



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra silničních staveb**

**Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za
studena**

Alternative additives and binders in cold technologies

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jakub Šedina

Doktorský studijní program: SI

Studijní obor: K

Školitel: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Praha, 2018



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jakub Šedina

Název disertační práce: Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za studena

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Ing. Petra Mondscheina, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

- TE01020168 Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)
- TA04031256, MACRec, Rozvoj mechanicky aktivovaných materiálů na bázi recyklovaného betonu pro progresivně stabilizované a za studena recyklované konstrukční vrstvy
- TA02030549 Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev
- Mezinárodní výzkumný projekt CoRePaSol (characterization of advanced cold recycling bitumen stabilized pavement solutions), pod záštitou Centre of European Directors of Roads (CEDR)
- TJ01000435 ConSlag - výzkum a ověření stavebních aplikací s vyšší přidanou hodnotou při využití ocelářenské strusky
- SGS17/059/OHK1/1T/11 Využití fluidních popílků v podkladních vrstvách vozovek
- SGS15/047/OHK1/1T/11 Aplikace cyklické triaxiální zkoušky na směsi podkladních vrstev vozovek
- SGS14/044/OHK1/1T/11 Experimentální ověření vlivu zlepšujících přísad na vybrané funkční charakteristiky hydraulicky stmelených vrstev
- SGS13/125/OHK1/2T/11 Experimentální hodnocení vybraných funkčních parametrů směsí recyklace za studena.
- SGS12/039/OHK1/1T/11 Návrhové parametry a vybrané funkční charakteristiky asfaltových směsí prováděných za studena
- SGS10/142/OHK1/2T/11 Experimentální návrhy a analýza chování stmelených směsí s uplatněním vedlejších produktů a alternativních pojiv v dopravním stavitelství

V Praze dne 20. 1. 2019

.....
podpis



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

**Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za
studena**

Alternative additives and binders in cold technologies

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jakub Šedina

Doktorský studijní program: SI

Studijní obor: K

Školitel: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Praha, 2018

Anotace

Současné sociálně ekonomické podmínky v evropské společnosti nahrávají prosazování dříve opomíjených témat jako je ochrana životního prostředí, recyklace odpadů a principy takzvaného bezodpadového hospodaření. Prosperita posledních let vede naši společnost k myšlenkám o vlivu lidské činnosti na životní prostředí nejenom po dobu našeho života, ale i v průběhu příštích generací, které do jisté míry ponесou zátěž našich rozhodnutí. Zejména na území vyspělých států pozorujeme zvýšený důraz na snížení emisí skleníkových plynů a dalších nežádoucích látek. Rovněž je kladen stále větší důraz na recyklaci materiálů a hledání cest pro využití stávajících odpadů. V rámci Evropské unie vedou tyto snahy k intenzivnímu zpříšňování evropské legislativy, která se dotýká prakticky všech odvětví současného průmyslu. Řada odvětví je tak nucena zavádět nové moderní technologie a daleko více řešit nakládání s odpady a jejich případnou zpětnou využitelnost.

Nejinak je tomu v silničním stavitelství, kde kromě legislativních procesů je motivací i omezená surovinová základna přírodních zdrojů, která přestává stačit současným požadavkům. Trendy posledních let tak směřují ke zpracovávání co největšího množství odpadů a jejich přeměně na takzvané druhotné materiály, které nalézají další využití. Stále více využíváme technologie pro recyklaci starých asfaltových vrstev, které díky recyklaci ať již za horka, nebo za studena naleznou nové uplatnění v konstrukci silničního tělesa. Znovuobjevujeme staré zapomenuté technologie, které v kombinaci s moderními postupy a materiály umožňují zpracování místních zemin v kvalitě, ve které to dříve nebylo možné. Vyvíjíme stále nové aplikace pro odprašky, odpady z lomů, betonové a jiné recykláty, odpady průmyslové výroby a energetiky, a další odpady s potenciálem využití v silničním stavitelství. Velmi často tak naleznou smysluplné uplatnění materiály, které byly dosud skládkovány nebo aplikovány pouze s mizivým využitím jejich skutečného potenciálu. Předkládaná práce reflektuje aktuální potřeby silničního stavitelství a zabývá se možnostmi aplikace alternativních pojiv a přísad pro technologie podloží vozovky a podkladních vrstev. Moderní přísady deklarují nové možnosti zpracování lokálních zemin a tato studie se zaměřuje na jejich využití v případě hydraulicky stmelěných vrstev. Studie se rovněž zabývá alternativními pojivy na bázi odpadních produktů z energetického a metalurgického průmyslu, jejich mechano-chemickou aktivací a následným využitím pro úpravu a stabilizaci zemin, případně v technologiích studené recyklace.

Anotation

Current socio-economic conditions in European society are in favour to think about previously neglected topics like environmental protection, waste recycling and circular economy. The prosperity of recent years has led our society to think about the impact of human activity on the environment, not only during our lifetime, but also during the next generations, which will deal with our present problems. Especially in western countries, we see increased emphasis on reducing greenhouse gas emissions and other undesirable substances. There is also an increasing effort to recycle materials and finding new way to reuse current waste. Within the European Union, these efforts are leading to an intensified tightening of European legislation that affects all sectors of the industry. Many industries must modernize their work processes, develop new technologies and must improve waste management. Otherwise, overall situation is same in road construction, where we are also motivated by limited resource base of natural resources, which ceases to meet current requirements. Trends of recent years have led to the processing of waste as much as possible and their conversion to secondary materials and their further use in pavement construction. We are using new modern recycling technologies for old asphalt and we have developed new applications in the pavement construction. We are rediscovering old forgotten technologies that, combined with modern processes and materials, enable using local soils in a quality that was not possible in previous time. We are developing new technologies for reusing dust, waste from quarries, concrete and other recyclables, industrial and power wastes and other wastes with potential in road construction. So often, these materials are finding new utilization, which is better than store these materials on a landfill or when they are applied without use of their real potential. The dissertation reflects actual necessities of road construction and deals with the possibilities of applying alternative binders and additives for road treatment technologies. Advanced ingredients promise new possibilities for the processing of local soils and this thesis focuses on their use in the case of hydraulically treated layers. The dissertation also deals with alternative binders based on waste products from energy and metallurgical industry, their mechano-chemical activation and utilization for soil treatment and stabilization, or cold recycling technologies.

Obsah

1. Úvod	11
2. Vrstvy prováděné za studena.....	13
2.1. Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy.....	13
2.2. Směsi z kameniva stmelené hydraulickými pojivy	15
2.3. Studená recyklace	16
2.3.1. Technologie.....	16
2.3.2. Pojiva.....	17
2.3.3. Technologie studené recyklace in situ.....	19
2.3.4. Uplatnění	20
2.3.5. Pozitiva technologie studených recyklací.....	21
2.3.6. Možná negativa technologie studených recyklací	22
2.3.7. Hodnotící nástroje	23
3. Vedlejší energetické a metalurgické produkty.....	25
3.1. VEP- Vedlejší energetické produkty.....	25
3.2. Rozdělení vedlejších produktů	26
3.3. Vedlejší produkty metalurgického průmyslu.....	27
3.4. Strusky	27
3.4.1. Vysokopeční struska.....	29
3.4.2. Ocelářská struska	33
3.4.3. Slévářská struska	38
3.4.4. Strusky energetického průmyslu.....	38
3.4.5. Škvára (struska ze spalování tuhých odpadů)	39
3.5. Fluidní spalování.....	42
3.5.1. Spalování na fluidní vrstvě (FBC).....	42
3.5.2. Odsíření pomocí vápna.....	43
3.5.3. Vedlejší produkty FBC.....	44
3.5.4. Současné využití vedlejších produktů FBCA.....	44
3.6. Posuzované FBCB	46
3.6.1. FBCB-TU a FBCB-TL Fluidní popílek Tisová úlet a lože.....	46
3.6.2. FBCB-LL - Fluidní popílek Ledvice lože	48
4. Přísady.....	49
4.1. Přísada P-T	49
4.2. P-U.....	51
4.3. P-P	51

4.4.	P-MgCl ₂	52
5.	Hydraulická pojiva	53
5.1.	Vápno.....	54
5.1.1.	Tuhnutí vápna	55
5.1.2.	Účinky vápna při úpravě zemin	55
5.2.	Cement	56
5.2.1.	Hydratace cementu	58
5.2.2.	Účinky cementu při úpravě zemin.....	59
5.3.	SP-D.....	59
6.	Alternativní pojiva	60
6.1.	Vysokorychlostní mletí	60
6.2.	Alkalická aktivace.....	62
6.3.	AP-D.....	63
6.4.	AP-S.....	64
6.5.	AP-SK	66
6.6.	AP-SO.....	67
6.7.	Mechanicky aktivovaný beton	69
7.	Použité materiály	70
7.1.	Zeminy	70
7.1.1.	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy (Z-S-F).....	71
7.1.2.	Jílovitý písek (Z-SC).....	73
7.1.3.	Písek hlinitý (Z-SM)	74
7.1.4.	Recyklovaná cementem upravená zemina (RCZ)	75
7.2.	Asfaltový recyklát	76
7.3.	Betonový recyklát (RB)	77
8.	Metodika posouzení, zkušební postupy.....	78
8.1.	Hutnění směsí	78
8.1.1.	Hutnění zemin	78
8.1.2.	Hutnění kameniva.....	79
8.1.3.	Hutnění těles pro technologii studené recyklace.....	79
8.2.	Zrání těles	83
8.2.1.	Zrání těles před zkouškou IBI a CBR	83
8.2.2.	Zrání těles - pevnostní parametry	83
8.3.	CBR IBI.....	84
8.4.	Pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě	85

8.5.	Bobtnání.....	86
8.6.	Pevnost v příčném tahu.....	86
8.7.	Monotónní triaxiální zkouška	87
9.	Experimentální činnost.....	90
9.1.	Posouzení hydrofobizačních přísad	90
9.1.1.	IBI, CBR (hydrofobizační přísady).....	90
9.1.2.	Pevnostní charakteristiky (hydrofobizační přísady).....	91
9.1.3.	Posouzení pomocí monotónní triaxiální zkoušky.....	95
9.1.4.	Shrnutí poznatků hydrofobizační přísady.....	96
9.2.	Přísada na bezprašnost.....	98
9.3.	Posouzení substituce zemin popílky	101
9.3.1.	Pevnostní parametry substituce recyklovaného materiálu.....	102
9.3.2.	Pevnostní parametry substituce přírodního materiálu	104
9.3.3.	Objemové změny	105
9.3.4.	Shrnutí.....	106
9.4.	Směsná pojiva.....	107
9.4.1.	Posouzení pojiv směsného pojiva SP-D - IBI, CBR	108
9.4.2.	Posouzení pojiva SP-D - Pevnostní parametry.....	108
9.4.3.	Posouzení pomocí monotónní triaxiální zkoušky.....	111
9.4.4.	Příklad využití v praxi.....	113
9.4.5.	Zhodnocení posouzení směsného pojiva SP-D.....	114
9.5.	Alternativní pojiva	114
9.5.1.	Alternativní pojivo na bázi fluidního popílku Plzeň (AP-D).....	115
9.5.2.	Pokusný úsek.....	119
9.5.3.	Závěr pojivo AP-D	120
9.5.4.	Alternativní pojivo na bázi fluidního popílku ČVUT (AP-S)	121
9.5.5.	Alternativní pojivo na bázi mikro-mletého betonu (AP-MB).....	126
9.5.6.	Alternativní pojiva na bázi strusky (AP-SO, AP-SK).....	129
9.5.7.	Alternativní pojiva – ekonomická a ekologická rozvaha	134
10.	Závěr	135
11.	Literatura.....	139

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma výroby pěnoasfaltu [Wirtgen 2010] (vlevo); stanovení optimálních parametrů asfaltové pěny (vpravo).....	18
Obrázek 2: Laboratorní sestava tvořená míchačkou a pěnojednotkou	18
Obrázek 3: Schéma výroby asfaltové emulze [Wirtgen 2010] (vlevo), výroba asfaltové emulze v laboratoři (vpravo).....	19
Obrázek 4: Postup recyklace za studena [Solařová 2007].....	20
Obrázek 5: Mechanizace pro pokládku technologií recyklace za studena	20
Obrázek 6: Schéma procesu výroby surového železa, oceli a strusky [Wang 2016].....	28
Obrázek 7: Vysoká pec [foto: http://www.pavelzubek.cz]	29
Obrázek 8: Využití vysokopeční strusky [Euroslag].....	32
Obrázek 9: Produkce a uplatnění strusek jako VEP [Euroslag].....	33
Obrázek 10: Odlévání strusky [foto: http://www.pavelzubek.cz].....	33
Obrázek 11: Produkce a uplatnění ocelářských strusek jako VEP [Euroslag]	37
Obrázek 12: Uplatnění ocelářských strusek jako VEP [Euroslag]	38
Obrázek 13: Pokusný úsek – využití strusek – Dánsko (Danish waste solutions)	40
Obrázek 14: Skladba vozovky - pokusný úsek Dánsko [Danish waste solutions]	41
Obrázek 15: Hloubka vyjeté koleje – pokusný úsek Dánsko [Danish waste solutions].....	41
Obrázek 16: Schéma fluidního spalování v uhelné elektrárně [skupina ČEZ] ...	44
Obrázek 17: FBCB-LL (vlevo nahoře); FBCB-TL (vpravo nahoře); FBCB-TU (vlevo dole); Popílek Mělník (vpravo dole).....	46
Obrázek 18: XRD analýza - FBCB-TU.....	47
Obrázek 19: Povrch ošetřený přísadou [Zydex industries 2014].....	50
Obrázek 20: Aplikace přísady P-T A) 0 %, B) 0,01 %, C) 0,1 %	51
Obrázek 21: Řez zrnem portlandského cementu [Taylor 1997]	57
Obrázek 22: Vysokorychlostní mlýn (vpravo); rozevřené mezikruží rotorů pro osazení mlecích elementů (vlevo) [Valentin 2016]	61
Obrázek 23: Deskový vysokorychlostní mlýn [Suda 2017].....	63
Obrázek 24: XRD analýza AP-D [Suda 2017]	64
Obrázek 25: Termická analýza - AP-S2 [Škvára 2018].....	65
Obrázek 26: XRD analýza – AP-S2 [Škvára 2018].....	66
Obrázek 27: XRD analýza – AP-SK [Hanzálek 2017]	66
Obrázek 28: XRD analýza – AP-SO [Hanzálek 2017].....	68
Obrázek 29: Klasifikace zemin- trojúhelníkový diagram [ČSN 73 6133].....	70
Obrázek 30: Klasifikace zemin- Casagrandeho diagram plasticity [ČSN 73 6133].....	71
Obrázek 31: Křivka zrnitosti Z-S-F.....	72
Obrázek 32: Stanovení optimální vlhkosti S-F.....	72
Obrázek 33: Křivka zrnitosti Z-SC.....	73
Obrázek 34: Stanovení optimální vlhkosti SC	74
Obrázek 35: Křivka zrnitosti- Z-SM.....	74

Obrázek 36: Stanovení optimální vlhkosti Z-SM.....	75
Obrázek 37: Stanovení optimální vlhkosti RCZ	76
Obrázek 38: Křivka zrnitosti- RB.....	77
Obrázek 39: Schéma hutního zařízení [TP208] (vlevo), statický lis (vpravo) .	80
Obrázek 40: Sestava pro měření CBR (vlevo); vzorek po zkoušce CBR (vpravo nahoře); příklad lineárního bobtnání (vpravo dole).....	85
Obrázek 41: Zkušební vzorek před zkoušením (vlevo) a po ukončení zkoušky (vpravo).....	87
Obrázek 42: Zatěžování zkušebního tělesa během zkoušky (vlevo), detail formy s gumovou membránou uvnitř (vpravo).....	89
Obrázek 43: CBR: Z-S-F, Z-SC + hydrofobizační přísady	91
Obrázek 44: Pevnost v tlaku: Z-S-F + hydrofobizační přísady	92
Obrázek 45: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-S-F + hydrofobizační přísady)....	92
Obrázek 46: Pevnost v tlaku: Z-SC + hydrofobizační přísady	93
Obrázek 47: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-SC + hydrofobizační přísady)....	93
Obrázek 48: Pevnost v tlaku: směsi zeminy a popílku ošetřené hydrofobizačními přísadami.....	95
Obrázek 49: Směs upravená P-T (vlevo), P-U (vpravo).....	96
Obrázek 50: Obalové křivky pro zeminy upravené hydrofobizačními přísadami	96
Obrázek 51: Aplikace přísady přímo do směsi - vzorky po zmrazovacích cyklech	99
Obrázek 52: Pevnost v tlaku: SC + MgCl ₂	100
Obrázek 53: Pevnost v tlaku: RSC + MgCl ₂	101
Obrázek 54: Pevnost v tlaku: směs částečně substituovaná fluidními popílky	103
Obrázek 55: Pevnost v tlaku: Z-SC v kombinaci s popínkem	105
Obrázek 56: Časový průběh bobtnání směsi s popínky	106
Obrázek 57: Únosnost upravených zemin: SP-D	108
Obrázek 58: Pevnost v tlaku: Z-S-F + SP-D.....	109
Obrázek 59: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-S-F + SP-D)	110
Obrázek 60: Pevnost v tlaku: Z-SC + SP-D.....	110
Obrázek 61: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-SC + SP-D).....	111
Obrázek 62: Směs ZC (3% cementu) Obrázek 63: Směs D (3% SP-D).....	112
Obrázek 64: Obalové křivky porovnání cementu a SP-D.....	112
Obrázek 65: Vzorek F8 CH po saturaci (vlevo) a následném vysušení (vpravo)	113
Obrázek 66: Zemina před úpravou (vlevo) a během úpravy (vpravo).....	114
Obrázek 67: CBR posouzení AP-D (zlepšení zemin)	116
Obrázek 68: Pevnost v příčném tahu: kombinace AP-D : cement (studená recyklace)	117
Obrázek 69: Pevnost v příčném tahu: AP-D 3:1 (Studená recyklace)	118
Obrázek 70: Pevnost v tlaku: AP-D 3:1 (studená recyklace).....	118
Obrázek 71: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (R-mat 0/11 + SP-D 3:1).....	119
Obrázek 73: Pevnost v tlaku: Z-SC + AP-S1.....	122
Obrázek 74: Vývoj pevnosti v tlaku v čase: Z-SC + AP-S1 (stmelení zemin) ..	122
Obrázek 75: CBR: Z-SM + AP-S (zlepšení zemin).....	123
Obrázek 76: Pevnost v příčném tahu: AP-S2 (studená recyklace).....	124

Obrázek 77: Pevnost v tlaku: AP-S2 (studená recyklace).....	125
Obrázek 78: Vývoj pevnosti v tlaku v čase AP-S2 (studená recyklace)	125
Obrázek 79: Pevnost v tlaku: AP-MB (SC).....	127
Obrázek 80: Pevnost v tlaku: AP-MB (studená recyklace).....	128
Obrázek 81: Pevnost v příčném tahu: AP-SO, AP-SK (studená recyklace)	129
Obrázek 82: Pevnost v tlaku: AP-SO, AP-SK (studená recyklace).....	130
Obrázek 83: Pevnost v příčném tahu: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace).....	131
Obrázek 84: Pevnost v tlaku: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace) ..	131
Obrázek 85: Tělesa po zmrazovacích cyklech (vlevo AP-SK, vpravo AP-SK+cement).....	132
Obrázek 86: Vývoj pevnosti v tlaku v čase: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace).....	132

Seznam tabulek

Tabulka 1: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa a jejich úpravy [ČSN 736133]	13
Tabulka 2: Vyhodnocení XRD analýzy FBCB-TU.....	47
Tabulka 3: Vyhodnocení XRD analýzy FBCB-LL.....	48
Tabulka 4: XRD analýza AP-D [Suda 2017].....	64
Tabulka 5: XRD analýza AP-SK [Hanzálek 2017].....	67
Tabulka 6: XRD analýza AP-SO [Hanzálek 2017].....	68
Tabulka 7: Parametry zkoušky proctor standard a proctor modifikovaný [ČSN EN 13286-2]	78
Tabulka 8: Rozměry forem proctor [ČSN EN 13286-2].....	79
Tabulka 9: Způsob výroby zkušebních těles ve vybraných zemích.....	81
Tabulka 10: Pevnostní parametry zemin upravených hydrofobizačními přísadami.....	91
Tabulka 11: Pevnostní parametry směsí zeminy a popílku ošetřené hydrofobizačními přísadami.....	94
Tabulka 12: Smykové parametry zemin upravených hydrofobizačními pojivy...	95
Tabulka 13: Složení směsí- P-MgCl ₂	98
Tabulka 14: Pevnostní parametry směsí SC ošetřených přísadou MgCl ₂	98
Tabulka 15: Pevnostní parametry směsí RSC ošetřených přísadou MgCl ₂	100
Tabulka 16: Optimální vlhkost a množství přidávaného pojiva pro směsi zemin a popílků	101
Tabulka 17: Pevnostní parametry směsí recyklované cementové stabilizace a popílků	102
Tabulka 18: Pevnostní parametry směsí písku jílovitého a popílků.....	104
Tabulka 19: Parametry IBI a CBR	108
Tabulka 20: Pevnostní parametry Z-S-F a Z-SC	109
Tabulka 21: Smykové parametry zemin stmelěných alternativními hydraulickými pojivy	111
Tabulka 22: Složení směsí- AP-S (zlepšení zemin).....	115
Tabulka 23: Složení směsí- kombinace AP-D : cement (studená recyklace) ..	116
Tabulka 24: Složení směsí- AP-D 3:1 (Studená recyklace).....	118
Tabulka 25: Složení směsí- pokusný úsek	119
Tabulka 26: Laboratorní posouzení směsí pro pokusný úsek	120
Tabulka 27: Laboratorní posouzení směsí pro pokusný úsek odebraných na pokládce	120
Tabulka 28: Složení směsí- Z-SC + APS1	121
Tabulka 29: Složení směsí- Z-SM + AP-S (zlepšení zemin).....	123
Tabulka 30: Složení směsí- AP-S2 (studená recyklace)	124
Tabulka 31: Složení směsí- SC + AP-MB	126
Tabulka 32: Složení směsí- RSC + AP-MB	127
Tabulka 33: Složení směsí- AP-SO, AP-SK (studená recyklace).....	129
Tabulka 34: Složení směsí- alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace)....	130

1. Úvod

Dnešní moderní trendy v silničním stavitelství nejsou již jen o dostatečné únosnosti vozovky, její pevnosti, případně životnosti, ale zaobírají se i otázkou, na kolik je její výstavba ekologická a samozřejmě ekonomická nejen v době výstavby, ale následně i z hlediska její údržby, případně pozdější recyklace. Stále více se mluví o moderních technologiích, které nám umožňují stoprocentně využít materiál, který se nachází v místě stavby, ať už jde o materiál z rekonstruovaných vrstev vozovky, nebo o zeminu v místě budované komunikace.

Z hlediska zlepšení zemin se již jako standardní berou vrstvy zlepšené, případně stabilizované hydraulickými pojivy, nejčastěji cementem nebo vápnem, případně jejich kombinací. V současné době již existují možnosti pro zpracování téměř jakéhokoliv typu zeminy, přesto tento cenný materiál mnohdy končí na deponiích a řízených skládkách. Velmi často se vyskytují případy, kdy je volena nevhodná technologie pro zpracování zemin, nebo v rámci projektového řízení je navržena úprava bez jakékoliv znalosti místních poměrů nebo geologického průzkumu. V lepším případě je problém odhalen během hutnění, kdy zeminy v podloží budované komunikace nelze pomocí zvolených technologií zpracovat, nebo mají velmi špatnou únosnost. V horším případě je nevhodný materiál zabudován do komunikace a tím výrazně přispívá k její rychlejší degradaci. Předkládaná práce se zabývá experimentálním ověřením zlepšujících přísad, které ovlivňují základní návrhové parametry upravované zeminy a to v případech, kdy je zemina navíc zlepšena, nebo stabilizována hydraulickými pojivy, zejména cementem. Podle výrobců jsou tyto přísady potenciálně vhodné pro neutralizaci nežádoucích chemických látek v zemině, díky svému složení ovlivňují samotnou hydrataci cementu a mění krystalickou mřížku výsledného produktu. Zemina stmelená za pomoci přísad sebou nese řadu výhod a její použití umožňuje zpracování prakticky jakéhokoliv typu zeminy. Tyto přísady přispívají ke zvýšení pevnostní charakteristiky hydraulicky stmelených vrstev, omezují vznik trhlin, zrychlují proces výstavby, snižují hloubku úpravy a počet pokládaných vrstev. Výsledná vrstva je díky nim zpravidla vysoce pevná a odolná vůči mrazu. Některé z těchto úprav dokonce za určitých podmínek umožňují redukovat počet vrstev v silničním souvrství a na hydraulicky stmelenou podkladní vrstvu již umístit pouze vrstvu obrusnou. Všechny tyto přínosy mají potenciál snížit ekologickou zátěž, prodloužit životnost úpravy a vykazují i nemalou ekonomickou úsporu. Modifikační přísady jsou v posledních letech předmětem zájmu odborné veřejnosti, zejména v rozvojových zemích, kde jejich aplikací chráníme jednoduché konstrukce vozovky před klimatickými jevy, zejména přívalovými dešti. Předkládaná práce se snaží využít deklarovaných vlastností pro potřeby silničního stavitelství v České republice se zaměřením na zlepšení podloží, případně stabilizaci zemin pro technologie podkladních vrstev. Popisuje posouzení jednotlivých přísad a jejich případný vliv na zlepšení zeminy, případně na proces hydratace hydraulických pojiv. Jelikož jde v České republice o dosud téměř nevyužívané technologie a nejsou zde dostatečné laboratorní ani praktické zkušenosti, poskytne práce základní poznatky o laboratorním chování takto

stmelených materiálů, na které v současnosti nepamatují technické předpisy ani české normy.

Předkládaná práce se z velké části zabývá také zpracováním odpadních produktů z energetického a metalurgického průmyslu, kdy je snahou využít latentně hydraulického charakteru těchto materiálů (fluidní popílků, popílků z klasického spalování, strusky). Pomocí procesu mechano-chemické aktivace dochází k přeměně těchto materiálů na alternativní hydraulická pojiva, která jsou zajímavou variantou k dnes běžně využívaným hydraulickým pojivům, zejména cementu. Práce je zaměřena na využívání popílků z fluidního spalování a starých ocelářenských a vysokopecních strusek. Tyto materiály jsou v lepším případě využívány jako náhrada přírodního kameniva nebo zeminy, například pro aplikace v protipovodňových hrázích, jako zásyp starých důlních děl a lomů, nebo pro tvorbu prefabrikovaných stavebních prvků. V tom horším případě končí tento materiál bez dalšího využití na skládce odpadů. Jen malé procento těchto materiálů je využíváno jako přísada do směsných cementů, či po dalším zpracování jako plnohodnotná náhrada současných hydraulických pojiv a hydraulických silničních pojiv. Práce je zaměřena jak na využití alternativních pojiv na bázi strusek a popílků, tak na samotné fluidní popílků v neupravené podobě a jejich uplatnění jako částečné substitute lokálních zemin s vyšší přidanou hodnotou. Cílem práce je nalézt vhodné uplatnění těchto odpadních produktů, a ověřit některé dílčí výzkumné aktivity na poli alternativních pojiv v technologiích silničního stavitelství.

Výše uvedené materiály jsou aplikovány do směsí zemin, v případě alternativních pojiv se nabízí i aplikace pro technologie studené recyklace. Jednotlivé cíle jsou prověřeny pomocí zkoušek předepsaných současnou legislativou, která za rozhodující pro posouzení zemin zlepšených hydraulickými pojivy požaduje zkoušky IBI a CBR. Z hlediska uplatnění materiálů v podkladních vrstvách jsou potom stěžejní pevnostní parametry, zejména pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě. V případě technologií studené recyklace potom technologické podmínky umožňují směs klasifikovat i pomocí pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě. Jelikož se jedná o materiály, které při styku s vodou mohou vykazovat výrazné objemové změny, je tento parametr sledován v rámci zraní těles před zkouškou CBR (lineární bobtnání). V případě fluidních popílků a jejich využití v neupravené formě jsou provedena i dlouhodobá sledování objemových změn. Sérii zkoušek doplňují i první poznatky z monotónní triaxiální zkoušky, která umožňuje lépe simulovat reálné prostředí a mohla by nám poskytnout relevantnější data o skutečném chování vrstvy ve vozovce.

2. Vrstvy prováděné za studena

V rámci silničního stavitelství rozlišujeme z hlediska technologie pokládky jednotlivých vrstev vrstvy prováděné za horka (zpravidla asfaltové vrstvy) a vrstvy prováděné za studena (technologie nestmelených vrstev, vrstev zlepšených, nebo stabilizovaných hydraulickými pojivy, technologie studené recyklace a další). V této práci se zaměřujeme zejména na technologie pro zlepšení (úpravu) podloží vozovky a technologie určené pro podkladní vrstvy vozovky, tedy vrstvy stabilizované (stmelené) hydraulickými pojivy. Předmětem zájmu předkládané práce je i progresivní technologie studené recyklace, která se pomalu stává účinným nástrojem při opravě vozovek.

2.1. Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy

Samotný proces úpravy zemin pomocí hydraulických pojiv je v České republice znám již od 60. let minulého století. V současnosti je úpravy využíváno zpravidla u zemin, které svými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi neodpovídají požadavkům na jejich zpracování v konstrukci vozovky, a je tedy nutné je nejdříve upravit, případně nahradit novým vhodnějším materiálem, přičemž náhrada materiálu bývá zpravidla ekonomicky a časově náročnější. Současná norma (ČSN 73 6133) rozlišuje, kterou zeminu je vhodné či nevhodné použít jako stavební materiál, kterou je nutné před použitím upravit, případně určuje, v kterých případech zeminu nelze využít jako stavební materiál (tabulka 1).

Podmínky použití	NEPOUŽITELNÉ ¹⁾ k jakémukoli použití	NEVHODNÉ k přímému použití bez úpravy	PODMÍNEČNĚ VHODNÉ k přímému použití bez úpravy	VHODNÉ k přímému použití bez úpravy
	Nelze upravit běžnými technologiemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit ³⁾	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než 6 % ²⁾ ,	ML, MI, CL, CI MH, MV, CH, CV,	S-F	SW, GW, G-F
Násyp	bahna, rašelina, humus, ornice, CE, ME	MH, MV, CH, CV,	MG, CG, MS, CS, SM, SC, GM, GC, GP, SP ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F S-F
1) Netýká se podloží násypu a svahů zářezu 2) Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2 3) Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu				

Tabulka 1: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa a jejich úpravy [ČSN 736133]

Se zvyšujícím se tlakem na recyklaci a zaváděním nových technologií, které umožňují zpracování i dříve nepoužitelných materiálů, stále více přistupujeme k využívání lokálních zemin dostupných v místě stavby. Stále častěji jsou tak zpracovávány i dříve nevyhovující zeminy. V kombinaci se zvýšenou poptávkou

po přírodním materiálu, kdy kamenolomy nestačí dodávat kamenivo v požadované kvalitě, je využití materiálů v místě stavby stále aktuálnější.

Technologie používané pro aplikace v zeminách je přitom z hlediska aktuálních předpisů poměrně složité správně pojmenovat. V současné době jsou tyto technologie popsány řadou norem, technologických podmínek, nebo technických kvalitativních podmínek a nacházíme zde termíny jako zeminy upravené, zeminy stmelené, případně zeminy stabilizované. Současně dochází k slučování jednotlivých předpisů a vydávání nových norem, což ještě více komplikuje orientaci ve správném názvosloví a pojmenování jednotlivých technologií. V minulosti bylo nejednoznačné terminologie použito i v evropských normách ČSN EN 14 227 - (10-14), kdy se označení technologií v jednotlivých normách lišilo a pro některá pojiva bylo pojmenování omezeno na označení: „zemina upravená pojivem“. Současná norma ČSN EN 14 227-15 sice zavádí jednotné označení pro zeminy:

- **zeminy stabilizované hydraulickými pojivy** (*hydraulically stabilized soil*) *stabilizovaná směs zeminy a vody, která tuhne a tvrdne hydraulickou reakcí,*

nicméně implementace do ostatních národních předpisů dosud neproběhla. Termín je navíc společný jak pro technologie zlepšení podloží, tak pro podkladní vrstvy. V současné době tak neexistuje ucelený předpis, který by tyto pojmy souhrnně a jasně vymezoval a současné předpisy (ČSN 73 6133, ČSN 73 6244, TP 94, TKP 4 a jiné) používají obecného termínu „úprava zemin“ aniž by specifikovaly konkrétní technologii použití. Všeobecné vžití termínu úprava zemin má pravděpodobně původ v příliš obecném pojetí terminologie původní řady norem ČSN EN 14227- (12-14), kde byl tento termín uváděn jako jediný přípustný popis pro technologie využívající pro úpravu zemin strusku, hydraulická silniční pojiva a popílky.

- **zemina upravená (struskou...)** (*soil treated with ...*) *směs zeminy, pojiva, dalších vstupních materiálů a vody, která tuhne a tvrdne hydraulickou reakcí*

Z hlediska rozlišení použitých technologií byla v tomto ohledu nejjednoznačnější dnes již neplatná norma ČSN EN 14 227-10 (případně 11), která rozlišovala jednotlivé technologie

- **zemina upravená cementem** (*soil treated by cement*) *směs vzniklá přidáním cementu a kde je to vhodné, dalších vstupních materiálů, do zeminy*
- **zemina stabilizovaná cementem** (*cement stabilized soil*) *směs zeminy nebo kameniva, cementu jako pojiva a pokud je to vhodné, dalších vstupních materiál, která je navržena tak, aby se dosáhlo únosnosti měřené zkouškou kalifornského poměru únosnosti*

- ***zemina stmelená cementem (cement bound soil)***
směs zeminy nebo kameniva, cementu jako pojiva a pokud je to vhodné, dalších vstupních materiál, která je navržena tak, aby se dosáhlo soudržnosti přímo měřitelné pomocí pevnosti v tlaku nebo pevnosti v tahu a modulu pružnosti

Nová norma ČSN EN 14227-15, tedy poměrně stroze nahrazuje definice uváděné v předchozí řadě norem ČSN EN 14227. Sloučením tak zaniká předchozí rozdělení, které se ovšem stále částečně užívá v řadě dalších předpisů, které nebyly dosud aktualizovány.

Více jasno by mělo být po zavedení připravované normy TIN prEN 16907-4 *Zemní práce - Část 4: Úprava zemin vápnem a/nebo hydraulickými pojivy*, která pro rozlišení dle jednotlivých technologií znovu zavádí termíny úprava zemin, zlepšení zemin a stabilizace zemin. V připravovaném návrhu je formulována *úprava zemin*, která zahrnuje obě technologie *zlepšení* i *stabilizaci zemin*. Zlepšením zeminy se mimo jiné rozumí úprava jejích fyzikálních vlastností za účelem lepší zpracovatelnosti a zlepšení únosnosti, tedy požadavky související s podložím vozovky. Stabilizace zemin je v připravované normě pospána jako středně až dlouhodobý proces, při kterém směs zeminy, pojiva a vody výrazně mění vlastnosti zemin, které je učiní stabilní s důrazem na odolnost proti mrazu a vodě [Havelka 2018], tedy požadavky typické pro stmelené materiály využívané v podkladních vrstvách vozovky. Nové rozdělení by tak konečně mohlo podat ucelený náhled na použití zemin a hydraulických pojiv a napravit tak stav, který byl způsoben sloučením norem ČSN EN 14 227- (10 - 14). Na druhou stranu zavedení TIN prEN 16907- 4 opět mění klasifikaci posuzovaných směsí, kdy místo tříd pevnosti zavádí pevnostní kategorie, přičemž ne všechny korelují se současnými předpisy. Po mnoha letech tak opět dojde ke změně zařazení, stejně tak jako tomu bylo například v prvním kole nahrazování starých ČSN 73 6125 „Stavba vozovek. Stabilizované podklady“ evropskými normami řady ČSN EN 14227.

2.2. Směsi z kameniva stmelené hydraulickými pojivy

Stejně jako v případě zemin je technologie zaměřená na směsi z kameniva stmelené cementem známa a používána již řadu let. Stejně tak je i zde rozpor v jednotlivých předpisech, jak směsi obecně značené jako SC nazývat a značit. Obecně je stále používán jak odbornou veřejností, tak v praxi i v některých předpisech pojem KSC, který daleko lépe vystihoval podstatu směsi, tedy že se jedná o kamenivo zpevněné cementem. Současné označení SC doplněné třídou pevnosti je shodné jak pro stabilizované zemin, tak pro kamenivo stmelené hydraulickým pojivem a z názvu tak není na první pohled jasné, o jaký materiál se ve skutečnosti jedná. Krok správný co se pevnostních parametrů týká, oba materiály by měly splňovat stejné podmínky, nicméně z hlediska rozlišení zemin a kameniva je toto označení nejednoznačné. Ve stavební praxi se tak běžně setkáváme s výrazem KSC. Z hlediska předpisů se směsmi kameniva stmelených hydraulickými pojivy zabývají technické kvalitativní podmínky TKP 5, normy ČSN 73 6124 a především rada norem ČSN EN 14 227-(1-5),

kteřá pŕedepisuje požadavky pro jednotlivé typy hydraulických pojiv, jejich posouzení a zařídění. I zde při pŕechodu na evropské normy došlo k řadě rozbrojů a zmatků z hlediska správného stanovení pevnostních tříd a jednotlivých požadavků, kdy evropské normy jsou v některých případech oproti starým národním pŕepisům poměrně benevolentní.

2.3. Studená recyklace

Téma zpracování místních zdrojů je poměrně často diskutovanou problematikou a poslední dobou se stává plnohodnotnou součástí moderního stavitelství. V rámci Evropské unie je kladen důraz na co nejvyšší recyklovatelnost materiálů uložených v místě stavby a s tím související snížení nákladů a vlivu na životní prostředí. V České republice se ročně vybourá cca 1,8 miliónu tun asfaltového materiálu [EAPA 2016]. Z toho je zpětně využíváno cca 30 % pomocí technologie studené recyklace, 17 % recyklace za horka, 20 % do nestmelených vrstev a celých 23 % je zahrnuto pod společnou položku skládkování, jiné využití, neznámé. Cca 0,4 mil. tun materiálu tak pravděpodobně zůstává využito neefektivně, nebo je skládkováno. Odpadová politika Evropské unie si pŕitom klade za cíl zvýšit recyklovatelnost stavebních a demoličních odpadů v následujících letech na maximum. S tím souvisí i podpora a rozvoj nových moderních technologií, mezi které rozhodně patří recyklace asfaltových materiálů, ať již za horka, nebo za studena. Pro širší využití technologií studené recyklace hovoří i současný stav silniční sítě v České republice, který je stále znepokojivý. I pŕes narůstající snahu tento stav zlepšit je kvalita a provozuschopnost silniční sítě stále na velmi špatné úrovni. Svůj podíl na tom měla finanční krize, kdy se roky snižovaly výdaje státu na stavbu a rekonstrukci silnic a dálnic. Částečně také problém vznikl pŕevezením části silniční infrastruktury pod krajskou správu, kdy kraje nedostaly, nebo nechtěly vynakládat odpovídající finanční prostředky na údržbu. V mnoha případech tak byly voleny levnější technologie, nebo nedocházelo k opravám v požadovaném rozsahu. Stále se tak setkáváme s takzvaným záplatováním, které je na jednu stranu velmi rychlé a poměrně levné, na stranu druhou tento typ opravy nevykazuje pŕíliš dlouhou životnost. Není neobvyklé, že chybí jakákoli diagnostika opravované vozovky, na jejímž základě by došlo k volbě ideální technologie a stanovení rozsahu oprav. Velmi často se tak opravuje pouze důsledek, ale pŕičína poruchy není odstraněna. Oprava pomocí technologií studené recyklace je pŕitom komplexním nástrojem s dlouhou životností a umožňuje opravy vozovek vykazujících celou řadu poruch.

2.3.1. Technologie

Studená recyklace je efektivní technologií pro rekonstrukci stávajících pozemních komunikací. Historie této úpravy se datuje do poloviny osmdesátých let minulého století, kdy byly v USA provedeny první úpravy touto technologií. V České republice je technologie studených recyklací aplikována zhruba 20 let. Oproti klasické opravě, kdy dochází k výměně konstrukčních vrstev opravované vozovky, vykazuje nemalé finanční úspory, rychlou opravu a celkové snížení zátěže životního prostředí. Hlavním pŕínosem této technologie je využití stávajícího materiálu uloženého ve vozovce, s čímž souvisí další výhody.

Z hlediska samotné technologie rozlišujeme studenou recyklaci na místě a v míchacím centru. Recyklace v míchacím centru je *technologický proces zhotovení recyklované vrstvy převážně z recyklovaného kameniva, které se před dovezením na stavbu upravuje mícháním v centru* [TP 208]. Zcela zásadní je zde přesun materiálu do míchacího centra ani ne tak z hlediska samotné přepravy materiálu, jako z hlediska pohledu platné legislativy na tento proces. V současné době je odvezený materiál z místa stavby považován za odpad a je nutné takto s tím nakládati, nebo je potřeba provést a deklarovat celou řadu testů a to i v případech, kdy je materiál určen ke zpětnému uložení do komunikace. Oproti tomu recyklace za studena na místě je *technologický proces, při kterém se zhotoví recyklovaná vrstva rozpojením a úpravou staré vrstvy recyklačním zařízením přímo na místě za studena* [TP 208]. V tomto případě umožňuje současná legislativa materiál použít pouze s minimálními požadavky na jeho posouzení a de facto ho považuje za druhotnou surovinu. Tento zdánlivě nesmyslný fakt komplikuje širší využití asfaltového R-materiálu ve stavební praxi a celou řadu let je vyvíjen tlak na změnu současných předpisů a podmínek recyklace asfaltového R-materiálu mimo místo jeho původního uložení.

2.3.2. Pojiva

Technologie studené recyklace primárně využívá pro stmelení směsí tři typy pojiv: hydraulická pojiva, asfaltová emulze, případně asfaltová pěna. V ČR je, díky jednoduchosti technologie a nenáročnosti na mechanizaci, nejvíce zastoupena varianta zpracování recyklovaného materiálu pomocí hydraulických pojiv, případně pomocí kombinace hydraulických pojiv a pěnoasfaltu. Technologie založené na asfaltových emulzích se u nás v posledních letech prakticky nepoužívají, jelikož jsou ekonomicky náročnější.

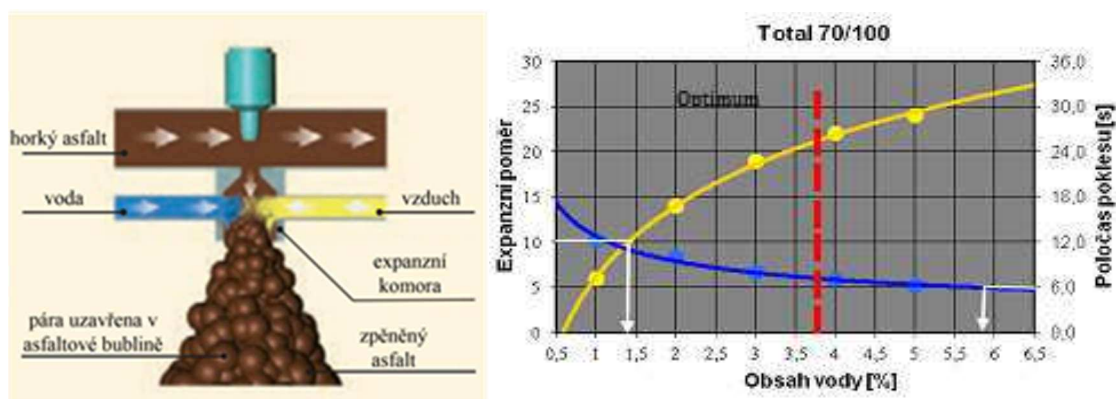
Hydraulická pojiva

Z hlediska hydraulických pojiv je nejčastěji používán běžný portlandský cement popsáný v kapitole 5.2. Dávkování je obvykle voleno v rozmezí 2 – 6 % recyklované směsi, kdy je cement dávkován na povrch vozovky před samotnou recyklací a následně promísen s podkladovým materiálem za použití recykléru. V případě nepříznivých klimatických podmínek je dávkování možné i pomocí speciálně konstruovaného míchacího zařízení, kde je cement smíchán s vodou, případně dalšími přísadami. Vzniká tak cementová suspenze, která je dávkována do směřovací komory. Tímto krokem je zaručeno přesné dávkování cementu a eliminuje se jakákoliv ztráta cementu v důsledku klimatických podmínek (nemůže dojít k odvátí větrem, jako v předchozím případě).

Asfaltová pěna (Pěnoasfalt)

Pěnoasfalt, nebo též zpěněný asfalt, je směs asfaltu, vody a vzduchu. Do rozehrátého asfaltového pojiva (170 - 190 °C) je vstříkováno malé množství vody (2 - 5 % hm. asfaltu), které se při styku s horkým asfaltem mění ve vodní páru a dochází k samovolnému napěnění asfaltu. Zpěněný asfalt je okamžitě vstříkován do mísící komory recykléru a promíchán s recyklovaným materiálem. Pro výrobu pěnoasfaltu je nejčastěji používán asfalt gradace 50/70 až 160/220. Kvalita asfaltové pěny se hodnotí dvěma parametry: expanzní poměr

(min. 8 - 15) a poločas poklesu (8 - 15 s), kdy je laboratorně stanoveno množství přidané vody pro optimální napěnění asfaltového pojiva. Oba uvedené parametry jsou do značné míry závislé na druhu a původu asfaltového pojiva, na teplotě horkého asfaltového pojiva, jakož i na množství přidávaného stlačeného vzduchu a tlaku, kterým je voda do horkého asfaltového pojiva vstřikovávána. Intenzita a účinnost efektu napěnění může být ovlivněna regulací základních fyzikálních podmínek, jako je teplota, vlhkost a tlak.



Obrázek 1: Schéma výroby pěnoasfaltu [Wirtgen 2010] (vlevo);
stanovení optimálních parametrů asfaltové pěny (vpravo)

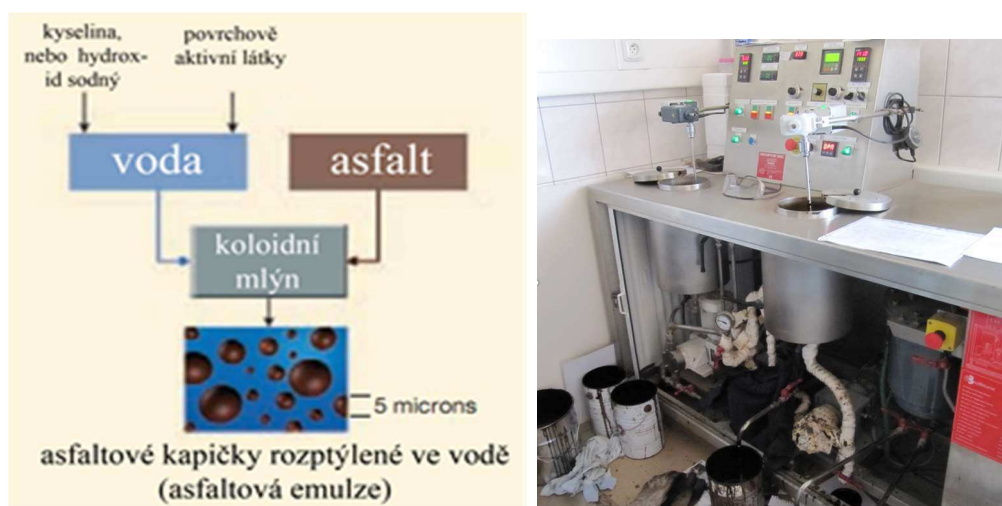
V případě směsí prezentovaných v této práci bylo množství zpěňující vody stanoveno dle manuálu [Wirtgen 2010] tak, aby byla dosažena optimální kombinace maximálního expanzního poměru a zároveň nejdelšího dosažitelného poločasu usazení pěny. Předepsané minimální hodnoty expanzního poměru a poločasu poklesu jsou pro míchání asfaltové pěny s kamenivem o teplotě v rozmezí 10 – 25 °C následující: expanzní poměr $ER \geq 10$ a poločas poklesu $\tau_{1/2} \geq 6$ [Iwański 2013]. Hodnota optimálního množství vody vstřikované do asfaltové pěny leží uprostřed tohoto intervalu, v případě použitého asfaltu 70/100 Total bylo stanoveno 3,8 % (viz obrázek 1). Takto napěněný asfalt je při výrobě laboratorních vzorků ihned dávkován do dvouhřídelové míchačky s nuceným mícháním Wirtgen WLM 30.



Obrázek 2: Laboratorní sestava tvořená míchačkou a pěnojednotkou

Asfaltová emulze

Asfaltová emulze je disperzní systém typu Voda/Olej/Voda dvou navzájem v sobě nerozpustných kapalin. Částičky asfaltu jsou za pomoci koloidního mlýnu a emulgátoru rozptýlené ve vodě. Emulgátor částičky asfaltu obaluje a tím mění elektrostatické povrchové napětí, čímž je výrazně zpomaleno shlukování a stékání asfaltových částiček a je tak zaručena tekutost výsledné směsi. Z hlediska využití asfaltových emulzí v silničním stavitelství byl velkým krokem kupředu vývoj kationaktivní asfaltové emulze, která je vhodná pro většinu typů kameniva zpracovávaného v ČR a dnes tvoří naprostou většinu používaných asfaltových emulzí. Pro potřeby studené recyklace se používají pomaluštěpné kationaktivní asfaltové emulze typu C60B7, C65B7, či pro částečnou recyklaci C60BP7 nebo C65BP7 podle ČSN EN 13808. V současné době je považováno použití emulzí v technologiích studené recyklace za neekonomické, zejména díky nárůstu cen vstupních zdrojů. Při využití technologií studené recyklace v praxi se tak v posledních cca třech letech uplatňují spíše technologie založené na hydraulickém pojivu, případně v kombinaci hydraulického pojiva a pěnoasfaltu.



Obrázek 3: Schéma výroby asfaltové emulze [Wirtgen 2010] (vlevo), výroba asfaltové emulze v laboratoři (vpravo)

2.3.3. Technologie studené recyklace in situ

Při studené recyklaci dochází ke znovuvyužití stávajících asfaltových vrstev, které jsou vybourány a zpětně použity v nové komunikaci, nejčastěji v podkladních vrstvách. Nejprve dochází k rozpojování stávajících vrstev komunikací pomocí frézovacího bubnu, čímž vzniká základní směs, R-materiál. Tato směs je dále roztříděna, podrcena a následně promíchána s hydraulickým pojivem, asfaltovou pěnou, nebo asfaltovou emulzí, případně s kombinací hydraulického pojiva a asfaltové pěny, nebo asfaltové emulze. Takto vzniklá směs je pomocí rozdělovacího šneku rozprostřena, následně předhutněna pěchovadlem a uhlazena lištou, případně položena finišerem. Na závěr úpravy dochází k dohutnění položené vrstvy pomocí válců. Na následující obrázku vidíme příklad technologie studené recyklace, schéma takzvaného recyklačního vlaku. Nejprve fréza vyfrézuje stávající vrstvu, následně vyfrézovaný materiál putuje do stroje CRMX 2, který takto získaný materiál roztřídí, podrtí a promíchá s vhodně zvoleným pojivem, případně přidá další přísady. Takto vzniklá směs je poté dávkována do finišeru, který položí novou vrstvu.



Obrázek 4: Postup recyklace za studena [Solařová 2007]

V současné době jsou již na trhu speciální stroje určené pro studenou recyklaci, které spojují proces frézování, drcení, míchání s pojivy a hutnění v rámci jediné mechanizace. Odpadá tak nutnost dopravovat na místo soustavu strojů.



Obrázek 5: Mechanizace pro pokládku technologií recyklace za studena

2.3.4. Uplatnění

Technologie studených recyklací in situ je primárně určena pro opravy pozemních komunikací. Nejčastěji je recyklovaná vrstva navržena jako podkladní, případně jako ložní u silnic nižších tříd. Jiné užití prozatím současná legislativa neumožňuje, z hlediska technologie však neexistují překážky pro uplatnění této technologie i v ostatních konstrukčních vrstvách vozovky, případně u silnic vyšších tříd. Technologie studených recyklací in situ je vhodnou opravou pro vozovky vykazující následující poruchy: plošná deformace vozovky, olamování okrajů, místní poklesy, křížové trhliny, nepravidelné hrboly, hloubková koroze, výtluky. Mnohdy jde o poruchy vznikající v nižších konstrukčních vrstvách vozovky, kde pouhá výměna krytu není dostačující. Technologie studených

recyklací je komplexním nástrojem pro efektivní opravu tako deformovaných vozovek a v kombinaci s účelnou diagnostikou je jednou z moderních technologií zaručující kvalitní opravu s dlouhou životností.

2.3.5. Pozitiva technologie studených recyklací

Nespornou výhodou je zabudování stávajícího materiálu ve vozovce, který je zdrojem kvalitní a cenné suroviny pro budoucí komunikaci. Od tohoto faktu se odvíjí celá řada výhod. Z ekologického hlediska je použit materiál, který by se jinak stal odpadem a musel by být uložen na skládku, i touto cestou se dostane nového využití v opravené vrstvě. Jelikož zde nachází uplatnění recyklovaný materiál, je úspora neobnovitelných zdrojů naprosto zřejmá. S využitím stávajícího materiálu je spojen i snížený přesun hmot, a tím minimalizována doprava jak starého materiálu z komunikace na skládky, tak přesun nového materiálu, jak by tomu bylo u klasického způsobu opravy. Minimalizace počtu pojezdů těžkých nákladních vozidel sebou nese kromě ekonomických a ekologických výhod i řadu příznivých aspektů z hlediska vnímání realizace stavby veřejností. Je sníženo zatížení komunikační sítě v okolí stavby, rovněž jsou minimalizovány negativní vlivy těžké nákladní dopravy na okolí stavby, jako je hluk, vibrace, zvýšená prašnost a další. Celkově je stavba veřejností snášena daleko lépe a odpadají také dodatečné náklady na sanace spojené s pojezdy těžkých nákladních vozidel.

Jednoduchost a nenáročnost této technologie výrazně přispívá ke snížení finančních nákladů na tuto technologii. Úspora nákladů se pohybuje okolo 40 – 50 % oproti konvenčním způsobům opravy vozovek.

Vrstva z recyklovaného materiálu je plně funkční a kvalitou srovnatelná s novou komunikací. Tato úprava prodlužuje životnost celé komunikace o 15 – 20 let. Oproti opravě prováděné pouze oživením živичné vrstvy dochází ke zpevnění podloží, kde velmi často vzniká příčina porušení komunikace. Pro tuto úpravu hovoří i legislativní nenáročnosti, jelikož jde de facto o opravu stávající komunikace, není nutné k této úpravě žádat o stavební povolení.

Dochází ke snížení pracovních teplot oproti konvenčním způsobům opravy, které je způsobeno nižší energetickou náročností, odpadá ohřev materiálů, redukuje se spotřeba fosilních paliv a s tím klesá i produkce vypouštěných emisí.

Rychlost, s níž je provedena pokládka recyklované vrstvy, opět nahrává ke zlevnění celé úpravy a ke snížení vlivu na okolní prostředí. Vývoj strojové pokládky v posledních letech gradoval, dnešní moderní stroje nemají problém položit jeden až dva kilometry denně v závislosti na šířce pokládky a hloubce frézování. Po týdnu lze na recyklovanou vrstvu pustit stavební stroje, které položí obrusnou vrstvu, kterou je možno okamžitě po zhutnění pojíždět (recyklace kde jsou použita hydraulická pojiva).

Technologie studené recyklace in situ částečně umožňuje souběžnou dopravu na opravované komunikaci, není tedy nutná úplná uzavírka opravované komunikace.

Původní kamenivo v místě stavby muselo při budování původních vrstev vozovky splňovat určité parametry. Proto se při jeho recyklaci již nepožaduje prokazování některých vlastností jako tvarový index, odolnost proti drcení, obsah celkové síry a odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Toto ale neplatí, pokud recyklované kamenivo pochází z jiných zdrojů nebo jeho původ není znám.

Jednou z možných výhod je i takzvaný pasivační účinek asfaltové emulze, který obaluje minerální složku směsi a tím zabraňuje unikání nebezpečných látek do okolí. Tuto výhodu ocení zhotovitel u R-materiálu, který obsahuje dehet. Jelikož recyklace probíhá v místě stavby, nedochází tedy k přesunu materiálů obsahujících dehet, a tím se nenaplní podmínky, které by zhotoviteli nařizovaly klasifikovat tento materiál jako nebezpečný odpad. Studená recyklace in situ je tak účelným prostředkem pro znovu zabudování materiálů s obsahem dehtu, který by se jinak z hlediska zákona musel klasifikovat jako nebezpečný odpad a muselo by s ním být takto nakládáno.

Technologie in situ je vhodná pro reprofilaci příčného řezu a její přínos byl prokázán i při rozšiřování komunikace.

2.3.6. Možná negativa technologie studených recyklací

Směsi stmelené za studena vyžadují při svém zpracování vyšší hutnící sílu oproti směsím zpracovávaným za horka. Zde narážíme na jeden z problémů v českém prostředí, kdy ne všechny firmy disponují těmito hutnícími prostředky, přičemž cena potřebných strojů není nejmenší. Samotné stroje určené pro studenou recyklaci (recyklery, finišery) jsou poměrně objemná zařízení, manipulace s nimi je tedy velice komplikovaná a poměrně nákladná, v případě velkých recyklerů je dokonce nutné před transportem žádat o speciální povolení ministerstvo dopravy. Tento fakt zamezuje využití této technologie u staveb malého rozsahu, kdy by se zhotoviteli nevyplatilo složitě a nákladně transportovat recyklační jednotku do místa stavby.

