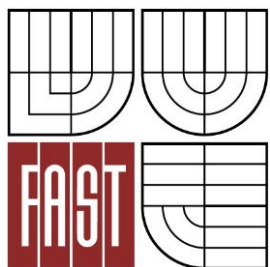




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

TESTOVÁNÍ MOŽNOSTÍ VYUŽÍVÁNÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN JAKO NÁHRADY PŘÍRODNÍCH KAMENIV

TESTING WAYS OF USE OF SECONDARY RAW MATERIALS REPLACING NATURAL
AGGREGATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ VAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Tomáš Vašek
Název	Testování možností využívání druhotných surovin jako náhrady přírodních kameniv
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- odborné zahraniční časopisy ze zahraničních i tuzemských konferencí
- odborné publikace z elektronických zdrojů např. Sgopus, Web of Science
- Structure and Performance of Cements, J. Bensted, P. Barnes, Spon Pres London 2001
- M. Collepari - Moderní beton, ČBS 2009
- T.C. Holland, P.R. Gupta, V.M. Malhotra - Super plasticizers and other chemical admixtures in Concrete, American Concrete Institute 2009

Zásady pro vypracování

Možnosti zdrojů kvalitních přírodních kameniv se pomalu ztenčují, narůstají omezení těžby z důvodů ekologie a současně stoupá jejich cena. Současně vznikají velké objemy odpadních surovin, které by mohly v některých případech úplně, či částečně nahradit přírodní zdroje. V závodech Prefa Brno vznikají různé odpady jako např. polystyren při výrobě kanalizačních šachet a zatvrdlý beton, dále Prefa disponuje haldou teplárenské strusky.

Cílem práce bude najít možnosti využití těchto odpadů pro stávající či nový výrobní sortiment Prefy. V teoretické části bude provedena rešerše odborných publikací se zaměřením na možnosti zpracování, technologie úpravy či technické omezení pro výše uvedené odpady.

V praktické části bude proveden návrh složení lehkých betonů s využitím drceného polystyrenu různé granulometrie jako plniva pro objemové hmotnosti v rozmezí od 400 do 1800 kg/m³. Laboratorně budou ověřeny fyzikálně mechanické vlastnosti zatvrdlých směsí, včetně tepelně izolačních a odolnosti proti zvýšeným teplotám. Na vzorcích teplárenské strusky bude ověřeno její chemické složení a granulometrie, poté budou vytríděny běžné frakce do 16 mm a navrženy receptury betonů třídy C 8/10, C12/15, C20/25 a KSC I s částečnou či úplnou náhradou přírodních kameniv struskou. Posuzována bude také možnost využití doupravené strusky mletím jako jemnozrnné příměsi do betonu. Na vyrobených zkušebních tělesech budou testovány vlivy na konzistenci, pevnosti, mrazuvzdornost, vodotěsnost zatvrdlých betonů. Obdobné experimenty budou provedeny na vzorcích běžných frakcí předrceného betonu. Ověřeny budou možnosti dosažení pevností min. 45 MPa při užití hrubých frakcí recyklovaného betonu.

Rozsah minimálně 75 stran textu.

Předepsané přílohy

.....
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce sestává ze dvou částí, tedy teoretické a praktické. V teoretické části jsou uvedeny základní informace o alternativních kamenivech do betonu, jako je polystyren, struska a recyklovaný beton. Dále je uveden vliv těchto alternativních kameniv z druhotných surovin na chování a vlastnosti betonu, ať už v čerstvém, nebo ztvrdlém stavu. V poslední řadě jsou zmíněny některé možnosti použití betonu s obsahem těchto surovin. V praktické části jsou experimentálně ověřeny fyzikálně mechanické vlastnosti betonů s obsahem odpadní polystyrenové drtě, včetně tepelně izolačních a odolnosti vůči zvýšeným teplotám. Následuje ověření vlivu teplárenské mleté strusky jako aktivní příměsi do betonu. Dále jsou uvedeny experimenty na betonech s náhradou hrubého kameniva teplárenskou struskou a recyklovaným betonem a vlivu těchto druhotných surovin na konzistenci, pevnosti, mrazuvzdornost a vodotěsnost betonů. Uveden je také experiment použití recyklovaného betonu pro podkladní vrstvy vozovek jako kamenivo stmelené cementem. Závěrem je vyhodnocení praktické části a uvedení poznatků použití polystyrenu, strusky a recyklovaného betonu jako kameniva do betonu.

Klíčová slova

polystyren, struska, škvára, recyklovaný, drcený, beton, druhotná surovina, trvale udržitelný rozvoj, kamenivo

Abstract

Master's thesis consists of two parts, theoretical and practical. In the theoretical section are listed basic information about alternative aggregates used for concrete mixture, like polystyrene, cinder and recycled concrete. Further, the influence of these alternative aggregates, used as secondary raw materials, on the behaviour and properties of fresh respectively hardened concrete. Possibilities of application concrete containing secondary raw materials are mentioned. In the practical part are experimentally verified physical and mechanical properties of concrete containing crushed waste polystyrene beads, furthermore thermal insulation properties and resistance to elevated temperatures is tested. Influence of heating plant cinder powder as active addition to concrete mixture was tested. As a next is prepared concrete with replacement of coarse aggregate by cinder and recycled concrete and tested. The influence of these secondary raw materials on workability, compressive strength, frost resistance and water permeability of concrete is also defined. The last part of research is focused on recycled concrete such as main material used in mixture of aggregates bonded with cement, dispose for base layers in roads. In conclusion are discussed results from experimental research and summary of knowledge's about using polystyrene, cinder and recycled concrete as aggregates for concrete mixtures.

Keywords

polystyrene, slag, cinder, recycled, crushed, concrete, secondary raw material, sustainable development, aggregate

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Tomáš Vašek *Testování možností využívání druhotných surovin jako náhrady přírodních kameniv*. Brno, 2014. 115 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014

.....
podpis autora
Bc. Tomáš Vašek

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. a kolektivu v okruhu betonářských laboratoří na ústavu THD FAST VUT v Brně za odborné vedení a rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za veškerou podporu při plnění mého studia.

V Brně 2014

Bc. Tomáš Vašek

Obsah

1	Úvod	9
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	Základní informace	10
2.2	Polystyren jako kamenivo do betonu	10
2.2.1	Obecně	10
2.2.2	Vliv polystyrenového kameniva na vlastnosti čerstvého betonu	11
2.2.3	Vliv polystyrenového kameniva na vlastnosti ztvrdlého betonu	13
2.2.4	Příklady použití betonu s obsahem polystyrenových zrn	14
2.3	Struska jako kamenivo do betonu	20
2.3.1	Obecně	20
2.3.2	Vliv struskového kameniva na vlastnosti čerstvého betonu:	21
2.3.3	Vliv struskového kameniva na vlastnosti ztvrdlého betonu:	27
2.3.4	Příklady použití betonu se struskovým kamenivem	33
2.4	Drcený (recyklovaný) beton jako kamenivo do betonu	33
2.4.1	Obecně	33
2.4.2	Vliv kameniva z betonového recyklátu na čerstvý beton	37
2.4.3	Vliv kameniva z betonového recyklátu na ztvrdlý beton	39
2.4.4	Příklady použití betonu s kamenivem z betonového recyklátu	42
3	Praktická část	45
3.1	Cíl praktické části	45
3.2	Metodika práce	46
3.3	Použité materiály	48
3.4	Provedené zkoušky	55
3.4.1	Zkoušení vlastností v čerstvém stavu	55
3.4.2	Zkoušení vlastností v ztvrdlém stavu	55
3.5	Výsledky měření – Polystyrenové betony	59
3.5.1	Receptura A-400	59
3.5.2	Receptura B-1000	60
3.5.3	Receptura C-1500	61
3.5.4	Shrnutí výsledků polystyrenových betonů	62
3.6	Výsledky měření – malty s mletou teplárenskou struskou	70
3.6.1	Receptura M-REF	70
3.6.2	Receptura M-STR10(2300)	71
3.6.3	Receptura M-STR10(4200)	72
3.6.4	Receptura M-STR20(2300)	73
3.6.5	Receptura M-STR20(4200)	74
3.6.6	Receptura M-STR30(2300)	75
3.6.7	Receptura M-STR30(4200)	76
3.6.8	Shrnutí výsledků malt s mletou struskou	77
3.7	Výsledky měření – betony s náhradou hrubého kameniva	79
3.7.1	Receptura REF-C12/15	79

3.7.2	Receptura REC20-C12/15.....	80
3.7.3	Receptura STR20-C12/15.....	81
3.7.4	Receptura REC40-C12/15.....	82
3.7.5	Receptura STR40-C12/15.....	83
3.7.6	Receptura REC60-C12/15.....	84
3.7.7	Receptura STR60-C12/15.....	85
3.7.8	Receptura REF-C16/20.....	86
3.7.9	Receptura REC20-C16/20.....	87
3.7.10	Receptura STR20-C16/20.....	88
3.7.11	Receptura REC40-C16/20.....	89
3.7.12	Receptura STR40-C16/20.....	90
3.7.13	Receptura REC60-C16/20.....	91
3.7.14	Receptura STR60-C16/20.....	92
3.7.15	Receptura REF-C20/25.....	93
3.7.16	Receptura REC20-C20/25.....	94
3.7.17	Receptura STR20-C20/25.....	95
3.7.18	Receptura REC40-C20/25.....	96
3.7.19	Receptura STR40-C20/25.....	97
3.7.20	Receptura REC60-C20/25.....	98
3.7.21	Receptura STR60-C20/25.....	99
3.7.22	Shrnutí výsledků betonů s náhradou hrubého kameniva.....	100
3.8	Výsledky měření – KSC I.....	104
3.8.1	Receptura KSC-REC.....	104
3.8.2	Shrnutí výsledků KSC I.....	105
4	Závěr.....	106
5	Seznam použitých zdrojů.....	110
6	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	115

1 ÚVOD

Recyklace materiálů je velmi důležitá pro udržitelný rozvoj, pro životní prostředí a zachování zdrojů surovin dalším generacím. V tomto problému je již řada zavedených druhotných surovin v betonu jako např. popílky, křemičité úlety a vysokopecní strusky. Všechny tyto odpadní suroviny ale pocházejí z jiných odvětví průmyslu, než je výroba cementu a betonu. V poslední době se ovšem objevil problém, jež souvisí přímo s odpady ze stavební výroby a to zejména z výroby a použití betonu. Tyto odpady opětovně zavedené jako kamenivo do betonu by mohly přinést dvě zásadní výhody. Šetřily by životní prostředí, jelikož by se nemusely odvážet na skládku a dále by nahrazovaly z části přírodní kamenivo, které by se tak nemuselo odtěžit a nadále by zůstalo uchováno jako přírodní zdroj. Je tedy zapotřebí uvést v aspektu zahraniční, nebo tuzemské zkušenosti v této problematice, jejich řešení a také omezení, které s sebou přinášejí. Tyto zkušenosti poté aplikovat s ohledem na praktické podmínky v českých výrobnách betonu a betonového sortimentu. [3]

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní informace

Beton je dnes zdaleka nejrozšířenější stavební materiál vůbec. Všestrannost a schopnost variability tohoto materiálu významně přispěla k jeho širokému využití po celém světě.

Mnozí vědci se snažili změnit vlastnosti běžného betonu tak, aby vyhovovaly dnešním individuálním potřebám. Úpravy betonu se zkoušely s ohledem na jeho kvalitu a trvanlivost, kde byly posuzovány alternativní složky betonu, jež nahrazovaly konvenční běžně užívané materiály. Ačkoli použití těchto alternativních materiálů mnoho technologií odsuzovalo pro jejich některé nevýhody, naopak jiní podporovali jejich využívání, kde kladli velký význam na jejich vývoj a potlačení nevýhod těchto materiálů a byli si vědomi jejich vlastností a účinků, zvláště pak kladný vliv na ekonomiku betonových konstrukcí. [3] Polystyren, škvára a recyklovaný beton právě patří mezi tyto alternativní materiály. V teoretické části této práce se seznámíme s poznatky o těchto materiálech ze zahraničí a s omezeními, které tyto druhotné suroviny s sebou přinášejí.

2.2 Polystyren jako kamenivo do betonu

2.2.1 Obecně

Pěnový polystyren je pěna zatuhlého charakteru o nízké objemové hmotnosti, složená ze separovaných vzduchových pórů v polymerní matici.

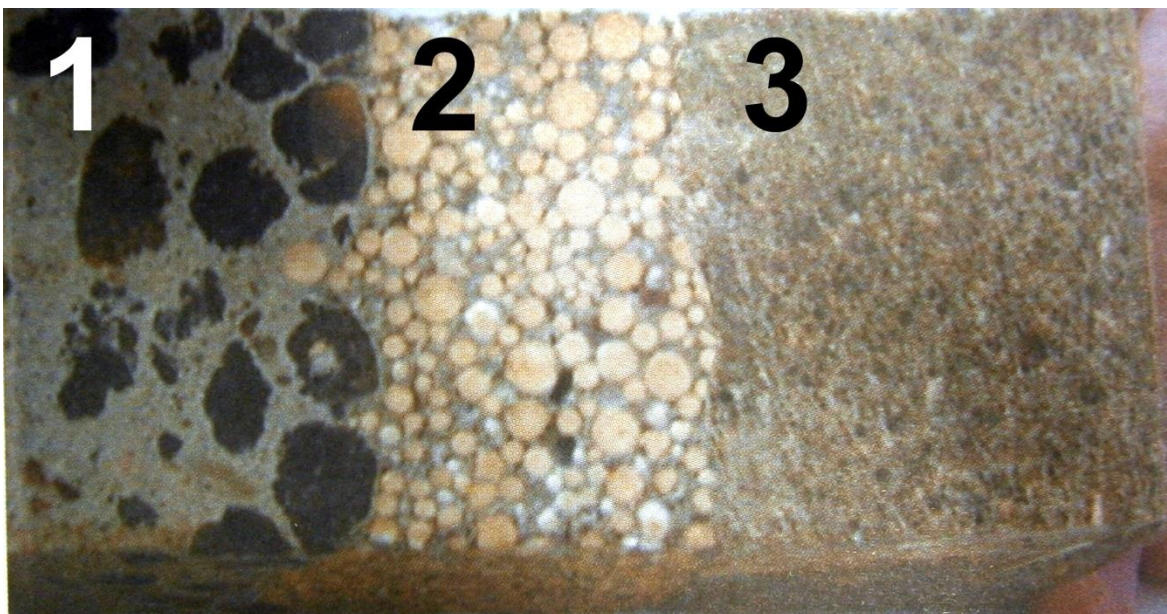


Obr. č. 1 Zrna expandovaného polystyrenu

Je patrné, že polystyrenová drť vyniká především výrazně nízkou objemovou hmotností a tepelně izolačními vlastnostmi samotného materiálu. Proto je použití polystyrenové drtě, či kuliček vhodné především do lehčených betonů.

Můžeme rozlišit základní typy betonů, z hlediska technologie vylehčení.

- beton s kamenivem z expandovaných anorganických jíílů, Obr. č. 2 (1)
- beton s kamenivem z pěnového polystyrenu, Obr. č. 2 (2)
- beton vylehčený vznikajícím plynem v cementové pastě, Obr. č. 2 (3)



Obr. č. 2 Srovnání typů lehkých betonu

Ty se pak dále dělí dle objemových hmotností a pevností (měřeno ve stáří 28 dní) do 3 tříd:

- A. **Tepelně izolační lehké betony**, s tlakovou pevností 0,5 – 7 MPa a s objemovou hmotností 300 až 800 kg/m³ ve vysušeném stavu. Využití je v oblastech, kde stačí nízká pevnost a kde jsou požadovány izolační vlastnosti.
- B. **Lehké betony střední pevnosti**, s objemovou hmotností 800 – 1400 kg/m³ a s tlakovou pevností 7 – 18 MPa.
- C. **Konstrukční lehké betony**, s objemovou hmotností 1400 – 2000 kg/m³, které jsou obvykle vyráběny za použití kameniva z expandovaných jílu a vykazují tlakovou pevnost 18 – 70 MPa.

Pěnový polystyren má nejen potenciál v prvních dvou zmiňovaných třídách A a B, ale i ve třídě C, tedy konstrukčních lehkých betonů. [3]

Součinitel tepelné vodivosti je úzce spjatý s objemovou hmotností materiálu, čím menší je objemová hmotnost betonu, tím vyšší jsou tepelně-izolační vlastnosti. Je patrné, že čím menší je objemová hmotnost materiálu a je v něm obsaženo více vzduchu, tak tím více klesají mechanické vlastnosti betonu, jako je právě pevnost betonu v tlaku. Musíme tedy nalézt kompromis mezi těmito dvěma vlastnostmi, aby byla pevnost betonu co největší a objemová hmotnost zároveň co nejmenší. [8]

2.2.2 Vliv polystyrenového kameniva na vlastnosti čerstvého betonu

Xu, Xu, Jiang a Li z Číny provedli studii chování polystyrenového kameniva na vlastnostech betonu. [8]

Pro čínský výzkum byl použit cement typu CEM I portlandský, těžené drobné kamenivo, drcené hrubé kamenivo o maximální velikosti zrna 10 mm a jako lehké kamenivo komerčně dostupný expandovaný polystyrén. Zrna EPS byla velmi hladká, kruhového

tvaru o velikosti okolo 3 mm a objemové hmotnosti 30 kg/m³, což může být klasifikováno jako ultralehké kamenivo.

Suroviny byly smíchány v pořadí nejprve EPS kuličky s částí záměsové vody, poté cement, drobné kamenivo, zbývající část vody a nakonec se přidalo kamenivo hrubé. [8] Tento postup míchání je již osvědčený a je doporučován například i pány Babu a Babu. [9]

Zpracovatelnost

Polystyren má pouze nepatrnou absorpci vody, díky jeho uzavřené buněčné struktuře. Dle Cooka standardní zkoušky zpracovatelnosti v tomto případě pro beton s polystyrenovým kamenivem nejsou vhodné, jelikož jsou citlivé na měrnou tíhu betonu. Použití polystyrenových zrn by nemělo snížit zpracovatelnost betonu. Tradiční testovací metody pro posuzování tohoto materiálu musí být ovšem upraveny. [2] [13]

Většina z polystyrenových lehkých betonů u studie z Číny projevila dobrou zpracovatelnost. Avšak receptury obsahující nevyšší množství polystyrenu (25 %) projevovaly vysokou náchylnost k segregaci, což má za následek nižší stupeň zhutnění vzorků, který částečně přispěl ke snížení pevností. Přestože obecně zpracovatelnost betonu s vyššími dávkami polystyrenu je dobrá, zde se při zvyšující dávce polystyrenu zpracovatelnost čerstvého betonu snižovala vlivem hydrofobních vlastností povrchu polystyrenových zrn. Tento povrch díky vyšším dávkám polystyrenu rostl a tím více působil na vodu obsaženou v záměsi. [8] Proto při vyšších dávkách polystyrenových zrn je velmi důležité zvýšit dávkování jak smáčecí přísady, tak přísady plastifikační, jež tento efekt eliminuje. Zpracovatelnost tehdy zůstává dobrá i při vyšších dávkách polystyrenu. [12]

Betony s polystyrenovým kamenivem se vyznačují dobrou přizpůsobivostí a práce s nimi je velmi snadná. Hutnit se mohou jednoduše ručně a jejich konečná úprava je také bezproblémová. [9]

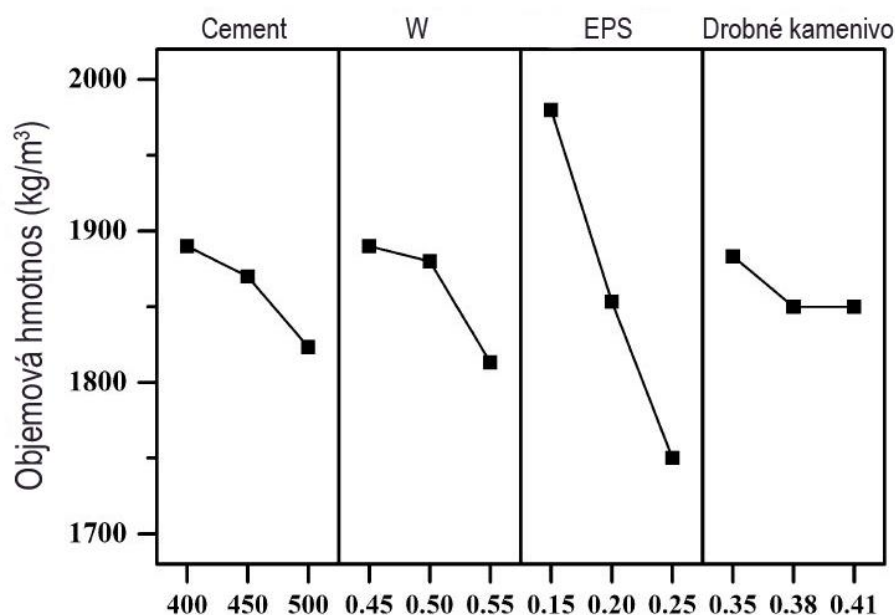
Segregace

Hlavním problémem polystyrenového betonu zůstává segregace zrn ve směsi. [9] V minulosti použití polystyrenových zrn v betonu způsobovalo segregaci vzhledem k extrémně nízké objemové hmotnosti zrn a jejich hydrofobní povaze. Cook zavedl použití lepkavé přísady ke zlepšení stability betonových směsí obsahujících polystyrenová zrna. Chemicky ošetřená zrna expandovaného polystyrenu, například v Austrálii komerčně známá pod názvem BST, jsou schopna prevence před segregací v betonových směsích. [1] [9] [12] Pokud polystyren takto upravený ovšem není, je použití přísady pro eliminaci nízkého povrchového smáčení zrn nezbytností. Přísada pak dopomáhá k tomu, aby zrna dosáhla co nejvíce homogenní disperze v čerstvé betonové směsi a aby se zabránilo jejich segregaci během míchání a zpracování betonu. [2] [12]

2.2.3 Vliv polystyrenového kameniva na vlastnosti ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost

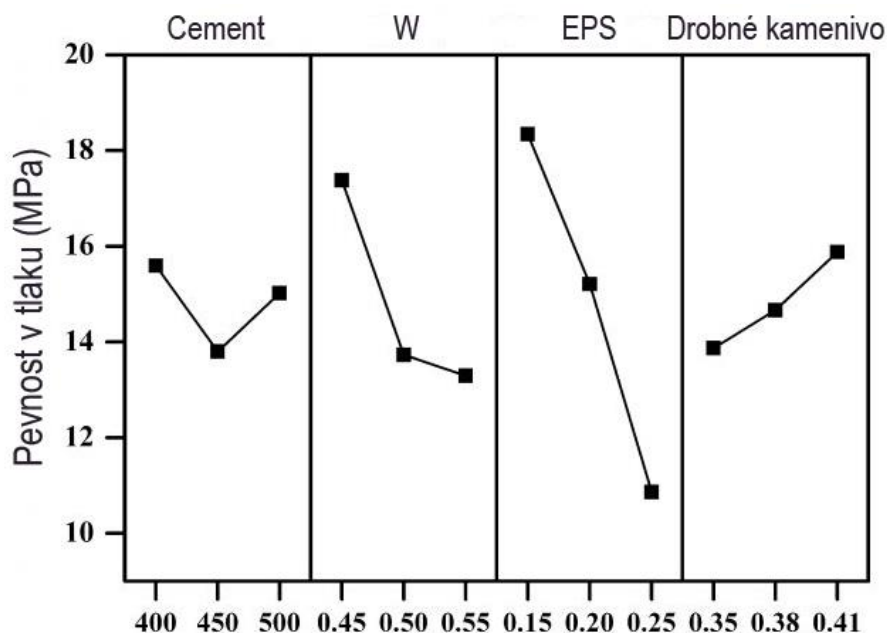
Objemová hmotnost betonu je jedním z nejdůležitějších parametrů, jež ovlivní výsledné fyzikální vlastnosti ztvrdlého lehkého betonu a reguluje se především množstvím přidaného lehkého kameniva a jeho hustotou. Objemová hmotnost EPS betonu u čínské studie byla v rozmezí od 1700 kg/m^3 do 2100 kg/m^3 . Tím bylo ušetřeno cca 10 až 30 % hmotnosti oproti klasickému betonu, pohybujícího se na hodnotě zhruba 2350 kg/m^3 . Pokud měníme úrovně volených faktorů, potvrzuje se právě největší vliv dávky polystyrenu na objemovou hmotnost, jak je znázorněno na Obr. č. 3. Zvyšující dávka polystyrenu jasně ukazuje lineárně klesající křivku objemové hmotnosti. [8]



Obr. č. 3 Vliv faktorů na objemovou hmotnost betonu

Pevnost v tlaku

U pevnosti betonu v tlaku čínská studie ukázala také velmi silný vliv množství polystyrenu ve směsi. Průběh křivky závislosti množství polystyrenu a také ostatních faktorů na pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 4. S rostoucí hodnotou polystyrenu z 15 na 25 % objemových, poklesla pevnost betonu po 28 dnech o 40 %. Vliv množství cementu je v porovnání s faktory vodního součinitele a množství polystyrenu zanedbatelný. Polystyrenové kamenivo se na poklesu pevnosti podílí nejvíce a to z toho důvodu, že pevnost jeho zrn je téměř nulová. [8] [9] Velikost zrn polystyrenu má také vliv na pevnost betonu. [14] [15] U stejné záměsi je pevnost betonu s většími zrny nižší, než se zrny menšími. [8] Obecně nejjednodušší způsob jak zvýšit pevnost polystyrenového betonu je zvýšit dávku cementu, to ovšem vede ke zvýšení objemové hmotnosti a také k vyšší náchylnosti na smršťování betonu při vysychání. [10]



Obr. č. 4 Vliv faktorů na pevnost betonu v tlaku po 28 dnech

Chování při deformaci

Deformační chování betonu obsahujícího polystyrenové kamenivo je odlišné od klasického normálního betonu. Jelikož jsou zrna polystyrenu pružná, deformace betonu namáhaného tlakem jsou více pozvolné a neodpovídají typickému křehkému lomu. [8]

Nasákavost

Trvanlivost betonu primárně závisí na jeho propustnosti, jež definuje odolnost vůči vnikání agresivních iontů z prostředí. Absorpční vlastnosti nepřímo reprezentují velikost porozity betonu a jeho propustnost, pokud nejsou póry zcela uzavřené, nýbrž v matrici propojeny mezi sebou. Na experimentech provedených v Indii všechny betony obsahující polystyren vykazovaly nízkou nasákavost, ukazující z tohoto hlediska na dobrou kvalitu betonu. Betony s vyšším obsahem polystyrenových zrn, dosahovaly nižších hodnot nasákavosti v porovnání s betony obsahujícími polystyrenových zrn méně. [9]

2.2.4 Příklady použití betonu s obsahem polystyrenových zrn

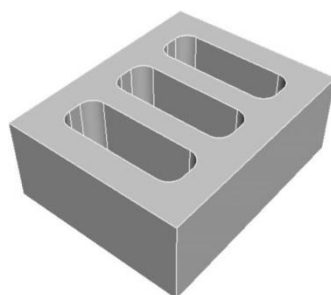
Polystyrenová zrna mohou být lehce zakomponována do betonové matrice za účelem vytvoření lehčených betonů s širokou škálou objemových hmotností. Aplikace polystyrenového betonu byla zkoumána např. Cookem a zahrnuje obvodové pláště budov, obkladové prvky, stěnové panely a kompozitní podlahové systémy. Polystyrenový beton byl použit i k výrobě nosných betonových tvárnic, zvukově izolačních prvků, nebo základního materiálu pro dlažbu (chodníky). Bischoff a kolektiv navrhl překrývající vrstvu

z polystyrénového betonu, která může poskytnout ochranu konstrukcím proti rázovému namáhání. [1] [11]

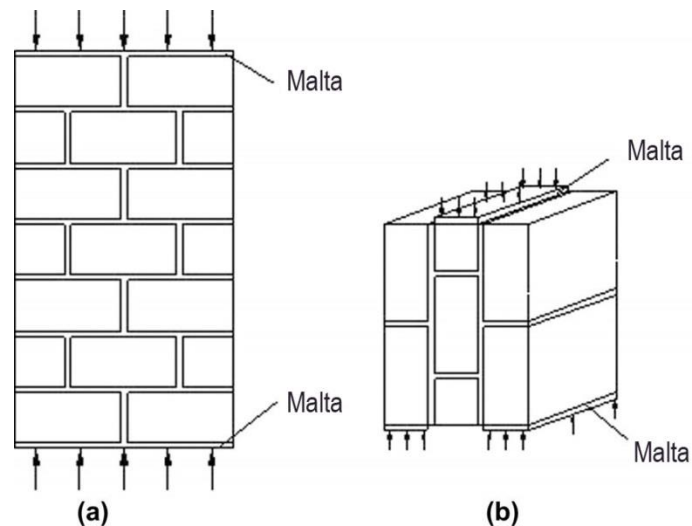
Tvárnice

Optimální složení lehkého betonu pro výrobu dutých tvárnic se snažili nalézt Xu, Xu, Jiang a Li. Z pohledu úspory energie a ekonomiky mají duté cihly zřejmé výhody, jako zlepšení tepelně izolačních vlastností, absorbování hluku, nebo snížení zatížení stěn stavby, stejně jako snížení nákladu na dopravu. Zde nacházíme výše uvedený rozpor protichůdných vlastností, které chceme u tvárnice dosáhnout. Jedná se tedy o co nejvyšší pevnost v tlaku a co nejmenší objemovou hmotnost (jež znamená nízkou tepelnou vodivost). Složení takové směsi musí najít určitý kompromis v souladu s efektivitou nákladů na výrobu a jinými praktickými parametry. [8]

V čínském experimentu navrhované tvárnice s rozměry 190 mm x 240 mm x 90 mm a tloušťkou stěny 30 mm se vyráběly lisováním a ihned po výrobě se uložily do skladovacích prostor na dobu 28 dní k jejich vytvrzení v normálním prostředí. Model navržené tvárnice je na Obr. č. 5. Za účelem analýzy mechanického chování těchto tvárnic byly testovány vzorky zdiva pro zjištění pevnosti v tlaku, respektive pevnosti ve smyku, jak je znázorněno na Obr. č. 6. Praskliny, jež se vyskytly po zatěžování, nevznikaly pouze u jednotlivých tvárnic, ale procházely souvisle se sousedními tvárnicemi spojenými maltou. Tvar prasklin při zatěžování byl ve vertikální poloze. Zdivo dosahovalo pevností v rozmezí 3,1 až 3,4 MPa. Poměr mezi zatížením, kdy začínalo docházet k prasklinám na zdivu a konečným zatížením se pohyboval okolo 40 až 55 %, což je podobné jako u normálního zdiva z cihelných tvárnic. [8]



