



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů
pro CB kryty

Effect of slug-based aggregate substitutes on selected properties of concrete
for concrete pavement structures.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin Ph.D.

Bc. Daniel Bezpalec

Praha, 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bezpalec** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **484396**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra silničních staveb**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a dopravní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty

Název diplomové práce anglicky:

Effect of Slag-based Aggregate Substitutes on Selected Properties of Concrete for Concrete Pavement Structures

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Valentin, Ph.D. katedra silničních staveb FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.09.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Valentin, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ludvík Vébr, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací na téma „Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty“ vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací vedoucího diplomové práce a nezbytné součinnosti technických a vědeckých pracovníků laboratoři při provádění zkoušek. Uvedl jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám žádné námítky pro použití této diplomové práce, či její části.

V Praze dne.....

Bc. Daniel Bezpalec



Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce za rady, připomínky, pomoc a trpělivost při vypracování a Bc. Pavlu Koubíkovi za spolupráci při výrobě a testování v laboratoři. Dále bych chtěl poděkovat Lukáši Joglovi, doc. Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. a pracovníkům experimentálního centra Českého vysokého učení technického v Praze za poskytnutí optimálního zázemí. Poděkovat chci i panu Ing. Stanislavu Bedřichovi ze společnosti STRABAG a.s. za poskytnutí cenných rad a informací ohledně testování betonu a panu Ing. Zdeňku Proškovi, Ph.D. za pomoc při zkoušce zjištění porozity vzorků.



Anotace

Tato diplomová práce se zabývá využitím alternativních materiálů, jako náhrad vstupů při výrobě cementobetonového krytu. Jmenovitě struskového kameniva jako částečné náhrady v receptuře betonu. Díky využití vedlejších produktů z hutního a energetického průmyslu by došlo ke snížení emisí spojených s těžbou a zpracováním kameniva a také ke zmírnění rychlosti zvěšování půdního záboru kamenolomy. Za účelem experimentálního ověření vlastností byly vyrobeny zkušební vzorky, respektive varianty betonu, ve kterých byla vždy jedna frakce kameniva nahrazena struskovým kamenivem. Na vzorcích byl následně sledován vývoj mechanických vlastností po 7, 14, 28, 56 a 90 dnech od výroby.

Klíčová slova

Cementobetonový kryt, struskové kamenivo, vysokopecní struska, ocelářská struska

Abstract

This master's thesis deals with the use of alternative materials as substitute input compounds in the production of concrete pavement. Namely, slag aggregates as a partial or complete replacement in the formulation (mix design). The use of by-products from the energy and metallurgical industry would reduce emissions associated with aggregate mining and processing, as well as decrease the speed of land take by quarries. For experimental validation of properties, test samples were produced in which one aggregate fraction was replaced by slag aggregate. The development of mechanical properties was then monitored on the samples at 7, 14, 28, 56 and 90 days after production.

Key words

Concrete pavement, slag aggregate, blast furnace slag, steel slag



Obsah

1	Úvod	7
2	Kamenivo	8
2.1	Vliv chemických látek v kamenivu	9
2.2	Drcené/těžené kamenivo.....	10
3	Strusky	11
3.1	Vysokopeční struska	13
3.2	Ocelářská struska	17
4	Cementobetonový kryt	21
4.1	Materiál pro výrobu cementobetonového krytu	22
5	Charakteristika použitých materiálů	26
5.1	Voda	26
5.2	Cement	26
5.3	Kamenivo	27
5.4	Přísady.....	29
6	Výroba zkušebních těles	31
7	Experimentální zkoušky	34
7.1	Tvarový index kameniva.....	34
7.2	Nasákavost kameniva a objemová hmotnost	35
7.3	Porozita betonových směsí	37
7.4	Pevnost v tlaku na krychlích a válcích.....	38
7.5	Pevnost v tahu za ohybu	39
7.6	Odolnost vůči CHRL.....	41
8	Výsledky.....	44
8.1	Tvarový index kameniva.....	44
8.2	Nasákavost a objemová hmotnost kameniva	45
8.3	Porozita betonových směsí	46
8.4	Pevnost v tlaku na krychlích a válcích.....	46
8.5	Pevnost v tahu za ohybu	52
8.6	Odolnost vůči CHRL.....	53
9	Závěr.....	56
10	Seznam použitých zdrojů	59
11	Seznam obrázků	64
12	Seznam grafů.....	65
13	Seznam tabulek	65
14	Přílohy.....	67



1 Úvod

Kamenivo patří k základním a nejrozšířenějším stavebním materiálům v celém spektru stavebnictví. Pokud by se prokázaly pozitivní účinky kameniv získaných, jako vedlejší produkty různých procesů, přispělo by to k jejich častějšímu užívání a v důsledku toho i menšímu environmentální zatížení při budování. Snížilo by se tím množství emisí produkovaných těžbou, zpracováním a uskladněním materiálů.

V teoretické části této diplomové práce jsem se rozhodl zabývat obecným popisem vlastností a složení cementobetonových krytů, kameniva a podrobnějším popisem alternativních kameniv na bázi strusky s potenciálním užíváním v silničním stavitelství, se zaměřením na kamenivo z vysokopecní a ocelářské strusky.

V praktické části jsou popsány charakteristické vlastnosti použitých materiálů při výrobě zkušebních těles rozdílných betonových směsí. Dále jsou vysvětleny zkoušky, kterými jsem zkušební tělesa a použitá kameniva podroboval. Jedná se o zkoušky nasákavosti kameniva a betonu, pevnosti betonu v prostém tlaku na krychlích a válcích, pevnosti v tahu za ohybu a odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám.

Zkušební tělesa byla vytvořena dle jedné receptury se čtyřmi modifikacemi. Referenční skupina těles bez modifikace, označena REF, která sloužila pro stanovení běžných hodnot, kde bylo použito klasické drcené kamenivo. Tři skupiny těles s modifikovanou recepturou betonu stejné cílové třídy pevnosti, kde se vždy nahrazovala pouze jedna frakce kameniva za struskové kamenivo, K1 nahrazení frakce 4/8 mm ocelářskou struskou, K2 nahrazení frakce 8/16 mm ocelářskou struskou, K3 nahrazení frakce 4/8 mm vysokopecní struskou. Poslední modifikovaná skupina, označená M, kde se nahrazovala frakce kameniva 8/16 mm struskovým kamenivem ocelářským a část cementového pojiva mletým struskovým pojivem, granulovanou vysokopecní struskou. Frakce byly voleny s ohledem ke skutečnosti, že se zpravidla jedná o ty více žádané, kde může v průběhu roku kolísat i dostupnost produktu.

Cílem této práce bylo vyhodnotit, jak struskové kamenivo různého původu a velikostí přispívá kladně či negativně na celkové vlastnosti a požadavky cementobetonových krytů.



2 Kamenivo

Kamenivo představuje základní stavební materiál v silničním stavitelství. Jedná se o zrnitý materiál, který může být přírodního, umělého nebo recyklovaného původu. Používá se při konstrukci všech druhů vozovkových vrstev s hlavním cílem vytvořit pevnou a odolnou kostru. Z technického hlediska jsou charakteristiky zásadně ovlivněny mineralogickým složením, tj. druhem horniny, ale také způsobem jeho získávání.

Kamenivo rozdělujeme podle objemové hmotnosti na:

- pórovité – do 2000 kg/m^3 , např. pemza, keramzit, cihelný recyklát, vysoce nasákavé;
- hutné – $2000\text{--}3000 \text{ kg/m}^3$, většina přírodních kameniv, vysokopecní struska, betonový recyklát;
- těžké – nad 3000 kg/m^3 , např. čedič nebo ocelářská struska,

dále podle původu:

- přírodní – anorganického původu těžného nebo drceného;
- umělé – vedlejší produkt jiného průmyslu, např. struska, pěnové sklo nebo cíleně vyráběné;
- recyklované – kamenivo, které již bylo dříve využito v konstrukci,

podle vzniku zrn:

- těžné – přírodní kamenivo říčního nebo ledovcového původu vzniklé rozpadem (zakulacené hrany);
- těžné předrcené – drcení těžného kameniva (ostrohranný tvar);
- drcené – kamenivo těžné v povrchových dolech (ostrohranný tvar)

a podle velikosti zrn:

- jemné částice – do $0,063 \text{ mm}$;
- drobné kamenivo – do 2 mm ;
- hrubé kamenivo – do 63 mm ;
- směs kameniva – směs drobného a hrubého;
- šterkopísek – směs těžného přírodního kameniva drobného a hrubého;
- šterkodrt' – směs drceného přírodního kameniva drobného a hrubého;
- lomová výsivka – odpad z drcení lomového kameniva. [1]

Kamenivo je výrobkem, u kterého musí výrobce stanovit počáteční charakteristiky a ověřit předepsané požadavky podle jejich budoucího účelu zkouškami typu (Type Tests). [1]



Počátečními zkouškami typu se zjišťují:

- index tvaru;
- zrnitost;
- kvalita jemných částic;
- otlukovost;
- nasákavost;
- trvanlivost síranem hořečnatým;
- chemické složení;
- objemová hmotnost. [1]

V průběhu výroby se kamenivo kontrolně zkouší a sledují se shody vlastností s požadavky zkoušek typu. Četnost zkoušek je uvedena v normách. [1]

2.1 Vliv chemických látek v kamenivu

2.1.1 Síranová koroze

Betonová konstrukce může být vystavena vnější nebo vnitřní síranové korozi. Záleží, které sírany konstrukci ohrožují. Při vnější korozi je zdrojem síranů okolní prostředí. Při vnitřní korozi je zdrojem síranů buď kamenivo nebo nevhodná záměsová voda. [2]

Jde o chemickou degradaci, kde vzniká reakce mezi sírany a hydraulickými složkami betonu, při které dochází k expanzi produktů a krystalových solí. Následkem jsou mikrostrukturální poškození, rozklad cementových materiálů, nárůst objemu, ztráta pevnosti a celková degradace betonu. Výše uvedené vede ke snížené životnosti a spolehlivosti betonové konstrukce. [2]

Síranové ionty reagují s hydratovaným cementem a vytvářejí zejména sádro a ettringit, které jsou mnohem objemnější. Dochází tak k expanzi, objemové nestabilitě a praskání betonu. [2]

Mezi faktory, které ovlivňují síranové koroze, patří vodní součinitel, mineralogické složení kameniva, složení cementu nebo i přidání hydratujících látek. S velkým vodním součinitelem je beton pórovitější a tím se mohou sírany v betonu lépe pohybovat. Přidáním do betonu hydratující látky jako je vysokopecní struska, křemičitý úlet nebo popílek, dochází ke zlepšování odolnosti vůči působení síranů. Přidané látky spotřebovávají přebytečné ionty vápníku, omezují tím tvorbu hydroxidu vápenatého a následnou tvorbu sádry. [2]



2.1.2 Alkalicko-křemičitá reakce

ASR neboli alkali-silica reaction je výsledkem reakce mezi alkáliemi (zásadami) v pórovém roztoku betonu a reaktivními minerály (SiO_2 nebo křemičitany) v kamenivu. Alkálie se do betonu dostanou cementem nebo jako součást chemických rozmrazovacích látek. SiO_2 reaguje s kationty draslíku, sodíku a vápna a vytváří alkalicko-silikátové gely (ASG). Vzniklé gely mají schopnost absorbovat vodu a rozpínavou silou působit na beton. Svou objemovou nestálostí gely způsobují mikrotrhliny, husté sítě trhlin či odlamování a opadávání konstrukce. [3]

Na rozpustnosti křemene se podílí řada vnějších faktorů jako pH, teplota nebo velikost zrn. Sodné a draselné chloridy zvyšují rozpustnost 5-8krát. Naopak kationy hliníku, železa nebo zinku účinek zbrzdí. Stupeň ASR se kvalifikuje podle měrné délky trhlin a objemu alkalicko-křemičitých gelů. Křemičitany a křemičité agregáty se mohou projevit už po pěti letech. [3]

Jelikož se křemičitany nachází v každém kamenivu, musí se před použitím provést geologicko-petrologický a technologický rozbor ložiska kameniva. K omezení výskytu reakce přispívá snížení množství alkálií, snížení vlhkosti, používání nereaktivního kameniva nebo minerální příměsi. [3]

2.2 Drcené/těžené kamenivo

2.2.1 Drcené kamenivo

Jedná se o tvarově nepravidelná, ostrohranná zrna. Získ kameniva probíhá nejčastěji povrchovou těžbou v lomech pomocí odstřelů horniny. Vzniklý rozval po odstřelu je odvezen k drcení v drtičích, které podle způsobu práce rozdělujeme na drtiče čelistové (primární), odrazové (sekundární) a kuželové. Hrubozrnné kamenivo se získá po primárním drcení a jemnozrnné po primárním a sekundárním drcení, tedy dvou způsobech drcení za sebou. Někdy se používá i tzv. praní kameniva, kde se z povrchu zrn odstraňují hlíny, jíly a drobné částice, které zhoršují povrchové vlastnosti kameniva. Kamenivo se dále třídí na sítích a vznikají podle požadavků úzké a široké frakce. [1]



2.2.2 Těžené kamenivo

Kamenivo kulovitěho tvaru se získává povrchovou těžbou z ložisek na povrchu nebo pod hladinou vody. Rozdělujeme těžbu na suchou nebo z vody. Po vytěžení se kamenivo tvarově nijak neupravuje, narozdíl od drceného, a je pouze roztříděno na sítěch do poptávaných frakcí. Těžené kamenivo má oproti drcenému horší technické vlastnosti, ale je méně finančně nákladnější. [1]

3 Strusky

Struska je hrubozrnný materiál vznikající při vulkanické činnosti, pyrometalurgických zpracování různých rud nebo jako odpad v energetickém průmyslu při spalování pevných paliv. Zájem o strusku celosvětově roste. Ročně se vyrobí strusky v objemu několik stovek miliónů tun. Výzkumy se obecně zaměřují na ekologické problémy s ní spojené, jakožto zvětrávání struskových skládek, ale taky na její skvělý potenciál ve stavebnictví. [4]

Její chemické a mineralogické složení ovlivňuje několik faktorů: jakým procesem byla struska vytvořena a které materiály hráli roli při jejím vytváření. Podle jejích vlastností s ní pak bude nakládáno buď jako s odpadem, nebo jako s ceněnou opětovně využitelnou surovinou [4].

Struska se obecně skládá ze směsi oxidů kovů, oxidu křemičitého a v některých případech může obsahovat i sulfidy a neelementární kovy. Mezi její hlavní složky patří oxidy vápníku, hořčíku, křemíku, železa, hliníku a v malém množství fosforu a manganu. Specifické vlastnosti se odvíjejí od množství použitých surovin při výrobě a způsobu výroby. Dá se předpokládat větší zastoupení oxidů železa u ocelářské strusky a větší dominanci oxidu hořčíku a hliníku u strusky získané při tavení železné rudy, neboli označované též jako vysokopecní struska. [4]

Vlastnosti dodávaných surovin vždy deklaruje výrobce strusky. [22]

Mezi hlavní problém užívání strusky ve stavebnictví řadíme její objemovou nestálost. Kvůli svému chemickému složení nám při výrobě strusky a během jejího života vznikají různé reakce, které její objem zvyšují, což vede dále k lokálním či souvislým poruchám vozovky a zemního tělesa. K první reakci může docházet v čerstvě vytvořené strusce, kde mohou probíhat chemické reakce charakteru chemického rozpadu, které zvyšují objem o 30 %. K dalšímu zvětšení objemu dochází, pokud se



zásaditá struska pomalu ochlazuje. Struska totiž přeměňuje svoji stavbu na krystalický stav u kterého hrozí silikátový rozpad, přeměna beta-sirouhlík na gama-sirouhlík, a zvětšení objemu o 10 %. Dalšími důležitými rozpady jsou železnatý a manganatý rozpad. U strusky ve vlhkém prostředí dochází k oxidaci železa a k přeměně sulfidu železnatého (FeS) na sírany železité a železnaté, což vede ke zvětšení objemu produktu až o 40 %. U manganatého rozpadu je původ reakce podobný, zde se ovšem mění sulfid manganatý (MnS) na hydroxid manganatý (Mn(OH)₂). [22]

Nebezpečí rozpadu granulované strusky spočívá v jejím pomalém uskutečnění. Obecný postup eliminace dlouhodobého rozpadu je její uskladnění na minimálně 2 roky. Tento postup však nezaručuje dlouhodobou stabilitu pro všechny případy. Vlastnosti dodávaných produktů vždy deklaruje výrobce strusky. [22]

Při tvorbě strusky jako druhotného materiálu v hutním průmyslu ji dělíme na vysokopecní a ocelářskou, viz kapitoly níže. Ocelářské a vysokopecní strusky při užití na pozemních komunikacích nalezneme v konstrukčních vrstvách nebo při zlepšení zemního tělesa. Před užitím musí být stanoveno její chemické složení normovými postupy dle ČSN EN 1744-1.

Světová ocelářská asociace (WSA) odhaduje na 1 tunu oceli 200 kg použitelné strusky při výrobě EAF a 400 kg při BF nebo BOF. [5] Minulý rok podle dat amerického statistického úřadu bylo vytvořeno 1300 miliónů tun surového železa a 1900 miliónů tun surové oceli na světě [6]. Z jednoduchého přepočtu nám vychází, že bylo vytvořeno cca 520 milionů tun vysokopecní strusky a 380 až 760 milionů tun strusky ocelářské.