Velmi často také dochází k využití několika technologií naráz. Technologie studených recyklací je nejčastěji uplatňována v podkladních vrstvách komunikace. Ložní a obrusná vrstva je oproti tomu tvořena směsmi za horka. Na stavbu je tedy nutné dopravit stroje jak pro technologii studené recyklace, tak pro technologii směsí prováděných za horka.

Je velmi obtížné zaručit homogenitu R-materiálu zabudovaného ve vozovce. Nově položená vrstva tak může z hlediska materiálového složení vykazovat stejné anomálie jako předchozí komunikace. Složení nové směsi je tak nutné navrhnout s ohledem na tuto skutečnost.

Jedním z problémů v ČR byla a stále ještě je relativní nezkušenost s touto technologií z hlediska zkoumání jejího chování. Technické podmínky týkající se technologie studených recyklací požadují pro návrh recyklované vrstvy omezené množství parametrů, kdy jsou vyžadovány pouze pevnosti v příčném tahu a odolnost směsi proti vodě. Otázkou zůstává, nakolik jsou tyto parametry dostačující a zda by nebylo vhodné technické podmínky rozšířit o další zkoušky, které by lépe charakterizovaly chování recyklované vrstvy v praxi.

Problematickou by se mohla zdát i technologická pauza cca 7 - 10 dní u směsí stmelených cementem. Pauza je dána technologií použití cementu, kdy je v závislosti na množství přidaného cementu určena doba, kdy dojde k dostatečnému vytvrzení vrstvy tak, aby na ni mohla být vpuštěna staveništní doprava. Po uplynutí technologické pauzy je vozovka opatřena ložní a obrusnou vrstvou. V případě aplikace asfaltových vrstev lze komunikaci velmi rychle předat do užívání.

Nutnost technologické kázně. Další možnou nevýhodou z hlediska provádění je jednoduchost a nízké náklady technologie, které mohou u zhotovitelů vést k nedostatečné pečlivosti, ačkoliv tato technologie vyžaduje stejnou technickou kázeň a odborný dohled jako jakákoliv jiná asfaltová technologie.

Prozatím, z hlediska českých předpisů, nelze ve stavebnictví plně využít potenciál technologie studených recyklací. Částečně s tím souvisí i nedostatečné odborné zkušenosti a absence právního zázemí. Tyto úpravy je v současné době možné použít pouze jako podkladní vrstvu rekonstruované vozovky, případně jako ložní vrstvu na silnicích nižších tříd. Technologicky by však neměl být problém pro použití vrstvy z recyklovaného materiálu i v ostatních konstrukčních vrstvách vozovky.

Teoretickým negativem je i bující byrokracie, kdy jsou v současné době asfaltové vrstvy považovány za odpad a pro jejich opětovné použití mimo místo, kde byli získány, je potřeba prokázat vybrané vlastnosti a jejich zdravotní nezávadnost. Je tedy výrazně zpřísněno využití vybouraných asfaltových vrstev jinde než v místě stavby. To by se mělo změnit v roce 2019, kdy by měla vyjít vyhláška k asfaltovému odpadu, která by měla materiál zařadit nikoliv jako odpad, ale jako vedlejší produkt. V současné době je návrh v připomínkovém řízení (10/2018). Zda v budoucnu dojde k další novelizaci a případnému zpřísnění, nelze vyloučit, jelikož limity nebezpečných chemických prvků a částic obsažených v odpadech jsou dlouhodobě předmětem řady sporů.

Jedním z velkých problémů, s kterým se všeobecně potýkají technologie recyklace, byla a je nedůvěra v recyklované materiály. Mnohdy jsou tak technologie recyklace, ať již za horka či za studena, neoprávněně zatracovány a stále se velmi často přistupuje ke konvenčním typům oprav, ačkoliv oprava s využitím stávajících materiálů nabízí efektivní a cenově srovnatelné, nebo dokonce výhodnější řešení.

2.3.7. Hodnotící nástroje

V dnešní době sílí tlaky na snižování emisí vypouštěných do ovzduší během výstavby vozovek. Pomalu se začínají tyto požadavky objevovat i v zadáních jednotlivých zakázek v západní Evropě, například ve Francii. Aby bylo možno těmto požadavkům vyhovět, je třeba dostatečně prokázat a potvrdit, nakolik samotná výstavba a použité technologie ovlivňují životní prostředí. Nejen ve světě, ale i u nás začínají vznikat projekty na klasifikaci jednotlivých vlivů výstavby na životní prostředí. V prostředí naší fakulty vznikla hodnotící aplikace, která by měla objektivně zhodnotit jak finanční, tak ekologickou výhodnost jednotlivých technologií při recyklaci vozovek. V současnosti je aplikace

zaměřena na hodnocení studených recyklací, kdy porovnává tuto technologii s klasickou výměnou krytu. V rámci aplikace můžeme volit mezi jednotlivými sestavami strojů použitými pro opravu, případně lze navolit i jednotlivé stroje. Do budoucna má tento program obsáhnout další technologie oprav vozovky, a tak podat globálnější představu o výhodnosti jednotlivých technologií. Z ekonomického hlediska by měl program stanovit finanční náročnost úpravy nejen při výstavbě, ale po celou dobu životního cyklu vozovky.

V zahraničí se touto problematikou dlouhodobě zabývají například ve Velké Británii. Britský nástroj asPECT (asphalt Pavement Embodied Carbon Tool) v současnosti dostatečně postihuje jednotlivé technologie a přiřazuje k nim odpovídající zátěž na životní prostředí vyjádřenou množstvím vyprodukovaného CO₂ a dalších skleníkových plynů na tunu směsi. Nástroj nepostihuje jen proces výstavby, ale jde daleko více do hloubky. Do výpočtu zahrnuje vše od získání surovin, jejich zpracování, pokládku vozovky, její údržbu a zabývá se i otázkou, co s vozovkou bude na konci její životnosti. Z hlediska recyklovaných vrstev nástroj zohledňuje prakticky nulovou produkci CO₂ a skleníkových plynů až do doby výstavby, spojenou s absencí získávání a transportem nových surovin.

Dalším projektem, který se zabývá problematikou uhlíkové stopy, je projekt evropské unie s názvem CEREAL (CO₂ Emission REduction in roAd Lifecycles). Program CEREAL vychází z mnoha nástrojů vyvíjených v EU, přičemž se snaží přebírat pozitiva a odstranit negativa jednotlivých hodnotících projektů vyvinutých ve státech evropské unie. Projekt si klade za cíl snížení produkce CO₂ a ostatních skleníkových plynů při výstavbě pozemních komunikací. V současnosti se na projektu stále pracuje.

Současná politika EU stále více směřuje k takzvaným zeleným technologiím, které co nejméně zatěžují naši planetu. Z hlediska silničního stavebnictví může takovým nástrojem být i technologie studené recyklace a nástroje hodnocení environmentálních aspektů stavby se tak do budoucna stanou jedním z určujících parametrů pro výběr zhotovitele stavby.

3. Vedlejší energetické a metalurgické produkty

Problematika zpracování vedlejších produktů energetického (VEP) a metalurgického průmyslu je aktuálním tématem. S vývojem produkce logicky souvisí nárůst množství odpadů, pro které hledáme dalšího využití. Z hlediska silničních staveb, můžou odpadní produkty z energetického a metalurgického průmyslu nalézt uplatnění jako náhrada přírodního materiálu, případně lze pomocí nových technologií tyto produkty dále upravovat na hydraulická pojiva. Aplikace těchto produktů v minulosti však byla spojena s řadou problémů a i současné uplatnění těchto produktů je technologicky náročné a je nutné počítat s některými negativními jevy. Velkým problémem je homogenita materiálů, kdy nelze chování jednotlivých produktů zobecňovat. Je tak nutné rozlišovat nejenom mezi jednotlivými typy producentů, ale dokonce i jednotlivými provozy a jednotlivými šaržemi vznikajícími během výroby. To sebou nese řadu problémů, kdy bude muset být každý materiál posuzován individuálně a nebude možné efektivně uplatnit materiál ve větší míře. Velkým problémem jsou i chemické látky obsažené v těchto produktech, kdy například popílký obsahují celou řadu těžkých kovů, sírany, arsen atd. Uplatnění těchto materiálů je tak opět omezeno z hlediska možného úniku těchto látek do okolního prostředí. Z hlediska silničního stavitelství je pak velkým problémem nezkušenost a nedůvěra v tyto materiály. Se vzrůstajícím tempem výstavby je prakticky nemožné uplatnit materiál, který v praxi vyžaduje pečlivé laboratorní posouzení. Velmi často se setkáváme s případy, kdy je množství pojiv a materiálů stanoveno na základě dlouholeté zkušenosti a možnosti nových technologií jsou zcela opomíjeny. Neochota zhotovitelů je podpořena negativními zkušenostmi s uplatněním těchto materiálů v minulosti, například při stavbě dálnice D 47, nebo při zakládání staveb na Ostravsku. Nejznámější kauzou je ostravská dálnice D 47, kde bylo použito velké množství těchto druhotných surovin (studený odval - směs hutnických strusek, slévárenských písků, vyzdívky vysokých pecí a další druhotné suroviny metalurgického průmyslu, uhelná hlušinová sypanina, ocelářské strusky a další). Následně došlo u těchto materiálů k objemovým změnám, které způsobily výrazné zdvihy nivelety dálnice. Díky rozsáhlé medializaci případu, kdy se již řadu let hledá odpovědný viník, jsou tyto materiály jako celek vnímány negativně odbornou i laickou veřejností. Nalézt smysluplné uplatnění je tak poměrně složité a technologie využívající možností vedlejších energetických a metalurgických produktů, musí přinášet výrazné benefity, v první řadě ekonomického charakteru, tak aby mohly nalézt smysluplné uplatnění nejen v silničním stavitelství.

3.1. VEP- Vedlejší energetické produkty

Samotný proces spalování provází lidstvo již od jeho počátků a v dnešní době je na něm založena velká část současného průmyslu. VEP neboli „vedlejší energetický produkt“ je odpad z energetického průmyslu, jako je výroba elektrické energie, výroba tepla, spalování komunálního odpadu, ocelářský průmysl, slévárenský průmysl a mnoho dalších odvětví. S primárním využitím energie získané při spalování a s rozmanitostí dnes používaných kotlů roste i rozmanitost a kvalita vedlejších energetických produktů. Běžně je VEP definován jako tuhá látka vznikající při procesu spalování pevných látek,

případně při procesech úpravy produkovaných spalin. Vývoj produkce VEPů v EU se úměrně zvyšuje s nárůstem průmyslové výroby a se stále zpřísnující se politikou Evropské unie. V ČR je většina producentů VEP (cca 97 %) sdružována asociací ASVP (Asociace pro využití energetických produktů) a TS ČR (Teplárenské sdružení ČR), kdy dle dostupných dat v ČR vyprodukuje cca 13 miliónů tun VEPů za rok. Toto číslo ovšem nemusí odpovídat skutečnosti, i díky složité legislativě evidujeme část VEPů v režimu odpadů a část v režimu stavebních výrobků, případně chemických látek. Producent deklaruje odpad, nicméně po zpracování se odpad přemění na stavební výrobek, který není do produkce VEPů zahrnut. Samotný vývoj produkce VEP je závislý na zvyšující se produkci a do jisté míry i na platné legislativě, která reguluje množstvím vypouštěných látek. S připravovaným snižováním povolených limitů na vypouštění SO₂ bude většina provozů nucena upravit dávkování odsiřovacích přísad. Změní se tak nejenom složení VEPů, ale výrazně naroste i jejich množství.

3.2. Rozdělení vedlejších produktů

Z hlediska spalování rozlišujeme několik základních typů vedlejších energetických produktů. V zásadě je dělíme na produkty, které zůstávají na dně kotle, produkty odloučené ze spalin, produkty získané při čištění výrobků, případně produkty odsiřené. Podrobnější dělení je pak závislé na procesu a druhu výroby, při které daný VEP vzniká. Práce popisuje využití, případně další zpracování VEP z fluidního spalování a to jak použití v surovém stavu, tak zpracování fluidních popílků pomocí vysokorychlostního mletí na alternativní hydraulická pojiva. Další ucelenou kapitolou je využití strusek zejména z metalurgického průmyslu, kdy pomocí mechano-chemické aktivace se snažíme nalézt jejich využití jako náhrady současných hydraulických pojiv. Problematika strusek je doplněna o stručnou rešerši současně řešeného problému na téma uplatnění strusky, nebo škváry jako VEPu spalování komunálního odpadu. Zpracování odpadních produktů energetických nebo průmyslových zařízení a jejich další využití sebou nese výrazné ekologické výhody, kdy v současné době dokážeme VEPy nahradit přírodní zdroje, nebo průmyslově vyráběné látky, tedy eliminujeme negativní ekologické dopady, které sebou nese výroba průmyslových produktů, například hydraulických pojiv a zároveň využijeme produkt, který by musel být skládkován, nebo dokonce zpracován, jako nebezpečný odpad. Naší snahou by mělo být VEPy používat smysluplně a hledat pro ně co nejefektivnější využití, tak aby nekončily jako zásypy starých důlních děl, skládek, jako materiál pro rekultivaci krajiny, případně přímo na skládce jako odpad. V současné době je velké množství odpadních materiálů průmyslu skládkováno bez dalšího využití. Současné využití surovinové základny v České republice, například přírodního kameniva, je přitom na hranici soběstačnosti a současný stavební boom naráží na nedostatek kvalitního materiálu. Lze tak nalézt využití nejenom pro nyní produkované odpadní látky, ale i pro dříve uskladněné materiály, které byly ukládány řadu let a dnes se mohou stát cenným zdrojem surovin. Typickým příkladem mohou být ocelářské strusky, které jsou v současné době hojně využívané jako umělé kamenivo a jejichž efektivním zpracováním se zabývá i tato práce.

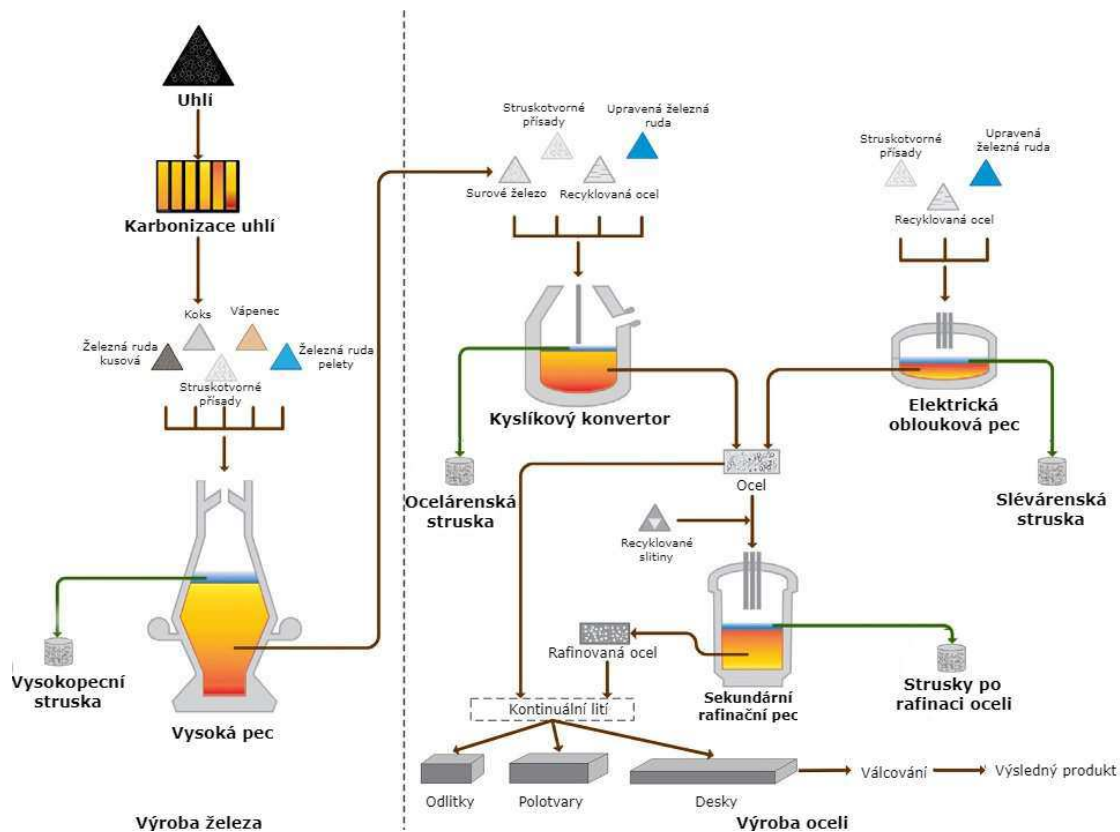
3.3. Vedlejší produkty metalurgického průmyslu

Vedlejší produkty, nebo chcete-li druhotné suroviny metalurgického procesu, jsou úzce spojeny s procesem výroby surového železa a výroby oceli. Proces úpravy železných rud a jejich přeměna na ušlechtilé materiály je známa již několik tisíciletí. Samotný proces se neustále zdokonaluje a v posledních desetiletích doznal značného boomu, zejména se vzrůstající poptávkou v Asijských zemích v čele s potřebami Čínské lidové republiky, kde se vyrobí cca 50 % světové produkce oceli. Ta neustále narůstá a v roce 2017 činila celosvětová produkce oceli neuvěřitelných 1,69 miliardy tun. S narůstající výrobou logicky vzrůstá i množství odpadních produktů. Jedná se zejména o vysokopecní a ocelářské strusky, pro které se snažíme v současné době nalézt efektivní využití například v technologiích silničních staveb.

3.4. Strusky

Struska vzniká jako odpadní produkt především hutního a energetického průmyslu, případně při spalování pevných látek, například ve spalovnách komunálního odpadu, teplárnách a dalších průmyslových provozech. Struska jako taková je hrubozrnný materiál s ostrými hranami, nejčastěji černého zbarvení s typickým skelným leskem. Podoba strusky, její chemické složení a mechanické vlastnosti závisí především na způsobu spalování, na materiálech vstupujících do procesu a způsobu zpracování strusky, na způsobu chlazení a uložení strusky [Tossavainen 2008]. Základní dělení strusek dle průmyslového odvětví

- Výroba železa a oceli
 - Vysokopecní strusky
 - Ocelářské strusky
 - Slévárenské strusky
 - Elektrické pece
 - Struska indukčních elektrických pecí
 - Struska elektrických obloukových pecí
- Odsiřovací strusky
- Strusky modifikace tvárné litiny hořčíkem
- Strusky při spalování pevných částic
 - Energetický průmysl
 - Spalování odpadů
- Vulkanické strusky



Obrázek 6: Schéma procesu výroby surového železa, oceli a strusky [Wang 2016]

Z hlediska vyprodukovaného množství je nejvyšším producentem strusky hutní průmysl, zejména výroba železa [Wang 2016]. Celosvětová produkce VEP z hutního průmyslu za rok 2016 byla 1 615 967 tisíc tun. Česká republika se na této produkci podílela cca 0,3 %, tedy 5 262 000 tunami za rok [World Steel Association, 2016].

3.4.1. Vysokopeční struska



Obrázek 7: Vysoká pec [foto: <http://www.pavelzubek.cz>]

Tavení železné rudy ve vysokých pecích je nejrozšířenější technologií pro výrobu surového železa, které je primárním produktem pro výrobu oceli a dalších slitin. Do vysoké pece, kromě recyklovaného železa, vstupuje podrcená železná ruda zbavená částí hlušiny pomocí magnetického třídíče, která se nachází v surové formě, ve formě aglomerátů, nebo pelet. Dále koks vyráběný z černého uhlí suchou destilací (karbonizace) při teplotě 1000 - 1200 °C v koksárenských bateriích. A struskotvorné přísady, které se přidávají za účelem odstranění nežádoucích látek, zejména hlušiny a popela z pece. V současné době se kvůli kyselému charakteru zpracovávaných rud používají nejčastěji zásadité přísady. Většinou se jedná o vápno, vápenec, dolomity a bauxity. Vápenec přidávaný do vsázky v množství asi 200 až 300 kg na 1 t vyrobeného železa se při teplotě nad 800 °C rozkládá dle rovnice (1) na oxid vápenatý a oxid uhličitý.



Oxid vápenatý je mimořádně reaktivní látka. Váže na sebe přednostně křemík, který je vždy přítomen v železných rudách jako nežádoucí příměs. Vzniká tzv. struska - směs s převahou křemičitanů vápníku, která na sebe dále váže síru ve formě sulfidů a nezredukované oxidy. Struska, díky nižší teplotě tavení a nižší hustotě, vytváří na hladině taveného železa souvislý povlak, který kromě vazby nečistot má i ochrannou funkci. Struska odděluje surové železo od procesů probíhajících ve vyšších částech vysoké pece a chrání surové železo před oxidací, nadměrným nasycením uhlíkem a degradací výsledného produktu. Struska i surové železo vznikají nepřetržitě během tavení železné rudy, je proto nutné, aby struska byla z vysoké pece odváděna, následně zchlazena a dále zpracována [Jirásek, Vavro 2008]. Množství vyprodukované strusky je přímo závislé na kvalitě vstupní železné rudy a množství použitých tavidel, které jsou

nezbytné pro požadovanou jakost surového železa. Pro typickou železnou rudu, obsahující 60-66 % železa, se množství strusky pohybuje v rozmezí 0,25-0,3 tuny na tunu vyrobeného železa [Wang 2016]. Struska je v současné době využívána v mnoha průmyslových aplikacích, včetně materiálu pro stavbu silnic, jako přísada do hydraulických pojiv, případně jako jejich plná náhrada. Aktuálním cílem je využít veškerou produkci vysokopeční strusky, čehož bylo v mnohých případech již dosaženo. Otázkou zůstává nakolik je toto využití účelné a zda by tento potenciálně cenný materiál nemohl najít efektivnějšího využití. V současné době známe tři základní procesy zpracování vysokopeční strusky:

- Granulace strusky
- Suchá granulace strusky
- Chlazení vzduchem (zakládání strusky do jam)
- Expandované strusky (zpěnění)
- Peletizace strusky

Granulace strusky

Granulace strusky je v současné době nejběžnějším procesem, který se ke zpracování vysokopeční strusky používá. Každý rok je takto zpracováno přibližně 70-80 % veškerých vysokopečních strusek [Wang 2016, Euroslag 2016]. Odlévaná struska z vysoké pece je zkrápěna pomocí vysokotlakých vodních trysek, umístěných v těsném sousedství vysoké pece. Dochází k chlazení a tuhnutí strusky, která vede k fragmentaci materiálu do formy granulí. Rychlost chlazení určuje finální použití strusky, pomalé chlazení vede k vývinu krystalické fáze, tedy struska vykazuje jen velmi malé, nebo prakticky žádné hydraulické vlastnosti a je spíše vhodná jako náhrada kameniva. Naopak rychlé zchlazení strusky vede k vyššímu podílu sklovité fáze a podpoření latentně hydraulického charakteru strusky, která je následně využívána zejména v cementářském průmyslu.

Chlazení vzduchem

Chlazení vzduchem probíhá v takzvaných struskových jámách (alternativně v pánvích), které jsou umístěny v těsné blízkosti vysoké pece. Do struskových jam je odlévána tekutá struska v tenkých vrstvách, dochází k pomalému chlazení strusky a její krystalizaci na volném vzduchu. Po zatuhnutí (teplota strusky nižší než 93 °C) je struska odtěžena a dále zpracována pomocí drtičů jako náhrada přírodního kameniva. Proces tuhnutí lze zkrátit zkrápěním strusky regulovaným množstvím vody. Doba uložení strusky v jámě (chlazení) má velký vliv na mechanické vlastnosti vzniklé kusové strusky. Chlazení vodou také zlepšuje mikrostrukturu při dosažení lepších mechanických vlastností [Wang 2016].

Expandované strusky

Zpracování strusky probíhá ještě v tekutém stavu, kdy je struska zpracována v řízených podmínkách a dochází k objemovým změnám (expandaci). Struska je buď zkrápěna vodou při opouštění pece, nebo je s vodou, případně vodní párou dodatečně míchána. Struska tak tuhne v řízených podmínkách, kdy horká struska při styku s vodou vytváří porézní struktury podobné pemze. Takto vzniklý

produkt je možné využít jako lehčené kamenivo například pro výrobu betonových bloků.

Proces peletizace strusky

Proces peletizace strusky je využíván pouze v několika závodech v EU a Kanadě. Roztavená struska se rozprostře na desku, která slouží jako deflektor. Vrstva strusky se rozřeže regulovanými vodními tryskami, které iniciují bobtnání a chlazení strusky. Struska se potom odstředivě vyhazuje do vzduchu na rotačním bubnu, aby se dokončilo unikání plynu a chlazení. Částice strusky sledují různé trajektorie podle své velikosti od granulovaného písku do rozpětí pelet. Když se použije správného postupu, procesní voda se úplně spotřebuje odpařením a působí jen jako vlhkost produktu. Specifická spotřeba vody je menší, než je třeba při mokré granulaci. [Kurková 2007]

Suchá granulace strusky

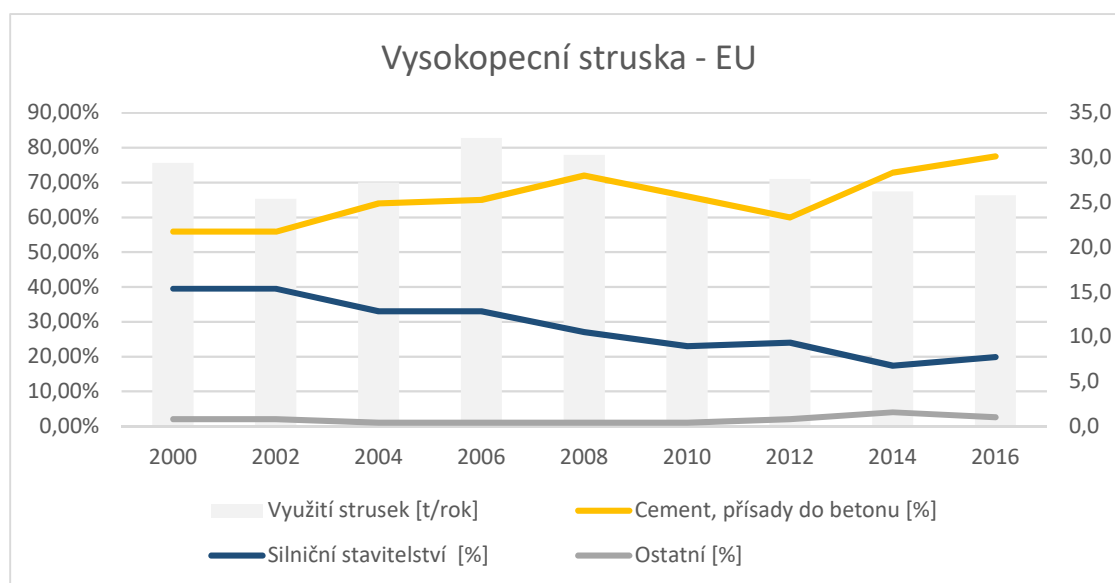
Suchá granulace strusky je experimentální postup pro zpracování strusky vyvinutý v Austrálii. Roztavená struska je rozprašována na rotující disk, vlivem odstředivých sil je následně ve formě kapek vymrštěna a vzduchem ochlazená. Tento způsob granulace strusky se vyznačuje poměrně vysokou přidanou hodnotou ve formě uvolňovaného tepla, které může být dále využíváno. Ve srovnání s běžnou granulací za mokra nabízí granulování za sucha ekologicky udržitelnější přístup ke zpracování roztavené strusky prostřednictvím úspory vody, snižování znečištění a obnovení vodního tepla s cílem snížit spotřebu energie, tudíž i emise skleníkových plynů.

Chemické složení

Vysokopeční struska obvykle obsahuje ve větší míře oxid vápníku CaO (37-50 %), křemíku SiO₂ (10-15 %) a železa FeO nebo Fe₂O₃ (20-30 %). CaO se ve struskách objevuje i ve formě volného vápna (do 10 %). Dále se zde vyskytují oxidy manganu MnO, fosforu P₂O₅ (do 5 %) a stopové prvky například oxidů síry SO₃ (do 0,5 %), nebo titanu TiO₂. [YILDIRIM 2011] Kromě výše uvedených oxidů se ve struskách mohou nahodile objevovat další chemické prvky v závislosti na chemickém složení vstupních materiálů. Pro další zpracování je nutné si uvědomit určitou nehomogenitu strusek nejen mezi jednotlivými provozy, ale i v rámci jednoho zařízení, případně jedné konkrétní pece. Princip vysoké pece je založen na kontinuálním zpracování materiálu, kdy do procesu nepřetržitě vstupují jednotlivé zdroje a zároveň vystupují jednotlivé produkty.

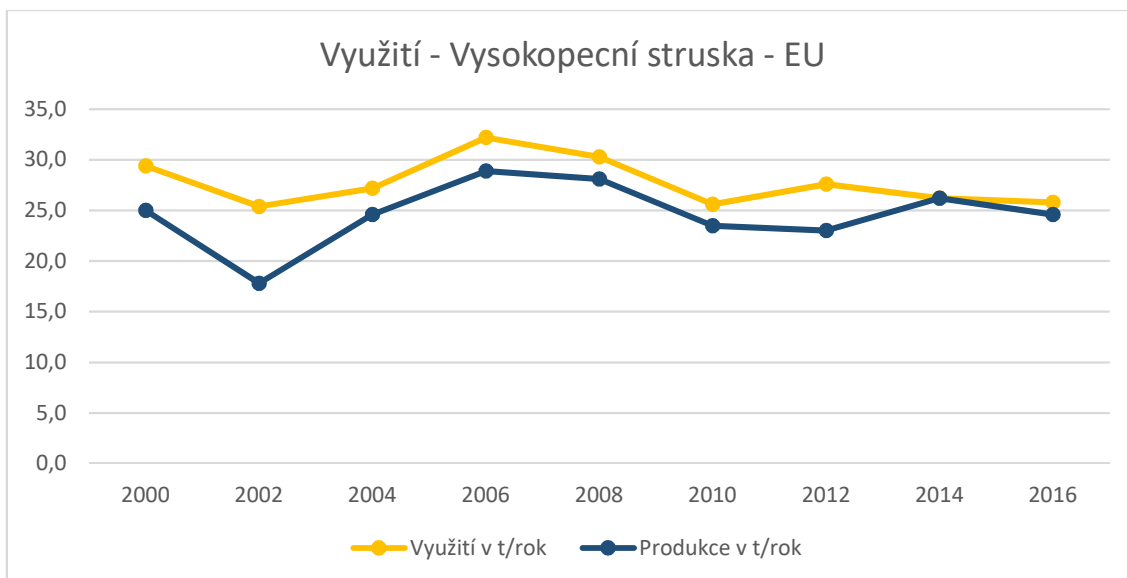
Aplikace vysokopecní strusky

Využití vysokopecní strusky je známé více jak 2000 let (350 př. n. l.), kdy byla struska používána jako vysokohodnotná náhrada přírodních kameniv. Současné zpracování vysokopecních strusek cílí spíše do oblastí hydraulických pojiv, případně přísad do betonů. Skupina Euroslag, sdružující evropské producenty strusek, shromažďuje od roku 2000 data o produkci a využití vysokopecních strusek obrázek 9. Data poukazují na vývoj uplatnění vysokopecní strusky, kdy narůstá podíl využití strusek v cementářském průmyslu. Naopak v silničním stavitelství dochází k poklesu využívání vysokopecních strusek jako náhrady přírodního kameniva a v současné době je využíváno pouze necelých 20 % upravené vysokopecní strusky obrázek 8.



Obrázek 8: Využití vysokopecní strusky [Euroslag]

Produkce a využití vysokopecní strusky v průběhu posledních let stagnuje. Zajímavým ukazatelem je využívání strusek jako druhotného produktu, kdy množství zpracované strusky na území evropské unie je vyšší, než produkce. To může ukazovat na zpracování strusek, které byly uloženy v dřívějších dobách bez dalšího využití a v dnešní době se stávají cenným surovinovým zdrojem. V České republice to jsou zejména halda Kladno, která je v současné době cenným zdrojem umělého kameniva, nebo například haldy v okolí Ostravy a Třince.



Obrázek 9: Produkce a uplatnění strusek jako VEP [Euroslag]

3.4.2. Ocelářenská struska



Obrázek 10: Odlévání strusky [foto: <http://www.pavelzubek.cz>]

Ocelářenské strusky jsou vedlejším produktem zpracování surového železa, kdy dochází k dalšímu snižování obsahu uhlíku a přeměně surového železa na ocel. Od toho se odvíjí i způsob zpracování surového železa a mechanické a chemické vlastnosti strusek. Využívání kyslíkového konvertoru naprosto dominuje v současné době, kdy více jak 60% ocelí na světě je vyrobeno právě touto technologií [Wang 2016]. Mezi dalšími moderními technologiemi, které jsou používány v současné době, převládají elektrické obloukové pece, případně elektrické indukční pece. Dalšími možnostmi výroby oceli je takzvaná tandemová

pec, nebo dříve používaná technologie Siemens-Martinských pecí, obě tyto technologie se dnes v moderní západní Evropě již nepoužívají, zejména kvůli nízké efektivitě, vysoké pořizovací ceně a ekologické zátěži. V EU je výjimkou ostravská ocelárna, kde je stále v provozu tandemová pec, která prošla generální opravou v roce 2014. Ostravské ocelárny tuto technologii preferují díky možnosti přidání většího podílu železného šrotu, než je tomu u modernějších pecí, dle dostupných informací se v současné době jedná o jedinou z mála provozovaných tandemových pecí na území Evropské unie. Kvalita a chemické složení strusky je opět ovlivněna řadou činitelů. Od druhu použité technologie a vstupních zdrojů, po požadavky na výsledný produkt. Rozlišujeme tak strusku vznikající při procesu zkujňování, při dezoxidaci, mimo pecní rafinaci oceli, zda se jedná o kyselý, nebo zásaditý proces, či jaká technologie pro zpracování byla zvolena. Hlavní úlohou strusky, především z hlediska reakcí mezi kovem a struskou resp. kovem a vyzdívkou, definujeme jako zásaditost, nebo oxidační schopnost strusky. Zásaditost je dle molekulární teorie vyjádřena jednak hmotnostním poměrem zásaditých a kyselých oxidů, jednak jako množství volného CaO, nebo zásaditých oxidů. Toto vyjádření se vyznačuje jednoduchostí, nicméně mezi parametry popisujícími probíhající děje mezi struskou a kovem (odsíření, odfosfoření oceli) a touto zásaditostí lze nalézt převážně statistické a nikoliv fyzikálně chemické vztahy [Bažan, Socha 2014].

Technologie zpracování oceli

Technologie zpracování oceli a její vývoj reaguje na aktuální potřeby a požadavky na kvalitu produkovaných ocelí, kvalitu zpracovávaných rud, případně jejich chemické složení. V minulosti sehrála velkou roli i možnost recyklovat kovový šrot, kdy starší technologie s kovovým odpadem de facto nepracují. Stranou nezůstávají ani ekonomické aspekty, kdy nové provozy urychlují celý proces výroby a snižují finanční náklady a v poslední době i environmentální aspekty, úzce související s aktuální politikou nejen v EU. Tak jak se vyvíjely jednotlivé technologie, měnily se i odpadní produkty, tedy potenciální zdroj materiálu, který je dnes uložen v haldách nedaleko dřívějších hutních průmyslů.

Vzduchový konvertor

Jedním z nejstarších způsobů zpracování surového železa je vzduchový konvertor. U vzduchového konvertoru byla kvalita strusky dána vyzdívkou, která byla buď zásaditá (Thomasův konvertor- 1879), nebo kyselá (Bessemerův konvertor- 1885). O vhodnosti použití rozhodovalo chemické složení železné rudy. V Evropě jsou používány zejména Thomasovy konvertory, jelikož většina zdejších rud je fosforných, a neobsahují velké množství křemíku. Využití Bessemerova konvertoru je naopak určeno pro rudy s dostatečným množstvím křemíku, jež neobsahují síru ani fosfor, které nelze v Bessemerově konvertoru odstranit. Rudy vhodné pro zpracování v Bessemerově konvertoru se nacházejí zejména v Rusku a USA, na území Evropy se Bessemerův konvertor používal například ve Švédsku. Nevýhody vzduchového konvertoru byly zejména v nižší kvalitě vyráběné oceli. Produkovaná ocel obsahovala větší množství dusíku, kyslíku a fosforu. Byly kladeny přísnější požadavky na vstupní železnou rudu

a nebylo možné zpracovat větší množství ocelového odpadu. Od vzduchových konvertorů bylo postupně upuštěno a byly nahrazovány SM pecemi.

Siemens-Martinská pec (1864)

Zavedení technologie SM pecí znamenalo určitý pokrok ve zpracování ocelového odpadu. Samotná pec je vyhřívána spalováním vhodného paliva (koksárenský plyn, vysokopecní plyn a další), což umožnilo dosáhnout teplot nad 1600 °C. SM pece tak umožnily zpracování většího množství ocelového odpadu. První martinské pece s kyselou vyzdívku zpracovávaly ocelový odpad až do poměru 80:20 ocelového odpadu k surovému železu. Stejně jako u Bessemerova konvertoru neumožňovala kyselá vyzdívka zpracovávat rudy bohaté na fosfor, tedy rudy těžené v Evropě. Teprve zavedení zásadité vyzdívky umožnilo vyrábět ocel ze vsázky téměř libovolného složení.

Elektrická oblouková pec (1902)

Elektrické pece postupně nahrazovaly SM pece, které dominovaly ocelárnám ještě v polovině 20. století. První elektrická oblouková pec byla uvedena do provozu v roce 1902 (Heroult - Francie, Stassano – Itálie) a v témže roce i první elektrická indukční pec (Kjellin – Švédsko). Na počátku 90. let bylo celosvětově v provozu více než 1200 ocelářských EOP, které se podílely 32 % na celkové světové výrobě oceli. Nutno podotknout, že v téže době na území ČR byl podíl produkované oceli pomocí elektrických pecí pouze 10 %. Vstupní surovinu tvoří zejména železný šrot, kdy EOP slouží především jako tavící agregát zajišťující přípravu tekutého kovu pro následné procesy sekundární metalurgie [<http://ocelarna.sweb.cz>].

V EOP se zajišťuje zejména

- roztavení vsázky a ohřev na předepsanou teplotu
- oduhličení kovu
- odfosfoření lázně
- bezstruskový odpich

Kyslíkový konvertor (1952)

Moderní technologií, která odstraňuje problémy vzduchových konvertorů a SM pecí a zároveň zlevňuje výrobu a snižuje její dopady na životní prostředí, je technologie kyslíkových konvertorů. Vzduch známý z technologie vzduchových konvertorů nahrazuje čistý kyslík (min. čistota 98,5 %) a místo vhánění spodem, které se ukázalo jako problematické, neboť docházelo k přehřívání, je kyslík vháněn přes strusku svrchu. Dnes nejběžnější technologie pro výrobu oceli, cca 70 % celosvětové produkce oceli. Konvertor je naplněn surovým železem z vysoké pece (70-80 % objemu materiálu), železným šrotem (20-30 % materiálu) a je přidána struskotvorná přísada, nejčastěji vápenec, nebo dolomit. Samotný princip konvertoru spočívá ve vhánění kyslíku do roztaveného surového železa skrz strusku. Vháněný kyslík na sebe váže přebytečný uhlík, křemík, síru, fosfor a další nežádoucí látky. U kyslíkového konvertoru je rozlišován směr vhánění kyslíku, dmýchání horní tryskou, dmýchání dnem konvertoru, případně

kombinací. V současné době je nejběžnějším typem dmýchání horní tryskou skrze strusku.

Dmýchání horní tryskou

- systém LD (Linz - Donawitz)- vyvinutý v Rakousku po 2. sv. válce, v současné době nejužívanější typ kyslíkového konvertoru. Nevhodný pro zpracování rud s vyšším obsahem fosforu.
- systém LD-CL (Linz-Donawitz / Arbed-CRM) - japonská modifikovaná varianta LD konvertoru s rotující tryskou, umožňuje zpracovat rudy s vysokým obsahem fosforu
- systém Kaldo - šikmý rotující konvertor

Dmýchání dnem konvertoru

- systém OBM - v Německu
- systém Q-BOP - v Americe
- systém OXYVIT - Vítkovice

případně kombinace dmýchání

- systém LBE
- systém TBM

Reakce probíhající při výrobě oceli

Strusky jsou tvořeny struskotvornými materiály vsázky (vápno, aglomerát, magnezit, okuje), dále produkty oxidace prvků ze surového železa (FeO, MnO, SiO₂, P₂O₅) a oxidy z vyzdívky pánve (MgO, Al₂O₃ ...), která se v průběhu zkujňování opotřebovává [Adolf 2013, Wang 2016].

Strusky lze rozdělit dle jejich charakteru na

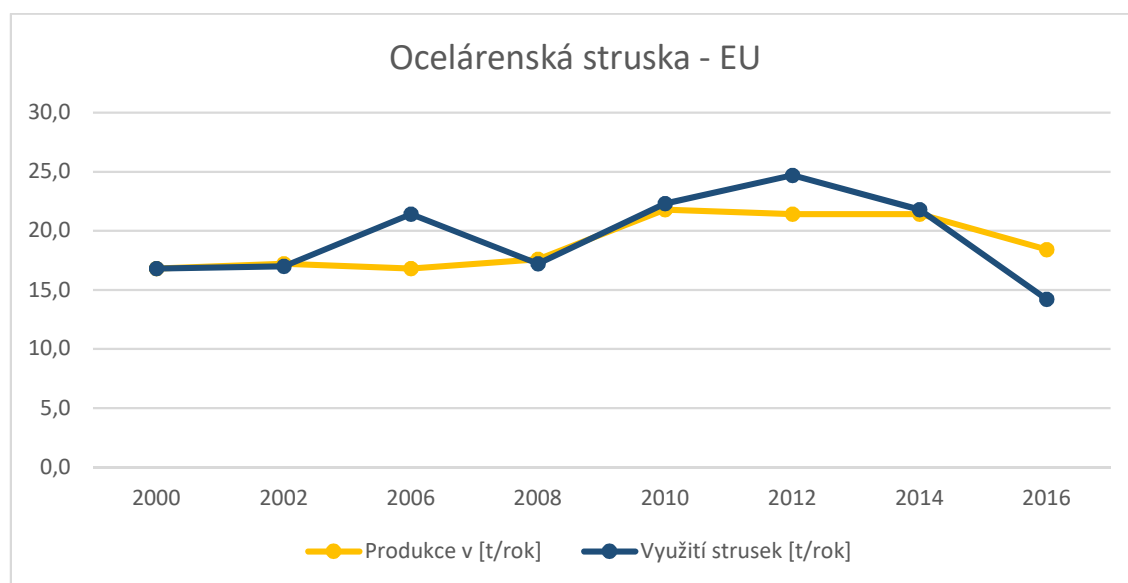
- zásadité (obsah CaO se pohybuje mezi 45 a 55 % hmotnosti strusky)
- oxidační strusky (obsah oxidů železa FeO se pohybuje mezi 10 až 35 % hmotnosti strusky).
- kyselé strusky v případech, kdy je elektrická oblouková pec vyzděna kyselou vyzdívkou. Kyselé strusky se vyznačují vysokým podílem SiO₂ (až 60 % hmotnosti strusky).

Oxidační, neboli zkujňovací reakce je nejdůležitějším procesem úpravy surového železa, kdy dochází k redukci uhlíku, za vzniku plynného CO. Vznikající CO v roztaveném kovu zabezpečuje správnou cirkulaci a podporuje reakce mezi struskou a kovem. Vytvářejí se tak příznivé podmínky pro redukci vodíku a dusíku v oceli, pro vyplavování vměstků a důležitý je i tepelný efekt podílející se na ohřevu oceli. V důsledku dmýchání čistého kyslíku vzniká v ocelářských pecích FeO, který z části přechází do strusky. Vytvářejí se tak příznivé podmínky pro oxidaci doprovodných prvků na rozhraní struska-kov a vznikající oxidy tvoří takzvanou tekutou strusku. U kyselých pochodů je struska tvořena oxidy FeO, MnO, SiO₂ a jejich sloučeninami (FeSiO₃, Fe₂SiO₄, MnSiO₃, Mn₂SiO₄). U zásaditých pochodů dochází k rozpouštění sázeného vápna a vznikající struska má silně zásaditý charakter, dochází tak k redukci přebytečného fosforu.

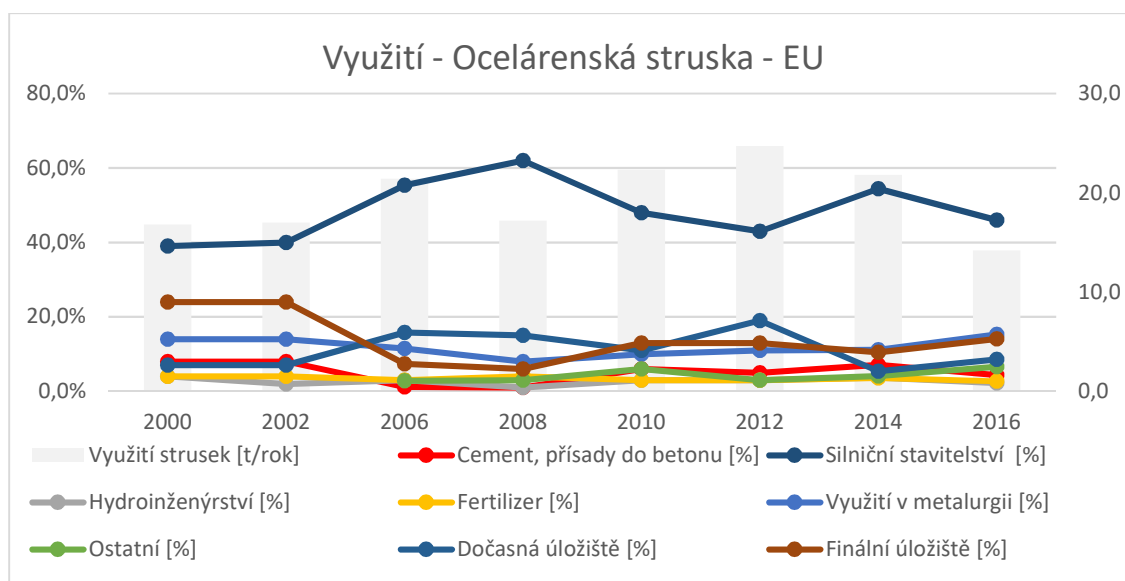
Aktivita vznikajícího oxidu fosforečného P_2O_5 je snížena reakcí s oxidem vápenatým CaO . Optimální pro odstranění P_2O_5 je obsah CaO ve strusce mezi 40 až 45 %. Příliš vysoký obsah CaO ve strusce, stejně jako nízká teplota, negativně ovlivňují proces odstranění fosforu z oceli. K odstranění síry dochází jejím pohlcením ve strusce vhodného složení (obsahuje CaO 45-55 % hmotnosti strusky), výjimku tvoří kyslíkové konvertory, kde se 10-15 % síry váže s kyslíkem a uniká ve formě SO_2 [Bažan, Socha 2014].

Aplikace ocelářenských strusek

V současné době se můžeme na trhu setkat zejména s umělým kamenivem, dostupným v široké škále frakcí, podobně jako je tomu u přírodního kameniva. Cena je rovněž velmi podobná. Tento materiál je v dnešní době po splnění všech podmínek klasifikován jako vhodný jak do betonů, tak pro výrobu prefabrikovaných prvků, případně jako náhrada kameniva v silničním stavitelství.



Obrázek 11: Produkce a uplatnění ocelářenských strusek jako VEP [Euroslag]



Obrázek 12: Uplatnění ocelářenských strusek jako VEP [Euroslag]

3.4.3. Slévárenská struska

Proces slévárství zahrnuje modifikaci vyrobených ocelí, které jsou dále zpracovány a upraveny dle požadavků na konečný produkt. Základ kvality metalurgických pochodů leží v jakosti tekutého kovu, v jeho čistotě, chemickém složení a dalších charakteristikách. Historicky se využívalo v oboru slévárství elektrických obloukových pecí, ovšem současné požadavky na vyráběné slitiny jsou již nad jejich možnosti. Stále častěji tak mluvíme o procesu takzvané sekundární metalurgie, kdy pomocí obloukových pecí dochází k primárnímu tavení oceli a požadované jakosti je dosaženo mimo obloukovou pec v peci pánvové. Proces slévárství (sekundární metalurgie) je velmi rozmanitým oborem, co do množství a variability výsledných slitin, které vznikají sloučením více kovů za určitých podmínek a musí splňovat předem stanovené požadavky na jakost a kvalitu. S rozmanitostí vyráběných produktů je obtížné postihnout i složení strusky jako odpadního materiálu, které je úzce spjato s požadavky na vyráběnou slitinu a její čistotu. Je tedy velice obtížné hledat cestu pro využití slévárenských strusek ve stavebním průmyslu. Nezanedbatelným faktem je i množství odpadních produktů sekundární metalurgie, které je násobně menší než produkce odpadních produktů ocelářského a vysokopečního.

Pokud se pokusíme o jednoduché postihnout chemických vlastností pánvových strusek, zpravidla se jedná o strusky zásadité s vysokým obsahem CaO a redukční s minimálním obsahem FeO (i pod 1 %hm). Nejčastěji obsahují struskotvorné materiály (vápno, syntetické strusky, magnezit apod.), sloučeniny (MnO, SiO₂, Al₂O₃) související s dezoxidací při odpichu oceli, zpravidla se vyskytují i oxidy z opotřebení vyzdívky pánve a podíl pecní strusky, která přetéká do pánve při odpichu oceli. [Adolf 2013]

3.4.4. Strusky energetického průmyslu

Struska, nebo též ložový popel je produktem klasického spalování v uhelných elektrárnách, kde se nejčastěji spaluje uhlí v granulačních kotlích. Struska jako taková se odlučuje pomocí výsyvky spalovací komory kotle, kde je vyhrnutá

struska prudce schlazena pomocí vodní lázně. Takto zchlazená struska je vysušena a je dále zpracována. Strusku lze využít do násypů zemních těles pozemních komunikací, zásypů rýh a kanalizačního potrubí, obsypů mostních opěr apod. Strusky z klasického spalování jsou poměrně málo reaktivní a mají nízkou objemovou hmotnost, která je žádoucí zejména při stavbách násypových těles na málo únosném podloží. Výhodou strusek je i jejich poměrně vysoká smyková pevnost, které je využito při zásypech opěrných konstrukcí. Současní producenti deklarují fyzikální a mechanické vlastnosti strusek, stejně jako splnění požadavků na ochranu lidského zdraví a životního prostředí dle platné legislativy EU a ČR [www.cez.cz]. S narůstajícími emisními limity dochází i k modernizaci stávajících kotlů, nebo k výměně starých kotlů za nové. Jednou z moderních variant je i spalování na fluidní vrstvě, které se vyznačuje specifickým způsobem spalování při nižších teplotách a k odsíření se používá mletý vápenec, který je dávkován do kotle spolu s palivem. Předkládaná práce se zabývá zpracováním VEPů z tohoto typu spalování a snaží se hledat jeho uplatnění v konstrukci vozovky. Odpad, který se usazuje na dně kotle má řádově nižší zrnitost než zbytky z klasického spalování na roštovém ohništi, místo označení struska se tak používá fluidní popílek ložový. Bližší popis těchto produktů je uveden v kapitole 3.5.

3.4.5. Škvára (struska ze spalování tuhých odpadů)

Škvára tvoří asi 80 % odpadů vzniklých spalováním komunálního odpadu (KO). V jednoduchosti lze vycházet z jednoduché rovnice, kdy z každé tuny KO zůstane po spálení cca 25 % materiálu, který je následně vyhrnut z kotle a schlazen ve vodní lázni. Proces mokré vypírky je preferován zejména kvůli ekonomické a technologické nenáročnosti tohoto procesu. Samotný proces zchlazení přitom způsobí případnou reakci zbytkového vápna a škvára se tak ve většině případů stává heterogenním inertním materiálem tvořeným nespalitelnými částmi KO, jako jsou pozůstatky skla, kovů, keramiky, nespálených organických látek a další [Traina 2007; Wiles 1996]. Hlavní motivací využití škváry v ČR je nastavená politika EU ohledně hospodaření s odpady, která má v roce 2024 vyloučit ukládání KO na skládky (stejně tak jako vylučuje uložení odpadů, které jsou recyklovatelné a dále využitelné), resp. skládkování bude zatíženo vyššími poplatky. Z hlediska spalování KO je tak žádoucí hledat smysluplné uplatnění škváry jako hlavního odpadního produktu. Využití strusky se tak dostává do popředí společně s efektivním získáváním železitých a neželezitých kovů.

Současné snahy o využití škváry v silničním stavitelství staví na dlouholetých zkušenostech ze zemí s nižší surovinovou základnou, jako je Dánsko, Nizozemí, nebo například Belgie, kde je škvára jako vedlejší produkt spalování KO využívána jako náhrada přírodního kameniva. Škvára je pak využívána hlavně v podkladních vrstvách vozovky jako náhrada přírodního kameniva do nestmelených. Dánský model počítá s využitím na stavbách nižšího významu, což má svou logiku v poměrně nízké produkci škváry jednotlivými zařízeními. Samotná aplikace je také limitována nastaveným procesem zrání a posouzení škváry, kdy je škvára z velké části zbavena železitých a neželezitých kovů.

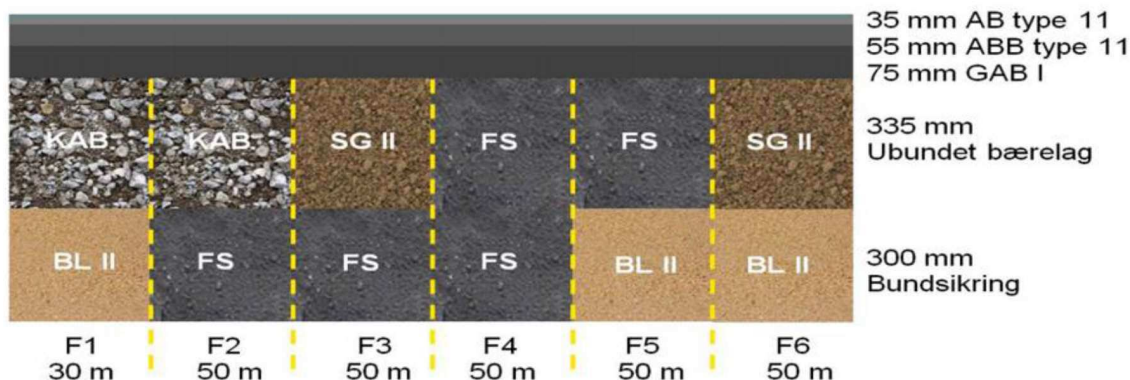
Škvára je uchovávána na haldách do 5000 t, kdy je každá tato halda posouzena z hlediska maximálního zrna, podílem hrubých a jemných částic, zatříděna dle EN 1385, posouzena co do obsahu organického uhlíku, z hlediska výluhů a dalších předepsaných parametrů. Samotné použití je možné pouze za předpokladu zpracování každé haldy zvlášť. Současné dánské předpisy umožňují použití strusek do spodních podkladních vrstev pro komunikace se zatížením do 600 TNV za den. Projekt využití strusek má i řadu odpůrců zejména z řad ekologických organizací, které argumentují možným vlivem látek obsažených ve strusce (solí, kovy a toxické organické látky) na životní prostředí, nízkou úroveň současné kontroly provozů. Do jisté míry mají pravdu, do komunikací se dostane velké množství odpadu, který by mohl mít negativní vliv na životní prostředí, musíme si ovšem uvědomit, že současné podmínky zahrnující zránění škváry a její finální použití pod nepropustnými vrstvami by mělo zajistit stabilitu těchto škvár a uzavření případných nebezpečných látek uvnitř konstrukce vozovky. Navíc je sledovaná škvára podrobena řadě testů z hlediska výluhů a podmínky využití přímo nařizují, kde a za jakých podmínek z hlediska vodního režimu může být škvára použita. Druhým faktem zůstává současné zpracování strusek, které jsou v surovém stavu vyvezeny na skládku, včetně zmíněných solí, kovů a toxických organických látek v nich obsažených.