Obr. č. 5 Model tvárnice z lehkého betonu obsahujícího polystyrenová zrna



Obr. č. 6 Způsoby zatěžování tvárnic

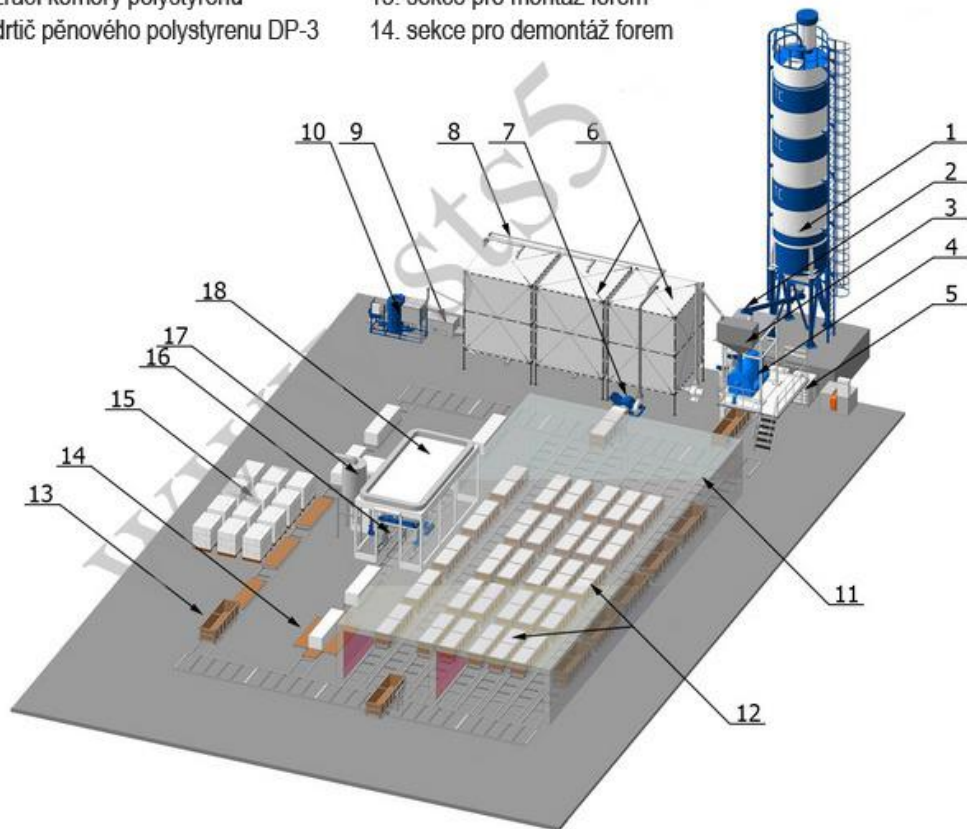
Původně chtěli autoři výzkumu také posílit mechanické spolupůsobení tvárnic vložení malty do části jejich dutin, což se ale v konečné fázi projevilo jako nekompaktní a nejednotné. Výsledky smykové pevnosti šesti různých vzorků byly v rozmezí hodnot od 0,09 do 0,18 MPa, což bylo ve studii považováno v základě za uspokojivé s místními požadavky. Z ekonomického a praktického hlediska je tedy jedna z možností jak využít lehký beton s polystyrenovými zrny právě formou výroby dutých tvárnic. [8]

Technologie výroby polystyrenbetonových tvárnic se skládá z těchto operací:

- Drcení polystyrenu, nebo jeho výroba na granule
- Dávkování surovin
- Lisování masy z polystyrenbetonové hmoty
- Vytvrzování masy
- Řezání masy do tvaru tvárnic o požadované velikosti
- Balení tvárnic
- Skladování

Schéma příkladu linky na výrobu tvárnic z polystyrenového betonu je na Obr. č. 7. [17]

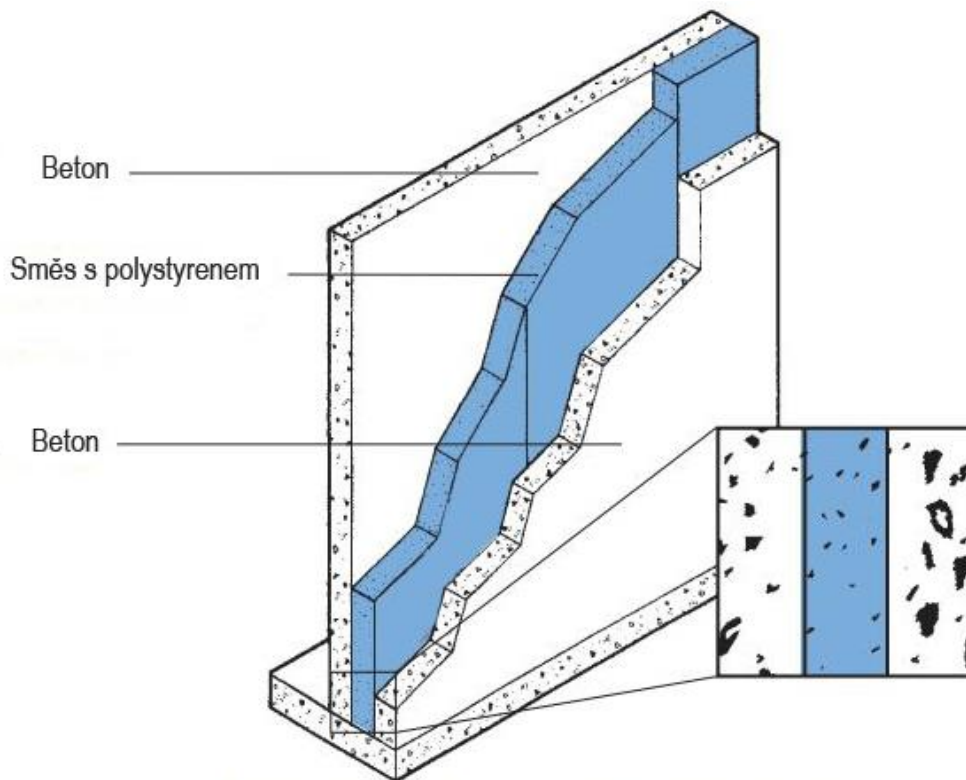
- | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1. zásobník pro skladování cementu | 8. pneumatický dopravník | 15. balení tvárnic |
| 2. šnekový dopravník | 9. vysoušecí souprava | 16. stroj na řezání ARK |
| 3. objemový dávkovač zrn EPS | 10. PND-500 automatický expandér | 17. cyklón |
| 4. RGS-900 | 11. zrací komora pro bloky | 18. odvětrávací systém |
| 5. komplex pro úpravu vody | 12. formy FM-85 | |
| 6. zrací komory polystyrenu | 13. sekce pro montáž forem | |
| 7. drtič pěnového polystyrenu DP-3 | 14. sekce pro demontáž forem | |



Obr. č. 7 Linka pro výrobu tvárnic z polystyrenového betonu

Sendvičové panely

Využití odpadního polystyrenu je možné také jako výplň do sendvičových betonových panelů. Nenosná vrstva směsi s obsahem polystyrenových zrn ve formě zatvrdlé pěny zlepšit tepelně izolační vlastnosti a nosnou funkci zajistí klasický beton po stranách panelu, jak je znázorněno na Obr. č. 8. [18]



Obr. č. 8 Sendvičové panely s polystyrenovou směsí

Litý beton s obsahem polystyrenového kameniva

Litý polystyrenbeton se dá použít například do podlah, stropů, konstrukcí bazénů, energokanáľů či střech jako nekonstrukční výplňový materiál, vzhledem k jeho tepelně izolačním vlastnostem. Výhodou takového materiálu je především variabilita tvaru, spádovost a dobrá manipulace. [16] [17]



Obr. č. 9 Aplikování polystyrenbetonové podlahy



Obr. č. 10 Plochá střecha z polystyrenbetonu

2.3 Struska jako kamenivo do betonu

2.3.1 Obecně

Kotelní struska je slinutý materiál, který je porézni, skelného charakteru o hranatých tvarech zrn, přibližně stejné velikosti. Vzniká spalováním lignitu, nebo hnědého uhlí, jež má tendenci k větší porozitě, než uhlí černé. [19]



Obr. č. 11 Teplárenská struska vytříděná v různé granulometrii

Množství průmyslových vedlejších produktů-odpadů jako je struska, neboli škvára, vyrobená v uhelných teplárnách a elektrárnách, nadále se zvyšující se poptávkou energií roste. Využití kotelní strusky je s ohledem na situaci naléhavou problematikou a je potřeba se na tento environmentální cíl zaměřit.

Struskové kamenivo je jedním z typu materiálů používaných v určitých místech, kde je nedostatek přírodního kameniva, nebo je přírodní kamenivo příliš nákladné, nebo je zde velké množství odpadní strusky, které by se mělo snižovat vzhledem k životnímu prostředí. [4] [20]

Jenom v Anglii a Walesu každoročně vyprodukovalo 11 elektráren přibližně 8 % z celkového množství 27,6 milionů tun tuhého odpadu. To mělo za následek 642 tisíc tun strusky, která ze 79 % putovala na skládku a zbylé množství bylo použito jako násypy pro aplikace jako např. hráze, nebo jako kamenivo do asfaltových směsí. [5] Tepelné elektrárny tedy produkují velké množství residua v podobě strusky, jež má dle literatury slibný potenciál jako částečná, nebo úplná náhrada drobného, či hrubého přírodního kameniva v maltě, nebo betonu. Je zapotřebí si ale uvědomit, jaká omezení takové kamenivo s sebou přináší. [4] [6]

Škodlivé materiály, jako rozpustné sírany, nebo pyrit, mohou být před použitím strusky jako kameniva odstraněny. Pyrit se dá odstranit například magnetickou separací. Vzhledem k obsahu solí, nízkému pH a nízkému elektrickému odporu může být tento materiál potenciálně náchylný ke korozi. Proto před použitím tohoto materiálu je nezbytné znát jeho složení a vlastnosti. [19]

2.3.2 Vliv struskového kameniva na vlastnosti čerstvého betonu:

Zpracovatelnost

Joseph a Ramamurthy pozorovali klesající hodnotu sednutí kužele čerstvého betonu, jež může být redukována použitím většího objemu frakce lehkého kameniva ve směsi. Kim a kolektiv uvedli, že schopnost toku SCC s použitím lehkého kameniva vykazovala zlepšení se snižující se objemovou hmotností kameniva, což ale zapříčinilo omezení v podobě daleko vyšší náchylnosti k segregaci. [4]

Díky vysoké porositě uhelné strusky je zde určitý problém v určení přesného vodního součinitele pro tyto betony. Množství předpokladů je založeno na odhadovaném množství vody, kde není zahrnuta voda potřebná pro proces smáčení povrchu kameniva a vyplnění prázdných dutin. Taková voda je přítomna uvnitř strusky prostřednictvím kapilární elevace a nepřispívá k tvorbě kapilárních pórů v cementové matrici. Ačkoli pohlčená voda pórovitostí strusky chybí pro zpracovatelnost čerstvé směsi, tento efekt má za následek uchování vody pro pozdější hydrataci cementu, jako tzv. „samoošetřování“. Vysoká porozita struskového kameniva tedy znamená, že vodní součinitel v betonu nelze považovat za reálný, jelikož voda absorbovaná do nitra kameniva se uvolňuje do betonu zpět v průběhu času, kdy je beton ještě v čerstvém stavu. [6]

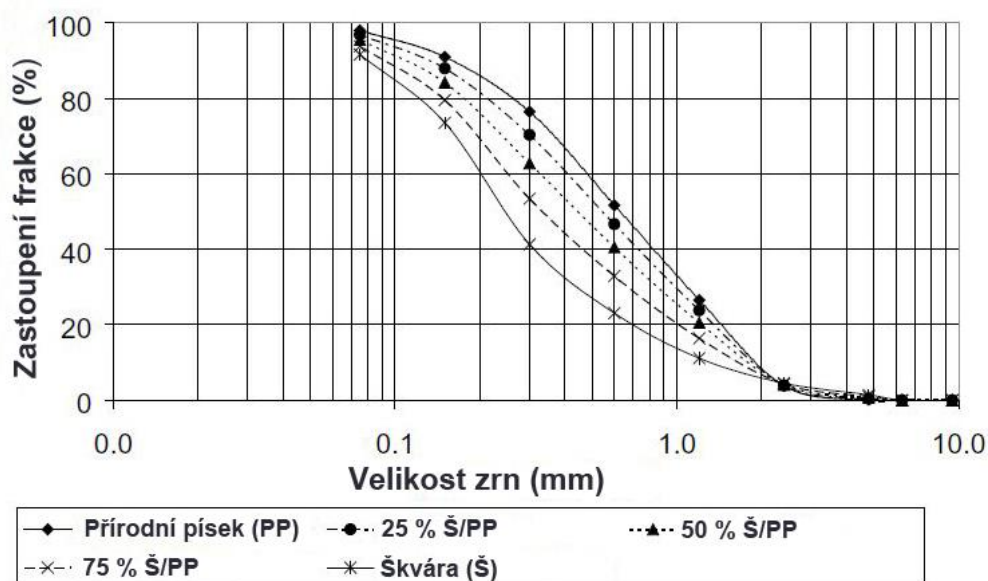
Bleeding

Pokud použijeme struskové kamenivo ve formě drobné frakce, přicházejí kromě klasické zpracovatelnosti další aspekty, jež mají na čerstvý beton vliv. Brazilská studie zkoumala vliv použití uhelné strusky jako náhradu přírodního drobného kameniva na vlastnostech betonu v čerstvém stavu.

Materiály pro betonovou směs tvořily cement CEM III, přírodní křemičitý písek jako drobné kamenivo o hustotě 2630 kg/m^3 a hrubé kamenivo žulové o hustotě 2700 kg/m^3 a maximální velikosti zrna 19 mm. Struska vybraná z usazovací nádrže Jorge Lacerda teplárenské elektrárny, jež každoročně produkuje v Santa Catarina 840 tisíc tun této suroviny. Chemické složení strusky bylo analyzováno pomocí energiově disperzní spektroskopie. Obsah vápníku byl velmi nízký. Suma $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dosáhla 89,5 % a suma $\text{CaO} + \text{MgO}$, byla velmi nízká, méně než 1,4 %. Granulometrie přírodního písku a strusky je znázorněna na Obr. č. 12.

Směsi byly navrženy ve dvou různých formách náhrady strusky za přírodní drobné kamenivo. První byla s ekvivalentním množstvím strusky s korekcí kameniva dle obsahu vlhkosti - CRT3; druhá byla koncipována tak, aby dosáhla přibližně stejných mechanických vlastností jako směs referenční – CRT4. Aby toho mohla dosáhnout, bylo zapotřebí do CRT4 zahrnout vyšší dávky cementu, oproti CRT3.

Tab. č. 1 ukazuje množství surovin použitých pro výrobu záměsí. Konzistence byla v rozmezí 80 ± 10 mm sednutí kužele. Objemová hmotnost čerstvého betonu se stanovila pomocí gravimetrické metody. [6]



Obr. č. 12 Granulometrie přírodního písku a teplárenské strusky (škváry)

Tab. č. 1 Záměsí a jejich vlastnosti z výzkumu chování ČB s obsahem uhlé strusky

Záměs	Zastoupení surovin (kg/m ³)					OH ČB (kg/m ³)	Obsah vody ČB (%)	Pevnost v tlaku (MPa)		
	Cement	Písek	Struska	Štěrka	Voda			3 dny	28 dní	90 dní
0% CRT	304	912	0	806	219	2238	-	15.9	28.4	32.0
25% CRT3	305	686	145	808	277	2177	50.0	12.5	23.2	25.7
50% CRT3	301	452	287	798	336	2090	50.0	9.9	18.0	23.0
75% CRT3	295	221	422	782	373	1964	52.0	6.3	11.5	14.9
100% CRT3	299	0	570	792	378	1869	57.0	4.2	8.6	12.5
25% CRT4	323	727	103	856	245	2220	50.0	19.5	27.2	32.1
50% CRT4	334	501	212	885	272	2138	50.0	17.0	28.5	35.9
75% CRT4	356	267	340	943	303	2109	50.0	16.1	26.1	32.7
100% CRT4	386	0	441	1023	323	2040	67.0	21.2	32.6	38.4

Během výroby vzorků docházelo díky různým objemovým hmotnostem použitých materiálů k segregaci. Kamenivo a částice cementu měly tendenci držet se u dna formy, zatímco voda byla vytlačována na horní povrch vzorku. Tento proces vytlačování vody na povrch vzorku se nazývá bleeding, nebo „pocení“ betonu. V tomto ohledu jsou velmi důležité tři faktory:

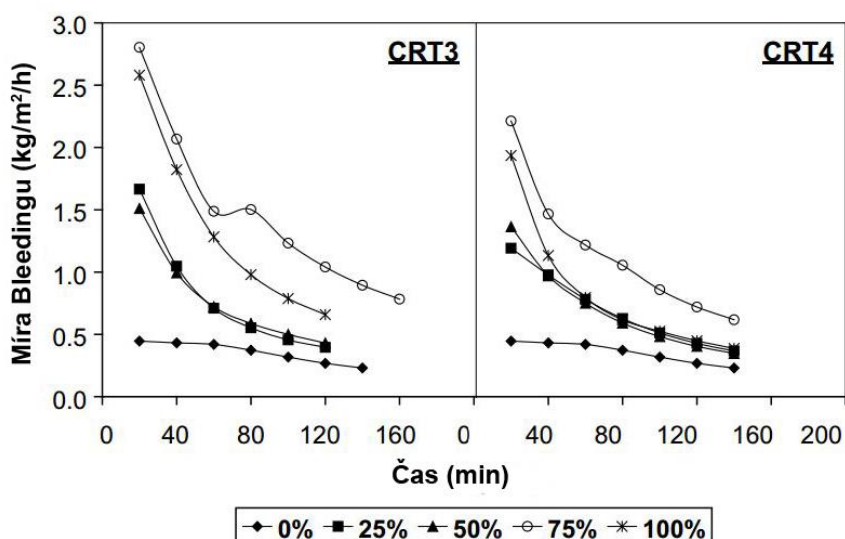
1. Množství vody, jež je ztracena procesem bleedingu a která se vypařuje do okolního prostředí, jemuž je vystavena. Větší množství vody odcházející z nitra betonu má totiž za následek snížení trvanlivosti betonu z důsledku zvýšení transportních vlastností betonu pro škodlivé faktory (kapilarita, propustnost) v zatvrdlém stavu.
2. Celkový čas, během kterého dochází k bleedingu, protože čím delší je čas bleedingu, tím menší bude význam kapilárního tlaku pórů v důsledku jejich vysoušení.

3. Rychlost bleedingu myšleno ztrátou určitého objemu vody za jednotku času. Tento faktor poskytuje důležitý údaj související s povrchovým odpařováním, kde nižší míra bleedingu s vysokou mírou odpařování vede k procesu plastického smršťování betonu.

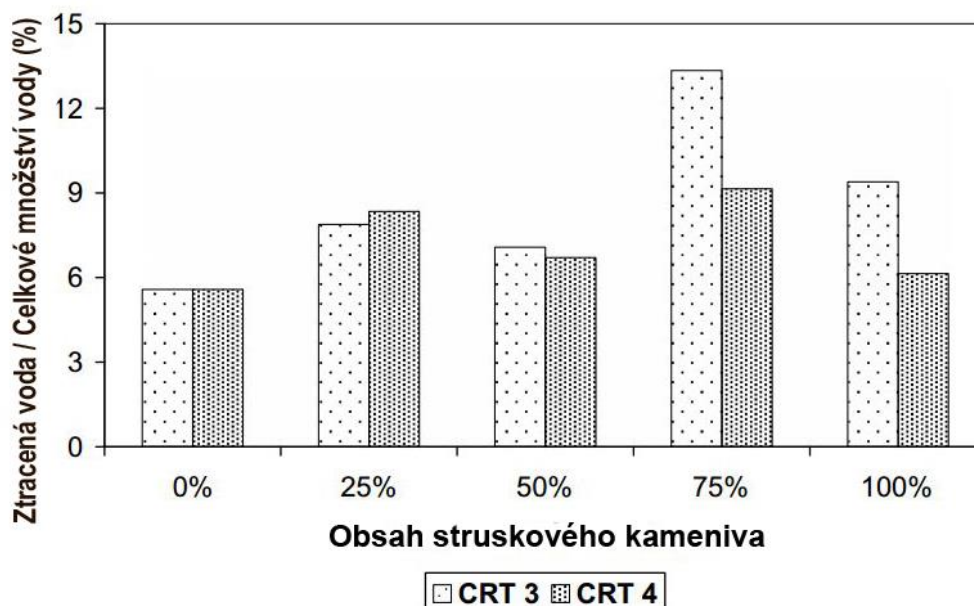
Zkouška ztráty vody bleedingem se provedla v místnosti s kontrolovanou teplotou v rozmezí 22 ± 2 °C o relativní vlhkosti 60 ± 5 %. Voda se odebírala ze vzorků umístěných ve skleněné nádobě s exponovanou plochou 140 x 190 mm. Systém odebírání vody z povrchu betonu byl založen na naklonění nádoby pod úhlem přibližně 15° a odebrání nahromaděné vody za pomoci injekční jehly, aby nedošlo k odebrání malých částic betonu z povrchu. Odebrání „vypocené“ vody proběhlo vždy v intervalu 12 minut. Nulový čas byl určen jako doba, při které byl vzorek vložen do testovací skleněné nádoby. Když mezi dvěma měřeními již nebylo nalezeno k odebrání žádné množství vody, měření v tomto okamžiku bylo považováno za ukončené.

Jak je vidět na Obr. č. 13 směsi betonu CRT3 s vyšší hodnotou vodního součinitele měly vyšší míru ztráty vody procesem bleeding. CRT4 vykazovaly podobné chování, avšak s hodnotami blízcími se referenční směsí, tedy pouze s přírodním pískem. Je zřejmé, že vyšší vodní součinitel a také větší množství struskového kameniva v receptuře přispívá k vyšší hodnotě ztráty vody během procesu bleeding.

Pokud porovnáme hodnoty ztráty vody procesem bleeding v závislosti na celkovém množství vody ve směsích CRT3 a CRT4, tak u 25% a 50% náhrady přírodního kameniva struskovým, byly shledány velmi podobné výsledky, jak je možno vidět na Obr. č. 14. Je nutno poznamenat, že se zvyšujícím se množstvím struskového kameniva ve směsi (75 a 100 %) se zvýšila potřeba vody v čerstvém stavu, což souvisí s vyšší ztrátou vody během procesu bleeding. [6]



Obr. č. 13 Míra procesu bleeding v závislosti na čase



Obr. č. 14 Ztráta vody procesem bleeding v poměru k celkovému množství vody ve směsi

Přítomnost uhelné strusky tedy zvyšuje množství vody ztracené bleedingem a dobu jeho trvání. Čím vyšší je množství strusky, tím je tento efekt větší.

Doba tuhnutí betonu

Na brazilské studii probíhalo také stanovení doby tuhnutí betonu. Měření proběhla v souladu s francouzskou normou NF EM 196-3 (1990), pomocí Vicatova přístroje s jehlou upravenou pro vzorky o hmotnosti 700 g, kvůli zajištění bezpečnému průchodu vzorkem, aniž by byla blokována zrny drobného kameniva. Vzorek byl před zkouškou proséván síty s otvory o velikosti 4,8 mm k odstranění hrubé frakce kameniva ze vzorku.

Doba počátku tuhnutí je charakterizována jako moment, kdy se zvýší teplota betonu po určité periodě, po kterou zůstávala přibližně konstantní a zároveň se začne zvyšovat tuhost směsi. Tento jev má velký význam v souvislosti s tahovými silami betonu, odolávajícím plastickému smršťování. Čím dříve počátek a konec tuhnutí směsi nastane, tím dříve bude směs odolávat tahovým silám z plastického smršťování, jež působí vlivem vysychání vody z povrchu betonu. Pozdější nástup tuhnutí má za následek snížení trvanlivosti vlivem vzniku trhlin právě z důvodu plastického smršťování. Kombinace časné iniciace doby tuhnutí a následně delšího působení procesu bleeding se může projevit jako velmi prospěšné při prevenci vůči trhlinkám z plastického smršťování. Některé studie uvedly, že přidávkem uhelné strusky do betonu se zvyšuje počátek a konec doby tuhnutí ve vztahu k referenční směsi. Je to důsledkem zvýšení přítomnosti vody v betonech s uhelnou struskou, aby byla zachována dobrá zpracovatelnost. Dalším faktorem je snížení pH ve směsi, což způsobuje zpoždění, či snížení hydratační aktivity cementových částic. [6]

Tab. č. 2 ukazuje výsledky doby tuhnutí betonů s náhradou drobného kameniva uhelnou struskou. Směsi CRT3 vykazovaly značné zpoždění doby počátku a konce tuhnutí.

Naopak směsi CRT4 měly proces tuhnutí rychlejší s výjimkou 25% náhrady struskou, u které byla tato doba mírně delší, než u referenční. Ne příliš odlišná hydratační dynamika a dynamika doby tuhnutí betonů CRT4 od referenční směsi byla zapříčiněna zkrácenou dávkou přidané vody, jelikož si část této vody struskové kamenivo natáhlo a uchovalo ve své pórovité struktuře, jak již bylo výše uvedeno.

Tuto skutečnost nelze ověřit u betonů CRT3, protože množství vody spotřebované ve vztahu k referenční směsi bylo značně vyšší. Tedy, velké množství volné vody vede k tendenci prodloužení doby počátku tuhnutí betonu. 100% náhrada betonu struskovým drobným kamenivem u CRT3 s nejvyšším množstvím záměsové vody měla největší hodnotu konce doby tuhnutí. Stejná náhrada, ovšem u CRT4, zaznamenala naopak nejnižší hodnotu konce doby tuhnutí. U obou typů při náhradě 25 %, byl výsledek velmi podobný a blížil se hodnotě referenční směsi.

Přestože doba tuhnutí betonu byla u typu CRT3 delší, výsledky deformací betonu vlivem plastického smrštění díky vyšším hodnotám ztracené vody bleedingem nestoupaly. Tento proces udržoval dostatečné množství vody na povrchu a chránil jej před nadměrným odpařováním. [6]

Tab. č. 2 Doba počátku a konce tuhnutí

	Náhrada struskou (%)	Počátek tuhnutí (min)	Konec tuhnutí (min)
CRT3	0	230	330
	25	250	360
	50	340	475
	75	350	460
	100	270	540
CRT4	25	240	340
	50	210	315
	75	225	315
	100	195	255

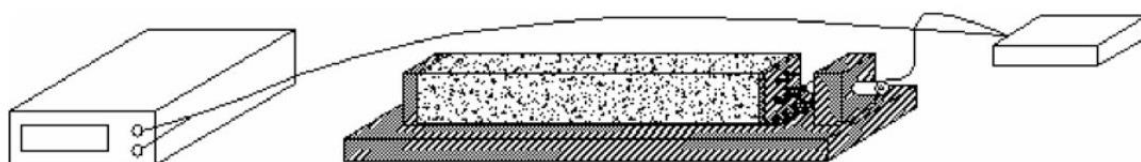
Se zvyšujícím se množstvím strusky a snižujícím se množstvím cementu je tedy pozorováno zpoždění v počátku a konci doby tuhnutí

Plastické smrštění

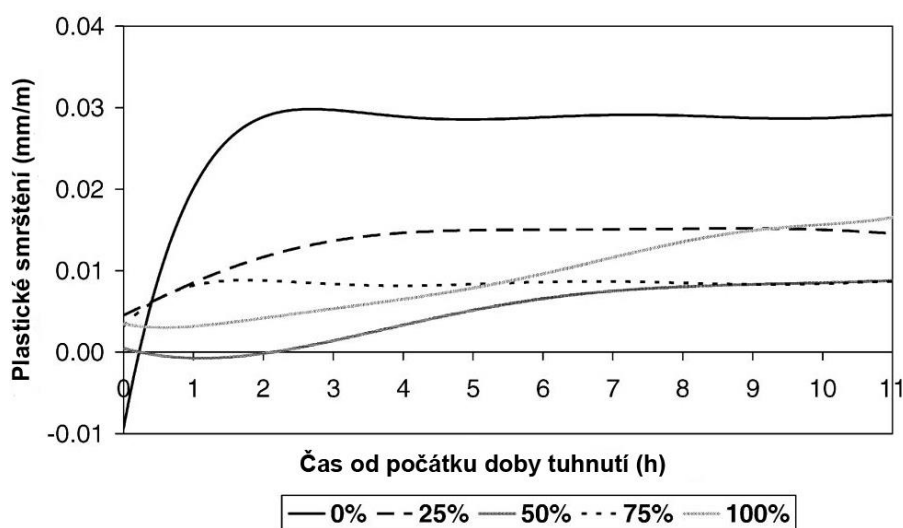
Fenomén plastického smršťování je zejména v posledních letech velmi diskutován. Moderní pohled vědců na tuto problematiku připisuje její hlavní příčinu nadměrným silám přitažlivosti v pórech, způsobeným ztrátou vody, jež má za následek zvýšení kapilárního tlaku.

Plastické smrštění betonu je tedy přímo ovlivněno množstvím vody, vyloučené skrze bleeding, změnou relativní vlhkosti vzduchu, jeho prouděním na povrchu materiálu a vnitřním kapilárním tlakem. Použití porézního materiálu, který může podporovat vnitřní zásobování vodou do betonu, činí systém méně citlivý na deformace, nebo praskání

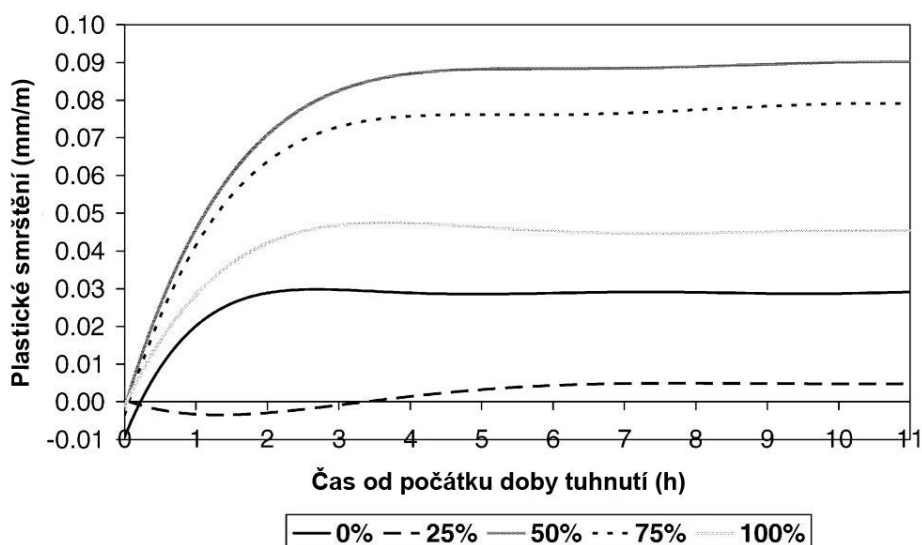
z důvodů plastického smršťování, což je velmi žádoucí. V brazilské studii se na nízkém plastickém smrštění nepodílel pouze tento jev, ale i vysoká ztráta vody bleedingem. [6] Zkouška stanovení plastického smršťování se stávala z pozorování lineárních deformací vzorků o velikosti 70 x 70 x 500 mm. Měření vzorků probíhalo za pomoci lineárního měřicího zařízení, jež bylo fixováno do kovové destičky upevněné na vzorku. Samotné měření zaznamenávalo posun této kovové destičky, jehož hodnoty byly odečítány na měřicím zařízení. Tělo měřicího zařízení bylo vyrobeno z plexiskla pro zabránění absorpce vlhkosti a úniku vody ze vzorků. Forma byla externě pokrytá kovovými deskami, z důvodů zamezení bočních deformací betonu v počáteční fázi. Zkouška byla zahájena neprodleně po nástupu tuhnutí betonu, kdy se odejmuly boční desky ze vzorku. Měřicí zařízení je znázorněno na Obr. č. 15. [6]



Obr. č. 15 Zařízení pro měření plastického smršťování



Obr. č. 16 Vývoj plastického smrštění u CRT3



Obr. č. 17 Vývoj plastického smrštění u CRT4

Jak lze pozorovat na Obr. č. 16 a Obr. č. 17, směsi CRT3, ač měly vyšší vodní součinitel, projeví se nižším plastickým smrštěním. Je to dáno již výše zmíněnou vysokou ztrátou vody bleedingem u těchto struskových směsí obsahujících více vody. Naopak CRT4 měly oproti referenční směsi výsledky plastického smrštění vyšší v důsledku vyššího obsahu cementu, zvyšovaného vzhledem k udržení mechanických vlastností se zvyšujícím se obsahem struskového kameniva. „Vypocená“ voda tedy způsobila u CRT3 nízké rozmezí výsledků plastického smrštění.