Roční spotřeba uhlí v energetickém průmyslu každoročně stoupá. Podle různých odhadů stoupne spotřeba uhlí v roce 2035 z 6,4 miliardy tun na 7,1 miliardy tun, což povede k nárůstu odpadního materiálu strusky a popílku. [7] V dnešní době je ročně vyrobeno zhruba 750 miliónů tun popílku a strusky touto metodou. [8]

Výzkum enviromentálních aspektů strusky je důležitým tématem opětovného použití, recyklace nebo sanace. Vysokopecní nebo železité strusky mají schopnost neutralizovat kyseliny, neuvolňují se do okolí a tím jsou atraktivní pro stavební průmysl. Naproti tomu neželezité strusky uvolňují stopové prvky, a proto se častěji ukládají na skládky nebo se užívají k sekundárnímu získání kovů. [4]



Tab. 1 – Množství vedlejších produktů při výrobě oceli [5]

Produkt	kg/t oceli
Vysokopecní struska (BF)	275
Železářský prach a kal (BF)	126
Ocelářská struska (BOF)	20
Ocelářský prach a kal (BOF)	3
Ocelářská struska (EAF)	169
Ocelářský prach a kal (EAF)	13

Tab. 2 – Procentuální využití strusky ocelářské a vysokopecní v Evropě [5]

Obor	Využití [%]
Cement, přísady do betonu	46,8
Stavby pozemních komunikací	29,8
Hutní průmysl	6,8
Skládka	5,7
Ostatní	4,4
Meziskládka	4,3
Hnojivo	1,2
Vodohospodářské stavby	1,0



Obr. 1 – Vzduchem chlazená vysokopecní struska [9]



Obr. 2 – Granulovaná vysokopecní struska [9]



Obr. 3 – Vzduchem chlazená ocelářská struska BOF [9]

3.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je nekovový materiál vznikající při zpracování železa ve vysokých pecích. Vzniká z odpadů, které zahrnují zbytky popela z koksu, hlušinu z rud a vápence, který na sebe váže síru. [10]

Struska tvoří zhruba 35 % obsahu taveniny v peci. Díky své všestrannosti je velice cenným vedlejším produktem. [11]

Dříve byla struska pouze jako odpadový produkt vylévána na haldy. Dnes se vysokopecní struska dále zpracovává. Struska s vyšším obsahem MgO je nerozpadavá a zpracovává se na kamenivo použitelné samostatně nebo jako plnivo do betonu. Struska s vyšším obsahem CaO se zpracovává na granule a je použita jako hydraulická příměs do betonu nebo hlavní složka při výrobě cementu. Ne každá struska se tedy dá všude využít. [12][10]



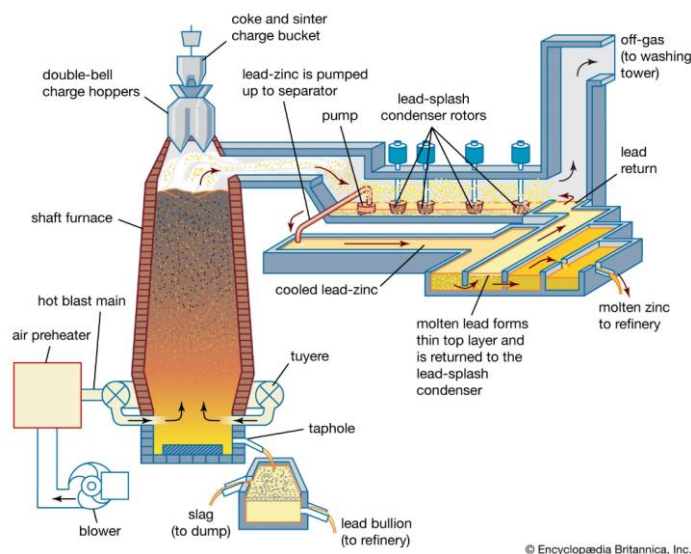
3.1.1 Zisk strusky při výrobě železa

Surová ruda se společně s tavidly a přísadami vkládá do pece shora. Železná ruda, která se dnes zpracovává, obsahuje velké množství Fe_2O_3 a Fe_3O_4 . V peci se tyto složky pomalu rozkládají a přecházejí v jednodušší nižší oxid železa FeO . Pohybem surovin od shora dolů se zvětšuje jejich teplota a urychluje se reakce oxidů a vznik strusky. Tavidla a přísady přispívají ke snížení bodu tavení, zlepšení vázaní síry na strusku a tekutosti surového železa. Tavenina a struska se vylévají u dna pece, zatímco vzniklé horké plyny jsou odváděny víkem pece k další úpravě. [13]

Struska se rozděluje na horní, ta která plave na horním povrchu a odpouští se samostatně, a spodní, která vytéká z pece společně s tekutým železem promíchaná. Proto se tavenina vylévá do železového žlabu, který musí být dostatečně dlouhý k uklidnění toku materiálu a tím dochází k oddělení těžšího železa od lehké strusky. Při vypouštění z pece má teplotu v rozmezí 1200–1450 °C. K definitivnímu oddělení dochází na konci v sifonovém ukončení, kde lehčí struska odtéká horem do struskových pánví a těžší železo spodem do pojízdných vozů. [10]. Struska je pak dále přesunuta buď ke granulaci, nebo do otevřené jámy.

Vzduchem chlazená struska vznikala v otevřených jámách, kde ji ochlazoval okolní vzduch. Kusová struska, která se z jámy odtěžila, se dále rozlamovala a drtila jako hrubé kamenivo [13] Vznikaly krychlové částice buď s porézním povrchem, nebo až se sklovitě hladkým. [11]

Granulace strusky probíhala rychlým zchlazením vodou. Buď silným proudem vody, nebo ve vychlazovacích jámách. V prvním případě je struska v pánvích co nejrychleji dopravena na granulaci, malým jeřábem se pánev pomalu překlápí a struska pomalu teče do vysokotlakého proudu studené vody. Prudkým zchlazením vznikají struskové granule o velikosti 5 mm s hlubokými otevřenými póry, která voda odnáší na odvodňovací pole, kde voda odtéká zpět k čerpadlům. Tam se struska sesbírá a přesouvá na dopravním páse do zásobníků. Ve druhém případě jsou budovány zchlazovací jámy, které jsou asi 2 m hluboké, 10 m široké a 30 m dlouhé se zpevněnými stěnami. Do jámy se vyklápějí pánve s tekutou struskou, která se dále chladí vodou. Zchlazená struska se vybírá rypadlem a odváží do zásobníků. Po granulaci strusky se následně struska rozemele na prášek. [10]



Obr. 4 – Schéma tvorby železa ve vysoké peci [14]

3.1.2 Chemické složení vysokopecní strusky

Vysokopecní struska je mírně zásaditá a na stupnici pH se pohybuje v rozmezí 8–10. Přestože obsahuje malé procento síry (1–2 %), výluh nepředstavuje riziko koroze ocelové výztuže v betonu ze struskového kameniva nebo cementu. [11].

Chemické složení strusky závisí na materiálovém složení taveniny v peci. Struska obsahuje obecně čtyři hlavní oxidy a to vápna (CaO), hořčíku (MgO), křemíku (SiO_2) a hliníku (Al_2O_3). Ty tvoří zhruba 95 % celkového obsahu. Ve zbylých 5 % se vyskytuje síra, železo, mangan a alkálie. Při tavení železné rudy ve vysoké peci nelze chemické složení kontrolovat. To závisí na dostupných surovinách a efektivnosti výroby železa. Avšak lze složení strusky lehce modifikovat metodou chlazení. Pomalu chlazené vysokopecní strusky s vysokým obsahem vápna mají tendenci tvořit dikalciumsilikát, který při zchlazení na okolní teplotu zvětšuje svůj objem a tím mělní strusku na prášek. [11]

Vysokopecní struska, která se v tekutém stavu po vylití z pece rychle ochladí vodou, vytváří sklovitý, amorfni materiál. Při pomalém ochlazování vzduchem dochází ke krystalizaci minerálů. Chemické složení strusky je významný faktor pro její budoucí použití. Například struska s vysokým obsahem železa a současně vhodnými hladinami ostatních složek tvoří sloučeniny, které snadno reagují s vodou, což přispívá k rozpadu strusky. V minulosti se síra dlouhodobě brala jako nežádoucí složka, ale žádný výzkum neprokázal její negativní vliv na výkonnost strusky. Dochází pouze k výluhům síry ve špatně odvodněných podmínkách, které způsobují nepříjemný zápach. [11]



Tab. 3 – Rozsah chemického složení vysokopecní strusky v % [11]

Složka	Vysoká pec
CaO	30,9–46,1
SiO ₂	30,5–40,8
Al ₂ O ₃	5,9–17,6
MgO	1,7–17,3
FeO	0,1–4,7
Fe ₂ O ₃	1,5–3,8
MnO	2–8

3.1.3 Užití vysokopecní strusky ve stavebnictví

Historie užití strusky sahá do římské doby před 2000 lety, kde se našly záznamy o používání rozlámané strusky z železáren té doby při stavbě základů staveb. Jinak bylo použití strusky sporadické až do začátku 20. století. Tehdy se začala používat jako kamenivo do betonu a v asfaltových vrstvách. V posledních letech se zvýšila snaha o recyklaci a využití velkého množství strusky, která každoročně vzniká. Dnes se vysokopecní struska používá v různých odvětvích. [11]

Hlavní rozvoj strusky je v použití jako kameniva, pro výrobu cementu nebo jako zemědělské aplikace. Vysoké úrovně využití strusky bylo dosaženo konkurenčním prostředím, snahou o začlenění vedlejších výrobků do využitelných procesů a také pro její výkonnost, protože umožňuje dosáhnout stejného nebo dokonce lepšího výkonu za srovnatelnou či nižší cenu. [11]

V současné době se mletá granulovaná vysokopecní struska používá v širokém spektru jako náhrada cementu v betonu po celém světě. Beton obsahující mletou vysokopecní strusku má nižší počáteční pevnost, delší dobu tuhnutí, ale daleko vyšší pozdější pevnost, hustší mikrostrukturu a tím pádem i lepší trvanlivost v porovnání s portlandským cementem. Výzkumy ukázaly, že cementy alkalicky aktivované z vysokopecní strusky bez slínku mohou mít lepší trvanlivost a hustší strukturu než portlandský cement. [15]

Vzduchem chlazená vysokopecní struska má rozsáhlé využití. Může se použít jako jakýkoliv typ stavebního kameniva, k výrobě cementu, skla a minerální vlny. Hlavní použití je zejména v neupraveném stavu jako kameniva v podkladních vrstvách, vrstvách stmelených cementem nebo asfaltem. Struska se používá stejně jako drcené



kamenivo. Má požadovanou texturu a tvar, které poskytují dostatečnou soudržnost, objemovou stabilitu, nižší objemovou hmotnost a neplastické jemné částice. Velký obdiv si struska získává jako plnivo v asfaltovém betonu jednak kvůli vlastnostem zmíněných výše, ale dále také kvůli svým protismykovým vlastnostem povrchu hotové vrstvy. A jelikož je alkalická, má lepší vlastnosti smáčivosti asfaltovým pojivem. Při použití jako plniva v betonu, poskytuje skvělou vazbu s cementem, dobrou pevnost betonu, požární odolnost, která je větší než u použití klasického kameniva a nižší objemovou hmotnost betonu, až o 160 kg/m^3 . Betony se obvykle vyrábějí se struskovým hrubým kamenivem a jemným přírodním. [11]

Granulovaná mletá struska se používá v cementech nebo jako cementová složka. Na konci 19. století byly vyrobeny první cementy obsahující strusku a v polovině 20. století se začala běžně užívat jako samostatný jemně mletý anorganický materiál přidávaný s portlandským cementem do betonu (aktivní příměs). Hlavní využití má jako složka „struskového“ cementu. Struskové cementy se využívají kvůli několika výhodným charakteristikám. Mají nízké hydratační teplo, beton má vyšší trvanlivost kvůli nízké kapilární pórovitosti a je odolný vůči chloridům a síranům. Beton je odolnější vůči alkalicko-křemičité reakci a je lépe zpracovatelný. Tyto kladné vlastnosti upřednostňují použití struskových cementů nebo směsí s portlandským cementem v situacích, kde je zapotřebí vysoká trvanlivost. [11]

V České republice podléhá použití granulované vysokopecní strusky do betonu normě ČSN EN 15167-1, ČSN EN 14227-2. Struskové kamenivo podléhá technickým podmínkám TP 138 a hlavně požadavkům z normy ČSN EN 13242+A1.

3.2 Ocelářská struska

Ocelářská struska vzniká jako vedlejší produkt přeměny surového železa na ocel v běžné kyslíkaté peci nebo při tavení ocelového šrotu v elektrické obloukové peci. [15]

Strusky dělíme na:

- ocelářská struska BOF (basic oxygen furnace) – použita kyslíkatá pec (zásaditá struska);
- ocelářská struska EAF (electric arc furnace) – použita elektrická oblouková pec;
- ocelářská pánevní struska (ladle slag) – zušlechťování oceli v pánvi. [12] [15]

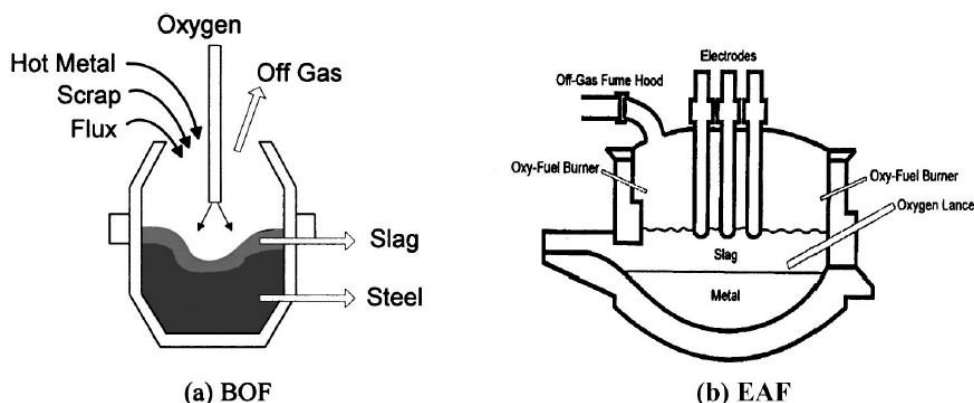


3.2.1 Zisk strusky při výrobě oceli

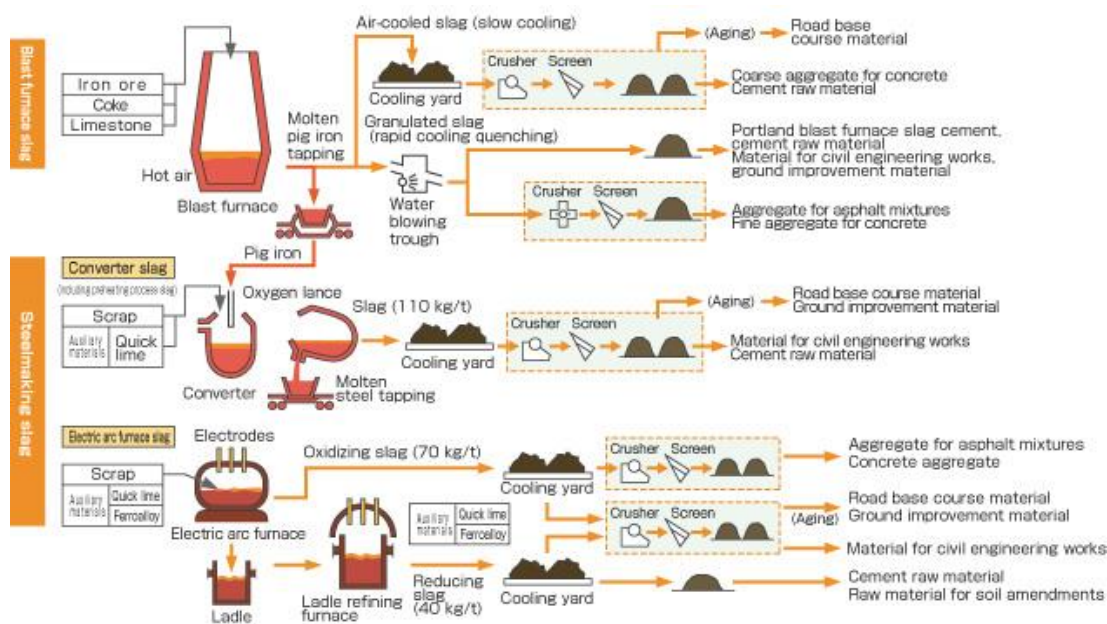
Při metodě BOF (basic oxygen steelmaking) se v peci mísí roztavené surové železo, šrot a tavidla, která se skládají z vápna (CaO) a dolomitického vápna. Dále se vhání trubici pod vysokým tlakem kyslík, který na sebe váže nečistoty a odvádí je. Ty se skládají z uhlíku v plynné podobě jako oxid uhelnatý, manganu, fosforu a některých druhů železa v kapalně fázi, které se mimo to vážou i s vápnem a dolomitickým vápnem a vytváří tak strusku. Díky rozdílným objemovým hmotnostem tekutá struska plave na roztavené oceli, tím pádem může být ocel vylita samostatně do pánve. Struska po odlití oceli zůstává v peci a je odčerpána do samostatného struskového kotle. [15]

Na rozdíl od BOF se při EAF nepoužívá roztavené surové železo, ale studený ocelový šrot, který by se jinak těžce jinde využil a ohrožoval životní prostředí. Používá se konstrukce tvaru kotle s odnímatelným víkem. Skrz víko prochází grafitové elektrody, které vedou do pece elektrický proud a vytváří tak elektrický oblouk v peci. Teplo vznikající od oblouku roztaví šrot. Během tavení se do pece přidávají další kovy (feroslity), které upravují výsledné chemické složení, kyslík, který stejně jako při metodě BOF na sebe váže nečistoty, a volné vápno (CaO). Po vyčištění a zkontrolování chemického složení se kotel nakloní, aby se vylila struska plavající na hladině roztavené oceli. Ocel se odčerpá do pánve, kde se dále zušlechťuje, za účelem odstranění příměsí, které ještě ocel obsahuje nebo přidání slitin. Toto se nazývá zušlechťování v pánvi, které může po celou dobu probíhat v transportní pánvi. Během rafinace v pánvi se přidáváním tavidel dále vytváří struska, tu nazýváme obecně pánevni a svými vlastnostmi se zásadně liší od strusky z kotle. [15]

Získaná roztavená struska se musí pro další zpracování zchladit. K tomu se používá několik metod jako přirozené chlazení vzduchem, chlazení proudem vody, kalení ve vodě nebo kalení vzduchem. Přirozeně vzduchem chlazená struska se skládá většinou z velkých kusů a prachových částí. Při chlazení vodou se roztavená struska nalije do jámy, zchladí se vzduchem a pak se na její povrch stříká voda. Vlivem teplotních rozdílů se ocelová struska sama rozpadá na malé kusy. [15]