Obrázek 13: Pokusný úsek – využití strusek – Dánsko (Danish waste solutions)

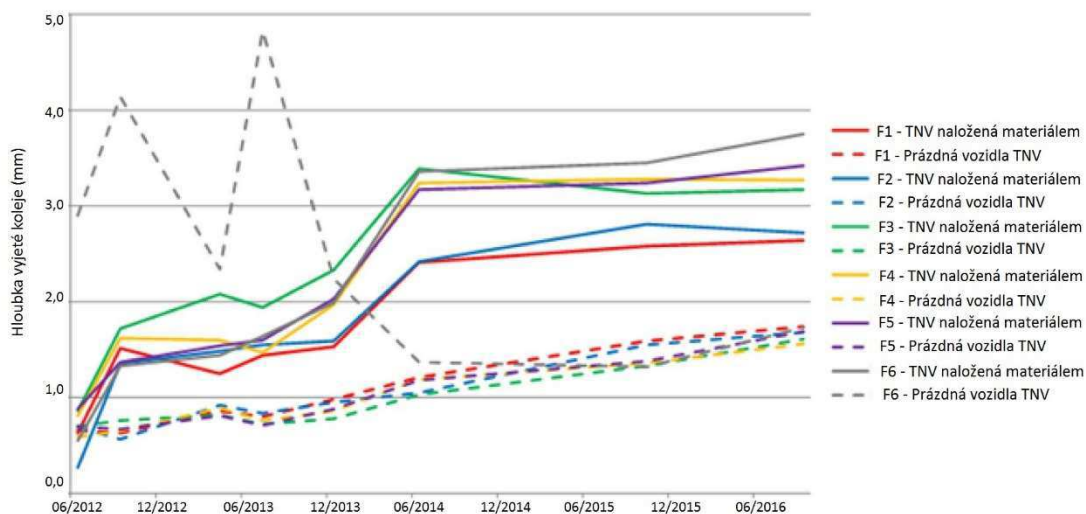
Současný projekt zpracování škváry je doplněn o dlouholeté pozorování pokusného úseku, který byl zbudován na příjezdové čtyřproudé komunikaci za účelem rozšíření kodaňského přístavu. Jedná se tak o vysoce zatěžovanou komunikaci, zhruba 900 TNV za den, po které se má v průběhu příštích 15 až 20 let přepravit cca 10 miliónů m³ zeminy. Současný projekt má posoudit vhodnost strusek i pro komunikace s vyšším dopravním zatížením, než je dnes povolených 600 TNV za den. Variantní použití strusky je znázorněno na obrázku 14, jednotlivé vrstvy jsou tvořeny

- BL- štěrkopísky
- SG- normová štěrkodrt' z přírodního kameniva
- KAB- asfaltový nebo betonový recyklát
- FS- škvára splňující Dánské podmínky pro uplatnění ve vozovce



Obrázek 14: Skladba vozovky - pokusný úsek Dánsko [Danish waste solutions]

Dosavadní poznatky, získané po 6 letech od uvedení do provozu, prezentují vhodnost použití strusek nejen pro náhradu přírodních materiálů ve spodních podkladních vrstvách, ale i možné náhrady materiálů v horní podkladní vrstvě u vysoce zatěžovaných vozovek. Materiál prokázal svou vhodnost, kdy sledované parametry, především hloubka vyjeté koleje, vykazovaly u směsí F2 – F5 lepší parametry, než v případě referenční směsi F6. Lepší odolnost proti vyjetí kolejí je logicky pozorována zejména na zatíženější straně vozovky, po které jezdí TNV naložené materiálem, na straně po které se vracejí, jsou měřené hodnoty prakticky totožné obrázek 15.



Obrázek 15: Hloubka vyjeté koleje – pokusný úsek Dánsko [Danish waste solutions]

Současné snahy ČVUT společně s průmyslovými partnery směřují k aplikaci dánského modelu v ČR, za účelem uplatnění škvár v silničním stavitelství jako náhrady kameniva. V současné době běží paralelní klasifikace dánské škváry dle platných norem a technických podmínek v ČR a zároveň je nastartován proces modernizace separace kovů. Zároveň se pracuje na návrhu legislativy upravující podmínky použití škváry. Současné snahy by měli vést k nalezení efektivní aplikace škvár jako náhrady přírodního kameniva v podkladních vrstvách vozovky. V současné době jsou posouzeny vzorky škváry původem z ČR, které lze klasifikovat jako G1 GW (nenamrzavý štěrk dobře zrněný), který

je vhodný do násypů a aktivní zóny [Valentin 2018]. Proběhly i první pokusy o laboratorní ověření těchto materiálů pro aplikaci v podkladních vrstvách vozovky, kdy byl materiál stabilizován pomocí hydraulických pojiv. První výsledky bohužel nenasvědčují možné aplikaci, kdy směsi vykazovaly poměrně nízké pevnostní parametry, zejména odolnost proti mrazu a vodě. Použití strusek se tak spíše uplatní jako náhrada přírodního kameniva vhodného do násypů nebo aktivní zóny. Uplatnění české škváry ve vyšších vrstvách vozovky se prozatím jeví jako neúčelné a neefektivní.

3.5. Fluidní spalování

Jednou z moderních a efektivních technologií je spalování fosilních paliv na fluidní vrstvě. Technologie fluidního spalování umožňuje efektivnější spalování při nižších teplotách, a má za následek snížení množství vypouštěných emisí (SO_2 , NO_x a dalších plynů), pevných částic popílku a dalších škodlivých látek. Tyto látky jsou pomocí sorbentu, nejčastěji vápna, zachyceny a společně s popílkem tvoří vedlejší produkt tohoto typu spalování. Zachycený popílek kromě vázané síry obsahuje také stopy těžkých kovů a dalších nebezpečných látek, které mohou ovlivnit jeho další zpracování. Ročně vyprodukují uhelné elektrárny na území České republiky přibližně 13 miliónů tun odpadních produktů (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015), které se s rozvojem moderních technologií pomalu stávají cenným zdrojem materiálu.

V současné době poměrně dobře umíme tento druhotný materiál využít při zavážce starých důlních děl, rekultivaci krajiny, případně jako výplň násypů v rámci protipovodňových opatření. I přesto zůstává nemalé množství tohoto materiálu nevyužito. Všeobecnou snahou je tedy hledat další uplatnění poměrně velkého množství materiálu, který je v současné době znehodnocován na skládkách a nenachází dalšího uplatnění. Využití elektrárenských popílků je celospolečenským problémem, o čemž svědčí i snaha a tlak na jejich využívání v mnoha odvětvích stavebnictví, kdy se snažíme nalézt cestu pro jejich smysluplné uplatnění nejen v oblasti silničního stavitelství. Předkládaná studie je zaměřena na možné využití těchto druhotných produktů pro konstrukce pozemních staveb, zejména potom na využití fluidního popílku, který v ČR tvoří asi 13 % všech odpadů uhelných elektráren (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015). Naše disertační práce se zabývá možnou substitucí přírodních materiálů v podkladních vrstvách vozovky, kdy je využito hydratační schopnosti fluidních popílků, které jsou spojeny s procesem fluidního spalování v uhelných elektrárnách.

3.5.1. Spalování na fluidní vrstvě (FBC)

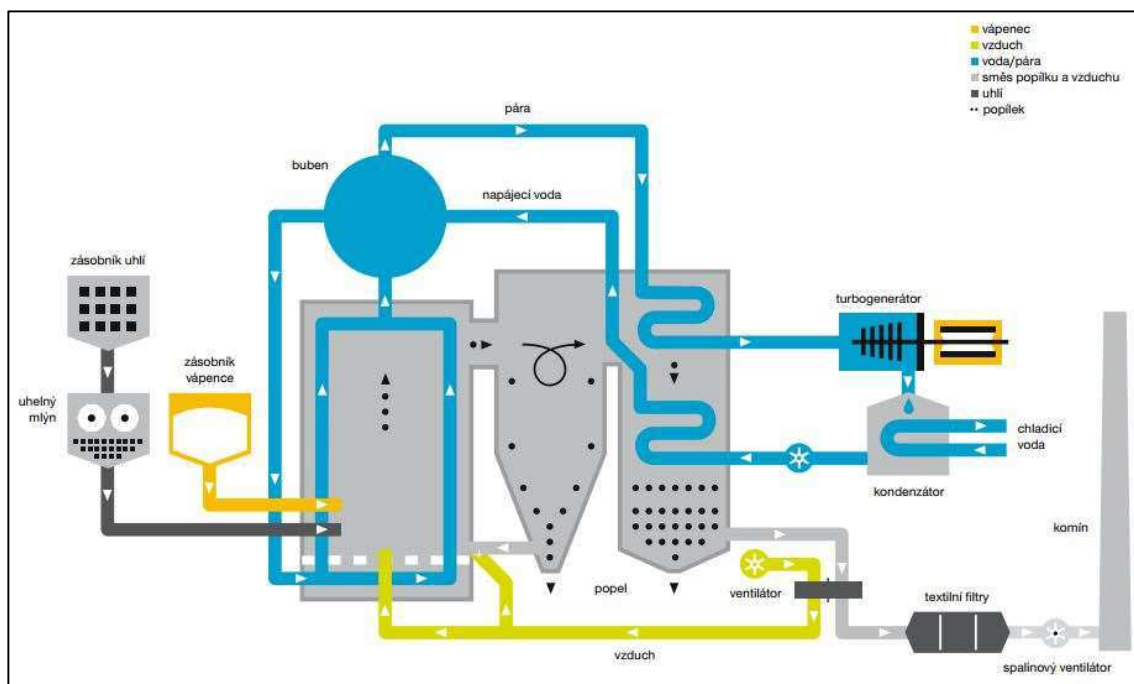
Fluidní spalování (FBC) je založeno na spalování směsi uhlí a sorbentu, nejčastěji vápence, ve fluidní vrstvě, tedy vrstvě, která vlivem proudění vháněného vzduchu nabývá vlastnosti kapaliny. Oproti klasickému spalování v pevném loži [Basu, 2006, 2015; Johnsson, 2007; Oka, 2004] se jako hlavní výhody fluidního spalování uvádějí nižší teploty spalování (teplota se pohybuje v rozmezí 800 - 900 °C), možnost efektivně regulovat výkon, vyšší účinnost kotlů a možnost kombinace paliva z různých zdrojů a různé kvality, kdy je podmínkou pouze shodná zrnitost. Nižší teplota spalování spolu s přidávaným odsiřovacím

činnidlem vede ke snížení emisí škodlivých látek vypouštěných do ovzduší a k redukci ekologicky nevhodných látek obsažených v popílku. Nevýhodou je rychlost najíždění na provozní stav, která činí více než 15 hodin, složitost celého zařízení a vysoká pořizovací cena této technologie. Technologii FBC lze rozdělit na dva základní typy, na spalování při atmosférickém tlaku a na spalování při zvýšeném tlaku, které je v současné době předmětem zájmu odborné veřejnosti, zejména v souvislosti s problematickým spoluspalováním biomasy. Atmosférické spalování lze dále rozdělit na spalování na stacionární vrstvě BFBC - Bubblig Fluidized Bed Combustion a spalování na cirkulující fluidní vrstvě CFBC - Circulation Fluidized Bed Combustion [Basu 2006, 2015]. Technologie BFBC a CFBC se liší v rychlosti proudícího vzduchu skrz fluidní lože, ve velikosti zrn inertního materiálu tvořícího fluidní vrstvu a ve způsobu samotného hoření paliva. U BFBC dochází k hoření paliva ve spodní části kotle, fluidní vrstva je ukončena hladinou a nedochází tak k úletu částic. CFBC využívá vyšších rychlostí vstupujícího vzduchu, kdy není patrná hladina fluidní vrstvy. Vlivem turbulencí a cirkulace dochází k lepšímu spalování a homogenitě lože. Při CFBC dochází k unášení lehkých částic, které jsou následně odloučeny v cyklónech a vráceny zpět do fluidní vrstvy [Basu 2006; Ochodek et al. 2007]. CFBC se tak vyznačuje velmi vysokou účinností vyhoření paliva dle [Basu 2015] 98 až 99,5 %. BFBC nachází uplatnění u zařízení s nižším výkonem do 20 MW, CFBC naopak u technologií s instalovaným výkonem vyšším než 30 MW, tedy zejména v energetice. Tato práce se zabývá zpracováním fluidních popílků z elektráren Ledvice a Tisová, je tedy zaměřena na využití VEP z CFBC. Vedlejší produkty BFB nejsou předmětem zájmu této práce. Kromě neupravené zeminy je jako referenční vzorek uveden i popílek z vysokoteplotního spalování na pevném roštu z elektrárny Mělník.

3.5.2. Odsíření pomocí vápna

Při CFBC je palivo (černé uhlí, hnědé uhlí, biomasa a další) předem rozdrobeno na velikost zrna cca 20 mm a společně s vápencem vháněno do kotle proudem vzduchu 5 - 10 mm/s, kdy dochází k turbulentnímu proudění této směsi, a tím k účinnému vyhoření paliva. Samotné spalování probíhá na fluidní vrstvě, která je tvořena inertním materiálem, nejčastěji křemičitým pískem o zrnitosti 0,2 až 0,4 mm. Přidaný sorbent, vápenec (CaCO_3), případně dolomit, za vhodných teplotních a aerodynamických podmínek reaguje přímo v kotli s oxidem siřičitým (SO_2) a výsledný tuhý produkt (CaSO_4) je součástí popelu viz. chemické vyjádření, rovnice (2) a (3) (Wang et al., 2009). Vzniklý produkt pak představuje směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO_3), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Zbytkové vápno je přítomno v popelu ve formě měkce páleného vápna (Frýzová, 2012), které vykazuje schopnost dále hydratovat. Typické množství měkce páleného vápna v popílku se pohybuje okolo 15 %, se zpříšňujícími limity na odsíření lze do budoucna očekávat nárůst podílu až na 30 %.





Obrázek 16: Schéma fluidního spalování v uhelné elektrárně [skupina ČEZ]

3.5.3. Vedlejší produkty FBC

Fluidní popílek (FBCA), jako vedlejší produkt FBC, lze rozdělit na tzv. úletový a ložový popílek. Úletový popílek je popílek zachycený ve filtrech (cyklonové, elektrostatické, textilní, nebo kombinace předchozích). Ložový popílek je potom popel tvořený hrubšími částicemi, který zbyde na roštu po vyhoření paliva. Oba druhy popílků mají odlišné fyzikální (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypná hmotnost), chemické a mineralogické vlastnosti. Mineralogické složení popílků je závislé především na druhu a obsahu minerálů ve spalovaném uhlí a na stupni jejich tepelné přeměny. Fyzikální a chemické vlastnosti jsou závislé na velikosti popílkových zrn, kterou významně ovlivňuje obsah nespáleného podílu. Podle granulometrie se nejvíce klasickým popílkům podobá fluidní popílek z cyklónů, naopak fluidní popílek z lůžka svou nestejnorodostí chemických vlastností připomíná spíše písek. Rozhodující faktor, který výrazně ovlivňuje granulometrii popílků, je obsah prchavých složek a macerátové složení spalovaného uhlí. Z hlediska posuzování vyluhovatelnosti je důležitý měrný povrch, jehož velikost je ovlivňována množstvím nedopalu v popítku.

3.5.4. Současné využití vedlejších produktů FBCA

V současné době jsou Vedlejší Energetické Produkty (VEP) ve stavebnictví využívány jen minimálně, cca 20 - 30 %, dle [Fečko 2005] je většina VEP neefektivně skládkována, případně využita pro zavážku starých důlních děl nebo rekultivaci krajiny. V ČR tvoří fluidní popílků (FBCA) zhruba 13 % všech VEP. Každý rok je tak nutné zpracovat nebo uskladnit cca 1,5 miliónu tun VEP z fluidního spalování. Toto množství stále stoupá s postupnou modernizací stávajících provozů a s instalací nových fluidních kotlů. Všeobecnou snahou je tyto odpadní produkty recyklovat a hledat pro ně další využití. Nové aplikace se snaží využít schopnosti FBCA dále hydratovat a vytvářet tak poměrně pevné struktury. FBCA tak může nalézt využití například jako výplňový materiál

protipovodňových hrází [Mráz 2015], při výstavbě popílkových hrází za účelem omezení endogenních požárů při těžbě černého uhlí [Pomykala 2014], úpravě nevhodných a podmíněčně vhodných zemín [Šedina 2016, Stehlík 2017], případně jako náhradu hydraulických pojiv. Poslední zmiňovaná oblast týkající se částečné substituce hydraulických pojiv, či jejich úplné náhrady nově vzniklými pojivy na bázi CFBA, je předmětem mnoha studií nejen u nás, ale i v zahraničí [Dung 2013; Rathbone 2010, Jewell 2009], a poukazuje na efektivní a smysluplné využití odpadních produktů a jejich přeměnu na cenný materiál. V ČR probíhá několikaletý výzkum mikromletých pojiv na bázi FBCA pro uplatnění v silničním stavitelství. V současné době nalézáme smysluplné využití těchto produktů zejména v technologiích studené recyklace, kdy pojiva na bázi fluidních popílků vykazují obdobné vlastnosti jako standardní hydraulická pojiva. [Valentin 2012, 2016; Suda 2012] poukazují na možnosti a některé limity použití neupravených fluidních popílků a popílků upravených pomocí vysokorychlostního mletí. Dlouhodobou snahou je i využití neupraveného FBCA v oblasti úpravy místních zemín, určených pro konstrukce silničních staveb [Šedina 2016; Hopkins and Bergham 1999; Mráz 2016, Bernardo 2004], kde je využito schopnosti FBCA hydratovat při úpravě místních zemín.

Možné překážky pro širší využití FBCA jsou objemová nestálost a kolísavá kvalita. Při styku FBCA s vodou v mnoha případech dochází k výraznému bobtnání a tvorbě ettringitu [Brandštetr a Havlica 1996; Rathbone 2010; Jóźwiak-Niedźwiedzka 2008; Monetenegro 2005]. Bobtnání směsí s FBCA je pravděpodobně spojeno i s vysokou namrzavostí těchto směsí, na kterou upozorňuje [Stehlík 2017]. V případě zkoumání fluidních popílků z elektráren Ledvice a Tisová, které jsou rovněž předmětem zájmu této studie, popisuje [Mráz 2016], který rovněž poukazuje na objemové změny, vznik ettringitu $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ a také thaumasitu $\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 24\text{H}_2\text{O}$. Pro využití fluidních popílků je tak nutné hledat aplikace, kde nedochází ke styku FBCA s vodou, případně je nutné FBCA nebo výrobky z něj modifikovat vhodnými přísadami a pojivy, tak aby bylo objemovým změnám zamezeno.

Samostatnou kapitolou je kvalita vedlejších produktů, která je přímo úměrná nejen kvalitě spalovaného uhlí, ale i kvalitě přidávané biomasy, sorbentu, případně dalších látek vstupujících do spalovacího procesu. Problematické z hlediska kvality FBCA je spoluspalování biomasy, kdy technologie fluidního spalování umožňuje spoluspalování biomasy až do 20 % [ČEZ, 2016]. Na možné problémy, které jsou spojeny s nízkými charakteristickými teplotami tavitelnosti popela biopaliv, upozorňují [Buryan 2015, Wang 2012]. Při dosažení teploty tavitelnosti daného materiálu, v našem případě biomasy, dochází k fyzikálně-chemickým změnám ve struktuře popela, tzv. spékání popela z biomasy a vzniku tuhých zbytků o velikosti i několika desítek centimetrů. Tyto inkrusty mají samozřejmě vliv na materiálové a chemické složení popílku. V praxi se tak můžeme setkat s různou kvalitou a chováním vedlejších produktů nejen v rámci jednotlivých elektráren, ale lze předpokládat proměnlivou kvalitu v čase u jednotlivých zařízení tak, jak se mění kvalita vstupních zdrojů a množství přidávané biomasy, případně dalších látek.

3.6. Posuzované FBCB

V rámci posouzení uplatnitelnosti vedlejších produktů fluidního spalování pro hydraulicky stmelené vrstvy určené do podkladních vrstev vozovky byly posouzeny fluidní popílky z elektráren Tisová a Ledvice. Zároveň jako zástupce klasického roštového spalování byl pro některé zkoušky vybrán popílek z elektrárny Mělník. V návaznosti na výsledky byla u vybraných popílků provedena analýza složení pomocí rentgenové difrakce (XRD).



Obrázek 17: FBCB-LL (vlevo nahoře); FBCB-TL (vpravo nahoře);
FBCB-TU (vlevo dole); Popílek Mělník (vpravo dole)

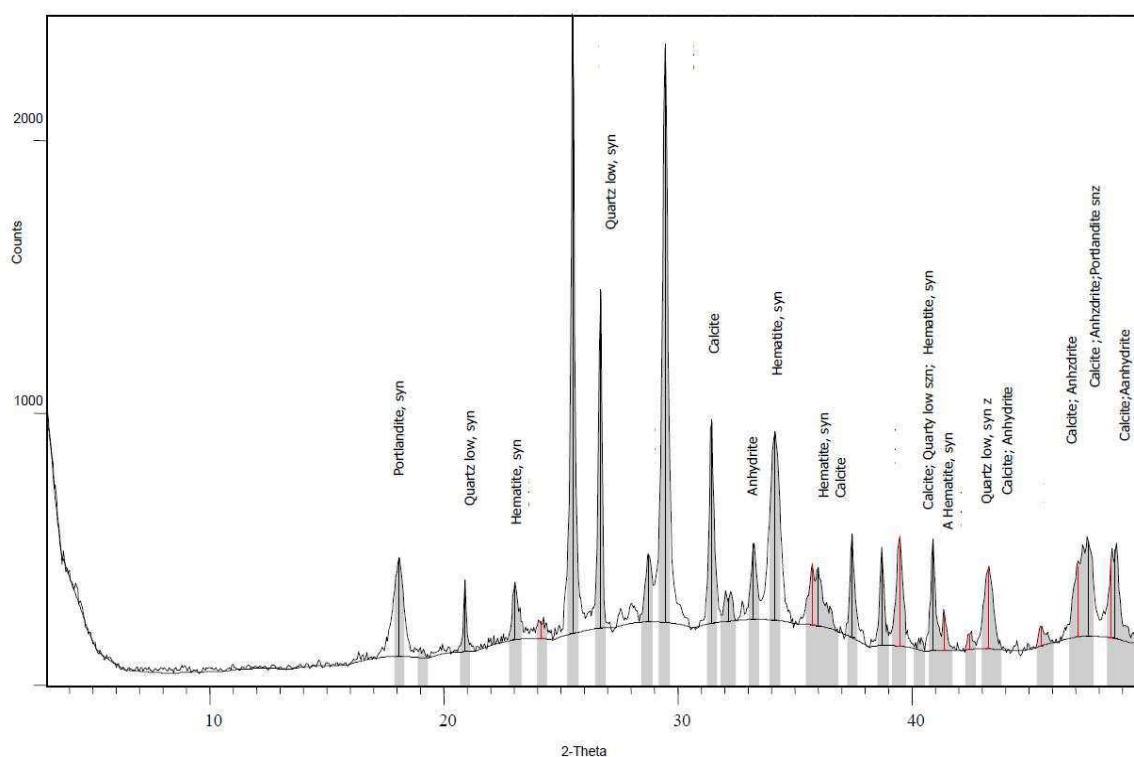
3.6.1. FBCB-TU a FBCB-TL Fluidní popílek Tisová úlet a lože

Elektrárna Tisová se nachází v sokolovské hnědouhelné pánvi v podhůří Krušných hor a do provozu byla uvedena v roce 1954. Podobně jako celá řada elektráren prošla po roce 1989 řadou modernizací za účelem snížení vypouštěných emisí. V roce 1995 a 1997 byly v elektrárně instalovány dva nové fluidní kotle s celkovým výkonem 700 t/h. Jelikož technologie fluidního spalování umožňuje spoluspalování biomasy, je k hnědému uhlí přidávána i dřevní štěrpa a to až do 20 % spalovaného materiálu. Provedená XRD analýza charakterizuje pouze FBCB-TU, jelikož předkládané výsledky FBCB-TL nevykazovaly parametry vhodné pro zabudování do konstrukce vozovky a přesné posouzení chemické složení nebylo předmětem zájmu této práce. Výsledky XRD analýzy FBCB-TU potvrdily předpokládaný charakter fluidního popílku, který je typický pro spalování hnědého uhlí. FBCB-TU vykazuje vyšší podíl anhydritu, křemene a některých dalších alumosilikátových minerálů. V menším množství je zastoupen také portlandit, kalcit a vápno [Suda 2017]. Tabulka obsažených prvků

a difraktogram z provedené XRD analýzy jsou uvedeny v tabulce 2 a na obrázku 18.

Ref. kód	Skóre	Název složky	Název minerálu	Chemické označení	SemiQuant [%]
01-072-0916	65	Calcium Sulfate	Anhydrite	Ca(SO ₄)	28
01-087-2096	55	Silicon Oxide	Quartz low, syn	SiO ₂	20
00-044-1481	51	Calcium Hydroxide	Portlandite, syn	Ca(OH) ₂	6
01-089-0596	42	Iron Oxide	Hematite, syn	Fe ₂ O ₃	3
01-072-4582	39	Calcium Carbonate	Calcite	Ca(CO ₃)	11
01-077-2010	38	Calcium Oxide	Lime, syn	CaO	2
04-014-8515	34	Titanium Oxide	Anatase, syn	TiO ₂	5
04-014-0868	29	Calcium Aluminum Silicate	Gehlenite, syn	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	6
00-041-1486	19	Calcium Aluminum Silicate	Anorthite, ordered	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	18

Tabulka 2: Vyhodnocení XRD analýzy FBCB-TU



Obrázek 18: XRD analýza - FBCB-TU

3.6.2.FBCB-LL - Fluidní popílek Ledvice lože

Elektrárna Ledvice leží na východním úpatí Krušných hor, do provozu byla uvedena v roce 1969. V současné době v elektrárně funguje fluidní kotel instalovaný v rámci modernizace provozu v letech 1996-1998. Jako hlavní surovina pro výrobu elektrické energie zde slouží hnědé uhlí z nedalekého dolu Bílina. Materiál posuzovaný v rámci práce byl odebrán z lože fluidního kotle, úletový popílek nebyl v rámci této práce posuzován. FBCB-LL se vyznačuje vyšším podílem anhydritu, křemene a poměrně nízkým zastoupením vápna [Suda 2017].

Ref. Code	Score	Compound Name	Mineral Name	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-080-6361	66	Calcium Sulfate	Anhydrite	Ca(SO ₄)	48
01-087-2096	64	Silicon Oxide	Quartz low, syn	SiO ₂	28
01-078-4614	47	Calcium Carbonate	Calcite, syn	Ca(CO ₃)	9
01-078-0315	57	Calcium Hydroxide	Portlandite, syn	Ca(OH) ₂	8
04-004-5476	57	Calcium Oxide	Lime, syn	CaO	3
04-014-8515	27	Titanium Oxide	Anatase, syn	TiO ₂	2
04-018-6455	17	Calcium Iron Oxide		CaFeO ₃	2

Tabulka 3: Vyhodnocení XRD analýzy FBCB-LL

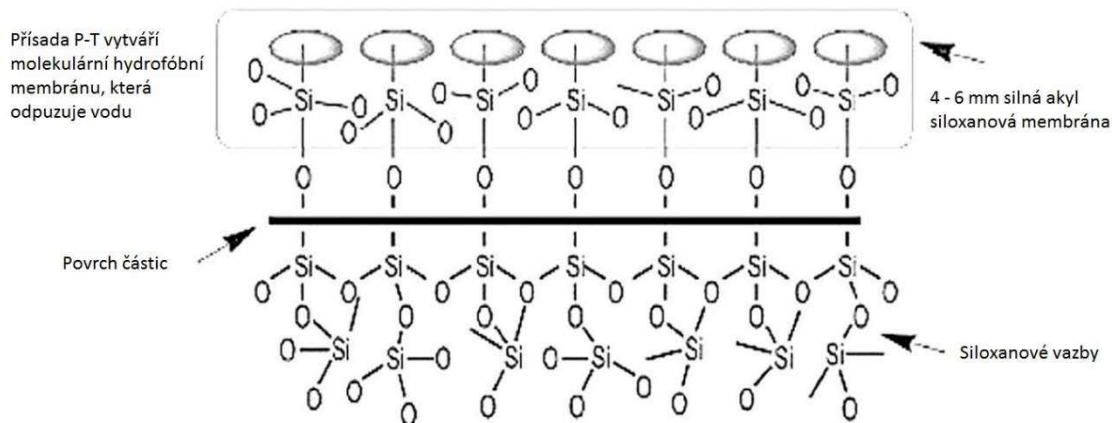
4. Přísady

V předkládané práci jsou uvedeny zejména přísady sloužící k hydrofobizaci směsi, tedy přísady, které mají potenciál neutralizovat nežádoucí látky v zemině, případně úplně zabránit těmto látkám, aby ovlivnily proces hydratace cementu. V důsledku toho pak není potřeba zvyšovat dávkování pojiva, které by bylo spotřebováno na neutralizaci nežádoucího chemického prostředí v zemině. Některé z přísad ovlivňují samotnou hydrataci cementu, kdy mění vlastní chemický proces hydratace, případně jen zpomalují hydrataci pojiva, s čímž souvisí pozvolnější uvolňování hydratačního tepla. Výsledkem je zvýšená odolnost směsi proti vzniku smršťovacích trhlin, které bývají častým problémem u cementem stmelených vrstev. Výše uvedené vlastnosti mohou mít pozitivní vliv zejména na zlevnění staveb, kdy zhotovitel může použít materiál uložený v místě budoucí stavby a nemusí nákladně zeminu odtěžit a nahradit novým, kvalitnějším materiálem. Zároveň můžeme tyto úpravy označit jako ekologické, kdy odpadají již zmíněné přesuny materiálů, a zároveň je s využitím místního materiálu eliminována těžba nových materiálů.

Současné využití přísad je spíše v technologiích samotné úpravy zeminy, kdy přidáním přísad je zlepšena zpracovatelnost vrstvy a zároveň se vrstva stává hydrofobní, je tedy méně náchylná na změny vodního režimu. V rozvojových zemích aplikace těchto přísad pomáhá udržovat provozuschopné komunikace například v místech častých monzunů, která jsou náchylná na střídání suchého období s obdobím dešťů. V Evropě pak smysl těchto aplikací vidíme spíše pro úpravu vozovek s nižší třídou dopravního zatížení, případně ve specifických aplikacích sanace chemicky nebo jinak znečištěných zemin. Negativa těchto přísad spočívají zejména v jejich samotné aplikaci, kdy jsou přísady rozpouštěny ve vodě. Tato aplikace může fungovat v případě, kdy je zemina dostatečně vysušená. V podmínkách ČR se však spíše vyrovnáváme se zeminami, které jsou nad optimální vlhkostí a pro jejich správné zpracování je naopak nutné vlhkost snížit například použitím vápna. Důležitou otázkou, kterou se práce zabývá, je pak vliv samotných přísad na hydrataci cementu. Tento problém je řešen i v případě přísady, která má zaručit bezprašnost pojížděných povrchů.

4.1. Přísada P-T

Nanotechnologická 100% organická patentovaná přísada rozpustná ve vodě, byla vyvinuta indickou společností pro ošetření cest na bázi zhutněné zeminy, případně zeminy a hydraulického pojiva. Přínos této přísady lze spatřovat zejména v hydrofobizaci směsi, kdy výsledná vrstva je velmi odolná proti vniknutí vody, a s tím souvisí zlepšené návrhové parametry, zejména odolnost proti mrazu a vodě. Pomocí siloxanové vazby (Si-O-Si) vznikne na povrchu zrn zeminy velmi tenká prodyšná membrána, která je velmi stabilní a chemicky odolná a zároveň plní hydroizolační funkci [Lekha 2013, Zydex industries 2014].

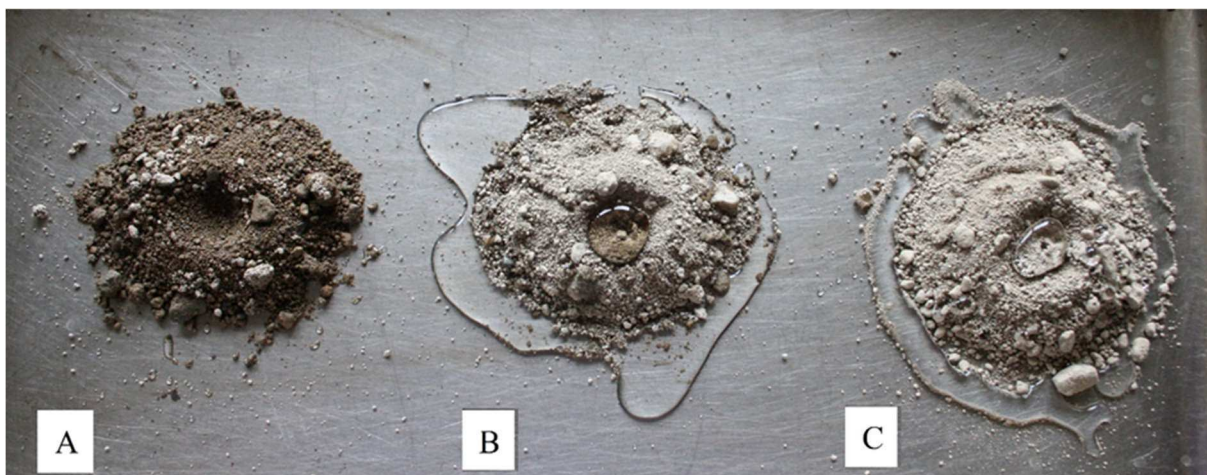


Obrázek 19: Povrch ošetřený přísadou [Zydex industries 2014]

V současné době je přísada aplikována ve formě vodného roztoku na ztuhlý povrch, který impregnuje, a povrch se tak stává hydrofobním. Praktické aplikace jsou známy na území Indie, v typicky tropickém podnebí, které se vyznačuje extrémní vlhkostí v období monzunů. V situaci, kdy je pojižděný povrch komunikace velmi často tvořen pouze ztuhlou zeminou, v lepším případě stmelenu hydraulickými pojivy, dochází velmi rychle k porušení této vrstvy a její degradaci. Příklad svou podstatou povrch komunikace uzavře (impregnuje) a voda je velmi rychle odvedena mimo pojižděný povrch, který tak vykazuje výrazně vyšší trvanlivost.

Z hlediska možných aplikací přísady přímo do směsi, za účelem úpravy zemin v podloží, je v současnosti známo několik prací, které se zabývají zlepšením zeminy bez použití hydraulických pojiv. [Chaudhari 2016] uvádí nárůst hodnoty CBR na desetinásobek původní hodnoty naměřené na referenční zemině. [Patel 2015] uvádí zlepšení plastického chování zeminy po ošetření přísadou P-T (0,041%) v kombinaci s dalšími přísadami. Tyto směsi ovšem nejsou upraveny cementem, který s sebou může nést určitá omezení z hlediska použitých přísad.

Cílem práce bylo prověřit chování přísady v případě použití hydraulických pojiv, její vliv na výsledné parametry směsi a zhodnocení přínosů a případných negativ, která by mohla být s touto technologií spojena. Po prvotních pokusech (obrázek 20) a konzultaci s výrobcem, bylo množství přidávané přísady stanoveno na 0,01 % ošetřované zeminy.



Obrázek 20: Aplikace přísady P-T A) 0 %, B) 0,01 %, C) 0,1 %

4.2. P-U

Kapalná anorganická přísada spolupůsobící s cementem vyráběná lotyšskou společností KTD Group. Pomocí výměny iontů neutralizuje nežádoucí chemické prostředí v zemině a zároveň zabraňuje pronikání vody do konstrukce vozovky. Umožňuje tak zpracovat i chemicky znečištěné zeminy, kdy zabraňuje vyplavování nežádoucích látek do okolí. Typickým příkladem je zpracování zemin znečištěných pohonnými hmotami, oleji, mazivy a dalšími nežádoucími látkami, které se vyskytují na místech bývalých skladů, průmyslových areálů, letišť atd. [KTD Group 2014]. V současnosti je s těmito zeminami nakládáno jako s nebezpečným odpadem, a dle platné legislativy je nutné je odtěžit a skladovat na speciálních skládkách, což je poměrně ekonomicky náročné. Vrstvy stmelené pomocí přísady P-U naleznou nejčastěji uplatnění v podkladních vrstvách vozovky. Nemalým přínosem je i výrobcem deklarovaná zlepšená odolnost vůči tvorbě trhlin a jejich prokopívání do vyšších konstrukčních vrstev vozovky. Pro úpravu je tak možné použít i vyšší dávkování cementu, bez nutnosti vrstvu opatřit dilatačními spárami, které jsou vždy problematickým místem konstrukce, zvláště vyskytují-li se v podkladních vrstvách. Příklad deklaruje zpracovatelnost široké škály zemin, jediným limitem jsou v tomto případě organické látky obsažené v zemině, které by neměly přesáhnout 5 % podílu [KTD Group 2014], což koresponduje se současnými doporučeními evropských norem. Příklad se dává společně s vodou přímo do míchacího bubnu zemní frézy. Po konzultaci s výrobcem bylo dávkování přísady stanoveno na 0,15 l/m³ upravovaného materiálu.

4.3. P-P

Kapalná přísada na nano-polymerní silikátové bázi spolupůsobící s hydraulickými pojivy, zejména s cementem. Hlavní přínos přísady lze spatřovat ve vytvoření hydrofobní ochrany, kdy je vytvořena 3D (trojrozměrná) struktura vázaná na polymerizaci cementu. Výsledná vrstva vykazuje zvýšenou odolnost vůči pronikání vody, snižuje její kapilární absorpci, UV záření, zamezuje tvorbě solí (síranů a siřičitanů) a zabraňuje jejich přenosu v celém materiálu

(tzv. výkvěty – vysolování), zároveň nebrání propustnosti vodní páry. Přísada je v současné době úspěšně testována na možné použití v oblasti impregnace betonových konstrukcí (mosty, sklady, parkoviště) a výrobků z betonových prefabrikátů. V oblasti podkladních vrstev lze tuto přísadu aplikovat na oblast zemin upravených hydraulickými pojivy zejména v podloží a v podkladních vrstvách vozovky. Tato nově vyvinutá přísada a její chemické složení je chráněno patentovým úřadem. V současné době není známo uplatnění této přísady v praxi. Dávkování přísady se váže k množství přidávaného cementu, standardní dávkování se pohybuje mezi 0,8-1,6 % na suchý podíl cementu.

4.4. P-MgCl₂

Přísada P-MgCl₂ oproti ostatním uváděným přísadám neslouží k hydrofobizaci směsi. V současné době vidíme její aplikaci u nestmelených vrstev za účelem jejich bezprašnosti a určité stabilizace povrchu. Jedná se o čirou, lehce nažloutlou kapalinu, která obsahuje vysoce koncentrovaný chlorid hořečnatý (min. 30 % hmot.), díky kterému ošetřený povrch vykazuje výraznou hygroskopii, tedy schopnost snadno pohlcovat vzdušnou vlhkost. P-MgCl₂ je tak účinným nástrojem pro snížení prašnosti nezpevněných komunikací, kdy přísada udržuje ošetřené povrchy vlhké, stabilní a bezprašné, díky navázání jemných prachových částic na částice větší zrnitosti. V současné době byla přísada aplikována na staveništní komunikaci v okolí dálnice D8 v blízkosti obce Řehlovice, kdy bylo cílem odstranit nadměrné množství polétavého prachu. V práci je prezentován vliv přísady na stmelené vrstvy, kdy byla přísada aplikována jak postřikem na povrch, tak přímo do hutněné směsi. Standardně je na upravenou vrstvu nanášena přísada kropicími vozy v dávce 1 – 2,5 l/m².

5. Hydraulická pojiva

Současné silniční stavitelství si bez použití hydraulických pojiv už neumíme ani představit. Pokud se zaměříme na oblast České republiky, využívání hydraulických pojiv zejména cementu a vápna má dlouholetou tradici související s bohatou surovinovou základnou, kdy ČR disponuje dostatkem zdrojů pro jejich výrobu. Mnohaletá tradice má bohužel i své nevýhody, kdy jsou hydraulická pojiva považována za všelék a jejich aplikace se navrhuje i na místech, kde je to neopodstatněné, nebo přímo nevhodné. Návrh složení tak často probíhá bez předchozího posouzení zeminy, není výjimkou návrh úpravy podloží až během provádění, kdy se objeví problém s únosností podloží. Absence geotechnického průzkumu tak často vede k neefektivnosti úpravy, kdy by bylo možné navrhnout účinnější a ekonomicky výhodnější variantu například mechanické úpravy, pomocí vhodnějšího pojiva, nebo pomocí kombinace pojiv. V ČR je nejrozšířenější používání pojiv na bázi cementu, vzdušného vápna, nebo pojiv směsných, které kombinují výhody jak cementu, tak vápna. Současné normy povolují i použití alternativních úprav na bázi strusek popílků, případně fluidních popílků, bohužel případy z minulosti způsobily nedůvěru v tyto materiály a tak i v současných předpisech nalezneme rozpory. Například u zemin stabilizovaných hydraulickými pojivy norma 14227-15 použití vysokopecní strusky umožňuje, oproti tomu TP 94, uvádí: *Vysokopecní struska se k úpravě zemin v České republice nepoužívá. Většina produkce vysokopecní strusky je zpracovávána v cementárenském průmyslu na výrobu struskových a struskoportlandských cementů.* Takovýchto rozporů se v českých předpisech vyskytuje celá řada.

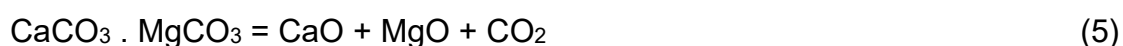
Používání hydraulických pojiv ve smyslu, jak ho chápeme v dnešní době, se rozšířil zejména v posledních dvou stoletích s masivním nárůstem výstavby a s postupným vývojem zejména portlandských cementů. Historicky pod pojmem hydraulické pojivo rozumíme obecný termín pro látku, která po smíchání s vodou tuhne a je používána pro spojování inertních materiálů. Jeden z nejstarších nálezů se datuje 7000 let př. n. l., kdy při výstavbě silnice u Yiftah El v Galilei (Izrael), byla odkryta betonová podlaha. Jako pojivo bylo pravděpodobně použito nehašené vápno, které po smíchání s kamenivem a vodou ztuhlo a vytvořilo jednu z prvních betonových směsí. Další příklad použití hydraulických pojiv lze nalézt v Gíze, kdy starověcí Egypťané kolem roku 2500 př. n. l. použili pojivo na bázi cementu pro spojení kamenných bloků Velké pyramidy v Gíze. 500 let př. n. l. staří Řekové běžně používali malty na bázi vápna při výstavbě chrámů jako spojovací prvek mezi kameny a cihly, případně pro tvorbu dekoračních prvků. Samotný název cement pochází z latinského „caedere“ tlouci, nebo spíše z výrazu „caementa“ resp. „structurae caementa“. Pojem cement přitom vznikl náhodou, při překladu díla Naturalis historia od Gaia Plinia Secunda, kde byl pro slovo „caementa“ použit výraz „ciment“. Odtud přešel tento výraz do odborné literatury jako označení pro maltoviny tvrdnoucí pod vodou v pevnou hmotu [Jirásek 2008]. Základ cementů tak jak je známe dnes, položil v roce 1796 James Parker, vlastník patentu na cement z „kentského“ vápence, který vykazoval vhodný obsah jílovitých složek. Na začátku 19. století L. J. Vicat

potvrdil možnost dodatečně přidávat vhodné jílové složky, pokud se nevyskytují v samotném vápenci. Patent na výrobu portlandského cementu byl přiznán v roce 1824 Johnu Aspdinovi, zedníkovi z Leedsu. Název portlandský byl odvozen od barvy betonových prvků z něj vyrobených, která se nápadně podobala velice oblíbenému šedobílému vápenci z ostrova Portlandu. „Vynález“ portlandského cementu „dokončil“ I. Ch. Johnson, který roku 1844 upozornil na důležitost přesného dodržování a stálého sledování správného míšícího poměru surovin. Hlavní důraz kladl na ostré pálení, aby nastalo slinutí [Bárta 1961, Jirásek 2008]. V současné době je proces výroby cementů modifikován přidáváním přísad, které ovlivňují hydratační vlastnosti, případně je samotný cement částečně nahrazován vhodnými vedlejšími produkty zejména z metalurgického a energetického průmyslu. Běžně se tak setkáváme s cementy s vyšším podílem mleté granulované vysokopeční strusky, popílků, a dalších pucoánů. Současné snahy vedou k vývoji nových pojiv na bázi těchto materiálů, které by dokázaly cement zcela, nebo alespoň částečně nahradit. Kromě ekonomických výhod a zpracování odpadních produktů jde i o poměrně velkou zátěž životního prostředí, která je s výrobou cementů spojena a která by aplikací alternativních pojiv byla částečně eliminována.

V Čechách registrujeme první pokusy o výrobu cementů portlandského typu kolem roku 1860, v roce 1865 již vzniká první cementárna na území Čech v Bohusudově. Další cementárny vznikají v průběhu 70. let 19. století zejména v okolí Prahy (1870 – Podolí; 1872 – Radotín; 1900 v Berouně). V současné době produkují cementárny na území ČR cca 3 937 000 tun ročně [Svaz výrobců cementu ČR, 2016].

5.1. Vápno

Z hlediska použití pro stavební účely rozlišujeme takzvaná vzdušná vápna a vápna hydraulická. Vápna hydraulická se ovšem na území ČR nevyrábějí a užívá se tak spíše ve speciálních technologiích mimo potřeby silničního stavitelství. Vzdušné vápno je naopak velmi často používáno k úpravě podloží vozovky za účelem snížení vlhkosti zeminy a zlepšení její zpracovatelnosti. Vzdušné vápno je technický název pro oxid vápenatý s podílem oxidu hořečnatého. Je vyráběno pálením čistých nebo dolomitických vápenců pod mez slinutí (900 – 1300 °C). Dle teploty a rychlosti výpalu jsou rozlišována vápna tvrdě pálená (kolem 1300 °C), vhodná pro výrobu pórobetonu, naopak měkce pálená vápna (cca 900 °C), jsou reaktivnější, pórovitější, vykazují vyšší aktivitu a jsou více vhodná pro výrobu malt a omítek. Během pálení, takzvané dekarbonizace, vzniká nehašené vápno, které je nutné dále upravit. Proces dekarbonizace je popsán jednoduchými chemickými rovnicemi (4) a (5). Je založen na rozkladu vápence CaCO_3 na oxid vápenatý CaO a uvolňující se oxid uhličitý CO_2 . V případě dekarbonizace uhličitánu vápenatého navíc vznikají oxidy hořčíku [Jirásko 2008].

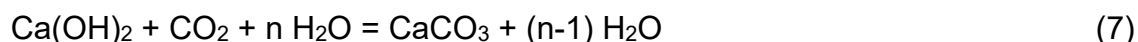


Druhou fází výroby je takzvané hašení vápna, které probíhá dvěma způsoby a to mokrou nebo suchou cestou (rovnice (6)). Mokrá metoda se zpravidla užívá až na stavbě za výrazného přebytku vody cca 240 – 320 l na 100 kg vápna. V případě suché metody je vápno smícháno přímo ve vápence s 60 – 70 l vody na 100 kg vápna, dochází k procesu hydratace spojeného s vývinem hydratačního tepla, kdy dochází k odpaření přebytečné vody a výsledným produktem je takzvaný vápenný hydrát [Jirásko 2008], tedy vápno v podobě, v níž je běžně vnímáno veřejností.



5.1.1. Tuhnutí vápna

Použití vápna má řadu omezení a jedním z nich je nutnost odpaření přítomné vody v sesychajícím koloidním gelu. Z tohoto důvodu malty ze vzdušného vápna, na rozdíl od cementů, netuhnou pod vodou. Přidáním vody je nastartován hlavní proces tvrdnutí vápenné malty takzvaná karbonatizace. Za přítomnosti volného vzdušného CO₂ dochází k odpařování vody a vzniku uhličitanu vápenatého CaCO₃ (uhličitanové tvrdnutí) [Jirásko 2008]. Vzhledem k nízké koncentraci CO₂ ve vzduchu (0,03 % objemu) probíhá proces karbonatizace, vyjádřený rovnicí (7), velmi pomalu.



5.1.2. Účinky vápna při úpravě zemin

Působení vápna lze rozdělit do několika fází, kdy rozlišujeme krátkodobé a dlouhodobé účinky vápna na upravovanou zeminu.

Krátkodobé účinky jsou velmi rychlé, kdy je takřka okamžitě nastartována exotermická reakce, při které probíhá hydratace vápna za přítomnosti vody a dochází jednak k úpravě vlhkosti zeminy, kdy se přidáním 1 % vápna snižuje vlhkost v zemině o 1-3 %, tak k úpravě materiálu, kdy volné ionty Ca⁺ reagují s jílovitými materiály a v jejich struktuře nahrazují Na⁺ ionty a K⁺ ionty. Struktura jílu se mění na zrnitou a jíly s plastickým charakterem se mění na materiály hrudkovité, které mají charakter spíše prachovitý či jemně písčité, což má vliv na zpracovatelnost takovýchto materiálů. Upravená zemina tak vykazuje lepší vlastnosti z hlediska indexu plasticity, citlivosti na vodní režim, zemina je pevnější a odolnější vůči účinkům vody a mrazu. Výsledkem přidání vápna je tedy velmi rychlé zlepšení zpracovatelnosti upravovaných zemin.

Dlouhodobé účinky probíhají mnohem pomaleji v rámci dnů až týdnů a méně známý faktem je, že k nim nemusí na rozdíl od změn krátkodobých vůbec dojít. Podstatou dlouhodobých změn jsou pucolánové reakce, pro něž je ovšem nutná dostatečná dávka pojiva, která způsobí zásaditost upravované zeminy a tím umožní průběh reakce. Při ní dochází působením zásaditého prostředí k rozpouštění SiO₂ a Al₂O₃ z jílových minerálů, vznikají gely hydrátů vápníku, křemíku a hliníku a z těchto gelů postupně krystalují nové minerály, které působí jako pojivo pro původní materiál a vytvářejí nové a mnohem pevnější struktury. Obvyklá dávka pojiva pro dosažení tohoto stavu se pohybuje kolem 3 %. Velmi významným faktorem je i teplota, kdy při teplotách pod

5 °C se proces takřka zastavuje. Zásadní vliv může mít i vyšší obsah organických látek, kdy je značná část pojiva spotřebována na neutralizaci huminových kyselin, které se z organických látek uvolňují. Reakci rovněž může ovlivnit i chemické složení upravovaných materiálů, například některé druhy jílu s vysokým obsahem jemnozrnných slíd. Například se jedná o zvětraliny krystalických břidlic. Nedochozí tedy nutně k tomu, že by po přidání vápna bylo dosaženo pevnější struktury, jelikož k dlouhodobému působení nemusí vůbec dojít. [TP 94]

5.2. Cement

Podle ČSN EN 197-1 je cement hydraulické pojivo, které po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů, po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Z hlediska použití rozlišujeme celou řadu cementů dle jednotlivých přísad a příměsí. Výroba spočívá v semletí takzvaných portlandských slínek a její proces lze rozdělit do tří základních kroků: příprava vstupní suroviny, pálení slínku a mletí cementu.

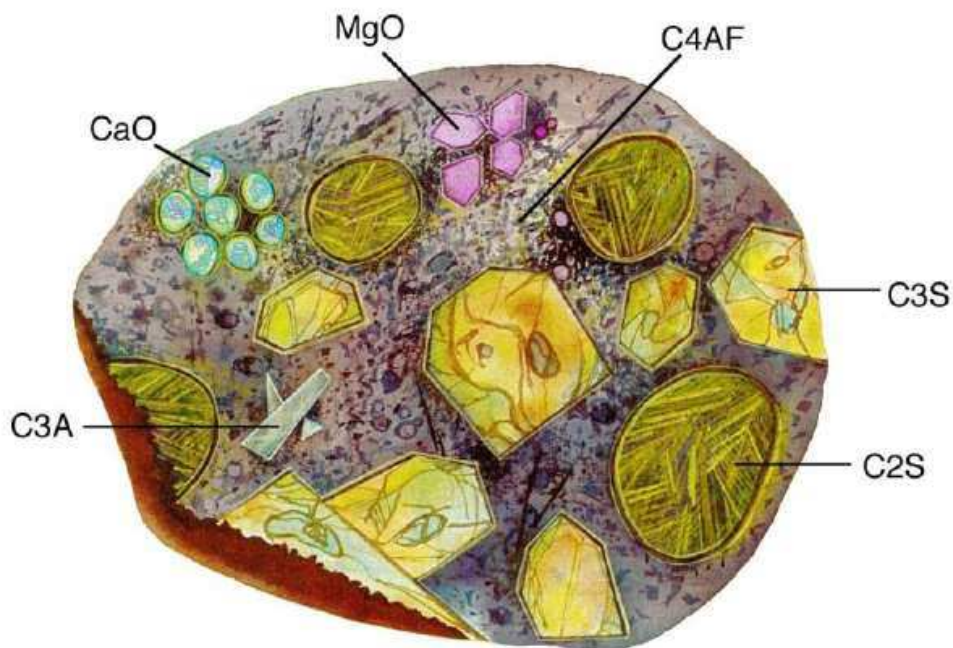
- **Příprava suroviny:** Vstupní surovina, která je více jak z 80 % tvořena lomovým vápencem, je nadrcena, předsušena, a následně po homogenizaci míšena s korekčními (křemičitý písek, bauxit,...) a pomocnými surovinami (černé uhlí, kazivec, ...). Podle způsobu mletí této směsi rozlišujeme dva základní postupy výroby cementů, mokrý a suchý způsob. V současné době je na území ČR využíván pouze suchý způsob, kdy veškeré procesy přípravy probíhají na vysušeném materiálu. V případě mokrého způsobu, byl materiál ve fázi přípravy navlhčen, obsah vody se pohyboval v rozsahu od 30 do 40 %. Navlhčení způsobilo snadnější mletí a lepší homogenizaci směsi, na druhou stranu byl tento postup velmi náročný na dodanou vodu a na následné sušení před samotným pálením.
- **Pálení slínku:** Samotné pálení předeřáté moučky probíhá nejčastěji v rotačních pecích při teplotách kolem 1450 °C, kdy dochází ke slinutí (spékání) materiálu a jeho nabalování do tvrdých hrudek o velikosti několika centimetrů. Vzniklý slínek je potřeba zchladit, přičemž proces zrání během chlazení výrazně ovlivňuje finální vlastnosti cementů po semletí. Rychlé chlazení zvyšuje výskyt sklovité (amorfní) fáze, a takto chlazené cementy se vyznačují vyššími pevnostmi a vyšší odolností vůči síranovým vodám. Naopak příliš pomalé chlazení může vést k nadměrnému vzniku γ -C₂S, který nemá prakticky žádné hydraulické schopnosti, a takto vyrobené cementy vykazují nižší kvalitu. Z hlediska zrání se jako optimální doporučuje pomalé chlazení až na úroveň 1250 °C a následně chlazení rychlé. Portlandský slínek obsahuje více než 20 druhů minerálních složek, zejména křemičitany (silikáty) a hlinitany (alumináty) vápenaté [Taylor 1997, Svoboda 2004, Jirásko 2008].

Zásadní vliv na finální parametry cementu přitom mají 4:

- C3S- Alit (45-60 %)
- C2S- Belit (15-30 %)
- C3A- Amorfni fáze (5-12 %)
- C4AF- Celit (10-20 %)

Kromě výše uvedených minerálů se ve slínku vyskytuje i volné vápno CaO (max 4 %) a MgO (max 6 %). Maximální přípustné hodnoty jsou stanoveny v závislosti na reakci CaO a MgO s vodou, která je sice poměrně pomalá, nicméně vede k výrazným objemovým změnám, při vyšším obsahu by tak mohlo dojít ke vzniku nežádoucích trhlin.

- **Mletí slínků:** Zcela nebo dostatečně zchlazený slínek je následně semlet společně s dalšími přísadami (například sádrovec, který zpomaluje tuhnutí) ovlivňujícími vlastnosti cementů do finální podoby jemně mletého anorganického pojiva s velikostí zrna od 1 do 250 μm (většina zrn má velikost od 5 do 50 μm). Parametrem jemnosti mletí je přitom měrný povrch, který má zásadní vliv na rychlost hydratace cementů. Běžné hodnoty měrného povrchu měřeného u cementů nižších tříd se pohybují v mezích 280 – 350 m^2/kg , u cementů vyšších tříd potom v rozmezí 350 - 500 m^2/kg [Taylor 1997, Ščučka 2013].



Obrázek 21: Řez zrnem portlandského cementu [Taylor 1997]

5.2.1. Hydratace cementu

Hydrataci cementu chápeme jako smíšení cementu s vodou za vývinu hydratačního tepla a vzniku krystalických struktur amorfního kalcium-silikátového-hydrátu (C-S-H), monosulfátů Afm, portlanditu a dalších. Nově vzniklé krystalické struktury vytváří velmi pevné vazby, čehož je ve velké míře využíváno ve stavebním průmyslu. Časový průběh od smíšení cementu s vodou, případně spojovaným materiálem, lze dle [Pytlík 2000; Peter C Hewlett 2004, Berek 2016, Jennings 2002] rozdělit do několika fází.

1. fázi (tzv. indukční) lze dále rozdělit na dvě podfáze

První (předindukční) se vyznačuje vysokou rychlostí uvolňování hydratačního tepla, po krátkou dobu (10 až 15 minut) a zahrnuje kontakt zrn cementu s vodou, kdy dochází ke smáčení zrn a k prvním reakcím se slínkovými minerály.

V rámci předindukční fáze dochází k disociaci trikalciem aluminátu C_3A a následné reakci s ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} („regulátor tuhnutí“), za vzniku ettringitu (Aft fáze, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$). Shodně dochází k reakci C_3S (alit) s vodou a na povrchu zrn cementu se utváří C-S-H fáze. V této hydratační fázi dojde k hydrataci pouze 2–10 % C_3S . Hydratace následně poklesne z důvodu špatně propustné vrstvy hydratačních produktů na nezhydratovaných zrnech cementu. [Hewlett 2004]

Pro druhou (indukční) podfázi je typické pomalé uvolňování hydratačního tepla, vzrůstající viskozita suspenze (počátky tuhnutí cementu), kdy dochází k úbytku silikátů a tvoří se zárodky krystalů C-S-H a CH (portlandit). Pokračuje tvorba Aft (ettringit) a voda proniká k zrnům cementu za vzniku dalších produktů hydratace. Druhá podfáze je ukončena cca po 1 až 2 hodinách od zamíchání. Pevnost v tlaku cementového tmele je v závislosti na druhu a typu použitého cementového pojiva zpravidla velmi nízká (do 100 kPa), výjimku tvoří cementy pro speciální účely, u kterých je žádoucí dosažení finální pevnosti v řádu hodin.

2. fázi (přechod do tuhého skupenství)

Je urychlujícím stupněm hydratace a trvá od 1-2 do 12-24 hod. od zamíchání. C_3S rychle reaguje za vzniku dlouhovláknitého silikátu C-S-H a krystalů portlanditu. Zrna cementu se k sobě přibližují tím, že prorůstají krystaly hydratačních produktů. V této periodě se vytvářejí základy mikrostruktury cementového kamene. Běžně používané cementy dosahují v této fázi pevnosti od 1 do 20 MPa.