Ve vztahu k plastickému smrštění je tedy možné odvodit, že přítomnost uhelné strusky v podobě drobného kameniva má na tento jev významný vliv. Můžeme to přisuzovat ne pouze vyššímu množství obsahu vody v betonu způsobující bleeding, ale také efektu rezervy vody ve struskovém pórovitém kamenivu. To lze pozorovat zejména u směsí CRT4, kdy se zvyšujícím se množstvím strusky se jejím vlivem plastické smrštění přibližuje referenčnímu i přes vyšší obsah cementu. Lze tedy říci, že se zvyšující se dávkou strusky v betonu bez zvyšování dávky cementu se plastické smrštění snižuje. [6]

2.3.3 Vliv struskového kameniva na vlastnosti ztvrdlého betonu:

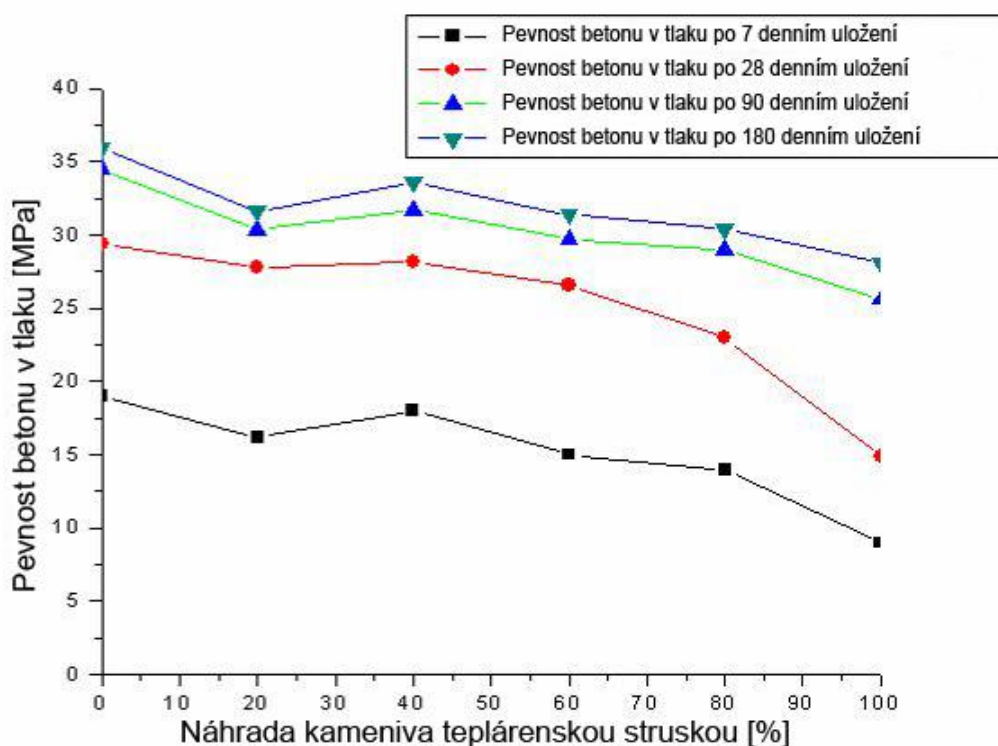
Pevnost v tlaku

Během výzkumu v Indii byla testována na navržené receptuře C16/20 náhrada klasického žulového kameniva 0, 20, 40, 60, 80 a 100 % teplárenskou struskou. Vzorky byly testovány v rozmezí 7, 28, 90 a 180 dnů. Betonovou směs zde tvořily drobné kamenivo, hrubé kamenivo (žula), cement, voda, lehké hrubé kamenivo (škvára) a mikrosilika. [4]

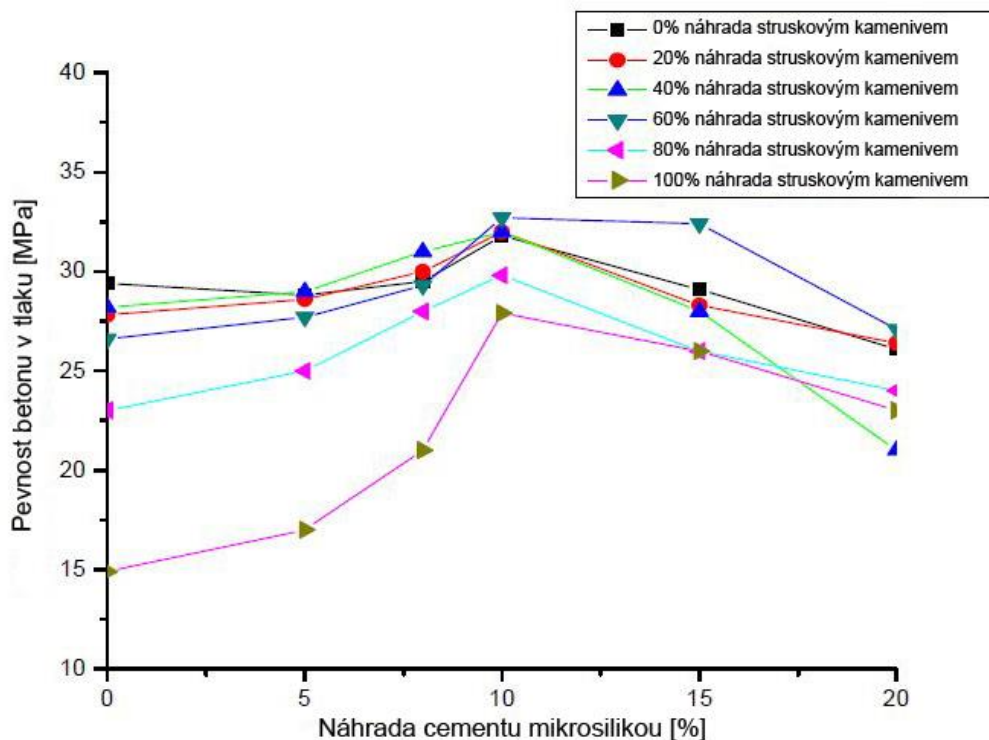
Obr. č. 18 prezentuje různou náhradu kameniva struskou v závislosti s pevností betonu v tlaku. Tento graf ukazuje situaci, kdy se zvyšujícím se množstvím strusky pevnost betonu v tlaku zaznamenává pokles hodnot, jež má takřka identický průběh u všech období uložení. Při použití příměsi mikrosiliky nahrazující cement je patrné, že do 60% náhrady konvenčního kameniva struskovým je průběh pevnosti betonu v tlaku téměř

totožný a poté vykazuje pokles. Nejlepších výsledků přitom dosahovaly betony s 10% náhradou cementu mikrosilikou, kde větší množství této příměsi mělo na beton již negativní vliv. Shrnutí těchto výsledků je znázorněno na Obr. č. 19. [4]

Z této studie vyplynulo, že při použití kvalitní příměsi, jako je mikrosilika, může náhrada hrubého přírodního kameniva struskovým stále dosahovat podobných výsledků na pevnostech jako bez něj a to konkrétně v maximálním poměru 60 % struskového kameniva a 40 % kameniva přírodního. Z výsledků je taky patrné, že kvalita struskového hrubého kameniva nedosahuje kvalit kameniva přírodního, což je způsobeno pórovitou strukturou tohoto typu kameniva. Pevnost betonu v tlaku se struskovým kamenivem je relativně nižší v porovnání s betonem konvenčním. Avšak beton s tímto typem kameniva dosahoval stále vyšších pevností, než např. keramické materiály, proto je možné jeho použití v místech, kde jsou nízké pevnosti betonu dostačující. Výsledky pevnosti v tahu za ohybu, nebo příčném tahu více méně korespondovaly s výsledky pevnosti v tlaku. [4] Jiná studie provedená v Koreji uvedla s přidavkem strusky nahrazující kamenivo podobné výsledky. [7]



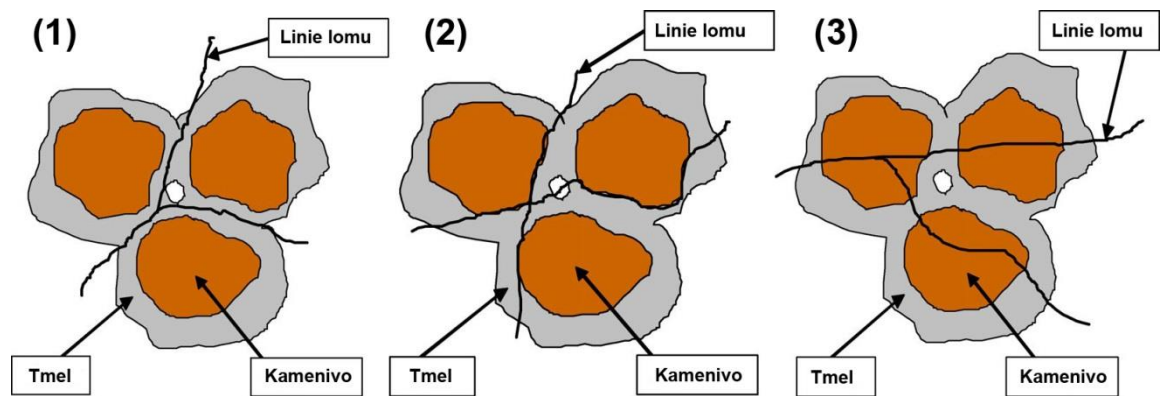
Obr. č. 18 Závislost pevnosti betonu v tlaku na náhradě přírodního kameniva škvárou



Obr. č. 19 Závislost pevnosti betonu v tlaku s náhradou cementu mikrosilikou a náhradou přírodního kameniva struskovým kamenivem

Clarke upřesnil tvorbu poruch v betonech obsahujících lehké kamenivo s výsledkem, že tvorba poruch je pozorována nejčastěji přímo v lehkém kamenivu. Grubal poznamenal, že typ lehkého kameniva, jeho fyzikální charakteristiky a pevnost částic tvoří limitní faktory při návrhu dosažitelné pevnosti betonu. Je třeba uvést, že pevnost betonu je rovněž ovlivněna i dalšími faktory, jako jsou obsah cementu, obsah minerálních příměsí, způsob dávkování, poměr vody a pojiva, nebo tvar zrn a jejich velikost. [4]

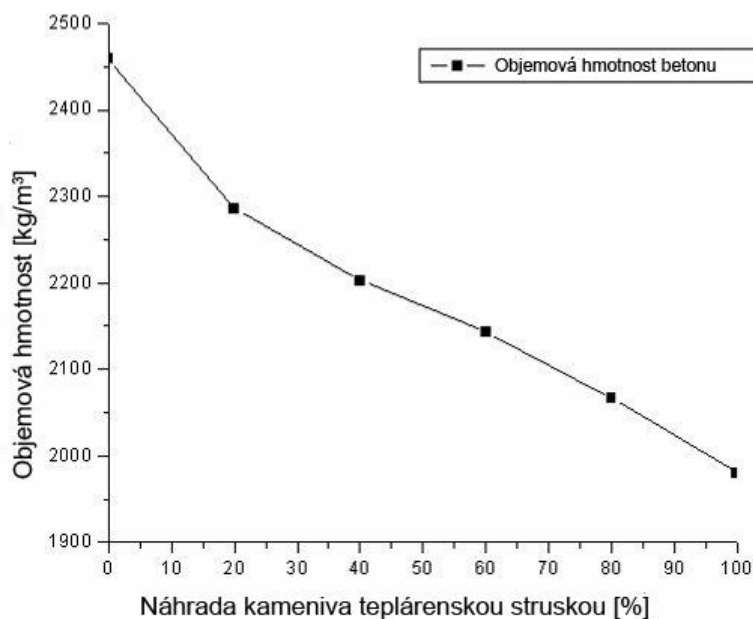
Jak je zobrazeno na Obr. č. 20, Shigemitsu definoval tři typy lomů při překročení pevnosti betonu: (1) lom procházející pouze přes cementový kámen; (2) lom na rozhraní mezi zrnem kameniva a cementovým kamenem; (3) lom jdoucí přes kamenivo, kdy dojde k porušení samotného zrna kameniva. Když struskové kamenivo nebylo do betonu přidáno, docházelo k lomu povětšinou na rozhraní cementového kamene s kamenivem, nebo samotným kamenivem. Pokud se zvyšovalo množství struskového kameniva nahrazující kamenivo konvenční, docházelo daleko více k lomu přes samotné kamenivo, než na rozhraní kamenivo/cement. Je to způsobeno menší pevností tohoto kameniva, jež tvoří slabší článek betonu a dojde u něj k porušení jako první. [7]



Obr. č. 20 Typy lomů při porušení pevnosti betonu

Objemová hmotnost

Výsledky objemové hmotnosti betonu s různými procentuálními náhradami konvenčního kameniva uhelnou struskou ze studie v Indii jsou uvedeny na Obr. č. 21. Z grafu je patrné, že s rostoucím množstvím strusky objemová hmotnost klesá.

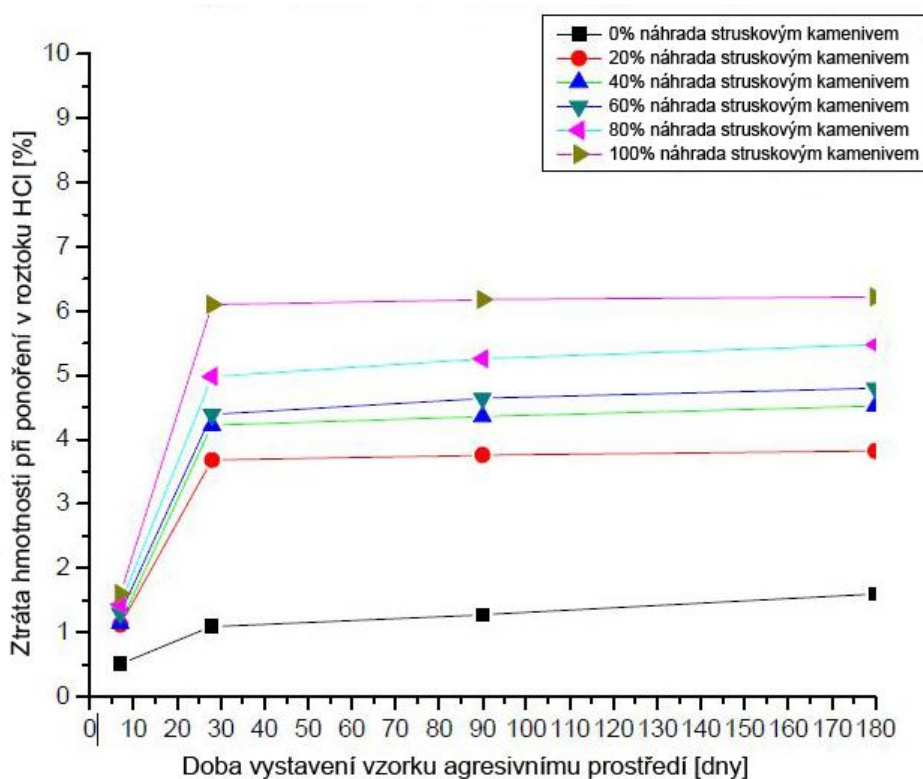


Obr. č. 21 Závislost objemové hmotnosti betonu na náhradě přírodního kameniva uhelnou struskou

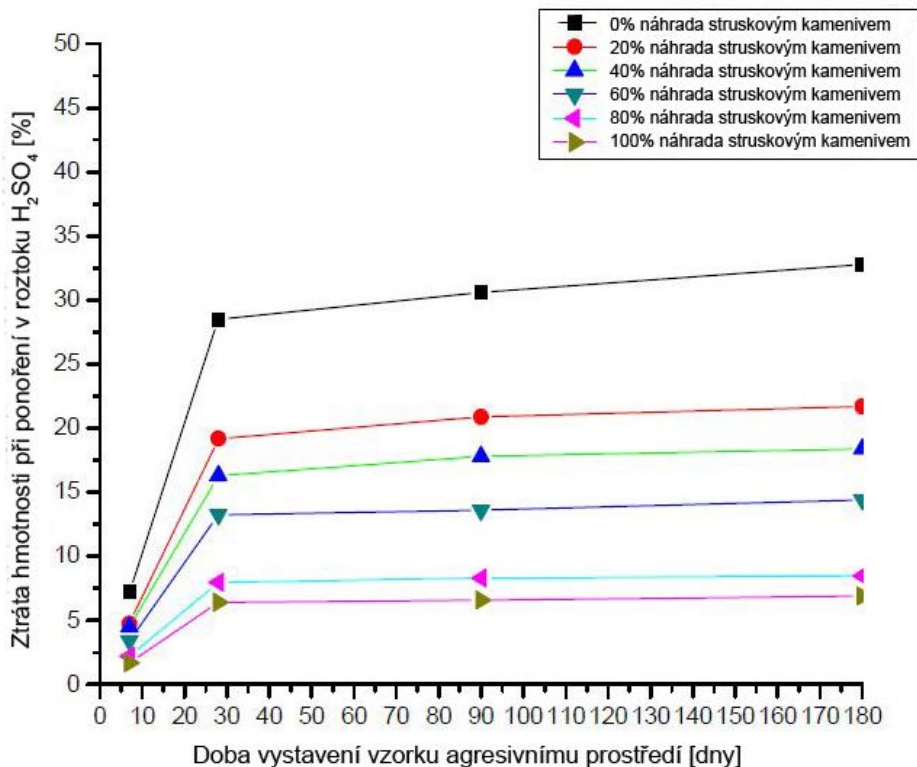
Odolnost vůči agresivnímu prostředí

Dalším důležitým faktorem, kromě pevnosti a objemové hmotnosti je odolnost betonu vůči agresivnímu prostředí jako např. chloridy, nebo sírany. Beton v tomto prostředí by neměl vykazovat přílišné zhoršení svých vlastností. Ve studii z Indie byly vzorky o velikosti 100 x 100 x 100 mm normově uloženy po dobu 28 dní do vody, kdy se po této době z vodního uložení vyjmuly a uložily se do prostředí agresivního. Agresivní prostředí tvořily roztoky

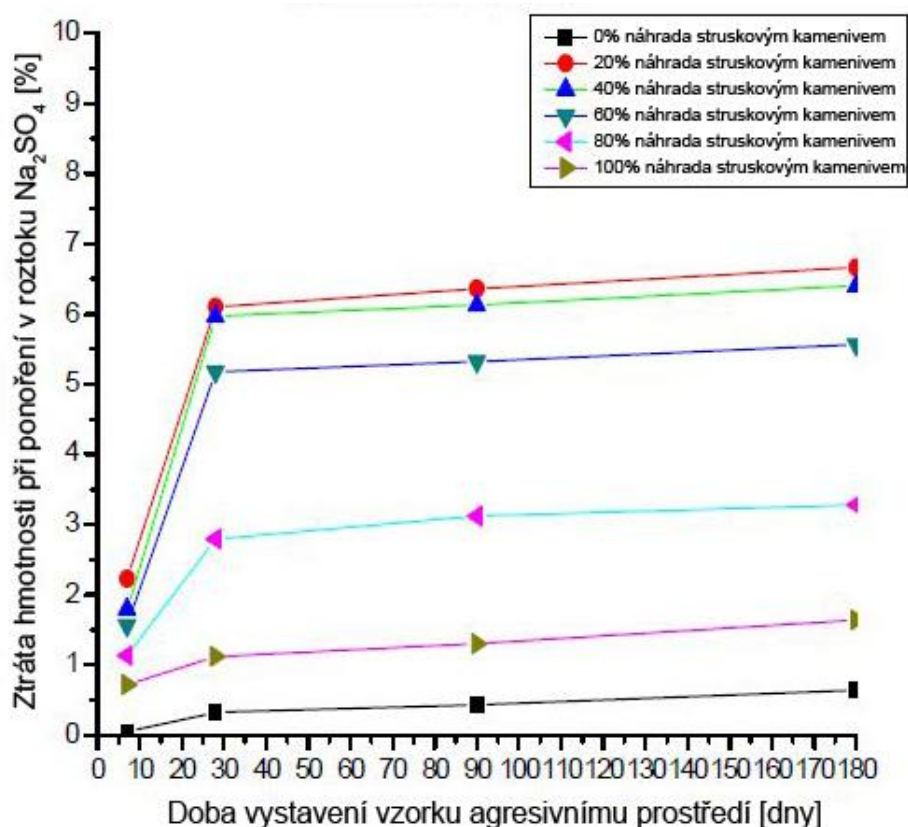
HCl, H₂SO₄ a Na₂SO₄ o koncentracích 5 %. Následně byly vzorky vždy vytaženy a zaznamenala se ztráta hmotnosti v období po 7, 28, 90 a 180 dnech. Výsledky jsou znázorněny na Obr. č. 22, Obr. č. 23 a Obr. č. 24. [4]



Obr. č. 22 Ztráta hmotnosti vzorků vystavených účinku 5% roztoku HCl



Obr. č. 23 Ztráta hmotnosti vzorků vystavených účinku 5% roztoku H_2SO_4



Obr. č. 24 Ztráta hmotnosti vzorků vystavených účinku 5% roztoku Na_2SO_4

U vzorků vystavených agresivnímu prostředí HCl je relativně malý rozdíl ve ztrátě hmotnosti mezi vzorky s konvenčním kamenivem a vzorky s kamenivem struskovým. Ztráta hmotnosti je zde výrazná především mezi 7 a 28 dnem. Po 28 dni vystavení HCl již není ztráta hmotnosti na vzorcích nikterak výrazná. Nejnižší odolnost byla pozorována u směsi se 100 % struskového kameniva a nejvyšší s čistě přírodním kamenivem. Výsledky vystavení vzorků agresivnímu působení 5% roztoku H_2SO_4 ukazují, že navržený beton vykazuje velmi nízkou odolnost vůči tomuto prostředí, přestože zde působil opačný efekt, než z roztoku HCl, tedy se zvyšujícím se množství strusky se odolnost zvyšovala. Je zde taky patrné, že markantní ztráty hmotnosti probíhají do 28 dne vystavení. Vystavené vzorky roztoku Na_2SO_4 zaznamenaly podobný výstup, jako u HCl, tedy že všechny vzorky se struskou vykazovaly horší výsledky, než referenční vzorky bez strusky. Je zde patrný rozdíl oproti uložení v roztoku HCl, že klesání odolnosti mělo s rostoucí náhradou kameniva opačný průběh. Tedy nejvíce odolná byla směs se 100% náhradou a nejméně odolná směs s 20% náhradou [4]

Z výsledků odolnosti vůči kyselinám a solím prováděných v této studii je patrné, že struskové kamenivo reaguje na různé agresivní prostředí odlišně. Proto při návrhu betonu s obsahem takového kameniva je zapotřebí klást důraz na vědomost prostředí, do kterého bude daná směs uložena. [4]

2.3.4 Příklady použití betonu se struskovým kamenivem

Ztracené bednění

Asi největší využití má struskové kamenivo pro směsi k výrobě dílců ztraceného bednění. Tyto dílce mají především výhodu při požadavcích na jejich hmotnost, kdy díky použité odpadní strusce vyniká samotný materiál nižší objemovou hmotností. Tedy stejný typ dílce ze struskového betonu v porovnání s dílcem z klasického betonu je lehčí a tudíž vyniká pohodlnější manipulovatelností. [21]



Obr. č. 25 Stěna z dílců obsahujících strusku

2.4 Drcený (recyklovaný) beton jako kamenivo do betonu

2.4.1 Obecně

Použití recyklovaného betonu jako kameniva je pro nové betony v zásadě důležité, protože chrání přírodní zdroje a eliminuje potřebu skládek.

Kvalita takového betonu závisí ovšem na kvalitě použitého materiálu k recyklaci. Nejdůležitější je původ tohoto materiálu, zda jde o betonovou konstrukci, nebo prvek, či demolici celé budovy, kde jsou v materiálu často cihly a další odpad. Podrcený materiál nesmí obsahovat dřevo, papír, plasty a asfalt. Potom může být použit např. pro podkladní vrstvy vozovek.

Tab. č. 3 ukazuje typy recyklovaného materiálu (demolice betonu, či budov) a procento recyklovaného kameniva jako funkci krychelné charakteristické pevnosti ($f_{cu/ck}$). Pro beton s nízkou pevností ($f_{cu/ck} < 15$ MPa) může být použito až 100% odpadů z demolic. Pro kvalitnější beton ($f_{cu/ck} < 25$ MPa), či ($f_{cu/ck} < 35$ MPa) je možné nahradit až 60, resp. 30 % kameniva recyklovaným betonem. Ve výrobě dílců by mělo být použito do 5 % recyklovaného betonu původem z recyklace dílců, pro nový beton s krychelnou charakteristickou pevností do 55 MPa. [3]

Tab. č. 3 Doporučené použití recyklátu v závislosti na charakteristické pevnosti ($f_{cu/ck}$)

Původ recyklátu	$f_{cu/ck}$	Procento recyklovaného kameniva
stavební demolice	< 15 Mpa	až do 100 %
demolice betonu	≤ 25 Mpa	až do 60 %
	≤ 35 Mpa	do 30 %
drcené prefabrikáty	≤ 55 Mpa	do 5 %

Tab. č. 4 ukazuje porovnání různých evropských zemí a jejich přístup a využití materiálu z demolic pro opětovnou recyklaci, nebo naopak nevyužití materiálu, který nadále putuje na skládky. [3]

Tab. č. 4 Recyklace konstrukcí a demolic v evropských zemích

Země	Recyklace z konstrukcí a demolic [10^6 tun]	Recyklovaný materiál [%]	Materiál na skládky [%]
Německo	59	17	83
Velká Británie	30	45	55
Francie	24	15	85
Itálie	20	9	91
Španělsko	13	< 5	> 95
Holandsko	11	90	10
Belgie	7	87	13
Rakousko	5	41	59
Portugalsko	3	< 5	> 95
Dánsko	3	81	19
Řecko	2	< 5	> 95
Švédsko	2	21	79
Finsko	1	45	55
Irsko	1	< 5	> 95
Celkem v Evropě	181	28	72

Recyklační proces se skládá ze čtyř stupňů:

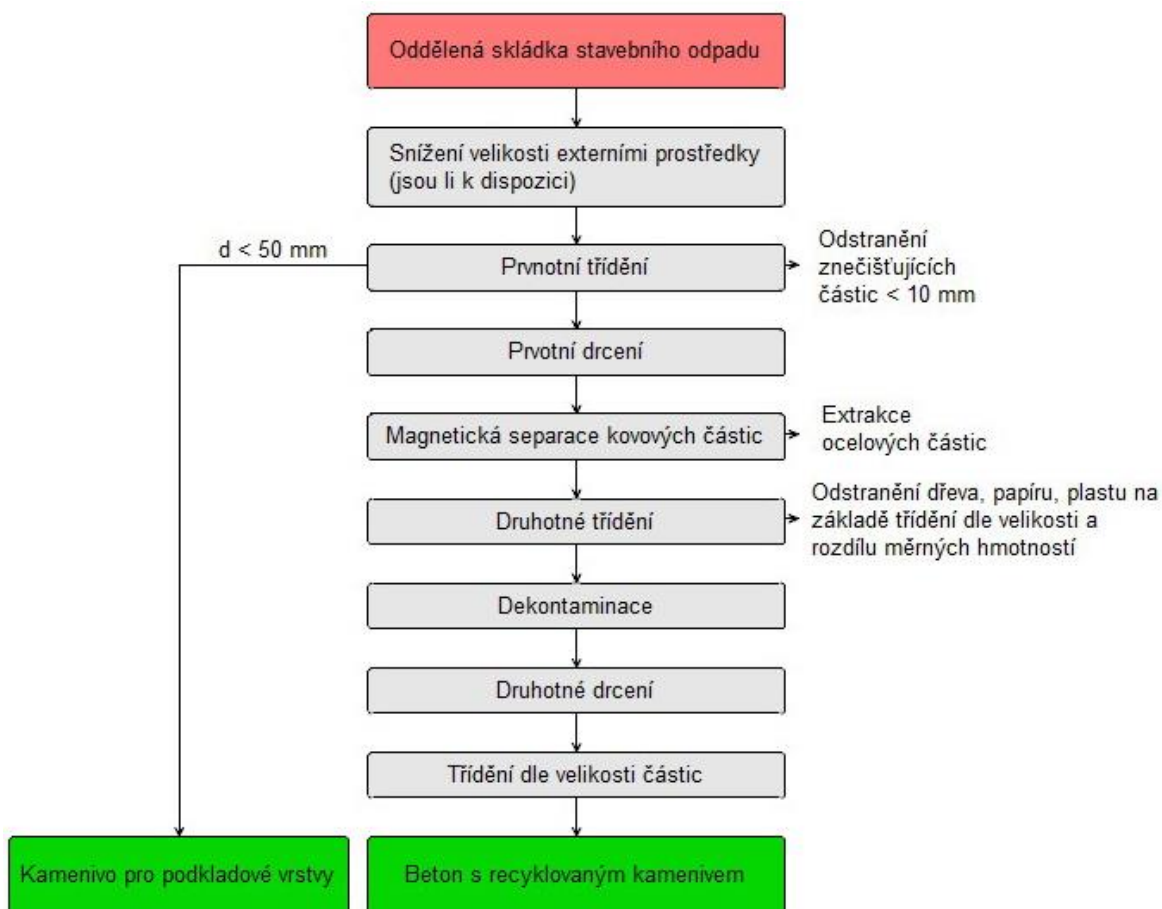
- výběr odpadu
- podrcení betonových bloků
- odstranění kontaminujících částí
- smíchání s přírodním kamenivem

Z betonu je zapotřebí odstranit výztuž a jiné cizorodé částice, zvláště pak asfalt, různé shluky zeminy, či jílu, chloridy, sklo, sádrokarton, papír, plastické hmoty, dřevo i krytinu, které mohou být škodlivé.

Materiál, který je takto určen pro následující výrobu betonu je zapotřebí ještě před smícháním s přírodním kamenivem opětovně předrtit a přetřídit. Drtičky pro recyklovaný beton nejsou příliš odlišné od drtiček pro přírodní kamenivo. Recyklační linka a její umístění poté nabízí dvě možnosti:

- recyklační zařízení, jež je mobilní a umísťuje se v místě demolice, kde bude recyklovaný beton opětovně použit pro výrobu nového betonu

- centrální recyklační linka, jež není tak blízko místa použití recyklovaného kameniva jako předchozí, ale díky automatizaci dosahuje vyšší produktivity (až 100 tun/hod), která kompenzuje tuto dopravní vzdálenost.



Obr. č. 26 Kroky recyklačního procesu

Vlastnosti betonu z hlediska drcení jsou podobné vlastnostem použitého kameniva a nejsou tolik ovlivněny vlastnostmi původního betonu. Zkoušky, jež se dají na recyklované kamenivo použít, mohou být totožné se zkouškami hodnocení běžného přírodního kameniva. Dávkování, míchání, doprava, ukládání betonové směsi z recyklovaného kameniva může být také prováděno podobným způsobem, jako u běžného betonu z kameniva přírodního. U drobného recyklovaného kameniva je vhodné použít pouze 10 až 20 % náhrady za přírodní kamenivo. Nejlépe předem vyzkoušet několik variant dávek recyklovaného kameniva a poté určit optimální dávku náhrady. [3]

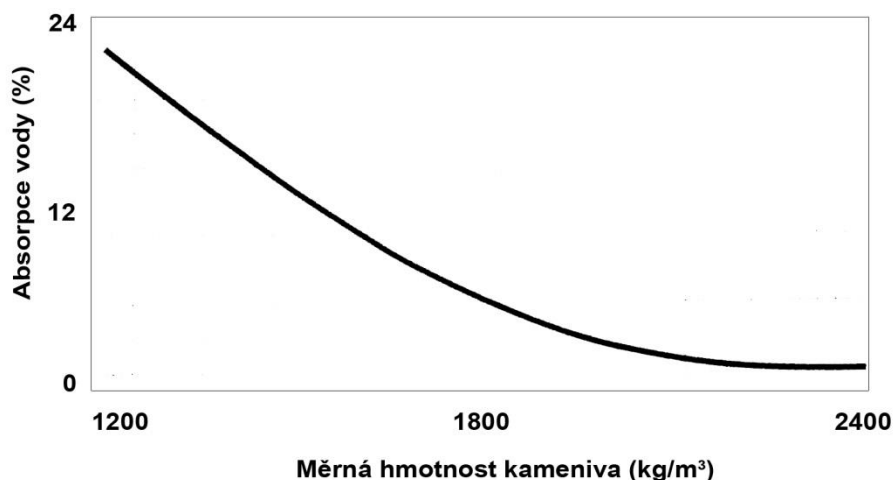
Objemová hmotnost recyklovaného kameniva bývá nižší, než kameniva přírodního. Hrubé recyklované kamenivo má objemovou hmotnost okolo 2400 kg/m^3 , kdežto přírodní kamenivo okolo 2650 kg/m^3 . U drobného recyklovaného kameniva je to ještě méně, než u hrubého, jak je znázorněno v Tab. č. 5. Je to důsledkem většího obsahu cementového tmele, jež má objemovou hmotnost nižší, než přírodní kamenivo a na povrchu drobného recyklovaného kameniva jej ulpívá více, naproti kamenivu hrubému. [3]

Tab. č. 5 Porovnání objemové hmotnosti přírodního a recyklovaného kameniva

Typ kameniva	Objemová hmotnost [kg/m ³]
recyklované hrubé	2300-2500
recyklované jemné	2150-2350
přírodní	2600-2700

Recyklované kamenivo má mnohem vyšší nasákavost (4 – 9 %, frakce 4 – 32 mm), naproti kamenivu přírodnímu (0,5 – 2,5 %). U drobného recyklovaného kameniva je nasákavost dokonce okolo 12 %.