Obr. 5 – Schéma výroby oceli [15]



Obr. 6 – Schéma výroby vysokopecní a ocelářské strusky [9]

3.2.2 Chemické složení ocelářské strusky

Ocelářská struska se převážně skládá z oxidu vápníku (CaO), hořčíku (MgO), křemíku (SiO₂) a železa (FeO). Při výrobě oceli s nízkým obsahem fosforu může dosahovat obsah oxidů ve struskách rozmezí 88–92 %, proto lze jednoduše strusku reprezentovat jako kvartérní systém CaO-MgO-SiO₂-FeO. Reprezentace těchto oxidů ve strusce je vysoce variabilní i v jednom závodu, závisí na surovinách, typu vytváření oceli, podmínkách pece a způsobu chlazení strusky. [15]



Tab. 4 – Rozsah chemického složení ocelářské strusky v % [15]

Složka	Kyslíkatá pec	Elektrická oblouková pec (uhlíkatá ocel)	Elektrická oblouková pec (slitina/nerez)	Zušlechtnění v pánvi
CaO	30–55	35–60	39–45	30–60
MgO	5–15	5–15	8–15	1–10
SiO ₂	8–20	9–20	24–32	2–35
FeO	10–35	15–30	1–6	0,1–15
Al ₂ O ₃	1–6	2–9	3–7,5	5–35
MnO	2–8	3–8	0,4–2	0–5

3.2.3 Užití ocelářské strusky ve stavebnictví

Mnohé výzkumy ukázaly vlastnosti ocelářské strusky vhodné pro použití v cementech, přesto se struska ve většině zemí používá pouze jako plnivo v asfaltových směsích nebo se nepoužívá vůbec. Použití strusky by však mělo být prioritou z technického, ekonomického a enviromentálního hlediska. [15]

Největšími problémy ocelářské strusky je její objemová nestabilita a pomalý a dlouhodobý rozpad, které jsou zaviněny hydratací volného vápna (CaO), hořčíku (MgO), karbonatů hydroxidů vápenatých a hořečnatých, polymorfni přeměna křemíků a reakcí hliníku. K objemovým změnám velkým podílem přispívá svou přítomností sklovitá fáze, která mimo to záporně ovlivňuje výše uvedené hydratace a rozpad strusky. [12]

Před užitím ve stavebnictví musí být ocelářské strusce laboratorně posouzeny vlastnosti z důvodu vysoké koncentrace CaO, viz tab. 4 výše. Použití jako kameniva ve stmelených a nestmelených vrstvách podléhá podmínce obsahu volného vápna (CaO) pod hranicí 4,5 %, kterou stanovilo v technických podmínkách TP 138 Ministerstvo dopravy. Moderní ocelářské strusky mají díky procesům čištění při výrobě nižší obsah MgO a CaO. Ty fungují na principu vhnání kyslíku a suchého písku do tekuté strusky. [12]



4 Cementobetonový kryt

Cementobetonový kryt je vrstva tvořená betonovou směsí přenášející dopravní zatížení a odolávající negativním vlivům prostředí. Díky své vysoké pevnosti, trvanlivosti, odolnosti proti tvorbě trvalých deformací a vysokému modulu pružnosti přispívá k vysoké životnosti a celkové únosnosti vozovky. Proto se tyto kryty typicky vyskytují v tuhých vozovkách s vysokým dopravním zatížením, jako jsou dálnice, rychlostní silnice a letištní plochy. [1]

Velkou nevýhodou tuhých vozovek je nutnost vytváření smršťovacích spár z důvodu dotvarování a teplotní roztažnosti materiálu. Další nevýhodou je obtížnost jakékoliv opravy poruch nebo zásahu do vozovky. V takovém případě se mění vždy deska za desku, jakýkoliv jiný tvar, než je obdélník s normovými poměry stran je nepřijatelný. [1]

Cementobetonové kryty můžeme podle konstrukce rozdělit na kryty nevyztužené se spárami, vyztužené se spárami a spojitě vyztužené bez mezilehlých příčných spár. Můžeme je provádět jako vozovky s jednou vrstvou nebo dvěma vrstvami krytu. [1]

Spáry rozdělujeme podle orientace na spáry podélné a příčné. Podle funkce na spáry smršťovací (dilatační) a pracovní. Příčné smršťovací a pracovní spáry se mohou provádět s nebo bez kluzných trnů. Podélné smršťovací a pracovní spáry se provádí s nebo bez kotev. [1]

Podle druhu dopravního zatížení a dopravního významu rozdělujeme kryty do tří skupin. Jednotlivé skupiny se od sebe liší požadavky na vlastnosti materiálů, způsob zkoušení a vlastnosti hotového krytu. [1]

Tab. 5 – Členění cementobetonových krytů [1]

Skupina	Třída dopravního zatížení	Dopravní význam
CB I	S, I – III	Letištní dráhy a plochy, dálnice, rychlostní silnice a místní komunikace, silnice I. třídy
CB II	III – V	Silnice II. a III. třídy, místní komunikace sběrné a obslužné, parkovací plochy
CB III	IV – VI	Místní komunikace sběrné a obslužné, parkovací plochy, účelové komunikace

Beton použitý pro cementobetonové kryty nese označení stupně vlivu prostředí XF4, XD3 a je tak odolný vůči dešťovým srážkám, vlivu mrazu a ošetřování chemickými rozmrazovacími látkami (solím a chloridů). [16]



Výroba a užití CB krytů spadá pod řadu evropských a národních norem: ČSN EN 206+A2, ČSN EN 13 877 -1, 2, ČSN 73 6123-1 a TKP 6.

4.1 Materiál pro výrobu cementobetonového krytu

Vozovkový beton je vyráběn ze směsi vody, kameniva, cementu a přísad, jejichž vzájemný poměr významně ovlivňuje výsledné chování vozovkového krytu. Beton s optimálně nastaveným poměrem pak splňuje teoretické a ekonomické zásady:

- cementové malty pouze tolik, aby stačila vyplnit mezery mezi zrny kameniva a tato zrna obalila;
- zrna kameniva s minimální zrnitostí po setřesení;
- malta musí mít dobrou viskozitu, mikrostrukturu a tixotropní charakter

a současně s tím i kritéria:

- odolnost vůči mechanickému namáhání a opotřebenosti jeho krytu;
- odolnost proti působení chemických látek, mrazu a vody;
- dobré protismykové vlastnosti po dlouhou dobu životnosti;
- konzistence pro bezproblémové položení krytu finišerem. [1]

Na betonové směsi užívané v silničním stavitelství jsou kladeny speciální požadavky oproti směsím užívaným v jiném odvětví, například odolnost vůči působení chemických rozmrazovacích látek, působení vody a pevnost v tahu za ohybu. [1]

4.1.1 Kamenivo do betonu

Kamenivo musí splňovat deklarované podmínky norem ČSN EN 12620+A1 a ČSN EN 13242+A1. K upřesnění složení a hranic hodnot vlastností se užívají doplňující předpisy nebo normy, jako jsou národní TP, ZTP ČSN EN 206-1. [1]

Kamenivo v betonové směsi může být drcené, těžené i umělé recyklované. Používají se horniny vyvřelé, jako žula, gabro a čedič, usazené horniny, například pískovec, vápenec a dolomit, nebo přeměněné horniny, například rula, křemenek a mramor. [1]



Použité kamenivo podléhá požadavkům na:

- zrnitosti;
- tvarového indexu;
- odolnosti proti drcení;
- odolnost proti ohladitelnosti
- odolnost proti obrusu
- trvanlivost;
- nasákavost;
- odolnosti proti rozmrazování a zmrazování;
- obsahu humusovitých látek;
- obsahu síry;
- obsahu chloridů a reaktivnosti s alkáliemi. [1]

Podle velikosti zrn frakce je kamenivo rozděleno do skupin hrubého, drobného a jemného kameniva. Použitá zrna se pohybují v rozmezí 0,063–63 mm. Použité kamenivo musí být označováno frakcí (dolní/horní velikost čtvercových sít d/D), například 0/4, 8/16, 11/22. [1]

Granulometrické složení kameniva a jeho původ jsou důležitým faktorem v chování směsi čerstvé a zatvrdlé. Při vyšším obsahu jemných částic se beton lépe hutní a zpracovává, ale nemá jako zatvrdlý takovou pevnost. Doporučuje se tedy obsah jemných částic směřovat mezi 350 až 450 kg/m³. [1]

4.1.1.1 Struska do betonu

Pro užití struskového kameniva do konstrukcí pozemních komunikací slouží technické podmínky TP 138, které stanovují zásady použití, definují druhy strusky a provádění kontrol vlastností.

Chemické složení těchto výrobků je velmi náchylné na objemové změny. Před užitím kameniva do betonu se musí provést průkazní a doplňkové zkoušky ke stanovení chemického složení. U vysokopecních strusek se jedná o zkoušky obsahu síranů ve vodě a kyselině a celkový obsah síry. U ocelářské strusky se zaměřujeme na obsah volného vápna a obsah oxidu hořečnatého. [22]

Kameniva z vysokopecní strusky nacházejí uplatnění v konstrukčních vrstvách pozemních komunikací, zatímco kamenivo z ocelářské strusky se hodí převážně do podkladních vrstev. [22]



U kameniv ze strusky se oproti přírodnímu kamenivu také klade důraz na:

- objemovou stálost;
- obsah volného vápna;
- rozpadavost kameniva;
- nasákavost. [22]

Objemová stálost se posuzuje podle chemického složení, aby se předešlo samovolnému rozpadu. Objemová stálost je závislá na původu produktu. U kameniva z vysokopecní strusky se zkouší rozpad křemičitanu vápenatého (CaSiO_3). U kameniva z ocelářské strusky se zaměřujeme na rozpínavost, do 5 % nárustu objemu, v případě užití do podkladních vrstev pozemních komunikací se ověřuje navíc železitý a silikátový rozpad. Pokud struska vykazuje větší rozpínavost než 5 % v autoklávu, nesmí být použita do jakékoliv části konstrukčních vrstev nebo zemního tělesa. Maximální obsah volného vápna je 4,5 % hmotnosti kameniva. [22]

Tab. 6 – Doporučené chemické vysokopecní strusky podle TP 138. [22]

Složka	Zastoupení [%]
CaO	35–45
SiO ₂	35–45
Al ₂ O ₃	5–10
MgO	5–15

4.1.2 Záměsová voda

Voda v čerstvém betonu se podílí na zpracovatelnosti směsi a hydrataci. Jako záměsová voda k přípravě směsi se může použít pitná voda bez nutnosti zkoušení použitelnosti, povrchová, podzemní, recyklovaná nebo odpadní průmyslová voda s nutným ověřením její použitelnosti. Mořská voda pouze do betonu bez použití výztuže z důvodu zvýšené korozi působením solí a splašková voda se nesmí používat vůbec. [17]

Záměsová voda se podrobuje několika kritériím, podle kterých:

- je bez olejů a tuků, maximálně viditelné stopy je potřeba jinak ověřit;
- je bez pěny, resp. dochází ke zmizení do 2 min;
- má barvu světlejší, nejhůře bledě žlutou;
- je bez zápachu, jako voda pitná;
- je s množstvím usazenin menším než 4 ml;
- na stupnici pH má číslo větší než 4, tedy neutrální až zásadité. [17]



Množstvím použité vody, respektive velikostí vodního součinitele (hmotnost vody ku hmotnosti cementu v čerstvém betonu), můžeme upravovat výslednou pevnost. Podle použitého cementu volíme vhodný vodní součinitel, obsažené slínkové minerály potřebují různé množství vody pro uskutečnění hydratace. Součinitel by se měl pohybovat v rozmezí od 0,25 do 0,45. Spodní hranice hodnoty stačí ke správnému průběhu hydratace cementu, ale nestačí k potřebné zpracovatelnosti čerstvého betonu. S rostoucím množstvím vody (zvětšováním vodního součinitele) klesá výrazně pevnost a zvyšuje se prostorové smrštění.

Proto se pro zlepšení zpracovatelnosti a zachování vysoké pevnosti dále používají plastifikační přísady. [1]

4.1.3 Cement

Cement je anorganický mletý materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši. Díky hydraulické reakci tuhne a tvrdne. [18]

Přidání většího množství cementu do betonu zlepšuje pevnost, vodotěsnost, přídržnost a odolnost výztuže proti korozi. Na druhé straně negativně ovlivňuje vývoj hydratačního tepla a smrštění betonu. Nad 450 kg/m³ v betonu už je v rámci zlepšení pevnostních charakteristik neekonomické takové množství přidávat. [18]

Podle skupiny cementobetonového krytu se určí vhodné pojivo a jeho množství. Nejčastěji se jedná o portlandský cement CEM I třídy 32,5–42,5 nebo portlandský struskový cement CEM II třídy 32,5–42,5. Záleží na požadované pevnosti. Požaduje se, aby cement měl co nejmenší obsah alkálií a bylo tedy zamezeno vzniku alkalicko-křemičité reakce (alkalická složka z cementu a křemičitá z kameniva), po které vznikají síťové trhliny na hranách desek, a omezení množství trikalciumaluminátu (složka ve slínku), který má vliv na velikosti smršťování betonu [1].

4.1.4 Přísady

Pomocí přidání různého typu přísad do čerstvé směsi můžeme kladně změnit základní fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. Například urychlovače, zpomalovače tuhnutí, plastifikátory nebo provzdušňovací přísady. Poslední jmenované hrají v dnešní době významnou roli při výrobě. [1]

Plastifikační přísady mění povrchové náboje všech částic ve směsi na kladné, záporné nebo neutrální, čímž se částice elektrostaticky odpuzují, tzv. po sobě kloužou



s menším třením a zvyšují tak zpracovatelnost celé směsi. Snižuje se tak potřebné množství záměsové vody, a tedy se zvyšuje výsledná pevnost betonu [1]

Provzdušňovače zlepšují plasticitu čerstvé směsi a zpracovatelnost. Mikrostruktura kamene je doplněna o vzduchové bubliny, které díky malým mezerám mezi sebou přerušují kapilární síť, a tedy napomáhají ke snížení nasákavosti. To zlepšuje odolnost vůči zmrazování a rozmrazování, působení chemických rozmrazovacích látek a tím mnohonásobně zvyšuje životnost betonového krytu za cenu snížení pevnosti v tlaku o 10–30 % vůči betonu neprovzdušněnému [1]

5 Charakteristika použitých materiálů

5.1 Voda

Pro výrobu betonových směsí byla použita kohoutková voda z vodovodního řádu Prahy 6. Voda splňovala kritéria vyhlášky č 252/2004 Sb. podle dat společnosti Pražské vodovody a kanalizace a.s.

Voda byla tedy označena za pitnou a byla používána bez dalších doplňujících zkoušek.

5.2 Cement

Pojivem byl zvolen Portlandský cement CEM I 42,5 R vyrobený v cementárně Mokrá. Výrobce je Českomoravský cement, a.s.. Cement splňuje normu EN 197 1.

Jedná se o cement s rychlým nárůstem počátečních pevností, vysokou počáteční a konečnou pevností a rychlým vývinem hydratačního tepla. Obsah portlandského slínku se pohybuje v rozmezí 95–100 %, doplňujících složek není více než 0,5 %.



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty

Fyzikální a mechanické vlastnosti			Chemické vlastnosti			
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	17,0	EN 196-1	Obsah SO ₃ [%]	2,97*	EN 196-2
	2 dny	30,3*	EN 196-1	Obsah Cl [%]	0,052*	EN 196-2
	7 dní	50,3	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]	0,64*	EN 196-2
	28 dní	60,6*	EN 196-1	Nerozpuštěný zbytek [%]	0,88*	EN 196-2
	56 dní	65,9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,26*	EN 196-2
	90 dní	67,9	EN 196-1			
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4,3	EN 196-1	*Průměrné hodnoty získané z měsíčních statistických dat za rok 2022		
	2 dny	6,3*	EN 196-1	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr ⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).		
	7 dní	8,1	EN 196-1			
	28 dní	9,0*	EN 196-1			
	56 dní	9,6	EN 196-1			
	90 dní	9,7	EN 196-1			
Normální konzistence [%]	27,2*	EN 196-3				
Počátek tuhnutí [min]	211*	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]	286*	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]	0,8*	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	409*	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg m ⁻³]	3130	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v autocisterně	1070	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v síle	1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
Hydratační teplo [J.g ⁻¹]	7 dní	314	EN 196-11			

Obr. 7 – Technický list použitého portlandského cementu [19]

Při laboratorní výrobě směsi typu M, viz tabulka směsí níže, bylo nahrazeno 25 % cementu vysokopecní granulovanou struskou od společnosti ECOCOAL Slag Handling. Jedná se o vysokopecní granulovanou strusku chlazenou vodou rychle zchlazovanou vodou, která se mele ve více fázích.

5.3 Kamenivo

Ve vytvořených směsích bylo použito kamenivo přírodní drcené, těžené ale i uměle vytvořené (struskové jako vedlejší produkt metalurgie). (Obr. 8–12)

Jemné těžené kamenivo frakce 0/4 mm bylo použito ze závodu Ledčice. Hrubé drcené kamenivo frakcí 4/8 mm, 8/16 mm a 11/22 mm bylo použito ze závodu Sýkořice. Jak pískovna tak i lom patří pod společnost KÁMEN Zbraslav, a.s..

Náhradou hrubého kameniva frakce 4/8 mm ve směsi typu K1 byla ocelářská struska z hutí Voest Alpine AG (Linec, Rakousko). Ve směsi K2 bylo použito ocelářské struskové kamenivo frakce 8/16 mm ze stejných hutí. Pro směs K3 byla nahrazena frakce 4/8 vysokopecní vzduchem chlazenou struskou od firmy DestroKladno s.r.o..