3. fázi (stupeň stabilní struktury)

Vznikají fáze drobnovláknité C-S-H, ettringit postupně přechází na monosulfát AFm (aluminát ferrit monosulfát), dochází k hydrataci C_2Si (belit), snižuje se vývin tepla a hydratační reakce jsou řízeny difúzí. Tuto fázi lze rozdělit na období klesající rychlosti hydratace (asi 28 dnů) a na takzvané období „dozrávání“, které může trvat i několik let. V prostoru mezi zrny cementu nastává rekrystalizace fází. Objem hydratačních produktů je 2 až 2,2 krát větší než původní objem cementu.

Uvolňované hydratační teplo je závislé na:

- mineralogickém složení slínku a cementu
- typu přidávaných přísad
- jemnosti a způsobu mletí cementu (měrném povrchu cementu)
- teplotě, při které hydratace probíhá

5.2.2. Účinky cementu při úpravě zemin

Působení cementu na zeminu je pomalejší a složitější, než je tomu v případě vápna (popsáno v kapitole 5.1.). Úpravu pomocí cementu a jeho účinky lze rozdělit, stejně jako u vápna, na krátkodobé a dlouhodobé. Na rozdíl od vápna ale probíhají vždy a probíhají za dlouhodobého uvolňování hydratačního tepla.

Krátkodobým účinkem je opět snížení vlhkosti upravované zeminy, i když v případě cementu se udává pokles o cca 0,5 % na 1 % cementu, i přesto je potřeba při úpravě na tento fakt nezapomínat.

Dlouhodobé účinky zahrnují 3 fáze zrání (popsané v kapitole 5.2.1.), jejich důsledkem je pevnější struktura materiálu, který odolává účinkům vody a mrazu. Důležitým faktem je skutečnost, že cement na rozdíl od vápna tuhne i pod vodou.

5.3. SP-D

První aplikace směsných pojiv na bázi cementu a vápna je známá z Německa, kde bylo směsné pojivo aplikováno v roce 1994 na stavbě okružní komunikace u Peutenhausenu pro zlepšení podloží vozovky [Schode 2006]. Od té doby proběhla řada testů, které prokázaly vhodnost této kombinace obzvláště u zemin, kde je použití jedné za složek samostatně neefektivní. Na území ČR se problematikou směsných pojiv zabývají průmyslové závody již řadu let a nejinak je tomu i v případě posuzovaného SP-D. Jedná se o prachovité pojivo tvořené vhodnou kombinací mletých slínků a hydraulických pojiv, vyvinuté pro potřeby silničního stavitelství. V současnosti nachází využití zejména při stabilizaci a zlepšování zemin. Mezi hlavní výhody SP-D patří vysoká odolnost vůči síranům, prodloužení doby zpracovatelnosti směsi. Nemaleým přínosem je zpomalení nárůstu pevností v čase. Díky pozvolnější hydrataci pojiva dochází k eliminaci možnosti vzniku smršťovacích trhlin a je možné navýšit dávkování pojiva do směsi. V současné době je pojivo již poměrně dobře vnímáno odbornou veřejností a výhodou pro české zadavatele jsou i praktické zkušenosti s tímto pojivem u nás. Pojivo SP-D začíná být vnímáno odbornou veřejností jako plnohodnotný nástroj pro úpravu zemin v podloží vozovky, případně pro technologie stabilizace zemin v aplikacích určených pro podkladní vrstvy. Aplikace pojiva se nijak neliší od možností známých u tradičních druhů pojiv, jako je cement nebo vápno. Jelikož se jedná o směsné pojivo, vhodně kombinuje výhody cementu i vápna (kapitola 5.1.2. a 5.2.2.). V případě úpravy zeminy tak dojde k okamžitému zlepšení zpracovatelnosti zeminy, její únosnosti, případně k jejímu vysušení. Následně během zrání dochází k dlouhodobým procesům, kdy je pozitivně ovlivněna pevnost a odolnost směsi proti mrazu a vodě. Aplikace SP-D rozšiřuje škálu podmíněně použitelných zemin, které se po aplikaci pojiva stávají plnohodnotným podložím vozovky.

6. Alternativní pojiva

V současné době je stále více kladen důraz na životní prostředí a jeho ochrana tak ovlivňuje všechna odvětví průmyslu, cementářský nevyjímaje. I přes značnou modernizaci současných provozů, které jsou úspornější a vypouštějí daleko méně znečišťujících látek, než tomu bylo před 20-ti až 30-ti lety, je výroba hydraulických pojiv jedním z energeticky nejnáročnějších průmyslových procesů. Řadu let se tak objevují snahy vyrábět nebo modifikovat materiály, které splňují požadavky na hospodárnou produkci, jsou šetrnější k životnímu prostředí a zároveň vykazují podobné vlastnosti jako klasická hydraulická pojiva, jako je cement nebo vápno. Jednou z cest je i uplatnění vedlejších energetických produktů, které vykazují latentně hydraulický charakter. S touto myšlenkou se pracuje již řadu let a mnoho vedlejších produktů již bylo v cementářském průmyslu uplatněno jako částečná náhrada cementu. V současné době se tak běžně setkáváme s cementy, které kromě portlandského slínku obsahují také vysokopevní strusky, pucolány, křemičité popílky a další vhodné materiály. Výzkum pojiv, který je jedním z předmětů této práce, se snaží hledat alternativu k současným cementům, s cílem je částečně, nebo plně nahradit nejenom v technologiích silničního stavitelství. Posuzovaná pojiva jsou založena na bázi vedlejších odpadních produktů, zejména z energetického a metalurgického procesu. Nově jsou odpadní produkty, strusky, popílky, fluidní popílky a další, upraveny pomocí mechanické, případně mechano-chemické aktivace, kdy využíváme takzvaného vysokorychlostního mletí, případně chemické, například alkalické, aktivace. Práce se zabývá úpravou a využitím těchto materiálů jako náhrady standardních pojiv pro úpravu nebo stmelení zemin, případně jako pojiv pro technologie studené recyklace.

6.1. Vysokorychlostní mletí

Proces mletí, tedy zjemnění zrnitosti materiálu, rozbití zrn atd., je základní technologií prakticky všech současných průmyslových odvětví. Samotná technologie mletí je známa již z dob starověku, kdy byly používány jednoduché mlýny na úpravu potravin, léčiv, nebo mletí rud při zpracování kovů. S postupným vývojem se mletí stává jednou ze základních technologií pro řadu odvětví, kdy zejména aplikace v nových průmyslových technologiích vedla ke zdokonalení tohoto procesu a k vývoji nových efektivních mlýnů specifikovaných pro požadavky dané výroby. Klasické technologie mletí v mlýnech (kulových, prstencových, tyčových, kolových, válcových, kotoučových, vibračních atd.) jsou přitom energeticky poměrně neefektivní, neboť velká část energie je uvolněna ve formě tepla a nemůže být použita na zjemnění (zvětšení měrného povrchu) mletého materiálu. Vysokorychlostní mletí je jedním z typů vysokoenergetického mletí, které se vyznačuje velkým množstvím předané energie na jednotku upravovaného materiálu. Pojem vysokoenergetického ani vysokorychlostního mletí není nikde v literatuře přesně definován. S mletím v klasickém pojetí má společné všechny základní vlastnosti, tedy zjemnění zrnitosti, zvětšení měrného povrchu, otevření zrn atd. Na rozdíl od klasického mletí dochází však při vysokorychlostním mletí k určitým jevům (efektům), které nebyly pozorovány u klasického procesu mletí. Určitá část vynaložené

energie, která se u běžného mletí bez užitku přemění na teplo, je tak díky těmto jevům uchována ve zpracovaném materiálu [Faltus 2014, Valentin 2016]. Pozorovanými jevy u anorganických materiálů jsou například:

- mechano-chemická (mechanická) aktivace
- tvorba vyšších podílů mikronových částic a nanočástic
- v některých případech vyšší efektivita využití spotřebované energie na tvorbu nových povrchů.

Efekt mechano-chemické aktivace využívaný vysokorychlostním mletím umožňuje významně lepší využití energie vynaložené na mletí látky. To je dáno díky akumulaci její části v podobě zvýšené entalpie upravované látky. Efekt mechano-chemické aktivace umožňuje ve vysokorychlostních mlecích zařízeních:

- vyvolat chemické reakce v pevném stavu materiálu při mletí (např. oxidace či výměnné reakce)
- iniciovat fázové změny (nejen amorfizaci) v různých látkách
- vytvořit mechanické slitiny kovových materiálů v procesu mletí
- iniciovat katalytické reakce v organických i anorganických systémech v procesu mletí

Na obrázku 22 je znázorněn impaktovaný vysokorychlostní mlýn (desintegrátor), který byl použit při zpracování materiálů, které jsou prezentovány v rámci této práce.



Obrázek 22: Vysokorychlostní mlýn (vpravo); rozevřené mezikruží rotorů pro osazení mlecích elementů (vlevo) [Valentin 2016]

Výzkumem uplatnění produktů vysokorychlostního mletí v praxi se laboratoře ČVUT zabývají mnoho let, kdy se snažíme za pomoci této technologie zpracovat celou řadu odpadních produktů a najít pro ně nové využití. Technologie se tak používá pro zpracování vedlejších energetických produktů (VEP) jako jsou klasické a fluidní popílků, metalurgické strusky, dále se zaměřujeme na uplatnění jemně mletých vápencových odprašků a kalů, zpracování betonového recyklátu, případně zpracování pryže ze starých pneumatik. Pozitivní efekty procesu vysokorychlostního mletí se podařilo prokázat zejména při zpracování fluidních popílků, kdy jsou během procesu mletí narušeny stávající vazby a dochází k homogenizaci výsledného materiálu,

což přispívá k ovlivnění nežádoucích procesů, spojených s objemovými změnami materiálu při styku s vodou. Vysokorychlostní mletí je tak účinným nástrojem prevence vzniku například ettringitů, thaumasitů a dalších látek, které v minulosti ovlivňovaly efektivní využívání fluidních popílků v praxi. Řada z výše uvedených materiálů již dospěla do fáze, kdy je možné jejich uplatnění v praxi v různých odvětvích stavebního průmyslu: náhrada hydraulických pojiv, moderní mostní závěry, či potenciální náhrada filerů pro asfaltové směsi prováděné za horka. Princip zpracování materiálů pomocí vysokorychlostního mletí má tedy své opodstatnění a přispívá k efektivnímu zpracování materiálů, které byly dříve bez užitku skládkovány, nebo využívány neefektivně.

6.2. Alkalická aktivace

Alkalická aktivace materiálů za účelem nastartování latentně hydraulického chování je známá již řadu let, kdy jsou takto zpracovávány zejména vedlejší produkty energetického a metalurgického průmyslu. Pomineme-li některé teorie o užití alkalicky aktivovaných materiálů při stavbě pyramid v Egyptě, najdeme první zmínky o alkalické aktivaci v publikaci profesora Kuhla, který ve 30. letech minulého století popisuje možnou alkalickou aktivaci aluminosilikátů. V roce 1937 Chassevent popisuje reaktivitu strusek aktivovaných hydroxidem sodným a hydroxidem draselným. Z roku 1940 pochází práce Purdona, který se zabýval možnostmi využití bezslínkatých pojiv na bázi strusek, aktivovaných pomocí hydroxidu sodného. Přelomem pro praktické využití je potom výzkumná práce profesora Gluchovského z roku 1964, která vedla k průmyslovému využívání alkalicky aktivovaných pojiv. Předmětem Gluchovského zájmu nebyla pouze alkalická aktivace strusky, ale i dalších materiálů, jako jsou popílků, přírodní pucolány a jíly. Dalším velkým skokem bylo pojivo s polymerní struskou, které dostalo název geopolymery. Profesor Davidov (z Geopolymer Institute ve Francii) si na konci 70. let nechal patentovat výsledky výzkumu zaměřeného na alkalickou aktivaci metakaolinů a položil tak základy progresivního oboru, který s rozvojem moderních technologií nalézá stále širší využití [SHI 2006]. V roce 1980 byly alkalické aktivátory seřazeny profesorem Gluchovským do 6 skupin dle chemického složení [Gluchovsky1980]

- silné zásady: MOH
- nesilikátové soli slabých kyselin: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- silikáty: $M_2O \cdot nSiO_2$,
- hlinitany: $M_2O \cdot nAl_2O_3$
- hlinitokřemičitany: $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$,
- nesilikátové soli silných kyselin: M_2SO_4

Správná volba aktivátoru je závislá na chemickém složení aktivovaného materiálu. Pro aktivaci strusek se nejčastěji používají alkalické křemičitany (vodní sklo), hydroxidy, nebo uhličitany. Z ekonomického hlediska se nejčastěji volí sloučeniny sodíku, které jsou běžně dostupné. Mezi méně používané potom patří hydroxid vápenatý, kombinace hydroxidu vápenatého a sádrovce, případně kombinace hydroxidu sodného a sádrovce vápníku. Aktivátor je nejčastěji smíchán v suché podobě s aktivovaným materiálem s důrazem na optimální dávkování aktivátoru. Příliš vysoké dávkování může způsobit degradaci pojiva a pokles výsledných pevností. Z hlediska použití alkalických aktivátorů v případě

strusek popisují současné publikace vhodnost použití Na_2CO_3 pro strusky bohaté na C_2MS , NaOH pro strusky s vysokým podílem C_2AS . Jedním z neúčinnějších aktivátorů je vodní sklo, u něž záleží na koncentraci roztoku a na tzv. silikátovém modulu, což je molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$ ($\text{Me} = \text{Na}, \text{K}$) [Malolepszy 1986, Frýbortová 2010].

V rámci prezentovaných dat byl pro potřeby aktivace mikromleté ocelářské strusky AP-SK zvolen, jakožto jedna z uváděných možností aktivace strusek, vápenný hydrát. Vápenného hydrátu jako alkalického aktivátoru bylo již v minulosti použito v případě mikromletých materiálů na bázi betonového recyklátu, nebo vápencových odprašků, a jeho použití pro aktivaci strusek bylo konzultováno s kolegy z katedry mechaniky.

6.3. AP-D

AP-D je v souladu s platným českým národním patentem suché anorganické hydraulické pojivo, vyrobené pomocí mechano-chemické aktivace popílku z fluidního spalování a dalších přísad v závislosti na požadavcích pro výsledné použití takového pojiva. Pomocí technologie vysokorychlostního mletí se dosahuje zvýšení hodnoty vnitřní energie materiálu, vytvoření aktivních povrchů na zrnech materiálů při současném zvýšení velikosti měrného povrchu (zjemnění zrnitosti) materiálů tak, že se jeho chemická reaktivita výrazně zvyšuje.



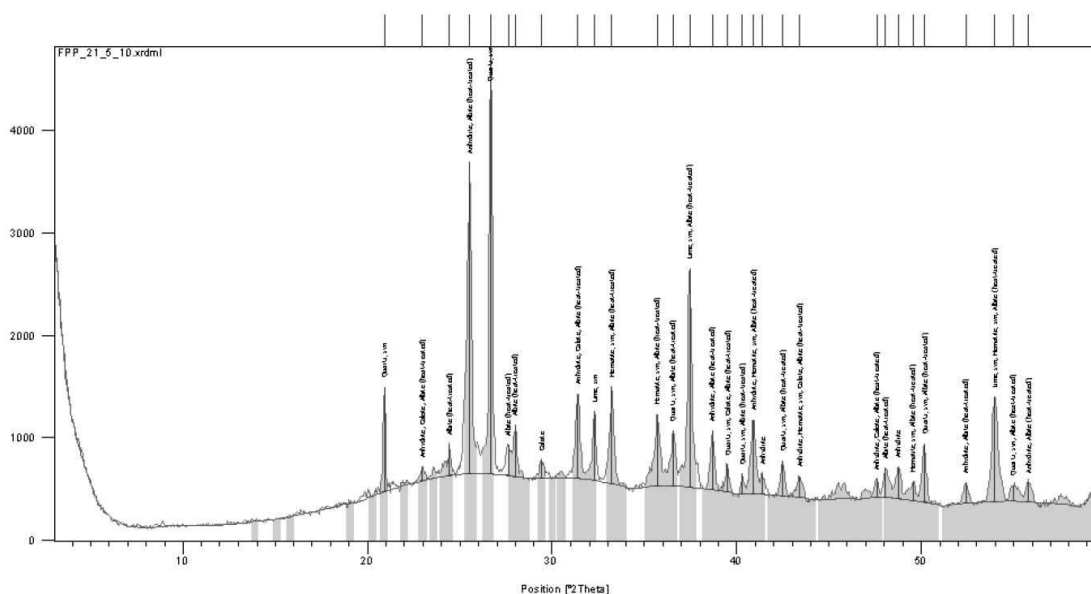
Obrázek 23: Deskový vysokorychlostní mlýn [Suda 2017]

Ze vstupních surovin tak vznikne alternativní hydraulické pojivo, použitelné samostatně nebo spolu s plnivem (např. různými druhy kameniva) pro aplikace v pozemním či dopravním stavitelství (např. pro zlepšování zemin, při výrobě vibrolisovaných stavebních prvků, pro kamenivo stmelené hydraulickým pojivem, pro stabilizaci kalů apod.). Pojivo vykazuje velmi vysoké hodnoty pucolanity a lze je rovněž výhodně použít jako aktivní příměs do betonů (zejména betonů podkladových, betonů pro výrobu vibrolisovaných výrobků a maltovin s obsahem cementu), která umožňuje ušetřit v řadě případů (podle receptury a nároků na

vlastnosti) značné množství cementu v betonové směsi (množství 30-70 %-hm.). V případě stabilizace kalů je možná substituce až na úroveň 100 %-hm. Přitom základní mechanické parametry betonů zůstávají zachovány a dlouhodobá trvanlivost těchto výrobků není limitována požadavkem na vysoké hodnoty relativní vlhkosti prostředí. Základní fyzikální parametry suchého hydraulického pojiva AP-D obvykle nabývají hodnot v rozmezí: sypná hmotnost cca. 680 - 860 kg/m³, objemová hmotnost cca. 2100-2200 kg/m³, měrný povrch cca. 800 - 900 m²/kg. Provedená XRD analýza (tabulka 4 a obrázek 24) prokazuje zvýšený podíl křemene, anhydritu, vápna a ilitu, což je vcelku logické vzhledem ke složení vstupních zdrojů, které jsou tvořeny hnědým uhlím a drceným vápencem. Logický je i vyšší obsah síry, jelikož vápence se zde používá k odsíření celého procesu.

Ref. Code	Mineral Name	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-085-0794	Quartz	Silicon Oxide	69	7	0.994	24
01-074-2421	Anhydrite	Calcium Sulfate	63	16	0.722	31
01-079-0007	Hematite	Iron Oxide	46	7	0.136	3
01-078-0649	Lime	Calcium Oxide	49	2	0.800	13
01-083-0578	Calcite	Calcium Carbonate	43	9	0.071	2
01-089-6423	Albite		26	83	0.076	9
00-026-0911	Illite-2\ITM\RG#1 [NR]		36	17	0.427	18

Tabulka 4: XRD analýza AP-D [Suda 2017]

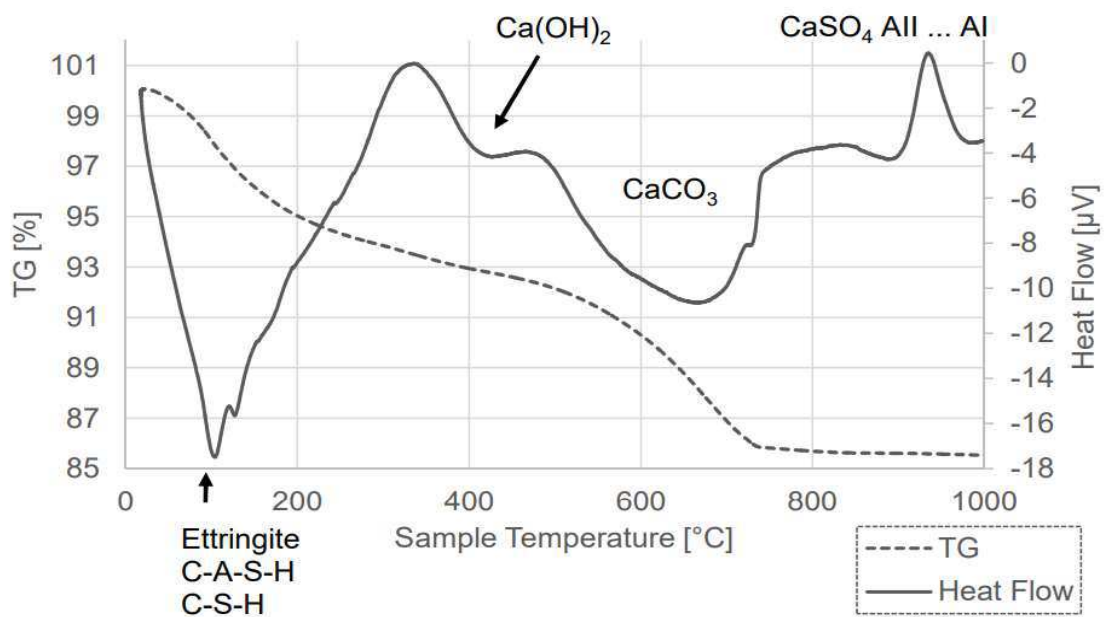


Obrázek 24: XRD analýza AP-D [Suda 2017]

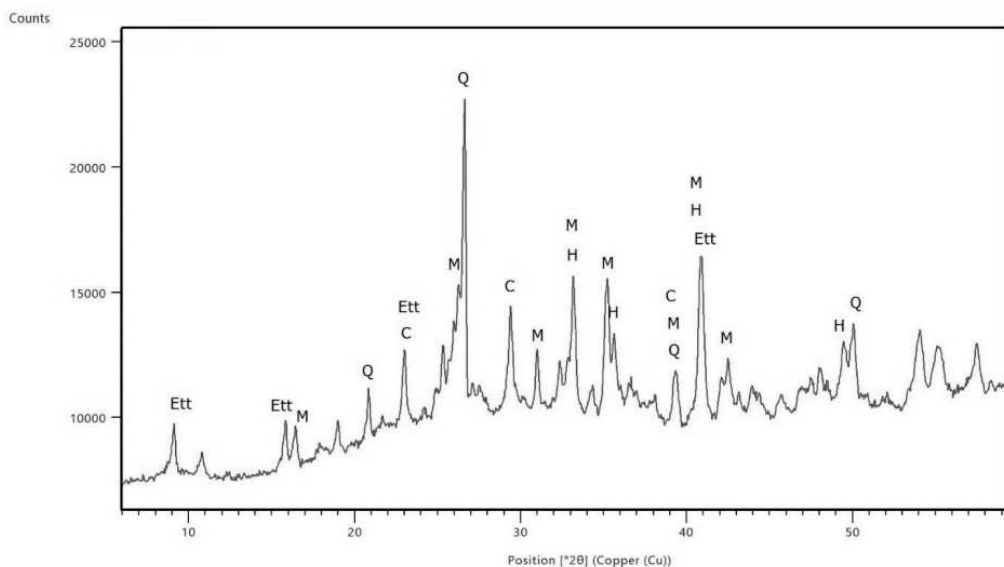
6.4. AP-S

Ternární pojivo na bázi fluidních popílků je tvořeno kombinací fluidních popílků, křemičitých popílků, alkalického aktivátoru Ca(OH)₂ (hydroxid vápenatý) a vhodného plastifikátoru na bázi polykarboxylátů. Pojivo je zaregistrováno na patentovém úřadě a v současné době pracujeme již s jeho druhou generací. Oba vzorky byly získány v rámci výzkumného záměru ČVUT v Praze, kdy hlavním cílem je recyklace odpadního materiálu a jeho přeměna na druhotný materiál, v tomto případě hydraulické pojivo, které nalezne uplatnění v aplikacích

pozemních staveb, případně v podloží, nebo v podkladních vrstvách vozovek. V práci jsou prezentovány výsledky 1. a 2. generace tohoto pojiva, kdy 2. generace prošla výraznou změnou a její hydraulické vlastnosti se přiblížily vlastnostem běžně dostupných cementů. Použitý fluidní popílek (fluidní sulfitovápenatý popílek) je do jisté míry specifický procesem vzniku, kdy je přidávaný vápenec dodán do kotle dodatečně až v okamžiku, kdy kotel dosáhne pracovní teploty 850 °C. Tento proces má za následek určité odlišnosti od běžných fluidních popelů. Využití sulfitovápenatých popílků je možné v omezené míře jako okamžitá stabilizační přísada do půdy, hlavním negativem je zvýšená tvorba ettringitu během hydratačního procesu. Tato expanzní reakce zabraňuje jeho použití jako příměsi k cementu nebo betonu. Jako účinný nástroj pro odstranění těchto nežádoucích jevů se jeví možnost popílek pomlít pomocí vysokorychlostního mlýna tak, aby byly narušeny shluky látek podporující lokální vznik etringitů a jejich následný vliv na objemové změny zpracovávaného materiálu. Provedené analýzy hydratovaného ternárního pojiva popisují přítomnost jednotlivých krystalických fází, mezi které patří i ettringit, nicméně následující měření neprokázala výrazné objemové změny u materiálu stmelených ternárním pojivem. (termická analýza obrázek 25 a rentgenová difrakční analýza XRD obrázek 26) [Škvára 2018].



Obrázek 25: Termická analýza - AP-S2 [Škvára 2018]

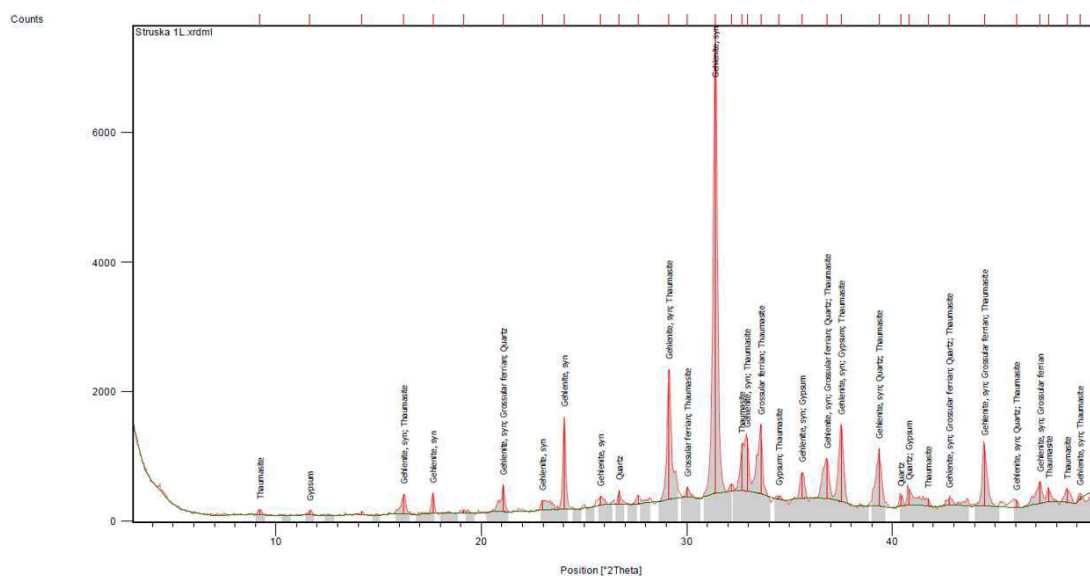


Obrázek 26: XRD analýza – AP-S2 [Škvára 2018]

Hlavní krystalická fáze byla tvořena ettringitem, případně jeho modifikací. Pomocí tepelné analýzy byla také zjištěna přítomnost dalších krystalických fází jako byl mullit, křemen, hematit, uhličitán vápenatý CaCO_3 , anhydrit CaSO_4AII a hydroxidy vápníku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Nebyly nalezeny žádné krystalické fáze ze systému C-A-S-H C_4AH_n , C_3AH_6 , C_2ASH_8 [Škvára 2018]

6.5. AP-SK

Alternativní pojivo AP-SK na bázi strusek je z hlavní části tvořeno ocelářskou struskou z lokality Kladno. Tato struska byla pomocí vysokorychlostního mletí upravena do podoby jemně mletého pojiva s vysokým podílem oxidů vápna (CaO), křemíku (SiO_2) a hliníku (Al_2O_3) [Hanzálek 2017]. Zvýšený obsah oxidů hliníku je typický pro technologie licích pánví, což odpovídá dříve používaným technologiím v místě odběru.



Obrázek 27: XRD analýza – AP-SK [Hanzálek 2017]

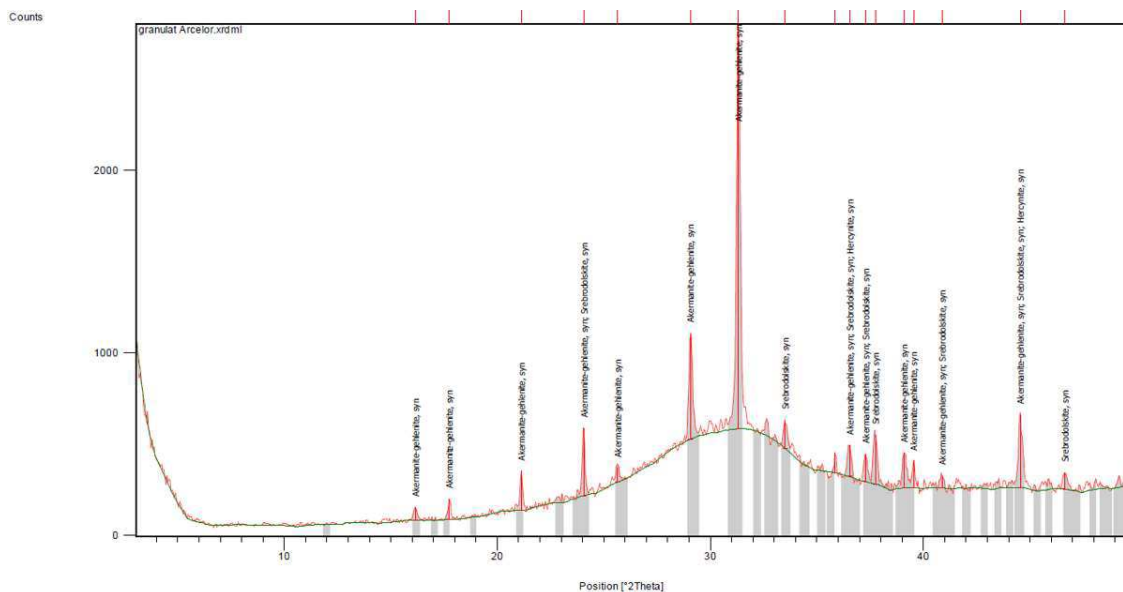
Ref. Code	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-087-0968	Gehlenite, syn	57	23	1	64
01-085-1369	Grossular ferrian	27	18	0,137	29
01-082-0511	Quartz	20	7	0,041	2
00-003-0044	Gypsum	8	16	0,024	2
01-075-1688	Thaumasite	12	51	0,034	3

Tabulka 5: XRD analýza AP-SK [Hanzálek 2017]

Výsledky provedené XRD analýzy vzorku mikromleté ocelářské strusky AP-SK (obrázek 27 a tabulka 5) prokázaly přítomnost gehlenitu ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$) jako hlavní krystalické struktury, dále byla pozorována přítomnost železitého grosuláru ($\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)_3$) a skelné fáze (spodní část grafu). Mezi méně zastoupené patří krystaly křemene, sádry a thaumasitu, výskyt těchto struktur je ovšem zanedbatelný. Výskyt gehlenit lze ve strusce očekávat, společně s akremanitem tvoří melilit, který u strusek běžně představuje až 90 % jejich složení. Železitý grosulár je minerál, který se ve strusce obvykle nachází pouze ve stopovém množství, jeho chemické složení však jeho výskyt nevylučuje [Hanzálek 2017].

6.6. AP-SO

Alternativní pojivo AP-SO na bázi strusek je z hlavní části tvořeno vysokopeční struskou z lokality Ostrava. Tato struska byla pomocí vysokorychlostního mletí upravena do podoby jemně mletého pojiva s vysokým podílem oxidů vápna (CaO) a křemíku (SiO_2), poměrně velké zastoupení mají i oxidy hliníku (Al_2O_3), železa (FeO , Fe_2O_3), případně manganu (MgO) a draslíku (Na_2O) [Hanzálek 2017]



Obrázek 28: XRD analýza – AP-SO [Hanzálek 2017]

Ref. Code	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-079-2423	Akermanite-gehlenite, syn	54	24	0,96	89
01-071-2108	Srebrodolskite, syn	21	35	0,067	6
01-082-0588	Hercynite, syn	33	6	0,075	6

Tabulka 6: XRD analýza AP-SO [Hanzálek 2017]

Výsledky provedené XRD analýzy vzorku mikromleté ocelářské strusky AP-SO (obrázek 28 a tabulka 6) prokázaly přítomnost ackermanit-ghelitu, kdy se jedná s největší pravděpodobností o melit, který bývá ve struskách běžně přítomen. Dále je zde v malém množství zastoupen srebrodolskit ($\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_5$), jehož přítomnost ve struskách je známa, v minimálním množství je přítomen také hercynit (FeAl_2O_4). Jeho přítomnost ve struskách není známa, nicméně chemickým složením odpovídá složení běžné strusky. V analyzované strusce je rovněž zastoupena skelná fáze [Hanzálek 2017].

6.7. Mechanicky aktivovaný beton

Jedním z posuzovaných alternativních pojiv byl i betonový recyklát získaný z rekonstrukce dálnice D1 - úsek 14, který byl zpracován pomocí vysokorychlostního mletí za účelem mechano-chemické aktivace. Vybouraný betonový recyklát byl v laboratořích ČVUT v Praze upraven na frakci 0/32 mm. Nově vzniklý materiál byl průmyslovými partnery předrcen v odrazovém drtiči a zpracován technologií vysokorychlostního mletí za účelem iniciovat chemické změny, zjemnit zpracovávaný materiál, otevřít zrna, zvětšit měrný povrch a docílit určité reaktivace hydratovaného cementu. Před konkrétními aplikacemi ve stavebnictví byly vždy vyrobeny „cementové pasty“, na kterých byly ověřovány základní charakteristiky. Zpravidla je ověřujeme pro standardní cementy při jejich využití v betonech a dalších kompozitech [Valentin 2016]. V současné době nachází mikromletý beton uplatnění v technologiích zaměřených na výrobu cementových a vápeno-cementových malt a lepidel, případně jako směs pro zdící prvky. Jemně mletý aktivovaný betonový recyklát je také dlouhodobě testován jako částečná, či úplná náhrada hydraulických pojiv určených pro dopravní stavby, což je i téma tohoto příspěvku. Základní fyzikální parametry zpracovaného betonového recyklátu z dálnice D1 dosahovaly jemnosti mletí 1,5 - 80 μm s průměrnou velikostí zrna 18 μm , objemová hmotnost materiálu byla rovna 2670 kg/m^3 s měrným povrchem 435 m^2/kg .

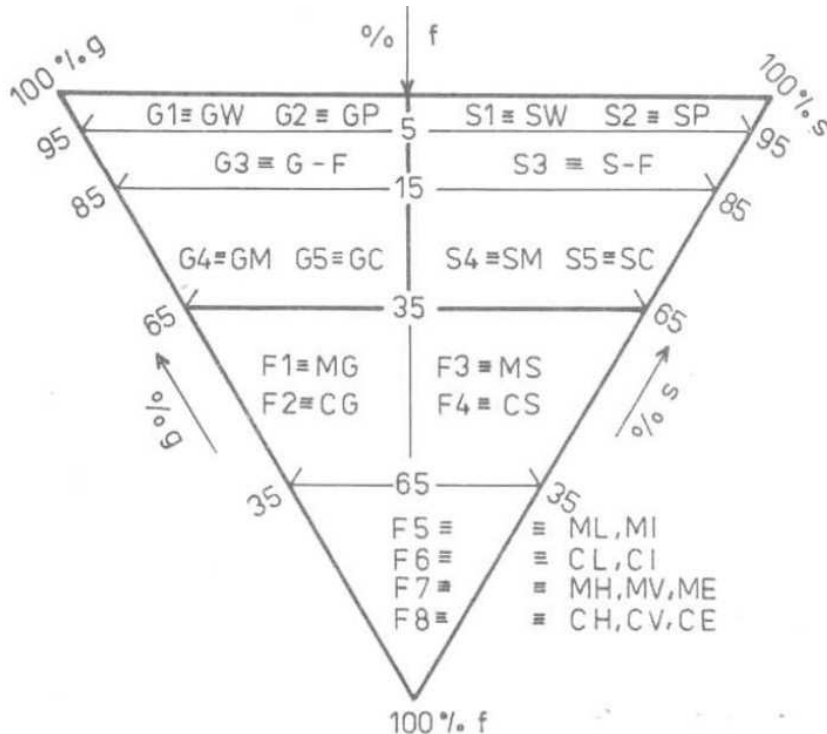
7. Použité materiály

7.1. Zeminy

Jedním ze základních parametrů pro posouzení zemin je křivka zrnitosti, která nám podá informace o typu zeminy a lze z ní predikovat chování zeminy při zatížení vodou a mrazem. Podle jednotlivých podílů štěrkovitých, písčitých a jemných částí lze zeminu zatřídit dle klasifikačního diagramu (obrázek 29) do tří základních skupin a to zeminy jemnozrné (F), písčité (S) a štěrkovité (G). Podrobnější dělení písků a štěrků (obsah jemných částic 0-35 %) je pak odvozeno do podílu jemných částic a je vyjádřeno přídatným jménem

- 0-5 %: příměs v názvu vůbec nezmiňujeme, dle čísla nestejnozrnnosti C_u a čísla křivosti C_c rozlišujeme písky a štěrky dobře (xW), nebo špatně (xP) zrněné.
- 5-15 %: charakterizujeme jako štěrk nebo písek s příměsí jemnozrné zeminy (x-F; x-F).
- 15-35 %: zohledňuje se charakter jemných částí na základě laboratorního posouzení konzistenčních mezí a diagramu plasticity (obrázek 30). Mluvíme pak o písku nebo štěrku jílovitém, případně hlinitém (xC; xM).

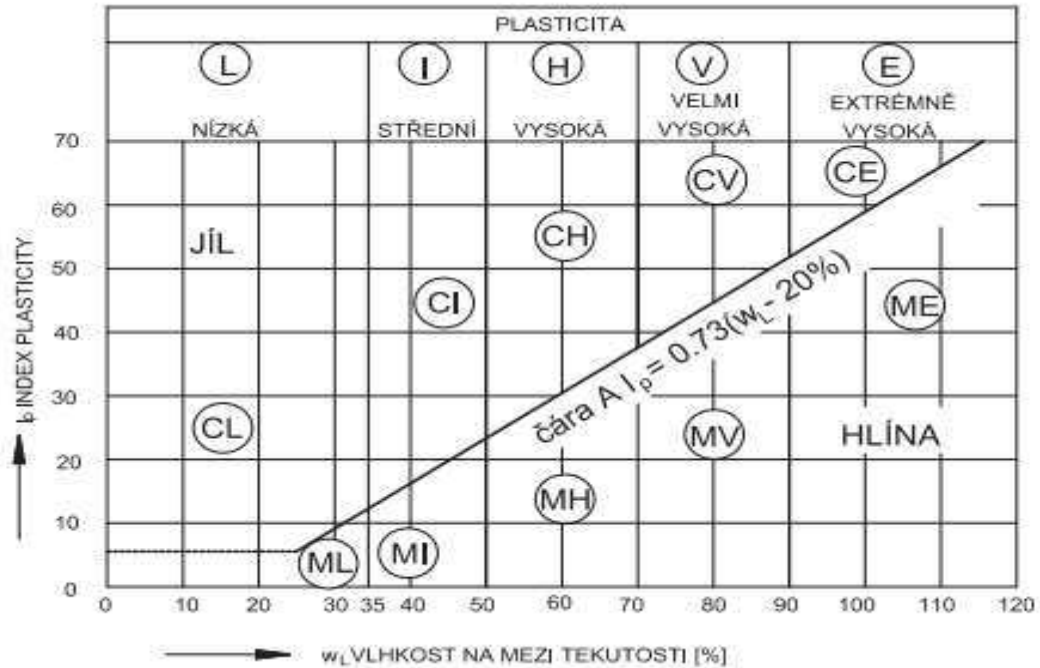
V případě jílovitých a hlinitých zemin (obsah jemných částic 35 – 100 %) nezáleží jenom na velikosti zrn, ale do jisté míry i na jejich mineralogickém složení, tyto zeminy je tak nutné posoudit i z hlediska jejich plastického chování.



Obrázek 29: Klasifikace zemin- trojúhelníkový diagram [ČSN 73 6133]

Plastické chování zemin se určuje na základě laboratorního určení konzistenčních mezí, meze plasticity w_p , meze tekutosti w_L a z nich dopočítaný index plasticity I_p , rovnice (8) Na základě zjištěných hodnot je pak dle Casagrandeho diagramu plasticity učeno, zda se jedná o jíly, nebo hlíny, a míra jejich plasticity.

$$I_p = w_L - w_p \quad (8)$$

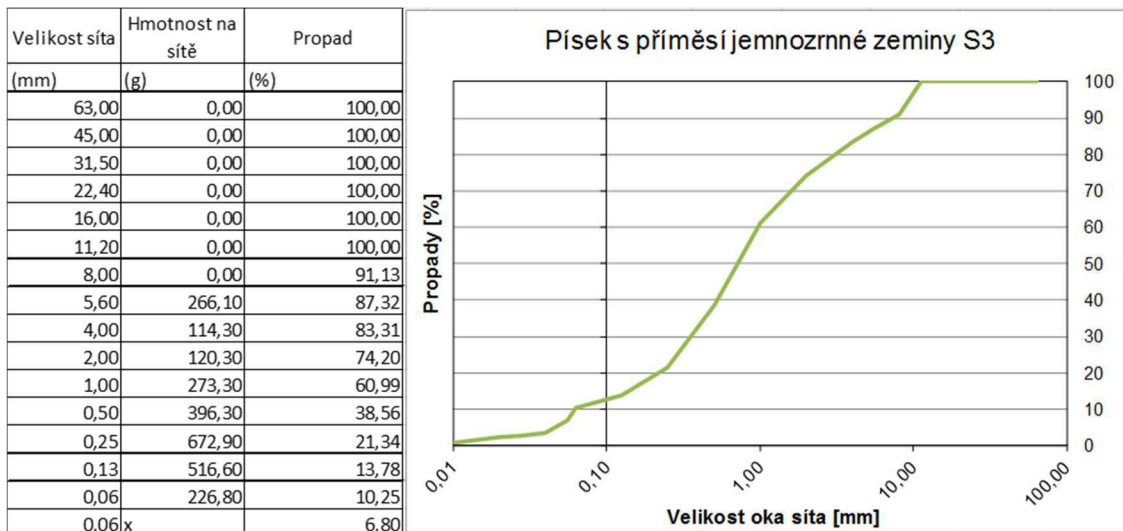


Obrázek 30: Klasifikace zemin- Casagrandeho diagram plasticity [ČSN 73 6133]

Na základě klasifikace lze dle doporučených hodnot (TP 94) odhadnout vhodnost konkrétní zeminy pro užití v konstrukci vozovky, případně navrhnout její výměnu, nebo zvolit vhodnou technologii pro jejich úpravu. Z hlediska zabudování posuzované zeminy do konstrukce vozovky je nutné laboratorně ověřit i její přirozenou vlhkost, optimální vlhkost pro hutnění a dle jednotlivých aplikací i pevnostní parametry zeminy. V případě podloží vozovky se jedná o posouzení dle IBI a CBR, pro zabudování zemin do vyšších konstrukčních vrstev nejčastěji posuzujeme pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě (podkladní vrstvy).

7.1.1. Písek s příměsí jemnozrnné zeminy (Z-S-F)

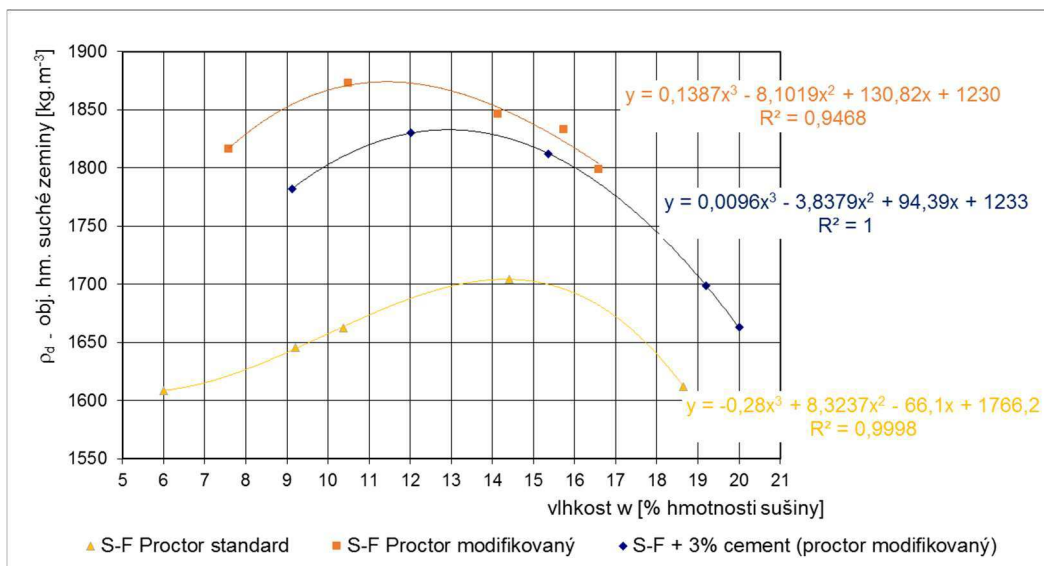
Zemina získaná z rekonstrukce dálnice D1 72 km 9. úsek. Zemina samotná obsahovala poměrně velké množství zeminy upravené cementem. Tento fakt sám o sobě do jisté míry ovlivnil jak zrnitost zeminy, tak nasákavost, kdy upravená zemina vykazovala poměrně malou odolnost vůči zmrazovacím cyklům. Zemina je klasifikována dle ČSN 73 6133 jako písek s příměsí jemnozrnné zeminy S3 = S-F, dle mezinárodního systému zatřídění (USCS) jako „Well-graded sand with silt“ SP-SM. Zemina je dle platných norem vhodná do náspů a podmíněčně vhodná i pro použití v podloží vozovky. Dle platných norem se jedná o nenamrzavou až mírně namrzavou zeminu.



Obrázek 31: Křivka zrnitosti Z-S-F

Vzhledem k místu odběru bylo nutné se zaměřit i na jednotlivá zrna zeminy, kdy při bližším zkoumání byl patrný výskyt poměrně velkého množství starších cementem upravených zemin. Vlivem této příměši vykazovaly jednotlivé vzorky zeminy velmi malou odolnost vůči mrazu i vodě, kdy přítomnost těchto částic může mít zásadní vliv na výsledné parametry směsi stmelené hydraulickými pojivy. Zemina vykazovala následující parametry

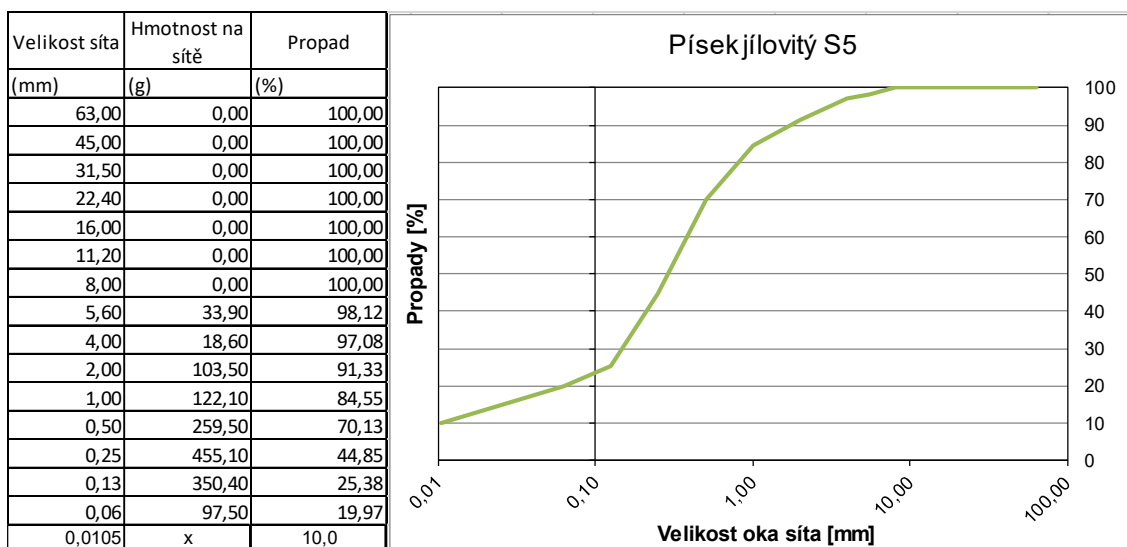
- Přirozená vlhkost: 8,5 %
- Optimální vlhkost:
 - Proctor standard: 14,5 %
 - Proctor modifikovaný: 11 %
 - Proctor modifikovaný (zemina upravená 3 % cementu) : 13 %
- Únosnost neupravené zeminy CBR: 30 % (Splňuje požadavky pro podloží PII)



Obrázek 32: Stanovení optimální vlhkosti S-F

7.1.2. Jílovitý písek (Z-SC)

Vzorek zeminy byl odebrán v lokalitě Veselý nad Lužnicí, ze stavby železničního koridoru. V místě stavby byla zemina upravena pojivem Dorosol, technologie byla použita pro zlepšení aktivní zóny. Zemina je zaříděna dle ČSN 73 6133 jako písek jílovitý S5=SC, dle mezinárodního systému zařídění (USCS) jako „Clayey sand“ SC. Zemina je dle platných norem vhodná do náspů a podmíněčně vhodná i pro použití pro podloží vozovky. Dle platných norem se jedná o namrzavou zeminu.

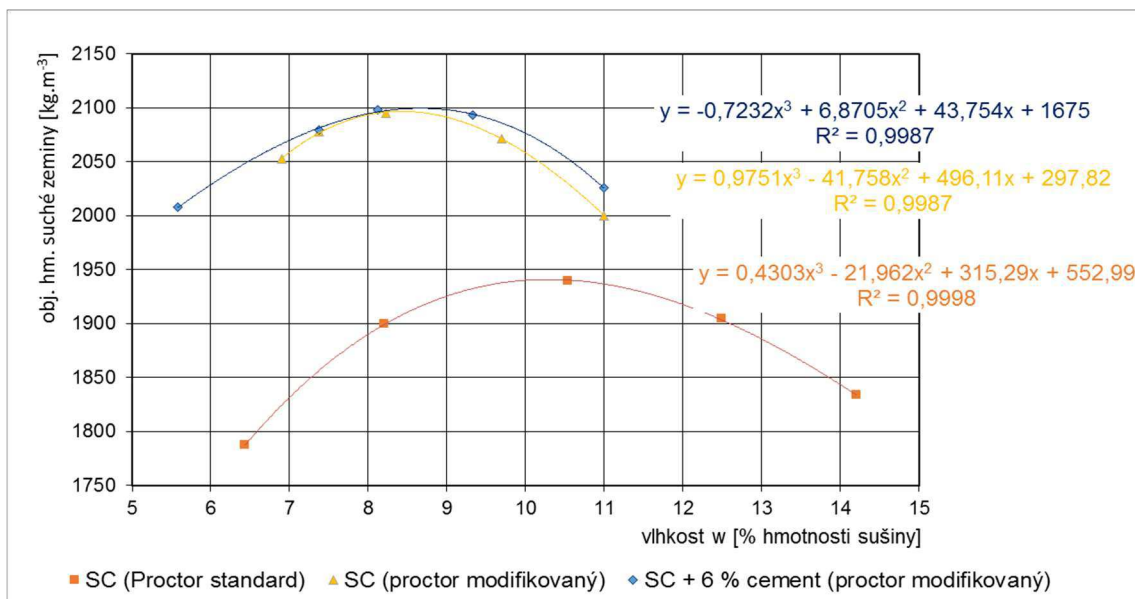


Obrázek 33: Křivka zrnitosti Z-SC

Optimální vlhkost dle proctor standard, podle ČSN EN 13286-2, byla stanovena na

10,25 %. Únosnost zeminy vyjádřená CBR je rovna 13,5 %. Dle prvotního hodnocení se tedy jedná o kvalitativně horší zeminu, kterou nelze bez další úpravy použít do podloží vozovky.

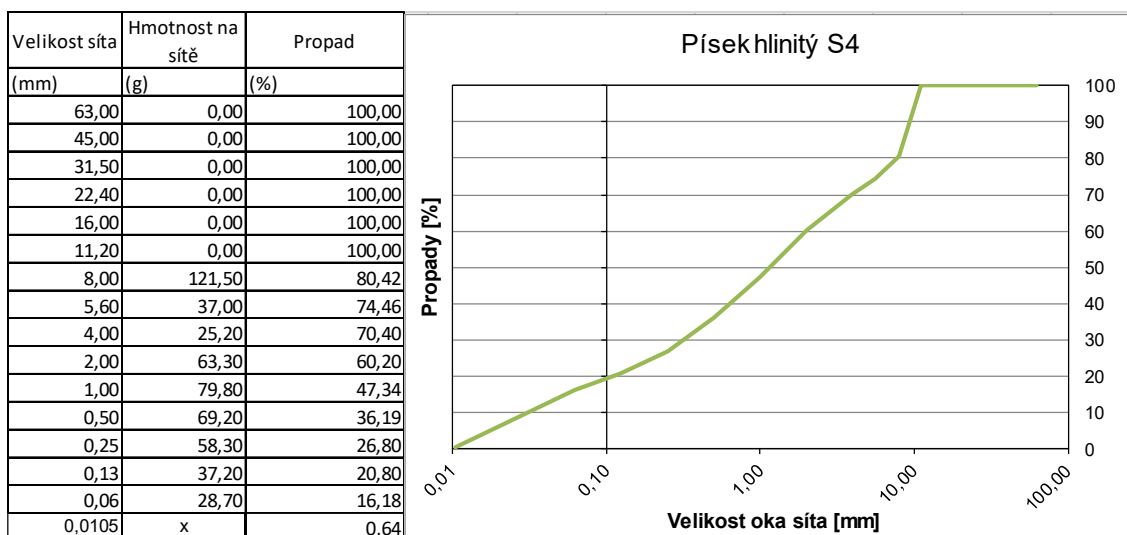
- Přirozená vlhkost: 10,2 – 12,5 %
- Optimální vlhkost:
 - Proctor standard: 10,25 %
 - Proctor modifikovaný: 8,5 %
 - Proctor modifikovaný (zemina upravená 3 % cementu) : 8,75 %
- Únosnost neupravené zeminy CBR: 13,5 % (nutné před použitím upravit)



Obrázek 34: Stanovení optimální vlhkosti SC

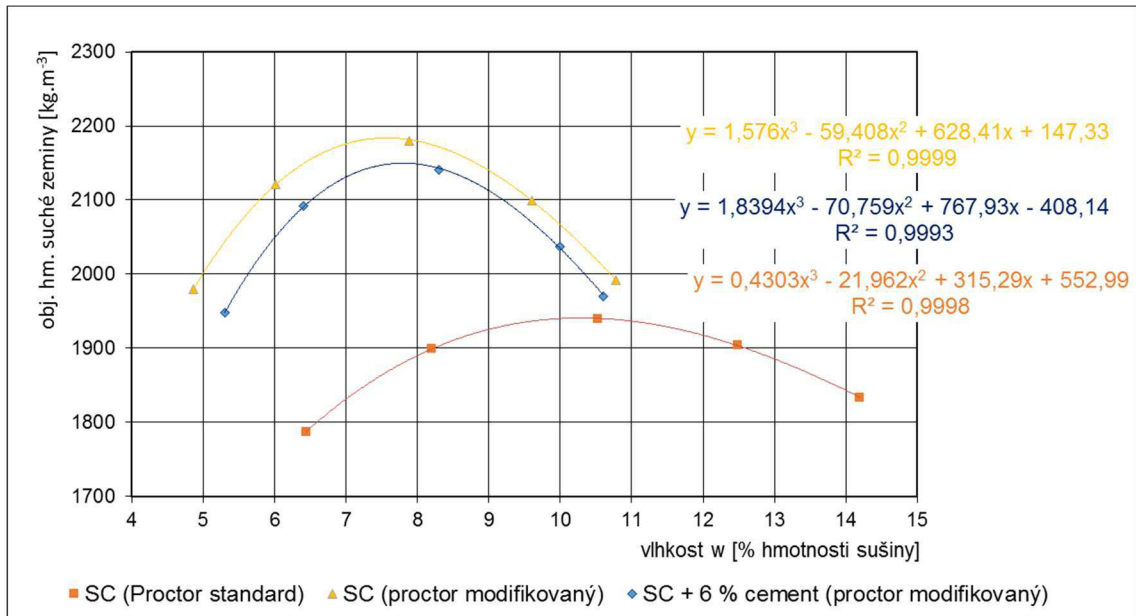
7.1.3. Písek hlinitý (Z-SM)

Zemina pocházející z rekonstrukce dálnice D1, 77 km. Zemina dle klasifikace ČSN 73 6133 vykazovala charakter hlitého písku až písku s příměsí jemnozrné zeminy, kdy se obsah jemných částic pohyboval na rozhraní těchto dvou klasifikačních tříd. Stejně tak rozdíl mezi podílem štěrkových a písčitých zrn byl velmi malý. Nicméně dle platných norem byla zemina zatříděna jako S4=SM, tedy písek hlinitý. Zemina je dle platných technických podmínek podmíněčně vhodná do násypů a aktivní zóny.