U tohoto typu kameniva nasákavost klesá se zvyšující se objemovou hmotností, viz Obr. č. 27. Je to způsobeno pórovitostí cementové pasty. Z důvodu vysoké nasákavosti je doba potřebná k nasáknutí recyklovaného kameniva delší, než je tomu u přírodního kameniva. Tato vlastnost může způsobovat určité problémy při míchání betonu s recyklovaným kamenivem, které není zcela nasáklé. Dodržení vodního součinitele může v tomto případě činit tedy potíže.



Obr. č. 27 Závislost absorpce vody na měrné hmotnosti kameniva

Recyklované kamenivo musí být dokonale nasáklé a poté ponecháno 2 – 3 hodiny na suchu. Tím je dosaženo stavu nasáklého povrchově suchého kameniva. [3]

Odstranění kontaminujících látek je jeden z nejdůležitějších problémů, jež musí být vyřešen. Existuje spousta takových látek, které kontaminují recyklované kamenivo a je potřeba je odstranit, aby se kamenivo mohlo dále použít.

Sádrovec (síran vápenatý) může být v kamenivu přítomen jako složka omítkových malt při demolici starých budov. Pro přírodní kamenivo je povolen maximální obsah síranů vyjádřených jako SO₃, 0,2 %. Je to kvůli možné reakci síranů s CAH nebo CSH ze ztvrdlé cementové pasty, což vede k tvorbě ettringitu, či thaumasitu. Tyto minerály způsobují porušení betonu v důsledku zvětšení svého objemu.

Pokud byla demolovaná konstrukce v kontaktu s rozmrazovacími solemi, či mořskou vodou, je velmi pravděpodobné, že v recyklovaném kamenivu jsou přítomny chloridy.

Zbavení se těchto látek v kamenivu je možné praním v horké vodě, jelikož jsou chloridy dobře rozpustné.

Další různé látky, které kontaminují recyklované kamenivo, jsou např. papír, dřevo, bitumeny, sklo, hliník atp. Porušení nového betonu je v případě kontaminace těmito látkami omezeno na snížení pevnosti. Takto znečištěný recyklát nesmí být proto použit pro výrobu kvalitnějších betonů, ale pouze pro betony nízké pevnosti ($f_{cu/ck} < 15$ MPa), nebo do podkladů.

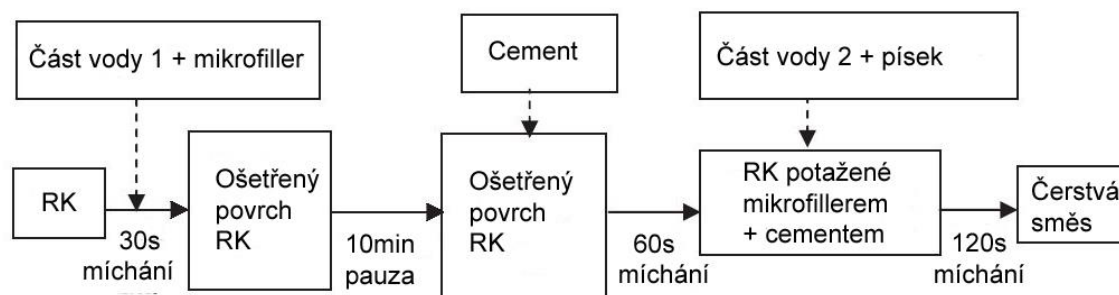
U recyklovaného kameniva z demolic konstrukcí, obsahující žáruvzdorné cihly, může také nastat jeden z větších problémů. Tyto žáruvzdorné cihly totiž obvykle obsahují MgO. Pokud se takové kamenivo smíchá s vodou, může nastat expanze, při které vzniká $Mg(OH)_2$, jež svým rozpínáním porušuje beton. [3]

2.4.2 Vliv kameniva z betonového recyklátu na čerstvý beton

Zpracovatelnost

U recyklovaného kameniva je díky přítomnosti cementové pasty, jež ulpívá na povrchu recyklovaných zrn značná drsnější textura, oproti kamenivu přírodnímu. Díky této drsnější textuře způsobující větší povrch pro smáčení kameniva je zapotřebí zvýšit dávku záměsové vody asi o 5 %. Při použití i drobného drceného kameniva dokonce až na 15 %. Tento aspekt se musí vždy dořešit použitím vhodné plastifikační přísady, redukující množství záměsové vody. [3] Pokud je recyklované kamenivo příliš pórovité, je zapotřebí učinit kroky k eliminaci tohoto nežádoucího aspektu na zpracovatelnost. Kamenivo by se do směsi mělo přidávat již nasáklé vodou, nebo by se povrch kameniva měl ošetřit způsobem jiným, aby se zamezilo snížení zpracovatelnosti a kolísání vodního součinitele. [22]

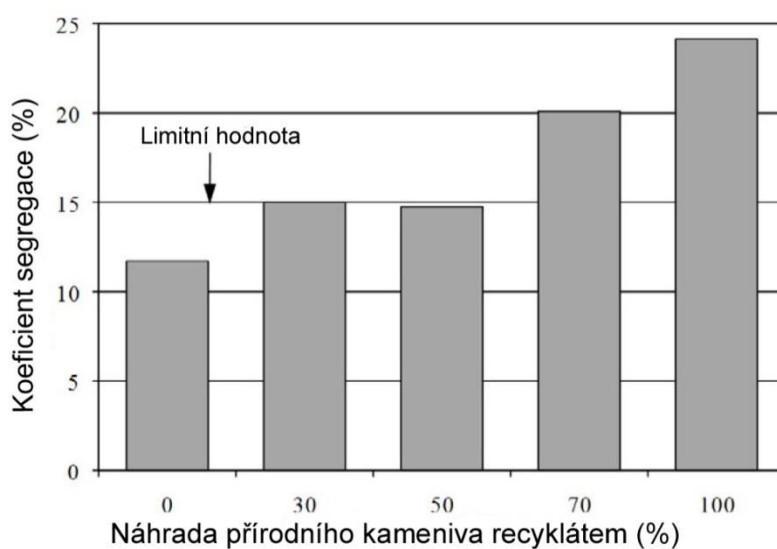
Pro zachování zpracovatelnosti, lze recyklované kamenivo (RK) ošetřit také pomocí využití mikrofilleru, jako je například popílek. V první fázi se vysušené kamenivo zváží a ponoří na 24 hodin do roztoku mikrofilleru (1 díl prášku, 10 dílů vody, 1 % plastifikátoru). Poté se kamenivo odebere a na 24 hodin nechá vysušit v sušárně. Hmotnost, jež na kamenivu vzrostla, značí množství mikrofilleru, které bude zapotřebí použít do fáze druhé. Fáze druhá spočívá ve způsobu samotného míchání směsi, které je znázorněno na Obr. č. 28. Takový způsob ošetření kameniva byl použit na studii v Británii a bylo zde dosaženo mírně lepší konzistence, než u kameniva přírodního. [22]



Obr. č. 28 Míchání recyklovaného kameniva při ošetření mikrofillerem

Segregace

Při použití betonového recyklátu do SCC betonů je zapotřebí vzít v potaz náchylnost tohoto kameniva k segregaci. V Kanadě provedli testy hodnocení segregace s náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem. Test segregace probíhal dle ASTM C 1610/C 1610M a přírodní hrubé kamenivo zde bylo nahrazeno betonovým recyklátem z 0, 30, 50, 70 a 100 %. Hodnoty koeficientu segregace stoupaly se zvyšující se náhradou přírodního kameniva recyklátem. Směsi s hodnotou náhrady do 50 % vykazovaly odolnost vůči segregaci dostačující. Doporučená maximální hodnota koeficientu segregace je 15 %, směsi o náhradě 70 a 100 % tuto hodnotu ovšem přesáhly, tudíž vůči segregaci kameniva odolné nebyly. Závislost náhrady kameniva na koeficientu segregace z této studie je znázorněna na Obr. č. 29. [23]



Obr. č. 29 Závislost obsahu kameniva z betonového recyklátu na segregaci

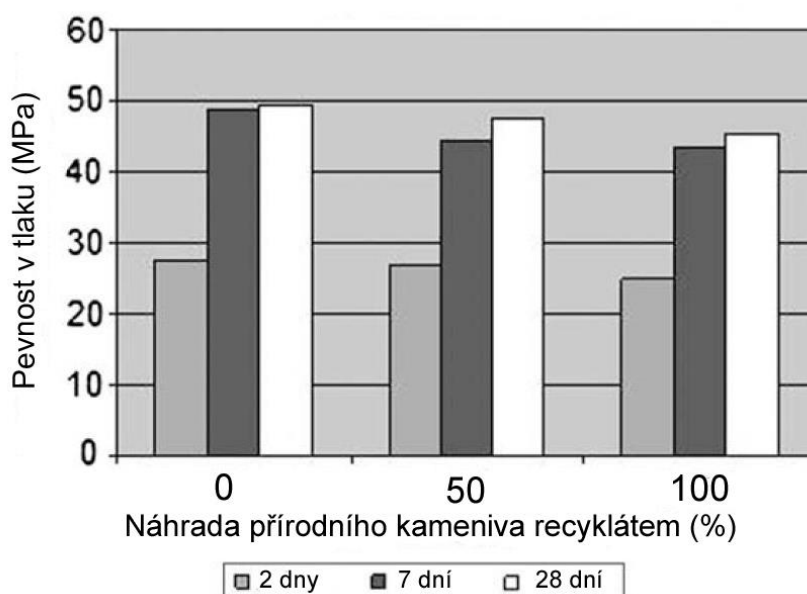
2.4.3 Vliv kameniva z betonového recyklátu na ztvrdlý beton

Pevnost v tlaku

Především díky vyšší pórovitosti a tedy nižší objemové hmotnosti, dochází při použití recyklovaného kameniva ke snížení pevnosti betonu ve srovnání s betonem z kameniva přírodního. [3]

Možným řešením tohoto problému je ošetření povrchu kameniva namočením do roztoku mikrosiliky. Katz tímto způsobem dokázal zlepšit stav mikrostruktury v tranzitní zóně a tím tedy zvýšit pevnost betonu v tlaku (po 28 dnech o 15 %). Toto řešení je ale díky vysokým nákladům pro praxi stále nepoužitelné. [22]

Na studii v Srbsku byly testovány SCC betony s obsahem recyklátu také na pevnost v tlaku. Zkoušky pevnosti byly provedeny po 2, 7 a 28 dnech, u betonů s náhradou přírodního kameniva 0, 50 a 100 % recyklátem. U všech časových rozmezí byl průběh pevností identický, tedy s rostoucí náhradou pevnost betonu v tlaku klesala. Pokles pevnosti po 28 dnech byl u 50% náhrady o necelé 4 % a u 100% náhrady o necelých 9 %. U pevností v tahu za ohybu byl rozdíl hodnot ještě vyšší. Výsledky z této studie jsou uvedeny na Obr. č. 30. [24]



Obr. č. 30 Závislost pevnosti v tlaku na náhradě přírodního kameniva recyklátem

Objemová hmotnost

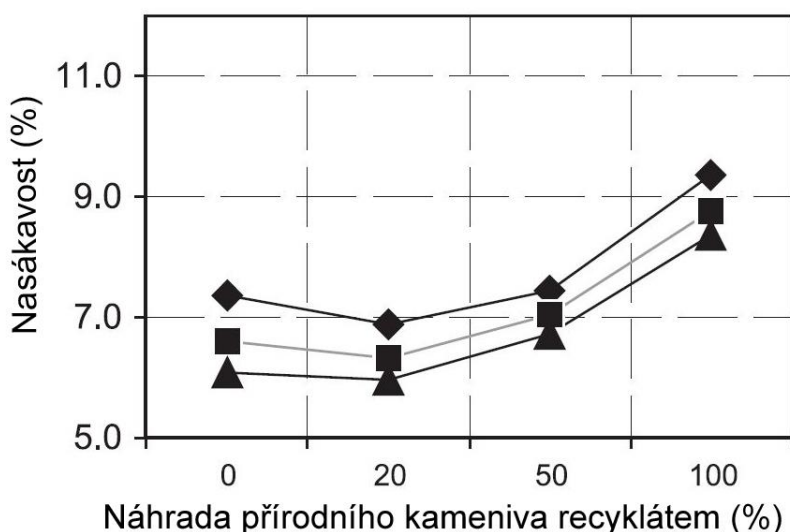
Jak již bylo uvedeno výše, kamenivo z recyklovaného betonu je obecně lehčí, než kamenivo přírodní. Z toho tedy vyplývá, že podobně jako u struskového kameniva i zde objemová hmotnost betonu se zvyšující se náhradou přírodního kameniva klesá. [3]

Modul pružnosti

Modul pružnosti je vlivem nižší tuhosti recyklátu oproti přírodnímu kamenivu nižší. Ze stejného důvodu je také vyšší smrštění vysycháním a podstatně vyšší dotvarování betonu, které činí při použití hrubého recyklovaného kameniva rozdíl o 25 až 50 % oproti kamenivu přírodnímu. [3] V Portugalsku testovali vliv náhrady přírodního kameniva recyklátem a pokles u 100% náhrady činil 8 %. Je to i způsobeno nižší objemovou hmotností směsi, jež má na pokles modulu pružnosti vliv také. [25]

Odolnost vůči agresivnímu prostředí

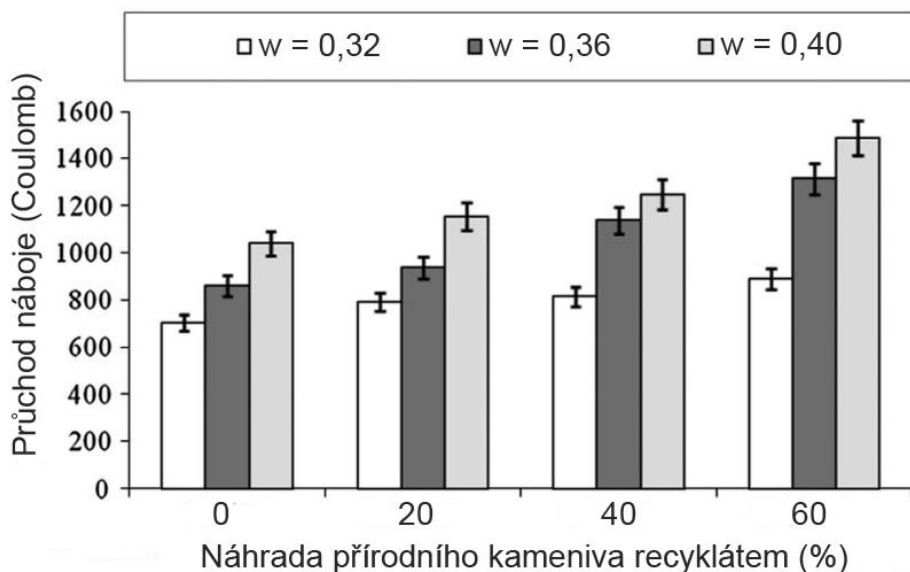
Permeabilita betonu je jedním z faktorů trvanlivosti. Betony s recyklovaným kamenivem mají při stejném vodním součiniteli obecně permeabilitu vyšší, než betony konvenční. Vyšší permeabilita, tedy propustnost betonu, znamená otevřenou cestu agresivním činitelům z okolního prostředí. [3] U brazilské studie s recyklovaným kamenivem výsledky ukazovaly, že 20% náhrada přírodního kameniva má přibližně stejné, nebo lepší hodnoty pro zkoušky trvanlivosti. Vyšší náhrada prezentovala již výsledky horší. Je to dáno zejména propustností betonu pro agresivní činitele díky pórovité struktuře kameniva, která se se stoupající náhradou kameniva zvyšuje, jak je vidět na Obr. č. 31, z testů nasákavosti. Pozitivní vliv byl shledán pouze u zkoušky proti karbonataci betonu. Recyklované kamenivo díky vlastnímu obsahu cementu tvoří v betonu vyšší alkalickou rezervu, což má kladný efekt na zvýšení doby odolnosti železobetonových konstrukcí, jelikož mohou déle pasivovat výztuž, která by jinak korodovala dříve. [26]



Obr. č. 31 Nasákavost betonu s recyklovaným kamenivem

V Turecku byly provedeny zkoušky odolnosti vůči chloridové propustnosti betonu s recyklátem. Byl zde sledován jak vliv množství náhrady přírodního kameniva recyklátem, tak vliv zvyšujícího se vodního součinitele. Jak se dalo očekávat, propustnost

chloridových iontů se zvyšovala se stoupajícím vodním součinitelem a stejný efekt byl indikován při zvyšující se náhradě recyklátem, viz Obr. č. 32. [27]

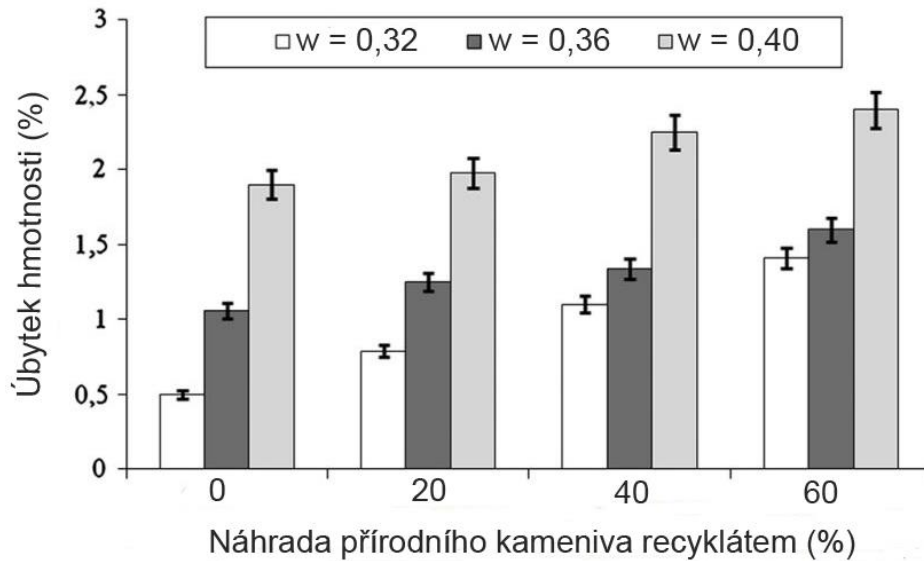


Obr. č. 32 Vliv recyklovaného kameniva a vodního součinitele na chloridovou propustnost betonu

Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost je zejména vlivem množství drobné recyklované frakce snížena. Díky tomuto negativnímu vjemu není vhodné u mrazuvzdorných betonů používat drobnou frakci recyklovaného kameniva. [3]

Na turecké studii testovali odolnost vzorků na zmrazovací a rozmrazovací cykly. Vyšší úbytek hmotnosti byl sledován u směsí s vyšším množstvím recyklátu, nebo se zvyšujícím se vodním součinitelem. Z Obr. č. 33 na úbytku hmotnosti je patrné, že vodní součinitel je v tomto ohledu více významný, než samotné kamenivo. Při vyšším vodním součiniteli, zůstávají v cementové pastě po vypařené vodě makro-póry, jež při zkoušce mrazuvzdornosti do sebe nasají vodu, která po zmrznutí zvětší svůj objem a dojde k porušení betonu. [27]



Obr. č. 33 Úbytek hmotnosti betonu s recyklátem

Všechny tyto negativní vlastnosti recyklovaného betonu jsou způsobeny zatvrdlou cementovou pastou, jež je v tomto kamenivu obsažena. Ta je pórovitější a tedy propustnější, než kamenivo přírodní. Tyto negativa zvyrazňuje zejména použití drobné frakce recyklátu pod 4 mm. Pokud je ovšem drobná frakce recyklátu pomleta pod 0,1 mm, může být naopak výhodné její použití při výrobě samozhutnitelných betonů jako filler, který zlepšuje kohezi. [3]

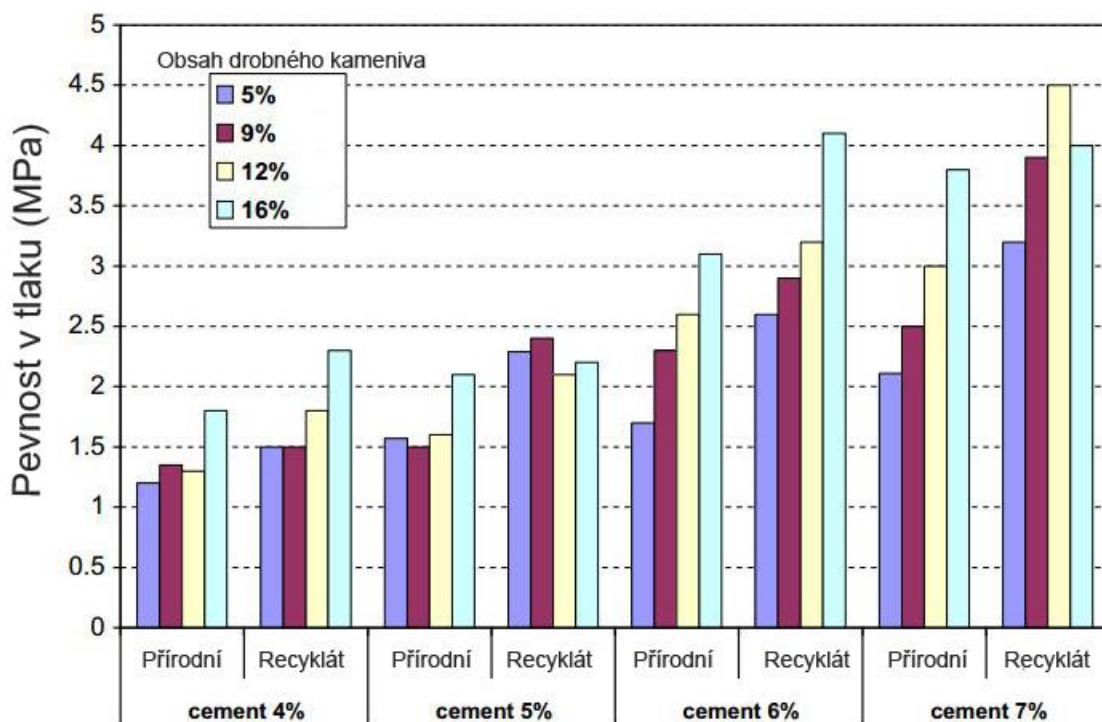
2.4.4 Příklady použití betonu s kamenivem z betonového recyklátu

Podkladní vrstvy vozovek

Velký potenciál má využití recyklátu do podkladních vrstev vozovek. Pokud recyklát splňuje minimální požadavky stanovené pro tyto aplikace, není důvod proč z části, nebo úplně nenahradit dražší přírodní kamenivo. Kamenivo stmelené cementem obsahuje nižší dávku cementu, který funguje jako pojivo pro kamenivo definované zrnitosti, jež je doplněno odpovídajícím množstvím vody, které má funkci zajištění co největší kompaktnosti směsi a hydrataci cementu. V dnešní době, kdy je potřeba zachovat přírodní zdroje a snižovat množství skládek, je v této oblasti recyklované kamenivo z betonu vhodným adeptem pro náhradu kameniva přírodního. [28]

V Egyptě proběhla studie na náhradu přírodního kameniva recyklátem z betonu do podkladních vrstev vozovek. Recyklát nahrazoval přírodní kamenivo z 0, 25, 50, 75 a 100 %. Bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti kameniva stmeleného cementem jsou ovlivněny mnoha proměnnými, jako například dávkou cementu, délkou doby ošetřování a množstvím drobného kameniva ve směsi. Se zvyšující se náhradou přírodního kameniva maximální objemová hmotnost a hodnoty kalifornského poměru únosnosti směsi zaznamenávaly pokles a optimální vlhkost vzestup. U kameniv pouze z cementu, nebo z přírodního vápence byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Se zvyšujícím se

obsahem cementu pevnost směsí rostla, kdy u vyšších dávek cementu byl patrnější rozdíl pevností obou druhů kameniv. Kameniva z recyklovaného betonu dosahovaly v této studii vyšších pevností, zejména při obsahu drobné frakce 16 %, oproti nižším hodnotám, jak je znázorněno na Obr. č. 34. Pevnost v tahu ohybem měla opačný průběh, kdy vyšších hodnot dosahovalo kamenivo přírodní a hodnoty recyklátu byly přibližně o 25 % nižší. Celkově bylo z výsledků patrné, že vhodný recyklát při správném návrhu směsi lze použít pro podkladní vrstvy vozovek. [28]



Obr. č. 34 Pevnost v tlaku KSC u experimentu v Indii

Konstrukční beton

Betonový recyklát lze také využít jako plnou náhradu přírodního kameniva při dosažení dostatečných charakteristik. Využití je pak u vytipovaných aplikací, především u zemních konstrukcí. [29]

Cementový potěr

Při recyklaci betonu vzniká téměř jedna třetina méně vhodného drobného recyklovaného kameniva frakce 0 – 8 mm. Drobná frakce recyklovaného kameniva běžně obsahuje okolo 20 % jemných podílů pod 0,25 mm, které jsou důležité pro samozhutnitelné potěry. Zvyšují totiž tvorbu cementového tmele a usnadňují tekutost samozhutnitelných cementových potěrů. Optimální množství náhrady drobného kameniva recyklátem je hodnoceno 20 %. Při tomto množství potěr dosahuje dobrých vlastností jak v čerstvém,

tak ztvrdlém stavu. Náhrada kameniva recyklátem sníží cenu samozhutnitelných cementových potěrů a využije odmítanou drobnou frakci recyklátu, která by jinak skončila na skládce stavebního odpadu. [30]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíl praktické části

Cílem praktické části této práce byl návrh lehkých směsí s využitím drceného polystyrenu jako plniva, pro objemové hmotnosti betonů v rozmezí 400 až 1800 kg/m³. Na těchto betonech ověření fyzikálně mechanických vlastností zatvrdlých směsí, včetně tepelně izolačních a odolnosti vůči zvýšeným teplotním podmínkám.

Následovalo ověření chemického složení a granulometrie teplárenské strusky a vytřídění frakce hrubého kameniva do 16 mm, kde spolu s podobně vytříděným betonovým recyklátem nahrazovaly samostatně tyto hrubé frakce běžné konvenční kamenivo užívané v betonových směsích. Na vyrobených vzorcích posouzení vlivu náhrady hrubých frakcí kameniva na konzistenci, pevnosti, mrazuvzdornost a vodotěsnost zatvrdlých betonů.

Na teplárenské strusce také posouzení jejího využití jako jemnozrnnou příměs do betonu, kde byla struska pro tento účel dopravena mletím.

Dále také použití betonového recyklátu pro KSC I s ověřením objemové hmotnosti a pevností.

3.2 Metodika práce

1. Etapa

- Stanovení vlastností vstupních surovin: objemová hmotnost, síťový rozbor, měrný povrch dle Blaina.

2. Etapa

- a) Návrh složení tří směsí betonu s plnivem z polystyrenové drtě o cílených objemových hmotnostech směsí 400, 1000 a 1500 kg/m³. U objemových hmotností 1000 a 1500 kg/m³ bylo použito jako plnivo kromě polystyrenové drtě také drobné těžené kamenivo frakce 0 – 4 mm. Cement byl použit CEM I 42,5 R a pro eliminaci vysokého úhlu smáčení vodou polystyrenových zrn se použila přísada Mapeair LP100.

Pro každou recepturu bylo vyrobeno 12 krychlí o rozměrech 100 x 100 x 100 mm a 2 desky o rozměrech 300 x 300 x 50 mm.

- b) Návrh složení maltové směsi s náhradou cementu mletou teplárenskou struskou 0 %, 10 %, 20 % a 30 % s použitím těžného drobného kameniva frakce 0 – 4 mm.

Z každé směsi bylo vyrobeno 12 trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

- c) Návrh složení betonových směsí tříd C12/15, C16/20 a C20/25 s náhradou hrubého drceného kameniva frakce 8 – 16 mm vytříděným struskovým kamenivem frakce 4 – 16 mm 0 %, 20 %, 40 % a 60 % a vytříděným betonovým recyklátem frakce 8 – 16 mm 0 %, 20 %, 40 % a 60 %. Použito bylo také drobné těžené kamenivo frakce 0 – 4 mm. Poměr mísení drobného a hrubého kameniva byl pro třídu C12/15 52 % : 48 %, pro třídu C16/20 49 % : 51 % a pro třídu C20/25 44 % : 56 %. Cement byl použit CEM I 42,5 R a superplastifikátor na bázi modifikovaných polykarboxylátů.

Receptury byly navrženy na konzistenci S3. Pro každou směs bylo vyrobeno 8 krychlí o rozměrech 150 x 150 x 150 mm a 4 trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm.

- d) Návrh složení směsi pro KSC I. Použit byl betonový recyklát frakce 0 – 32 mm, drobné těžené kamenivo frakce 0 – 4 mm a pro doplnění jemných podílů sloužil popílek. Poměr mísení kameniva recyklát, těžené kamenivo a popílek byl 74 % : 20 % : 6 %. Jako pojivo byl použit cement CEM II 32,5 R.

Bylo vyrobeno 13 vzorků tvaru válce o průměru 150 mm a výšce 115 mm. Pro směs s nejvyšší objemovou hmotností také 6 krychlí o rozměrech 100 x 100 x 100 mm.

3. Etapa

Vlastní míchání směsí, zkoušení vlastností v čerstvém stavu a výroba zkušebních těles pro zkoušky.