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty



Obr. 8 – Použité jemné a hrubé kamenivo ve vytvořených směsích



Obr. 9 – Ocelářská struska 4/8 mm



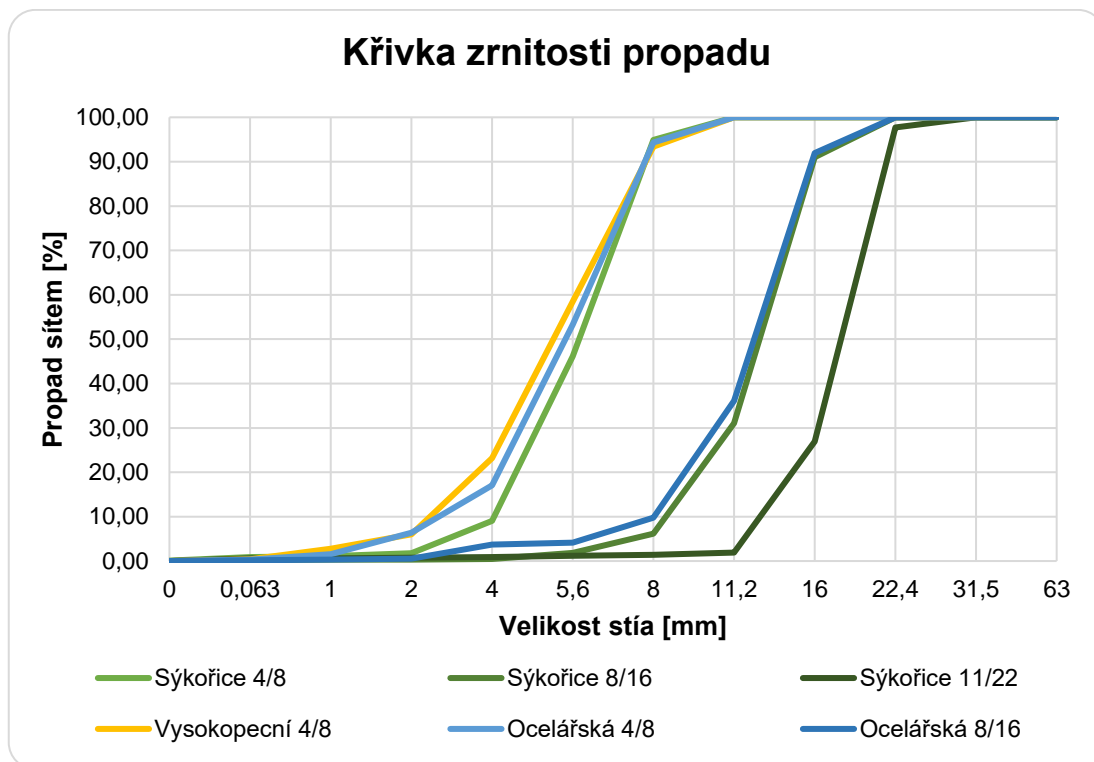
Obr. 10 – Vysokopecní struska 4/8 mm



Obr. 11 – Ocelářská struska 4/8 mm



Obr. 12 – Vysokopecní struska 4/8 mm



Graf. 1 – Křivka zrnitosti použitých kameniv

Tab. 7 – Tvarový index a nasákavost zkoušeného kameniva

Kamenivo	Sýkořice 4/8	Sýkořice 8/16	Sýkořice 11/22	Vysokopecní Destro 4/8	Ocelářská Voest 4/8	Ocelářská Voest 8/16
SI [%]	13,0	9,0	5,7	9,4	4,5	4,9
WA ₂₄ [%]	0,3	0,2	0,2	7,5	0,6	1,9

5.4 Přísady

5.4.1 STACHEPLAST

STACHEPLAST je plastifikační přísada na bázi lignosulfonátů přidávaná do betonu z důvodu zlepšení pevnosti betonu, voděodolnosti i odolnosti vůči chemickým vlivům. Nezvyšuje obsah vzduchu a mírně prodlužuje dobu tuhnutí. Doporučuje se především do transportbetonu. Výrobek vyrábí firma STACHEMA CZ s.r.o.. [20]



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty

Vlastnosti výrobku	
druh přísady	Plastifikační přísada EN 934-2: T 2
č. Osvědčení o shodě	0921-CPR-2000
řízení výroby	Tmavohnědá homogenní kapalina
vzhled	1 170 ± 30 kg m ⁻³
hustota	34 - 38 hm. %
sušina	8 - 11,5
pH	0,1 % hm.
Maximální obsah chloridů:	8 % ekv. Na ₂ O
Maximální obsah alkálií:	Schváleno dle ČSN EN 934-1, obsahuje pouze složky uvedené v příloze A.1 z EN 934-1:2008
Korozivní vlastnosti:	

Obr. 13 – Technický list Stacheplastu [20]

5.4.2 PORALAN STA

PORALAN STA je provzdušňovací přísadou do betonu, která vytváří malé vzduchové póry. Zlepšuje mrazuvzdornost a odolnost betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám, umožňuje snížení množství záměsové vody bez zhoršení zpracovatelnosti, ulehčuje hutnění a čerpatelnost čerstvého betonu. Použití v betonu dle normy ČSN EN 206-1. Výrobek vyrábí firma STACHEMA CZ s.r.o.. [21]

Vlastnosti výrobku	
druh přísady	Provzdušňovací přísada EN 934-2: T 5
č. certifikátu	0921-CPR-2000
řízení výroby	Dle ČSN ISO 9001 a ČSN EN 934 – 2/6
vzhled	Čirá až slabě zakalená homogenní kapalina
hustota	1008 ± 3 kg m ⁻³
sušina	4,5 ± 0,5 hm. %
pH	6 - 8
Maximální obsah chloridů:	0,1 % hm.
Maximální obsah alkálií:	1,5 % ekv. Na ₂ O
Korozivní vlastnosti:	Schváleno dle ČSN EN 934-1, obsahuje pouze složky uvedené v příloze A.1 z EN 934-1:2008

Obr. 14 – Technický list Poralanu [21]



6 Výroba zkušebních těles

Výchozí receptura byla převzatá od firmy KÁMEN Zbraslav, a.s. a odzkoušena společností STRABAG a.s. jako vozovkový beton užívaný u silničních staveb v pražském regionu. Výsledky těchto zkoušek [40] byly porovnány s výsledky mnou provedených laboratorních zkoušek u referenčního vzorku betonu.

Z důvodu provádění experimentálních zkoušek bylo vytvořeno celkem 80 těles v 5 různých směsích. Jednalo se o 1 směs s neupravenou recepturou a 4 směsi s recepturou upravenou.

Tvar těles byl zvolen podle normy ČSN EN 12390-1. Pro každou směs bylo vytvořeno 12 krychlí o velikosti 150x150x150 mm. 9 krychlí sloužilo k odzkoušení pevnosti v tlaku po 7, 28, 56 dnech od laboratorní výroby a 3 krychle byly vytvořeny jako rezervní. Jedna ze tří rezervních krychlí byla použita pro zjištění porozity betonu pod mikroskopem a zbylé 2 krychle byly použity pro upřesnění vývoje pevnosti v tlaku po 90 dnech zrání. Dále byly vytvořeny 3 válce z každé směsi o velikosti $\varnothing 150 \times 300$ mm. Válce byly velikostně upraveny pro odzkoušení odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám a odzkoušení pevnosti v tlaku ve stáří 28 dnů. Byly vytvořeny i trámky o velikosti 400x100x100 mm pro zkoušení pevnosti v tlaku za ohybu ve stáří 90 dní, z každé směsi byl vytvořen jeden trámek. Celkem bylo vytvořeno 60 krychlí, 15 válců a 5 trámků. Díky velkému množství zkoumaných vzorků jsem byl schopen ověřit vlastnosti a pevnost betonových směsí v průběhu času. Umožnilo mi to získat představu o rychlosti nárustu pevnosti v čase, odolnosti betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám a celkově posoudit, zda jsou upravené směsi vhodné a kvalitní pro cementobetonové kryty.



Seznam směsí:

- **REF** – referenční, originální receptura;
- **K1** – upravená receptura, nahrazená hrubá frakce přírodního kameniva 4/8 mm za uměle hutné kamenivo z ocelářské strusky 4/8 mm v celém rozsahu;
- **K2** – upravená receptura, nahrazená hrubá frakce přírodního kameniva 8/16 mm za uměle hutné kamenivo z ocelářské strusky 8/16 mm v celém rozsahu;
- **K3** – upravená receptura, nahrazená hrubá frakce přírodního kameniva 4/8 mm za uměle hutné kamenivo z vysokopecní vzduchem chlazené **strusky** 4/8 mm v celém rozsahu;
- **M** – upravená receptura, nahrazená hrubá frakce přírodního kameniva 8/16 mm za uměle hutné kamenivo z ocelářské strusky 8/16 mm v celém rozsahu a nahrazeno 25 % cementu mletou vysokopecní granulovanou struskou ECOCOAL.

Tab. 8 – Složení betonových směsí

SLOŽKA		MNOŽSTVÍ [kg]				
		REF	K1	K2	K3	M
Pojivo	CEMENT CEM I 42,5 R	23,90	22,43	23,90	23,90	17,94
	VYSOKOPECNÍ STRUSKA	—	—	—	—	5,96
Drobné kamenivo	DTK 0/4 – LEDČICE	41,15	38,63	41,15	41,15	41,15
Hrubé kamenivo 4/8	HDK 4/8 – SÝKOŘICE	9,96	—	9,96	—	9,96
	OCELÁŘSKÁ STRUSKA 4/8	—	9,35	—	—	—
	VYSOKOPECNÍ STRUSKA 4/8	—	—	—	9,96	—
Hrubé kamenivo 8/16	HDK 8/16 SÝKOŘICE	36,18	33,95	—	36,18	—
	OCELÁŘSKÁ STRUSKA 8/16	—	—	36,18	—	36,18
Hrubé kamenivo 11/22	HDK 11/22 – SÝKOŘICE	38,50	36,13	38,50	38,50	38,50
Přísady	STACHEPLAST	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
	PORALAN STA	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Voda	VODA PITNÁ	8,24	5,70	7,00	7,24	7,00
VÁHA CELKEM		158,09	146,34	156,85	157,09	156,85
SEDNUTÍ S [mm]		30 (S1)	20 (S1)	30 (S1)	30 (S1)	45 (S1-S2)
VODNÍ SOUČINITEL W [%]		0,34	0,25	0,29	0,30	0,33



Zkušební tělesa byla tvořena podle normy ČSN EN 12390-2. Do laboratorní míchačky byly jednotlivě přidávány odvážené složky originální, nebo modifikované receptury směsi. Jako poslední byla přidávána do míchačky po částech voda, aby bylo dosaženo požadované konzistence. Ta byla kontrolována zkouškou sednutí kužele podle normy ČSN EN 12350-2 (Obr. 15). Správné množství vody bylo ověřeno i výpočtem vodního součinitele W , u směsi M vodní součinitel W_{eff} . Ten musel odpovídat rozmezí 0,25–0,45 % podle [1]. Po smíchání složek v míchačce byla směs zednickou lžící skrz násypku nasypána do dutého plechového kužele. Kužel se plnil ve třech vrstvách a po každé naplněné vrstvě byl zhutněn 25 vpichy propichovací tyčí. Po posledním zhutnění byl plechový kužel svislým pohybem sejmut, postaven vedle a odměřil se výškový rozdíl mezi formou a nejvyšším bodem sednutého vzorku s přesností na 5 mm. Sednutí odpovídalo třídě S1 a S2. Betonová směs se po odbednění zhroutila oproti plechovému kuželu v rozmezí 10–40 mm nebo 50–90 mm.

Referenční směs vyrobená firmou STRABAG dosáhla v průměru sednutí kužele 76 mm, tedy konzistence S2 [40].

Z důvodu malého objemu laboratorní míchačky, musela být každá směs rozdělena na 2 poloviny, které byly smíchány zvlášť. Zkouška sednutí kužele byla provedena pro každou míchanou směs.



Obr. 15 – Zkouška sednutí konzistence směsi

Čerstvý beton byl poté nasypán pomocí zednické lžice do plastových a ocelových forem s vnitřními stěnami natřenými tenkou separační vrstvou na bázi oleje pro lehčí odbednění vytvrdlého tělesa. Beton byl sypán do forem ve dvou vrstvách a zhutněn na vibračním stole. Zhutněný beton byl ponechán ve formě 24 hodin a překryt potravinářskou folií z důvodu předejetí odpaření vody v průběhu tuhnutí generováním



hydratačního tepla (Obr. 16). Tělesa by se rychle vysušila a nebyla by v požadované kvalitě.



Obr. 16 – Vyplněné formy směsí a překryté potravinářskou fólií



Obr. 17 – Krychlové těleso a jeho kódové označení
(směs K2; 56 dní; 3 ze 3)

Po 24 hodinách byla zkušební tělesa odbedněna, označena číselným kódem (Obr. 17) k jednodušší budoucí identifikaci a přesunuta do vodní kádě (Obr. 37) s teplotou 20 °C, kde tělesa zrála do doby, než byla podrobena patřičným zkouškám.

7 Experimentální zkoušky

Po potřebné době zrání byla zkušební tělesa vyjmuta z kádě, povrchově osušena hadrem, zvážena její hmotnost s přesností na 0,1 g a elektronickým posuvným měřidlem přeměřena. U krychlí a trámů se měřila výška, délka a šířka těles vždy na 3 místech. V případě válců se měřil průměr a výška, opět na 3 místech. Z naměřených hodnot se stanovily aritmetické průměry jednotlivých rozměrů těles s přesností na 0,1 mm.

7.1 Tvarový index kameniva

Zkouška byl prováděna podle normy ČSN EN 933-4. Odzkoušeny byly pouze vzorky drceného struskového kameniva. Hodnoty přírodního drceného kameniva byla přebrána z technického listu [40–43] od výrobce KÁMEN Zbraslav a.s..

Jednotlivá zrna kameniva byla roztríděna a tvarový index se určil jako hmotnostní poměr nekubických zrn ku celkové navážce vyjádřen s přesností na 0,1 %.



7.1.1.1 Provádění zkoušky

Zkouška se prováděla podle postupu $D \leq 2d$ neboli velikost ok horního síta jsou menší nebo rovna velikosti ok dolního síta dvakrát zvětšených.

Odvážila se normou stanovená hmotnost zkušební navážky vysušeného kameniva (M_1), pro frakci 4/8 mm to bylo 0,1 kg a pro frakci 8/16 mm 1 kg. Pomocí dvoučelistového posuvného měřítka se posoudila délka zrna L a tloušťka E. Pokud byl poměr L/E větší než 3, byla zrna označena jako nekubická. Po přeměření celé navážky se zvažila celková hmotnost vyřazených, nekubických zrn (M_2).

Výpočet a vyjádření výsledků:

Tvarový index se stanoví jako poměr hmotnosti nekubických zrn ku celkové hmotnosti navážky s přesností na 0,1 % pomocí vzorce:

$$SI = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \times 100$$

kde je:

SI tvarový index, v procentech (%)

M_1 hmotnost zkušební navážky, v gramech (g)

M_2 hmotnost nekubických zrn, v gramech (g)

7.2 Nasákavost kameniva a objemová hmotnost

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 1097-6, podle pyknometrické metody pro zrna kameniva propadá zkušebním sítem s velikostí čtvercových ok 31,5 mm a zachycená na zkušebním síti s velikostí ok 4 mm.

Zkouška byla prováděna pouze u vzorků drceného struskového kameniva. Hodnoty přírodního drceného kameniva byly převzaty od výrobce KÁMEN Zbraslav a.s. z technického listu [40–43].

Nasákavost kameniva je vyjádřena jako procentní přírůstek hmotnosti s přesností na 0,1 %.



7.2.1.1 Provádění zkoušky

Příprava:

Kamenivo se promylo na sítích s velikostí ok 31,5 mm a 4 mm, aby se odstranily jemné částice z povrchu zrn kameniva, a nechalo se okapat. Hmotnost promytého kameniva odpovídala nejméně 1 kg pro frakci 4/8 mm a 2 kg pro frakci 8/16 mm.

Nasáknutí kameniva:

Připravená navážka se vložila do pyknometru naplněného vodou o teplotě 22 °C (± 3 °C). Naplněný pyknometr se jemně převaloval v šikmé poloze pomocí mechanických válců, aby se odstranily vzduchové bubliny. Následně se pyknometr vložil do vodní lázně o teplotě 22 °C (± 3 °C) na 24 h ($\pm 0,5$ h). Po uplynulé době se pyknometr vyjmul z vodní lázně a vložil se do vakuového hrnce po dobu 40 minut. Po skončení vakuování se do pyknometru dolila voda po rysku na nálevce, osušily se vnější strany a stanovila se hmotnost pyknometru s vodou a navážkou (M_2) v gramech. Zaznamenala se teplota vody, díky které se určila její objemová hmotnost. Kamenivo se vysypalo na plechový táč a povrchově osušilo nasákavými látkovými utěrkami, dokud nezmizel z povrchu kameniva vodní film. Následně se stanovila hmotnost nasáklého povrchově osušeného kameniva (M_1) v gramech. Na pyknometr se opět nasadila nálevka a naplnil se vodou až po rysku a stanovila se jeho hmotnost (M_3). Kamenivo rozprostřené na tácu se vložilo do sušárny, kde se při teplotě 110 °C (± 5 °C) sušilo do stavu ustálené hmotnosti, tedy úplného vysušení a tehdy se stanovila hmotnost kameniva (M_4) v gramech. Všechny hmotnosti byly váženy s přesností na 0,1 g.

Výpočet a vyjádření výsledků:

Nasákavost je vyjádřena v procentech s přesností na 0,1 % podle vzorce:

$$WA_{24} = \left(\frac{M_1 - M_4}{M_4} \right) \times 100$$

kde je:

WA_{24} nasákavost kameniva po 24 h ponořeného do vody, v procentech (%)

M_1 hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva na vzduchu, v gramech (g)

M_4 hmotnost v sušárně vysušeného kameniva na vzduchu, v gramech (g)



Objemová hmotnost je vyjádřena v megagramech na kubický metr s přesností na 0,01 Mg/m³ podle vzorce:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

kde je:

- ρ_a zdánlivá objemová hmotnost zrn, v megagramech na metr kubický (Mg/m³)
 M_1 hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva na vzduchu, v gramech (g)
 M_2 hmotnost pyknometru obsahující vzorek nasáklého kameniva a vodu, v gramech (g)
 M_3 hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou, v gramech (g)
 M_4 hmotnost v sušárně vysušeného kameniva na vzduchu, v gramech (g)

7.3 Porozita betonových směsí

Pro zkoušku byl použit odřez tloušťky cca 18 mm z jedné rezervní krychle po 90 dnech stárnutí od každé vytvořené směsi (Obr. 38). Zkouška byla prováděna na zařízení Univerzitního centra pro energeticky efektivní budovy ČVUT v Praze.