Obrázek 35: Křivka zrnitosti- Z-SM

- Přirozená vlhkost: 8,2 – 9,8 %
- Optimální vlhkost:
 - Proctor standard: 10,5 %
 - Proctor modifikovaný: 7,5 %
 - Proctor modifikovaný (zemina upravená 3 % cementu) : 7,8 %
- Únosnost neupravené zeminy CBR: 19,7 % (Splňuje požadavky na podloží PIII)

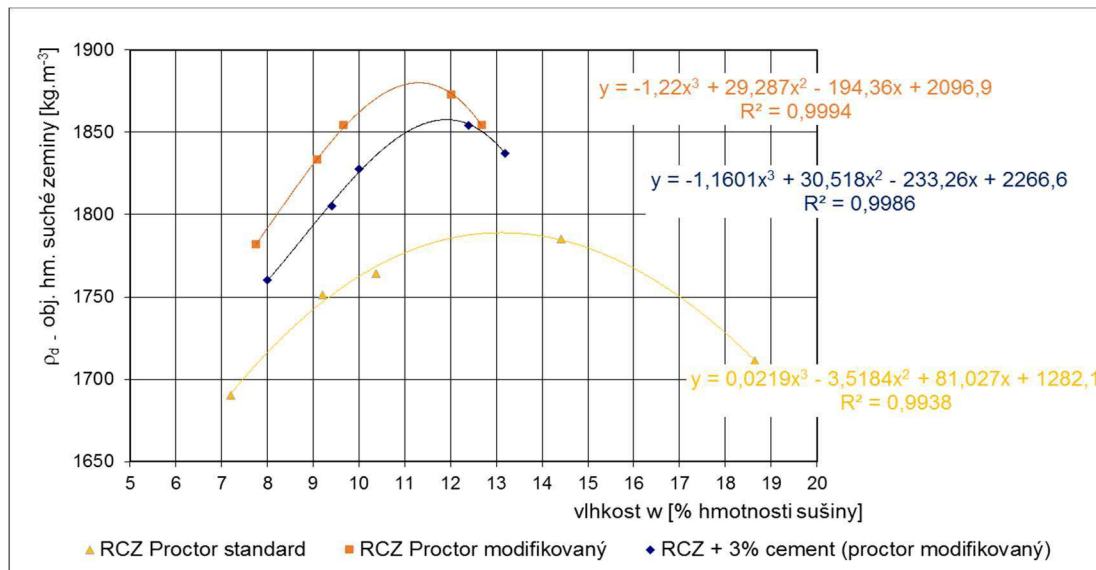


Obrázek 36: Stanovení optimální vlhkosti Z-SM

7.1.4. Recyklovaná cementem upravená zemina (RCZ)

Materiál získaný z rekonstrukce dálnice D1 úsek 14. Jedná se o recyklované, cementem upravené zeminy. Materiál dle zrnitostního rozboru za sucha lze zařadit jako dobře zrněný štěrk G1=GW, nicméně v případě zrnitostního rozboru za mokra, který normou v tomto případě není vyžadován, vykazoval charakteristiky štěrků s příměsí jemnozrnné zeminy, až hlinitých štěrků. Vlivem působení vody a síťovacího zařízení totiž došlo k rozpojení a rozdrobení stávajícího materiálu, je tedy otázkou, zda je rozbor v tomto ohledu reprezentativní a jak zeminu správně zařadit. Z hlediska současných podmínek se jedná o dobře zrněný štěrk. Bez ohledu na zařídění se jedná jemnozrnný materiál frakce 0/8 vykazující poměrně výraznou nasákavost, která byla problematická zejména v případě posouzení směsí s tímto materiálem pro technologie podkladních vrstev, kde je vyžadována i odolnost proti mrazu a vodě.

- Přirozená vlhkost: 6,4 %
- Optimální vlhkost:
 - Proctor standard: 14,2 %
 - Proctor modifikovaný: 11,2 %
 - Proctor modifikovaný (zemina upravená 3 % cementu) : 11,8 %
- Únosnost neupravené zeminy CBR: 21,7 % (pro GW běžně 50 % a víc)



Obrázek 37: Stanovení optimální vlhkosti RCZ

7.2. Asfaltový recyklát

Dle TP 210 je R-materiál asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. Jedná se o více jak 95% asfaltový materiál (Ra), s max. obsahem 5% hmotnosti ostatních recyklovaných materiálů (Rc + Rb + Ru + X + Y + FL). Pojmy RC, RB, Ru označují jednotlivé typy získaného kameniva, X, Y, FL jiné, ostatní a plovoucí částice.

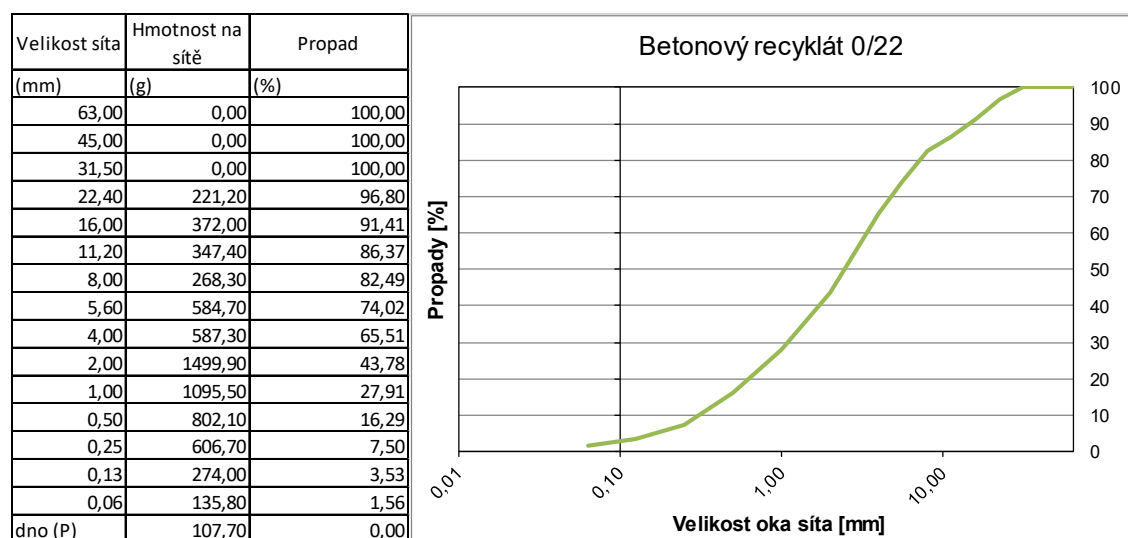
- Ra...recyklované kamenivo z asfaltového materiálu.
- Rc...recyklované kamenivo z drceného betonu.
- Rb...recyklované kamenivo z drcených cihel nebo cihelného zdiva.
- Ru...recyklované nestmelené kamenivo, z přírodního kameniva nebo/a ze směsi stmelené hydraulickým pojivem.
- X (jiné částice)... v souladu s ČSN EN 933-11 se jedná o přilnavé částice (tj. jemnozrnné jílovité zeminy a nečistoty), různorodé částice jako kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, stavební plasty a pryž, sádrová omítka apod.
- Y (ostatní částice)... jedná se o částice nestavebního charakteru např. papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály (např. humus, rašelina), apod. Z hlediska stanovování obsahu ostatních částic (Y) se tyto přiřazují při zkoušce podle ČSN EN 933-11 ke složce jiných částic (X)

- FL (plovoucí částice)... stanoví se v souladu s ČSN EN 933-11. Jedná se o částice, které plovou ve vodě (např. plovoucí dřevo, polystyrén, apod.).

Z hlediska požadavků je zásadní zrnitost, která by se u technologií studených recyklací měla pohybovat v rozmezí daných technickými podmínkami. Další požadavky, tak jak je známe například u kameniva, nejsou stanoveny vzhledem k faktu, že zabudovaný materiál v konstrukci vozovky již jednou dané požadavky splnil a po dobu životnosti vozovky se vlastnosti použitého kameniva výrazně nezměnily. Materiál zpracovávaný v průběhu mého doktorského studia samozřejmě měnil své parametry zrnitosti. S každou novou šarží přivezeného R materiálu tak bylo potřeba ověřit jeho zrnitost a v případě že se výrazně lišila od materiálu používaného pro porovnání jednotlivých pojiv nebo přísad, byla zhotovena i směs s referenčním pojivem, aby byl prokázán vliv zkoumaných pojiv případně přísad. Zpracovávané R-materiály byly odebrány na deponii obalovny PSVS Středokluky v obci Kněžves. Pro laboratorní posouzení technologií studené recyklace byly nejčastěji používány frakce 0/11 a 0/22.

7.3. Betonový recyklát (RB)

Posuzovaný betonový recyklát frakce 0/22 pocházel z rekonstrukce dálnice D1 úsek 14. Jednalo se o drcené cementobetonové vrstvy, které byly použity jako náhrada přírodního kameniva v některých aplikacích pro cementem stabilizované vrstvy.



Obrázek 38: Křivka zrnitosti- RB

8. Metodika posouzení, zkušební postupy

8.1. Hutnění směsí

Hutnění materiálů určených pro podkladní vrstvy, resp. podloží vozovky, je závislé na druhu materiálu, jeho vlastnostech a především na finálním použití ve vozovce. Zeminy a směsi stmelené hydraulickými pojivy se všeobecně hutní pomocí proctorova pěchu, pro směsi studené recyklace je v ČR využíván hydraulický lis.

8.1.1. Hutnění zemin

Hutnění zemin a výběr správné přípravy vzorků v laboratoři je ovlivněn celou řadou faktorů. V současné době probíhá hutnění zemin v laboratoři pomocí proctorova pěchu, a to buď metodou standard, nebo metodou modifikovanou [ČSN EN 13286-2]. Evropské normy dále umožňují hutnění pomocí vibračního pěchu ČSN EN 13286-4, případně pomocí vibračního stolu ČSN EN13286-5. V ČR ovšem stále platí určitá nedůvěra v přípravu laboratorních vzorků pomocí vibračních metod a tak i v rámci této práce jsou používány metody hutnění založené na hutnění pomocí proctorova pěchu, tedy pomocí metody proctor standard, nebo proctor modifikovaný. Volba správné proctorovy metody je závislá na parametrech zeminy, kdy pro zeminy s vyšším podílem jemnozrnných částic je standardně volena metoda proctor standard, pro zeminy s vyšším podílem hrubých částic je vhodné volit metodu proctor modifikovaný. Volbu hutnicí metody je nutno přizpůsobit i použité hutnicí mechanizaci v místě stavby, méně účinným hutnicím strojům odpovídá metoda proctor standard, oproti tomu pro zeminu hutněnou pomocí těžké mechanizace je vhodnější volit metodu proctor modifikovaný. Do jisté míry lze použití správné hutnicí metody v laboratoři stanovit na základě předpokládaných parametrů výsledné vrstvy, kdy zeminy určené pro podloží vozovky jsou standardně hutněny pomocí metody proctor standard, zeminy určené pro vrstvy s vyšší návrhovou pevností (podkladní vrstvy) pomocí metody proctor modifikovaný. Samotné metody se od sebe liší počtem hutněných vrstev, počtem úderů na vrstvu a hmotností hutnicího pěchu, viz tabulka 7.

Proctorova forma	Proctor standard		Proctor modifikovaný		
	A	B	A	B	C
Hmotnost pěchu	2,5	2,5	4,5	4,5	15
Průměr pěchu	50	50	50	50	125
Výška dopadu	305	305	457	457	600
Počet vrstev	3	3	5	5	3
Počet úderů na vrstvu	25	56	25	56	98

Tabulka 7: Parametry zkoušky proctor standard a proctor modifikovaný [ČSN EN 13286-2]

Velikost proctorovy formy a její typ je volen dle velikosti maximálního zrna D, použitého ve směsi. Hutnicí metoda je vhodná pro směsi, kde více jak 25 % materiálu propadne zkušebním sítem 63 mm. Určitým standardem je forma o průměru 150 ± 1 mm, pro jemnozrnné zeminy lze volit i formu s menším průměrem typu A, kdy průměr formy musí být minimálně čtyřnásobkem

maximálního zrna ve směsi. Pro hrubozrnné směsi může být použita forma typu C, s tímto typem se ovšem ve stavební praxi prakticky nesetkáme. U hrubozrnné směsi spíše dojde k odstranění hrubých zrn a využití formy typu B, tento fakt ovšem musí být zohledněn při vyhodnocení zkoušky. Požadované parametry forem jsou uvedeny v tabulce 8.

Proctorova forma	Průměr d_1 [mm]	Výška h_1 [mm]	Tloušťka	
			Stěna w [mm]	Základní deska t [mm]
A	$100,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$7,5 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,5$
B	$150,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$9,0 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$
C	$250,0 \pm 1,0$	$200,0 \pm 1,0$	$14,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$

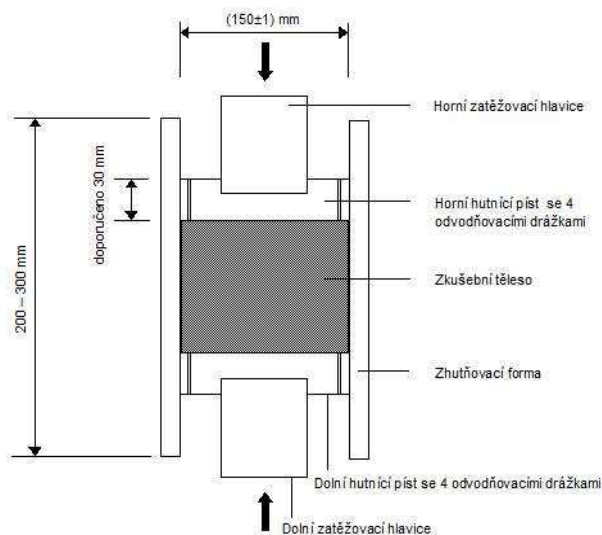
Tabulka 8: Rozměry forem proctor [ČSN EN 13286-2]

8.1.2. Hutnění kameniva

Metody hutnění laboratorních těles pro směsi kameniva, ať již v neupravené, nebo stmelené hydraulickým pojivem, odpovídají hutnění zemin pomocí proctorova zařízení popsaném v kapitole 8.1.1.

8.1.3. Hutnění těles pro technologii studené recyklace

Standardní postup [TP 208] platný v ČR využívá pro hutnění statický lis, z hlediska dalších možností je evropskými normami přípustné i hutnění pomocí gyrátoru, ve světě pak nalezneme i metody využívající marshalova pěchu. Vhodnost jednotlivých způsobů hutnění byla posouzena v rámci studentských projektů a výstup projektu je níže. Dle používaných metod v ČR probíhá hutnění na statickém lisu tlakem 5 MPa. Z hlediska forem a rozměrů těles je dle TP 208 možné použít formy o průměru $d = (150 \pm 1)$ mm a výšce $v = 200$ až 300 mm o známé hmotnosti. Na základě posouzení pevnosti v příčném tahu, měření modulů tuhosti a lomové houževnatosti bylo akceptováno jako přípustné i hutnění dle ČSN EN 12697-23. Formy o průměru 150 mm jsou zde nahrazeny formami pro výrobu Marshallových těles o průměru $d = 101,6 \pm 0,1$ mm a výšce $v = 63,5 \pm 2,5$ mm.



Obrázek 39: Schéma hutního zařízení [TP208] (vlevo), statický lis (vpravo)

Dlouhodobé snahy o sjednocení evropských norem byly základem pro posouzení způsobu přípravy vzorků v rámci členských států EU. V rámci laboratorního posouzení byly prověřeny postupy hutnění dle národních metodik členských států i postupy používané ve světě. Dle evropských norem je považováno za přípustné hutnění pomocí gyrátoru, využívané zejména ve Francii a ve Velké Británii, ve světě pak nalezneme i možnost hutnění pomocí Marshallova pěchu, tato metoda je ovšem spíše na ústupu. Vybrané státy a používané metodiky hutnění nalezneme v tabulce níže.

Německo	Tělesa o průměru 150 mm jsou hutněna na statickém lisu tlakem 2,8 MPa.
Francie	Pro zkoušku pevnosti v tlaku se tělesa připravují na statickém lisu při tlaku 120kN (metoda Duriez). Pro výrobu těles na zkoušení dynamického modulu je používán gyrátor (100 otáček).
Česká republika	Tělesa o průměru 150 mm jsou hutněna na statickém lisu tlakem 5 MPa.
Norsko	Hutnění těles probíhá buď statickým tlakem o velikosti 8 tun po dobu 2 minut, nebo pomocí gyrátoru. Gyrátor hutní těleso rychlostí 30 otáček za minutu při zatížení 600 kPa. Celkový počet otáček je pak požadován takový, aby bylo dosaženo 96% objemové hmotnosti, které dosahuje směs po 200 otáčkách.
Portugalsko	Tělesa jsou hutněna statickým tlakem o velikosti 21 MPa / 170 kN na tělesech o průměru 101,6 mm.
USA	Způsob výroby těles se v jednotlivých státech liší. Používá se buď 2x50 příp. 2x75 úderů Marshallova pěchu nebo Super Pave Compactor, přístroj na principu gyrátoru.
Austrálie	Tělesa o průměru 150 mm jsou hutněna buď pomocí gyrátoru (80 otáček) nebo pomocí 50 úderů Marshallova pěchu.

Tabulka 9: Způsob výroby zkušebních těles ve vybraných zemích

Z hlediska posouzení jednotlivých způsobů hutnění byly prověřeny výše popsané metody, v případě gyrátoru byly prověřeny různé kombinace tlaku a množství otáček.

➤ Marshallův pěch

Výroba zkušebních těles pomocí Marshallova pěchu funguje na principu hutnění zkušebních těles opakovaným zatěžováním dynamickým rázem. Dynamický ráz je zajištěn pádem hutnicího pěchu z předepsané výšky, počet rázů je z obou stran tělesa stejný. Pro potřeby výzkumu byla tělesa o průměru 150 mm zhutněna 75 údery z každé strany.

➤ Hydraulický lis

Metodika hutnění používaná v České republice. Oblast hutnění studených recyklací popisují technické podmínky TP 208. Hutnění probíhá na statickém hydraulickém lisu, kdy je těleso hutněno dvěma proti sobě se posouvajícími písty, přičemž na těleso působí napětí 5,0 MPa. Při působení síly vlivem dohutňování zkušebního vzorku dochází k jejímu poklesu, proto je nutné opakovaně osovou sílu vyrovnávat.

➤ Gyrátor

Zařízení slouží k výrobě válcových těles o průměru 100 a 150 mm. Metodika hutnění těles gyrátorem podle dostupných výsledků mnohem lépe charakterizuje reálné hutnění směsi v praxi. Tato metoda postupně nahrazuje hutnění zkušebních těles pomocí Marshallova pěchu. V současnosti je použití gyrátoru pro hutnění těles předepsáno metodikou Superpave v USA. Vývoj amerického typu gyrátoru začal ve 30. letech 20. století, k jeho začlenění do amerických standardů došlo na konci 20. století. V rámci EU je gyrátoru hojně využíváno ve Francii, kde je tato metodika hutnění rozvíjena od 60. let minulého století. I když je způsob hutnění velmi podobný, nelze tyto dvě metodiky hutnění zaměnit, zkoušení a vyhodnocení výsledků je na americkém a francouzském přístroji odlišné. Velký vliv na výsledné zhutnění vzorku nemá ani tak vertikální tlak, jako samotné zvolení úhlu odklonu mezi hlavou a vzorkem při otáčivém pohybu.

Laboratoře ČVUT disponují gyrátorem od firmy TROXLER. V rámci výzkumu byla vyrobena tělesa tlačena silou 600 a 900 kPa při 40-ti, 60-ti a 80-ti otáčkách. Náklon byl zvolen dle americké metodiky Superpave, kde je jako univerzální stanoven náklon 1,25°.

Logickým parametrem pro srovnání jednotlivých metod hutnění byla objemová hmotnost. V případě gyrátoru došlo se vzrůstajícím napětím a počtem otáček k nárůstu objemové hmotnosti. V případě Marshallova pěchu (2x75 úderů) a hutnění pomocí statického lisu bylo dosaženo obdobných hodnot objemových hmotností. Z hlediska gyrátoru bylo srovnatelných hodnot objemové hmotnosti dosaženo při nastavení hutnění při tlaku 600 kPa a 80-ti otáčkách, případně tlaku 900 kPa a 60-ti otáčkách. Pro porovnání jednotlivých metodik bylo použito i pevnosti v příčném tahu, vycházející z platných technických podmínek TP208 a modulů tuhosti. V případě naměřených hodnot pevnosti v příčném tahu se projeví rozdíly způsobené různým způsobem hutnění těles. Tělesa zhutněná pomocí gyrátoru opět nabývala vyšších hodnot pevnosti v příčném tahu úměrně k zvyšování tlaku a počtu otáček. Nejlepších hodnot ovšem dosáhla tělesa hutněná pomocí statického lisu. Zajímavé přitom bylo srovnání těles s podobnou objemovou hmotností, kdy metoda statického lisu vykazovala výrazně vyšší hodnoty pevnosti v příčném tahu jak po 7 tak po 14 dnech. V případě měření modulů tuhosti hodnoty nevykazovaly tak velké rozdíly. Ani zde ovšem nebyla nalezena shoda mezi jednotlivými způsoby hutnění. Výsledky tak neprokázaly možnost záměny jednotlivých způsobů hutnění. Metodika posouzení směsí studené recyklace tak musí být chápána jako celek, kdy nelze vytrhnout pouze přípravu těles, ale je třeba zohlednit i podmínky zrání těles, jeho časový průběh

a způsob samotného laboratorního posouzení s návazností na požadavky kladené na tyto směsi v jednotlivých státech EU.

V práci je tak použito standardních metod využívaných v ČR, tedy hutnění pomocí statického lisu tlakem 5 MPa. Prezentované vzorky jsou hutněny do forem o průměru 150 mm, odpovídají tedy současným požadavkům TP 208.

8.2. Zrání těles

Kapitola popisuje podmínky zrání těles v závislosti na použitém materiálu a typu zkoušky. Níže vypsány jsou jednotlivé typy zrání, kdy pro zeminy a kamenivo rozlišujeme zrání pro zkoušku IBI, CBR, pevnost v tlaku, odolnost proti mrazu a vodě a odolnost vůči objemovým změnám. V případě technologií studené recyklace, kterou se tato práce rovněž zabývá, je důležitým faktorem pro volbu správného zrání výběr použitého pojiva.

8.2.1. Zrání těles před zkouškou IBI a CBR

Zrání těles před zkouškou IBI neprobíhá a v závislosti na použitém pojivu je těleso zkoušeno ihned po zhutnění, nebo s kratším časovým odstupem. V případě hydraulických pojiv nejdéle 90 min po zhutnění, v případě použití hydraulických pojiv do 90 min po smíchání směsi, zároveň pokud bylo pro úpravu použito vápno, směsné pojivo s vápnem, nebo jiné pojivo na bázi vápna, nemělo by k posouzení dojít dříve než po 60 min od smíchání směsi.

Zrání těles pro zkoušku CBR je stanoveno v příslušné normě a je závislé na použité technologii. Zeminy a kamenivo bez pojiv jsou standardně posuzovány po 96 hodinách uložení ve vodní lázni. Zeminy a kamenivo stmelené hydraulickými pojivy jsou nejdříve skladovány 72 hodin ve vlhkém prostředí (vlhkost 90 – 100 %) a teplotě 20 ± 2 °C, následně je těleso na 96 hodin umístěno ve vodě. V průběhu zrání těles je sledováno takzvané lineární bobtnání, tedy zda při sycení těles nedochází k jeho objemovým změnám.

8.2.2. Zrání těles - pevnostní parametry

Z hlediska pevnostních parametrů rozlišujeme materiály použité v jednotlivých vrstvách. Zpravidla je vyžadováno ponechat vyrobené vzorky 24 hodin ve formách, následně vyjmout, změřit rozměry, zvážit a dále skladovat dle doporučených postupů. Pro směsi zeminy a kameniva upravené hydraulickými pojivy normy předepisují uchovat vyrobená tělesa po odformování při optimální vlhkosti, čehož lze dosáhnout uložení ve vlhké komoře, nebo uložení těles do neprodyšného obalu. Teplota zrání by měla být 20 ± 2 °C. Doba zrání potom odpovídá požadavkům na jednotlivé zkoušky. Určitým specifikem je zrání směsí studené recyklace, zejména pro směsi, kde je jako pojivo použito asfaltové pěny, nebo asfaltové emulze. Z hlediska studené recyklace tak TP 208 uvádí 3 metody zrání dle použitého pojiva

- u směsí stmelých cementem / jiným hydraulickým pojivem se uloží po vyjmutí z formy při vlhkosti 90 až 100 % a teplotě 20 ± 2 °C. Stejně jako pro směsi kameniva nebo zemin.
- u směsí stmelých cementem + asfaltovou emulzí / zpěněným asfaltem se tělesa po vyjmutí z formy uloží na 2 dny při vlhkosti 90 až 100 % a teplotě 20 ± 2 °C. Dále jsou tělesa skladována při vlhkosti 40 až 70 % a teplotě 20 ± 2 °C
- u směsí stmelých asfaltovou emulzí / zpěněným asfaltem se zkušební tělesa uloží na vzduchu při teplotě 20 ± 2 °C

Před samotným zkoušením je doporučeno tělesa temperovat na teplotu 15 ± 1 °C, zejména pokud je jako pojivo použito asfaltové pěny nebo asfaltové emulze.

8.3. CBR IBI

Postup zkoušení IBI a CBR specifikuje norma ČSN EN 13286-47, doplněn normou ČSN EN 14227-10, která stanovuje způsob stárnutí, popis zkoušení a požadavky pro zeminy upravené cementem. Rozhodujícím faktorem pro posouzení podloží vozovky je její únosnost. Na reálné stavbě je tato veličina posuzována pomocí statických zatěžovacích zkoušek. Po predikci únosnosti výsledné vrstvy v laboratoři je využíváno takzvaného kalifornského poměru únosnosti CBR (California Bearing Ratio). Zkouška CBR původně sloužila jako materiálová charakteristika pro navrhování konstrukcí silničních staveb empirickou metodou. Díky jednoduchosti stanovení CBR je dnes hojně využívána i pro posouzení únosnosti podloží vozovky [Klobouček 1979]. Zkouška CBR spočívá v zatlačování ocelového trnu o předepsaných rozměrech do zkušební vzorku s řízenou rychlostí pronikání 1,27 mm/min. Je zaznamenána síla pro dílčí zatlačení trnu do hloubky 2,5, resp. 5 mm. Výsledek je následně porovnán s hodnotami standardizovaného materiálu, jehož hodnoty CBR jsou předepsány normou. Výsledkem je potom poměr síly potřebné k zatlačení trnu při určité deformaci na zkoušeném a normovém vzorku (rovnice 9). Poměr únosnosti CBR zeminy v podloží je stanoven na vzorku zhutněném při optimální vlhkosti pomocí proctorova zařízení ČSN EN 13286-50, kdy pro podloží vozovky je zvolena metoda hutnění proctor standard. Zkušební těleso je dále podrobeno zrání popsanému v kapitole 8.2. Hodnota CBR je stanovena dle EN 13286-47 a je měřena s přitížením $4,5 \pm 0,2$ kg, které reflektuje přitížení od konstrukce vozovky.

$$CBR = \frac{p}{p_s} * 100 [\%] \quad (9)$$

kde p je specifické zatížení trnu (MPa) potřebné k jeho zatlačení do hloubky 2,5 resp. 5 mm zkoušeného materiálu.

p_s je specifické zatížení (MPa) trnu potřebné k jeho zatlačení do vzorku referenčního materiálu za předepsaných podmínek. Hodnoty zatížení p_s jsou uvedeny v normě ČSN EN 13286-47.



Obrázek 40: Sestava pro měření CBR (vlevo); vzorek po zkoušce CBR (vpravo nahoře); příklad lineárního bobtnání (vpravo dole)

Kromě CBR bývá požadovaná i hodnota IBI (Immediate Bearing Index), zejména při úpravě podloží vozovky pomocí hydraulických pojiv. Parametr IBI reprezentuje laboratorní posouzení okamžité únosnosti vrstvy ihned pro zhutnění a má simulovat reálné chování vrstvy a její únosnost pro jezd staveništní techniky, případně pokládku dalších vrstev. Postup zkoušky je velmi podobný zkoušce CBR, liší se jen v době zrání vzorků materiálu a samotná zkouška probíhá bez použití zatěžovacích prstenců.

8.4. Pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě

Posouzení pomocí pevnosti v tlaku je základním parametrem pro posouzení materiálů v podkladních vrstvách vozovky, na jehož základě je směs klasifikována pevnostní třídou $C_{x1/x2}$ případně $RC_{x1/x2}$, kde x_1 je pevnost měřená na válcích o štíhlostním poměru 2, a x_2 je pevnost měřená na krychli, nebo válci o štíhlostním poměru 1. Dle platných norem, pokud jsou zkoušena tělesa o jiném štíhlostním poměru, je nutné nejdříve stanovit korelaci mezi takto zkoušenými tělesy a tělesy o štíhlostním poměru 1 nebo 2. Z hlediska TP pro studenou recyklaci by se štíhlostní poměr zkoušených těles měl pohybovat mezi 0,8 – 1,2. Samotné zkoušení probíhá na statickém lisu, kdy je vzorek plynule zatěžován v ose tělesa a k jeho porušení dochází mezi 30 až 60 s od počátku zatěžování. Pevnost v tlaku R_c je stanovena dle následujícího vztahu (rovnice (10)) a směs je následně zatříděna dle příslušné normy řady ČSN EN 14227.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (10)$$

kde

F [kN] - je maximální síla zaznamenaná při porušení vzorku,

A [mm²] - je zatěžovaná plocha průřezu zkoušeného tělesa.

Pro zkoušku odolnosti vůči mrazu a vodě bylo z hlediska předpisů [ČSN EN 14227] přistoupeno ke krajně nevhodným podmínkám, tělesa byla zatížena 13 zmrazovacími cykly, 18 h při laboratorní teplotě 20 až 25 °C a 6 h v klimakomoře při -20 ± 2 °C, tedy teplotě odpovídající požadavkům na horní podkladní vrstvu v náročných klimatických podmínkách. Toto nastavení bylo voleno s důrazem na prokázání vybraných vlastností alternativních směsí a vhodnost vybraných úprav a alternativních pojiv i pro použití v náročných podmínkách. Tělesa jsou po 13 zmrazovacích cyklech následně podrobena zkoušce pevnosti v tlaku dle (ČSN EN 14286-41), kdy by tato pevnost měla dosahovat min 85 % pevnosti naměřené po 28 dnech zrání. V případě ztráty zrn z povrchu těles po zmrazovacích cyklech byl materiál doplněn sádrou a povrch srovnán do roviny tak, aby zatěžovaná plocha odpovídala podmínkám zkoušky. Pokud by toto doplnění nebylo provedeno, došlo by k výraznému ovlivnění zkoušky.

8.5. Bobtnání

Ověření objemové stálosti vybraných směsí, neboli stanovení součinitele objemové stálosti, probíhalo v CBR moždíři, kdy byl materiál o optimální vlhkosti hutněn energií předepsanou dle proctorovy zkoušky. Po zhutnění byla tělesa 28 dní uložena v neprodyšném obale při teplotě 20 ± 2 °C a následně sycena min. 28 dní, případně až do odeznění deformací. Součinitel bobtnání B_t byl stanoven dle následujícího vztahu (TP 93).

$$B_t = \frac{\Delta V_t}{V_1} \quad (11)$$

kde

V_1 [m³] – je počáteční objem vzorku,

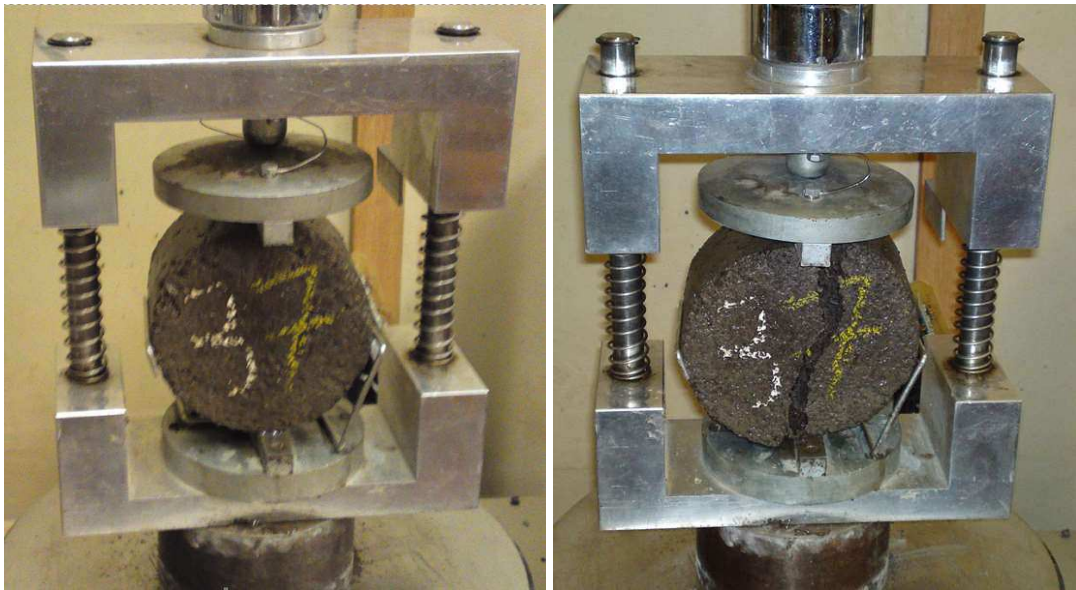
ΔV_t – je změna objemu vzorku v čase t,

B_t – je součinitel bobtnání.

8.6. Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu je základním nástrojem pro klasifikaci směsí studené recyklace. Dle TP 208 lze takto posoudit směsi s nižší třídou pevnosti C3/4 nebo směsi pro TDZ IV, V a VI. U těchto směsí lze nahradit zkoušky pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě zkouškami pevnosti v příčném tahu a odolnosti proti vodě, což vede ke zjednodušení a zrychlení klasifikace směsí. Samotná zkouška je provedena na tělesech vyrobených dle TP 208, postup výroby a zrání je blíže popsán v předcházejících kapitolách. Poté je těleso ve tvaru válce vloženo do lisu a namáháno tlakem v příslušné rovině procházející osou tělesa,

který v kolmém směru vyvolává tahová napětí, až do dosažení mezní hodnoty při které je těleso porušeno.



Obrázek 41: Zkušební vzorek před zkoušením (vlevo) a po ukončení zkoušky (vpravo)

Výsledkem zkoušky je pevnost zkušebního tělesa v příčném tahu, která byla vypočítána podle následující rovnice uvedené v TP208.

$$R_{it} = \frac{2 * F}{\pi * H * D} \quad (12)$$

R_{it} je pevnost zkoušeného tělesa v příčném tahu

F je maximální zatěžovací síla při porušení tělesa

D ... průměrný průměr zkušebního tělesa v mm stanovený ze 3 měření

H ... průměrná výška zkušebního tělesa v mm stanovená ze 4 měření

Zkouška byla provedena na tělesech po 7 dnech na vzduchu, následně byly provedeny zkoušky po 14 dnech od zhotovení, na tělesech ponechaných 7 dní na vzduchu a následně uložených po 7 dní ve vodě.

8.7. Monotónní triaxiální zkouška

V rámci dílčích projektů byly provedeny i zkoušky směsí prováděných za studena v triaxiální komoře, speciálně upravené pro potřeby testování směsí recyklace asfaltových vozovek za studena prof. Jenkinsem v JAR. Zkušební postup byl převzat rovněž od prof. Jenkinse a je podrobně popsán v „Determination of Triaxial Shear Parameters Using Simple Triaxial Test“ [Jenkins 2009]. Hlavní výhodou testování v triaxiální komoře oproti konvenčním metodám je možnost simulovat reálné prostředí v okolí zkoumaného segmentu, které je reprezentováno bočním tlakem. Zatěžování zkušebního tělesa probíhá shora hlavním napětím, přičemž těleso se umísťuje do speciální formy, která byla navržena na základě předchozích poznatků prof. Jenkinse, dále upravena a vyrobena v rámci vývojového oddělení Wirtgen. Hadičkou je do gumové membrány (obrázek 42), umístěné ve formě okolo zkušebního tělesa, přiváděn

vzduch pod předepsaným tlakem, který způsobuje boční (komorové) namáhání tělesa. Během předběžných testů jsme zkusili použití tenké kaučukové membrány doporučené v literatuře a vyráběné speciálním postupem např. na univerzitě Stellenbosch v JAR. Její velkou nevýhodou je ovšem malá trvanlivost a citlivost na manipulaci, kdy velmi rychle docházelo k prodření tenké vrstvy kaučukového materiálu. Masivnější gumová membrána, která byla navržena firmou Wirtgen má sice vyšší hmotnost, ale vyznačuje se výrazně větší odolností, s čímž je spojená i snazší manipulace. Mezi jednotlivými zkouškami nebylo totiž nutné formu rozevírat, stačilo pouze odpojit membránu od přívodu vzduchu, odmontovat spodní podstavu, zvednout formu i s membránou a porušené zkušební těleso jednoduše vyjmout. Poté bylo na podstavu položeno nové zkušební těleso a forma i s membránou byla na něj shora nasunuta. Toto zjednodušení, které výrazně snížilo časovou náročnost zkoušení, bylo umožněno především použitím masivnější membrány, která podobné zacházení vydrží. Vzorek je zatěžován až do porušení, kdy dojde k usmýknutí vzorku po smykové ploše, resp. ve směru ve kterém má vzorek nejnižší smykovou pevnost, která je reprezentována parametry smykové pevnosti: „C“ soudržnost a „ φ “ úhlem vnitřního tření. Pro každou směs bylo odzkoušeno celkem devět těles, pro každou úroveň bočního tlaku tři.

V rámci testování triaxiální komory na ČVUT byly mimo směsi studené recyklace prověřeny i směsi zemin stmelené hydraulickými pojivy, případně směsi upravené modifikačními přísadami. Posuzování zemin stmelých hydraulickými pojivy může narážet na některé poznatky prof. Jenkinse [Jenkins 1999, 2004], podle kterého je posouzení pomocí triaxiálního přístroje možné pouze u směsí bez většího množství aktivního fileru. K tomuto tvrzení ho přivedl poznatek z prováděných experimentálních měření, kdy přidávání většího množství cementu vedlo k nárůstu soudržnosti a zároveň k poklesu úhlu vnitřního tření až k hodnotě 0° . Nutno podotknout, že zmiňované testy byly provedeny na směsích studené recyklace s asfaltovým R-materiálem, tedy materiálem, který se zrnitostí diametrálně liší od námi testovaných zemin. Naše dosavadní výsledky toto chování zatím nepotvrdily. Testování pomocí triaxiální komory by se tak mohlo stát vhodným nástrojem pro klasifikaci stmelých zemin.



Obrázek 42: Zatěžování zkušebního tělesa během zkoušky (vlevo), detail formy s gumovou membránou uvnitř (vpravo)

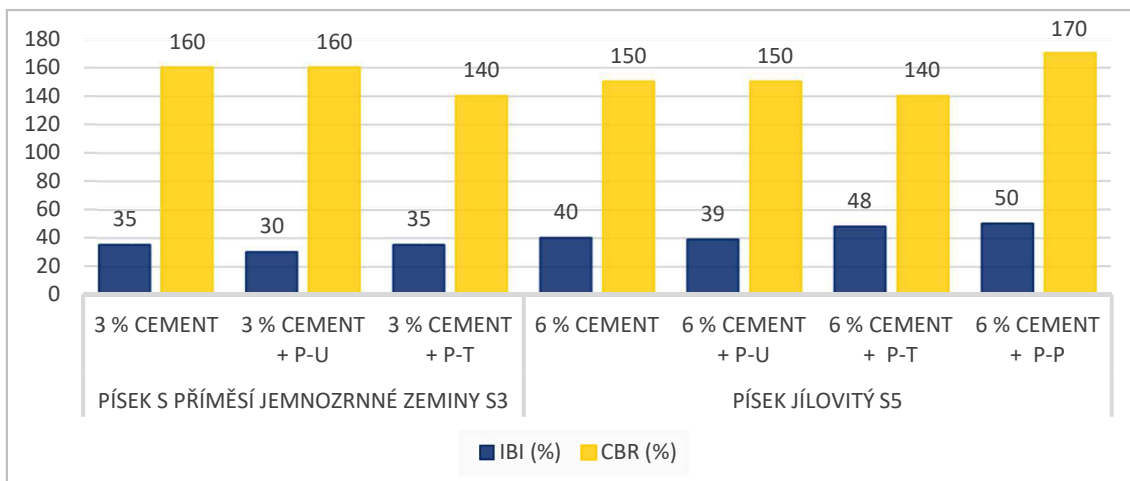
9. Experimentální činnost

9.1. Posouzení hydrofobizačních přísad

Posouzení hydrofobizačních přísad bylo provedeno na lokálních zeminách klasifikovaných jako písek s příměsí jemnozrnné zeminy (Z-S-F) a písek jílovitý (Z-SC). Zrnitost a další parametry zemin jsou uvedeny v kapitole 7.1. Schopnosti přísad hydrofobizovat směs bylo využito i v navazujících projektech, kde bylo stěžejní využití fluidních popílků. V této kapitole tak najdeme i aplikaci hydrofobizačních přísad na směsí fluidního popílku a zeminy, jejíž návrh a optimalizace je uvedena v kapitole následující. Cílem posouzení bylo ověřit aplikaci přísad na hydraulicky stmelené vrstvy a schopnost těchto přísad hydrofobizovat upravenou zeminu a tím ovlivnit vliv vody na měřené parametry, zejména na odolnost směsi vůči mrazu a vodě. Zároveň bylo nutné posoudit vliv na samotnou hydrataci cementu. Do této doby byly přísady používány pouze pro úpravu parametrů zeminy. Ve specifických aplikacích tedy nahrazovaly hydraulická pojiva, nebo sloužily k impregnaci povrchu komunikací v rozvojových zemích, kde jsou zvýšené nároky na odolnost komunikací vůči účinkům okolního prostředí. Doporučené dávkování jednotlivých přísad bylo stanoveno dle předchozích poznatků, kdy byly směsi aplikovány za účelem zlepšení únosnosti a úpravy návrhových parametrů zeminy. Jako referenční pojivo byl použit standardní cement CEM II/B-M 32,5R. Důvodem použití cementu jako hydraulického pojiva byl i předpoklad určitého spolupůsobení vybraných přísad právě s cementem. Množství přidávaného pojiva bylo stanoveno na základě předchozích zkušeností s návrhem zemin stmelených hydraulickými pojivy, jejich klasifikace a výsledků CBR.

9.1.1. IBI, CBR (hydrofobizační přísady)

Stejně jako při posuzování alternativních hydraulických pojiv bylo i zde cíleno na parametry vhodné pro podkladní vrstvy vozovky. Parametry IBI a CBR byly proto spíše doplňující informací, a z hlediska praktického využití byly značně předimenzovány. Následující hodnoty tak pouze upozornily na některé jevy pozorované i v případě sledování pevnostních parametrů směsi. Oproti předpokladu došlo k poklesu hodnoty CBR po ošetření směsi hydrofobizační přísadou P-T. I přes fakt, že procentuální pokles vzhledem k vysokým hodnotám CBR byl zanedbatelný, byl pozorován u všech sledovaných vzorků. Jedním z možných vysvětlení je funkčnost samotné přísady, která ze své podstaty mohla zabránit přístupu vody v průběhu zrání, kdy bylo těleso umístěno ve vodě. Tato voda, která v případě neošetřené zeminy měla volný přístup ke vzorkům a nehydratované části cementu, mohla v některých případech proces hydratace podpořit. Voda se v případě ošetřené zeminy pravděpodobně nedostala k ještě plně nehydratovaným částem hydraulického pojiva, což má za následek pokles laboratorně testované únosnosti. Saturace vzorků během zrání tak nijak neovlivnila průběh hydratace cementu uvnitř vzorku. V ostatních případech uložení těles ve vodě mohlo podpořit proces hydratace cementu a tím samotné zrání vzorku. Dílčí pokles tak můžeme chápat jako potvrzení funkčnosti přísady P-T, která má směřovat k hydrofobizaci.



Obrázek 43: CBR: Z-S-F, Z-SC + hydrofobizační přísady

9.1.2. Pevnostní charakteristiky (hydrofobizační přísady)

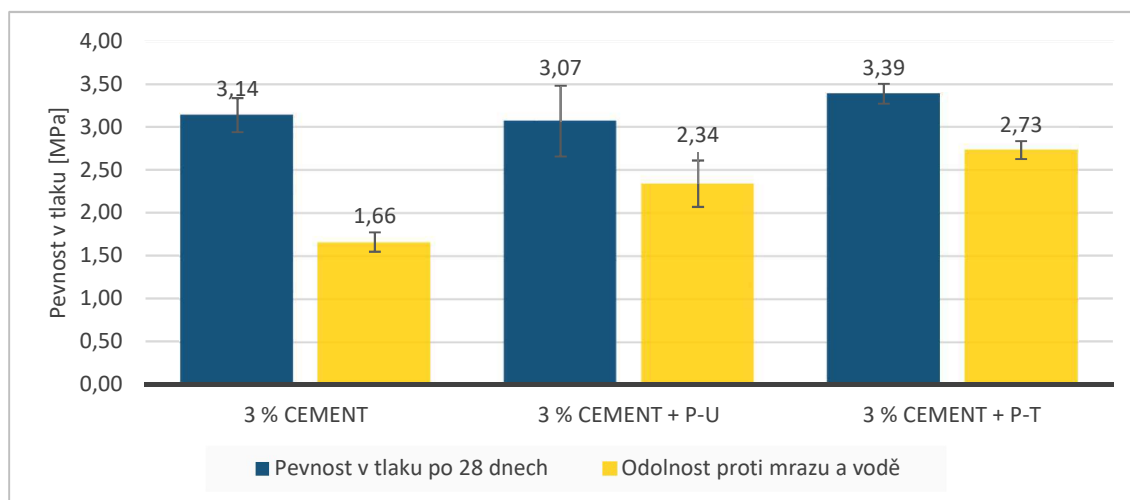
Posouzení pevnostních parametrů probíhalo na vzorcích zeminy Z-S-F a Z-SC, tedy na zeminách, které byly posouzeny z hlediska CBR a IBI v předchozí kapitole. Zemina Z-S-F byla zvolena na základě předchozího měření, kdy zemina upravená cementem vykazovala velmi špatnou odolnost proti mrazu a vodě. Jedná se tedy o příklad potenciálního použití přísady na hydrofobizaci směsi. Měření pevnosti po 28 dnech a odolnosti vůči mrazu a vodě bylo doplněno o sledování pevnostních parametrů v čase, tak aby byl podchycen počáteční nárůst pevností a chování směsí ošetřených přísadami po 28 dnech daných normou.

Pojivo	Písek s příměsí jemnozrné zeminy S3			Písek jílovitý S5			
	3 % cement	3 % cement + P-U	3 % cement + P-T	6 % cement	6 % cement + P-U	6 % cement + P-T	6 % cement + P-P
Zrání							
1	2,43	1,67	1,72	2,83	2,59	2,09	1,50
7	2,89	2,52	2,13	3,24	3,78	3,25	2,08
14	2,98	2,85	2,74	3,55	4,77	4,05	2,68
28	3,14	3,07	3,39	3,69	5,78	4,36	3,33
60	4,28	3,66	3,24	4,87	8,90	7,24	3,37
Odolnost proti mrazu a vodě [MPa]	1,66	2,34	2,73	3,93	4,67	4,33	4,13
	52,8%	76,2%	80,6%	106,50 %	80,84%	99,45%	124,02 %

Tabulka 10: Pevnostní parametry zemin upravených hydrofobizačními přísadami

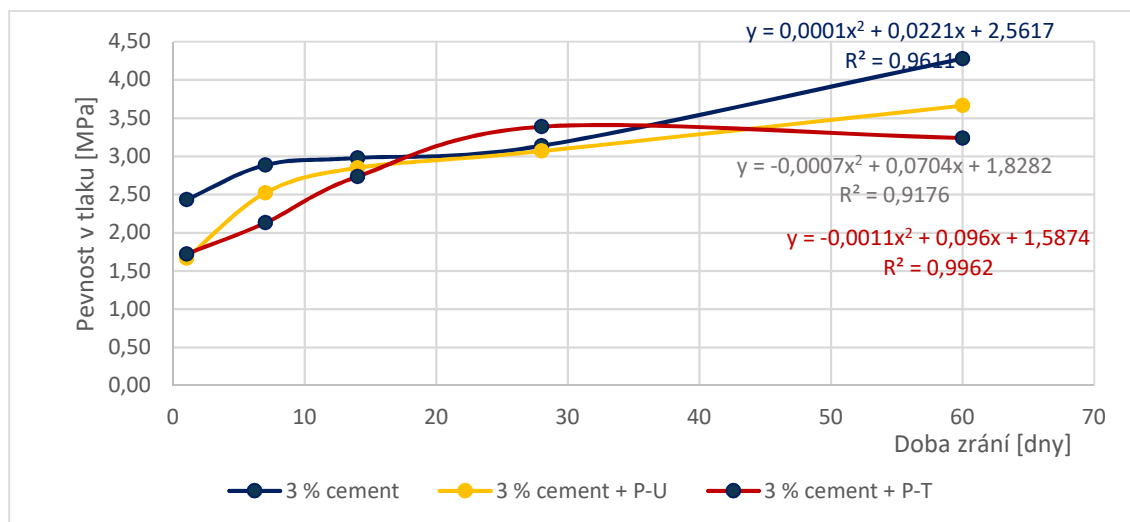
Naměřené hodnoty pro písčitou zeminu s příměsí jemnozrných hlinitých složek jasně prokázaly vhodnost použití přísad P-T a P-U, které jsou primárně zaměřeny na hydrofobizaci směsi, a měly by zabránit vnikání vody do jednotlivých zrn. Tento jev byl pozorován při zkoušce odolnosti proti mrazu a vodě, kdy směsi ošetřené přísadami vykazovaly výrazně vyšší odolnost než referenční směs.

Vzorky upravené pomocí P-T vykazovaly zhruba o 30 % vyšší odolnost vůči mrazu a vodě, v případě přísady P-U bylo pozorované zlepšení odolnosti cca 25% oproti referenční směsi, chování směsí po 28 dnech přitom odpovídalo referenční směsi. V tomto ohledu byl plně potvrzen pozitivní efekt přísad a vytyčena oblast jejich potenciálního využití v oblasti namrzavých zemin.



Obrázek 44: Pevnost v tlaku: Z-S-F + hydrofobizační přísady

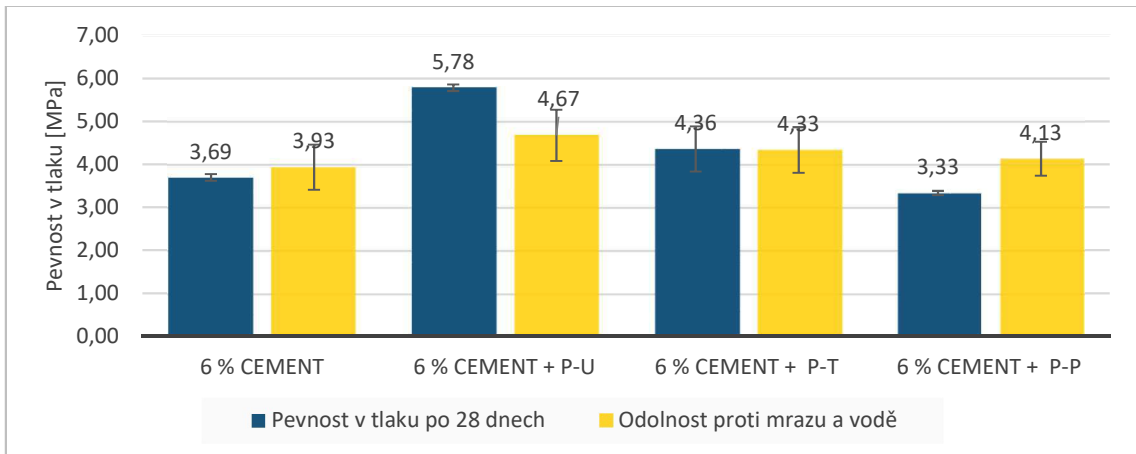
Z hlediska dlouhodobého sledování byly u těles ošetřených přísadou pozorovány pomalejší nárůsty pevnosti v prvních dnech zrání těles, nicméně 28 denní pevnost dosahovala srovnatelných hodnot s referenční směsí. Zajímavý byl pokles pevnosti po 60 dnech v případě P-T. Tento pokles, stejně jako pozvolnější nárůst pevností, opět poukazuje na vliv přísad na hydrataci hydraulických pojiv.



Obrázek 45: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-S-F + hydrofobizační přísady)

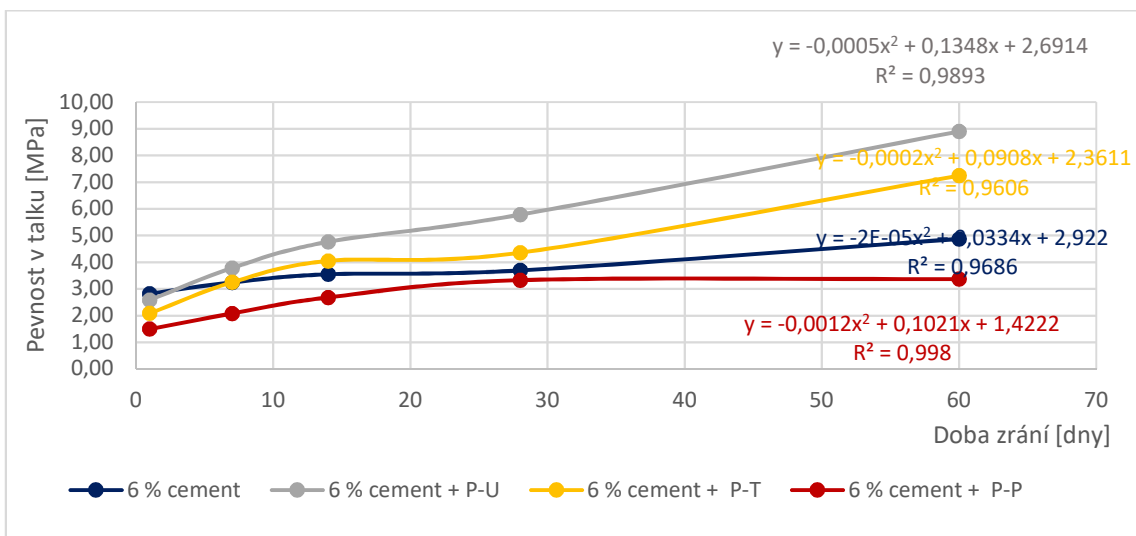
Přínos přísad při vyšším dávkování hydraulických pojiv již nebyl tak jednoznačný, jako v případě namrzavých zemin. Z hlediska posouzení odolnosti vůči mrazu a vodě nebylo pozorováno výraznější zlepšení, neboť podobný charakter odolnosti proti mrazu vykazovala i referenční směs. V případě P-U došlo dokonce

k poklesu odolnosti, což ovšem mohlo souviset s poměrně vysokou pevností v tlaku po 28 dnech.



Obrázek 46: Pevnost v tlaku: Z-SC + hydrofobizační přísady

Vyšší dávkování pojiv mělo výrazný vliv na vývin pevnosti u referenční směsi, kdy došlo k velmi rychlému nárůstu pevnosti již v prvních dnech zrání (cca 75 % 28 denní pevnosti), poté však došlo k výraznému zpomalení. V případě přísad někteří výrobci deklarovali jejich vedlejší efekt, kterým by mělo být spolupůsobení s hydraulickými pojivy, což mohlo vést k vyšším pevnostem po 28 a 60 dnech. Zároveň byl stejně jako u Z-S-F pozorován pomalejší nárůst pevnosti v prvních dnech zrání těles. Otázkou bylo, zda pozorovaný jev spíše nesouvisí se změnou parametrů zeminy a ovlivněním vodního režimu na počátku zrání. I tak je jev vnímán pozitivně a má za důsledek zlepšené pevnostní parametry směsi. V tomto ohledu bylo možné shledat přidání přísad P-T a P-U účelným, nicméně stále nebyl plně prověřen vliv přísady na samotnou hydrataci. Přístada P-P rovněž zpomalila nárůst pevnosti v čase, který se oproti ostatním přísadám po 28 dnech výrazně zpomalil. Z hlediska současných předpisů se ovšem jedná o směsi srovnatelných parametrů.