Provedené zkoušky:

- a) Polystyrenové betony
 - stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu
- b) Malty s mletou teplárenskou struskou
 - stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu
- c) Betony s náhradou hrubého kameniva
 - stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu
 - stanovení konzistence betonu sednutím kužele v čase 0 minut a 30 minut po zamíchání
- d) KSC I s kamenivem z betonového recyklátu
 - stanovení optimální hutnosti směsi Proctorovou zkouškou

4. Etapa

Zkoušení vlastností směsí v zatvrdlém stavu

Provedené zkoušky:

- a) Polystyrenové betony
 - stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
 - stanovení pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech
 - stanovení součinitele tepelné vodivosti
 - zkouška odolnosti vůči zvýšeným teplotám
- b) Malty s mletou teplárenskou struskou
 - stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
 - stanovení pevnosti v tahu za ohybu po 7, 28, 60 a 90 dnech
 - stanovení pevnosti v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech
- c) Betony s náhradou hrubého kameniva
 - stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
 - stanovení pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech
 - stanovení vodotěsnosti
 - stanovení mrazuvzdornosti
 - stanovení nasákavosti
- d) KSC I s kamenivem z betonového recyklátu
 - stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
 - stanovení pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech

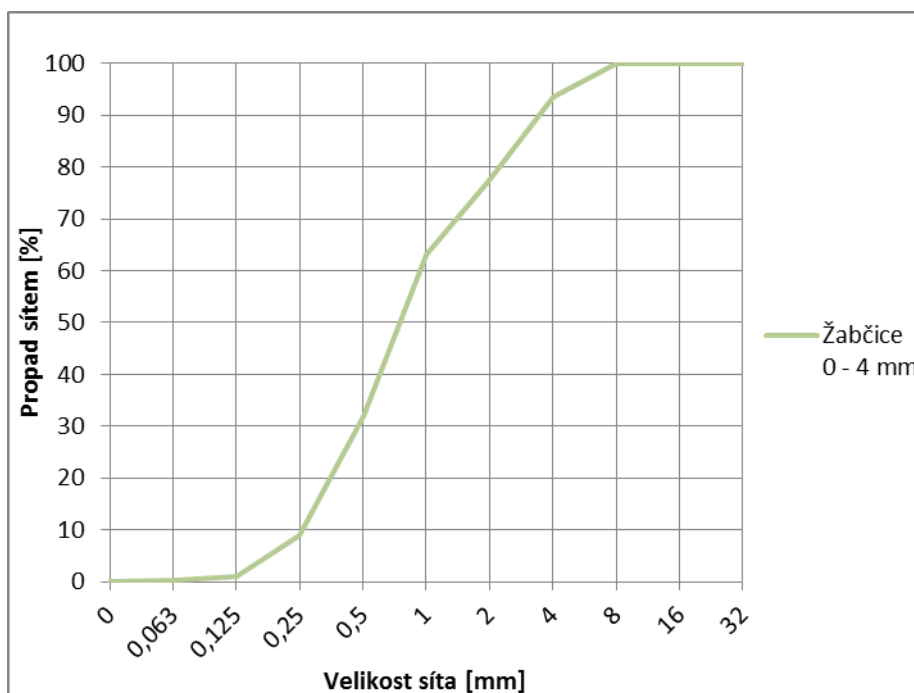
3.3 Použité materiály

Cement

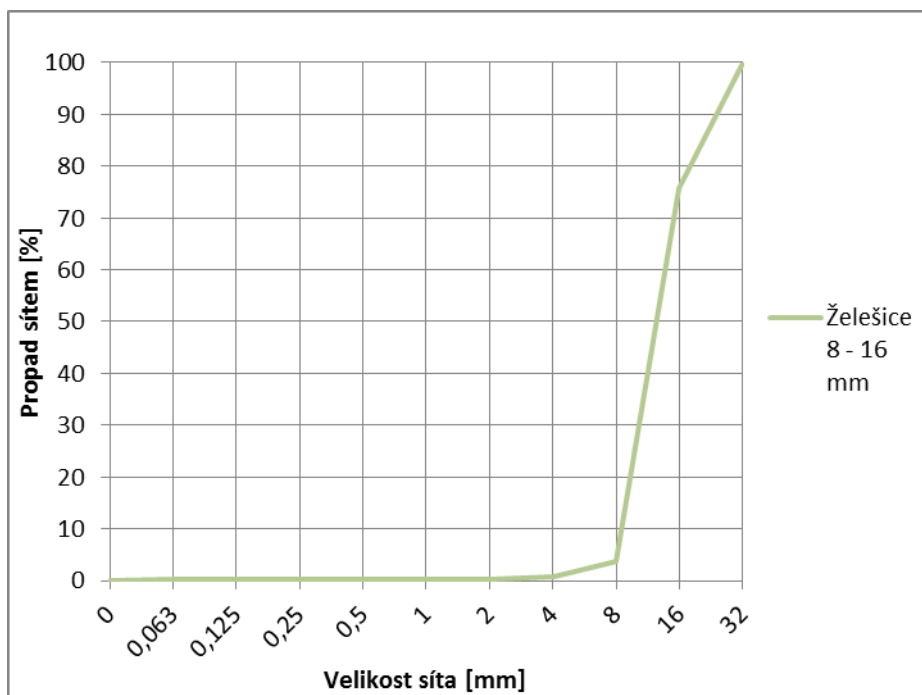
Pro KSC I byl použit cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R z produkce Českomoravský cement a.s., ze závodu Mokrý a pro všechny ostatní směsi cement CEM I 42,5 R taktéž z produkce Českomoravský cement a.s., ze závodu Mokrý.

Kamenivo

Pro všechny receptury byl použit těžný písek frakce 0 – 4 mm z lokality Žabčice, granulometrie tohoto kameniva je znázorněna na Obr. č. 35. Pro výrobu betonů drcené hrubé kamenivo frakce 8 – 16 mm z lokality Želešice, granulometrie tohoto kameniva je znázorněna na Obr. č. 36.



Obr. č. 35 Sítový rozbor drobného kameniva 0 – 4 mm Žabčice

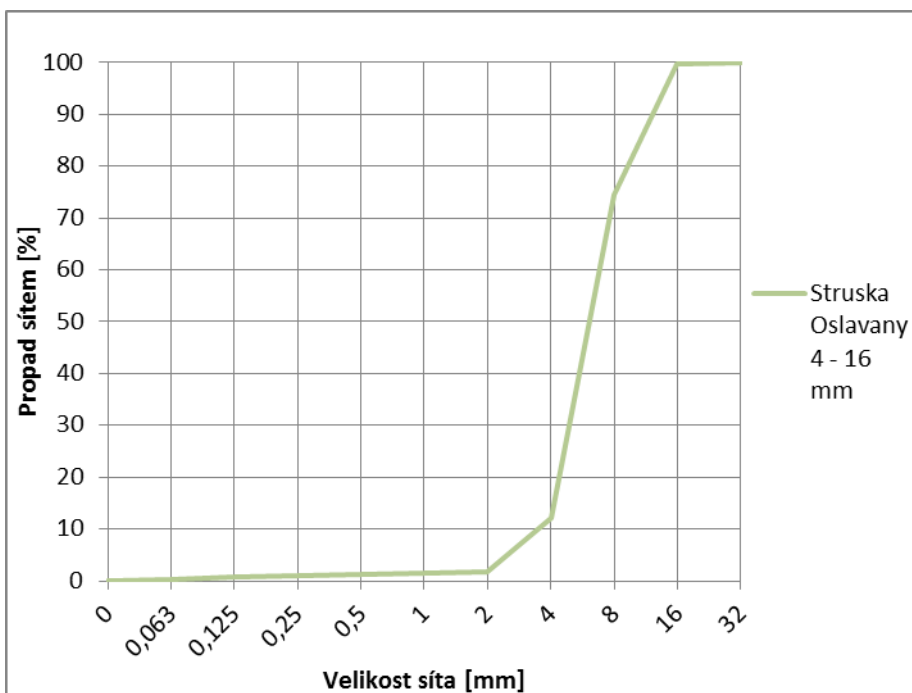


Obr. č. 36 Sítový rozbor hrubého kameniva 8 – 16 Želešice

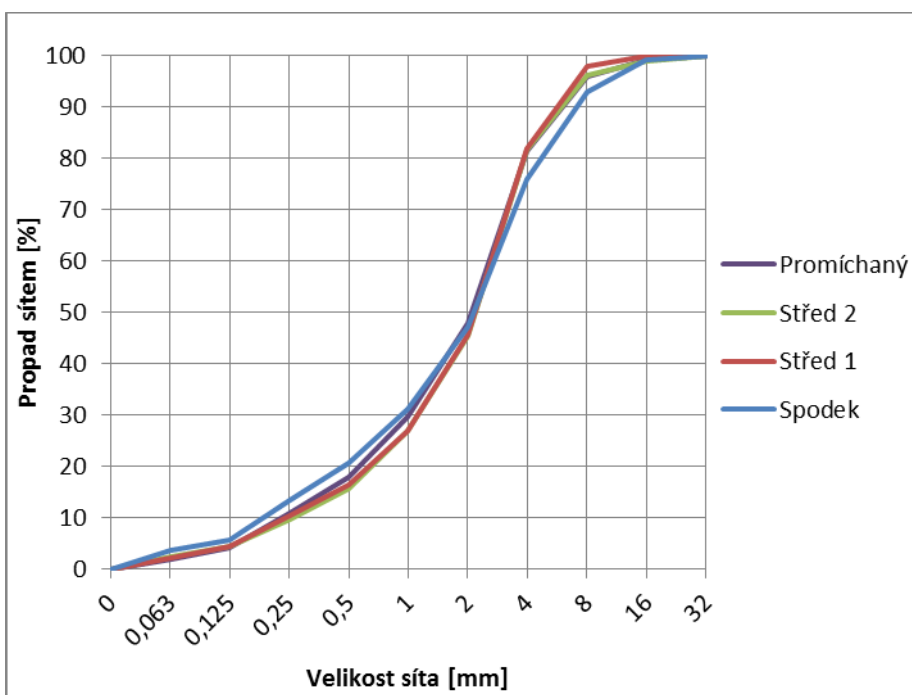
Kamenivo z druhotných surovin

Pro polystyrenové betony sloužila jako plnivo odpadní polystyrenová drť z firmy Prefa Brno a.s. Surovina pochází z polystyrenových dílců ze závodu Strážnice, původně určených jako součást bednění pro výrobu betonových trub a šachet. Dílce polystyrenu byly rozemlety do formy drtě.

Pro betony s náhradou hrubého kameniva sloužila jako druhotná surovina teplárenská struska. Tato byla odebrána z haldy již zrušeného areálu Tepláren Oslavany, nacházejícího se v sousedství závodu Oslavany, firmy Prefa Brno a.s. a následně vytříděna na frakci 4 – 16 mm. Granulometrie strusky této frakce je znázorněna na Obr. č. 37, granulometrie vzorků strusky odebraných ze tří různých míst haldy (spodek, střed I, střed II) je znázorněna na Obr. č. 38. Chemické složení a měrný povrch jemných podílů pod 0,125 mm je uveden v Tab. č. 6.



Obr. č. 37 Sítový rozbor teplárenské strusky Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

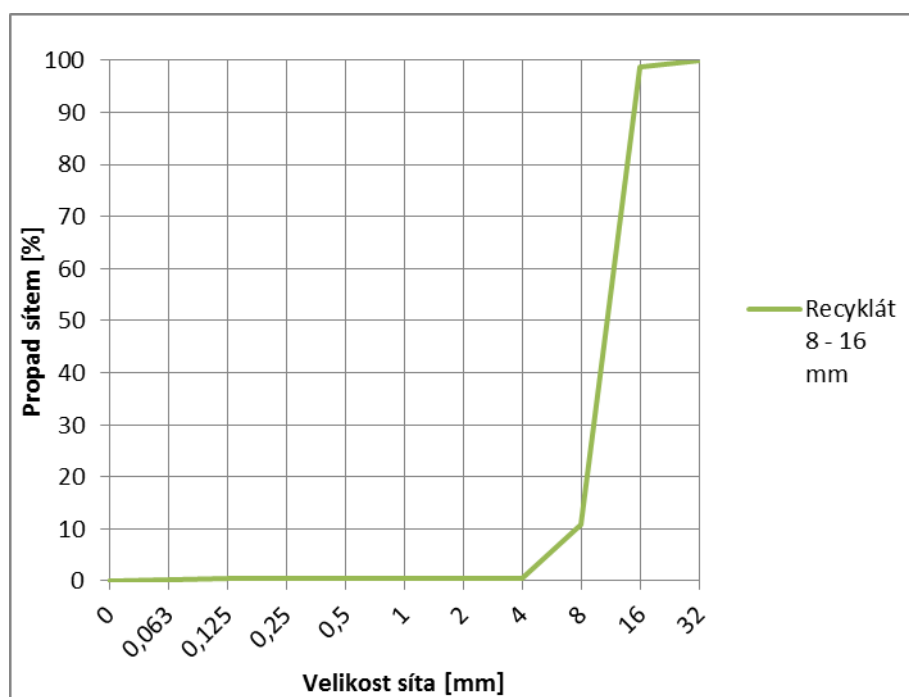


Obr. č. 38 Sítový rozbor teplárenské strusky Oslavany

Tab. č. 6 Chemické složení teplotné strusky Oslavany

Parametr [%]	Místo odběru strusky v haldě		
	Spodek	Střed I	Střed II
Ztráta sušením (105 °C)	0,69	1,14	0,72
SiO ₂	46,7	45,7	48,7
Al ₂ O ₃	20,3	20,3	21,3
Fe ₂ O ₃	11,7	12,8	11,8
CaO	3,04	3,54	3,13
MgO	1,68	1,67	1,93
K ₂ O	2,91	2,75	3,01
Na ₂ O	0,798	0,587	0,569
ztráta žíháním	0,66	0,83	1,23
Měrný povrch zkouškou Blaina (frakce pod 0,125 mm) [cm ² /g]	2669	2742	2109

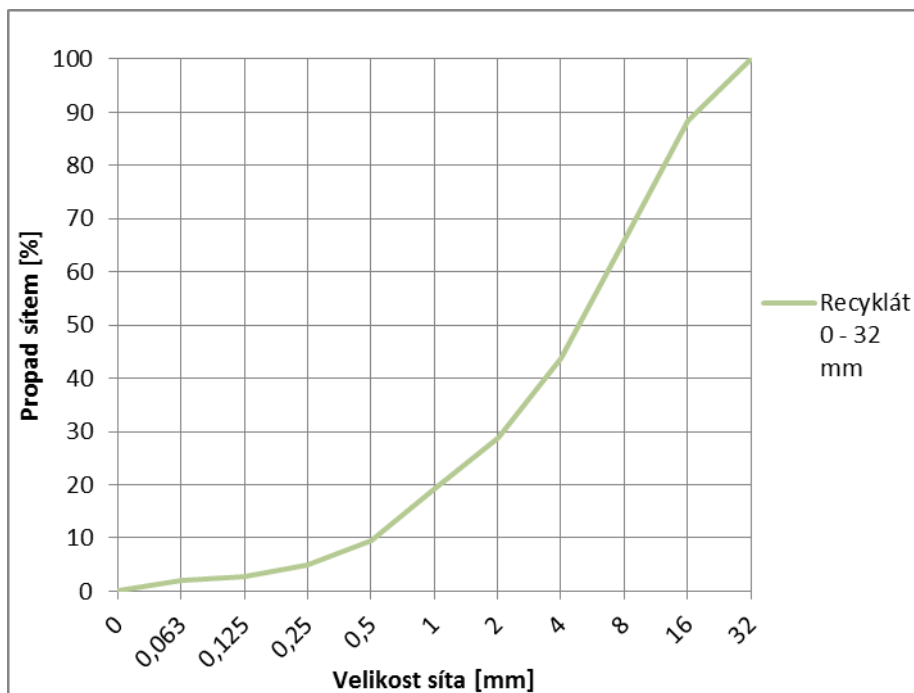
Jako další kamenivo pro náhradu hrubé frakce v betonu sloužil betonový recyklát z výroby firmy Prefa Brno a.s. ze závodu Kuřim. Pro dané použití byl recyklát vysušen a vytříděn na frakci 8 – 16 mm. Granulometrie této vytříděné frakce je znázorněna na Obr. č. 39.



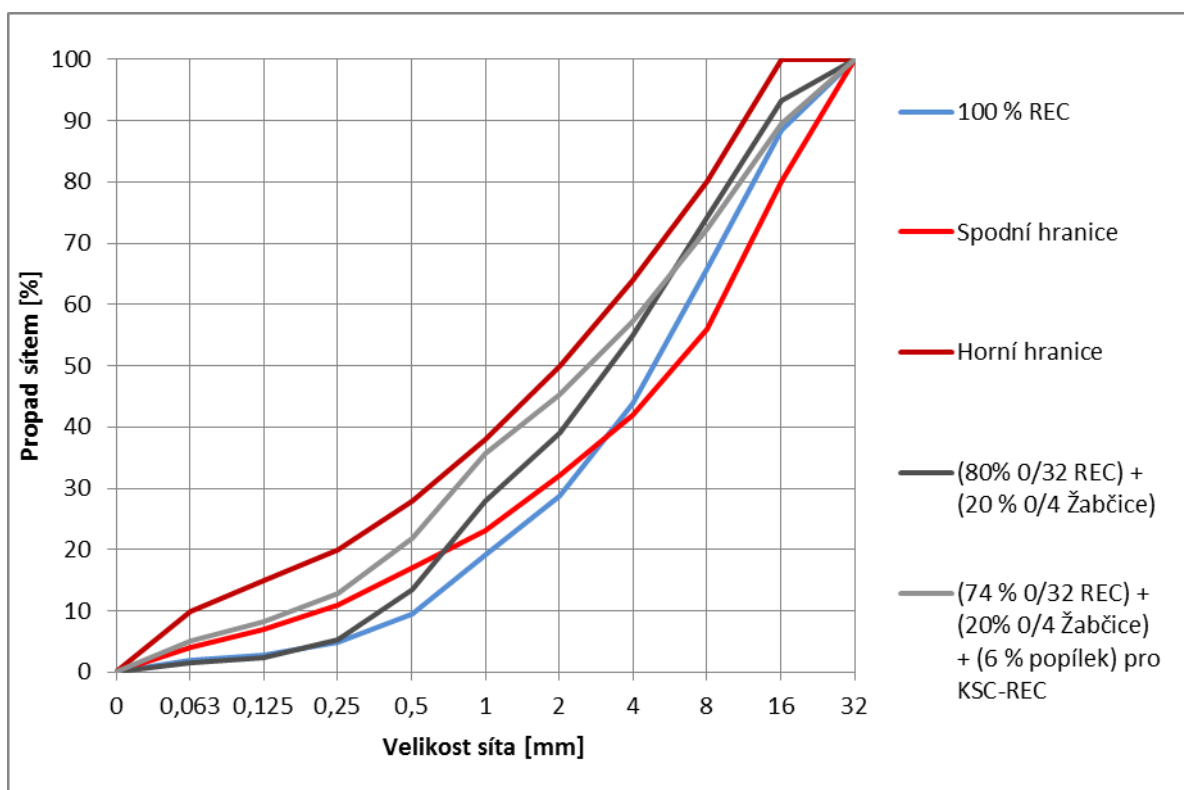
Obr. č. 39 Sítový rozbor betonového recyklátu Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Pro KSC I sloužil jako kamenivo stejný betonový recyklát. V tomto případě byl vysušen a vytříděn na frakci 0 – 32 mm. Granulometrie takto vytříděného recyklátu je znázorněna na Obr. č. 40. Protože tato křivka zrnitosti nepadla do rozmezí hodnot, určených pro KSC I, bylo zapotřebí doplnit křivku zrnitosti o drobné těžené kamenivo frakce 0 – 4 mm z lokality

Žabčice a také o jemné podíly v podobě popílku. Granulometrie takto upravené směsi kameniva je znázorněna na Obr. č. 41.



Obr. č. 40 Sítový rozbor betonového recyklátu Kuřim, frakce 0 – 32 mm.



Obr. č. 41 Granulometrie směsi kameniva pro recepturu KSC-REC

Přísady

Jako plastifikační přísada do betonů byl použit superplastifikátor na bázi modifikovaných polykarboxylátů, typ CHRYSO®Fluid Optima 224 od firmy CHRYSO Chemie s.r.o. Vlastnosti této přísady jsou uvedeny v Tab. č. 7.

Tab. č. 7 Vlastnosti superplastifikační přísady CHRYSO®Fluid Optima 224

Popis	Hnědá kapalina
Obsah sušiny [%]	21,4 ± 1,1
Hustota ρ [kg/m ³]	1050 ± 20
pH	4,7 ± 1,0
Max. obsah chloridů [% hm.]	0,1
Max. obsah alkálií [% ekv Na ₂ O]	1,0

Jako přísada eliminující vysoký úhel smáčení polystyrenových zrn, byl použit výrobek firmy MAPEI s.r.o., typ Mapeair LP 100. Vlastnosti přísady jsou uvedeny v Tab. č. 8.

Tab. č. 8 Vlastnosti přísady eliminující úhel smáčení Mapeair LP 100

Popis	Světle modrá kapalina
Hustota ρ [kg/m ³]	1010 ± 20
pH	8,0 ± 1,0
Max. obsah chloridů [% hm.]	10,0
Max. obsah alkálií [% ekv Na ₂ O]	1,0

Příměsi

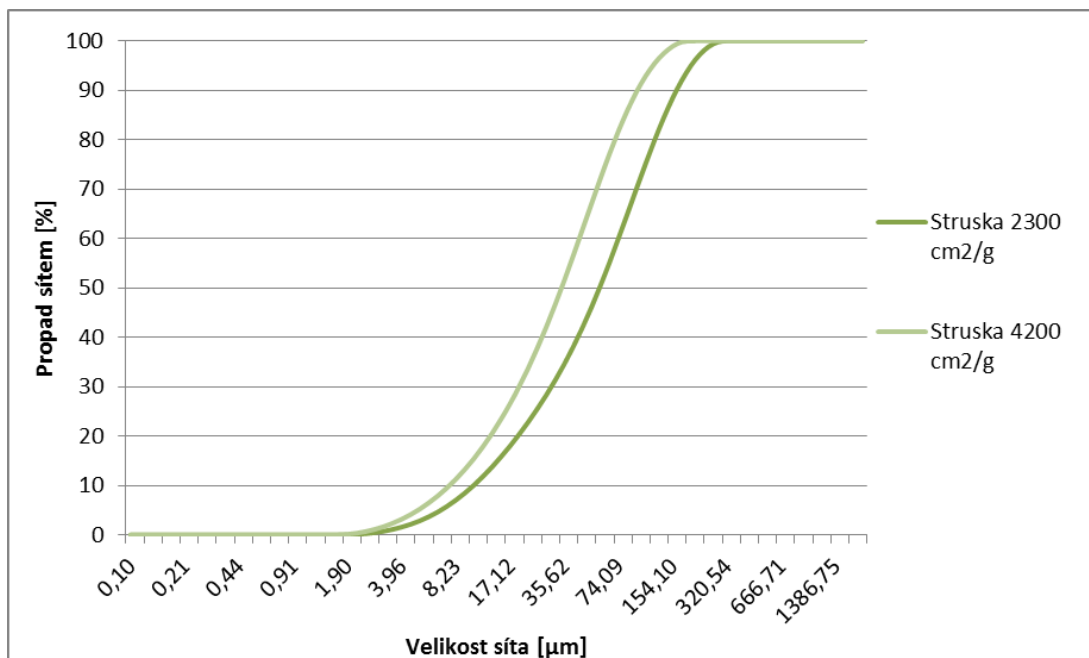
Jako jemnozrná příměs do malt sloužila mletá teplárenská struska Oslavany. Struska byla vysušena a pomleta v kulovém mlýně na měrný povrch 2300 cm²/g a dále na 4200 cm²/g. Chemické složení teplárenské strusky je uvedeno v Tab. č. 6. Granulometrie strusky o měrném povrchu 2300 cm²/g a strusky o měrném povrchu 4200 cm²/g je znázorněna na Obr. č. 44.



Obr. č. 42 Laboratorní kulový mlýn použitý pro mletí teplárenské strusky



Obr. č. 43 Mlecí tělesa z laboratorního kulového mlýna



Obr. č. 44 Granulometrie použitých vzorků mleté strusky

3.4 Provedené zkoušky

Vzorky vyrobené z malt, či betonů byly umístěny do vlhkého uložení v místnosti s teplotou 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí ≥ 95 %. Před samotným zkoušením byly vzorky ponořeny na 72 hodin do vodního uložení s vodou o teplotě 20 ± 2 °C.

3.4.1 Zkoušení vlastností v čerstvém stavu

Polystyrenové betony

U těchto směsí byla vždy stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 12350 – 6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost

Malty s mletou teplárenskou struskou

U maltových směsí byla stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 1015 – 6 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Betony s náhradou hrubého kameniva

Nejprve po zamíchání směsi byla provedena zkouška konzistence metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Poté byla stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 12350 – 6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Po 30 minutách od zamíchání byla opětovně provedena výše uvedená zkouška konzistence, metodou sednutí kužele.

KSC I s kamenivem z betonového recyklátu

Zde pro zjištění optimální vlhkosti směsi při nejvyšší objemové hmotnosti byla provedena Proctorova zkouška dle 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.

3.4.2 Zkoušení vlastností v ztvrdlém stavu

Polystyrenové betony

Stanovení objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu byla stanovena na krychlích 100 x 100 x 100 mm dle ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena vždy pro každou směs betonu na 3 krychlich 100 x 100 x 100 mm, po 7 a 28 dnech zrání betonu. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ se stanovoval pro každou směs na 2 deskách o rozměrech 300 x 300 x 50 mm za pomoci Bockova přístroje.

Zkoušení odolnosti těles vůči zvýšeným teplotám

Zkouška spočívala v zahřívání stěny krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm regulovaným plamenem, kde ve vzorku byly rozmístěny 4 čidla pro snímání teploty a byl monitorován průběh teplot v průřezu vzorku během postupného zvyšování teplotní zátěže na vzorek. Průběh zatěžování probíhal celkem 1 hodinu, během níž v určitých časových intervalech proběhlo zvýšení udržované teploty. Intervaly udržovaných teplot v závislosti na čase jsou uvedeny v Tab. č. 9.

Tab. č. 9 Intervaly udržovaných teplot v průběhu zatěžování

Čas [min]	Udržovaná teplota [°C]
0 - 10	500 - 600
10 - 20	600 - 800
20 - 30	800 - 900
30 - 40	900 - 1000
40 - 45	1000 - 1100
45 - 50	1100 - 1200
50 - 60	> 1200

Malty s mletou teplárenskou struskou

Stanovení objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost ztvrdlých malt byla stanovena na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm dle ČSN EN 1015 – 10 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty.

Pevnost v tahu za ohybu a tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu probíhalo na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, vždy po 7, 28, 60 a 90 dnech od výroby vzorků. Zkouška pevnosti v tlaku probíhala na zlomcích trámečků, jež byly k dispozici po zkoušce v tahu za ohybu. Zkoušení se

provádělo v souladu s ČSN EN 1015 – 11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku.

Betony s náhradou hrubého kameniva

Stanovení objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost byla stanovena na krychlích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm dle ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost betonu v tlaku byla vždy stanovena pro každou směs na 3 krychlích 100 x 100 x 100 mm, po 28 a 60 dnech zrání. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Stanovení vodotěsnosti betonu

Stanovení vodotěsnosti betonu bylo provedeno vždy na 2 krychlích 150 x 150 x 150 mm pro každou směs. Poté, co se vzorek upnul do vodotlačného zařízení, se nastavil tlak vody působící na povrch vzorku na hodnotu 0,5 MPa (V5) a nechal se působit celkem 72 hodin. Zkouška probíhala v souladu s ČSN EN 12390 – 8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou.

Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Zkouška byla provedena dle ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Zkoušena byla sada 4 trámců, z nichž 2 trámce byly referenční – uloženy ve vodním prostředí a další 2 trámce byly vystaveny 100 zmrazovacím cyklům. Zkouška započala po 28 dnech zrání betonu. U vzorků jdoucích do mrazícího boxu byla stanovena před zkouškou jejich hmotnost, která byla po dokončení zmrazovacích cyklů opět stanovena pro určení úbytku hmotnosti vlivem zmrazování a rozmrazování.

Dále byla stanovena zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Výsledkem byl tedy úbytek hmotnosti zkoušených trámců v % a součinitel mrazuvzdornosti jako poměr hodnot aritmetického průměru pevností v tahu za ohybu zmrazovaných a referenčních vzorků. Beton je mrazuvzdorný, pokud je hodnota součinitele mrazuvzdornosti vyšší, než 75 %.

Součinitel mrazuvzdornosti = $(f_{cf,mraz}/f_{cf,ref}) \times 100$.

Stanovení nasákavosti betonu

Na úlomcích trámců zmrazovaných a referenčních vzorků, ze zkoušky mrazuvzdornosti se provedla zkouška nasákavosti. Zkouška proběhla dle ČSN 73 1327: Stanovení

sorbčních vlastností betonu. Vzorky se nejprve nechaly nasytit vodou do ustálené hmotnosti a poté se vysušily v sušárně o teplotě 105 °C opět do ustálené hmotnosti.

KSC I s kamenivem z betonového recyklátu

Stanovení objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost byla stanovena na krychlích o rozměrech 100 x 100 x 100 mm a na válcovém vzorku o průměru 150 mm, výšky 115 mm dle ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena vždy na 3 krychlích o rozměrech 100 x 100 x 100 mm, po 7 a 28 dnech zrání. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

3.5 Výsledky měření – Polystyrenové betony

3.5.1 Receptura A-400

Tato receptura byla s nejvyšším množstvím odpadního polystyrenu ve formě drtě a cílem bylo dosažení nejmenší objemové hmotnosti ze souboru 3 receptur a to konkrétně 400 kg/m³. Jako jediná neobsahovala těžené drobné kamenivo.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 10 Složení receptury A-400

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	175	
0 - 4 žabčice	0	
Odpadní polystyrenová drť	610	l/m ³
Smáčecí přísada Mapeair LP100	0,5	8,2 x 10 ⁻⁴ kg/l drtě
Voda	70	w = 0,40

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Tab. č. 11 Vlastnosti čerstvé směsi A-400

Objemová hmotnost [kg/m ³]	510
--	-----

Po 7 a 28 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Dále bylo provedeno určení součinitele tepelné vodivosti a zkouška odolnosti proti zvýšeným teplotám. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 12. Srovnání objemové hmotností je znázorněno na Obr. č. 45, srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 46 a srovnání součinitele tepelné vodivosti na Obr. č. 47. Zkouška odolnosti vůči nadměrným teplotám, je znázorněna na Obr. č. 48 až Obr. č. 61.

Tab. č. 12 Výsledky zkoušek na zatvrdlém betonu směsi A-400

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech
D [kg/m ³]	420	500
f _c [MPa]	0,6	1
λ [W/m·K]	0,108915	
T _{max} [°C]	20,6	

3.5.2 Receptura B-1000

Tato receptura byla se středním množstvím odpadního polystyrenu a cílem bylo dosažení objemové hmotnosti 1000 kg/m^3 . Pro zlepšení fyzikálně mechanických vlastností již obsahovala drobné těžené kamenivo.

Složení směsi na m^3 :

Tab. č. 13 Složení receptury B-1000

	kg/m^3	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	300	
0 - 4 Žabčice	220	
Odpadní polystyrenová drť	480	l/m^3
Smáčecí přísada Mapeair LP100	0,4	$8,3 \times 10^{-4} \text{ kg/l}$ drtě
Voda	100	$w = 0,33$

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Tab. č. 14 Vlastnosti čerstvé směsi B-1000

Objemová hmotnost [kg/m^3]	1270
---------------------------------------	------

Po 7 a 28 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Dále bylo provedeno určení součinitele tepelné vodivosti a zkouška odolnosti proti zvýšeným teplotám. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 15. Srovnání objemové hmotností je znázorněno na Obr. č. 45, srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 46 a srovnání součinitele tepelné vodivosti na Obr. č. 47. Zkouška odolnosti vůči nadměrným teplotám, je znázorněna na Obr. č. 48 až Obr. č. 61.

Tab. č. 15 Výsledky zkoušek na zatvrdlém betonu směsi B-1000

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech
D [kg/m^3]	1230	1240
f_c [MPa]	8,1	8,6
λ [W/m·K]	0,429608	
T_{\max} [°C]	26,0	

3.5.3 Receptura C-1500

Tato receptura byla s nejnižším množstvím odpadního polystyrenu a cílem bylo dosažení objemové hmotnosti 1500 kg/m^3 .