7.3.1.1 Provádění zkoušky

Příprava odřezků:

Krychle byly po 90 dnech ve vodní lázni vyjmuty a elektrickou kotoučovou pilou (Obr. 44) 2x rozříznuty pro vytvoření čtvercové desky s tloušťkou cca 18 mm. Následně byl povrch odřezků lapován pomocí karbidu křemíku (SiC). Leštění plochy jedné desky trvalo 4 hodiny. Po vyleštění povrchu se na něj nanasla titanová běloba (pigment), která vyplnila póry a zajistila jejich rozeznatelnost pod mikroskopem.

Mikroskopování:

K mikroskopování byl použit mikroskop ZEISS Axio Zoom V.16. Povrch byl mikroskopem zvětšen 3,5x. Obrazová analýza povrchu se prováděla pomocí programu ImageJ, kde se prostřednictvím grafické úpravy zobrazily všechny póry červeně.

Vyjádření výsledků:

Výsledkem je hodnota porozity, která se vypočítala jako poměr červených zvýrazněných pixelů ku všem pixelům povrchu odřezku, vyjádřena procentech s přesností na 0,1 %.



7.4 Pevnost v tlaku na krychlích a válcích

Zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 12390-3. Pro zkoušku bylo použito celkem 11 krychlí různého stáří a 3 válce po 28 dnech zrání od každé směsi. Postupně byly testovány vždy 3 krychle po 7, 28 a 56 dnech zrání z každé směsi. Díky přebytku rezervních krychlí, byly využity 2 krychle z této skupiny pro testování pevnosti po 90 dnech zrání. Celkem bylo otestováno 55 krychlí a 15 válců. Z důvodu odřezů z tělesa válců pro zkoušku CHRL, nebyla výška válců normová, nýbrž o 5 cm zmenšená. Norma předepisuje použití alespoň 3 vzorků pro zamezení chybovosti. Pevnost v tlaku na válcích ve 28 dnech a krychlích v 90 dnech slouží pro doplnění znalostí o směsích, porovnání jednotlivých směsí mezi sebou a nemůže se jim přikládat 100% váha.

Zkušební tělesa byla stlačena v lisu (*Obr. 42*) až do momentu porušení. Zaznamenala se maximální síla a vyjádřila se pomocí ní pevnost v tlaku se zaokrouhlením na 0,1 MPa.

7.4.1.1 Provádění zkoušky

Příprava těles:

Zkušební tělesa byla povrchově osušena a jednotlivě se vkládala do lisu (*Obr. 18, 19*). Zatěžovacími plochami v případě krychlí byly boční stěny od otisku forem, z důvodu konzistentní výšky průřezu po celé ploše. Horní i spodní zatěžovací plocha krychle byla osazena přídavnými deskami a takto byla krychle položena na středící blok z důvodu zmenšení pracovní výšky lisu. Válce byly osazeny svisle přímo na středící blok bez přídavných desek. Po kontrole, zda je těleso v lisu uloženo centricky, začalo zatěžování. Přesné uložení krychle či válce v lisu bylo důležité pro správné zatěžování a výsledné porušení zkušebního vzorku. To muselo být po všech stranách rovnoměrné.

Pro zatěžování byl použit ručně řízený dvousloupový lis se vzduchem plněným pístem pomocí kompresoru.

Stlačení těles:

Po aplikaci prvotního zatížení, které bylo vyšší maximálně o 30 % předpokládaného zatížení při porušení, se zatížení ručním řízením snížilo a korigovalo, aby byla rychlost zatěžování konstantní, zhruba 0,6 MPa/s ($\pm 0,2$ MPa/s). Zatěžovalo se plynule bez



nárazu a zatížení se nepřetržitě zvyšovalo konstantní rychlostí. Zatěžování probíhalo do bodu porušení. Zaznamenala se vyvinutá síla se zaokrouhlením na 0,1 kilonewtonu ze siloměru (*Obr. 39*) a lis byl odtížen pro další testování.



Obr. 18 – Zkušební krychle umístěna v lisu před zatížením



Obr. 19 – Zkušební válec umístění v lisu před zatížením

Výpočet a vyjádření výsledků:

Maximální vyvinutá síla lisu při porušení tělesa se zaznamenala v kilonewtonech s přesností na 0,1 kN a výsledná pevnost betonu v tlaku se stanovila pomocí vzorce s přesností na 0,1 MPa:

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

kde je:

f_c pevnost v tlaku, v megapascalch ($\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$);

F maximální zatížení lisu při porušení, v kilonewtonech (kN);

A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení, v milimetrech čtverečních (mm^2).

7.5 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 12390-5. Pro zkoušku byl použit 1 trámek po 90 dnech stárnutí ve vodní lázni od každé vyrobené směsi.

Trámky byly po jednom stlačeny ve čtyřbodovém lisu (*Obr. 41*) až do momentu porušení. Zaznamenala se maximální síla a vyjádřila se pomocí ní pevnost v tahu za ohybu se zaokrouhlením na 0,1 MPa.



7.5.1.1 Provádění zkoušky

Příprava:

Trámky se vyndaly z vodní lázně, povrchově osušily a po jednom se vkládaly do lisu (Obr. 33). Trámky se do lisu umísťovaly centricky, tak aby jejich podélná osa byla kolmá na osu horních a dolních válečků lisu.

Zatěžovací lis se skládá ze 2 spodních podpěrných válečků a 2 horních zatěžovacích válečků. Horní válečky jsou kloubově uloženy na příčném závěsu lisu. To slouží k rovnoměrnému rozdělení síly na trámek. Válečky musí být vyrobeny z oceli s šířkou minimálně o 10 mm větší, než je šířka trámku.

Zatížení:

Po aplikaci prvotního zatížení, které bylo vyšší maximálně o 20 % předpokládaného zatížení při porušení, se zatížení ručním řízením snížilo a korigovalo, aby byla rychlost zatěžování konstantní, od 0,4 MPa/s do 0,6 MPa/s. Zatěžovalo se plynule bez nárazu a zatížení se nepřetržitě zvyšovalo konstantní rychlostí. Zatěžování probíhalo do bodu porušení. Zaznamenala se vyvinutá síla se zaokrouhlením na 0,1 kilonewtonu ze siloměru (Obr. 40) a lis byl odtížen pro další testování.

Výpočet a vyjádření výsledků:

Maximální vyvinutá síla lisu při porušení tělesa se zaznamenala v kilonewtonech s přesností na 0,1 kN a výsledná pevnost betonu v tlaku se stanovila pomocí vzorce s přesností na 0,1 MPa:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

kde je:

- $f_{c,fl}$ pevnost v tahu za ohybu, v megapascálech (N/mm² = MPa);
- F maximální zatížení lisu při porušení, v newtonech (N);
- d_1 šířka trámku, v milimetrech (mm)
- d_2 výška trámku, v milimetrech (mm)



7.6 Odolnost vůči CHRL

Zkouška byla prováděna podle normy ČSN 73 1326–Z1 metodou C, „Automatické cyklování II“. Pro zkoušku byla použita odříznutá tělesa z válců po 28 dnech stárnutí. Bylo použito 15 těles, vždy 3 tělesa z každé směsi, které se nechaly vystavit působení 3% solného roztoku po celkovou dobu 4 týdnů v klimatizační skříni, kde se cyklicky měnila teplota. Celkem 100 cyklů změny teploty. Po 25 cyklech byl vždy z těles odebrán vytvořený odpad a obnovil se roztok na povrchu vzorků.

V rámci této zkoušky proběhla i zkouška povrchové nasákavosti betonu, podle které se mohlo predikovat, kolik odpadu vznikne a která taky prokázala, zda objímky správně těsní.

7.6.1.1 Provádění zkoušky

Příprava:

Po 28 denním zrání, byly válce vyjmuty z vodní lázně a elektrickou kotoučovou pilou (Obr. 44) jim byl proveden odřez výšky 5 cm z horní poloviny válce (Obr. 20). Zbytek tělesa původních válcových těles byl použit pro zkoušku pevnosti v tlaku na válcích, viz výše. Na zkušební tělesa se nalepily chemoprenem objímky vytvořené z duše kola automobilu, které se pro jistotu vodotěsnosti stáhli kovovými objímkami a spára mezi dušiči a vzorkem byl vyplněna taktéž chemoprenem (Obr. 21). Objímky byly na tělesa nasazovány tak, aby udržely kapalinu na povrchu odříznuté strany „puku“. Po přípravě těles proběhlo prvotní zvážení nenasyceného vzorku s objímkou M_1 .



Obr. 20 – Odříznuté zkušební těleso z válce



Obr. 21 – Zkušební tělesa navlečená v automobilové duši s kovovými objímkami



Provádění zkoušky nasákavosti betonu:

Na povrch vzorku ohraničeného objímkou byl nalit $\pm 0,5$ cm vody a vzorek byl následně odstaven na určitý čas do klidu, a to na 5, 10, 20, 40, 80, 120 minut a 24 hodin od prvního zalití. Po uplynutí zmíněného času byla voda z povrchu slita a vzorek byl zvážen, stanovila se hmotnost M_n . Povrch vzorku se znovu zalil a vzorek se odstavil do dalšího časového mezníku. Po skončení zkoušky nasákavosti byla tělesa rovnou přesunuta do provádění zkoušky CHRL.

Výpočet a vyjádření výsledků nasákavosti:

Nasákavost vzorku je vyjádřena jako přírůstek hmotnosti podle délky času vystavení působení vody dále uvedeným vzorcem v procentech se zaokrouhlením na 0,1 %:

$$W = \frac{M_n}{M_1} \times 100$$

kde je:

W nasákavost vzorku v procentech (%);

M_1 hmotnost vzorku s objímkou před zalití vodou v gramech (g);

M_n hmotnost vzorku s objímkou po nasáknutí v čase v gramech (g).

Působení CHRL:

Na čerstvě slité vzorky z předešlé zkoušky byl nalit 3% solný roztok NaCl, s výškou hladiny zhruba 0,5 cm nad povrchem. Takto zalitá tělesa byla umístěna do klimatického boxu, kde se teplota periodicky po 3 hodinách měnila z -18 do $+5$ °C. Délka jednoho cyklu odpovídá 6 hodinám. Po 7 dnech, což odpovídalo 25 cyklům, se tělesa vyjmula ze skříně a solný roztok se slil z povrchu. Degradovaná strana tělesa se následně vykartáčovala a uvolněné částice se opatrně stříčkou splavily do předznačených Petriho misek. Označené misky byly vloženy do sušárny na několik hodin při teplotě 105 °C (± 5 °C). Vysušené vzorky byly zváženy a stanovila se hmotnost odpadu po n cyklech M_n . Po slití roztoku a kartáčování povrchu se tělesa omyla čistou vodou. Takto se postup opakoval 4x. Celkem byla tělesa vystavena 100 cyklům periodické změny teploty při působení chemické rozmrazovací látky.

Výpočet a vyjádření výsledků:

Vysušené uvolněné částice v Petriho miskách se zvážily s přesností na 0,1 g a přepočtem plochy „puku“ na 1 m² se stanovily celkové velikosti odpadu betonu v g/m² s přesností na desítky g/m². Výsledné hodnoty se zanesly do grafu, kde přímková



čára vyjadřovala vztah mezi počtem cyklů a velikostí odpadu. Z grafu se pak odečetl součinitel odolnosti D.



8 Výsledky

Kromě výsledků zkoušek mnou zpracovaných, jsem získal od společnosti STRABAG a.s. výsledky zkoušek referenční receptury. Jednalo se o zkoušky pevnosti v tlaku na krychli, zkoušky odolnosti betonu vůči CHRL po 28 dnech stáří a výsledky konzistence a obsahu vzduchu čerstvé směsi. Zkoušky byly prováděny na betonárně [40].

8.1 Tvarový index kameniva

Pro výrobu betonu se nejvíce hodí tvar zrn rovnoosý, kulovitý nebo kubický, tedy takový, kde se tvarový index blíží k 0. Zrna nekubická, tedy zrna tvarem plochá či jehlicovitá negativně ovlivňují vlastnosti čerstvého směsi a ztvrdlého betonu.

Tato zrna svým tvarem zvětšují mezerovitost čerstvé směsi. To sice vede k lepší zpracovatelnosti, ale samotná zrna nedokáží přenášet takové síly, jako zrna kubická, tvarově ideální, beton není ideálně hutný a výsledná pevnost betonu je nižší. S větší mezerovitostí roste i potřebné množství pojiva, jehož hodnota by měla být cca 1,2 násobkem objemu mezer. Další nevýhodou je vyšší spotřeba záměsové vody z důvodu většího povrchu zrn, což dále přispívá ke zvětšení množství cementu pro zachování správného vodního součinitele. [17][39]. Pokud by se množství cementu neupravilo mohlo by dojít k vyčerpání možnosti betonu hydratovat.

Vysokopecní struska obsahuje dvojnásobné množství nekubických zrn oproti struskám ocelářským. (Obr. 11, 12, Tab. 12)

Všechny 3 zkoušené frakce struskového kameniva spadají do 1. kategorie tvarového indexu SI_{15} tedy s tvarovým indexem menším než 15 % dle normy ČSN EN 12620+A1. Norma ČSN 73 6123-1 doporučuje kategorii SI_{20} pro užití kameniva do horního betonu cementobetonové vozovky. Strusková kameniva tento požadavek splňují.

Tab. 9 – Tvarový index struskového kameniva

Struska	M_1 [g]	M_2 [g]	SI [%]
Vysokopecní 4/8	100,2	9,4	9,38
Ocelářská 4/8	105,1	4,7	4,47
Ocelářská 8/16	1002,4	48,7	4,86



8.2 Nasákavost a objemová hmotnost kameniva

Vlastnosti, které závisí na pórovitosti kameniva.

Nasákavost kameniva ovlivňuje vlastnosti čerstvé směsi a betonu. Kamenivo může záměsovou vodu nasakovat a zmenšovat tak vodní součinitel, nebo v opačném případě svou vlhkostí vodní součinitel zvětšovat. Mokrý kamenivo bude zlepšovat zpracovatelnost, ale zhoršovat pevnost. Kamenivo suché má účinek opačný.

Další vlastností, kterou nasákavost kameniva ovlivňuje, je mrazuvzdornost. Při vysoké nasákavosti se dostane voda do pórů kameniva, kde zmrzne a zvětší tak objem o několik procent. Tím vzniknou v kamenivu vnitřní tlaky, které snižují trvanlivost betonu.

Pokud nasákavost běžného drceného kameniva nepřekročila hodnotu 1 % celkové hmotnosti může se považovat kamenivo za odolné vůči zmrazování a rozmrazování. U struskového kameniva se odhaduje dobrá odolnost i při hodnotách větších než 2 %. Norma ČSN P 73 2404 stanovuje mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu, dle kterých je povolena nasákavost hrubého kameniva menší nebo rovna 1,5 % pro stupeň vlivu prostředí XD3, XF2, tedy prostředí odpovídající běžnému výskytu CB krytů.

Podmínku stanovenou normou výše splňuje pouze ocelářská struska frakce 4/8 mm. U strusky frakce 8/16 mm by se dala stále uvažovat dobrá odolnost kameniva proti rozmrazování. Vysokopeční struska dopadla několikanásobně hůře, dá se tedy u ní očekávat horší odolnost.

Vysokopeční struska spadá svou objemovou hmotností do kategorie hutného kameniva, které se používá běžně do většiny betonů. Ocelářská struska spadá do kategorie těžkého kameniva, které je užíváno do vysokohodnotných betonů.

Tab. 10 – Nasákavost struskového kameniva a jeho objemová hmotnost

Struska	M ₁ [g]	M ₂ [g]	M ₃ [g]	M ₄ [g]	ρ _w [Mg/m ³]	WA ₂₄ [%]	ρ _a [Mg/m ³]
Vysokopeční 4/8	891,5	2562,0	2009,8	829,5	0,9975	7,47	2,984
Ocelářská 4/8	891,2	2657,2	2019,1	885,9		0,60	3,566
Ocelářská 8/16II	2014,5	3463,7	2008,1	1976,8		1,91	3,784



8.3 Porozita betonových směsí

Tab. 11 – Porozita betonových směsí

Směs	Porozita [%]				
	REF	K1	K2	K3	M
	1,50	1,80	2,08	1,67	9,76

Mikroskopováním byly zaznamenány jenom větší póry, mikro póry nebyly rozeznány, neboť se do nich nedostal použitý pigment. K upřesnění výsledků by bylo vhodné použít více odřezků od každé směsi, ale výrazně se tím prodlužuje doba provádění zkoušky.

S rostoucí pórovitostí směsí rostl i možný obsah vzduchu uzavřených v těchto pórech. Můžeme tyto výsledky vyjádřit i jako minimální obsah vzduchu v betonu. Díky vyššímu obsahu vzduchu klesá pevnost a také odolnost betonu, v celku pak tedy i jeho životnost. Norma ČSN 73 6123-1 udává doporučené hodnoty pro minimální a maximální obsah vzduchu. Hodnota by neměla překročit 6,0 %

8.4 Pevnost v tlaku na krychlích a válcích

Třída pevnosti betonu se určuje podle pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání. Válcová pevnost je v mém případě spíše jako doplňující hodnota. Jelikož neměly válce normový rozměr výšky, jejich pevnost se zobrazuje nižší, než ve skutečnosti může být.

Roztřídění směsí podle krychelné a válcové pevnosti a jejich možné využití:

- REF: C 25/30, CB III;
- K1: C 30/37, CB I / CB II;
- K2: C 35/45, CB I / CB II;
- K3: C 25/30, CB III;
- M: C16/20, nehodí se pro CB kryty.

Pokud bychom se soustředili pouze na krychelné pevnosti, dosáhli bychom u některých směsí o 1 až 2 pevnostní třídy výše.