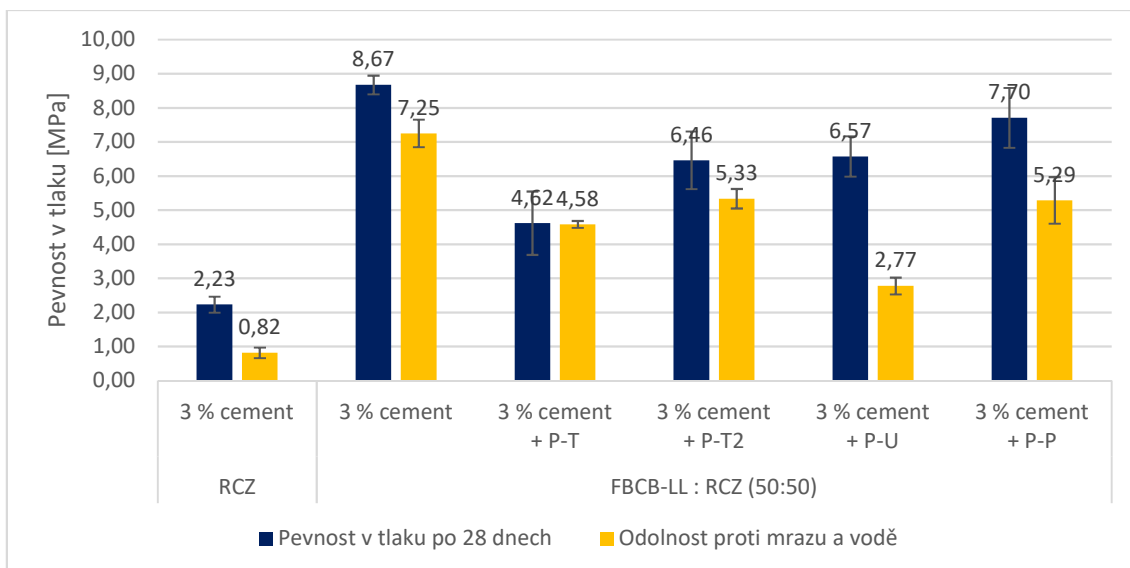
Obrázek 47: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-SC + hydrofobizační přísady)

Poznatky o chování jednotlivých přísad, které byly provedeny na přírodních materiálech, byly dále využity pro úpravu směsí zeminy a popílku popsanou v následující kapitole 9.3. Všeobecným problémem popílků jsou jejich výrazné objemové změny při kontaktu s vodou, tzv. bobtnavost popílků. Zvýšení odolnosti směsí vůči účinkům vody a mrazu, by tak úspěšná aplikace hydrofobizačních přísad mohla výrazně redukovat i objemové změny těchto materiálů. Aplikace hydrofobizačních přísad na směsi recyklovaných zemin a popílků měla pouze doplnit předchozí poznatky o aplikaci přísad na hydraulicky stmelené vrstvy. Volba aplikace přísad právě na tyto směsi ovšem ukázala možnou Achillovu patu využití hydrofobizačních přísad k ošetření hydraulicky stmelěných vrstev.

Materiál	Pojiva a přísady	Objemová hmotnost	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Odolnost proti mrazu a vodě	
		[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Recyklovaná cementem upravená zemina (RCZ)	3 % cement	2,01	2,23	0,82	36,65%
Fluidní popílek Ledvice lože : Recyklovaná cementem upravená zemina (FBCB-LL : RCZ (50:50))	3 % cement	1,78	8,67	7,25	83,62%
	3 % cement + P-T	1,99	4,62	4,58	99,23%
	3 % cement + P-T2	1,75	6,46	5,33	82,59%
	3 % cement + P-U	1,99	6,57	2,77	42,20%
	3 % cement + P-P	1,75	7,70	5,29	68,61%

Tabulka 11: Pevnostní parametry směsí zeminy a popílku ošetřené hydrofobizačními přísadami

Vliv přidávaných přísad na sledované parametry byl jednoznačně negativní. I když odolnost vůči mrazu a vodě v některých případech vyhověla podmínkám normy a byl zde patrný nárůst oproti směsím bez popílků, byl zaznamenán pokles pevnostních parametrů oproti směsi zeminy a popílku bez přísad. Rovněž rozptyl jednotlivých měření byl na hraně únosnosti. Vysvětlení se nabízelo v samotné podstatě jednotlivých přísad a potvrdily se tak předchozí domněnky o možném vlivu přísad na proces hydratace. Pravděpodobně došlo k ošetření samotného popílku, kdy přísady zabránily kontaktu fluidního popílku s vodou, a nedocházelo tak k jeho plné hydrataci. Tento fakt se nám podařilo částečně potvrdit u varianty P-T2, kdy byla směs popílku a zeminy nejdříve promísena s cementem a částí záměsové vody a až po 10 minutách byla přidána přísada P-T rozmíchaná ve zbytku záměsové vody. Efektem tohoto pozdržení byl nárůst pevnosti o téměř 50 %. Lze se tedy domnívat, že samotná přísada neovlivňuje pouze samotnou zeminu, ale do jisté míry jejím přidáním ovlivníme i schopnost popílku absorbovat vodu a reagovat s ní. Bylo tedy pravděpodobné, že tento efekt mohou přísady mít i na samotné hydraulické pojivo.



Obrázek 48: Pevnost v tlaku: směsi zeminy a popílku ošetřené hydrofobizačními přísadami

9.1.3. Posouzení pomocí monotónní triaxiální zkoušky

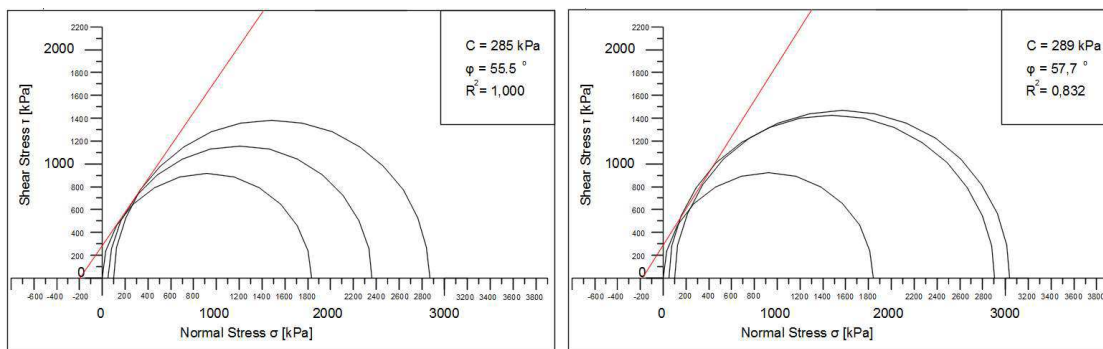
V rámci projektu zaměřené na posouzení využitelnosti velké triaxiální komory pro technologie studené recyklace jsme měli možnost otestovat směsi zemin ošetřené hydrofobizačními přísadami i pomocí trojosého namáhání. Pro posouzení byla vybrána směs hydraulicky stmelené zeminy Z-S-F.

		F [kN]	$\sigma_{1,f}$ [kPa]	σ_3 [kPa]	ϕ [°]	C [kPa]	R ₂
		Zatížení v okamžiku porušení	Normálové napětí	Boční (komorový) tlak	Úhel vnitřního tření	Soudržnost	Korelační koeficient
3% cement	C1-100kPa	47,73	2658,755	100	55,49	270	0,871
	C2-150kPa	63,21	3522,78	150			
	C3-200kPa	66,14	3695,419	200			
3% cement + P-T	T2- 0kPa	32,95	1831,421	0	55,51	285	1,000
	T3-50kPa	42,38	2363,362	50			
	T1-100kPa	51,39	2869,347	100			
3% cement + P-U	U1- 0kPa	33,17	1843,337	0	57,74	289	0,832
	U2-50kPa	52,19	2907,060	50			
	U3-100kPa	54,70	3038,869	100			

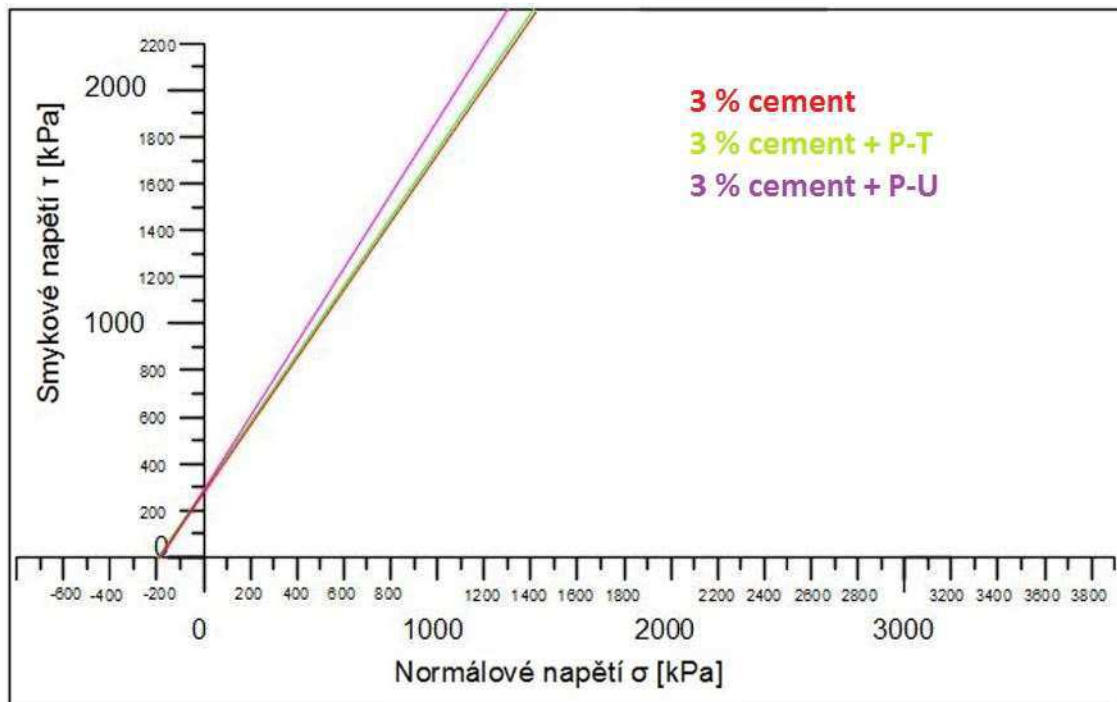
Tabulka 12: Smykové parametry zemin upravených hydrofobizačními pojivy

Stejně jako v případě alternativních hydraulických pojiv byla i u hydrofobních přísad provedena monotónní triaxiální zkouška jakožto doplňující nástroj pro posouzení jednotlivých přísad. Vzhledem k novému typu zkoušky, kdy bylo

na počátku potřeba nastavit vhodné okrajové podmínky a vyřešit problémy s hutněním vzorků a samotným zkoušením v triaxiální komoře, byla zvolena jiná nastavení bočních tlaků pro směsi referenční a směsi zlepšené hydrofobizačními přísadami. Tento fakt, i vzhledem k prezentovaným výsledkům, by neměl mít na samotné posouzení přísad výraznější vliv. Naměřená data ukázala na potenciál přísady P-U, u které výrobce deklaroval určité spolupůsobení s cementem. Směs s přísadou P-U vykazovala vyšší soudržnost a úhel vnitřního tření, než referenční směs a směs ošetřená přísadou P-T. Příklad P-T oproti tomu korespondovala s referenční směsí a z hlediska triaxiálního namáhání mezi nimi nebyl velký rozdíl. Obě přísady tak lze považovat z hlediska posouzení v triaxiální komoře za vyhovující, přísada P-U navíc vykazovala zlepšené vlastnosti výsledné směsi, kdy se nepatrně zvýšil úhel vnitřního tření i soudržnost.



Obrázek 49: Směs upravená P-T (vlevo), P-U (vpravo)



Obrázek 50: Obalové křivky pro zeminy upravené hydrofobizačními přísadami

9.1.4. Shrnutí poznatků hydrofobizační přísady

V práci byl popsán vliv hydrofobizačních přísad na výsledné parametry směsi upravených nebo stmelovaných hydraulickými pojivy. V případě hydrofobizačních

přísad se podařilo prokázat pozitivní vliv přísad na zeminy citlivé na přítomnost vody, kdy docházelo zejména ke zlepšení parametrů po zmrazovacích cyklech. Tělesa vykazovala parametry referenční směsi po 28 dnech zrání a zároveň došlo k výraznému snížení citlivosti na účinky mrazu a vody. V některých případech byl pozorován i pozitivní vliv na nárůst pevnosti v čase, kdy docházelo k plynulejšímu a konstantnějšímu nárůstu sledovaných parametrů, než u neošetřených směsí. Poznatky byly doplněny o měření na triaxiálním přístroji, kdy směsi ošetřené přísadami vykazovaly obdobné vlastnosti jako neupravené směsi. Přínos přísad byl prokázán i u směsí s vyšším dávkováním hydraulických pojiv. Parametry směsí s přísadami odpovídaly pevnostem měřeným na referenční směsi a zároveň směsi vykazovaly srovnatelné vlastnosti z hlediska odolnosti proti mrazu a vodě. Nicméně v případě vyššího dávkování pojiv docházelo u směsí s přísadami k vyšším výkyvům mezi jednotlivými zkoušenými vzorky, zejména v případě posouzení odolnosti vůči mrazu a vodě, jejíž zlepšení bylo prvotním motivem pro použití hydrofobizačních přísad. Rovněž při sledování pevnostních parametrů v čase docházelo k výrazným výkyvům, kdy nárůst pevnosti nebyl konstantní ve smyslu zpomalování a zrychlování zrání v čase. Jedním z vysvětlení je teoretické ovlivnění hydratace cementu samotnými hydrofobizačními přísadami u jednotlivých vzorků. U sledovaných směsí jsme nepozorovali pouze výkyvy pevnostních parametrů v čase, ale i poměrně velký rozptyl výsledků v rámci jednoho měření. Pro zjištění vlivu přísad na proces hydratace bohužel silniční laboratoř nedisponuje potřebným zařízením a další zvyšování podílu hydraulických pojiv nepřineslo uspokojivé odpovědi. Podobný jev byl pozorován i u směsí s fluidními popílků, kde by aplikace těchto přísad měla svůj smysl jako prevence před případným bobtnáním, případně pro zakonzervování nebezpečných látek, které popílků obsahují. Při ošetření směsí s popílkem přísady ze své podstaty zabránily přístupu vody k popílků a tím jeho následné hydrataci. Potvrdila se tak funkčnost jednotlivých přísad, které dokonale hydrofobizovaly směs zeminy a přidaného popílků, který i přes svůj latentně hydraulický charakter byl částečně izolován od vody a nedošlo tak k žádoucí hydraulické reakci. V tomto ohledu lze konstatovat vliv na samotnou hydrataci fluidních popílků a možné ovlivnění tohoto procesu u hydraulického pojiva, i když v případě pojiva tento efekt nebude tak markantní. Možné řešení tohoto problému lze spatřovat v odděleném dávkování, kdy dojde k ošetření zeminy přísadou a po určité době je přidáno hydraulické pojivo. Tento proces dvojího dávkování by ovšem byl náročný na technologickou kázeň i samotné provedení úpravy. Potenciál přísad na poli hydraulicky stmelovaných zemín tak výrazně klesá a lze je efektivně použít pouze v omezené míře v kombinaci s nižším dávkováním pojiva, nebo u aplikací pro úpravu zeminy bez přidání pojiv, které ovšem nejsou předmětem této práce. Jedním z problémů je i samotné dávkování, kdy se přísady dávkují společně se záměsovou vodou. Je tedy vyloučeno jejich použití v případech, kdy je naopak nutné u upravované zeminy snížit vlhkost například přidáním vápna. V praxi tak tyto přísady budou funkční pouze ve specifických případech, kdy není zapotřebí upravovanou zeminu odvlhčovat, naopak je potřeba pro optimální hutnění navýšit vlhkost upravované zeminy. Před případným použitím hydrofobizačních přísad v praxi tak bude potřeba podrobněji prozkoumat vliv přísad na konkrétní směs

materiálu a hydraulického pojiva. Rovněž by bylo vhodné upřesnit postup aplikace jednotlivých přísad přímo do směsi tak, aby byl minimalizován vliv přísad na samotnou hydrataci. Například by bylo vhodné směs nejdříve ošetřit pomocí přísady rozpuštěné v části záměsové vody a až následně promíchat s hydraulickým pojivem. Částečně by se tak mohl eliminovat negativní vliv na samotnou hydrataci hydraulických pojiv. V praxi bude rovněž nutné uplatnit vyšší nároky na technologickou kázeň, brát v úvahu dobu úpravy a s tím související cenu. Přínos a případné uplatnění přísad tak lze spatřovat u velmi namrzavých zemin, případně u aplikací, kde je vhodné zeminu izolovat od okolní vody, například v případě nežádoucího chemického složení ošetřovaného materiálu.

9.2. Příklad na bezprašnost

Primárním úkolem nebylo zkoumání vlivu této přísady na bezprašnost, tento jev byl již dostatečně popsán výrobcem, ale podobně jako u přísad na hydrofobizaci směsi bylo nutné posoudit případný vliv přísady na proces hydratace. Pro posouzení byla použita přísada na bázi chloridu hořečnatého $MgCl_2$. Posouzení vlivu přísady na směsi stmelené cementem bylo provedeno pomocí zkoušek pevnosti v tlaku a odolnosti vůči mrazu a vodě, tak aby byl postihnut případný vliv přísady na hydrataci cementu, jelikož chloridy mohou do jisté míry ovlivňovat vývoj pevnostních charakteristik a při vyšším obsahu chloridů v materiálu může dojít i k jeho bobtnání.

	SC	RSC
ŠD Litice 0/32	80,0%	50,0%
ŠP Uhy 0/16	20,0%	--
R-mat Středokluky 0/22	--	50,0%
Cement	6,0%	6,0%
Voda	3,1%	3,1%
P- $MgCl_2$	3,1 % (v případě dávkování do směsi), 2 l/m ² (v případě postřiku)	

Tabulka 13: Složení směsi- P- $MgCl_2$

Příklad byla aplikována na dva typy směsi, v jednom případě se jednalo o kombinaci ŠD 0/32 a ŠP 0/16 stmelené cementem, v druhém případě byl ŠP 0/16 nahrazen betonovým recyklátem získaným z rekonstrukce dálnice D1.

	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Odolnost proti mrazu a vodě
SC (6 % cementu)	7,20	6,14
SC (6 % cementu + postřik $MgCl_2$ - 2l/m ²)	7,66	8,89
SC (6 % cementu + 3,1 % $MgCl_2$ ve směsi)	6,22	0,00

Tabulka 14: Pevnostní parametry směsi SC ošetřené přísadou $MgCl_2$

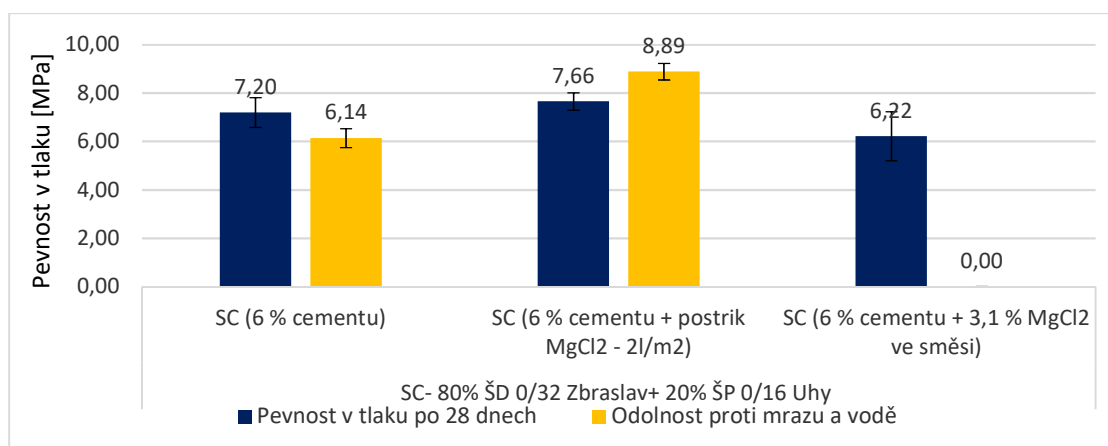
U směsi SC byla přísada P- $MgCl_2$ dávkována jak formou postřiku (standardní postup), tak přímo do směsi při jejím míchání. Postřik na již ztuhlou směs byl proveden 5 dní po ztuhnutí směsi v dávkování 2 l/m² a přísada byla dávkována pomocí rozprašovače. Tento postup sebou nesl zatížení možnou chybou ve smyslu nepřesného dávkování přísady na povrch vzorku, kdy určité množství přísady bylo dávkováno i mimo povrch laboratorního vzorku. Pro eliminaci příliš

nízkého dávkování přísady bylo dávkování mírně navýšeno. V druhém případě byla prověřena varianta přidání přísady přímo do směsi, kdy bylo dávkování po konzultaci s dodavatelem přísady stanoveno na 3,1 % hmotnosti ošetřovaného materiálu. Pokud se zaměříme na aplikaci postřikem, směs nevykazovala zhoršení, naopak došlo k mírnému zlepšení pevnostních parametrů oproti referenční směsi. V tomto případě neměl postřik na pevnostní parametry již stmelené vrstvy žádný negativní efekt.



Obrázek 51: Aplikace přísady přímo do směsi - vzorky po zmrazovacích cyklech

V případě přidání přísady do záměsové vody došlo ke snížení pevnosti po 28 dnech. Zkoušku po zmrazovacích cyklech vůbec nebylo možné provést, jelikož samotná tělesa vlivem působením vody bobtnala a během zmrazovacích cyklů byla tělesa doslova roztrhána (obrázek 51). Tělesa po zmrazovacích cyklech vykazovala pevnosti pod hranicí měřitelnosti laboratorního zařízení. Pravděpodobně díky vysokému obsahu $MgCl_2$ v záměsové vodě nedošlo k řádné hydrataci cementu a v důsledku hyroskopických vlastností $MgCl_2$ mohlo mezi jednotlivými látkami dojít ke kompetici o dostupnou vodu ve směsi. Důsledkem tohoto chování je nedostatečný nárůst pevností a trvale zvýšený obsah vázané vody. Zvýšený obsah $MgCl_2$ ve směsi navíc mohl vyvolat nežádoucí objemové změny. Kombinace těchto jevů tak pravděpodobně vedla k nedokonalému propojení směsi, nedostatečným pevnostním charakteristikám a následnému porušení těles během zmrazovacích cyklů. Z tohoto pohledu je přidávání přísady do směsi naprosto nevyhovující a pro další testování byla tato varianta zavržena.



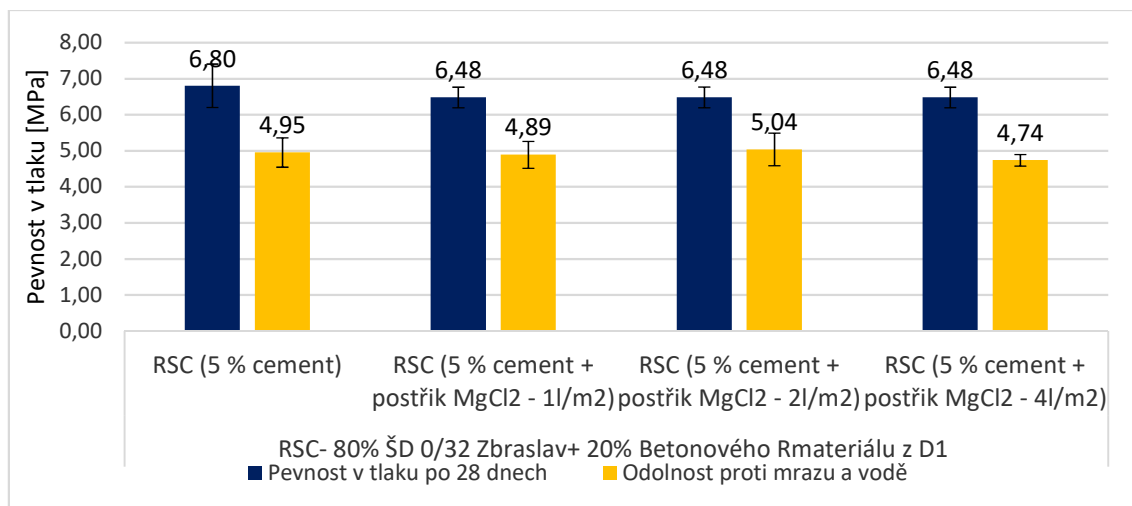
Obrázek 52: Pevnost v tlaku: SC + MgCl₂

Pro další posouzení vlivu přísady na pevnostní parametry bylo zvoleno dávkování přísady formou postřiku na povrch již ztuhnutých těles. Oproti prvotnímu posouzení byl postřik realizován pomocí tvárné hmoty, která utěsnila prostor kolem tělesa a na povrch bylo aplikováno předepsané množství P-MgCl₂. Tímto bylo zajištěno přesné dávkování přísady na povrch vzorku a došlo k eliminaci nežádoucích jevů spojených s dávkováním pomocí rozprašovače. Dle doporučeného rozsahu dávkování pro použití v praxi byly stanoveny 3 varianty dávkování a to postřikem v množství 1, 2 a 4 l na m².

	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Odolnost proti mrazu a vodě
RSC (5 % cement)	6,80	4,95
RSC (5 % cement + postřik MgCl ₂ - 1l/m ²)	6,48	4,89
RSC (5 % cement + postřik MgCl ₂ - 2l/m ²)	6,48	5,04
RSC (5 % cement + postřik MgCl ₂ - 4l/m ²)	6,48	4,74

Tabulka 15: Pevnostní parametry směsí RSC ošetřených přísadou MgCl₂

Z naměřených dat (tabulka 15) bylo patrné, že dodatečný postřik zpevněného kameniva neměl na pevnost výraznější vliv, a to ani u nadstandardního dávkování 4 l/m². Odchylka naměřených hodnot pro směsi ošetřené přísadou se pohybuje do 5 % od hodnot naměřených na referenční směsi. V případě postřiku naměřená data jednoznačně deklarovala prakticky nulový vliv aplikované přísady na výsledné pevnostní parametry směsi a nebyly tak nalezeny žádné překážky pro použití této přísady i v případě vrstev stmelovaných hydraulickými pojivy.



Obrázek 53: Pevnost v tlaku: RSC + MgCl₂

9.3. Posouzení substituce zemin popílků

Kapitola je zaměřena na využití fluidních popílků a jejich latentně hydraulických vlastností pro úpravu a stmelení lokálních zemin. V práci je uvedeno možné využití fluidních popílků pro částečnou substituci přírodních nebo recyklovaných materiálů určených pro další využití v konstrukci vozovky. Pro tyto účely byla zvolena substituce staré cementové stabilizace (RCZ) získané z rekonstrukce dálnice D1 72km. Dále substituce přírodního materiálu, klasifikovaného jako písek jílovitý (Z-SC), pocházejícího z modernizace železničního koridoru z lokality Veselý nad Lužnicí. Tyto dva materiály byly z 50 % nahrazeny popílkem z elektráren Mělník, Ledvice a Tisová. Množství přidávaného pojiva bylo stanoveno na základě klasifikace zeminy a výsledků předchozích testů. Hutnění probíhalo v proctorově pěchu [ČSN EN 13286-50], proces hutnění je popsán v kapitole 8.1. Vzhledem k zrnitosti materiálu byla zvolena proctorova forma o průměru 100 ± 1 mm a výšky 120 ± 1 mm. Hutnění probíhalo dle proctor modifikovaný. Hodnoty optimální vlhkosti a množství přidávaného pojiva (cement CEM II/B-M 32,5R) jsou uvedeny v tabulce 16. Po zhutnění byla tělesa uchována dle postupů uvedených v kapitole 8.2.

	Optimální vlhkost	Pojivo
Jílovitý písek S5 100 %	8,50%	6%
Fluidní popílek Tisová Lože : Jílovitý písek (50:50)	15,69%	6%
Fluidní popílek Tisová Úlet : Jílovitý písek (50:50)	23,37%	6%
Fluidní popílek Ledvice Lože : Jílovitý písek (50:50)	20,75%	6%
Cementová stabilizace D1 100%	11,20%	3%
Popílek z klasického spalování Mělník Úlet : Cementová stabilizace D1 (50:50)	16,10%	3%
Fluidní popílek Tisová Lože : Cementová stabilizace D1 (50:50)	16,79%	3%
Fluidní popílek Tisová Úlet : Cementová stabilizace D1 (50:50)	24,10%	3%
Fluidní popílek Ledvice Lože : Cementová stabilizace D1 (25:75)	16,53%	3%
Fluidní popílek Ledvice Lože : Cementová stabilizace D1 (50:50)	21,85%	3%

Tabulka 16: Optimální vlhkost a množství přidávaného pojiva pro směsi zemin a popílků

9.3.1. Pevnostní parametry substituce recyklovaného materiálu

Materiál	Označení	Pojivo	Objemová hmotnost	28 denní	Po zmrazování	
			[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Recyklovaná cementem upravená zemina D1	RCZ	3 % cement	2,01	2,23	0,82	36,65%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Popílek Mělník úlet (50:50)	RCZ:FA-M (50:50)	3 % cement	1,63	1,52	0,38	24,99%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	RCZ:FBCB-TL (50:50)	3 % cement	1,93	2,28	0,66	29,04%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	RCZ:FBCB-TU (50:50)	3 % cement	1,74	6,22	5,14	82,62%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Fluidní popílek Ledvice lože (75:25)	RCZ:FBCB-LL (75:25)	3 % cement	1,87	7,07	4,05	57,25%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	RCZ:FBCB-LL (50:50)	3 % cement	1,75	8,67	7,25	83,62%
Recyklovaná cementem upravená zemina D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	RCZ:FBCB-LL (50:50)	Bez pojiv	1,74	6,21	1,83	29,40%

Tabulka 17: Pevnostní parametry směsí recyklované cementové stabilizace a popílků

Prvotní posouzení bylo zaměřeno na stanovení optimálního množství substituovaného materiálu. Byly zvoleny dvě varianty pro substituci staré cementové stabilizace, jejíž část byla nahrazena fluidním popílkem z 25 % a 50 %. V obou případech bylo pozorováno zlepšení pevnostních parametrů po 28 dnech. Rozhodujícím faktorem pro volbu složení tak bylo měření pevnosti po zmrazovacích cyklech. Na základě výsledku po zmrazování byla pro další posouzení vybrána varianta, kdy bylo substituováno 50 % materiálu fluidním popílkem. Poměr 50 % zpracovávaného materiálu a 50 % fluidního popela byl nadále držen i v dalších variantách s rozdílnými typy fluidních popílků za účelem určité kontinuity a možnosti porovnání jednotlivých variant.

Tabulka 17 prezentuje vliv jednotlivých popílků na zpracovávaný materiál a jeho výsledné parametry. V první řadě nutno okomentovat velmi špatné parametry referenční směsi, kdy stará cementová stabilizace i s přídatkem 3 % cementu dosahovala velmi malých pevností po zmrazovacích cyklech a v tomto ohledu by ji nebylo možné v praxi použít. Vcelku očekávaný byl i negativní vliv popílku získaného z elektrárny Mělník (ELM), který byl produktem klasického spalování a nelze od něj očekávat další přidanou hodnotu. Tělesa s popílkem z ELM vykazovala poměrně velkou nasákovost, což mělo za následek porušení těles během zmrazování a pokles odolnosti vůči účinkům vody a mrazu.

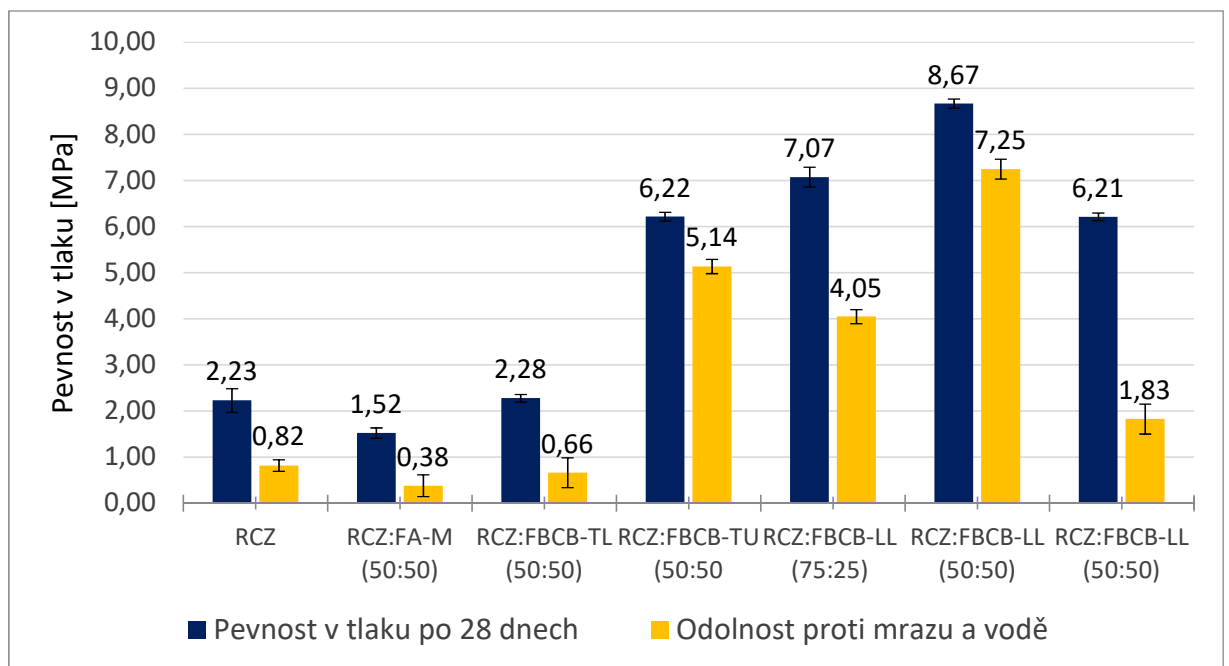
Obdobných výsledků dosahoval fluidní ložový popílek z elektrárny Tisová, kdy pevnost v tlaku po 28 dnech a odolnosti vůči mrazu a vodě dosahovala

obdobných výsledků jako referenční směs. V tomto ohledu by substituce byla možná, nicméně samotný popílek nijak nezlepšuje zkoumané parametry, a šlo by tak pouze o substituci materiálu o parametrech nevyhovujících pro zabudování do podkladních vrstev vozovky.

Přínos popílků tak lze spatřovat u fluidních popílků Tisová úlet a Ledvice lože. Pozitivní efekt této substituce je zcela jednoznačný, pevnost po 28 dnech vzrostla na troj až čtyřnásobek pevnosti naměřené u referenční směsi bez popílků a odolnost vůči mrazu a vodě téměř dosahuje požadovaných 85 % pevnosti po 28 dnech. Pokud si uvědomíme, o jaké materiály se jednalo, tedy o vysoce namrzavou recyklovanou zeminu a fluidní popílek s vysokým sklonem k bobtnání, byla odolnost 82,6 % resp. 83,6 % velmi dobrým výsledkem, který sice nedosahuje požadovaných 85 %, ale velmi se této hodnotě blíží.

Významným faktorem byla i kombinace fluidního popílku a hydraulického pojiva, v našem případě cementu. V případě, kdy byl kombinován pouze popílek s původním materiálem, došlo sice k poměrně vysokému nárůstu pevností po 28 dnech, nicméně směsi bez přídavku cementu vykazovaly řádově nižší hodnoty odolnosti vůči mrazu a vodě. Kombinace pojiva a popílku tak spolupůsobila a tvořila pevný a odolný materiál, zejména v případě odolnosti proti účinkům mrazu a vody.

Přínos této úpravy byl spatřován i v částečném vylehčení celé konstrukce, kdy objemová hmotnost materiálu poklesla oproti referenční směsi cca o 12 %. Směsi s přídavkem popílků tak mohou být vítaným řešením při problémech s únosností podloží vozovky.



Obrázek 54: Pevnost v tlaku: směs částečně substituovaná fluidními popílků

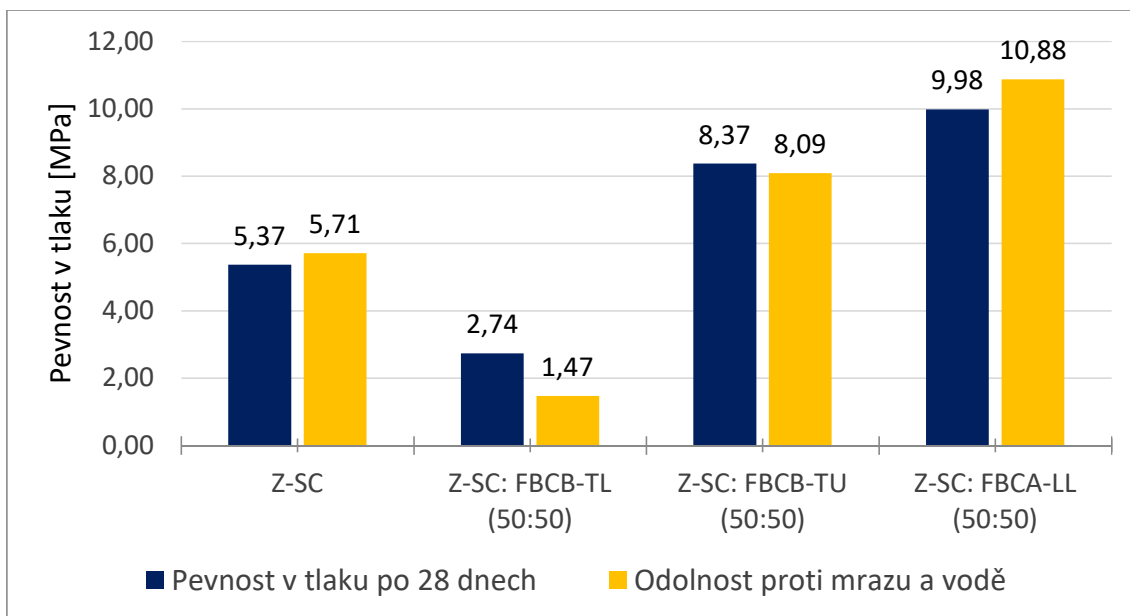
9.3.2. Pevnostní parametry substituce přírodního materiálu

Pro potvrzení výsledků popsanych v kapitole 9.3.1. byly vybrané popílký aplikovány i pro substituci přírodního materiálu, kdy byla použita dříve navržená směs jílovitého písku Z-SC, stmeleného 6 % cementu. Optimální vlhkost hutnění směsi popílký a jílovitého písku je uvedena v tabulce 18. Jílovitý písek byl opět z 50 % substituován fluidními popílký z elektrárny Tisová a Ledvice.

Materiál	Označení	Pojivo	Objemová hmotnost	28 denní	Po zmrazování	
			[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Písek jílovitý	Z-SC	6 % cement	2,20	5,37	5,71	106,41%
Písek jílovitý: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	Z-SC: FBCB-TL (50:50)	6 % cement	2,05	2,74	1,47	53,70%
Písek jílovitý: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	Z-SC: FBCB-TU (50:50)	6 % cement	1,84	8,37	8,09	96,60%
Písek jílovitý: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	Z-SC: FBCA-LL (50:50)	6 % cement	1,85	9,98	10,88	108,96%

Tabulka 18: Pevnostní parametry směsí písku jílovitého a popílků

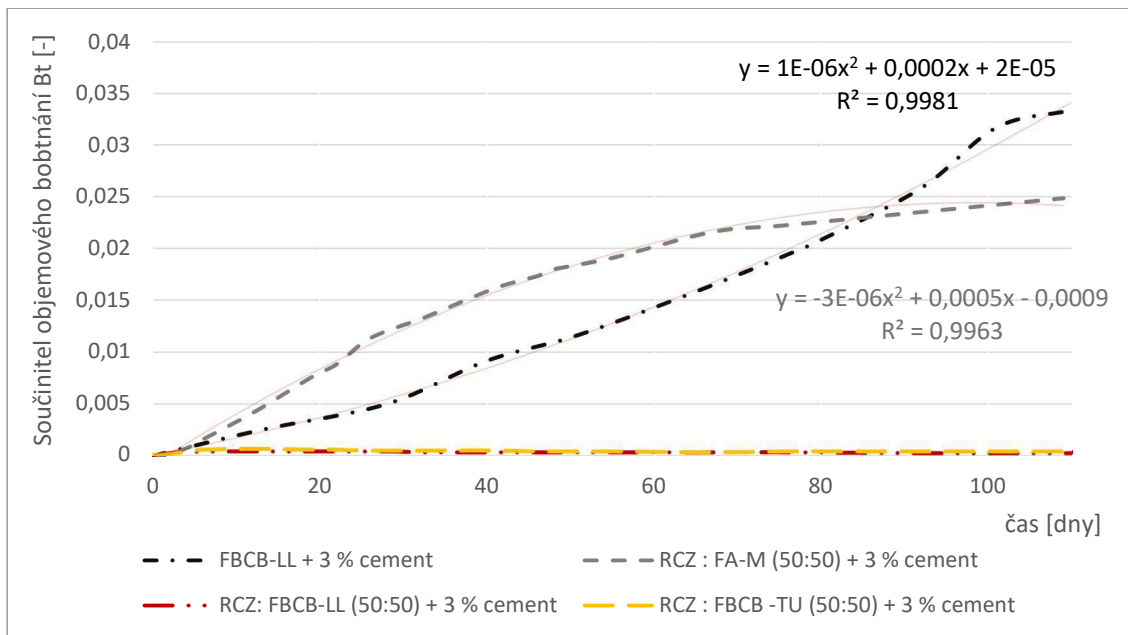
I v případě přírodního materiálu substituovaného fluidním popílkem z elektrárny Ledvice lože a Tisová úlet byl patrný nárůst pevnosti a odolnosti vůči mrazu a vodě. Rovněž v tomto případě lze doporučit popílek jako vhodnou náhradu přírodních materiálů, kdy vedlejším efektem této substituce byl i výrazný nárůst pevnostních charakteristik. Varianta s ložovým fluidním popílkem z elektrárny Tisová se oproti tomu ukázala jako krajně nevhodná. Došlo k degradaci směsi, kdy poklesla jak pevnost v tlaku po 28 dnech, tak směs nevyhověla na odolnost vůči vodě a mrazu. V tomto ohledu se nejen potvrdily výsledky uvedené v kapitole 9.3.1., ale přidáním popílký došlo k degradaci směsi. Přidání popílký Tisová lože bylo tak krajně nevhodné a nelze ho použít ani jako náhradu materiálu bez dalších přidanych hodnot.



Obrázek 55: Pevnost v tlaku: Z-SC v kombinaci s popílkem

9.3.3. Objemové změny

Objemové změny bývají jedním z častých jevů pozorovaných u směsí na bázi fluidních popílků, proto byl kladen velký důraz na objemovou stálost těchto směsí. Pro pochopení a deklaraci vhodnosti vybraných směsí byla kromě zkoumaných směsí s popílkem posouzena i směs s popílkem z klasického spalování z elektrárny Mělník a směs samotného popílku z elektrárny Ledvice a cementu. Význam substituce zeminy popílkem a stanovení správného poměru byl jasně prokázán. U směsí popílku a zeminy stmelené cementem nedošlo k žádným objemovým změnám po celou dobu sledování. Oproti tomu u samotného FBCB-LL stmelěného cementem byly pozorovány objemové změny (obrázek 56), které nebyly ukončeny ani po 100 dnech, kdy bylo pozorování zastaveno. Obdobné chování bylo pozorováno i u popílku z klasického spalování FA-M. Výsledky objemových změn tak doplnily poznatky o pevnostních charakteristikách směsí a podtrhly vhodnost kombinace vybraných popílků, jemnozrnné zeminy (stará cementová stabilizace) a hydraulického pojiva. V případě ložového fluidního popílku z elektrárny Ledvice byla prověřena jak kombinace se zeminou, tak pouze samotný fluidní popílek. Výsledky jasně deklarují vhodnost kombinace zeminy a popílku.



Obrázek 56: Časový průběh bobtnání směsí s popílkou

9.3.4. Shrnutí

Prezentované výsledky ukázaly možné využití vybraných fluidních popílků a prokazují tak neopodstatněnost nedůvěry, se kterou jsou fluidní popílkou jako stavební materiály odmítány odbornou veřejností. V praxi samozřejmě nelze chování fluidních popílků zobecňovat. Jednotlivé elektrárny mají odlišné vstupní zdroje (uhlí, vápenec a další), a i samotná technologie fluidního spalování není jednotná. Je potřeba pečlivě rozlišovat popílkou z jednotlivých elektráren a zohlednit kvalitu vstupních materiálů. Využití výše uvedených fluidních popílků v silničním stavitelství lze nicméně doporučit. Z naměřených dat byl patrný přínos substituce „přírodních“ materiálů fluidními popílkou z elektrárny Ledvice (ložový) a Tisová (úletový), kdy byla prokázána vhodnost kombinace fluidních popílků, jemnozrnné zeminy a pojiva. Kromě samotné úspory materiálu na jedné straně a využití odpadních produktů na straně druhé, byla prokázána i přidaná hodnota této kombinace v podobě zlepšení pevnostních charakteristik. V případě substituce 50 % původního materiálu došlo k výraznému nárůstu pevnosti v tlaku po 28 dnech, směsi vykazovaly dostatečnou odolnost proti mrazu a vodě a nedocházelo u nich k nežádoucím objemovým změnám. Výhodou této substituce bylo i vylehčení konstrukce s použitím popílků cca o 15 % oproti referenční směsi.

V důsledku kolísající kvality popílků, závislé na proměnlivých vstupech spalovacího procesu a samotné technologii spalování, bude využití fluidních popílků v praxi podmíněno individuálním přístupem a pečlivým návrhem směsi. Výše uvedené doporučení pro využívání navržené aplikace bude mít vždy spíše lokální charakter. Tento předpoklad vychází z množství produkovaných materiálů, kterých je sice v celorepublikovém měřítku poměrně velké množství, nicméně producentů schopných dodat materiál ve větším rozsahu je málo. Pro realizaci menších staveb regionálního charakteru mluví i vlastnosti fluidních popílků. Jedná se o poměrně lehké a objemné materiály a jejich přeprava tak

může být ekonomicky náročnější, než v případě standardních typů materiálů používaných v silničním stavitelství. Aplikace na menších stavbách navíc do jisté míry eliminuje případnou nehomogenitu materiálu, která se může v průběhu času měnit.

Přes veškeré potenciální nedostatky a rizika použití se podařilo najít efektivní využití fluidních popílků v konstrukci vozovky. Efektivní využití fluidních popílků bylo přínosné nejen z hlediska environmentálního, ale neslo sebou i další benefity v podobě zlepšení pevnostních parametrů. Tento fakt znamená potenciální redukci hydraulických pojiv a možnost širšího využití lokálních materiálů. Celá úprava se tak stává ekonomicky zajímavou i pro investora stavby, kdy v současné době je cena stále nejdůležitějším faktorem při volbě použitých technologií. Naměřená data podtrhují smysluplnost využití vybraných popílků, kdy je odpadní produkt přeměněn na cenný materiál, s jehož aplikací docílíme výrazně lepších pevnostních parametrů.

9.4. Směsná pojiva

Směsná pojiva na bázi cementu a vápna by měla kombinovat výhody obou pojiv, mělo by tak dojít k okamžité úpravě materiálu, zejména zeminu, a zároveň by měla vzrůst pevnost v čase. Pro posouzení bylo vybráno směsné pojivo SP-D, které po mnoha letech našlo uplatnění praxi a tak i tyto poznatky mohly přispět k širšímu povědomí o tomto druhu pojiva. V současné době je pojivo mícháno v několika poměrech pro širokou škálu aplikací. Posouzení pomalu tuhnoucího pojiva SP-D bylo provedeno na lokálních zeminách klasifikovaných jako písek s příměsí jemnozrné zeminy (Z-S-F) a písek jílovitý (Z-SC). Zrnitost a další parametry zemin jsou uvedeny v kapitole 7.1. Cílem posouzení bylo prověřit chování směsného pojiva SP-D vůči běžně používaným pojivům. Jako referenční pojivo bylo zvoleno standardní hydraulické pojivo, cement CEM II/B-M 32,5R. Množství přidávaného pojiva bylo stanoveno na základě zrnitosti a kalifornského poměru únosnosti upravovaných zemin, na 3 % pro písek s příměsí jemnozrné zeminy a 6 % pro písek jílovitý.

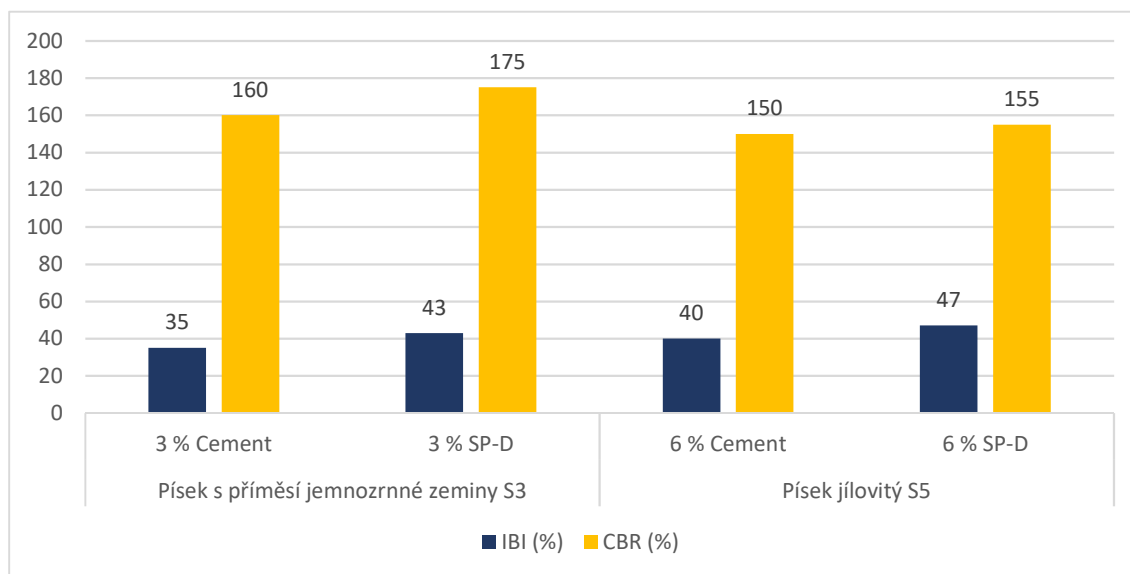
Hodnocení jednotlivých variant proběhlo na základě zkoušek IBI, CBR, pevnosti v tlaku (po 1, 7, 14, 28 a 60 dnech) a odolnosti vůči účinkům vody a mrazu. Klasifikace směsí zemin upravených hydraulickými pojivy pomocí zkoušek IBI a CBR je v ČR základním nástrojem pro posouzení podloží vozovky. Jelikož bylo snahou navrhnout směsi vyhovující požadavkům pro použití v podkladních vrstvách, byly naměřené hodnoty IBI a CBR značně předimenzované. Mnohem větší vypovídající hodnotu tak měly pevnostní charakteristiky jednotlivých směsí. V této práci se zaměřujeme pouze na posouzení vlivu jednotlivých pojiv na výsledné parametry směsi, množství použitého pojiva pro jednotlivé směsi je tak shodné.

9.4.1. Posouzení pojiv směsného pojiva SP-D - IBI, CBR

Navrhované směsi, vzhledem k obsahu hydraulických pojiv, jsou primárně určeny pro použití v podkladních vrstvách vozovky. Parametry IBI a CBR nám tak podávají spíše doplňující informaci o chování alternativních pojiv. Dle očekávání bylo přidáním směsného pojiva, které vhodně kombinuje výhody cementu a vápna za přispění dalších vhodně zvolených aktivátorů a přísad, dosaženo srovnatelných nebo i lepších výsledků než u referenční směsi. Měřené hodnoty IBI a CBR dosahovaly v obou sledovaných případech lepších hodnot než referenční směs. V tomto ohledu lze konstatovat vhodnost použití směsného pojiva SP-D obzvláště v případech, kde je nutné upravit jak zpracovatelnost zeminy, tak zlepšit její únosnost a odolnost proti působení vody, případně vody a mrazu.

	Písek s příměsí jemnozrné zeminy S3		Písek jílovitý S5	
	3 % cement	3 % SP-D	6 % cement	6 % SP-D
IBI (%)	35	43	40	47
CBR (%)	160	175	150	155

Tabulka 19: Parametry IBI a CBR



Obrázek 57: Únosnost upravených zemin: SP-D

9.4.2. Posouzení pojiva SP-D - Pevnostní parametry

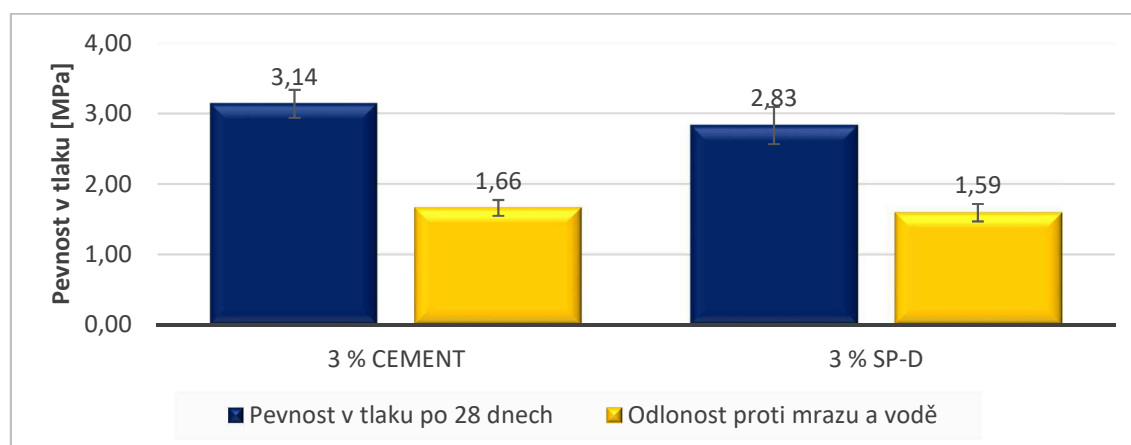
Lokální zeminy stmelené hydraulickými pojivy, byly primárně navrženy pro použití v podkladních vrstvách vozovek. Dle platných norem bylo v tomto případě rozhodující posouzení z hlediska pevnostních charakteristik, zejména pevnosti v tlaku po 28 dnech a odolností proti mrazu a vodě. Literatura, popisující chování směsných pojiv, uvádí i pomalejší, ale trvalý nárůst pevnostních parametrů v čase [Sotorník 2006]. Pro ověření tohoto faktu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku i po 1, 7, 14 a 60 dnech tak, abychom pokryli jak počátek zrání, tak i případný výraznější nárůst při zrání delším než 28 dní. Pro posouzení byly

zvoleny dva typy lokálních zemin Z-S-F a Z-SC, s dávkováním pojiva 3, respektive 6 % na 100 % upravované zeminy.

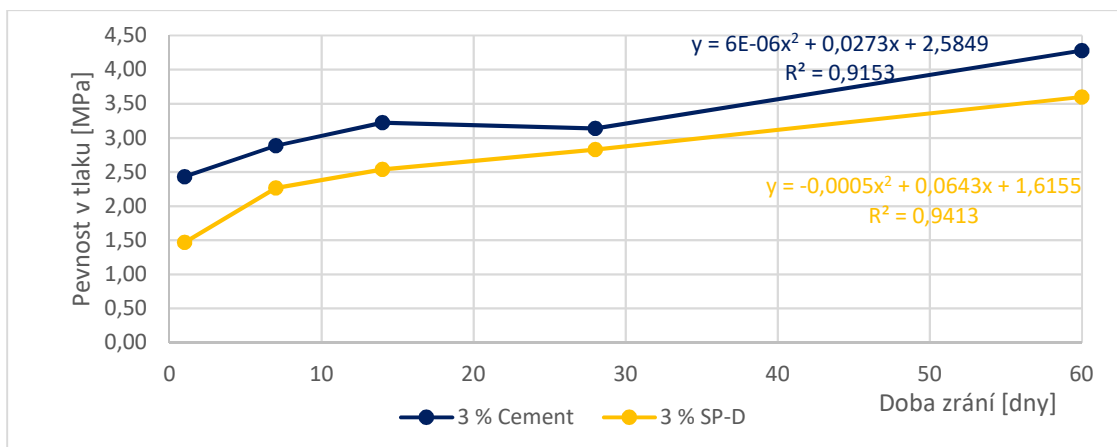
Zrání [dny] \ Pojivo	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy Z-S-F		Písek jílovitý Z-SC	
	3 % cement	3 % SP-D	6 % cement	6 % SP-D
1	2,43	1,47	2,83	2,19
7	2,89	2,27	3,24	3,13
14	3,22	2,54	4,06	4,25
28	3,14	2,83	3,69	6,07
60	4,28	3,60	4,87	6,55
Odolnost proti mrazu a vodě [MPa]	1,66	1,59	3,93	5,24
	52,85%	56,22%	106,50%	86,42%

Tabulka 20: Pevnostní parametry Z-S-F a Z-SC

Naměřené výsledky prezentované v tabulce 20 korespondovaly s předpokládaným chováním pojiva SP-D. Z hlediska posouzení namrzavosti směsi došlo v případě Z-S-F pouze k minimálnímu zlepšení. Patrný byl pomalejší průběh hydratační reakce v čase. Nárůst pevnosti byl pozvolnější a odpovídal použití směsného pojiva, kdy byla pouze část SP-D tvořena cementovou složkou. Nárůst pevností sice byl na počátku zrání pomalejší, nicméně v čase se téměř vyrovnal referenční směsi.