Složení směsi na m^3 :

Tab. č. 16 Složení receptury C-1500

	kg/m^3	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	350	
0 - 4 Žabčice	420	
Odpadní polystyrenová drť	400	l/m^3
Smáčecí přísada Mapeair LP100	0,3	$7,5 \times 10^{-4} \text{ kg/l}$ drtě
Voda	120	$w = 0,34$

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Tab. č. 17 Vlastnosti čerstvé směsi C-1500

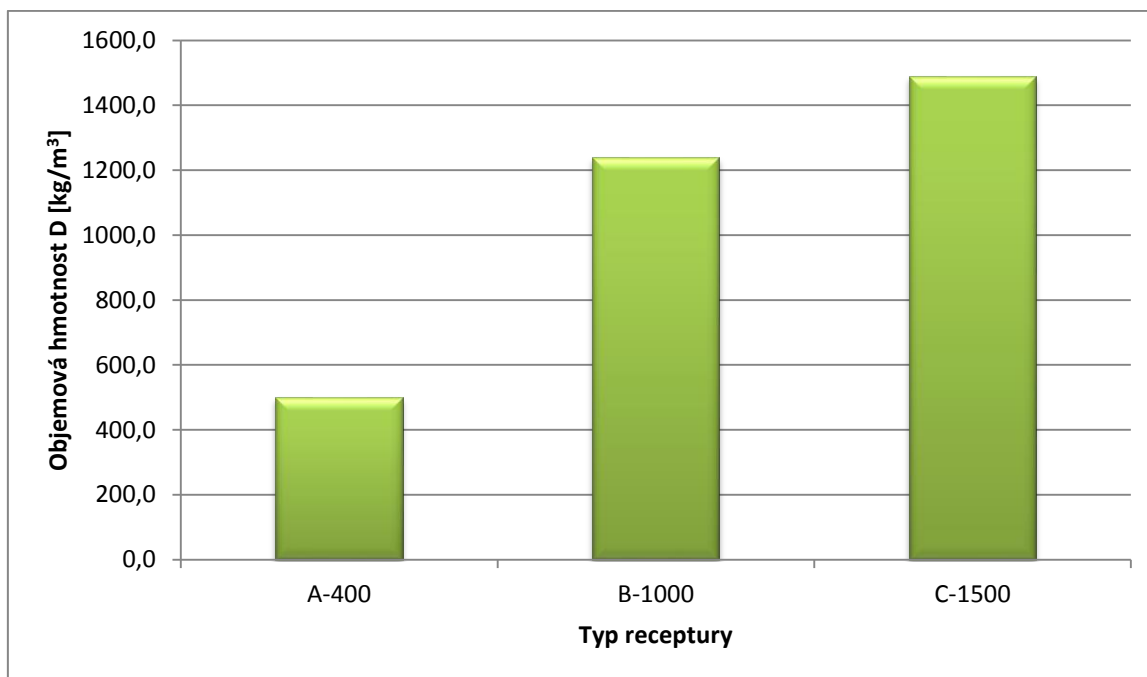
Objemová hmotnost [kg/m^3]	1540
---------------------------------------	------

Po 7 a 28 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Dále byla provedena zkouška odolnosti proti zvýšeným teplotám. Na této receptuře se již nestanovoval součinitel tepelné vodivosti z důvodu velké objemové hmotnosti a tudíž předpokladu, že by nabýval příliš vysokých hodnot. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 18. Srovnání objemové hmotností je znázorněno na Obr. č. 45 a srovnání pevnosti v tlaku na Obr. č. 46. Zkouška odolnosti vůči nadměrným teplotám, je znázorněna na Obr. č. 48 až Obr. č. 61.

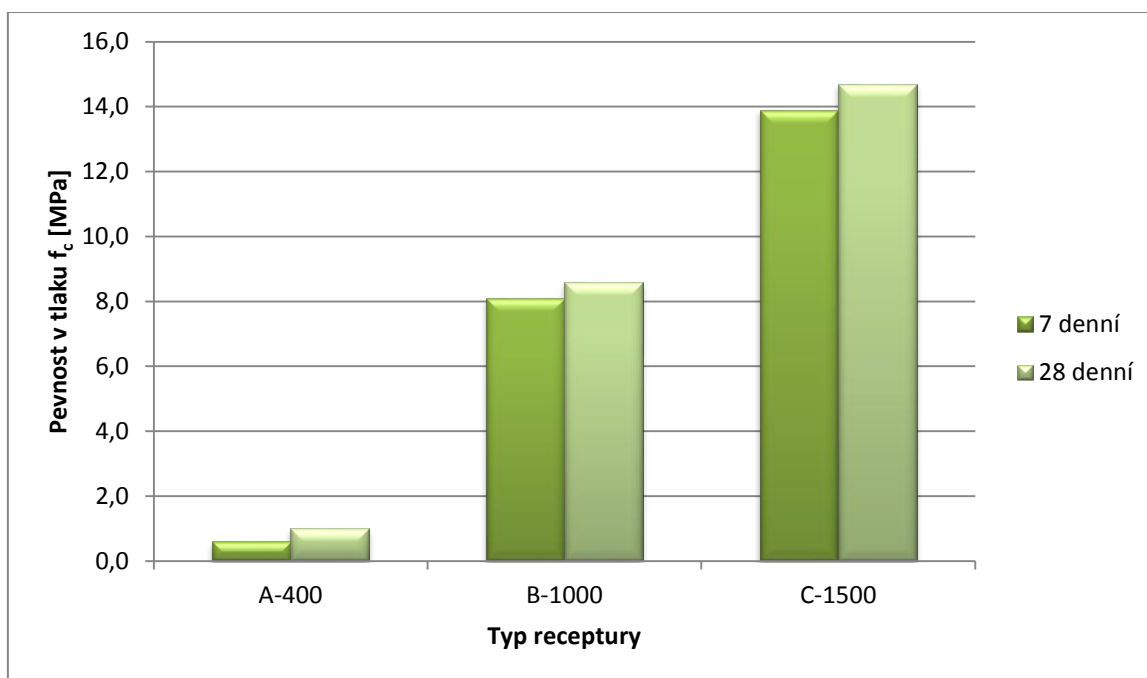
Tab. č. 18 Výsledky zkoušek na zatvrdlém betonu směsi C-1500

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech
D [kg/m^3]	1520	1490
f_c [MPa]	13,9	14,7
T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	32,4	

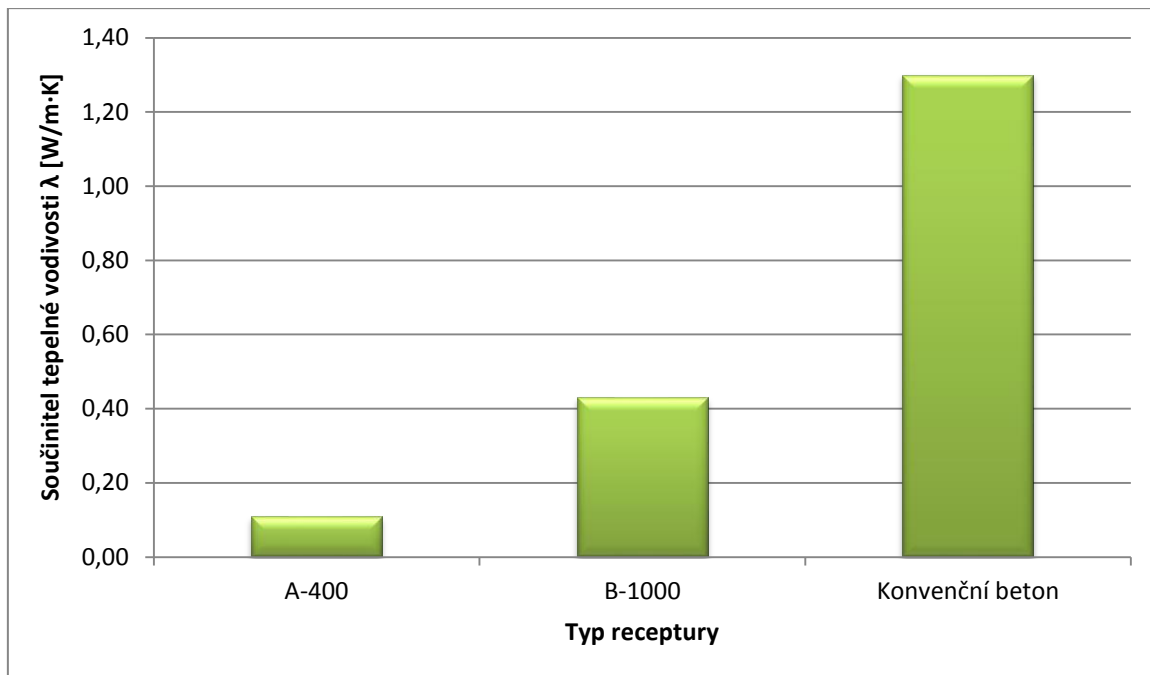
3.5.4 Shrnutí výsledků polystyrenových betonů



Obr. č. 45 Objemová hmotnost polystyrenových betonů po 28 dnech zrání



Obr. č. 46 Pevnost v tlaku polystyrenových betonů



Obr. č. 47 Součinitel tepelné vodivosti receptur polystyrenových betonů v porovnání s obvyklou referenční hodnotou konvenčního betonu $\lambda = 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

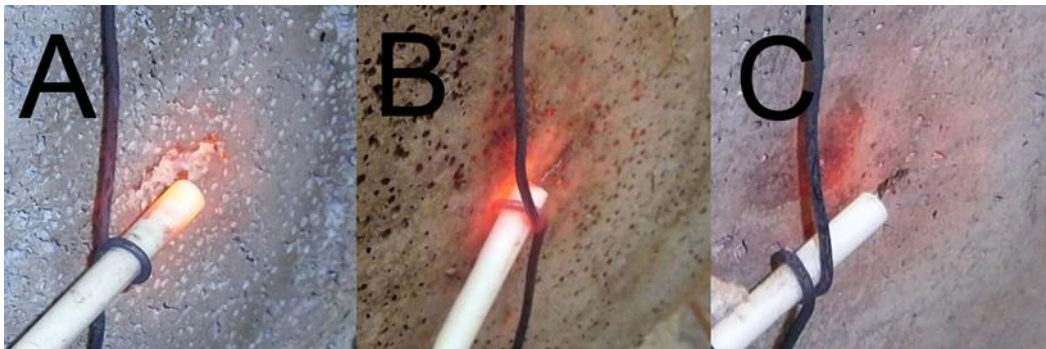
Při zkoušce odolnosti vůči zvýšeným teplotám se sledoval průběh rozložení teploty vzorkem za pomoci čidel umístěných ve vzorku ve vzdálenosti 0, 25, 50 a 100 mm od zatěžované stěny vzorku. Dále pak byly pozorovány vizuální změny během zatěžování.



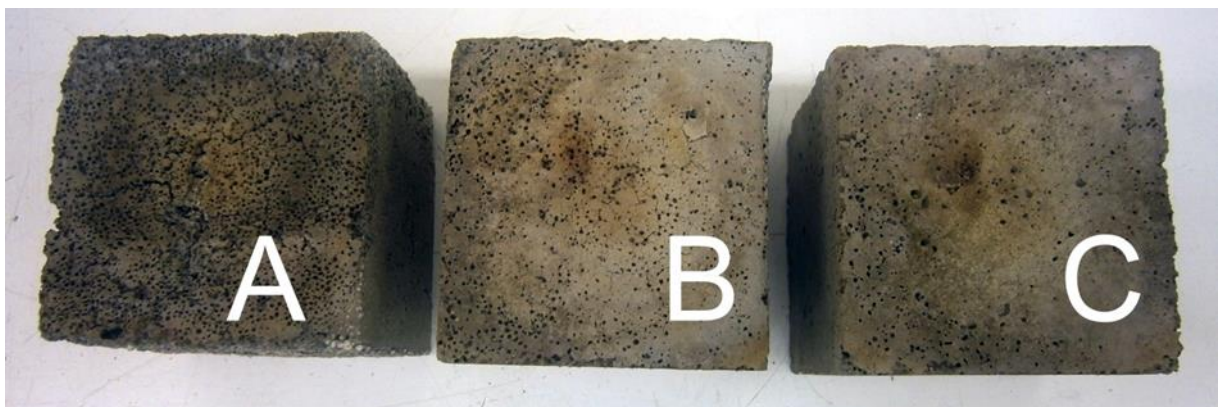
Obr. č. 48 Stav před provedením zkoušky



Obr. č. 49 Provádění zkoušky zatěžování plamenem



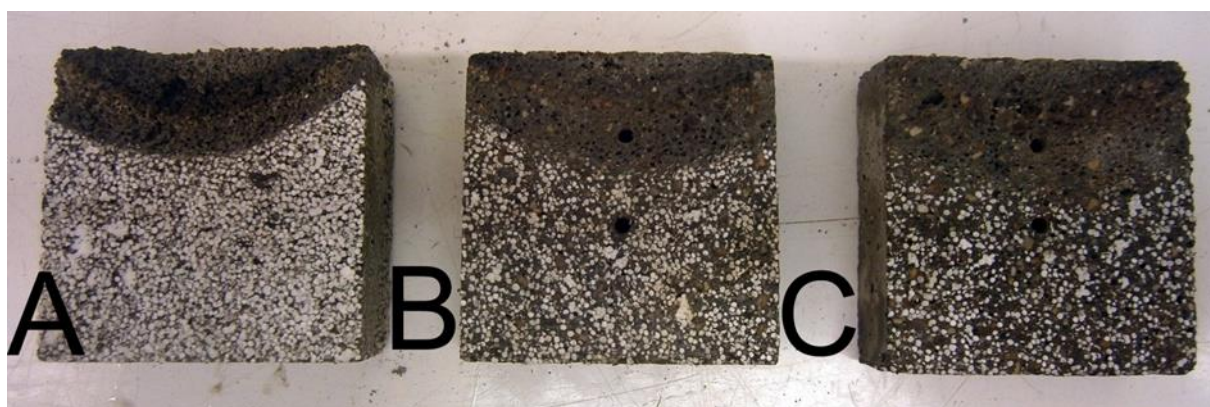
Obr. č. 50 Povrch vzorků po ukončení zkoušky



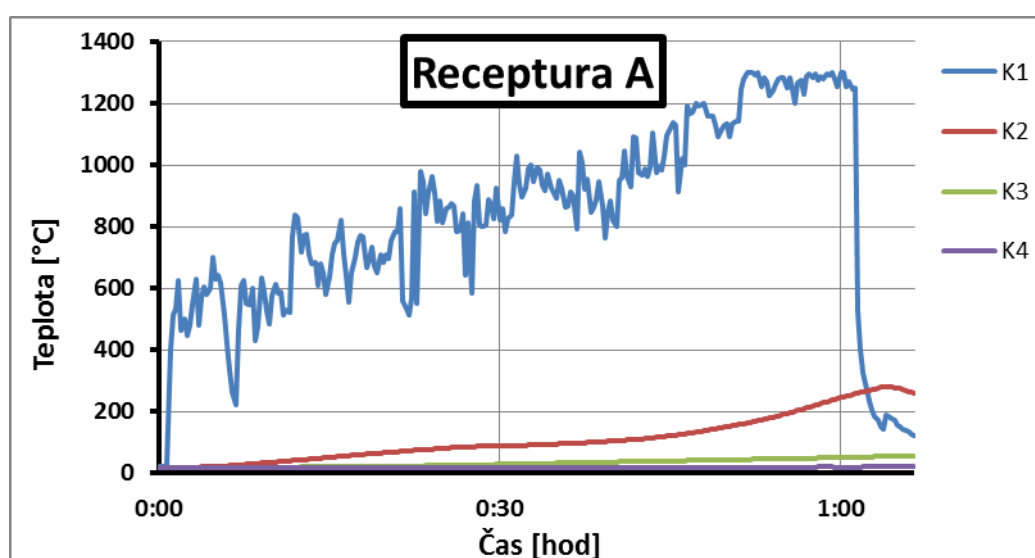
Obr. č. 51 Povrch vzorků po ukončení zkoušky a vychlazení vzorků



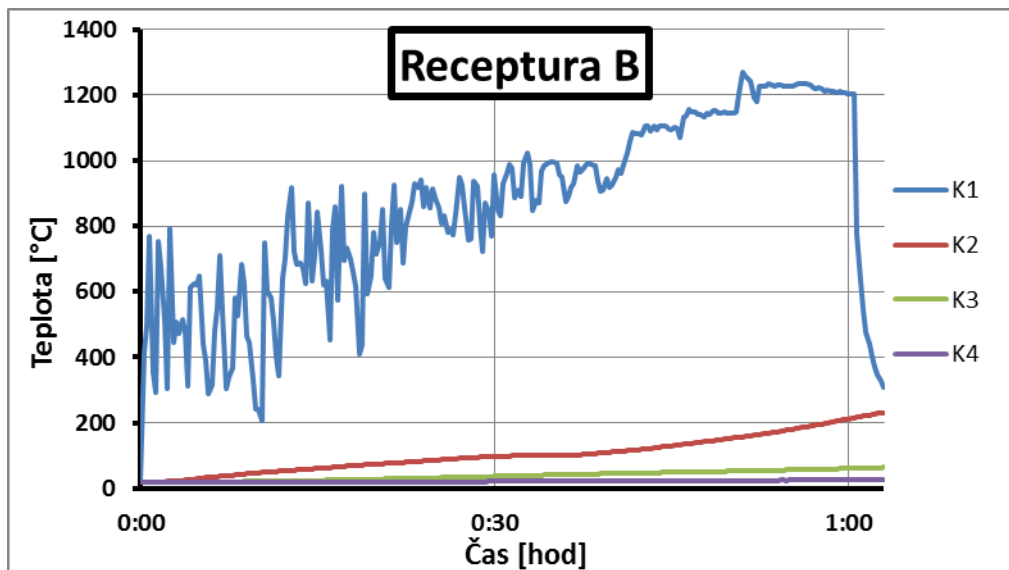
Obr. č. 52 Vypařená zrna polystyrenu ze zatěžovaného vzorku po zkoušce



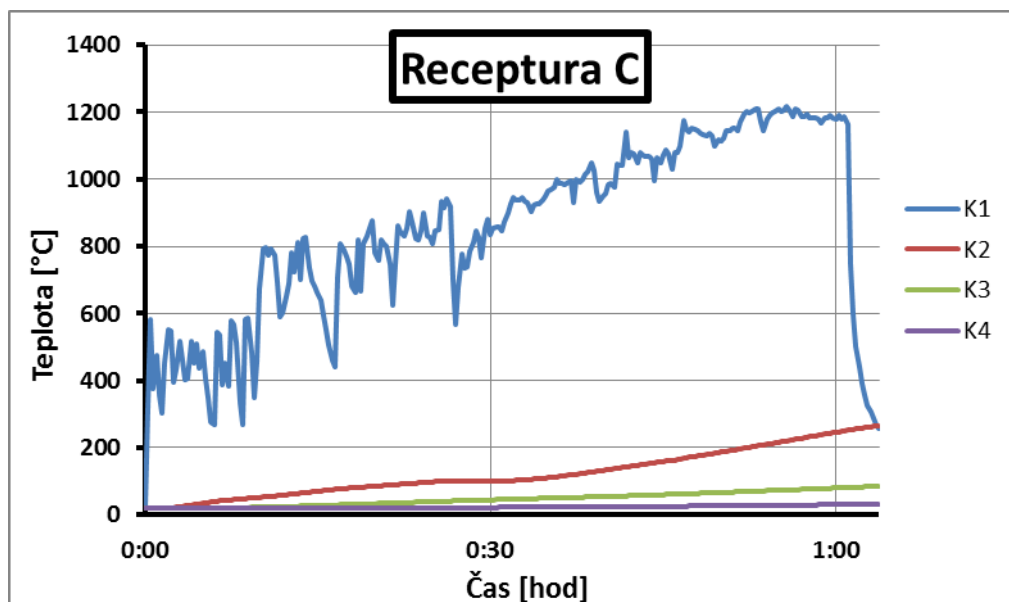
Obr. č. 53 Struktura průřezu vzorků po zkoušce



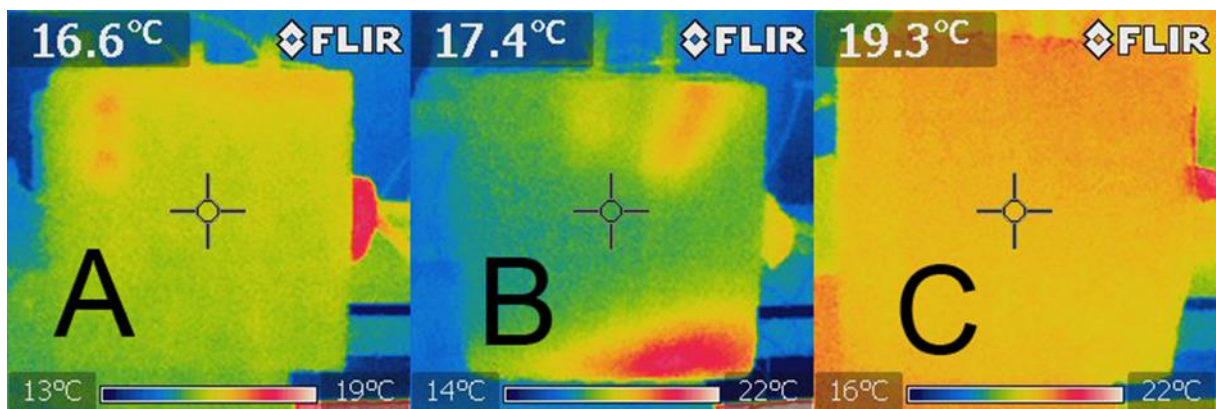
Obr. č. 54 Průběh teplot v závislosti na čase, teplotě zatěžování a průřezu vzorku pro recepturu A-400, kde K1 je čidlo nejbližší plamenu a K4 čidlo nejdále od plamene



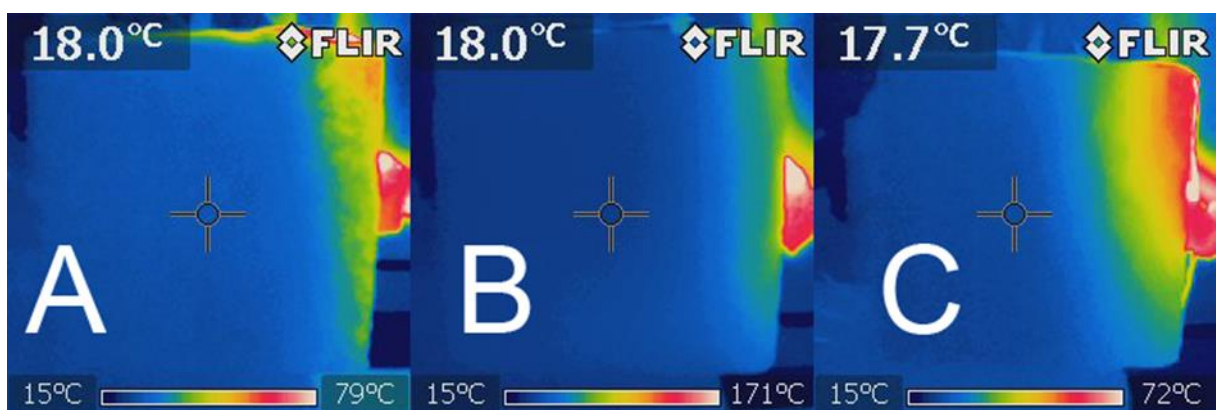
Obr. č. 55 Průběh teplot v závislosti na čase, teplotě zatěžování a průřezu vzorku pro recepturu B-1000, kde K1 je čidlo nejbližší plamenu a K4 čidlo nejdále od plamene



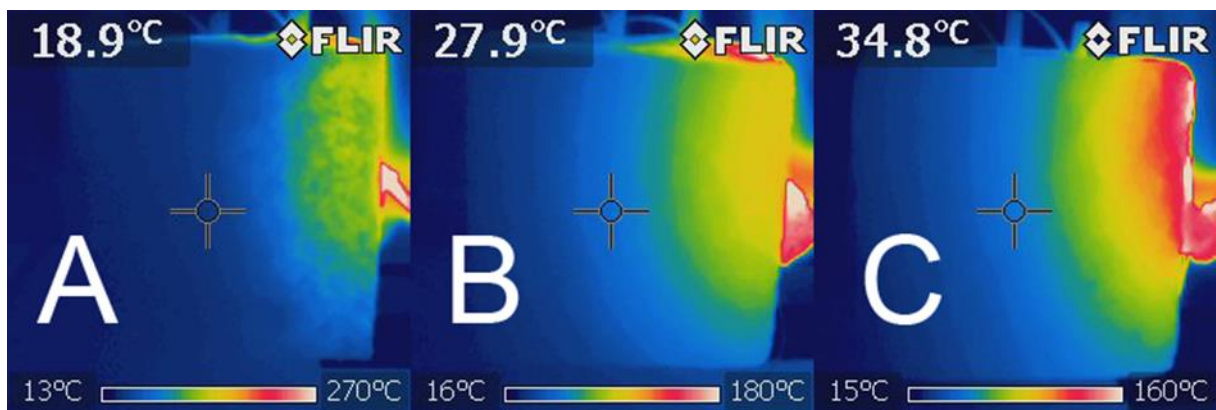
Obr. č. 56 Průběh teplot v závislosti na čase, teplotě zatěžování a průřezu vzorku pro recepturu C-1500, kde K1 je čidlo nejbližší plamenu a K4 čidlo nejdále od plamene



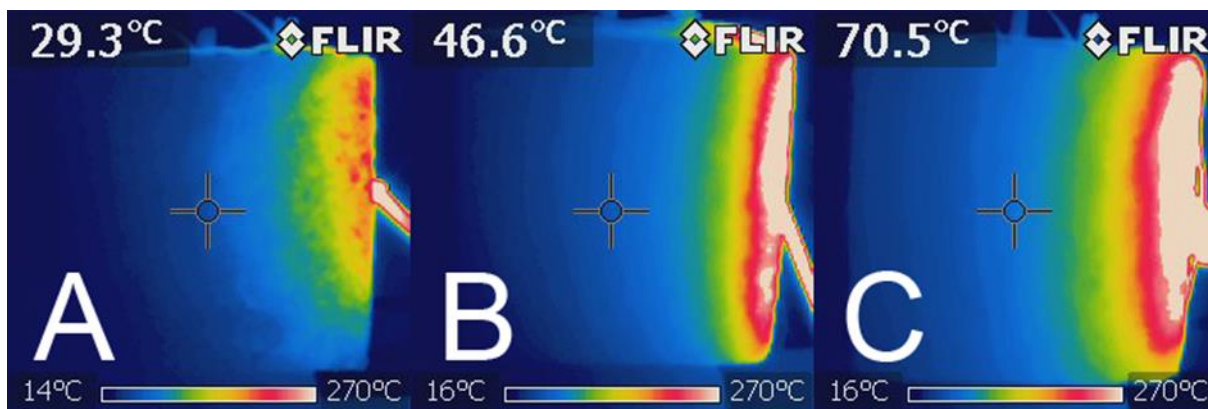
Obr. č. 57 Pohled přes termokameru před zahájením zkoušky



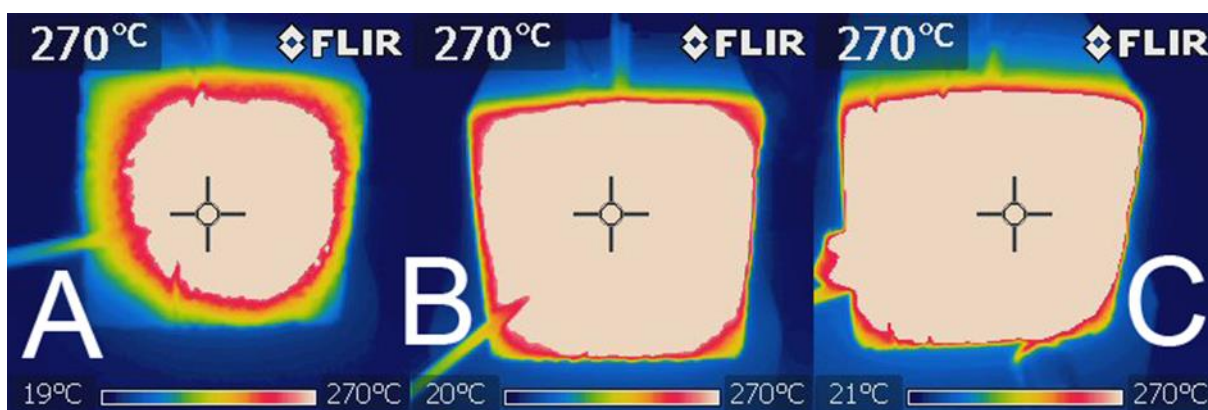
Obr. č. 58 Pohled přes termokameru po 5 minutách zatěžování plamenem



Obr. č. 59 Pohled přes termokameru po 30 minutách zatěžování plamenem



Obr. č. 60 Pohled přes termokameru po 60 minutách zatěžování plamenem



Obr. č. 61 Čelní pohled přes termokameru na zatěžovaný povrch po 60 minutách

Shrnutí výsledků

U receptury C-1500, kde byla dávka smáčecí přísady nejmenší, bylo chování polystyrenu vůči smáčení povrchu vodou již hraniční. Smáčení zrn v tomto případě nebylo dostatečně rychlé a pro úplné smáčení zrn bylo potřeba polystyren výrazně delší dobu s přísadou a vodou promíchat. U ostatních receptur, kde byla dávka smáčecí přísady o málo vyšší, probíhalo smáčení polystyrenových zrn mnohem lépe.

Objemová hmotnost zatvrdlých směsí se téměř shodovala s navrhovanými hodnotami, s výjimkou receptury B-1000, kde její hodnota oproti navrhované byla vyšší.

Objemová hmotnost sehrála velkou roli v rozdílu všech zkoušených vlastností receptur, kde u pevnosti v tlaku dosahovala receptura s nejnižší objemovou hmotností velmi nízkých výsledků a naopak receptura s nejvyšší objemovou hmotností vykazovala výsledků nejvyšších. Hodnoty pevností v tlaku pro tyto betony nebyly nikterak vysoké, avšak pro účely polystyrenových betonů v daných rozmezích objemových hmotností byly dostačující. Nárůst pevností mezi 7 a 28 dnem byl zanedbatelný.

Receptura s nejnižší objemovou hmotností vykazovala velmi dobrých výsledků součinitele prostupu tepla, srovnatelných například se suchými pórobetonovými tvárniciemi o podobné objemové hmotnosti. U receptury se střední objemovou hmotností byl naměřen součinitel prostupu tepla o již vyšších hodnotách, přesahujících hodnoty cihelných tvárníc.

Z naměřených výsledků zkoušky zatěžování nadměrnými teplotami je patrné, že prostup tepla vzorkem během zatěžování probíhá nejlépe u receptury s nejnižším obsahem polystyrenu a nejvyšší objemovou hmotností a nejhůře u receptury s nejvyšším obsahem polystyrenu a nejnižší objemovou hmotností. Hloubka vypaření polystyrenových zrn průřezem byla nejnižší u receptury s nejvyšším množstvím polystyrenu a nevyšší u receptury s nejnižším množstvím polystyrenu. Dle vizuálního posouzení však vzorek receptury s nejnižší objemovou hmotností vykazoval nejvyšší poškození zapříčiněné nízkými pevnostmi samotného materiálu.