Tab. 12 – Pevnost v tlaku na krychli zkoušených směsí v závislosti na stáří

Směs	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]			
	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
REF	27,5	35,3	37,0	32
K1	43,1	47,3	50,0	49,5
K2	34,9	45,3	45,4	43,7
K3	26,5	36,7	38,3	39,4
M	16,0	20,4	23,9	27,4

Tab. 13 – Pevnost v tlaku na válci zkoušených směsí ve stáří 28 dnů

Směs	Válcová pevnost v tlaku [MPa]
	28 dní
REF	28,1
K1	34,3
K2	47,5
K3	41,4
M	19,2

Podle hodnot v tabulkách (Tab. 12, 13) je vidět, že si směsi s kamenivem z ocelářské strusky v ohledu na pevnosti v prostém tlaku vedly nejlépe. Na pomyslném prvním místě pak jmenovitě směs K1 s ocelářskou struskou frakce 4/8 mm. Z grafu nárůstu pevnosti (Graf. 2) je vidět, že směs měla nejrychlejší a největší nárůst počáteční pevnosti v prvních 7 dnech od smíchání mezi všemi směsmi, 86 % pevnosti v tlaku na krychli z její maximální dosažené. Rychlost nabývání pevnosti se poté hodně snížila a zastavila okolo 56 dnu. U válcové pevnosti skončila tato směs na 3 místě, ale jak jsem už zmiňoval výše, této hodnotě se nemůže přikládat 100% váha.

Na druhém místě podle krychelné pevnosti skončila směs K2, také s náhradou kameniva za kamenivo z ocelářské strusky, ale tentokrát frakce 8/16 mm. I zde byl největší nárůst počáteční pevnosti do 7 dnů od výroby. Pevnost této směsi se vyvíjela až do 28 dnů, kde byla naměřena její nejvyšší hodnota. Dále už pevnost stagnovala v okolí této hodnoty. Při pohledu na válcovou pevnost, dopadla tato směs nejlépe. Ve 28 dnech byla hodnota srovnatelná s pevností krychelnou. Za tyto dobré výsledky směsí K1 a K2 odpovídá pravděpodobně dobré chemické složení ocelářské strusky, která tvořila alternativní kamenivo v těchto variantách betonu, a tvarový index zjištěný u tohoto kameniva.

Při pohledu na výsledky směsi K3, která skončila na třetím místě, je vidět rozdíl mezi užitím strusky vysokopecní a ocelářské, speciálně při porovnání se směsí K1. U směsi K3 bylo použito kamenivo z vysokopecní strusky frakce 4/8 mm. Tato směs měla opět nejrychlejší nárůst pevnosti během prvních 7 dnů, ale nabývala ji i po 56 dnech zrání, na rozdíl od směsí předešlých. Zde by se mohl aplikovat poznatek o vysokopecní strusce granulované používané jako pojivo, který nám říká o pomalejším a



dlouhodobém nárůstu pevnosti. Z tvaru křivky v grafu se dá usuzovat, že se pevnost ustálí až po 90 dnech. Nižší pevnost by se dala odůvodnit i větším množstvím nekubických zrn ve směsi, viz kapitola 8.1. Válcová pevnost této směsi však byla lepší jak pevnost krychelná ve stejném stáří, dokonce lepší než i u směsi K1.

Směs REF, s originální recepturou, kopíruje křivku vývoje pevnosti směsi K3, s tím rozdílem, že pevnost po 28 dnu se ustaluje. Válcová pevnost se vyvíjí v korelaci s pevností krychlenou, tedy o něco menší hodnota odpovídající rozdílu v normě.

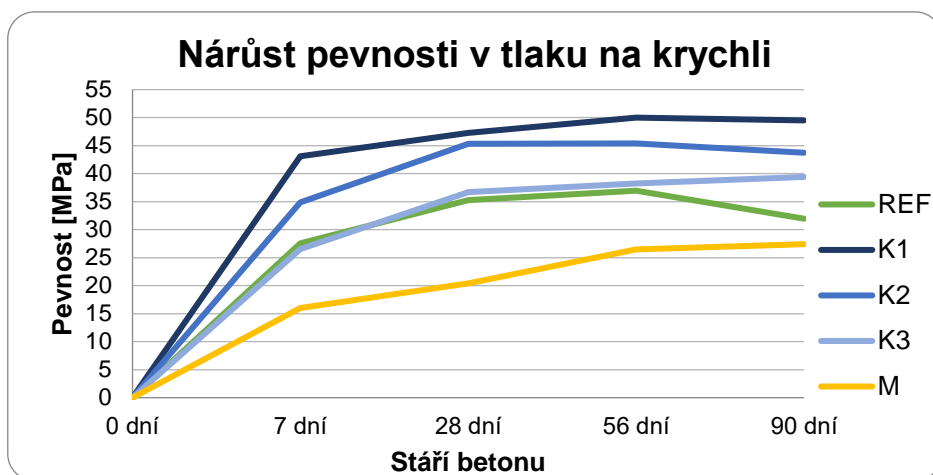
Všechny výše zmíněné směsi splňují podmínky normy ČSN 73 6123-1, která stanovuje minimální třídu pevnosti betonu po 28 dnech pro užití do cementobetonového krytu. Jediná mnou vytvořená směs, která tuto podmínku nespĺňuje, je směs M. Zde se použilo kamenivo z ocelářské strusky frakce 8/16 mm a nahradilo se 25 % cementového pojiva za vysokopecní strusku granulovanou vodou chlazenou. Z vývoje křivky v grafu je znatelné působení vysokopecní strusky v pojivu, která prodlužuje dobu nabývání pevnosti. Na rozdíl od ostatních směsí dosáhla tato směs po 7 dnech pouze 58 % celkové naměřené pevnosti na krychli. Za její nedostačující výkonnost může odpovídat hned několik faktorů. Za prvé obsah vzduchu. Ten měla směs téměř na úrovni 10 %, oproti ostatním minimálně pětinasobní hodnota. Překračuje i maximální doporučenou hodnotu 6,0 % stanovenou normou ČSN 73 6123-1. Za druhé nesoulad přísad. Ve směsi byla použita kombinace vysokopecní strusky a kameniva z ocelářské strusky a mohlo dojít k nekompatibilitě mezi nimi nebo překročení dovoleného množství chemických látek, jako například CaO. Směsi s použitím pouze ocelářské nebo vysokopecní strusky dosahovaly lepších výsledků a proto byl výsledek kombinace neočekávaný. Z tohoto důvodu bych doporučoval v budoucnu provést sérii zkoušek různých kombinací strusky, aby se tato možnost buď vyloučila či potvrdila.

Pokud bych výsledky krychlené pevnosti po 28 dnech interpretoval jako násobek zlepšení hodnoty směsi referenční pak jsou směsi K1 a K2 1,3 násobně lepší, směs K3 1,0 násobně lepší a směs M 0,6 násobně horší.

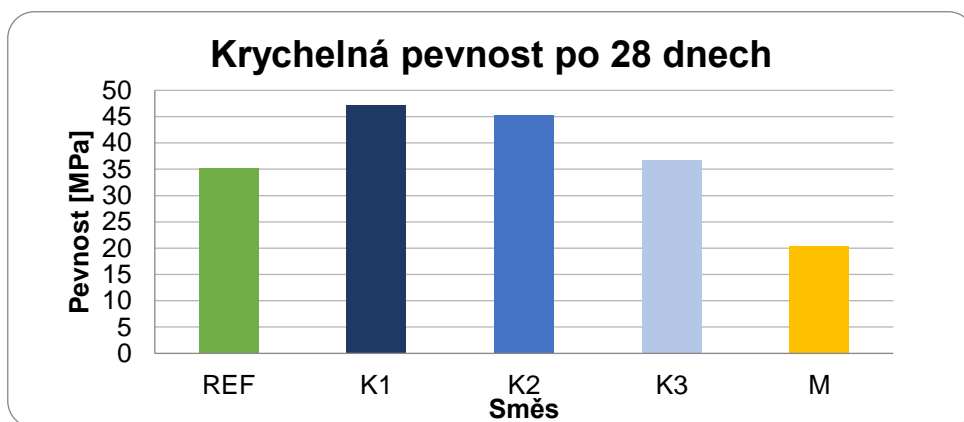
Pokud srovnáme mnou naměřené výsledky s výsledky od společnosti STRABAG a.s. (Tab. 28), kde vyšla průměrná pevnost na krychli 43 MPa, uvidíme mírné zlepšení pouze v případě směsí K1 a K2. Směs REF vykázala téměř o 8 MPa menší pevnost v prostém tlaku na krychli ačkoliv se jednalo o stejnou recepturu. To může být dáno rozdílnou hodnotou obsahu vzduchu při výrobě.



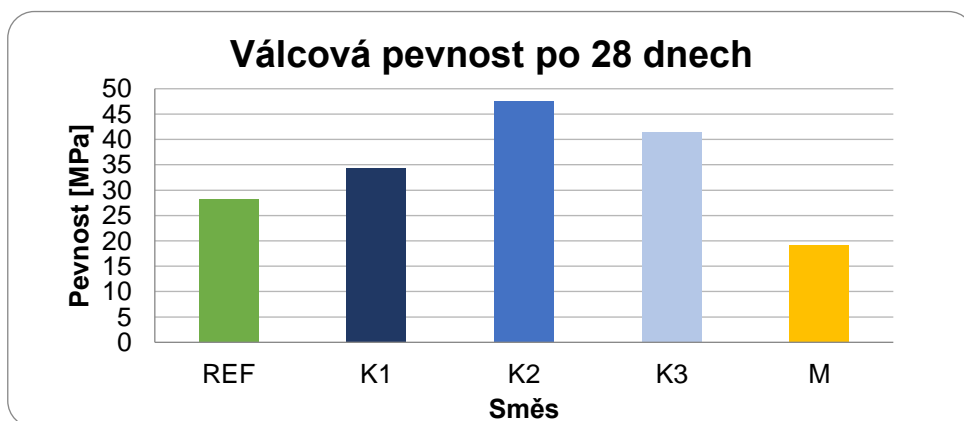
Dle obrázků níže (Obr. 22–32) je vidět, že na tělesa byla rovnoměrně rozložena tlaková síla. Docházelo ke stejnoměrnému poškození na všech stranách krychle, či válce. Je také možné vypožorovat, že směsi, které vykazují největší pevnost, jsou zároveň křehčí. Naopak směsi s menší pevností, jmenovitě vzorek od směsi M, je na konci zkoušky jen lehce naprasklý. Není tak pevný, křehký a rychle po zatížení kolabuje.



Graf. 2 – Vývoj průměrné pevnosti v tlaku na krychli směsi



Graf. 3 – Průměrná pevnost v tlaku na krychli



Graf. 4 – Průměrná pevnost v tlaku na válci



Obr. 22 – Krychle REF_1/3 po zatížení v lisu ve stáří 7 dnů



Obr. 23 – Krychle K1_2/3 po zatížení ve stáří 28 dnů



Obr. 24 – Krychle REF_1/3 po zatížení ve stáří 56 dnů



Obr. 25 – Krychle K1_3/3 po zatížení ve stáří 56 dnů



Obr. 26 – Krychle K2_2/3 po zatížení ve stáří 56 dnů



Obr. 27 – Krychle K3_2/3 po zatížení ve stáří 56 dnů



Obr. 28 – Krychle M_3/3 po zatížení ve stáří 56 dnů



Obr. 29 – Krychle K1_2/3 po zatížení ve stáří 90 dnů



Obr. 30 – Krychle K2_1/3 po zatížení ve stáří 90 dnů



Obr. 31 – Krychle K3_2/3 po zatížení ve stáří 90 dnů



Obr. 32 – Válec-K1_1/3 po zatížení ve stáří 28 dnů

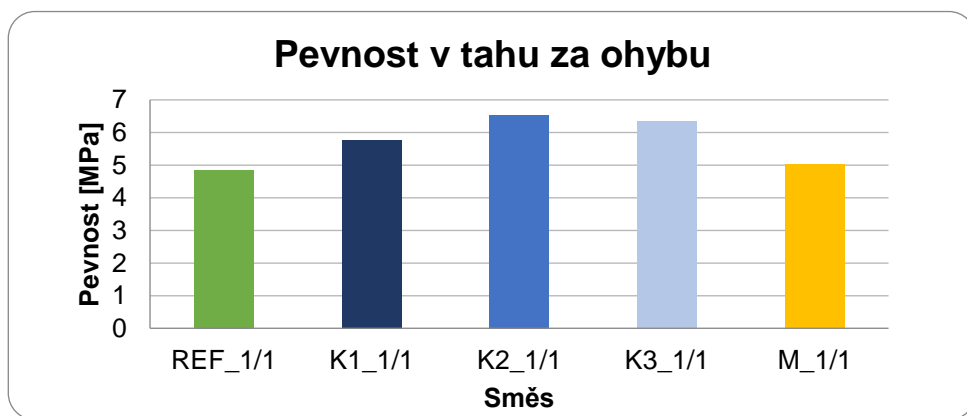


8.5 Pevnost v tahu za ohybu

Doplňková zkouška, která se provádí pouze v případě, je-li předepsána v dokumentaci stavby, prokázala vhodnost užití všech vyrobených směsí do cementobetonových krytů třídy CB I. Pro tuto třídu norma ČSN 73 6123-1 požaduje pevnost alespoň F4,5, tedy minimální deklarovaná pevnost v tahu za ohybu 4,5 MPa. Pro jistotu ověření hodnot, by bylo lepší, kdybych zkoušku provedl alespoň na 3 vzorcích od každé směsi.

Tab. 14 – Pevnost v tahu za ohybu trámek zkoušených směsí ve stáří 90 dnů

Směs	Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech [MPa]
REF	4,8
K1	5,8
K2	6,5
K3	6,3
M	5,0



Graf. 5 – Pevnost v tahu za ohybu na trámku



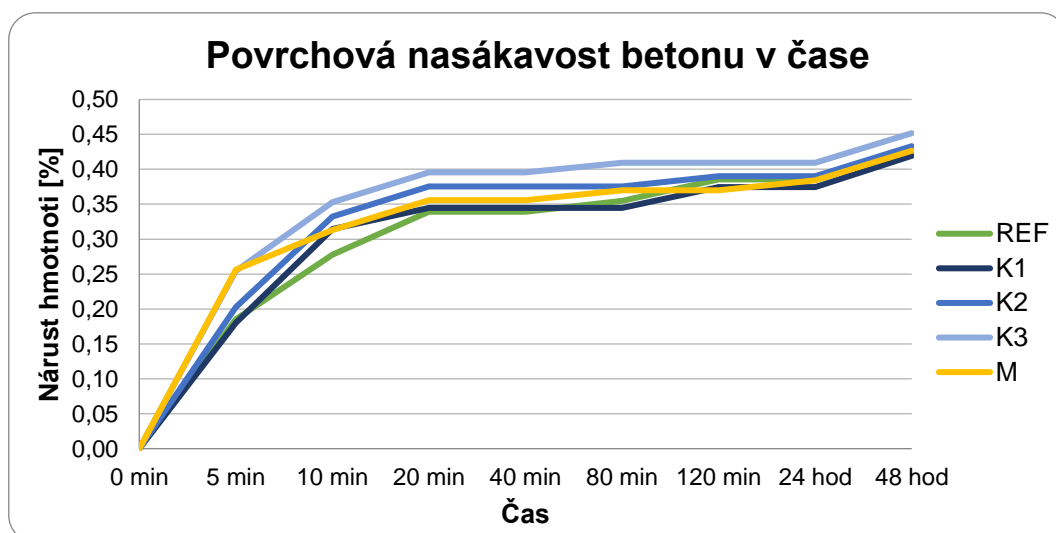
Obr. 33 – Zkušební trámek ve čtyřbodovém lisu



8.6 Odolnost vůči CHRL

Povrchová nasákavost:

Po 48 hodinách je rozdíl mezi povrchovou nasákavostí vzorků vyrobených ze směsí s užitím kameniva z vysokopecní a ocelářské strusky v rozmezí 0,03 %. Směrodatná odchylka se pohybovala v hodnotách od 0,011 % do 0,033 %. Rozdíl je tedy zanedbatelný a s maximální hodnotou povrchové nasákavosti 0,45 % nárůstu hmotnosti vzorku je možné uvažovat betonové směsi za málo povrchově nasákové a tedy mrazuvzdorné, odolné vůči působení chemickým rozmrazovacím látkám a objemovým změnám způsobených vodou. (Tab. 28, Graf. 6). Podle výsledků této zkoušky se nedá jasně určit, které vzorky vygenerují nejvíce odpadu při působení CHRL, ale naznačují, že odpady budou velmi malé.



Graf. 6 – Povrchová nasákavost betonu

CHRL:

Na vzorcích z referenční směsi byly naměřeny minimální odpady. Podobné hodnoty byly naměřeny u směsí K2 a M. U těchto směsí bylo v obou případech použito kamenivo z ocelářské strusky frakce 8/16 mm a mohla by se tedy vyvodit příčina nízkých odpadů díky němu. Horší výsledky byly zaznamenány u směsí K3 s kamenivem z vysokopecní strusky frakce 4/8 mm a K1 s kamenivem z ocelářské strusky frakce 4/8 mm. (Tab. 15).

Výsledky nám nabízejí možnou souvislost mezi množstvím odpadu a velikostí frakce. A tedy že směsi se struskovým kamenivem větší frakce jsou odolnější než směsi s frakcí menší. Při porovnání směsí K1 a K3 se nám ukazuje, že nasákavost



samostatného kameniva nemusí hrát tak důležitou roli jak bylo zamýšleno, pokud je sama směs nenasákavá a dosti odolná. Chemické rozmrazovací látky nemají možnost dlouhodobého kontaktu s kamenivem. V kapitole 8.2 je jasně ukázán horší výsledek u kameniva z vysokopecní strusky, které je užito ve směsi K3, než u kameniva ze strusky ocelářské ve směsi K1. A přesto je výsledek odpadů opačný.