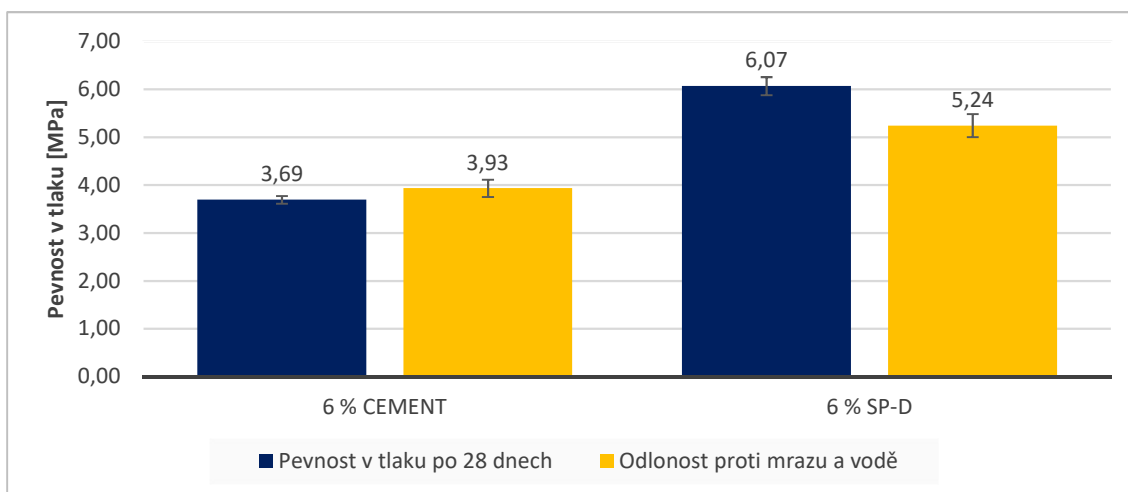


Obrázek 58: Pevnost v tlaku: Z-S-F + SP-D

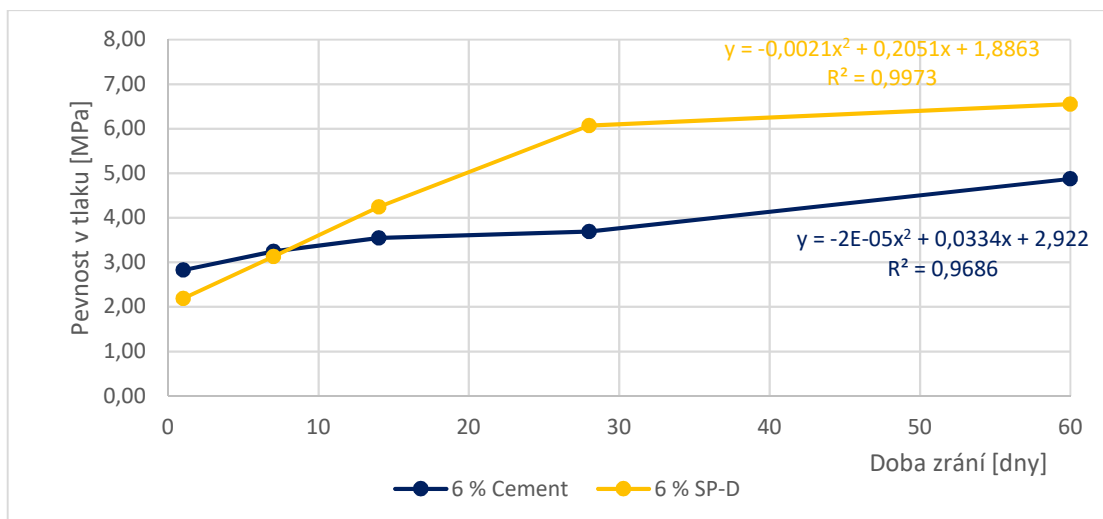


Obrázek 59: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-S-F + SP-D)

Pevnostní charakteristiky naměřené na upraveném jílovitém písku mnohem více odpovídaly předpokládanému chování směsného pojiva. Díky vysokému dávkování použitého pojiva docházelo u referenční směsi k příliš rychlému nárůstu pevnosti v čase a směs tak vykazovala dílčí poklesy pevnostních charakteristik během sledování. Tento jev byl pravděpodobně zapříčiněn příliš rychlým nárůstem pevnosti a vznikem mikrotrhlin souvisejících s uvolňováním hydratačního tepla. Svůj potenciál tak pravděpodobně prokázalo pomalu tuhnoucí směsné silniční pojivo SP-D. I v případě Z-SC došlo k pomalejšímu nárůstu pevnosti na počátku zrání a vhodná kombinace vápna a cementu vyvolala konstantní nárůst pevnosti v čase. V případě Z-SC se tak potvrdila vhodnost použití směsného pojiva, které bylo oproti referenční směsi efektivnější a dosahovalo lepších parametrů.



Obrázek 60: Pevnost v tlaku: Z-SC + SP-D



Obrázek 61: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (Z-SC + SP-D)

9.4.3. Posouzení pomocí monotónní triaxiální zkoušky

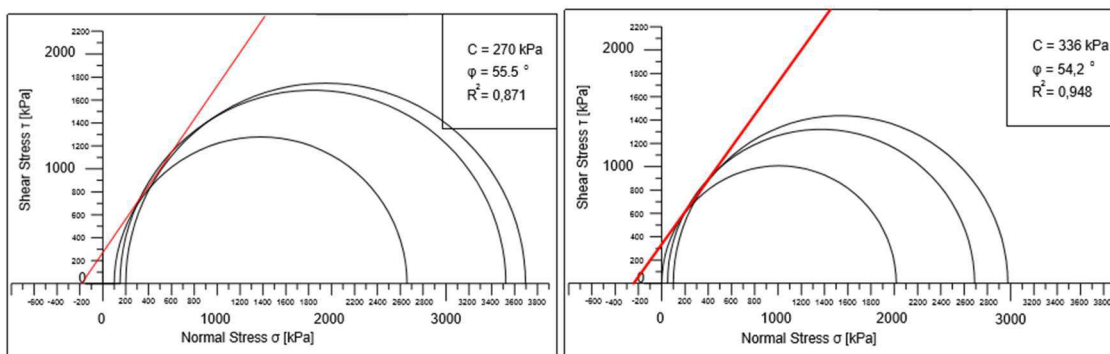
Vyhodnocení monotónní triaxiální zkoušky vycházelo z poznatků prof. Jenkinse, který princip triaxiálního zkoušení upravil pro testování směsí recyklace za studena. S použitím prakticky nového typu triaxiální komory souvisela i absence širší odborné literatury, která by se zabývala zkoušením stmelovaných zemín. Veškeré podklady a zkušenosti tak byly převzaty z poznatků získaných pro směsi studené recyklace. Výstupem zkoušky byly takzvané smykové parametry, vyjádřené úhlem vnitřního tření a soudržností směsi. Graficky pak lze vyjádřit křivku, která symbolizovala kritickou kombinaci normálového a smykového namáhání.

		F [kN]	$\sigma_{1,f}$ [kPa]	σ_3 [kPa]	ϕ [o]	C [kPa]	R ²
		Zatížení v okamžiku porušení	Normálové napětí	Boční (komorový) tlak	Úhel vnitřního tření	Soudržnost	Korelační koeficient
3% cement	C1-100kPa	47,73	2658,755	100	55,49	270	0,871
	C2-150kPa	63,21	3522,78	150			
	C3-200kPa	66,14	3695,419	200			
3% SP-D	D3-0kPa	36,19	2015,787	0	54,22	336	0,948
	D2-50kPa	48,47	2690,267	50			
	D1-100kPa	53,29	2975,51	100			

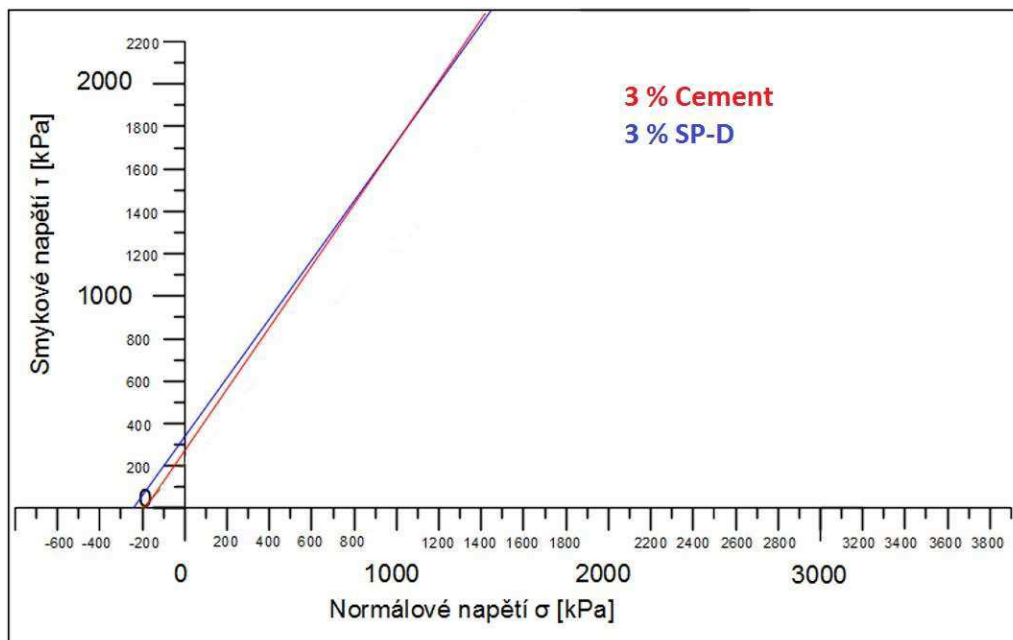
Tabulka 21: Smykové parametry zemín stmelovaných alternativními hydraulickými pojivy

I zde vlivem nedostatečných zkušeností s praktickým provedením této zkoušky bylo zvoleno jiné nastavení bočních tlaků pro referenční směs, než pro posuzované směsné pojivo. Nicméně tento fakt by neměl mít vliv na samotné

porovnání jednotlivých pojiv, což potvrdily poznatky z posouzení hydrofobizačních přísad. Měření pomocí triaxiálního přístroje prokázalo pozitivní vliv použitého pojiva SP-D, kdy výrazně narůstala hodnota soudržnosti a nepatrně se snížila hodnota úhlu vnitřního tření. Tento fakt mohl korespondovat s množstvím přidávaného pojiva a jeho kvalitou. Při bližším zkoumání jsme pozorovali lepší chování směsí stmelovaných pojivem SP-D až do normálového napětí zhruba 1000 kPa. Od vyššího zatížení bylo vhodnější zvolit variantu s cementem. Vzhledem k tomu, že síly běžně se vyskytující v podkladních vrstvách jsou řádově nižší než zmiňovaných 1000 kPa. Na základě výsledků získaných z měření pevnostních charakteristik v triaxiální komoře tak lze doporučit pojivo SP-D jako výhodnou variantu k současným hydraulickým pojivům.



Obrázek 62: Směs ZC (3% cementu) Obrázek 63: Směs D (3% SP-D)



Obrázek 64: Obalové křivky porovnání cementu a SP-D

9.4.4. Příklad využití v praxi

V rámci stavební praxe je SP-D využíváno pro zlepšení lokálních zemin s nedostatečnou únosností a špatnou zpracovatelností. V uváděném případě se jednalo o jíly s vysokou plasticitou, klasifikované jako F8 CH, kdy navrhované řešení, spojené s častým nedostatkem menších staveb (absencí geotechnického průzkumu a správné zatřídění zeminy), naprosto neodpovídalo tomuto typu materiálu. Projektant bez jakýchkoliv podkladů v projektu uvedl únosnost podloží jako dostatečnou a na problematický materiál v podloží se tak narazilo až v průběhu stavby, kdy již byly položeny inženýrské sítě a nebylo tedy možné materiál upravit na místě. Kromě nedostatečné zpracovatelnosti a únosnosti zeminy tak bylo nutné řešit i samotné provedení úpravy. Samotné laboratorní posouzení únosnosti F8 CH pomocí CBR bylo prakticky neproveditelné, jelikož vzorek během sycení nabobtnal a zkoušku tak nebylo možné provést. Po vysušení vzorku navíc docházelo k výraznému smrštění vzorku, které je dokumentováno na obrázku 65.



Obrázek 65: Vzorek F8 CH po saturaci (vlevo) a následném vysušení (vpravo)

V rámci laboratorního posouzení tak bylo navrženo doplnit křivku zrnitosti daného materiálu lomovým kamenivem frakce 0/4 a upravit pomocí směsného pojiva. Takto upravený materiál byl v rámci laboratorní analýzy klasifikován jako vyhovující pro podloží P I, tedy hodnota CBR přesahovala 50 %. Bobtnání materiálu během saturace bylo omezeno na minimum a ani při dlouhodobém sledování materiál nevykazoval výrazné objemové změny. Jelikož v místě budoucí komunikace již byly položeny inženýrské sítě, nebylo možné zeminu upravit na místě. Muselo být přistoupeno k odtěžení upravované zeminy a její rozprostření do plochy, následně bylo dle návrhu přidáno jemné kamenivo a dávkováno směsné pojivo. Na obrázku 66 je zachycena neupravená zemina, kdy jsou patrné velké shluky problematických jílovitých čoček. Pro náležité zpracování tak bylo nutné zeminu promísit dostatečným počtem pojezdů zemní frézy, tak aby došlo k minimalizaci jílovitých hrudek, tedy větším shlukům jílu lehce obalených pojivem. K minimalizaci tohoto jevu byly doporučeny minimálně 3 pojezdy zemní frézy. Na místě byl počet pojezdů optimalizován na 5.

Takto upravenou zeminu bylo nutné neprodleně zpracovat v místě budoucí komunikace, kdy byla položena ve dvou vrstvách v tloušťce 250 mm, přičemž byl kladen důraz na oddělené hutnění obou vrstev.



Obrázek 66: Zemina před úpravou (vlevo) a během úpravy (vpravo)

Po vyzrání byla měřena únosnost vozovky in-situ, pomocí lehké zatěžovací desky s konstatováním dostatečné únosnosti podloží. Měření in-situ ověřilo výsledky laboratorního měření získané v laboratoři pomocí zkoušek CBR. Použití směsného pojiva potvrdilo předpokládaný pozitivní vliv na zpracovatelnost směsi a zároveň zlepšení parametrů únosnosti výsledné vrstvy.

9.4.5. Zhodnocení posouzení směsného pojiva SP-D

Uplatnění směsných hydraulických pojiv u lokálních zemin má své opodstatnění. Prezentované výsledky pojiva SP-D se shodují s dosavadními poznatky o chování směsí stmelěných pomocí tohoto hydraulického pojiva [Sotorník 2006]. Pojivo SP-D vykazovalo pozvolnější, zato ale konstantní nárůsty pevnostních parametrů v čase. Jeho plný potenciál se projevil s vyšším dávkováním pojiva, kdy ve srovnání s referenční směsí nedocházelo k výkyvům měřených hodnot, ani k poklesům pevnostních charakteristik v čase. V současné době jsou pojiva SP-D běžně využívána pro úpravu podloží vozovky, zejména v případech problematických zemin, kdy vhodná kombinace složek cementu, vápna a dalších přísad vede k okamžité úpravě zeminy, která je poté stmelena cementem a získává výslednou pevnost.

9.5. Alternativní pojiva

Následující kapitola je zaměřena na posouzení alternativních pojiv (AP), především na bázi vedlejších produktů energetického a metalurgického průmyslu, a navazuje na poznatky popsané v předchozích kapitolách, kde byl prověřen fluidní popílek v surovém stavu bez dalších úprav. Výzkum uplatnění jednotlivých fluidních popílků a alternativních pojiv na bázi VEP probíhal v součinnosti a některé závěry tak byly aplikovány až v průběhu řešení.

Aktivita silniční laboratoře se zaměřuje na recyklaci odpadních materiálů a jejich uplatnění v praxi. Procesem mikromletí tak v průběhu předchozích let prošla celá řada materiálů od popílků, strusek, přes drcenou betonovou vozovku z D1, vápencové odprašky, až pro mletí odpadní gumy z pneumatik automobilů. Práce popisuje možná uplatnění vybraných produktů ve stavební praxi a jejich případnou modifikaci pomocí přísad. Uplatnění AP na bázi fluidních popílků (AP-D a AP-S) ve stavební praxi je jedním z dlouhodobých zájmů silniční

laboratoře na ČVUT, kdy v součinnosti s průmyslovými partnery bylo v posledních 5 letech provedeno nespočet měření jak na směsích studené recyklace, tak na stmelěných zeminách. Tomu odpovídá i postup prací, kdy bylo cíleno na aplikaci AP v těchto dvou odvětvích. Výsledky a modifikace použití AP v jednotlivých aplikacích se tak navzájem doplňují. Progresivní vývoj pojiva v čase nám dnes dovoluje prezentovat uspokojivé výsledky z hlediska pevnostních charakteristik za srovnatelné, nebo ekonomicky příznivější situace, než tomu bylo na počátku výzkumu. V práci jsou prezentovány výsledky dlouhodobého sledování pojiv na bázi fluidních popílků, snahy o uplatnění mikromletých betonů, ale i aktuální poznatky o AP na bázi strusek (AP-SO a AP-SK).

9.5.1. Alternativní pojivo na bázi fluidního popílku Plzeň (AP-D)

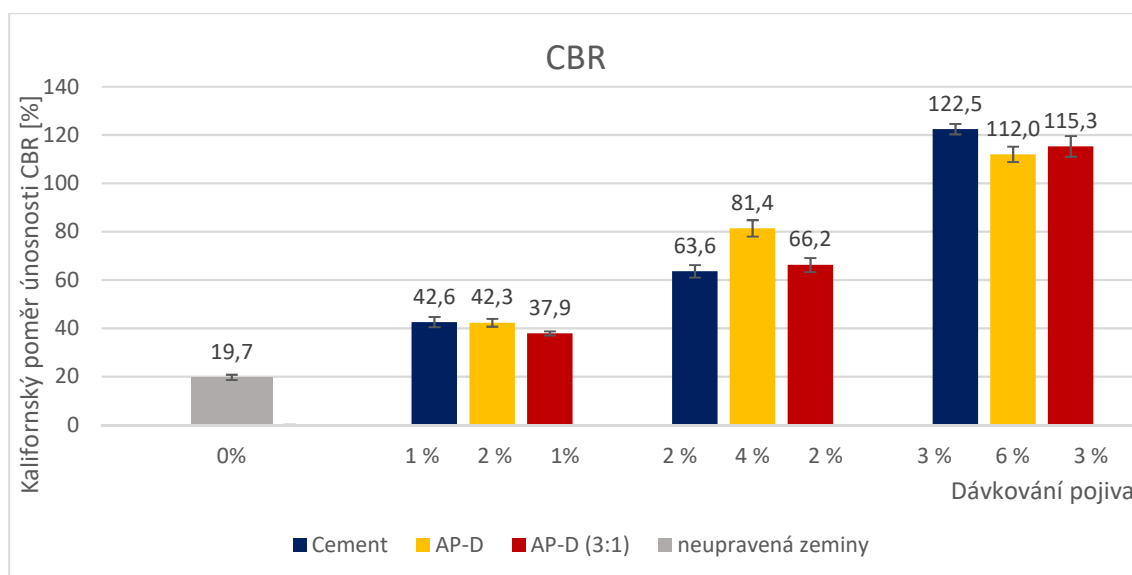
Kapitola věnovaná alternativnímu pojivu AP-D reflektuje nejen výsledky naměřené na jednotlivých směsích, ale prezentuje i samotný postup a modifikaci pojiva v rámci výzkumu. První naměřené výsledky odhalily nutnost vyššího dávkování pojiva. V návaznosti na ekonomickou stránku věci, kdy by se výsledná cena měla pohybovat zhruba na polovině nákladů na klasická hydraulická pojiva (portlandský cement), bylo v první fázi u posuzovaných variant zvoleno dvojnásobné dávkování. Bylo tedy prověřeno chování pojiv při srovnatelné pořizovací ceně. S postupným modifikováním AP-D bylo dávkování upravováno až na současné hodnoty odpovídající standardním hydraulickým pojivům.

9.5.1.1. Posouzení CBR

Posouzení využití alternativních pojiv celkem probíhalo celkem na 3 typech zemin, kdy bylo dávkováno pojivo v rozmezí 1-3 %, resp. 2-6 %, tedy v dávkách běžně používaných pro úpravu zemin v podloží vozovky. Nutno podotknout, že neupravovaná zemina vykazovala bez přídavku pojiv poměrně slušnou únosnost. V případě prezentovaných dat se jednalo zeminu Z-SM, s únosností CBR 19,7 %. Zemina by tedy i bez úprav byla vhodná pro aktivní zónu jako podloží PIII. Přesto může být v případech, kdy je požadována vyšší únosnost, nutné tuto zeminu upravit. Pro představu a posouzení chování AP-D je tento fakt zcela dostačující a bylo tedy přistoupeno k dávkování pojiva v rozsahu běžném pro stavební praxi.

	cement	AP-D	AP-D (3:1)
Písek hlinitý Z-SM	100,0%	100,0%	100,0%
Cement	1-3%	--	--
AP-D	--	2-6%	--
AP-D (3:1)	--	--	1-3%
Voda	8,5%	8,5%	8,5%

Tabulka 22: Složení směsí- AP-S (zlepšení zemin)



Obrázek 67: CBR posouzení AP-D (zlepšení zemin)

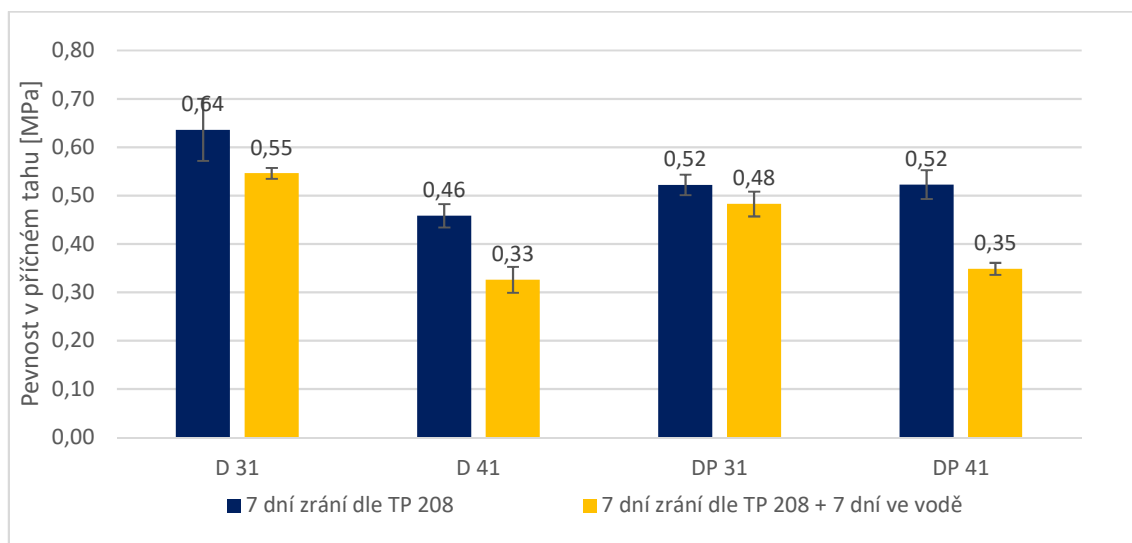
Zlepšení podloží zeminy je výrazně ovlivněno vodním režimem, což je i jedním z důvodů saturace těles během zrání. Vliv vody na popílky je znám řadu let a tak i u popílků upravených vysokorychlostním mletím byla saturace během zrání a měření lineárního bobtnání jedním ze zkoumaných parametrů. V našem případě byla konstatována odolnost směsí stmelovaných AP-D vůči lineárnímu bobtnání, kdy nedocházelo k objemovým změnám. Měřené hodnoty CBR pro AP-D vykazovaly srovnatelné parametry s referenční směsí a lze v tomto ohledu konstatovat, že přidáním AP-D bylo dosaženo stejných vlastností stmelového materiálu jako v případě cementu. Nutno ovšem dodat, že jen za cenu zvýšeného dávkování pojiva. To sice vedlo ke srovnatelným nákladům na pojiva, nicméně z hlediska dopravy a mechanizace by byly případné náklady vyšší. Pokud k tomu přičteme nezkušenost a neochotu tyto pojiva aplikovat, bylo by vždy upřednostněno klasické hydraulické pojivo, tedy cement. V tomto ohledu bylo nutné pojivo AP-D dále modifikovat. Proces modifikace je blíže popsán v následující kapitole a spočíval v nalezení vhodné kombinace AP-D a cementu, která byla stanovena na poměr 3:1 (AP-D : cementu). Poměr AP-D 3:1 vykazoval obdobné chování jako referenční směs, kde bylo použito pouze cementu a z hlediska úpravy zemin tak bylo nalezeno plnohodnotné hydraulické pojivo na bázi fluidních popílků. Dávkování tohoto pojiva je srovnatelné se standardně prodávanými cementy pevnostní třídy R 32,5, z hlediska ceny by ovšem pojivo AP-D mělo být výrazně levnější.

9.5.1.2. Posouzení pevnostních parametrů

	D31	D41	DP31	DP41
R-materiál Středokluky 0/22	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
AP-D : cement (3:1)	4,0%	4,0%	2,0%	2,0%
AP-D : cement (4:1)	0,0%	4,0%	0,0%	2,0%
Pěna (70/100; 3,8%)	0,0%	0,0%	3,0%	3,0%
Voda	5,0%	5,0%	4,5%	4,5%

Tabulka 23: Složení směsí- kombinace AP-D : cement (studená recyklace)

Aplikace pojiva AP-D v technologiích studené recyklace vycházela z předpokladu vyššího dávkování, kdy bylo dosahováno srovnatelných parametrů s referenčními pojivy v případě měření pevnosti v příčném tahu ITS a odolnosti vůči vodě ITSR. Problematickým se ovšem zdálo praktické využití pojiv, neboť vyšší dávkování poměrně lehkého materiálu bude náročnější na zpracování a při zhoršených povětrnostních podmínkách by mohla být aplikace pojiv problematická. Dílčím problémem bylo i posouzení vrstev určených pro vyšší konstrukční vrstvy vozovky, kdy byly kladeny vyšší nároky na pevnostní parametry a nebylo tak možné posuzovat směsi pouze podle pevnosti v příčném tahu. Tyto směsi byly podle současných technických předpisů posouzeny z hlediska v pevnosti v tlaku a odolnosti vůči účinkům mrazu a vody. Směsi stmelené AP-D vykazovaly při posouzení odolnosti vůči mrazu a vodě zhoršené pevnostní parametry a jejich použití tak bylo limitováno na vrstvy nižších pevností, kde tato zkouška nebyla požadována. Na základě výše uvedených důvodů bylo přistoupeno k modifikaci AP-D. Za účelem možného snížení dávkování byla hledána vhodná kombinace AP-D a cementu. Bylo tedy vytvořeno takzvané směsné pojivo, kdy pro finální použití byly vybrány poměry míchání 3:1 a 4:1 (AP-D : cement). Obrázek 68 prezentuje naměřená data, na jejichž základě byl volen optimální poměr míchání. Posuzované varianty odpovídaly současnému využití hydraulických pojiv v praxi, materiál byl stmelen pouze hydraulickým pojivem, případně bylo kromě hydraulického pojiva použito i asfaltové pěny. Kombinace hydraulického pojiva a asfaltové emulze prověřena nebyla, jelikož tato technologie se v ČR v posledních cca 3 letech příliš nevyužívá.



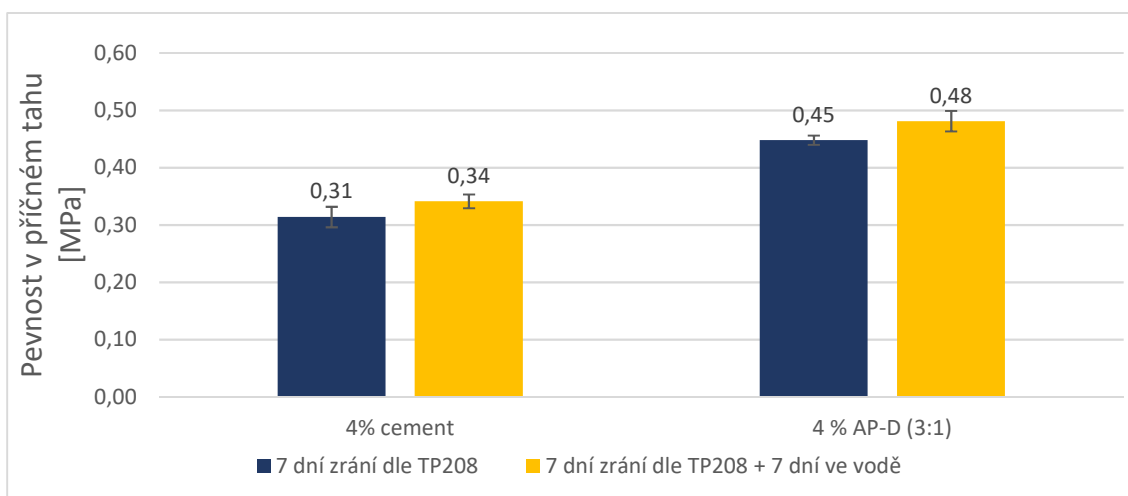
Obrázek 68: Pevnost v příčném tahu: kombinace AP-D : cement (studená recyklace)

Výsledky prokázaly vhodnost obou variant, které vyhověly nebo téměř vyhověly podmínkám TP 208, nicméně hodnota ITSR byla pro poměr 4:1 hraniční, proto pro další posouzení bylo zvoleno míchání pojiva v poměru 3:1 AP-D k cementu (AP-D 3:1). Byl tedy použit stejný princip jako v případě kombinace fluidního popílku a cementu (kapitola 9.3.). Přidáním cementu došlo k výraznému zlepšení sledovaných parametrů, které dosahují stejných případně lepších hodnot než referenční směs a to při stejném dávkování pojiva.

	cement	AP-D 3:1
R-materiál Středokluky 0/11	75,0%	75,0%
ŠD Litice 0/32	25,0%	25,0%
Cement	4,0%	0,0%
AP-D : cement (3:1)	0,0%	4,0%
Voda	5,0%	5,0%

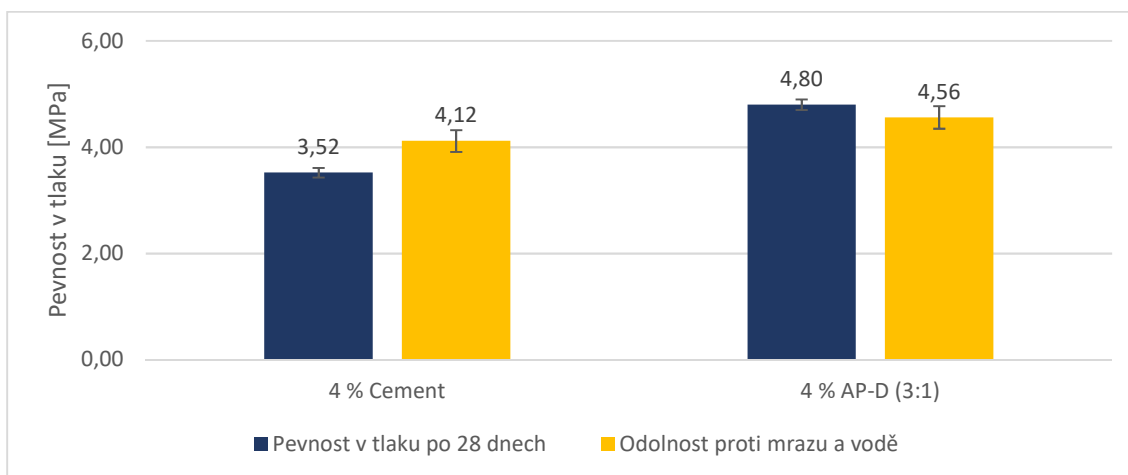
Tabulka 24: Složení směsí- AP-D 3:1 (Studená recyklace)

V rámci potvrzení výsledků bylo AS-D 3:1 podrobena dalším měřením jak pevnosti v příčném tahu (obrázek 69), tak zejména pevnosti v tlaku a odolnosti vůči mrazu a vodě (obrázek 70). Měření pevnosti v příčném tahu jenom potvrdila vhodnost použití zvoleného poměru, kdy vzorky vykazovaly srovnatelné, nebo lepší parametry, než směsi stmelené cementem.

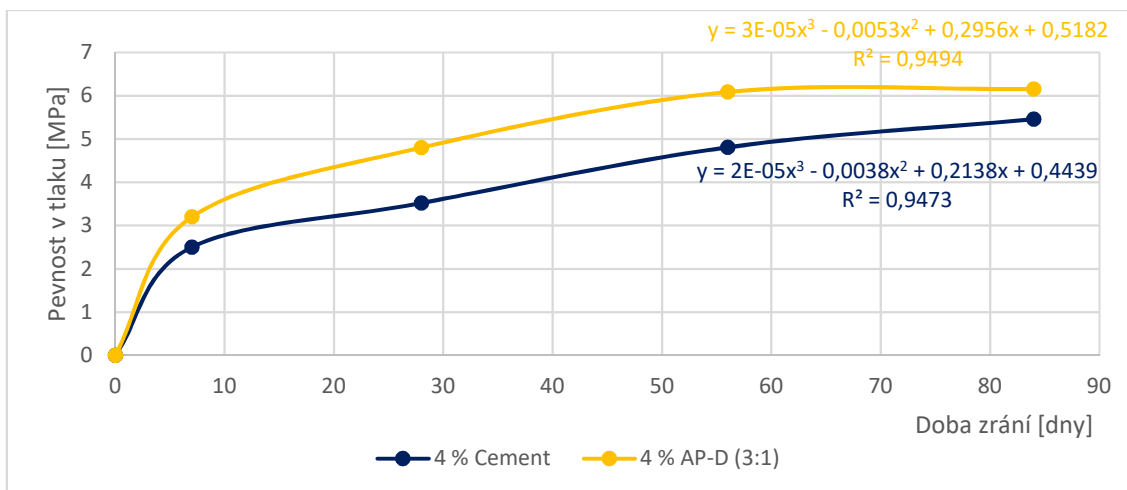


Obrázek 69: Pevnost v příčném tahu: AP-D 3:1 (Studená recyklace)

I v případě posouzení pevnosti v tlaku dosahovaly směsi s pojivem AP-D 3:1 srovnatelných nebo lepších výsledků než v případě referenční směsi. Zkoumané varianty přitom nebyly sledovány pouze v případě 28 denní pevnosti, ale byly posouzeny i pevnosti v tlaku po 56 a 84 dnech, tak, aby bylo postihnuto dlouhodobé chování těchto směsí.



Obrázek 70: Pevnost v tlaku: AP-D 3:1 (studená recyklace)



Obrázek 71: Vývoj pevnosti v tlaku v čase (R-mat 0/11 + SP-D 3:1)

Lze tedy konstatovat nejen ekonomickou výhodnost této varianty, ale do jisté míry i zlepšení sledovaných parametrů. V tomto ohledu se pojivo AP-D stává zajímavou variantou ke klasickým hydraulickým pojivům a pro praxi dokáže nabídnout zajímavou možnost z hlediska ceny dané úpravy.

9.5.2. Pokusný úsek

Na základě dlouhodobého měření probíhajícího v laboratoři ČVUT Praha, byl v roce 2017 realizován pokusný úsek v lokalitě mezi Nouzovem a Hřebenkou silnice II/118. Jedná se o extravilánovou komunikaci s intenzitou dopravy 4025 vozidel za den, z toho 206 přejezdy TNV/den (údaje z celostátního sčítání dopravy 2016, sč. úsek: I-3698). Původní stav vozovky vykazoval značné poškození, objevovaly se trhliny, výtluky, ztráta hmoty z krytu vozovky a lokální poklesy včetně poruch krajnic komunikace. Návrh opravy spočíval ve výměně krytu stávající vozovky a současně zapracování materiálů ze stávajících vrstev na místě, za účelem zvýšení tuhosti podkladních vrstev. Na úseku dlouhém 960 m byly aplikovány pomocí technologie studené recyklace na místě nová pojiva na bázi fluidních popílků AP-D. Celý úsek byl rozdělen do tří sekcí o délkách cca 300 m, kdy délka umožnila realizaci homogenní vrstvy ve standardní kvalitě. Délka jednotlivých úseků je rovněž dostatečná pro sledování a ověření nových technologií na bázi mechano-chemicky aktivovaného popílku AP-D. Jednotlivé úseky se lišily použitým typem pojiva, kdy kromě referenční směsi s cementem byla na zbývajících 2 úseky aplikována pojiva AD-P, v jednom případě v kombinaci s cementem, v druhém s asfaltovou pěnou. Složení směsí a dávkování pojiv je uvedeno v tabulce 25.

Složka	I. úsek	II. úsek	III. Úsek
	Obsah [%]		
Cement	4	1	0
Zpěněný asfalt	0	0	2
AP-D	0	4	3
Rec. Nouzov 0/63	91	89	91,5
Voda	5	6	3,5

Tabulka 25: Složení směsí- pokusný úsek

Návrh směsí byl proveden na základě posouzení jednotlivých variant v laboratoři, kdy navrhované varianty reflektovaly současné požadavky norem a zároveň postihovaly kombinace využitelné v praxi.

	I. úsek	II. úsek	III. úsek
Pojivo	4% cement	1% cement + 4 % AD-P	2 % asfaltová pěna + 3 % AD- P
Rit 7 [MPa]	0,49	0,54	0,32
Rit 7+7 [MPa]	0,50	0,55	0,24
Odolnost proti vodě	102,74%	101,23%	73,96%

Tabulka 26: Laboratorní posouzení směsí pro pokusný úsek

Tabulka 26 prezentuje hodnoty naměřené v rámci laboratorního posouzení materiálu z Nouzova, na jehož základě byly vybrány zmiňované 3 receptury. V rámci návrhu byla opětovně prokázána vhodnost kombinace pojiva AP-D a cementu, kdy tato varianta vykazovala hodnoty srovnatelné s referenční směsí, která byla stmelena cementem. Variantní posouzení bylo doplněno o využití alternativního pojiva v kombinaci s asfaltovou pěnou, což je v ČR jedna z využívaných forem studené recyklace. V rámci pokusného úseku nebyla posouzena kombinace alternativního pojiva a asfaltové emulze, jelikož tato technologie se na území ČR v posledních cca 3 letech prakticky nevyužívá.

	I. úsek	II. úsek	III. úsek
Pojivo	4% cement	1 % cement + 4 % AD-P	2 % asfaltová pěna + 3 % AD- P
Rit 7	1,00	0,39	0,25
Rit 7+7	1,26	0,42	0,17
Odolnost proti vodě %	125,67%	109,48%	68,92%

Tabulka 27: Laboratorní posouzení směsí pro pokusný úsek odebraných na pokládce

Tabulka 27 prezentuje hodnoty naměřené na hotové směsi odebrané z místa pokládky. Na první pohled byly patrné rozdíly mezi návrhovými parametry referenční směsi a skutečně realizovanou vrstvou, která vykazovala nepoměrně vyšší pevnost v příčném tahu.

Využití alternativních pojiv na bázi fluidních popílků AP-D ve směsi studené recyklace v rámci pokusného úseku Nouzov je ojedinělou aplikací tohoto druhu na území ČR a dle současných informací v celé Evropě. Výsledná vrstva vyhovuje současným technickým požadavkům a lze ji tak považovat za plnohodnotnou náhradu tradičních technologií založených zejména na cementu. Pokusný úsek je v současné době sledován za účelem vyhodnocení dlouhodobého chování alternativních pojiv.

9.5.3. Závěr pojivo AP-D

Alternativní pojivo na bázi fluidního popílku prošlo v průběhu let řadou modifikací a inovací. Na základě měření byl potvrzen latentně hydraulický charakter AP-D,

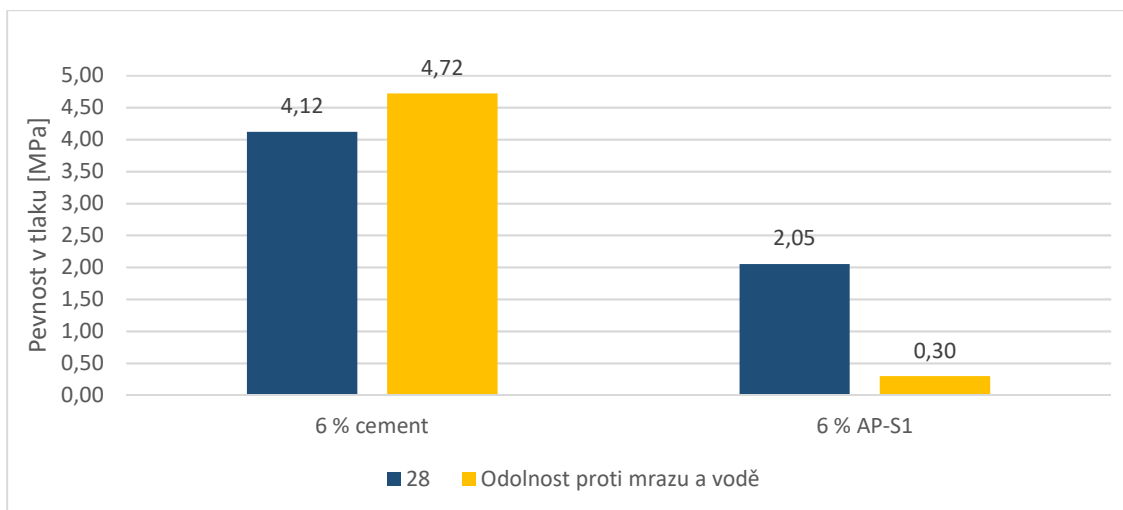
ale nízká odolnost směsí stmelených AP-D proti vodě, respektive proti mrazu a vodě, neumožnila pojivu širší uplatnění. Přelom v potenciálním využití AP-D nastal v okamžiku optimalizace a správného nastavení poměru mezi AP-D a cementem, kdy během procesu optimalizace bylo stále více jasné, že jeden z cílů, tedy nalézt pojivo, které by bylo schopno plně nahradit současná hydraulická pojiva, nebude naplněn. Na základě výzkumu, jehož část je uváděna i v této práci, byl stanoven optimální poměr mezi AP-D a cementem, za účelem minimalizace negativních účinků vody, respektive mrazu a vody. Maximální náhrada cementu byla stanovena poměrem mezi AP-D a cementem, který se pohyboval mezi 4:1 a 3:1 (AP-D : cementu). Poměr 3:1 zaručoval dostatečnou odolnost vůči účinkům mrazu a vody a lze ho tak použít do konstrukčních vrstev vyšší pevnosti. Poměr 4:1 se jevil jako dostatečný pro vrstvy nižších pevností, kdy technologii studené recyklace posuzujeme pomocí pevnosti v příčném tahu a současné technické podmínky vyžadují pouze odolnost vůči vodě. Při dodržení výše uvedených doporučení vykazovaly posuzované směsi s AP-D parametry směsí stmelených konvenčními hydraulickými pojivy. Částečná náhrada cementu je rozumným kompromisem pro využívání odpadního produktu a jeho efektivního využití v konstrukci vozovky. Příznivé ekologické a ekonomické faktory výroby AP-D by měly převážit nad negativy spojenými s aplikací těchto pojiv, jako je nižší objemová hmotnost (vyšší nároky na přepravu a mechanizaci, problematická aplikace při zhoršených klimatických podmínkách), nezkušenost zhotovitele, případně nedůvěra v tento typ materiálů. Výsledky uvedené v této práci prokázaly vhodnost použití AP-D v technologii studené recyklace a pro úpravu lokálních zemin. Lze konstatovat, že se podařilo odpadní produkt přeměnit na plnohodnotné hydraulické pojivo, které vykazuje obdobné parametry, jako dnes běžně používaná hydraulická pojiva, a z hlediska laboratorního posouzení by nic nemělo bránit širšímu využití tohoto pojiva v praxi.

9.5.4. Alternativní pojivo na bázi fluidního popílku ČVUT (AP-S)

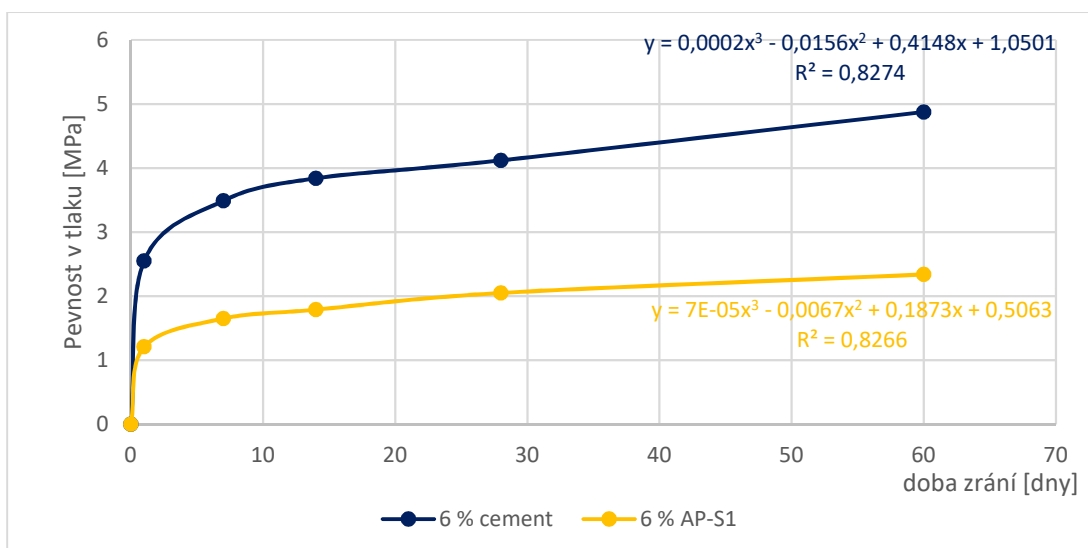
V součinnosti s katedrami technologie staveb a mechaniky je v rámci ČVUT vyvíjeno vlastní ternární pojivo na bázi fluidního popílku. V rámci našeho výzkumu alternativních pojiv jsme byli požádáni o studii zaměřenou na aplikaci tohoto pojiva v silničních stavbách. Prezentované výsledky postihují dvě varianty, tohoto pojiva AP-S1 a AP-S2, tak jak bylo pojivo modifikováno v čase.

	6 % cement	6 % AP-S1
Písek jílovitý Z-SC	100,0%	100,0%
Cement	6,0%	--
AP-S1	--	6,0%
Voda	10,3%	10,3%

Tabulka 28: Složení směsi- Z-SC + APS1



Obrázek 72: Pevnost v tlaku: Z-SC + AP-S1



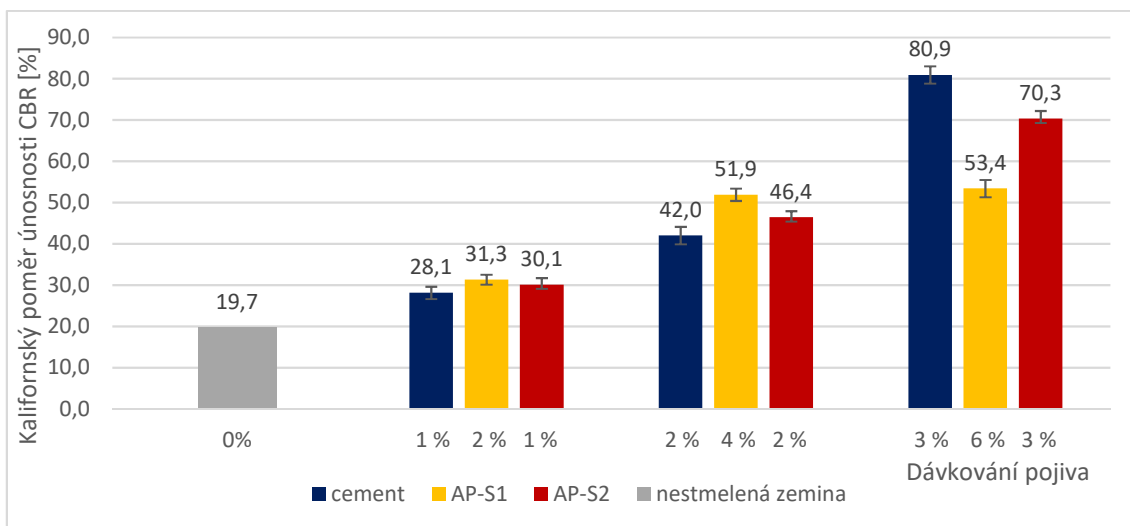
Obrázek 73: Vývoj pevnosti v tlaku v čase: Z-SC + AP-S1 (stmelení zemin)

První varianta pojiva AP-S1 měla pouze minimální hydratační schopnosti a v posuzovaných zeminách (písek s příměsí jemnozrnné zeminy a jílovitý písek) vykazovala pouze minimální zlepšení posuzovaných materiálů. Tuto skutečnost deklaruje obrázek 74, kdy bylo AP-S1 použito pro stmelení písku s příměsí jemnozrnné zeminy. Na základě měření pevností (7, 14, 28 a 60 dní) bylo konstatováno určité zlepšení pevnostních parametrů směsi v čase. Určité hydraulické pochody tedy i u tohoto pojiva nepochybně probíhaly, nicméně naměřené pevnosti dosahovaly řádově nižších hodnot a stmelený materiál absolutně nevyhověl odolnosti proti mrazu a vodě. Obdobné chování vykazovaly směsi stmelené AP-S1 i v případě měření IBI, CBR při úpravě zemin. V případě směsi studené recyklace docházelo v některých případech, zejména při kombinaci asfaltové emulze a AP-S1, k dosažení obdobných parametrů jako u referenční směsi s cementem. Ve většině případů ovšem, stejně jako u stmelených zemin, docházelo k výraznému poklesu odolnosti vůči mrazu a vodě, kde tělesa nevyhověla podmínkám uvedeným v TP 208. Ternární pojivo v této podobě bylo shledáno jako nevhodné pro použití v silničním stavitelství,

kdy výraznou roli hrála citlivost daného pojiva na vlhkost a vodu, tedy veličiny běžně se vyskytující v konstrukčních vrstvách komunikace. Pojivo by se dalo v omezené míře použít pouze v případě zabránění přístupu vody ke stmelené vrstvě, což sebou nese další náklady na úpravu. V kombinaci s nižší pevností oproti konvenčním pojivům se úprava stává neefektivní a ekonomicky nevýhodná. Pojivo v této fázi vývoje tak bylo shledáno nevyhovujícím a bylo nutné modifikovat proces výroby, případně pojivo chemicky aktivovat. Vznikla tak druhá varianta tohoto pojiva AP-S2, kdy byly částečně eliminovány negativa varianty první a chování směsi více odpovídalo potřebám silničního stavitelství. Z hlediska výroby AP-S2 došlo k optimalizaci jednotlivých složek pojiva a samotná výroba se více přiblížila komerčnímu využití, kdy bylo dávkování jednotlivých složek pojiva realizováno přímo v distribučním centru.

	cement	AP-S1	AP-S2
Písek hlinitý Z-SM	100,0%	100,0%	100,0%
Cement	1-3%	--	--
AP-S1	--	2-6%	--
AP-S2	--	--	1-3%
Voda	8,5%	8,5%	8,5%

Tabulka 29: Složení směsi- Z-SM + AP-S (zlepšení zemin)



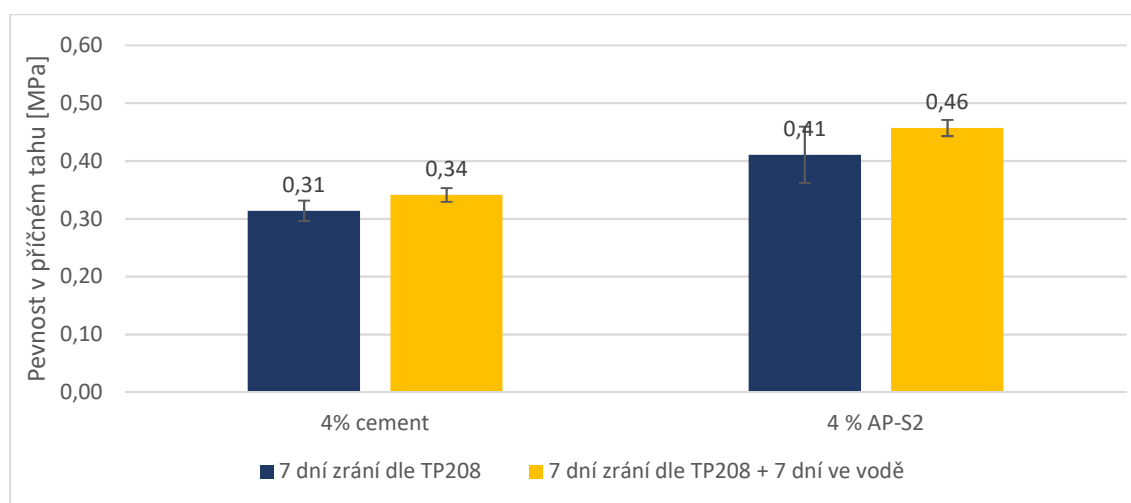
Obrázek 74: CBR: Z-SM + AP-S (zlepšení zemin)

Posouzení modifikace pojiva AP-S1 na AP-S2 bylo nejdříve prověřeno z hlediska aplikací pro zlepšení podloží vozovky. Zkoumaným parametrem byl dle současných předpisů Kalifornský poměr únosnosti CBR. Pro srovnání byla prověřena i první varianta tohoto pojiva AP-S1 a to vždy v dvojnásobném dávkování. V tomto ohledu byl potvrzen předpoklad vyššího dávkování AP-S1 pro dosažení srovnatelných parametrů s referenční směsí. Modifikované pojivo AP-S2 oproti tomu vykazovalo obdobné parametry jako referenční směsi a to při stejném dávkování. V tomto ohledu bylo možné považovat modifikaci pojiva za úspěšnou, nicméně pro širší využití AP-S2 bylo nutné prověřit pojivo i v dalších aplikacích, zejména pro použití v podkladních vrstvách vozovky. V tomto ohledu

bylo přistoupeno k posouzení pojiva AP-S2 jako náhrady standardních pojiv jak pro stmelení zemin, tak pro technologie studené recyklace.

	4 % cement	4 % AP-S2
R-materiál Středokluky 0/11	75,0%	75,0%
ŠD Litice 0/32	25,0%	25,0%
Cement	4,0%	--
AP-S2	--	4,0%
Voda	5,0%	5,0%

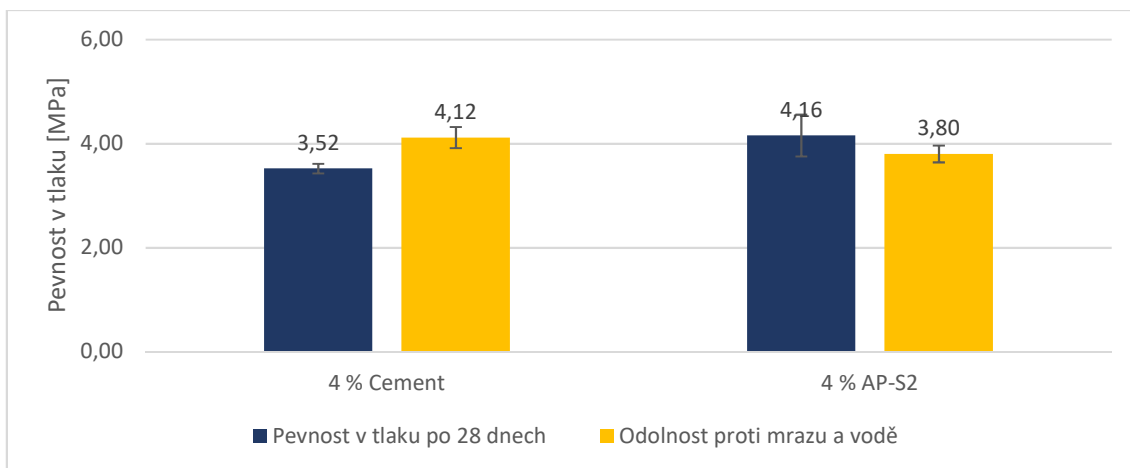
Tabulka 30: Složení směsí- AP-S2 (studená recyklace)



Obrázek 75: Pevnost v příčném tahu: AP-S2 (studená recyklace)

Vhodnost pojiva AP-S2 pro technologii studené recyklace byla prověřena jak z hlediska použití do vrstev s nižší třídou pevnosti, tak pro případ, kdy bude u těchto směsí požadována vyšší třída pevnosti, tedy jak z hlediska pevnosti v příčném tahu, tak z hlediska pevnosti v tlaku, kde bylo rovněž sledováno dlouhodobé chování takto stmelených směsí. Rozhodující v tomto ohledu bylo posouzení směsí stmelených AP-2 na odolnost proti mrazu a vodě, tedy parametru, který byl zcela nevyhovující v případě varianty AP-S1.

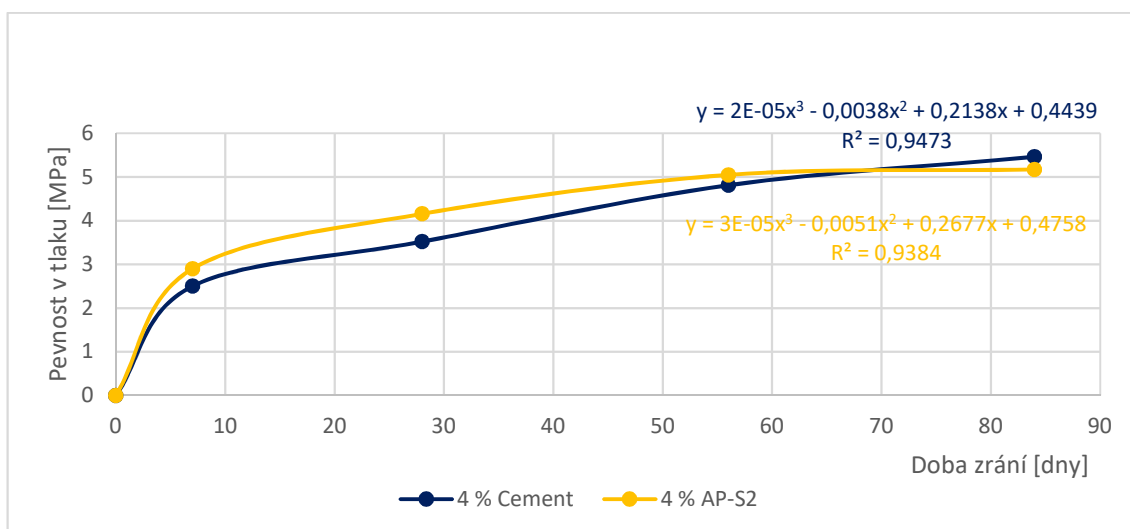
Z hlediska směsí určených do komunikace s nižší třídou dopravního zatížení, kde lze směs posoudit pomocí pevnosti v příčném tahu, vykazovaly směsi stmelené AP-S2 obdobné nebo mírně zlepšené parametry jak v případě 7 denní pevnosti tak i v případě, kdy po 7 dnech zrání dle TP 208 byla tělesa navíc zatížena 7 denním zráním ve vodní lázni. I v tomto případě byl výsledek srovnatelný s referenční směsí a z hlediska experimentálního posouzení je použití alternativního pojiva AP-S2 možné.