3.6 Výsledky měření – malty s mletou teplárenskou struskou

3.6.1 Receptura M-REF

Tato receptura byla bez příměsi mleté teplárenské strusky a sloužila jako referenční. Složení směsi na m³:

Tab. č. 19 Složení receptury M-REF

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	350	
Mletá struska	0	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 20 Vlastnosti čerstvé směsi M-REF

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2160
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 21. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 21 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-REF

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2130	2140	2130	2090
f _c [MPa]	2,8	3,6	4,2	4,6
f _{cf} [MPa]	0,7	0,8	0,9	0,9

3.6.2 Receptura M-STR10(2300)

Tato receptura byla s 10% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 2300 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 22 Složení receptury M-STR10(2300)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
Mletá struska 2300	35	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 23 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR10(2300)

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2190
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 24. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 24 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR10(2300)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2160	2230	2170	2120
f _c [MPa]	2,6	3,7	4,0	4,5
f _{cf} [MPa]	0,7	0,9	0,8	1,0

3.6.3 Receptura M-STR10(4200)

Tato receptura byla s 10% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 4200 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 25 Složení receptury M-STR10(4200)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
Mletá struska 4200	35	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 26 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR10(4200)

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2180
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 27. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 27 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR10(4200)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2170	2160	2120	2160
f _c [MPa]	2,5	3,5	3,4	3,4
f _{cf} [MPa]	0,7	0,8	0,8	0,8

3.6.4 Receptura M-STR20(2300)

Tato receptura byla s 20% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 2300 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 28 Složení receptury M-STR20(2300)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	280	
Mletá struska 2300	70	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 29 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR20(2300)

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2170
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 30. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 30 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR20(2300)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2170	2160	2160	2110
f _c [MPa]	2,3	3,0	3,7	3,9
f _{cf} [MPa]	0,7	0,8	0,8	0,8

3.6.5 Receptura M-STR20(4200)

Tato receptura byla s 20% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 4200 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 31 Složení receptury M-STR20(4200)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	280	
Mletá struska 4200	70	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 32 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR20(4200)

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2180
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 33. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 33 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR20(4200)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2190	2300	2140	2140
f _c [MPa]	2,0	3,0	2,9	3,1
f _{cf} [MPa]	0,5	0,9	0,8	0,8

3.6.6 Receptura M-STR30(2300)

Tato receptura byla s 30% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 2300 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 34 Složení receptury M-STR30(2300)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	245	
Mletá struska 2300	105	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 35 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR30(2300)

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2150
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 36. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

Tab. č. 36 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR30(2300)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2130	2140	2130	2130
f _c [MPa]	2,0	2,4	2,9	3,1
f _{cf} [MPa]	0,6	0,7	0,7	0,7

3.6.7 Receptura M-STR30(4200)

Tato receptura byla s 30% náhradou cementu mletou teplárenskou struskou Oslavany s hodnotu měrného povrchu 4200 cm²/g.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 37 Složení receptury M-STR30(4200)

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	245	
Mletá struska 4200	105	
0 - 4 Žabčice	1689	
Voda	210	w = 0,60

Vlastnosti čerstvé směsi:

Tab. č. 38 Vlastnosti čerstvé směsi M-STR30(4200)

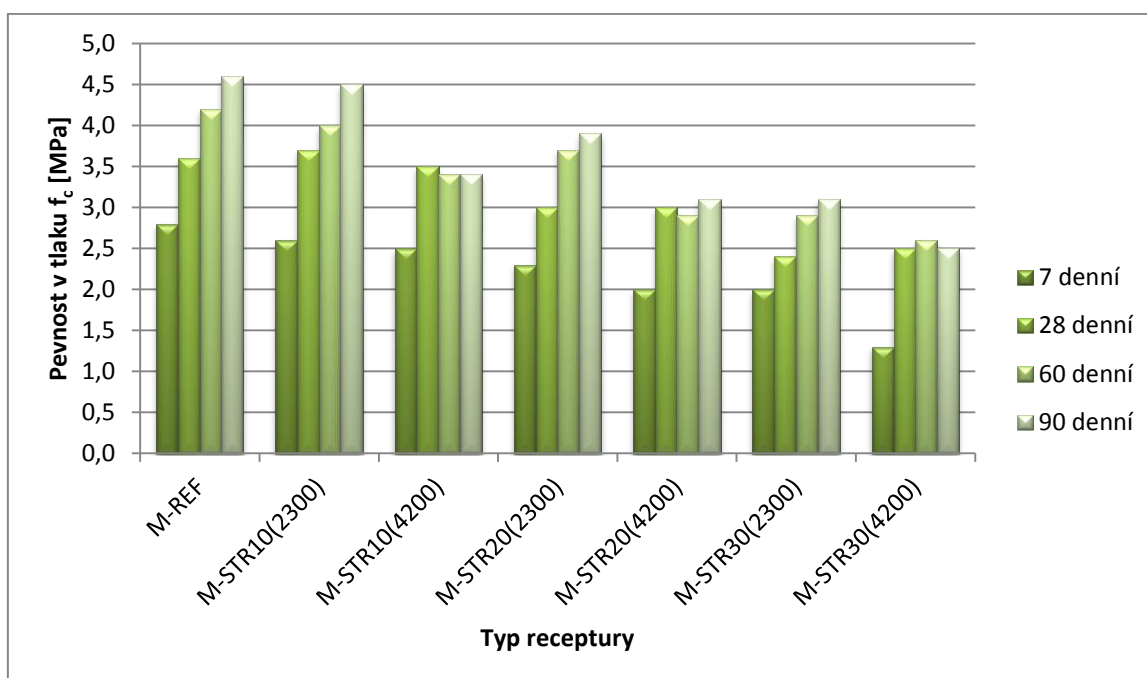
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2120
--	------

Po 7, 28, 60 a 90 dnech byla stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 39. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 62, vývoj pevnosti v tahu za ohybu na Obr. č. 63.

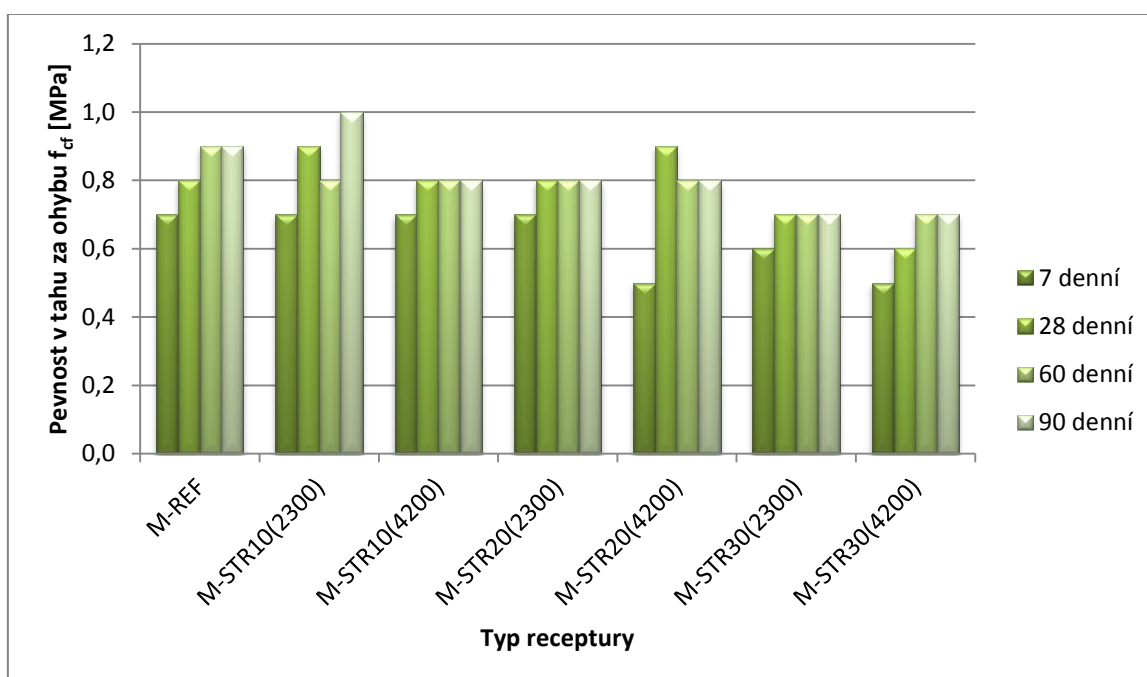
Tab. č. 39 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi M-STR30(4200)

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech	Po 60 dnech	Po 90 dnech
D [kg/m ³]	2130	2100	2100	2120
f _c [MPa]	1,3	2,5	2,6	2,5
f _{cf} [MPa]	0,5	0,6	0,7	0,7

3.6.8 Shrnutí výsledků malt s mletou struskou



Obr. č. 62 Vývoj pevností v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech na maltách



Obr. č. 63 Vývoj pevností v tahu za ohybu po 7, 28, 60 a 90 dnech na maltách

Shrnutí výsledků:

Mletá struska dle výsledků vykazovala nárůst pevnosti v tlaku mezi 28 a 90 dny pouze u nižšího měrného povrchu 2300 cm²/g. U vyššího měrného povrchu 4200 cm²/g nárůst nebyl zaznamenán, přičemž s výjimkou receptury u měrného povrchu 2300 cm²/g a

náhrady 10 % za cement, nedosáhly žádné směsi s náhradou cementu struskou hodnot referenčních pevností.

Nárůst pevností v tahu za ohybu byl v celém časovém rozmezí u náhrady 10 a 20 % cementu struskou přibližně shodný s referenční recepturou a to v obou verzích pomleté strusky. U 30% náhrady byl u obou verzí strusky nárůst nižší.

Z uvedených výsledků vyplývá, že vliv této teplárenské mleté strusky jako aktivní příměs je nepravděpodobný.

3.7 Výsledky měření – betony s náhradou hrubého kameniva

3.7.1 Receptura REF-C12/15

Tato receptura C12/15 byla bez obsahu kameniva z druhotných surovin a sloužila jako referenční.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 40 Složení receptury REF-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	945	48 %
Hrubé kamenivo z druhotných surovin	0	
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,3	0,9 % m _c
Voda	183	w = 0,70

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 41, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 41 Vlastnosti čerstvé směsi REF-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2380
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	100

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 42. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 42 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REF-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2380	2370
f _c [MPa]	29,1	35,2
Hodnota průsaku V5 [mm]	63	
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	101	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,2	6,3

3.7.2 Receptura REC20-C12/15

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 43 Složení receptury REC20-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	756	38 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	189	10 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,3	0,9 % m _c
Voda	189	w = 0,73

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 44, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 44 Vlastnosti čerstvé směsi REC20-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2350
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	140
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	90

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 45. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 45 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC20-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2340	2340
f _c [MPa]	31,3	38,4
Hodnota průsaku V5 [mm]	69	
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	93	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,7	6,5

3.7.3 Receptura STR20-C12/15

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 46 Složení receptury STR20-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	756	38 %
4 - 16 Struska Oslavany	189	10 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,5	1,0 % m _c
Voda	198	w = 0,76

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 47, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 47 Vlastnosti čerstvé směsi STR20-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2300
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	130
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 48. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 48 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR20-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2280	2270
f _c [MPa]	30,0	36,8
Hodnota průsaku V5 [mm]	58	
Úbytek hmotnosti [%]	0,3	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	95	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,3	6,4

3.7.4 Receptura REC40-C12/15

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 49 Složení receptury REC40-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	567	29 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	378	19 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,4	0,9 % m _c
Voda	193	w = 0,74

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 50, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 50 Vlastnosti čerstvé směsi REC40-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2260
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	70

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 51. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 51 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC40-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2270	2270
f _c [MPa]	32,3	34,3
Hodnota průsaku V5 [mm]	84	
Úbytek hmotnosti [%]	0,3	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	88	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	7,2	7,4

3.7.5 Receptura STR40-C12/15

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 52 Složení receptury STR40-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	567	29 %
4 - 16 Struska Oslavany	378	19 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,7	1,0 % m _c
Voda	213	w = 0,82

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 53, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 53 Vlastnosti čerstvé směsi STR40-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2230
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	120
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 54. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 54 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR40-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2210	2200
f _c [MPa]	25,2	29,1
Hodnota průsaku V5 [mm]	73	
Úbytek hmotnosti [%]	1,0	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	82	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	8,0	8,2

3.7.6 Receptura REC60-C12/15

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 55 Složení receptury REC60-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	378	19 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	567	29 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,4	0,9 % m _c
Voda	193	w = 0,74

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 56, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 56 Vlastnosti čerstvé směsi REC60-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2230
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 57. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 57 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC60-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2220	2200
f _c [MPa]	23,1	26,5
Hodnota průsaku V5 [mm]	120	
Úbytek hmotnosti [%]	0,6	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	85	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	8,5	8,6

3.7.7 Receptura STR60-C12/15

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 58 Složení receptury STR60-C12/15

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	260	
0 - 4 Žabčice	1015	52 %
8 - 16 Želešice	378	19 %
4 - 16 Struska Oslavany	567	29 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,9	1,1 % m _c
Voda	235	w = 0,90

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 59, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 59 Vlastnosti čerstvé směsi STR60-C12/15

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2160
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	100
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	70

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 60. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 60 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR60-C12/15

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2160	2170
f _c [MPa]	20,5	24,2
Hodnota průsaku V5 [mm]	114	
Úbytek hmotnosti [%]	3,6	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	81	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	9,6	9,9

3.7.8 Receptura REF-C16/20

Tato receptura C16/20 byla bez obsahu kameniva z druhotných surovin a sloužila jako referenční.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 61 Složení receptury REF-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	996	51 %
Hrubé kamenivo z druhotných surovin	0	
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,6	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,62

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 62, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 62 Vlastnosti čerstvé směsi REF-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2420
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	140
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	70

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 63. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 63 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REF-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2400	2390
f _c [MPa]	42,4	47,7
Hodnota průsaku V5 [mm]	41	
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	97	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	5,0	5,0

3.7.9 Receptura REC20-C16/20

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 64 Složení receptury REC20-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	797	41 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	199	10 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,6	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,62

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 65, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 65 Vlastnosti čerstvé směsi REC20-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2360
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	130
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	60

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 66. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 66 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC20-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2360	2370
f _c [MPa]	40,4	46,3
Hodnota průsaku V5 [mm]	39	
Úbytek hmotnosti [%]	0,3	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	93	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,2	6,0

3.7.10 Receptura STR20-C16/20

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 67 Složení receptury STR20-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	797	41 %
4 - 16 Struska Oslavany	199	10 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,9	1,0 % m _c
Voda	200	w = 0,69

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 68, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 68 Vlastnosti čerstvé směsi STR20-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2320
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	130
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 69. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 69 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR20-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2310	2310
f _c [MPa]	37,4	41,7
Hodnota průsaku V5 [mm]	39	
Úbytek hmotnosti [%]	0,6	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	94	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,5	6,4

3.7.11 Receptura REC40-C16/20

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 70 Složení receptury REC40-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	598	31 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	398	20 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,6	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,62

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 71, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 71 Vlastnosti čerstvé směsi REC40-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2320
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	160
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	100

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 72. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 72 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC40-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2310	2300
f _c [MPa]	31,5	34,1
Hodnota průsaku V5 [mm]	75	
Úbytek hmotnosti [%]	0,9	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	87	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,7	6,8

3.7.12 Receptura STR40-C16/20

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 73 Složení receptury STR40-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	598	31 %
4 - 16 Struska Oslavany	398	20 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	3,0	1,0 % m _c
Voda	210	w = 0,72

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 74, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 74 Vlastnosti čerstvé směsi STR40-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2260
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	120
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 75. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 75 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR40-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2280	2270
f _c [MPa]	32,2	34,0
Hodnota průsaku V5 [mm]	48	
Úbytek hmotnosti [%]	1,5	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	85	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	7,5	7,6

3.7.13 Receptura REC60-C16/20

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 76 Složení receptury REC60-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	398	20 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	598	31 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,6	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,62

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 77, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 77 Vlastnosti čerstvé směsi REC60-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2230
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	90

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 78. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 78 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC60-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2220	2210
f _c [MPa]	27,8	32,6
Hodnota průsaku V5 [mm]	79	
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	83	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	7,7	7,7

3.7.14 Receptura STR60-C16/20

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 79 Složení receptury STR60-C16/20

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
0 - 4 Žabčice	955	49 %
8 - 16 Želešice	398	20 %
4 - 16 Struska Oslavany	598	31 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	3,2	1,1 % m _c
Voda	222	w = 0,77

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 80, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 80 Vlastnosti čerstvé směsi STR60-C16/20

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2200
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	100
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	60

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 81. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 81 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR60-C16/20

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2200	2190
f _c [MPa]	28,4	32,7
Hodnota průsaku V5 [mm]	50	
Úbytek hmotnosti [%]	3,4	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	77	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	8,3	8,6

3.7.15 Receptura REF-C20/25

Tato receptura C20/25 byla bez obsahu kameniva z druhotných surovin a sloužila jako referenční.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 82 Složení receptury REF-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	1044	56 %
Hrubé kamenivo z druhotných surovin	0	
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,8	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,57

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 83, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 83 Vlastnosti čerstvé směsi REF-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2480
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 84. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 84 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REF-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2460	2450
f _c [MPa]	52,6	56,6
Hodnota průsaku V5 [mm]	33	
Úbytek hmotnosti [%]	0,3	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	95	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	4,7	4,7

3.7.16 Receptura REC20-C20/25

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 85 Složení receptury REC20-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	835	45 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	209	11 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,8	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,57

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 86, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 86 Vlastnosti čerstvé směsi REC20-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2410
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	90

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 87. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 87 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC20-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2430	2420
f _c [MPa]	47,8	51,8
Hodnota průsaku V5 [mm]	37	
Úbytek hmotnosti [%]	0,0	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	94	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	5,6	5,4

3.7.17 Receptura STR20-C20/25

Tato receptura byla s 20% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 88 Složení receptury STR20-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	835	45 %
4 - 16 Struska Oslavany	209	11 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	3,1	1,0 % m _c
Voda	200	w = 0,63

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 89, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 89 Vlastnosti čerstvé směsi STR20-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2370
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	120
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	90

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 90. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 90 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR20-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2370	2360
f _c [MPa]	42,8	50,4
Hodnota průsaku V5 [mm]	28	
Úbytek hmotnosti [%]	0,5	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	96	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	5,7	5,7

3.7.18 Receptura REC40-C20/25

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 91 Složení receptury REC40-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	626	34 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	418	22 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,8	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,57

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 92, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 92 Vlastnosti čerstvé směsi REC40-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2340
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	150
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 93. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 93 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC40-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2330	2320
f _c [MPa]	40,5	44,7
Hodnota průsaku V5 [mm]	42	
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	89	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,0	6,1

3.7.19 Receptura STR40-C20/25

Tato receptura byla s 40% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 94 Složení receptury STR40-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	626	34 %
4 - 16 Struska Oslavany	418	22 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	3,3	1,0 % m _c
Voda	210	w = 0,67

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 95, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 95 Vlastnosti čerstvé směsi STR40-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2310
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	120
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 96. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 96 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR40-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2300	2310
f _c [MPa]	39,3	44,3
Hodnota průsaku V5 [mm]	34	
Úbytek hmotnosti [%]	10,6	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	71	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,7	7,2

3.7.20 Receptura REC60-C20/25

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice recyklátem Kuřim, frakce 8 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 97 Složení receptury REC60-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	418	22 %
8 - 16 Recyklát Kuřim	626	34 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	2,8	0,9 % m _c
Voda	180	w = 0,57

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 98, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 98 Vlastnosti čerstvé směsi REC60-C20/25

Objemová hmotnost [kg/m ³]	2270
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	160
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	80

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 99. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

Tab. č. 99 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi REC60-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2280	2280
f _c [MPa]	36,6	39,8
Hodnota průsaku V5 [mm]	45	
Úbytek hmotnosti [%]	0,3	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	78	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	6,9	7,1

3.7.21 Receptura STR60-C20/25

Tato receptura byla s 60% náhradou hrubého kameniva Želešice teplárenskou struskou Oslavany, frakce 4 – 16 mm.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 100 Složení receptury STR60-C20/25

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	315	
0 - 4 Žabčice	820	44 %
8 - 16 Želešice	418	22 %
4 - 16 Struska Oslavany	626	34 %
Plastifikátor Chrysofluid Optima 224	3,5	1,1 % m _c
Voda	222	w = 0,70

Vlastnosti čerstvé betonové směsi jsou uvedeny v Tab. č. 101, srovnání konzistence sednutí kužele je znázorněno na Obr. č. 64.

Tab. č. 101 Vlastnosti čerstvé směsi STR60-C20/25

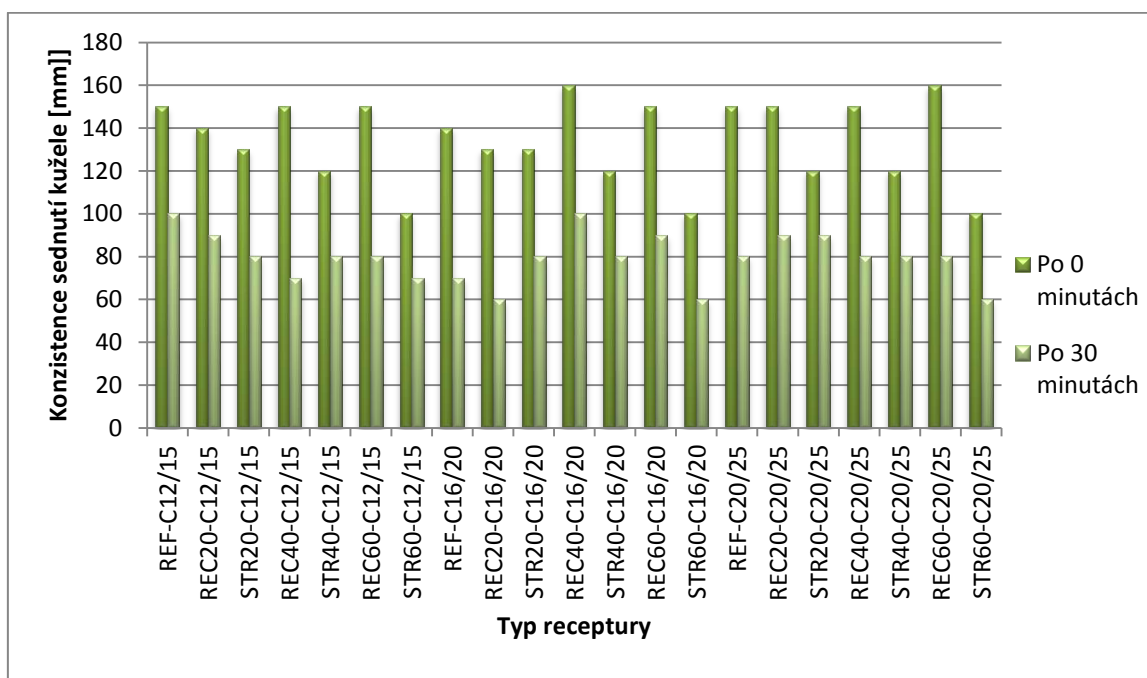
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2240
Konzistence sednutí kužele po 0 min [mm]	100
Konzistence sednutí kužele po 30 min [mm]	60

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Dále byla stanovena vodotěsnost, mrazuvzdornost a nasákavost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 102. Srovnání pevnosti v tlaku je znázorněno na Obr. č. 65, srovnání vodotěsnosti na Obr. č. 66, srovnání mrazuvzdornosti na Obr. č. 67 a Obr. č. 68. a nasákavosti na Obr. č. 69.

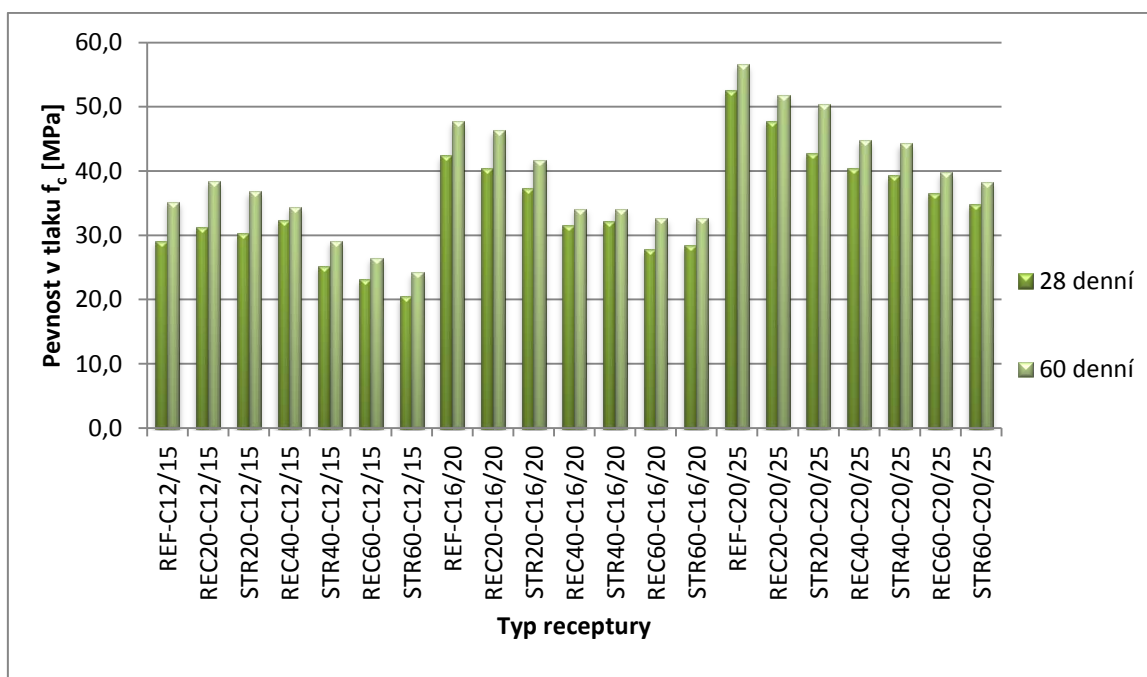
Tab. č. 102 Výsledky zkoušek na zatvrdlé maltě směsi STR60-C20/25

Typ zkoušky	Po 28 dnech	Po 60 dnech
D [kg/m ³]	2230	2220
f _c [MPa]	34,8	38,3
Hodnota průsaku V5 [mm]	39	
Úbytek hmotnosti [%]	19,4	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	-	
Nasákavost [%]	Referenční	Po mraz.
	7,8	-

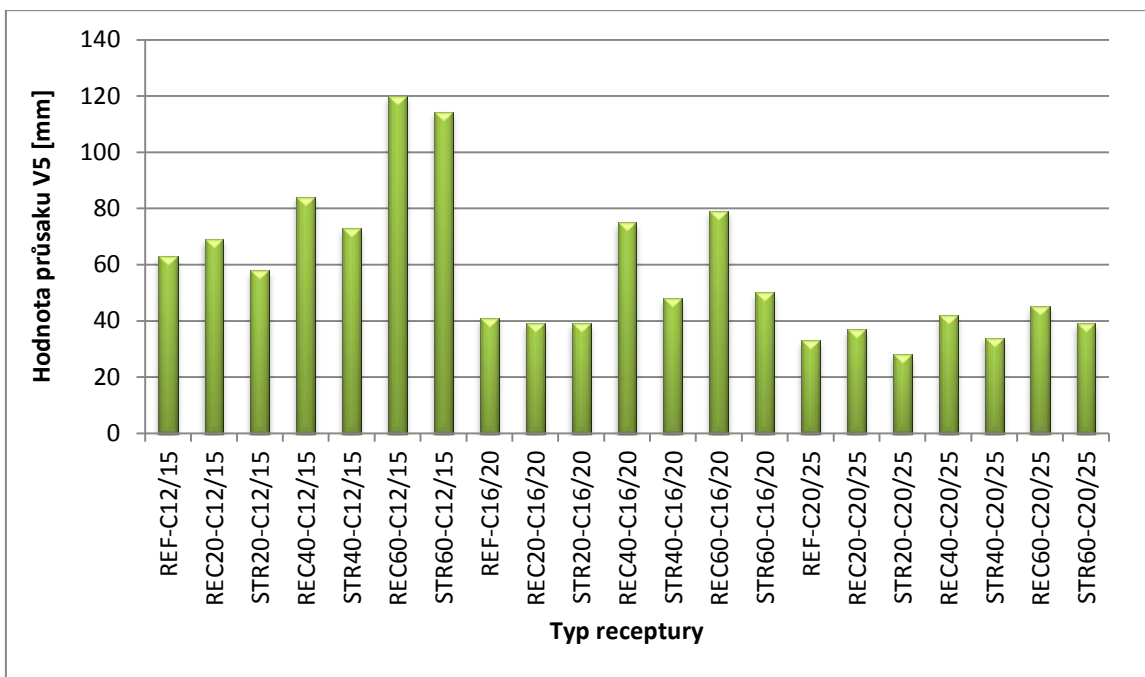
3.7.22 Shrnutí výsledků betonů s náhradou hrubého kameniva



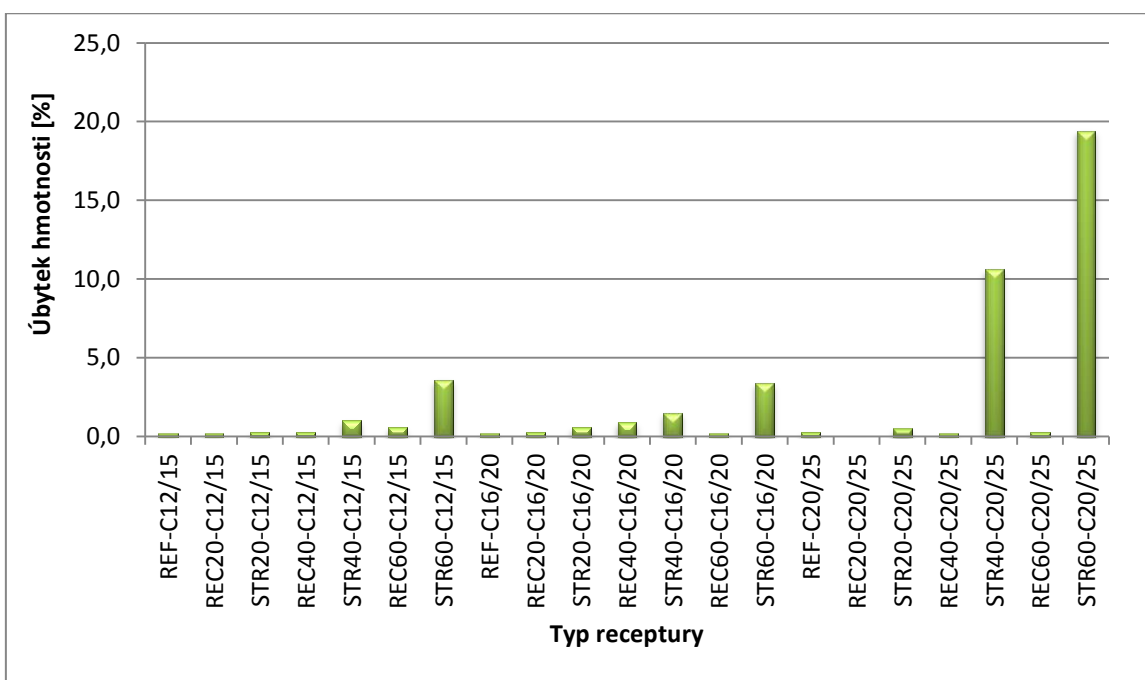
Obr. č. 64 Srovnání konzistence sednutí kužele po 0 a 30 minutách od zamíchání směsi



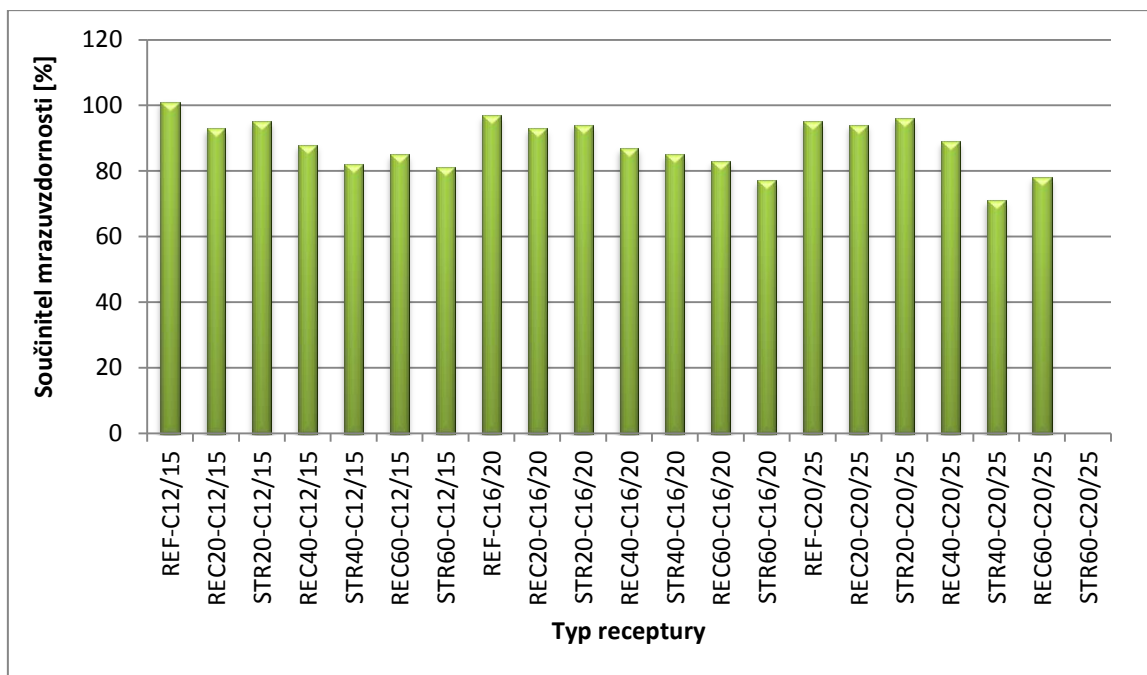
Obr. č. 65 Srovnání pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech zrání betonu



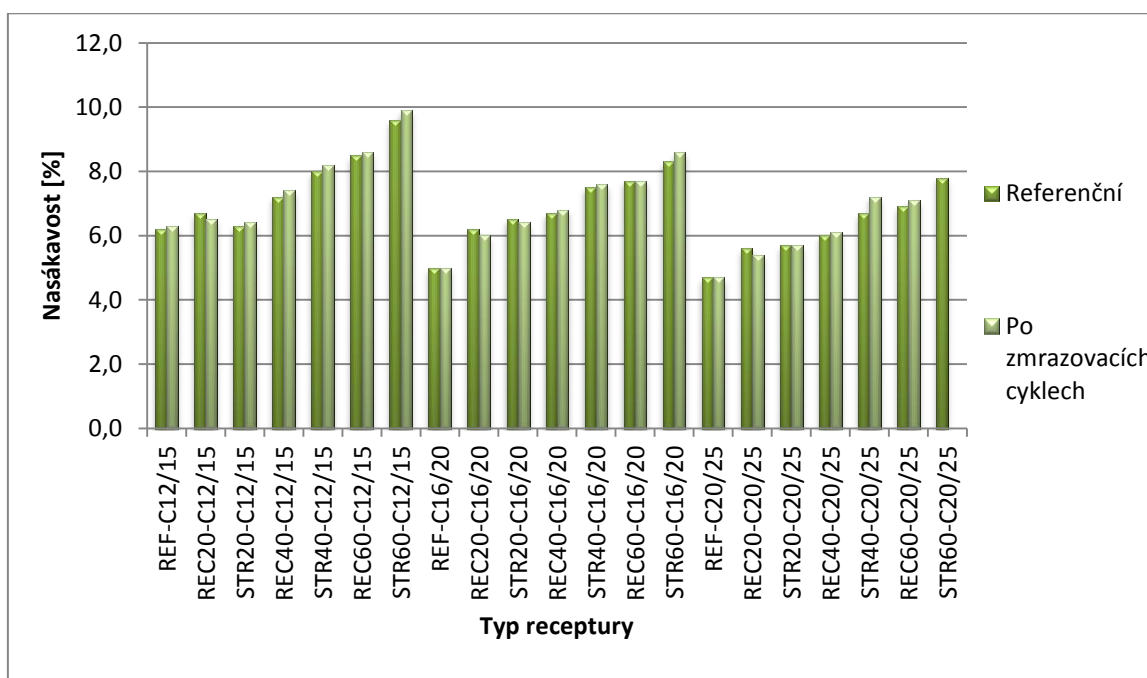
Obr. č. 66 Srovnání vodotěsnosti po 28 dnech zrání betonu



Obr. č. 67 Srovnání úbytku hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti



Obr. č. 68 Srovnání součinitele mrazuvzdornosti při zkoušce mrazuvzdornosti



Obr. č. 69 Srovnání nasákavosti

Shrnutí výsledků:

Zpracovatelnost sednutí kužele čerstvého betonu se u všech vzorků udržovala v třídě S3. U směsí referenčních a u směsí s náhradou hrubého kameniva recyklátem bylo udržení této třídy konzistence bezproblémové. U receptur s náhradou hrubého kameniva teplárenskou struskou vznikaly pro udržení konzistence problémy a bylo zapotřebí zvyšovat s rostoucím množstvím nahrazovaného kameniva dávku vody i plastifikátoru. Díky tomu byla konzistence sednutí kužele v téže třídě dosažena, ovšem hodnoty sednutí

kužele v této třídě byly nižší než u směsí ostatních. Je pravděpodobné, že tento jev byl způsoben pórovitější strukturou struskového kameniva a také zastoupeným podílem frakce strusky 4 – 8 mm v těchto směsích, která u ostatních receptur chyběla. Díky vyššímu množství přidaného plastifikátoru, měla zpracovatelnost směsí se struskou „medovější“ charakter a také pokles zpracovatelnosti po 30 minutách od zamíchání nebyl tak výrazný, jako u zbytku směsí, kde po 30 minutách zpracovatelnost poklesla přibližně na stejnou úroveň, jakou dosahovaly směsi se struskovým kamenivem.