V tomto případě by mohl být rozhodující faktor samotné chemické složení strusky. Již výše v kapitole 8.4 jsem zmiňoval křehkost vzorků při stlačení, která je vidět na obrázcích (Obr. 22 -32). Pokud struskové kamenivo na sebe váže více záměsové vody, mohlo by jí být poté nedostatek pro potřeby pojiva a tím by na povrchu vznikalo cementové mléko s horší strukturou a sklonem ke slabší soudržnosti na povrchu, právě zmíněné větší křehkosti.

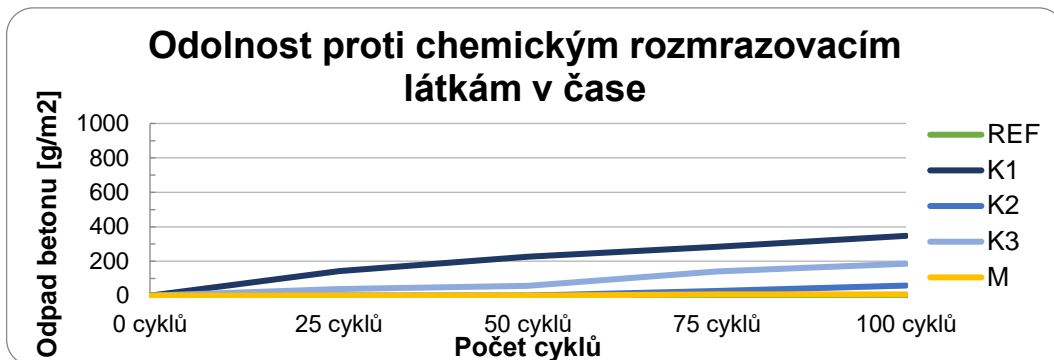
Zajímavé by bylo provést další zkoušky s větším počtem cyklů, aby se po degradaci povrchu vzorku mohl dostat solný roztok ke struskovému kamenivu a byl s ním v kontaktu delší dobu. Pak by se mohla ukázat již zmiňovaná objemová nestabilita strusky a rozpadavost, viz kapitola 4.1.1.1 S vývojem degradace povrchu těles zaznamenaným v mém případě, odhaduji jako zajímavé provést alespoň 200 cyklů, což v rámci času pro vypracování diplomové práce nebylo proveditelné.

Tab. 15 – Odolnost zkušebních těles vůči CHRL v závislosti na počtu cyklů

Směs	Hmotnost odpadu přepočítána na plochu [g/m ²]				Součinitel odolnosti
	Po 25 cyklech	Po 50 cyklech	Po 75 cyklech	Po 100 cyklech	
REF	5,651	11,301	16,952	22,602	D1
K1	141,858	227,003	283,456	347,361	D1
K2	5,659	11,318	37,742	69,850	D1
K3	39,770	62,489	145,785	191,189	D1
M	5,634	11,268	22,536	28,171	D1

Betonové vzorky vyrobené ze směsí betonu s náhradou kameniva a pojiva vytvořily větší množství odpadů než vzorky směsi referenční, avšak jejich hmotnost po přepočtu gramů na m² je tak nízká, že všechny směsi spadají pod součinitel odolnosti D1. Ten je ohraničen maximální hodnotou odpadu na 1000 g/m².

Norma ČSN 73 6123-1 stanovuje maximální množství odpadu pro cementobetonové kryty CB I na 1000 g/m² po 75 cyklech metodou C. Betonové směsi tak s velkou rezervou splňují podmínku užití pro cementobetonové kryty první kategorie.



Graf. 7 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám



Obr. 34 – Těleso směsi K1 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL



Obr. 35 – Těleso směsi K2 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL



Obr. 36 – Těleso směsi K3 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL

Jak je vidět z obrázků (Obr. 34, 35, 36) tělesa jsou jen lehce povrchově degradována, došlo k odstranění nejpoddajnějších částí vzorků tvořených cementovým mlékem. Kamenivo i díky své nízké nasákavosti po obnažení nejevilo žádné známky poškození.

Hodnoty odpadu referenční směsi získané od společnosti STRABAG a.s. dosahují v průměru 403 g/m² [40]. Rozdíl velikostí odpadů od mé směsi REF může být zapříčiněn rozdílnou metodou zkoušení. Laboratoř společnosti STRABAG a.s. (TPA ČR s.r.o.) použila na rozdíl ode mě jinou metodu a to metodu A, „Automatické cyklování“. Tato metoda pracuje ve větším teplotním rozsahu a se změnou teploty v kratším čase a tím je agresivnější. Konkrétněji mnou užitá metoda C, pracuje 3 hodiny při teplotě -18 °C a 3 hodiny při teplotě +5 °C, tedy jeden cyklus trvá 6 hodin. Metoda A pracuje při teplotách -15 °C a +20 °C, které se střídají po 15 minutách, tedy jeden cyklus trvá 30 minut. Další příčinou takového rozdílu může být obsahu vzduchu v betonu. S rostoucím procentem obsahu vzduchu klesá odolnost a zvyšuje se rozpadavost. Směs od společnosti STRABAG a.s. měla v průměru 5,7 % oproti mé REF směsi, která měla 1,5 %. Ostatní mnou vytvořené směsi dopadly v porovnání se směsí od společnosti STRABAG a.s. s lepšími hodnotami.



9 Závěr

Z laboratorních zkoušek a rozborů zaměřených na kamenivo můžeme vidět daleko lepší výsledky a potenciál pro cementobetonové kryty u kameniva ze strusky ocelářské, výsledky rozdílných frakcí jsou srovnatelné. Kamenivo z vysokopecní strusky zaznamenalo 2x větší počet nekubických zrn, které zapříčiňují horší zhutnitelnost, soudržnost a horší pevnost betonové směsi. Dále vyšla několikanásobně hůře i nasákavost tohoto kameniva. V kamenivu se mohou díky tomu vyskytovat vnitřní tlaky, které oslabují životnost kameniva i betonové směsi. V praktických aplikacích dle konzultací s výrobcem tohoto kameniva na Kladensku toto naštěstí není potvrzeno a vyšší nasákavost dle dosavadních poznatků spíše byla výhodou k tzv. vnitřnímu ošetřování betonu, kdy voda nasáknutá v zrnech tohoto struskového kameniva se postupem času uvolňuje a může přispívat ke zlepšení hydratace cementu.

Zkouška pevnosti v tlaku nám jasně naznačuje vyšší přínos ocelářské strusky. Ta dosahuje po 28 dnech 120 % pevnosti srovnatelné varianty betonu, kde byla použita struska vysokopecní. Nejrychlejší nárůst pevnosti v tlaku dosahují betonové směsi se struskami do 7 dnů od zpracování. Po 28 dnech dosáhly betonové směsi s náhradami kameniva alespoň 93 % své maximální pevnosti. Tyto směsi, K1, K2, K3, pak dosahují lepších nebo alespoň podobných výsledky jako směs referenční a svými hodnotami splňují podmínky pro užití do cementobetonových vozovek. Směsi K1 a K2 mohou být použity dle získaných výsledků v kategorii cementobetonových krytů CB I, která odpovídá nejvyšší třídě dopravního zatížení, jež se objevuje na dálnicích, letištních plochách a silnicích I. třídy. Směs K3 pak může být použita u kategorie CB III. Ta se používá na nejméně zatížených komunikacích, jako jsou místní komunikace sběrné a obslužné nebo parkoviště. Co se týče směsi M, s kombinací náhrady kameniva i pojiva, ta ve zkouškách pevnosti v tlaku dopadla nejhůře a pro cementobetonové kryty se nehodí. Náhrada pojiva prodlužuje nárůst počáteční pevnosti vzorků a v případě spolupůsobení se struskovým kamenivem nedosahují vzorky takových pevností jako náhrada kameniva samostatně. Zkoušena byla kombinace vysokopecní granulované strusky a strusky ocelářské.

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu na rozdíl od zkoušky předešlé prokázala vhodnost užití všech směrů pro cementobetonové vozovky kategorie CB I.



Takovýto výsledek prokázala i zkouška odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Po 100 cyklech byly naměřené nízké hodnoty odpadů, konkrétně nejvíce u vzorků směsi K1 s hodnotou 347 g/m². To odpovídá zhruba 1/3 odpadů normou povolené meze. Došlo pouze k odstranění cementového mléka z povrchu vzorků. Degradace s počtem opakování zpomalovala a můžeme tedy říci, že jsou směsi více než uspokojivě odolné.

Jak už zmiňuji v teoretické části, vlastnosti strusky závisí na typu zpracovaného materiálu a typu výroby. Proto se musí vždy před užitím konkrétní typ strusky odzkoušet, zda je jako umělé kamenivo vhodná či nikoli. I u strusky od stejného výrobce se stejným výrobním procesem a se stejným původním materiálem mohou vycházet jiné vlastnosti.

Pokud se budeme soustředit pouze na výsledky z této diplomové práce, jasně se nám ukazuje jako nejvhodnější nahradit kamenivo frakce 8/16 mm ocelářskou struskou. Ta vykazuje nejlepší pevnosti v tlaku, tahu za ohybu i odolnosti vůči CHRL. Na druhém místě náhrada kameniva frakce 4/8 mm taktéž ocelářskou struskou. Ta vykazovala podobné hodnoty v pevnosti v tlaku i tahu. Pouze zkouška odolnosti byla horší, ale stále v rámci skvělého rozpětí. Tyto dvě náhrady doporučuji užít v místech s očekávanými náročnými podmínkami. Pokud budeme nahrazovat kamenivo frakce 4/8 mm vysokopecní struskou musíme počítat s menší pevností a tak použít směs pouze do vozovek s nižším dopravním zatížením. Směs M se jeví jako nevhodná, jelikož neprošla hlavním kritériem a tím byla pevnost, kombinace pojiva a kameniva struskového původu neprokázaly v tomto konkrétním případě vhodnost.

Ocelářská struska nám tedy ve všech zásadních ohledech vychází lépe než struska vysokopecní a jak je vidět skrývá nemalý potenciál použití v dopravním stavitelství. Její vyšší pevnosti podbízejí myšlenku užití u vysokopecnostních betonů. Na straně druhé je však potřeba zdůraznit, že nebyla ověřena její dlouhodobá rozpadavost a nestabilita, před kterou varují vědecké práce. Pro odemknutí potenciálu ocelářské strusky by bylo dobré podrobit tyto materiály většímu prozkoumání z hlediska těchto problémů. V tomto ohledu je vysokopecní struska lépe zmapovaná a z předešlých výzkumů víme, že u ní rozpadavost v takové míře nehrozí. Vysokopecní struska je stabilní a odolná, jak do jisté míry ukázaly výsledky mnou provedené zkoušky. Doporučuji ji využít pro běžné cementobetonové kryty. Její velká výhoda spočívá v dobrém spolupůsobení s pojivem a také její objemová hmotnost ve srovnání s běžně užitými kamenivy, takže se nabízí možnost užití kupříkladu na betonových



mostech, kde výsledná hmotnost zvoleného typu krytu má významný vliv z hlediska přetížení konstrukce mostního objektu.

Tato práce potvrzuje význam a ekologickou hodnotu využívání strusek nejen v silničním stavitelství. Výsledky zkoušek ukazují, že použití strusek nejenže umožňuje dosahovat srovnatelných nebo dokonce lepších výsledků ve srovnání se směsmi bez náhrad, ale zároveň přináší environmentální přínos. Tím že využíváme druhotný materiál, který by jinak končil na skládce nebo by byl likvidován jako odpad, minimalizujeme negativní dopady na životní prostředí spojené se skladováním či odstraňováním.

V rámci současných trendů v oblasti environmentální politiky je využívání vedlejších produktů z výroby klíčové pro snižování emisí skleníkových plynů a omezení negativního dopadu průmyslových činností na životní prostředí. Použití vedlejších produktů z výroby má i ekonomický přínos s ohledem na rostoucí ceny emisních povolenek a zdražování cen energií z důvodu progresivní zelené politiky a vývoji politiky ve světě.



10 Seznam použitých zdrojů

- [1] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. 1. Praha: ČKAIT, 2014. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-59-6.
- [2] HOLEČEK, Petr. *Vliv síranové koroze na materiálové vlastnosti betonu při běžných a vysokých teplotách* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-09-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99521/F1-DP-2022-Holecek-Petr.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Radek Štefan.
- [3] PERTOLD, Zděnek et al. Alkalicko-křemičitá reakce v české republice a možnosti její eliminace. *BETON* [online]. únor 2014, **14**[2], 34-41 [cit. 2023-09-19]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2014-2-34-alkalicko-kremicita-reakce-v-ceske-republice-a-moznosti-jeji-eliminace/>
- [4] PIATAK, Nadine M., Michael B. PARSONS a Robert R. SEAL. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry* [online]. 2015, **57**(1), 236-266 [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: doi:10.1016/j.apgeochem.2014.04.009.
- [5] WORLD STEEL ASSOCIATION. *Steel industry co-products* [online]. Belgie, 2020 [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-industry-co-products.pdf>
- [6] Iron and Steel Statistics and Information. USGS. *National Minerals Information center* [online]. 2023 [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-steel.pdf>
- [7] DELITSYN, L. et al. Full utilization of coal-fired power plant ash and slag waste components. *2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* [online]. 2023, **1212**(012024) [cit. 2023-09-18]. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/1212/1/012024
- [8] RYABOV, Yu. V et al. Methods for Beneficiation of Ash and Slag Waste from Coal-Fired Thermal Power Plants and Ways for Their Commercial Use. *Thermal Engineering* [online]. duben 2019, **66**, 149-168 [cit. 2023-09-12]. Dostupné z: doi: 10.1134/S0040601519030054



- [9] About iron and steel slag: Generation of iron and steel slag. In: *Nippon Slag Association* [online]. [cit. 2023-09-12]. Dostupné z: <https://www.slg.jp/e/slag/process.html>
- [10] LUŇÁČEK, Josef. Struska. In: *A železo stále teklo* [online]. 1. 2020 [cit. 2023-09-12]. Dostupné z: <https://www.lunacek.cz/a-zelezo-stale-teklo/struska/>
- [11] SARNA, Satyendra Kumar. Blast Furnace Slag. In: *Ispatguru* [online]. 2013 [cit. 2023-09-13]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag/#>
- [12] VÁCLAVÍK, Vojtěch a Petr MLČOCH. Ocelářská struska a její aktuální využití při výrobě betonu. *BETON* [online]. 2021, 17.3.2021, **21**(1) [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2021_1_41_ocelarenska-struska-a-jeji-aktualni-vyuziti-pri-vyrobe-betonu/
- [13] KONVIČKA, Vladislav. Hornická skripta: Vysokopecní provoz železáren. *Nejen HORNICTVÍ.info* [online]. 2005 [cit. 2023-09-14]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/vyspec/vyspec.htm>
- [14] Blast furnace. In: *Encyklopedia Britannica* [online]. 1998, srpen 2023 [cit. 2023-09-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/blast-furnace#/media/1/69019/1529>
- [15] SHI, Caujin, NANNI, Antonio, ed. Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. ASCE, červen 2004, **16**[3], 230-236 [cit. 2023-09-12]. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)
- [16] Cementobetonová deska. *EBETON* [online]. [cit. 2023-09-19]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/stavby/silnice/cementobetonova-deska/>
- [17] ČESKOMORAVSKÝ BETON A.S. *Příručka technologa BETON: suroviny, výroba, vlastnosti* [online]. 1. Beroun, 2010 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: https://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a_uploaded_prirucka-technologa-beton.pdf
- [18] Cement. *EBETON* [online]. [cit. 2023-09-19]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/cement/>



- [19] *Technický list CEM I 42,5 R Mokrý*. Technický list [online]. Českomoravský cement a.s. – Závod Mokrý, březen 2023 [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [20] *Technický list STACHEPLAST*. Technický list [online]. Stachema CZ s.r.o., březen 2022 [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-Stacheplast.pdf>
- [21] *Technický list PORALAN STA*. Technický list [online]. Stachema CZ s.r.o., leden 2013 [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-Poralan-STA.pdf>
- [22] TP 138. *Užití struskového kameniva do pozemních komunikací*. 2. vyd. Praha: Ministerstvo Dopravy, Odbor silniční infrastruktury, duben 2011
- [23] TKP 6. *Cementobetonový kryt*. 5. vyd. Praha: Ministerstvo Dopravy, Odbor pozemních komunikací, leden 2015
- [24] ČSN 73 1326-Z1. *Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek*. 1. vyd. Praha: ČNI, listopad 2003
- [25] ČSN 73 6123-1. *Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shody*. 3. vyd. Praha: ÚNMZ, červen 2014
- [26] ČSN EN 206+A2 (73 2403). *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2. vyd. Praha: ÚNMZ, říjen 2021
- [27] ČSN EN 933-4 (72 1193). *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4 Stanovení tvaru zrn - Tvarový index*. 2. vyd. Praha: ČNI, říjen 2008.
- [28] ČSN EN 1097-6 (72 1194). *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6 Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. 4. vyd. Praha: ÚNMZ, leden 2023
- [29] ČSN EN 12350-2 (73 1301). *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*, 4. vyd. Praha: ÚNMZ, duben 2020
- [30] ČSN EN 12390-1 (73 1302). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*, 3. vyd. Praha: ÚNMZ, listopad 2021



- [31] ČSN EN 12390-2 (73 1302). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnostní*, 4. vyd. Praha: ÚNMZ, červenec 2020
- [32] ČSN EN 12390-3 (73 1302). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, 4. vyd. Praha: ÚNMZ, duben 2020
- [33] ČSN EN 12390-5 (73 1302). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*, 1. vyd. Praha: ÚNMZ, červenec 2020
- [34] ČSN EN 12620+A1 (72 1502). *Kamenivo do betonu*. 1. vyd. Praha: ČNI, listopad 2008.
- [35] ČSN EN 13242+A1. *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*. 1. vyd. Praha: ČNI, prosinec 2008.
- [36] ČSN EN 13877-1 (73 6150). *Cementobetonové kryty – Část 1: Materiály*. 3. vyd. Praha: ÚNMZ, říjen 2013
- [37] ČSN EN 13877-2 (73 6150). *Cementobetonové kryty – Část 2: Funkční požadavky*. 3. vyd. Praha: ÚNMZ, říjen 2013
- [38] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. 2. vyd. Praha: ÚNMZ, prosinec 2021.
- [39] ORT, Jiří. *Analýza vlivu velikosti kameniva na tlakovou pevnost HPC*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [40] STRABAG a.s., TPA ČŘ, s.r.o.. *Přehled výsledků zkoušek konzistence a obsahu vzduchu v čerstvém betonu, zkoušek pevnosti betonu CBK v tlaku na zkušebních tělesech, zkoušek odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Výzkumná zpráva bez označení. Praha, 2023.
- [41] KÁMEN Zbraslav, a.s.. *Protokol zkoušek kameniva*. Výzkumná zpráva označena č. 1223000218 – 421. Praha, 2023.
- [42] KÁMEN Zbraslav, a.s.. *Protokol zkoušek kameniva*. Výzkumná zpráva označena č. 1223000220 – 434. Praha, 2023.