Obrázek 76: Pevnost v tlaku: AP-S2 (studená recyklace)

Posouzení směsí s vyšší třídou pevnosti rovněž prokázalo obdobné parametry jako směsi stmelené standardními pojivy. Na druhou stranu byla opět pozorována zhoršená odolnost směsí proti mrazu a vodě. Pozorované poklesy pevností po zmrazování byly ve většině případů dle současných norem vyhovující, tedy pevnosti po zmrazovacích cyklech nebyly nižší než požadovaných 85 % pevnosti dosažené po 28 dnech. V tomto ohledu lze pojivo shledat vyhovujícím, nicméně je třeba na tento fakt myslet při návrhu směsí, kdy může být problematické použití pojiva za nestandardních podmínek. Například v případě, kdy je vrstva pod hladinou podzemní vody, nebo se bude jednat o materiál se zvýšenou nasákavostí (některé typy zemin).

Posouzení dlouhodobého chování AP-S2 vykazovalo mírně rychlejší hydrataci a nárůst pevností na počátku zrání, naopak v pozdější fázi bylo pozorováno zpomalení nárůstu pevnostních parametrů směsi. U směsí starších 54 dnů již bývá nárůst pevnosti zpravidla velmi malý, pozorovaný jev tak nemá velkou vypovídací hodnotu. Konkrétní směs uváděná na obrázek 78 je příkladem časového průběhu pevnosti v tlaku, kde bylo prokázáno chování takřka totožné s chováním směsi stmelené referenčním pojivem.



Obrázek 77: Vývoj pevnosti v tlaku v čase AP-S2 (studená recyklace)

9.5.4.1. Závěr

Ternární pojivo na bázi kombinace fluidního popílku a popílku z klasického spalování je za pomoci vysokorychlostního mletí a přidání potřebných aktivátorů zpracováno na mechano-chemicky aktivované pojivo vykazující latentně hydraulický charakter. Podobně jako u ostatních pojiv byl proveden proces optimalizace pojiva a způsobu mletí. Tento proces je ovšem řízen kolegy z katedry technologií staveb a naším úkolem bylo pouhé posouzení výsledné podoby pojiva v rámci uplatnění v konstrukčních vrstvách vozovky. Posuzovanou variantu AP-S2 lze doporučit pro komerční využití, kdy byly laboratorně prokázány obdobné vlastnosti pozorované u klasických hydraulických pojiv. Zkoumané pojivo vyhovělo jak v případě aplikace AP-S2 pro aplikace v zeminách, ať už pro úpravu podloží vozovky, tak pro stmelení konstrukčních vrstev, primárně aplikovaných v podkladních vrstvách vozovky. Přínos tohoto pojiva byl prokázán i v případě technologie studené recyklace, kdy posuzované směsi stmelené AP-S2 vykazovaly dostatečnou pevnost v příčném tahu i odolnost vůči vodě, případně (u směsí s vyšší třídou pevnosti) srovnatelnou pevnost v tlaku a dostačnou odolnost vůči mrazu a vodě. Přeměna VEPů na alternativní pojivo AP-S2 je moderní nástroj pro znovuvyužití tohoto druhu odpadů a koresponduje se současnou snahou nalézt co nejefektivnější využití těchto materiálů.

9.5.5. Alternativní pojivo na bázi mikro-mletého betonu (AP-MB)

Posouzení AP-MB navazovalo na předchozí experimentální ověření [Čížková 2017] využitelnosti tohoto pojiva pro směsi studené recyklace s nižší třídou pevnosti, tedy na směsi, které dle současných technických podmínek lze klasifikovat pomocí pevnosti v příčném tahu a odolnosti vůči vodě. Studie konstatovala možnost využití AP-MB pro směsi studené recyklace, kdy kromě environmentálních přínosů plynoucích ze zpracování odpadních materiálů prokázala studie zvýšenou odolnost vůči vodě a na pomalejší náběh pevnostních parametrů. Naším cílem bylo prověřit chování tohoto pojiva i v případě cílení na kvalitnější konstrukční vrstvy, tedy na vrstvy s vyšší návrhovou pevností. V práci jsou posuzovány dvě varianty použití AP-MB, kdy pojivo bylo použito pro stmelení přírodního kameniva a pro stmelení asfaltového R-materiálu. V obou případech byly směsi posouzeny na pevnost v tlaku a odolnost vůči mrazu a vodě.

	V1	V2	V3	V4	V5
ŠD 0/32 (Zbraslav)	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
ŠP 0/16 (Uhy)	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
Cement	6,0%	3,0%	1,5%	4,0%	--
AP-MB	--	6,0%	9,0%	2,0%	--
Vápno	--	--	--	--	6,0%
Voda	6,2%	6,2%	6,2%	6,2%	6,2%

Tabulka 31: Složení směsí- SC + AP-MB

Složení navrhovaných směsí uvedených v tabulkách 31 a 32 vycházelo z požadavků evropských norem na zrnitost a pevnostní charakteristiky směsí kameniva stmeleného cementem (SC), tedy směsí, které dosahují pevnostní třídy alespoň C_{5/6}, a mají zároveň dodatečnou odolnost vůči účinkům mrazu

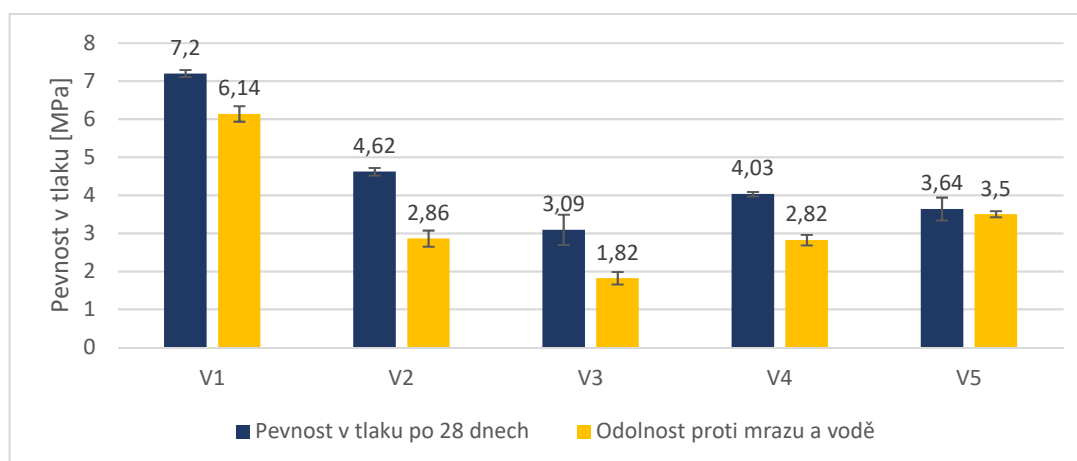
a vody. Vyšší dávkování alternativních pojiv bylo navrženo s ohledem na předchozí poznatky a předpokládanou cenu, která by měla být zhruba poloviční oproti běžně používaným směsným cementům. V případě referenční směsi V1 bylo jako hydraulického pojiva použito běžně používaného směsného cementu

CEM II / B-M (S-LL) 32,5.

U druhé varianty byla použita směs přírodního drceného kameniva ŠD 0/32 mm v kombinaci s asfaltovým R-materiálem 0/22 Středokluky, viz tabulka 32. Samotný návrh směsí vycházel z konkrétního zadání, kdy bylo cíleno na výslednou třídu pevnosti C_{3/4}.

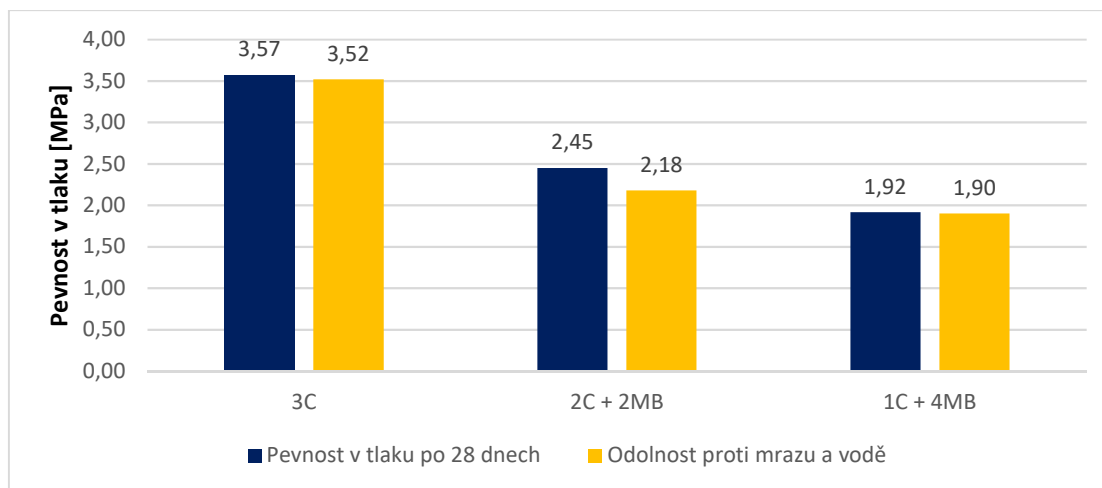
	3C	2C + 2MB	1C + 4MB
ŠD 0/32	50,0%	50,0%	50,0%
Asfaltový R-materiál 0/22	50,0%	50,0%	50,0%
Voda	5,5%	5,5%	5,5%
Cement	3,0%	2,0%	1,0%
AP-MB	0,0%	2,0%	4,0%
Voda	5,5%	5,5%	5,5%

Tabulka 32: Složení směsí- RSC + AP-MB



Obrázek 78: Pevnost v tlaku: AP-MB (SC)

Posouzení směsí typu SC vycházelo z požadavku normy ČSN EN 14227-1, a je založeno na posouzení pevnostních parametrů zkoumané směsi, tedy pevnosti v tlaku po 28 dnech a pevnosti měřené po zmrazovacích cyklech. Zvolené požadavky poukázaly na nevhodnost zvolené substituce pro směsi SC, kdy substitucí standardních pojiv mikromletým betonovým recyklátem došlo k poklesu pevnostních charakteristik. U posuzovaných směsí byla naměřena výrazně nižší pevnost po 28 dnech, a ani jedna z posuzovaných alternativ (V2, V3, V4) nevyhověla požadavkům na pevnost po zmrazovacích cyklech, která by měla být vyšší než 85 % pevnosti po 28 dnech zrání.



Obrázek 79: Pevnost v tlaku: AP-MB (studená recyklace)

Obdobné vlastnosti byly pozorovány i u směsí studené recyklace. I zde byl pozorován určitý přínos AP-MB, nicméně směsi vykazovaly řádově nižší pevnostní parametry. Navrhovaná substituce byla pro využití ve vrstvách vyšší pevnostní třídy neefektivní a kromě recyklace samotného materiálu nepřinesla pro využití v praxi žádné další benefity.

9.5.5.1. Závěr

Pro aplikaci do směsí SC a studené recyklace dle současných norem neměl zpracovávaný betonový recyklát dostatečný potenciál a s procesem vysokorychlostního mletí nedocházelo k vyvolání dostatečných mechano-chemických změn. Prezentovaná data poukázala na výrazné poklesy pevnostních parametrů jak u směsí z přírodního kameniva, tak u směsí studené recyklace. V případě aplikace AP-MB v technologiích studené recyklace bez dalších pojiv, jako je asfaltová emulze nebo pěna, vykazovaly směsi výrazné snížení pevnostních parametrů.

Současné technické podmínky TP 208 umožňují posoudit v některých případech směsi studené recyklace pouze z hlediska pevnosti v příčném tahu a odolnosti vůči vodě. Toto posouzení je možné v případě nižší třídy dopravního zatížení nebo pro třídy pevnosti C3/4 a nižší, kdy jsou zkoušky pevnosti v tlaku nahrazeny zkouškami pevnosti v příčném tahu. Je ovšem otázkou, zda je možné tuto výjimku aplikovat i na směsi stmelené alternativními pojivy, a zda je posouzení pomocí pevnosti v příčném tahu a odolnosti vůči vodě dostačující. Prezentovaná data prokázala nevhodnost použití AP-MB v technologiích studené recyklace určených pro vrstvy s vyšší třídou pevnosti, kde je vyžadována zkouška pevnosti v tlaku. Naměřené pevnosti v tlaku tak nepotvrdily předchozí poznatky [Čížková 2017], které klasifikovaly směsi studené recyklace pomocí pevnosti v příčném tahu.

Přidávání mechanicky aktivovaného betonového recyklátu vedlo oproti předchozím poznatkům k degradaci směsí SC a směsí technologie studené recyklace. Laboratorní měření pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě opakovaně prokázaly nevhodnost použití pojiva AP-MB pro tyto technologie. Navrhovaná substituce tak nepřinesla jiný než environmentální přínos, a proto

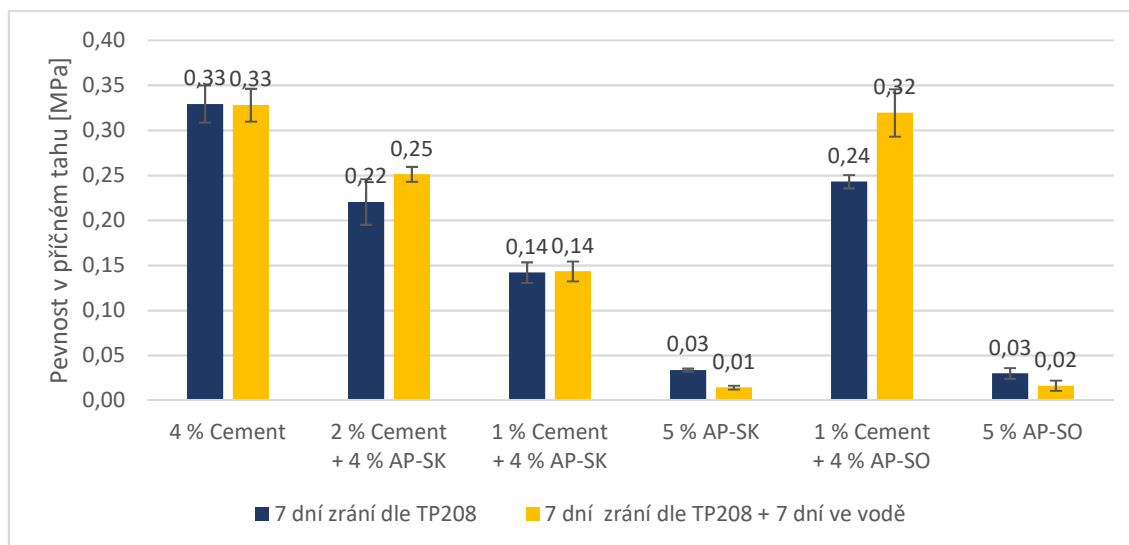
nemá zkoumaná náhrada cementu alternativním mikromletým pojivem na bázi betonového recyklátu v současnosti žádné funkční ani ekonomické opodstatnění. Využití tak lze spatřovat pouze v případě směsí studené recyklace určených pro nižší třídu pevnosti, kde není vyžadována zkouška pevnosti v tlaku a zároveň je AP-MB použito v kombinaci s asfaltovou emulzí, nebo asfaltovou pěnou. I zde ale vzniká pochybnost, zda je toto posouzení v případě pojiva AP-MB dostatečné.

9.5.6. Alternativní pojiva na bázi strusky (AP-SO, AP-SK)

	4 % cement	2 % cement + 4 % AP-SK	1 % cement + 4 % AP-SK	5 % AP-SK	1 % cement + 4 % AP-SO	5 % AP-SO
R-materiál Středokluky 0/22	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%
ŠD Litice 0/32	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
Cement	4,0%	2,0%	1,0%	--	1,0%	--
AP-SK	--	4,0%	4,0%	5,0%	4,0%	--
AP-SO	--	--	--	--	0,0%	5,0%
Voda	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%

Tabulka 33: Složení směsí- AP-SO, AP-SK (studená recyklace)

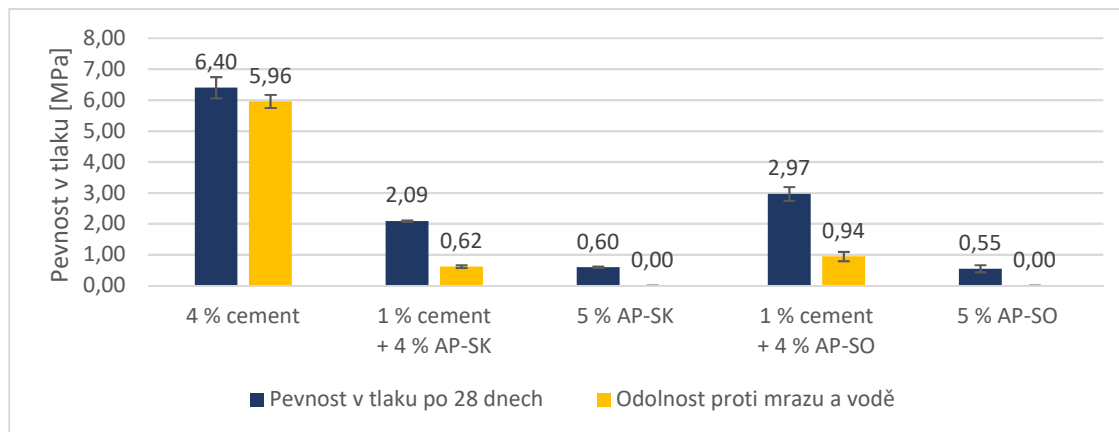
V rámci projektu byly posouzeny dva typy strusek AP-SO a AP-SK. Tyto strusky byly upraveny pomocí vysokorychlostního mletí za účelem mechanické aktivace materiálu s potenciálem plně nebo částečně nahradit klasická hydraulická pojiva. Prvotní posouzení pojiv proběhlo na směsích studené recyklace ve dvou variantách. Opět se jednalo o posouzení parametrů pevnosti v příčném tahu a odolnosti vůči vodě, a parametrů požadovaných pro směsi určené pro vrstvy vyšších pevností, tedy pevnost v tlaku a odolnost proti mrazu a vodě.



Obrázek 80: Pevnost v příčném tahu: AP-SO, AP-SK (studená recyklace)

Oproti předpokladům vykazovalo prvotní posouzení jen minimální pevnostní parametry směsí stmelených alternativními pojivy. Při plné substituci vykazovaly

směsi minimální pevnost, která do jisté míry mohla být zajištěna samotným procesem hutnění těles. Zde byl přínos pojiv prakticky zanedbatelný. Při částečné substituci, kdy bylo pro stmelení směsi použito 4% alternativního pojiva na bázi strusky (AP-SO, AP-SK) a cementu (1 a 2 %), bylo dosaženo výrazně vyšších pevností, nicméně nedosahují pevnostních parametrů referenční směsi stmelené pouze cementem.



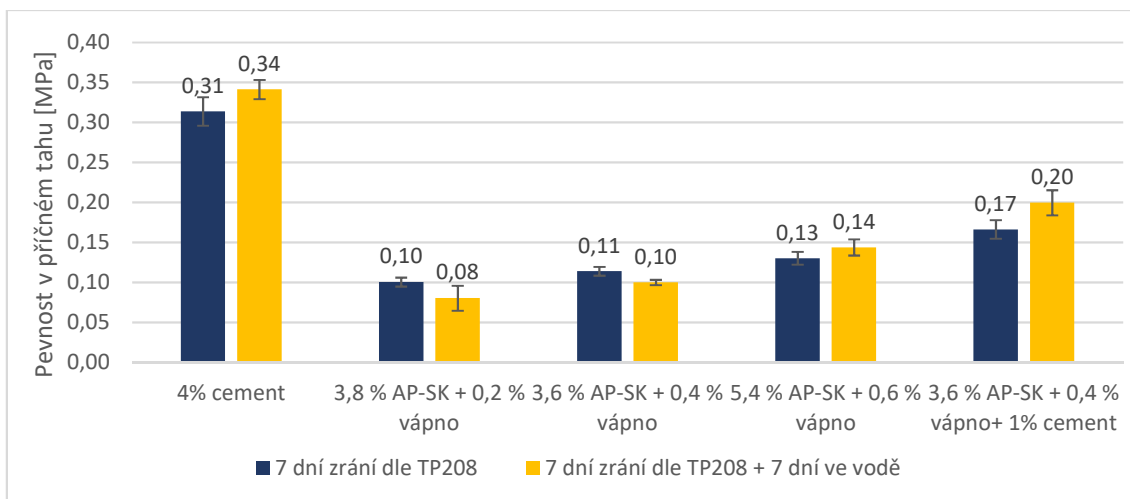
Obrázek 81: Pevnost v tlaku: AP-SO, AP-SK (studená recyklace)

V případě posouzení směsí pro využití ve vrstvách vyšší třídy pevnosti jsme pozorovali obdobné chování alternativních pojiv. Jednoznačně se zde projevila nízká pevnost a náchylnost těles stmelených alternativními pojivy na bázi strusky k degradaci směsi po zmrazovacích cyklech. I přes tento fakt se na základě výsledků kombinace AP s cementem dalo předpokládat určité latentně hydraulické chování alternativního pojiva.

Tento předpoklad vedl k úpravě mikromleté strusky AP-SK, kdy bylo nahrazeno 5 a 10 % hmotnosti strusky vápenným hydrátem, který sloužil jako alkalický aktivátor a měl nastartovat samotnou hydrataci strusky. O nově vzniklém pojivu mluvíme jako o mechano-chemicky aktivovaném struskovém pojivu. Nové alternativy AP-SK byly opět posouzeny v rámci technologie studené recyklace, kde byla aplikována pojiva v dávkování 4 a 6 % a ve vybraném případě i v kombinaci s 1 % cementu.

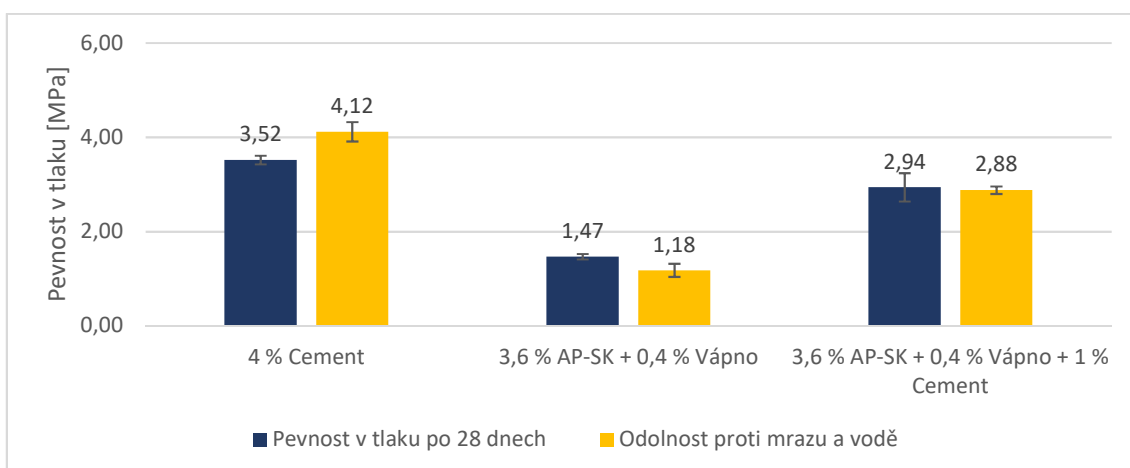
	4% cement	3,8 % AP-SK + 0,2 % vápno	3,6 % AP-SK + 0,4 % vápno	5,4 % AP-SK + 0,6 % vápno	3,6 % AP-SK + 0,4 % vápno + 1% cement
R-materiál Středokluky 0/11	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%	75,0%
ŠD Litice 0/32	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
Cement	4,0%	--	--	--	1,0%
Vápenný hydrát	--	0,2%	0,4%	0,6%	0,4%
AP-SK	--	3,8%	3,6%	5,4%	3,6%
Voda	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%

Tabulka 34: Složení směsí- alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace)



Obrázek 82: Pevnost v příčném tahu: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace)

Data prezentovaná na obrázku 83 prokázala smysluplnost alkalické aktivace alternativních pojiv na bázi strusky, kdy pojiva s minimálním přídatkem vápna dosahovala výrazně vyšších pevností než v případě pojiv bez chemické aktivace. V porovnání s referenční směsí bohužel AP-SK v případě posouzení pomocí pevnosti v příčném tahu vykazovala nižší hodnoty a to i v případě, kdy byl nárůst pevnosti dodatečně podpořen přídatkem cementu.



Obrázek 83: Pevnost v tlaku: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace)

K posouzení pevnostních parametrů směsi určené pro směsi s vyšší třídou pevnosti byly vybrány varianty AP-SK, kdy bylo nahrazeno 10 % pojiva vápnem, a to bez a v kombinaci s cementem. V tomto případě byl pozorován vcelku očekávaný výsledek pojiva bez cementu, které vykazovalo výrazně nižší pevnostní parametry, na druhou stranu byl s přídatkem vápna do jisté míry eliminován pokles pevnosti po zmrazovacích cyklech, tedy u struskového pojiva byly vyvolány určité hydratační schopnosti.

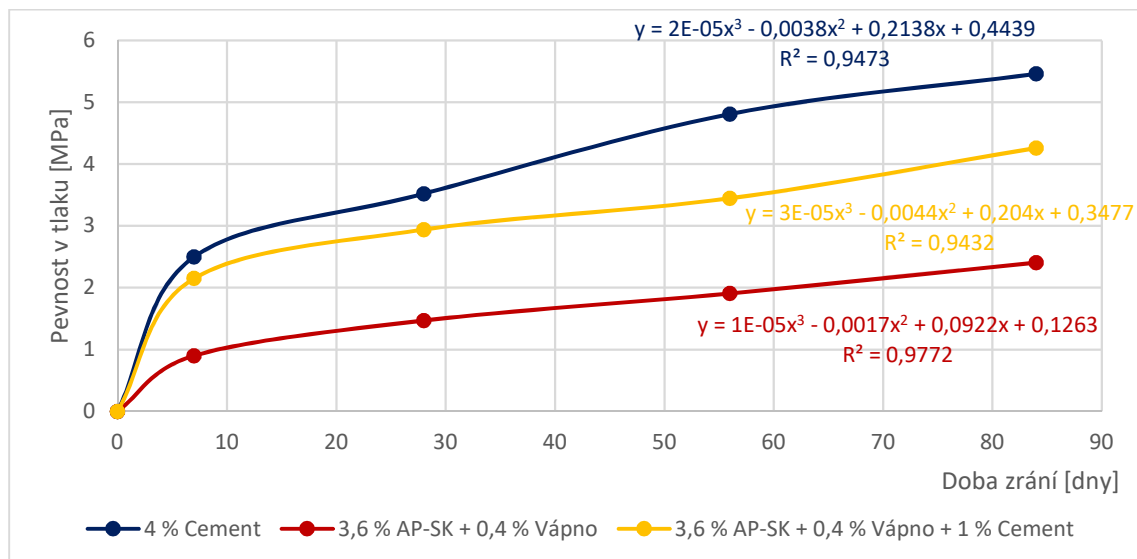
Zajímavější variantou je použití pojiva AP-SK v kombinaci s cementem. Navržená směs dosahovala cca 85% pevnosti referenční směsi a vyhověla podmínkám technických předpisů na pokles pevnosti po zmrazovacích cyklech. Pro použití kombinace AP-SK a cementu hovoří i výrazné snížení nasákavosti směsi a to při minimálním dávkování. Dopad tohoto jevu je patrný na obrázku 85, kde jsou prezentovány směsi stejného složení, vlevo je použito pojivo AP-SK

aktivované vápenným hydrátem, vpravo je navíc k tomuto pojivu přidáno ještě 1 % cementu. Tělesa jsou zachycena bezprostředně po sundání z nasákové podložky před zkoušením pevnostních parametrů po zmrazovacích cyklech.



Obrázek 84: Tělesa po zmrazovacích cyklech (vlevo AP-SK, vpravo AP-SK+cement)

Z hlediska posouzení AP-SK a jeho vlivu na pevnost směsi v čase byl prokázán pomalejší náběh pevnostních parametrů, nicméně po počátečním nárůstu pevnosti vykazoval konstantní růst po celou dobu sledování jak u varianty AP-SK s přídavkem cementu, tak bez něj. Pevnost měřená na směsi stmelené AP-SK s přídavkem cementu navíc vykazovala pevnost pohybující se v rozmezí 75 – 85 % pevnosti referenční směsi. Tento fakt bude základem pro další modifikaci pojiva, tak aby bylo možné jeho širší využití jako částečné nebo úplné náhrady současných hydraulických pojiv.



Obrázek 85: Vývoj pevnosti v tlaku v čase: alkalická aktivace AP-SK (studená recyklace)

9.5.6.1. Závěr analýzy pojiva na bázi strusek

Posouzení pojiv na bázi strusek vycházelo z předchozích poznatků získaných při zpracování fluidních popílků, ať již v neupraveném stavu, nebo v případě snahy upravit fluidní popel pomocí mechano-chemické aktivace na plně funkční hydraulické pojivo. Strusky jako takové byly svou povahou i chováním velmi podobné dříve zpracovávaným materiálům a byly poměrně dobře popsány v technologiích pro betonářský průmysl. Naším úkolem bylo najít cestu k využití mikromleté strusky v oblasti silničního stavitelství, zejména v aplikacích studené recyklace. Prvotní výsledky oproti předpokladům nepotvrdily potenciál těchto pojiv a plná substituce cementu alternativními pojivy vykazovala pouze minimální pevnosti.

Pojivo AP-SO vykazovalo poměrně dobré parametry v případě kombinace s malým množstvím cementu. Posouzení pomocí pevnosti v příčném tahu, dosahovalo srovnatelných parametrů s referenční směsí. Oproti tomu posouzení pomocí pevnosti v tlaku a odolnosti proti mrazu a vodě dopadlo zcela katastrofálně, kdy se tělesa během zmrazování rozpadala a vykazovala pouze minimální pevnost. Pojivo AP-SK klasifikované dle TP 208 vykazovalo výrazné zhoršení pevnostních parametrů oproti referenční směsi a jeho přínos na zlepšení pevnostních parametrů byl zanedbatelný.

Na základě prvotních výsledků bylo přistoupeno k chemické aktivaci pomocí alkalického aktivátoru, v našem případě vápenným hydrátem. Pro aktivaci bylo vybráno pojivo AP-SK, které vykazovalo horší výsledky v první fázi posouzení. Bylo dávkováno 5 a 10 % náhrady struskového pojiva, kdy na základě lepších výsledků byla pro další zpracování vybrána varianta s náhradou 10 % struskového pojiva. Pojivo AP-SK s vápnem bylo dále kombinováno s cementem, kdy cement iniciuje dostatečnou odolnost proti mrazu a vodě, rovněž bylo prověřeno i vyšší dávkování pojiva, které u aplikací tohoto typu bývá nutné.

Z hlediska posouzení pevností v příčném tahu vykazovaly směsi stmelené alternativními pojivy i po úpravách nižší pevnosti než v případě klasických hydraulických pojiv. Pro posouzení pevnosti v tlaku a dlouhodobého chování směsí byla vybrána varianta pojiva s 10 % alkalického aktivátoru, v jednom případě plně nahrazující cement, v druhém případě s 1% příměsí cementu. Varianta bez cementu dle předpokladů nevyhověla na odolnost vůči mrazu a vodě. Směs dosahovala 80 % 28 denní pevnosti, tedy ne zcela špatný výsledek nicméně nevyhovující současným předpisům, které předepisují minimálně 85 % pevnost. Rovněž varianty bez cementu i přes konstantní nárůst pevnosti v čase nedosahovala kvalit referenční směsi. Druhá varianta AP-SK s přídavkem cementu (3,6 % AP-SK + 0,4 % vápno + 1 % cement), oproti variantě bez cementu vyhověla na odolnost vůči mrazu a vodě a vykazovala konstantní nárůst pevnosti v čase při dlouhodobém sledování. Bylo dosaženo obdobných pevnostních parametrů, kdy se pevnost směsi stmelená AP-SK pohybovala v rozhraní 75 - 85 % pevnosti referenční směsi. Z hlediska zadaných cílů lze tedy konstatovat, že posuzovaná varianta pojiva lze částečně nahradit klasická

hydraulická pojiva, zejména cement. Navržený proces úpravy surové strusky K, kdy došlo k aktivaci pomocí vysokorychlostního mletí a alkalického aktivátoru, je plně funkční. Pro využití v praxi bude potřeba stanovit optimální náhradu cementu a způsob zpracování, kdy jako lepší se jeví homogenizace pojiv a alkalických aktivátorů již v rámci procesu mletí.

9.5.7. Alternativní pojiva – ekonomická a ekologická rozvaha

Současná výroba klasických pojiv (cementu a vápna) výrazně zatěžuje životní prostředí a je jedním z energeticky nejnáročnějších odvětví průmyslu. Pokud se zaměříme na plyny vypouštěné do ovzduší, vedlejším produktem výroby cementů jsou například oxidy dusíku, oxid siřičitý, oxidy uhlíku, polychlorované dibenzo-p-dioxiny, dibenzofurany, celkový organický uhlík, kovy, chlorovodík, fluorovodík a další. Množství jednotlivých plynů je samozřejmě závislé na konkrétní technologii a procesu výroby. Z hlediska nejdiskutovanějšího CO₂ produkují současné cementárny až 1 tunu CO₂ na 1 tunu vyrobeného cementu. Smysluplné uplatnění alternativních pojiv je v tomto ohledu neoddiskutovatelné a jejich vliv na životní prostředí je oproti klasické výrobě takřka zanedbatelný. Druhým faktorem je fakt, že využíváme de facto odpad a snažíme se najít pro něj nové efektivní využití.

Ekonomické podmínky využívání alternativních pojiv jsou v současné době poměrně příznivě nastaveny. U první generace pojiv byla odhadovaná cena zhruba poloviční oproti portlandskému cementu, zároveň ale bylo nutné vyšší dávkování těchto pojiv, které tuto ekonomickou výhodu částečně eliminovalo. Druhá generace těchto pojiv již umožňuje srovnatelné dávkování, nicméně první generaci pojiv bylo nutné modifikovat pomocí alkalických aktivátorů, příměsí cementu, případně byl pozměněn i samotný proces mletí. Je tedy nutné počítat, že se tyto úpravy projeví v samotné ceně. Stále by se ale mělo jednat o ekonomicky zajímavou alternativu ke klasickým pojivům, která by měla investora i zhotovitele motivovat pro využívání těchto druhů pojiv. Důležitým faktorem samozřejmě bude správné nastavení ceny průmyslovými výrobci, a také samotná cena vstupních surovin. V současné době je cena posuzovaných fluidních popílků a strusek na nízké úrovni, v mnohých případech jsou tyto materiály stále brány jako odpad, kterého se producenti rádi zbaví. V tomto ohledu předjímat, jak se cena vyvine ve chvíli, kdy se prokáže využitelnost těchto popílků jako alternativního pojiva, je vskutku nemožné a není to ani účelem této práce, která je primárně zaměřena na ověření funkčních vlastností alternativních pojiv.

10. Závěr

Jedním z cílů předložené práce je přispět k řešení aktuálních problémů odpadového hospodářství, kdy je kladen stále větší důraz na recyklovatelnost jednotlivých produktů a znovuvyužívání odpadního materiálu spojeného s jejich výrobou. Snažíme se tak hledat efektivní uplatnění materiálů, které byly dříve považovány za odpad, nebo byly přeměněny na druhotnou surovinu s malým využitím jejich potenciálu. Práce se zabývá aktuální problematikou využití druhotných surovin z energetického a metalurgického průmyslu, recyklací asfaltové vozovky a využití zemin dostupných v místě realizace nebo opravy komunikace. Vzhledem ke zvyšujícím se požadavkům na stavební konstrukce a jejich ekonomickou a environmentálně kompatibilní výstavbu je využívání recyklovaných a druhotných materiálů vhodnou cestou. Tato práce poukazuje na možné modifikace zlepšení zemin moderními přísadami a prezentuje možnost náhrady klasických hydraulických pojiv pojivy na bázi druhotných surovin, s cílenou aplikací pro zlepšení zemin v podloží vozovky, zpracování zemin v podkladních vrstvách a v neposlední řadě využití těchto pojiv v technologiích studené recyklace.

Použité modifikační přísady, bavíme-li se zejména o přísadách ovlivňující charakter zpracovávané zeminy a její odolnost vůči účinkům vody, ukázaly poměrně velký potenciál u zemin vykazujících vysokou nasákavost, kdy přísady dle předpokladu příznivě ovlivnily vodní režim stmelěných směsí a s jejich použitím nedocházelo ke ztrátám pevnosti. U zemin citlivých na přítomnost vody navíc došlo k výraznému zlepšení odolnosti vůči mrazu a vodě a zeminu by tak bylo možné použít jako plnohodnotný materiál. V opačném případě by muselo dojít k jejímu odtěžení a nahrazení vhodnějším materiálem, což sebou nese určitou ekonomickou a ekologickou zátěž. Jedním z případných negativ hydrofobizačních přísad je možný vliv přísad na samotnou hydrataci cementu, případně na hydrataci látek obsažených například ve fluidních popílcích. V případě ošetřených popílků přísada splnila svůj primární účel a zabránila přístupu vody k popílku, který následně nemohl hydratovat, nebo hydratovat jen v omezené míře. Aplikace přísady na směsi popílků tak byla neúčinná a naopak degradovala navrženou směs. Velkým problémem je i samotné dávkování přísady a teoretické uplatnění v podmínkách České republiky, kdy velké procento zemin, o jejichž zlepšení se pokoušíme, má poměrně vysokou přirozenou vlhkost. Je tedy otázkou, zda by výrobci těchto přísad, které jsou převážně kapalné a před použitím je nutné jejich rozpuštění v dostatečném množství vody, dokázali proces dávkování modifikovat pro podmínky běžné u nás.

Velká část práce se zabývá uplatněním druhotných materiálů z energetického a metalurgického průmyslu jako částečné substituce zeminy, nebo pro výrobu alternativních pojiv. V případě fluidních popílků práce popisuje jejich uplatnění v neupraveném stavu jako částečné náhrady místních zemin a následně se snaží pomocí moderních technologií hledat cesty pro jejich úpravu na alternativní hydraulická pojiva. Práce poukazuje na možnost využití vybraných fluidních popílků jako plnohodnotného stavebního materiálu, který sebou nese mnoho dalších výhod, zejména navýšení pevnostních charakteristik směsi. Směsi

fluidního popílku a zeminy, případně fluidního popílku a recyklované cementem upravené zeminy, jasně deklarují přínos této aplikace na širším spektru upravovaných materiálů, kdy dochází k výrazným nárůstům pevnostních charakteristik, a to nejenom v porovnání s neupravenou zeminou, ale i v porovnání s variantou, kdy je zpracováván samotný fluidní popílek. Princip úpravy spočívá v kombinaci několika jevů. Kombinace zeminy a popílku vytvoří materiál výrazně hrubší než v případě samotného popílku. Volné vápno obsažené v popílku způsobí okamžité změny v upravovaném materiálu, které mají příznivý vliv na jeho zpracovatelnost. Následným přidáním hydraulických pojiv (cementu) zaručíme dostatečné chování směsi z hlediska pevnostních parametrů. Práce popisuje vhodnou kombinaci popílku, zeminy a hydraulického pojiva, která vykazuje vysokou pevnost a zároveň je objemově stálá. Podařilo se tak najít smysluplné použití vybraných odpadních materiálů a jejich efektivní využití v konstrukci vozovky s vyšší přidanou hodnotou. Výstup práce klade velký důraz na zastoupení všech složek za účelem efektivního zpracování fluidního popela. Zároveň zdůrazňuje nutnost pečlivého laboratorního posouzení, kdy konkrétní typ zeminy a zejména konkrétní fluidní popílek mohou reagovat odlišně. Rovněž je zdůrazněn problém homogenity materiálu, kdy bude nutné posuzovat odděleně jednotlivé šarže fluidního popílku. Teoretické uplatnění v praxi tak spatřujeme spíše v případě lokálních staveb v blízkosti současných producentů fluidního popílku, kdy je možné minimalizovat negativní faktory této technologie.

Na poznatky z aplikace neupravených fluidních popílků navazujeme v případě úpravy druhotných surovin metalurgického a energetického průmyslu na alternativní hydraulická pojiva. Základním nástrojem pro jejich zpracování je jejich mechano-chemická aktivace pomocí vysokorychlostního mletí, a pokud je to nutné i přidání aditiv a aktivátorů. Vznikají tak nové homogenní látky, které vykazují latentně hydraulický charakter a jejich použitím lze částečně nebo plně nahradit současná hydraulická pojiva, zejména cement. Práce prezentuje širší soubor dat, kdy tímto procesem byly zpracovány fluidní popílků, popílků klasického spalování, případně vysokopecní a ocelářské strusky, a posuzuje jejich možné využití pro úpravu a stabilizaci zemin a využití v technologiích studené recyklace. Během posledních let došlo k modifikaci složení i úpravě výroby jednotlivých pojiv a s tím i k rozšíření možnosti použití těchto pojiv v silničním stavitelství. V současné době jsme těmito pojivy schopni částečně nahradit cement, nicméně stejně jako v případě neupravených fluidních popelů je stále nutné cement alespoň v minimálním množství použít za účelem zvýšení odolnosti upravovaných směsí vůči účinkům mrazu a vody. Vhodnost doporučené aplikace potvrdila i laboratorní měření mikromletých strusek, kdy byly porovnány jednotlivé varianty s pojivem upraveným pouze pomocí vysokorychlostního mletí, a pojivem, které bylo navíc upraveno alkalickým aktivátorem a příměsí cementu. V prvním případě vykazovaly směsi pouze minimální pevnostní parametry, ale po aktivaci bylo dosaženo návrhových pevností téměř na úrovni referenční směsi. I v případě alternativních pojiv se tak podařilo prokázat účelné zpracování odpadních materiálů, které se stávají rovnocennou variantou klasickým pojivům z hlediska pevnostních parametrů.

Jejich velkým bonusem by mohla být cena, která v současné době ještě není pevně stanovena, nicméně pro uplatnitelnost těchto výrobků v praxi je příznivé nastavení ceny žádoucí. Neoddiskutovatelným faktorem je rovněž environmentální stránka věci, kdy současný odpadní produkt dokážeme vhodnou volbou zpracování přeměnit na hodnotné hydraulické pojivo. Na druhou stranu si stále musíme uvědomovat, s jakými produkty pracujeme a jaká jsou možná negativa jejich použití. V praxi tak bude nezbytné pečlivé laboratorní posouzení jednotlivých směsí a zvolení správné technologie pro jejich využití.

11. Literatura

- ADOLF Z., 2013. Teorie procesů při výrobě železa a oceli, část II - Teorie ocelářských pochodů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3349-1
- BAREK J., 2016. Vliv koloidního oxidu křemičitého na vybrané vlastnosti cementových past a malt, DIPLOMOVÁ PRÁCE, Brno.
- BASU P., 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds, Taylor & Francis Group (CRC Press), New York.
- BASU P., 2015. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance, Springer International Publishing, London.
- BAŽAN J. a SOCHA L., 2014. Základy teorie a technologie výroby železa a oceli. Část II, Základy teorie a technologie výroby oceli : studijní opora. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3583-9.
- BERNARDO G., TELESCA A., VALENTI G.L., MONTAGNARO F., 2004. Role of ettringite in the reuse of hydrated fly ash from fluidized-bed combustion as sulfur sorbent: a hydration study, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 43 No. 15, 2004, 4054-4059.
- BRANDŠTETR J., HAVLICA J., 1996. Phase composition of solid residues of fluidized bed coal combustion, quality test, and application possibilities, Chemical papers, Vol. 50 No.4, 1996, 188-194.
- BURMAN P., 2016. Uvolňování plynů při stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popele biomasy, Chemické listy 110, 456-459.
- CIZKOVA Z. a VALENTIN J., 2017. Substitution of cement by micro-milled recycled concrete in cold recycled asphalt mixes. MM Science Journal. 1793-1797. DOI: 10.17973/MMSJ.2017_03_2016151. ISSN 18031269.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2005. Thematic Strategy on air pollution
- CHAUDHARI R., 2016. Mitigating the Quality of Expansive Soil Utilizing Terrasil as an Additive; Volume III, Issue V. International Journal of Research and Scientific Innovation ISSN: 2321 – 2705 (Online);
- DUNG N.T., CHANG T.P., CHEN C.T., 2015. Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash-Activated Slag Concrete as Novel Construction Material, ACI Materials Journal, 105-114.
- European Environment Agency (EEA), 2016. Air quality in Europe — 2016 report
- EUROSLAG, 2016. Evropská asociace výrobců a zpracovatelů strusky. <http://www.euroslag.com/products/statistics/2016>

FEČKO P., KUŠNIEROVÁ M., RACLAVSKÁ H., ČÁBLÍK V., LYČKOVÁ B., 2005. "Fly ash." Monograph, Technical University Ostrava, p. 191, ISBN 80-248-0836-6.

FRÝBORTOVÁ I., 2010. Možnosti alkalické aktivace ocelářské strusky (bakalářská práce), VUT Brno.

FRÝZOVÁ R., 2012. Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů (diplomová práce), VUT Brno.

GLUKHOVSKY V. D., G. S. ROSTOVKAYA, G. V. RUMYNA, 1980. High strength slag-alkali cement. 7th International Congress on the Chemistry of Cements. Paris, p. 164 – 168.

HEWLETT P.C., 2004. Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Editor Peter C Hewlett. Oxford: Elsevier, 1057 s. ISBN 07-506-6256-5

HLAVÁČEK J., 2012. The admixtures which are influencing setting time of Portland cement (Diploma thesis), Faculty of Civil Engineering VUT in Brno.

HOPKINS T.C., BECKHAM T.L., 1999. Long-term performance of a highway subgrade stabilized with an atmospheric fluidized bed combustion material, In: International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky.

IWAŃSKI M., CHOMICZ-KOWALSKA A., 2013. Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology, Procedia Engineering, Volume 57, 2013, Pages 433-442, ISSN 1877-7058

JIRÁSEK, J., VAVRO, M., 2008. Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1378-3

JENKINS K. J., MULUSA W. K., 2008. Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II – Appendix B, Technical Memorandum, South Africa.

JENKINS K. J., 2009. Determination of Triaxial Shear Parameters Using Simple Triaxial Test, Method 7.; South Africa.

JENKINS K. J., ROBROCH S., HENDERSON M.G., WILKINSON, J. a MOLENAAR, A.A.A., 2004. Advanced Testing for Cold Recycling Treatment Selection on N7 Near Cape Town; 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), ISBN: 1-920-01718-6.

JENKINS K. J., 1999. Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen; Ph.D. thesis; University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.

JENNINGS H. M., THOMAS J. J., ROTHSTEIN D., CHEN J. J., 2002. Handbook of porous solids, chapter 6 - Cements as porous materials, Weinheim, Wiley-VCH.

- JEWELL R.B., RATHBONE R.F., ROBL T.L., 2007. The fabrication of value added cement products from circulation fluidized bed combustion ash, In: World of coal ash (WOCA), Northern Kentucky, USA
- JIRÁSEK J., VAVRO M., 2007. Anorganická pojiva, Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava, dostupné <http://geologie.vsb.cz>.
- JOHNSON F., 2007. Fluidized bed combustion for clean energy. In: Engineering Conferences International, Fluidization XII, New York, 47-62.
- JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA D., 2008. Effect of fluidized bed combustion fly ash on the chloride resistance and scaling resistance of concrete, In: Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, Toulouse, France, RILEM proceedings PRO 63, vol. 2, 556–563.
- KLOBOUČEK, B., 1979. Silniční laboratoř: učebnice pro stavební fakulty. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Řada stavební literatury.
- KÜHL H., 1930. Zement.
- KURKOVÁ Z., 2007. Ekologické využívání vysokopecní strusky ve stavebnictví. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební b. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 7(1), 127-130. ISSN 1213-1962.
- LEKHA B.M., GOUTHAM, SHANKAR R., 2013. Laboratory investigation of soil stabilized with nano chemical. In: Indian Geotechnical Conference, Roorkee.
- MALOLEPSZY J., 1986. Activation of synthetic melilite slags by alkalis. 8th International Congress on the Chemistry of Cement, 4, 104-107, Rio de Janeiro, Brazil,.
- MONTAGNARO F., SALATINO P., BERNARDO G., TELESCA A., VALENTI G.L., 2005. Reuse of fly ash from a fluidized bed combustor for sulfur uptake: The role of ettringite in hydration-induced reactivation, Energy and fuels, Vol. 19, No. 5, 1822-1827.
- MRÁZ V., VALENTIN J., SUDA J., AND KOPECKÝ L., 2015. Experimental Assessment of Fly-Ash Stabilized and Recycled Mixes, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, No. 2, 1-15.
- MRÁZ V., HONETSCHLÄGEROVÁ L., SUDA J., VALENTIN J., KRESTA F., LUXEMBURK F. 2016. Limiting Factors for the Applicability of Specific Types of Energetic By-products in the Roadbed Structures. In: 4th GeoChina International Conference, Shandong.
- OCHODEK T., KOLONIČNÝ J., BRANC M., 2007. Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, Ostrava.
- OKA S.N., 2004. Fluidized Bed Combustion, Marcel Dekker, Inc., New York.

PATEL N. A. and col., 2015. Subgrade Soil Stabilization using Chemical Additives; Volume 2 Issue 04 July 2015, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056

POMYKALA R., KEPYS W., LYKO P., 2014. The influence of high temperature on the properties of solidified suspension made of ash from fluidized combustion of lignite, In: Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 23 No. 4, 1407-1411.

RATHBONE R., RUST D., PETERSON A., MAHBOUB K., ROBL T., 2010. Fluidized bed combustion ash utilization: CFBC bottom ash as a cementitious material, In: P Claisse, E Ganjian, F Canpolat and T Naik, Special Technical Proceedings 2nd international conference on sustainable construction materials and technologies, Ancona, Italy, Università Politecnica delle Marche.

SCHODE H-W, 2006. Vlastnosti směsného pojiva ve srovnání s vápnem a cementem. Straže+Autobahnt. 541-547.

SHI CAIJUN, KRIVENKO P. V., ROY D. M., 2006. Alkali-activated cements and concretes. New York: Taylor & Francis. ISBN 9780415700047.

SOTORNÍK J., 2006. Zkušenosti s novými pojivy Doroport a Dorosol; časopis silnice železnice 2/2006; str. 36-37

STEHLÍK D., SOKOLOVÁ V., 2017. Improvement of soils in pavement subgrade by Fly-Ashes and stabilized Fly-ashes, In: 3. mezinárodní konference pro využití energetických produktů – Popílky ve stavebnictví 2017, Brno, 111-120.

KOSMATKA S. H., KERKHOFF B., PANARESE W. C., 2003. Design and Control of Concrete Mixtures FOURTEENTH EDITION, ISBN 0-89312-217-3.

SUDA J., VALENTIN J., ŽÁK J., 2012. Use of Alternative Binders Induced from the Treatment of Fluidized Combustion Fly-ashes in Pavement Structures, In: 2nd International Scientific Meeting GTZ 2012 and Conference GEO-EXPO 2012. Tuzla: Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering, University of Tuzla, 947-954.

SUDA J., ČÍŽKOVÁ Z., TOPIČ J., VALENTIN J. a TESÁREK, P., 2016. Potentials for Using Pulverized (Micro-Milled) Mineral Waste Materials as Stabilizing Agents or Fillers in Cold Recycled Mixes. In: Geo-China 2016. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016-07-21, s. 29-37. DOI: 10.1061/9780784480052.004. ISBN 9780784480052.

SUDA J., 2017. Navrhování a hodnocení recyklovaných a emulzních asfaltových směsí s využitím vedlejších energetických produktů. Disertační práce, ČVUT Praha, fakulta stavební.

SVOBODA L., 2004. Stavební hmoty. Bratislava: Jaga Group, 471 s. ISBN 80-8076-007-1.

ŠČUČKA J., MARTINEC P., 2013. Stavební hmoty 1 – Beton, podklady pro výuku, FAST V3B-TU Ostrava.

- ŠEDINA J., VALENTIN J., SUDA J., 2016. Standardní a mikromleté fluidní popílký ve stmelených směsích pro podkladní vrstvy, In: Podkladní vrstvy a podloží vozovek, Praha 4: Pragoprojekt a.s., 45-52.
- ŠKVÁRA F., ŠULC R., SNOPEK R., PETEROVÁ A., ŠÍDLOVÁ M., 2018. Hydraulic clinkerless binder on the fluid sulfocalcic fly ash basis. *Cement and Concrete Composites*, 93, 118-126. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.06.020. ISSN 09589465
- TAYLOR H. F. W., 1997. *Cement Chemistry*, 2nd Ed., London: Academic Press.
- TRAINA G., MORSELLI L., ADORNO G. P., 2007. Electrokinetic remediation of bottom ash from municipal solid waste incinerator. *Electrochimica Acta*, 52(10), 3380-3385. DOI: 10.1016/j.electacta.2006.05.067. ISSN 00134686
- TOSSAVAINEN M., ENGSTROM F., YANG Q., MENAD N., LARSSON M. L., BJORKMAN B., 2007. Characteristics of steel slag under different cooling conditions, *Waste Management*, vol. 27, no. 10, pp. 1335–1344.
- VALENTIN J., SUDA J., MATOUŠEK D., 2012. Alternativní trendy v oblasti technologií recyklace za studena, *Silnice železnice*, Vol 7, No. 1, 36-41.
- VALENTIN J., PROŠEK Z., TESÁREK P., KARRA´A G., 2016. Jaký je potenciál mechano-chemické aktivace u vybraných vedlejších produktů či recyklátů?, In: Podkladní vrstvy a podloží vozovek, Praha 4: Pragoprojekt a.s., 53-65.
- VALENTIN J., ŠYC M., 2018. Možnosti využití škváry ze spalování tuhého komunálního odpadu v konstrukci vozovky, In: Podkladní vrstvy a podloží vozovek, Praha 4: Pragoprojekt a.s., 99-106.
- WANG H., XU H., ZHENG C., 2009. Temperature dependence on reaction of CaCO₃ and SO₂ in O₂/CO₂ coal. *Journal of Central South University* 16, 845–850.
- WANG L., HUSTAD J. E., SKREIBERG Ø., SKJEVRAK G., MORTEN G., 2012. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications, *Energy procedia*, Vol. 20, 20-29.
- WILES C. C., 1996. Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), 325-344. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00120-4. ISSN 03043894
- Wirtgen Cold Recycling Manual, 2010. 3th Edition, ISBN 3-936215-05-7, Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany.
- YILDIRIM I. Z., PREZZI M., 2011. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering*, 1-13. DOI: 10.1155/2011/463638. ISSN 1687-8086.

WANG G. C., 2016. The utilization of slag in civil infrastructure construction. Duxford, UK: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier. Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, number 68. ISBN 978-0-08-100994-9.

Online zdroje:

Danish Waste Solutions. Background information about utilization of bottom ash in road constructions. Shrnující zpráva 2018 (převzato 1. 11. 2018)

CEZ group, 2016. CEZ group and coal power plants <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny.html> (převzato dne 31. 1. 2016)

KTD Group, Technické podmínky použití přísady UPD, <http://www.keliutiesimas.lt>, (převzato 28. 11. 2014)

Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2015. Politika druhotných surovin České republiky, Dostupné na: <http://www.mpo.cz/dokument153352.html> (převzato 12. 12. 2015)

<http://ocelarna.sweb.cz> (převzato 5. 7. 2018)

SOLAŘOVÁ H., 2007. Recyklace asfaltových vozovek za studena, <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/recyklace-a-asfaltovych-vozovek-za-studena> (převzato 10. 2. 2017)

ZOUBEK P., <http://www.pavelzubek.cz>, (převzato 12. 9. 2017)

Zydex Industries, <http://www.zydexindustries.com>, (převzato 12. 11. 2014)

World Steel association. *Statistic*. <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html>, 2016 (Převzato 1. 4. 2018)

Citované normy, TP a TKP:

ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu (2005-2018)

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 (2011)

ČSN 13286-41 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy (2004)

ČSN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání (2012)

ČSN EN 13286-50 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 50: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu (2005)

ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem (2013)

ČSN EN 14227-2 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 2: Směsi z kameniva stmelené struskou (2013)

ČSN EN 14 227-3 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 3: Směsi z kameniva stmelené popílkem (2013)

ČSN EN 14 227-4 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 4: Popílký pro směsi stmelené hydraulickými pojivy (2013)

ČSN EN 14227-5 (736156) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 5: Směsi z kameniva stmelené hydraulickými silničními pojivy (2013)

ČSN EN 14 227-10 (Zrušená norma) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 10: Zeminy upravené cementem (2008-2016)

ČSN EN 14227-11 (Zrušená norma) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 11: Zeminy upravené vápnem (2008-2016)

ČSN EN 14227-12 (Zrušená norma) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 12: Zeminy upravené struskou (2008-2016)

ČSN EN 14227-13 (Zrušená norma) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 13: Zeminy upravené hydraulickými silničními pojivy (2008-2016)

ČSN EN 14 227-14 (Zrušená norma) Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 14: Zeminy upravené popílkem (2008-2016)

ČSN EN 14 227-15 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 15: Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy (2016)

ČSN 73 6133: Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací (2010)

ČSN 73 6244: Přejechy mostů pozemních komunikací (2010)

ČSN EN 197 – 1 ed.2. Cement – Část 1: složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití (2012)

TKP 4 ZEMNÍ PRÁCE (2017)

TP 93 Návrh a provádění staveb PK s využitím popílků a popelů (2011)

TP 94 Úprava Zemin (2013)

TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena (2009)

ASTM D2487-11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)