Objemová hmotnost byla vždy nejvyšší u referenčních směsí. Se zvyšující se náhradou alternativním kamenivem objemová hmotnost klesala, kde u struskového kameniva byl pokles hodnot znatelnější, než u kameniva z recyklovaného betonu.

Pevnost betonu v tlaku zaznamenala oproti referenčním směsím pokles hodnot se zvyšující se náhradou kameniva struskou i recyklátem. Mezi 28 a 60 dnem byl viditelný nárůst pevností u všech směsí. U receptury C20/25 dosahovaly pevnosti referenční směsi po 28 dnech zrání téměř 53 MPa. Při ověření možnosti dosažení hranice 45 MPa u betonů obsahujícího recyklát, 20% náhrada hrubého kameniva recyklátem téže receptury tuto hranici překonala a 40% náhrada již této hranice nedosáhla, ale po 60 dnech zrání se jí téměř přiblížila.

Vodotěsnost se s třídou betonu zvyšovala a s nárůstem hodnoty náhrady kameniva snižovala, přičemž u náhrady struskovým kamenivem dosahovala lepších výsledků, než u náhrady recyklátem.

Dále byla sledována mrazuvzdornost, která byla hodnocena součinitelem mrazuvzdornosti a úbytkem hmotnosti zmrazovaných vzorků. Součinitel mrazuvzdornosti zaznamenal pokles hodnot se stoupající náhradou hrubého kameniva recyklátem i struskou, přičemž u recyklátu nespádl pod hranici 75 %, jež je kritériem mrazuvzdornosti betonu. U strusky tohoto propadu zaznamenal a to u receptury C20/25, kde je hrubého kameniva nejvíce. Směsi se struskovým kamenivem s nárůstem náhrady zaznamenávaly obecně vyšší úbytek hmotnosti vzorků. U 60% náhrady receptury C20/25 byl úbytek takový, že již nebylo možné vzorky dále zkoušet na pevnost v tahu ohybem pro stanovení součinitele mrazuvzdornosti. U recyklátu tento problém zaznamenán nebyl a s referenčními záměsemi nabýval úbytek hmotnosti nízkých hodnot.

U zkoušky nasákavosti při stoupající náhradě struskou i recyklátem stoupala i hodnota nasákavosti, kdy u většiny případů u stejné procentuální náhrady měla struska vyšší nasákavost než betonový recyklát. Hodnoty nasákavosti před a po zkoušce mrazuvzdornosti u všech směsí nevykazovaly nikterak významnou odchylku. Pouze u 60% náhrady struskou receptury C20/25 se zmrazované vzorky na nasákavost již netestovaly. Vzorky byly po zkoušce mrazuvzdornosti v takovém stavu, že jejich povrch se při doteku rozpadal a tudíž by hodnocení nasákavosti kvůli možným odchylkám hmotností nebylo relevantní.

3.8 Výsledky měření – KSC I

3.8.1 Receptura KSC-REC

Tato receptura byla navržena s co největším množstvím recyklátu Kuřim, frakce 0 – 32 mm. Aby křivka zrnitosti padla do mezí stanovených pro KSC I, bylo jako kamenivo použito také drobné těžené kamenivo Žabčice a popílek doplňující jemné podíly.

Složení směsi na m³:

Tab. č. 103 Složení receptury KSC-REC

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	110	
0 - 32 Recyklát Kuřim	1432	74 %
0 - 4 Žabčice	387	20 %
Popílek	116	6 %
Voda	139	w = 1,26

Vlastnosti čerstvé směsi z Proctorovy zkoušky jsou uvedeny v Tab. č. 104, průběh Proctorovy zkoušky je znázorněn na Obr. č. 70.

Tab. č. 104 Vlastnosti čerstvé směsi KSC-REC v průběhu Proctorovy zkoušky

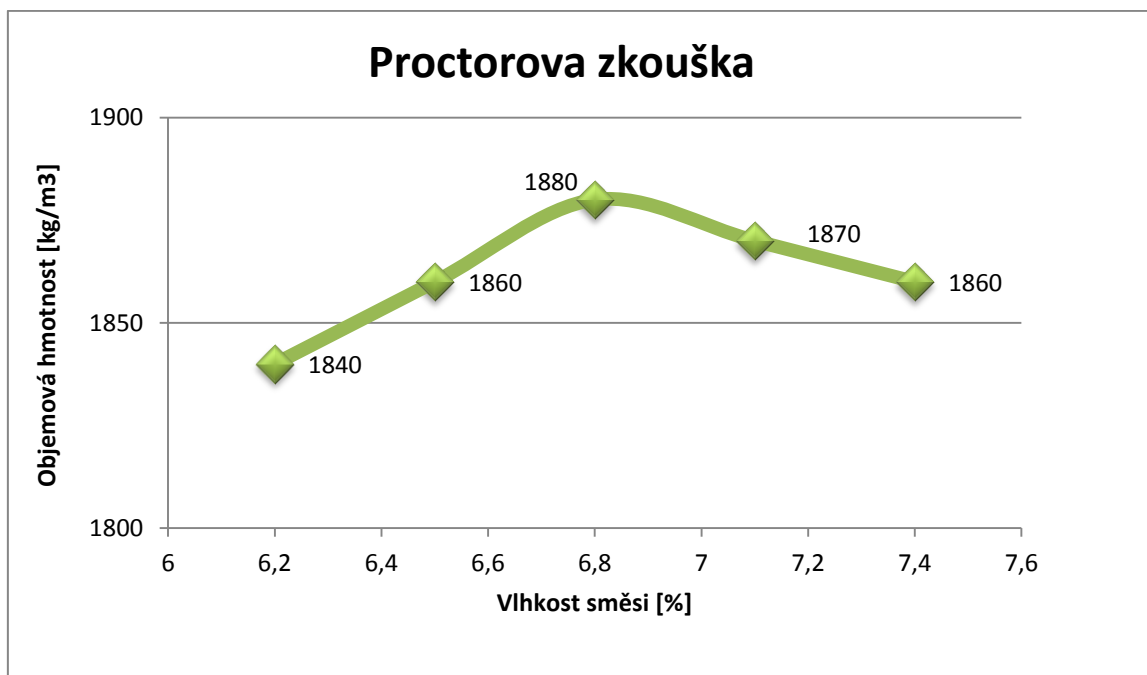
Vlhkost směsi [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
6,2	1840
6,5	1860
6,8	1880
7,1	1870
7,4	1860

Po 7 a 28 dnech byla stanovena objemová hmotnost a pevnost v tlaku. Výsledky jsou uvedeny Tab. č. 105.

Tab. č. 105 Výsledky zkoušek na zatvrdlé směsi KSC-REC

Typ zkoušky	Po 7 dnech	Po 28 dnech
D [kg/m ³]	1900	1890
f _c [MPa]	4,3	6,8

3.8.2 Shrnutí výsledků KSC I



Obr. č. 70 Proctorova zkouška KSC-STR

Shrnutí výsledků:

Nejvyšší objemová hmotnost směsi 1880 kg/m³ byla shledána u vlhkosti směsi 6,8 %, poté již objemová hmotnost měla tendenci klesání. Pevnost v tlaku zaznamenala mezi 7 a 28 dnem nárůst, kdy po 7 dnech dosahovala hodnoty 4,3 MPa a po 28 dnech 6,8 MPa, což neodpovídá minimální požadované pevnosti 8 MPa pro KSC I.

4 ZÁVĚR

Tato práce měla popsat možnosti využití odpadů polystyrenu, kotelní strusky a recyklátu jako kameniva do betonu, uvést jejich technologická omezení a tyto pak experimentálně ověřit.

Poznatky ze zahraničí ukazují, že polystyren se dá použít pro betony jak velmi lehké tepelně izolační, tak i pro betony lehké o střední pevnosti, nebo v omezené míře i pro lehké konstrukční betony. Nejvíce potenciálu má v první zmíněné skupině betonů, kde ovšem při použití většího množství rapidně klesá pevnost betonu v tlaku. Je tedy zapotřebí najít kompromis mezi součinitelem tepelné vodivosti a dostačující pevností betonu pro daný účel.

Problémem polystyrenových zrn je velmi nízká objemová hmotnost a vysoký úhel smáčení jejich povrchu vůči vodě, tudíž vysoká náchylnost k segregaci. Tento problém řeší chemická předúprava povrchu zrn, nebo přidání lepkavé smáčecí přísady do betonu, která zajistí homogenní rozmísení zrn polystyrenu v betonové směsi. Důležitá je také technologie míchání, kdy se pro správné mísení zrn volí pořadí jednotlivých kroků nejprve rozmíchání polystyrenu s částí záměsové vody a smáčecí přísady, poté se přidá cement a nakonec zbývající část vody a kamenivo. Zpracovatelnost polystyrenu zůstává obecně dostačující i při jeho vyšších dávkách, ovšem nedá se měřit klasickými metodami měření konzistence, které jsou citlivé na měrnou tíhu betonu. Testovací metody měření konzistence by měly být tedy upraveny. Deformace betonu s polystyrenem vykazuje odlišné chování, z důvodu pružného charakteru jeho zrn. Toto chování tedy neodpovídá klasickému křehkému lomu, ale je pozvolné.

Možné použití odpadního polystyrenu je především pro výrobu tvárníc, kde se dají uplatnit jeho tepelně izolační vlastnosti. Další možností je jako výplň sendvičových panelů ve formě pěnobetonu, nebo jako litý beton ve formě výplňového materiálu pro střechy, podlahy, bazény, nebo energokanály, kde se dá využít variabilita tvaru tohoto materiálu.

Kotelní struska má díky své pórovité struktuře významný vliv na zpracovatelnost betonu, kdy absorbuje záměsovou vodu ze směsi a zpracovatelnost snižuje. Pro takové betony je tedy problém s určením přesného vodního součinitele. Eliminace tohoto problému je možná při namočení kameniva ve vodě, kdy nasákne do sebe vodu a při míchání směsi již neabsorbuje záměsovou vodu v tak velké míře. Tato vlastnost strusky má ovšem pozitivní vliv na „samoošetřování“ betonu, kdy v průběhu hydratace postupně uvolňuje do betonu předem absorbovanou vodu a zajišťuje lepší podmínky ošetřování betonu.

Použití drobného struskového kameniva způsobuje vyšší míru bleedingu betonu, která eliminuje plastické smrštění betonu. Negativní vliv má struskové kamenivo na pevnost v tlaku, který lze eliminovat přidáním kvalitní příměsi, jako je například mikrosilika. Ze zahraničních studií vyšla eliminace tohoto negativního vlivu nejlépe při složení 60% náhrady kameniva struskou a 10% náhrady cementu mikrosilikou.

Důležitým aspektem je také odolnost vůči agresivnímu prostředí, kdy struskové kamenivo reaguje na různé agresivní prostředí jinak. Je tedy zapotřebí při návrhu betonu se struskovým kamenivem ověřit jeho odolnost vůči různým agresivním činitelům, abychom eliminovali možnost degradace betonu.

Použití struskového kameniva je možné například pro výrobu dílců ztraceného bednění, kde pevnost betonu daného dílce není vlivem jeho následného zalití významně důležitá, ovšem musí být dostačující.

Kvalitu recyklovaného betonu ovlivňují v něm obsažené cizorodé částice. Tyto je před použitím zapotřebí odseparovat a poté může recyklát nahrazovat kamenivo přírodní, u nízkopevnostních betonů do 15 MPa až ze 100 % náhrady. Pro výrobu prefabrikovaných dílců je doporučené použití recyklátu v maximální míře 5 % náhrady přírodního kameniva. Stejně jako u strusky, pokud je recyklát příliš pórovitý, snižuje konzistenci betonu a je zapotřebí kamenivo přidávat do směsi buď nasáklé vodou, nebo upravit technologii míchání směsi rozdělením záměsové vody a předmícháním recyklátu s touto částí vody, nejlépe s obsahem některého mikrofilleru, který zaplní otevřené póry recyklátu.

Pevnost betonu v tlaku při použití recyklátu se obecně snižuje. Lze tento aspekt eliminovat zase použitím mikrosiliky, ale pro praxi je to stále nákladné. Musíme tedy s tímto vlivem počítat a použití recyklátu navrhovat na míru dané pevnosti s ohledem na možnosti tohoto kameniva.

Při použití recyklátu roste propustnost betonu pro agresivní činitele a zvyšuje se tedy riziko narušení jeho trvanlivosti. Ze zahraničních studií vyplynula maximální doporučená náhrada betonu recyklátem 20 % při použití betonu do prostředí s agresivním charakterem.

Mrazuvzdornost betonu s recyklátem se s jeho zvyšující se dávkou snižuje, ovšem vodní součinitel má na mrazuvzdornost betonu vliv znatelně vyšší. Pokud tedy vodní součinitel snížíme, je možné u betonů s hrubou frakcí recyklátu, dosáhnout stejné, nebo podobné mrazuvzdornosti, jako u kameniva přírodního.

Recyklovaný beton lze prakticky použít kamkoliv, pokud daná směs splní patřičné požadavky, jimž je určena. V dnešní době má recyklát největší použití do betonů s nižšími požadavky na pevnosti, zejména pak u zemních těles, jako podklad pod železniční pražce, nebo do směsí pro podkladní vrstvy vozovek. Drobnou frakci recyklovaného betonu je pak možné využít do cementových potěrů.

V experimentální části byly testovány tři typy receptur s obsahem polystyrenu, které byly tříděny dle objemových hmotností betonu a měly dosahovat hodnot 400 kg/m³ pro A-400, 1000 kg/m³ pro B-1000 a 1500 kg/m³ pro C-1500. Až na recepturu B-1000, která měla hodnotu objemové hmotnosti o 240 kg/m³ vyšší, byly objemové hmotnosti přibližně stejné, jako navrhované. Vliv smáčecí přísady na zpracovatelnost směsi měl podstatný vliv, kdy u receptury C-1500 byla dávka nejmenší 0,3 kg/m³ a zpracovatelnost oproti dvěma zbývajícím recepturám byla znatelně snížena.

V souladu s objemovou hmotností byly hodnoty pevnosti v tlaku, kdy u receptury C-1500 byla pevnost v tlaku po 28 dnech nejvyšší 14,7 MPa a u receptury A-400 byla nejnižší 1,0 MPa. Při zjišťování součinitele tepelné vodivosti, byla naměřena u receptury A-400 hodnota 0,108915 W/m·K a u receptury B-1000 hodnota 0,429608 W/m·K. Receptura A-400 vykazovala tedy hodnotu součinitele tepelné vodivosti srovnatelnou například se suchými pórobetonovými tvárnici.

Při zatěžování polystyrenových betonů zvýšenými teplotami byl nejvíce patrný prostup tepla vzorkem u receptury o nejvyšší objemové hmotnosti a nejnižším obsahu polystyrenu C-1500. Naměřená hodnota čidla na odvrácené straně zatěžování byla po 60 minutách 32,4 °C. U receptury s nejnižší objemovou hmotností o nejvyšším obsahu polystyrenu A-400 byla naměřená hodnota čidla nejmenší, tedy 20,6 °C po 60 minutách zatěžování. Nutno však podotknout, že vzorek A-400 vykazoval nejvyšší vizuální poškození a vzorek C-1500 poškození nejnižší. Po rozříznutí vzorků byla patrná hloubka vypařených polystyrenových zrn, která byla nejznatelnější u vzorku receptury C-1500.

Při použití mleté strusky jako aktivní příměsi do betonu vykazovala struska nárůst pevnosti v tlaku mezi 28 a 90 dnem zrání pouze u nižšího měrného povrchu 2300 cm²/g. Téměř žádná ze směsí s náhradou cementu struskou v průběhu doby zrání nedosáhla referenčních pevností. Při zkoušce v tahu za ohybu dosahovaly u obou verzí pomleté strusky referenčních hodnot směsi s hodnotou náhrady 10 a 20 %. Z výsledků je patrné, že vliv této teplotenské strusky Oslavany, jako pomleté aktivní příměsi je nepravděpodobný.

U betonů s náhradou hrubého kameniva struskou a recyklátem, bylo patrné snížení zpracovatelnosti u všech směsí se struskovým kamenivem přibližně na hodnotu sednutí kužele 100 – 120 mm. Také obsah záměsové vody a plastifikátoru byl pro udržení konzistence sednutí kužele v třídě S3 zvyšován se zvyšující se náhradou kameniva struskou o 10 – 50 kg/m³. Je to zapříčiněno pórovitější strukturou kameniva a obsahem frakce 4 – 8 mm, která u ostatních směsí obsažena nebyla. Po 30 minutách hodnoty sednutí kužele měly ztelnější rozdíl oproti původní hodnotě zejména u směsí s recyklovaným betonem, kde poklesly přibližně na stejnou hodnotu, kterou dosahovaly po 30 minutách směsí se struskou. Směsí s betonovým recyklátem problémy se zpracovatelností z počátku neměly a udržovaly hodnotu sednutí kužele podobnou jako referenční záměsi, okolo 150 mm, bez nutnosti přidání záměsové vody. Problém snížení zpracovatelnosti po 30 minutách u recyklovaného kameniva mohl být také zapříčiněn opožděným nasátím části záměsové vody do jeho pórovité struktury.

Pravděpodobně z důvodu zvýšení vodního součinitele vykazovaly betony s obsahem struskového kameniva nejnižší mrazuvzdornost, kde u receptury o nejvyšším obsahu tohoto kameniva STR60-C20/25 byl ztelný úbytek hmotnosti o 19,4 % a vzorky již nemohly vzhledem k jejich značnému porušení podstoupit zkoušku pevnosti v tahu za ohybu pro určení součinitele mrazuvzdornosti a zkoušku nasákavosti. Pod limitní hodnotu součinitele mrazuvzdornosti 75 % se dostala směs STR40-C20/25 o hodnotě 71 %.

U směsí s obsahem recyklátu hodnota součinitele mrazuvzdornosti s nárůstem hodnoty náhrady kameniva také klesala, ovšem ani v jednom případě limitní hodnota překročena nebyla. Obecně směsi s recyklátem měly v celém rozsahu lepší výsledky mrazuvzdornosti a s úbytkem hmotnosti nezaznamenaly žádné problémy a dosahovaly podobných hodnot, jako receptury referenční.

S náhradou kameniva struskou i recyklátem, byl znatelný pokles objemové hmotnosti, který u struskového kameniva dosahoval vyššího rozdílu oproti referenční směsi, než u kameniva z recyklovaného betonu.

Pevnost v tlaku obecně klesala se zvyšující se náhradou přírodního kameniva u obou verzí. Mezi 28 a 60 dnů byl u všech směsí zaznamenán nárůst pevností. Jedním z požadavků bylo ověření možnosti dosažení pevnosti v tlaku 45 MPa pro beton s obsahem recyklovaného kameniva. Referenční receptura REF-C20/25 dosahovala po 28 dnech hodnotu pevnosti v tlaku 52,6 MPa. Receptura s 20% náhradou recyklátem REC20-C20/25 zde dosáhla hodnoty 47,8 MPa, tudíž tato hranice byla překonána. U 40% náhrady recyklátem receptury REC40-C20/25 byla po 28 dnech dosažena pevnost pod touto hodnotou, tedy 40,5 MPa, ale po 60 dnech se k této hodnotě téměř přiblížila a dosáhla 44,7 MPa.

Vodotěsnost se s třídou betonu zvyšovala a s nárůstem hodnoty náhrady kameniva snižovala, přičemž u náhrady struskovým kamenivem dosahovala lepších výsledků, než u náhrady recyklátem.

Z důvodu přesahujícího limitu horní hranice křivky zrnitosti pro KSC I u struskového kameniva, byla navržena směs pro KSC I pouze z recyklovaného betonu. Směs dosáhla u Proctorovy zkoušky maximální objemové hmotnosti 1880 kg/m³, při optimální vlhkosti 6,8 %. Pevnost v tlaku vykazovala po 28 dnech hodnotu 6,8 MPa, což nedosahuje minimální požadované hodnoty 8,0 MPa pro směsi KSC I. Je tedy do budoucna zapotřebí směs s recyklovaným kamenivem navrhnout v jiném poměru složek a pokusit se dosáhnout vyšší objemové hmotnosti a vyšší pevnosti v tlaku.

Využití druhotných surovin jako je polystyren, kotelní struska, nebo betonový recyklát ve formě kameniva do betonu je z hlediska ekonomiky, či ochrany životního prostředí velmi žádoucí. Je ovšem zapotřebí si uvědomit jejich technologická omezení a v co nejvyšší možné míře aplikovat znalosti, jež tato omezení potlačují, nebo dokonce eliminují.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RAVINDRARAJAH, R. Sri a A.J. TUCK. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1994, vol. 16, issue 4, s. 273-277 [cit. 2014-01-12]. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)90039-6](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(94)90039-6). Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946594900396>
- [2] MBADIKE, E.M. a N. N. OSADEBE. Effect of incorporating expanded polystyrene aggregate granules in concrete matrix. In: *Nigerian Journal of Technology* [online]. 2012 [cit. 12.1.2014]. ISSN 1115-8443. Dostupné z: <http://nijotech.com/index.php/nijotech/article/viewFile/570/522>
- [3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [4] SIVA LINGA RAO, N., G. VENKATA RAMANA,, V. BHASKAR DESAI a B. L. P. SWAMY. Properties of Light Weight Aggregate Concrete with Cinder and Silicafume Admixture. In: *International Journal of Earth Sciences and Engineering* [online]. 2011 [cit. 12.1.2014]. ISSN 0974-5904. Dostupné z: <http://ace-klu.in/img/020410438.pdf>
- [5] CHEESEMAN, C.R., A. MAKINDE a S. BETHANIS. Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. In: *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2005, s. 147-162 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.05.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344904001028>
- [6] ANDRADE, L.B., J.C. ROCHA a M. CHERIAF. Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2009, s. 609-614 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808001244>
- [7] PARK, Seung Bum, Young Il JANG, Jun LEE a Byung Jae LEE. An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2009, s. 348-355 [cit. 12.1.2014]. ISSN 03043894. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.054. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389408016981>

- [8] XU, Yi, Linhua JIANG, Jinxia XU a Yang LI. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2012, s. 32-38 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.030. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811004636>
- [9] BABU, K.Ganesh a D.Saradhi BABU. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. In: *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, s. 755-762 [cit. 12.1.2014]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01055-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602010554>
- [10] KUHAIL, Zaher. Polystyrene Lightweight Concrete (Polyconcrete). In: *An-Najah Univ. J. Res* [online]. Gaza, Palestine, 2001 [cit. 12.1.2014]. Dostupné z: <http://scholar.najah.edu/publication/journal-article/polystyrene-lightweight-concrete-polyconcrete>
- [11] CHEN, Bing a Juanyu LIU. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2007, s. 7-11 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061805002333>
- [12] SABAA, Ben a Rasiah SRI RAVINDRARAJAH. Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. In: *Materials Research Society: Fall Meeting* [online]. Boston, USA, 1997 [cit. 12.1.2014]. Dostupné z: <http://services.eng.uts.edu.au/~ravir/Engineering%20Properties%20of%20Polystyrene%20Aggregate%20Concrete.pdf>
- [13] SABAA, Ben a Rasiah SRI RAVINDRARAJAH. Workability assessment for polystyrene aggregate concrete. In: *Proceedings of the COMPAT 99: V IBEROAMERICAN Congress of Building Pathologies, VII Quality Control Congress* [online]. Montevideo, Uruguay, 1999 [cit. 12.1.2014]. Dostupné z: <http://services.eng.uts.edu.au/~ravir/Workability%20Testing%20for%20Polystyrene%20Aggregate%20Concrete.pdf>

- [14] BABU, Daneti Saradhi, K. GANESH BABU a Wee TIONG-HUAN. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. In: *Cement and Concrete Composites* [online]. 2006, s. 520-527 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506000497>
- [15] MILED, K., K. SAB a R. LE ROY. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. In: *Mechanics of Materials* [online]. 2007, s. 222-240 [cit. 12.1.2014]. ISSN 01676636. DOI: 10.1016/j.mechmat.2006.05.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663606000676>
- [16] Ekostyren: Polystyrenbeton. *Ekostyren* [online]. 2013 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <http://www.ekostyren.cz/polystyrenbeton-1>
- [17] Siberian Constructing Technologies: Polystyrene concrete. *Siberian Constructing Technologies* [online]. 2013 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <http://www.sts54.ru/en/polystyrene/>
- [18] Concrete Sandwich Panel Applications: Rigid foam insulation. [Http://msdssearch.dow.com](http://msdssearch.dow.com) [online]. 2013 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08c3/0901b803808c3038.pdf?filepath=styrofoam/pdfs/noreg/179-04047.pdf&fromPage=GetDoc
- [19] BRITO, Jorge de a Nabajyoti SAIKIA. *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste* [online]. New York: Springer, c2013 [cit. 2014-01-13]. Green energy and technology. ISBN 9781447145400.
- [20] LEE, H.K., H.K. KIM a E.A. HWANG. Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete. In: *Waste Management* [online]. 2010, s. 274-284 [cit. 12.1.2014]. ISSN 0956053x. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.043. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X09003973>
- [21] Cinder Blocks. *WiseGeek* [online]. 2013 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <http://www.wisegeek.org/what-are-cinder-blocks.htm#>

- [22] YOUNIS, Khaleel H. a Kypros PILAKOUTAS. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2013, s. 688-701 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813008404>
- [23] SAFIUDDIN, MD., M.A. SALAM a M.Z. JUMAAT. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. In: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2011 [cit. 12.1.2014]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966512600934>
- [24] GRDIC, Zoran Jure, Gordana A. TOPLICIC-CURCIC, Iva M. DESPOTOVIC a Nenad S. RISTIC. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2010, s. 1129-1133 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809004401>
- [25] PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.A., M.C.S. NEPOMUCENO, J.P. CASTRO-GOMES a M.F.C. VILA. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. In: *Construction and Building Materials* [online]. 2014, s. 113-120 [cit. 12.1.2014]. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813009823>
- [26] LEVY, Salomon M. a Paulo HELENE. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. In: *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, s. 1975-1980 [cit. 12.1.2014]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000882>
- [27] TUYAN, Murat, Ali MARDANI-AGHABAGLOU a Kambiz RAMYAR. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. In: *Materials* [online]. 2014, s. 983-991 [cit. 12.1.2014]. ISSN 02613069. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.100. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913007346>

- [28] EBRAHIM ABU EL-MAATY BEHIRY, Ahmed. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. In: *Ain Shams Engineering Journal* [online]. 2013, s. 661-673 [cit. 12.1.2014]. ISSN 20904479. DOI: 10.1016/j.asej.2013.02.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090447913000300>
- [29] VYTLAČILOVÁ, Vladimíra a Jan VODIČKA. *Konstrukční materiál s využitím recyklovaného kameniva*. Česká Republika: 19. Betonářské dny 2012, 2012. ISBN 978-80-87158-32-6.
- [30] BOEHME, Luc, Adam HUBÁČEK, Iveta NOVÁKOVÁ a Rudolf HELA. *Možnosti využití recyklovaného betonu jako náhrady drobného kameniva v cementových potěrech*. Česká Republika: 19. Betonářské dny 2012, 2012. ISBN 978-80-87158-32-6.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
FAST	Fakulta stavební
VUT	Vysoké učení technické v Brně
w	vodní součinitel
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
f_{cf}	pevnost v tahu za ohybu [MPa]
D	objemová hmotnost [kg/m^3]
ρ	hustota [kg/m^3]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]
T_{\max}	maximální teplota [$^{\circ}\text{C}$]
m_c	hmotnost cementu [kg]