- [43] KÁMEN Zbraslav, a.s.. *Protokol zkoušek kameniva*. Výzkumná zpráva označena č. 1223000222 – 446. Praha, 2023.
- [44] KÁMEN Zbraslav, a.s.. *Protokol zkoušek kameniva*. Výzkumná zpráva označena č. 3223000107 – 505. Praha, 2023.



11 Seznam obrázků

Obr. 1 – Vzduchem chlazená vysokopecní struska [9]	13
Obr. 2 – Granulovaná vysokopecní struska [9]	13
Obr. 3 – Vzduchem chlazená ocelářská struska BOF [9].....	13
Obr. 4 – Schéma tvorby železa ve vysoké peci [14]	15
Obr. 5 – Schéma výroby oceli [15].....	19
Obr. 6 – Schéma výroby vysokopecní a ocelářské strusky [9]	19
Obr. 7 – Technický list použitého portlandského cementu [19]	27
Obr. 8 – Použité jemné a hrubé kamenivo ve vytvořených směsích	28
Obr. 9 – Ocelářská struska 4/8 mm	28
Obr. 10 – Vysokopecní struska 4/8 mm.....	28
Obr. 11 – Ocelářská struska 4/8 mm	28
Obr. 12 – Vysokopecní struska 4/8 mm.....	28
Obr. 13 – Technický list Stachoplastu [20].....	30
Obr. 14 – Technický list Poralanu [21]	30
Obr. 15 – Zkouška sednutí konzistence směsi	33
Obr. 16 – Vyplněné formy směsí a překryté potravinářskou fólií.....	34
Obr. 17 – Krychlové těleso a jeho kódové označení	34
Obr. 18 – Zkušební krychle umístěna v lisu před zatížením.....	39
Obr. 19 – Zkušební válec umístění v lisu před zatížením.....	39
Obr. 20 – Odříznuté zkušební těleso z válce	41
Obr. 21 – Zkušební tělesa navlečená v automobilové duši s kovovými objímkami .	41
Obr. 22 – Krychle REF_1/3 po zatížení v lisu ve stáří 7 dnů.....	50
Obr. 23 – Krychle K1_2/3 po zatížení ve stáří 28 dnů.....	50
Obr. 24 – Krychle REF_1/3 po zatížení ve stáří 56 dnů.....	50
Obr. 25 – Krychle K1_3/3 po zatížení ve stáří 56 dnů.....	50
Obr. 26 – Krychle K2_2/3 po zatížení ve stáří 56 dnů.....	50
Obr. 27 – Krychle K3_2/3 po zatížení ve stáří 56 dnů.....	50
Obr. 28 – Krychle M_3/3 po zatížení ve stáří 56 dnů	51
Obr. 29 – Krychle K1_2/3 po zatížení ve stáří 90 dnů.....	51
Obr. 30 – Krychle K2_1/3 po zatížení ve stáří 90 dnů.....	51
Obr. 31 – Krychle K3_2/3 po zatížení ve stáří 90 dnů.....	51
Obr. 32 – Válec-K1_1/3 po zatížení ve stáří 28 dnů	51
Obr. 33 – Zkušební trámek ve čtyřbodovém lisu.....	52
Obr. 34 – Těleso směsi K1 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL ...	55



Obr. 35 – Těleso směsi K2 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL ...	55
Obr. 36 – Těleso směsi K3 před a po 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči CHRL ...	55
Obr. 37 – Zkušební tělesa po odbednění ponořená v kádi s vodou	75
Obr. 38 – Příčný řez krychlemi s texturou kameniva v betonu	75
Obr. 39 – Siloměr tlakového lisu EDB 400.....	76
Obr. 40 – Siloměr čtyřbodového lisu EU 40.....	76
Obr. 41 – Čtyřbodový lis EU 40	76
Obr. 42 – Tlakový lis EDB 400	76
Obr. 43 – Klimatizační box	76
Obr. 44 – Kotoučová pila při odřezávání puků z válců	76

12 Seznam grafů

Graf. 1 – Křivka zrnitosti použitých kameniv	29
Graf. 2 – Vývoj průměrné pevnosti v tlaku na krychli směsi	49
Graf. 3 – Průměrná pevnost v tlaku na krychli	49
Graf. 4 – Průměrná pevnost v tlaku na válci	49
Graf. 5 – Pevnost v tahu za ohybu na trámku.....	52
Graf. 6 – Povrchová nasákavost betonu.....	53
Graf. 7 – Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám	55

13 Seznam tabulek

Tab. 1 – Množství vedlejších produktů při výrobě oceli [5].....	13
Tab. 2 – Procentuální využití strusky ocelářské a vysokopecní v Evropě [5]	13
Tab. 3 – Rozsah chemického složení vysokopecní strusky v % [11]	16
Tab. 4 – Rozsah chemického složení ocelářské strusky v % [15].....	20
Tab. 5 – Členění cementobetonových krytů [1].....	21
Tab. 6 – Doporučené chemické vysokopecní strusky podle TP 138. [22]	24
Tab. 7 – Tvarový index a nasákavost zkoušeného kameniva	29
Tab. 8 – Složení betonových směsí.....	32
Tab. 9 – Tvarový index struskového kameniva.....	44
Tab. 10 – Nasákavost struskového kameniva a jeho objemová hmotnost	45
Tab. 11 – Porozita betonových směsí.....	46
Tab. 12 – Pevnost v tlaku na krychli zkoušených směsí v závislosti na stáří	47
Tab. 13 – Pevnost v tlaku na válcích zkoušených směsí ve stáří 28 dnů.....	47



Tab. 14 – Pevnost v tahu za ohybu trámek zkušných směsí ve stáří 90 dnů	52
Tab. 15 – Odolnost zkušných těles vůči CHRL v závislosti na počtu cyklů	54
Tab. 16 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice 4/8 mm	67
Tab. 17 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice 8/16 mm	67
Tab. 18 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice 11/22 mm	67
Tab. 19 – Zkouška zrnitosti kameniva DestroKladno vysokopecní 4/8 mm.....	67
Tab. 20 – Zkouška zrnitosti kameniva Voest Alpine AG ocelářská 4/8 mm.....	68
Tab. 21 – Zkouška zrnitosti kameniva Voest Alpine AG ocelářská 8/16 mm.....	68
Tab. 22 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých válců po 28 dnech.....	69
Tab. 23 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 7 dnech.....	70
Tab. 24 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 28 dnech.....	71
Tab. 25 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 56 dnech.....	72
Tab. 26 – Povrchová nasákavost betonových vzorků	73
Tab. 27 – Velikost odpadů ze zkoušky CHRL.....	74
Tab. 28 – Průměrné hodnoty výsledků zkoušek referenční směsi vyrobené firmou STRABAG a.s. [40]	74



14 Přílohy

Tab. 16 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice
4/8 mm

Sýkořice 4/8 mm			
Navážka [g]		3034,6	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	0,0	0,00	100,00
11,2	0,0	0,00	100,00
8	154,8	5,10	94,90
5,6	1479,4	48,75	46,15
4	1125,6	37,09	9,06
2	221,5	7,30	1,76
0,063	26,7	0,88	0,88
0	26,4	0,87	0,01

Tab. 18 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice
11/22 mm

Sýkořice 11/22 mm			
Navážka [g]		3032,1	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
31,5	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,00	100,00
16	272,9	9,01	90,99
11,2	1815,2	59,92	31,07
8	754,6	24,91	6,16
4	173,6	5,73	0,43
0,063	5,4	0,18	0,25
0	7,7	0,25	0,00

Tab. 17 – Zkouška zrnitosti kameniva Sýkořice
8/16 mm

Sýkořice 8/16 mm			
Navážka [g]		3029,4	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
31,5	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,00	100,00
16	272,9	9,01	90,99
11,2	1815,2	59,92	31,07
8	754,6	24,91	6,16
4	173,6	5,73	0,43
0,063	5,4	0,18	0,25
0	7,7	0,25	0,00

Tab. 19 – Zkouška zrnitosti kameniva
DestroKladno vysokopecní 4/8 mm

DestroKladno vysokopecní 4/8 mm			
Navážka [g]		246,61	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	0	0,00	100,00
11,2	0,0	0,00	100,00
8	16,3	6,61	93,39
5,6	86,1	34,91	58,48
4	87,0	35,28	23,20
2	42,4	17,19	6,01
1	8,0	3,24	2,76
0,063	5,8	2,35	0,41
0	1,0	0,41	0,00



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty

Tab. 20 – Zkouška zrnitosti kameniva Voest Alpine AG ocelářská 4/8 mm

Voest Alpine AG ocelářská 4/8 mm			
Navážka [g]		305,32	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	0	0,00	100,00
11,2	0,0	0,00	100,00
8	17,3	5,68	94,32
5,6	125,3	41,03	53,29
4	110,5	36,20	17,09
2	31,0	10,15	6,94
1	16,4	5,36	1,58
0,063	3,8	1,24	0,34
0	1,0	0,34	0,00

Tab. 21 – Zkouška zrnitosti kameniva Voest Alpine AG ocelářská 8/16 mm

Voest Alpine AG ocelářská 8/16 mm			
Navážka [g]		3032,1	
Síto	Zůstatek	Podíl	Propad
[mm]	[g]	[%]	[%]
31,5	0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,00	100,00
16	24,5	8,04	91,96
11,2	170,4	55,82	36,14
8	80,4	26,34	9,80
4	18,7	6,12	3,68
2	9,6	3,14	0,54
0,063	1,1	0,35	0,19
0	0,6	0,19	0,00



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty

Tab. 22 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých válců po 28 dnech

VÁLCE							
Stáří 28 dnů							
Směs	Výška	Průměr	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla F	Pevnost v tlaku	Průměr
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	
REF_1/3	247,00	150,00	9,788	2242,459	505	28,577	28,136
REF_2/3	245,67	150,00	9,962	2294,679	439	24,842	
REF_3/3	245,33	150,33	10,003	2297,198	550	30,987	
K1_1/3	241,33	149,38	10,371	2452,079	558	31,839	34,326
K1_2/3	243,33	150,67	10,474	2414,201	645	36,176	
K1_3/3	242,83	150,50	10,519	2435,058	622	34,965	
K2_1/3	242,83	149,67	10,874	2545,233	820	46,607	47,507
K2_2/3	242,83	149,67	10,864	2542,893	830	47,176	
K2_3/3	244,00	150,67	10,874	2499,517	869	48,739	
K3_1/3	243,33	150,33	10,237	2370,259	819	46,143	41,375
K3_2/3	244,33	149,67	10,269	2388,867	781	44,391	
K3_3/3	247,00	149,67	10,433	2400,783	591	33,591	
M_1/3	244,67	150,83	9,937	2273,051	371	20,764	19,201
M_2/3	243,00	150,33	10,023	2323,862	371	20,902	
M_3/3	246,33	149,83	9,833	2264,025	281	15,937	



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty

Tab. 23 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 7 dnech

KRYCHLE									
Stáří 7 dnů									
Směs	Výška	Délka	Šířka	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla F	Pevnost v tlaku	Průměr	Nárůst
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[%]
REF_1/3	149,82	148,72	149,78	7,783	2332,137	635	28,507	27,539	—
REF_2/3	150,77	152,29	150,72	7,991	2316,792	582	25,356		
REF_3/3	150,01	149,56	149,98	7,863	2336,788	645	28,755		
K1_1/3	150,13	150,16	150,21	8,303	2451,966	911	40,389	43,080	—
K1_2/3	149,66	149,56	149,80	8,322	2481,960	1030	45,974		
K1_3/3	150,11	149,40	150,02	8,278	2460,458	961	42,877		
K2_1/3	149,78	148,88	149,95	8,292	2479,834	815	36,507	34,876	—
K2_2/3	149,84	148,13	149,77	8,236	2477,540	738	33,265		
K2_3/3	150,22	149,17	149,82	8,241	2454,714	779	34,857		
K3_1/3	150,45	148,93	150,18	7,657	2275,476	591	26,424	26,515	—
K3_2/3	149,74	148,87	149,95	8,008	2395,701	908	40,675		
K3_3/3	149,94	150,33	150,01	7,697	2276,345	600	26,606		
M_1/3	149,82	148,24	149,80	7,492	2251,909	335	15,086	16,009	—
M_2/3	149,31	146,28	149,84	7,509	2294,460	336	15,329		
M_3/3	149,45	150,17	149,74	7,733	2301,077	396	17,611		

**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb**

Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti betonů pro CB kryty

Tab. 24 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 28 dnech

KRYCHLE									
Stáří 28 dnů									
Směs	Výška	Délka	Šířka	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla F	Pevnost v tlaku	Průměr	Nárůst
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[%]
REF_1/3	149,72	149,49	149,69	7,835	2338,591	783	34,991	35,250	27,9
REF_2/3	149,68	147,24	149,57	7,498	2274,633	781	35,463		
REF_3/3	150,07	150,57	149,59	7,779	2301,383	795	35,296		
K1_1/3	150,64	148,60	149,83	8,295	2473,196	1009	45,318	47,254	9,7
K1_2/3	149,80	149,24	150,10	8,237	2454,660	1170	52,230		
K1_3/3	150,08	149,33	149,79	8,195	2441,160	989	44,215		
K2_1/3	149,66	151,27	149,68	8,464	2497,775	1009	44,563	45,340	30,0
K2_2/3	149,24	147,48	150,10	8,269	2502,960	1100	49,691		
K2_3/3	149,81	145,99	149,57	8,174	2498,770	912	41,766		
K3_1/3	150,44	149,60	147,51	7,751	2334,755	828	37,521	36,706	38,4
K3_2/3	150,04	149,74	149,35	7,582	2259,611	800	35,772		
K3_3/3	149,66	150,49	150,14	8,119	2401,003	832	36,823		
M_1/3	150,36	151,90	150,52	7,664	2229,314	490	21,431	20,392	27,4
M_2/3	150,62	152,77	149,77	7,605	2206,753	420	18,356		
M_3/3	150,36	151,64	151,07	7,727	2243,296	490	21,390		



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty

Tab. 25 – Volumetrické vlastnosti a pevnosti jednotlivých krychlí po 56 dnech

KRYCHLE									
Stáří 56 dnů									
Směs	Výška	Délka	Šířka	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla F	Pevnost v tlaku	Průměr	Nárůst
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[%]
REF_1/3	149,45	150,26	149,90	7,920	2352,885	821	36,450	36,955	4,8
REF_2/3	150,26	150,35	149,84	7,737	2285,529	660	29,296*		
REF_3/3	150,20	151,30	149,97	7,952	2333,377	850	37,461		
K1_1/3	149,60	148,90	149,66	8,274	2481,865	1147	51,471	50,007	5,8
K1_2/3	149,62	149,03	149,97	8,224	2459,441	1132	50,649		
K1_3/3	149,72	148,55	149,67	8,121	2439,470	1065	47,901		
K2_1/3	149,73	150,21	149,67	8,321	2472,002	961	42,745	45,397	0,1
K2_2/3	149,38	146,29	149,86	8,282	2529,024	1162	53,004		
K2_3/3	149,91	150,69	149,16	8,278	2456,714	909	40,442		
K3_1/3	149,15	146,61	149,72	7,533	2300,858	815	37,129	38,271	4,3
K3_2/3	150,22	147,21	150,15	7,728	2327,492	865	39,134		
K3_3/3	149,15	151,31	149,15	7,782	2311,848	870	38,549		
M_1/3	149,82	149,02	150,12	7,471	2229,081	420	18,775*	26,481	29,9
M_2/3	149,14	150,13	149,90	7,767	2314,006	613	27,239		
M_3/3	149,16	148,83	149,15	7,612	2298,922	571	25,723		

*Rozdíl od průměrné hodnoty byl větší než 20 %, hodnota se dále nepoužila



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty

Tab. 26 – Povrchová nasákavost betonových vzorků

Směs	Hmotnost [kg]								
	0 min	5 min	10 min	20 min	40 min	80 min	120 min	24 hod	48 hod
REF_1/3	2,132	2,136	2,137	2,139	2,139	2,140	2,140	2,140	2,141
REF_2/3	2,141	2,144	2,146	2,147	2,147	2,147	2,148	2,148	2,149
REF_3/3	2,206	2,211	2,214	2,215	2,215	2,215	2,216	2,216	2,217
K1_1/3	2,321	2,325	2,329	2,329	2,329	2,329	2,329	2,329	2,330
K1_2/3	2,390	2,395	2,397	2,399	2,399	2,399	2,399	2,399	2,400
K1_3/3	2,363	2,372	2,373	2,374	2,374	2,375	2,375	2,375	2,376
K2_1/3	2,271	2,275	2,276	2,276	2,276	2,276	2,276	2,277	2,278
K2_2/3	2,336	2,340	2,341	2,343	2,343	2,343	2,344	2,344	2,345
K2_3/3	2,253	2,257	2,258	2,258	2,258	2,259	2,259	2,260	2,261
K3_1/3	2,415	2,418	2,419	2,420	2,420	2,420	2,420	2,423	2,425
K3_2/3	2,390	2,394	2,395	2,395	2,395	2,396	2,396	2,396	2,397
K3_3/3	2,299	2,303	2,304	2,305	2,305	2,305	2,305	2,307	2,308
M_1/3	2,150	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155	2,155	2,157	2,158
M_2/3	2,249	2,252	2,252	2,254	2,254	2,255	2,255	2,256	2,257
M_3/3	2,098	2,102	2,103	2,103	2,103	2,103	2,104	2,106	2,107
	Průměrný nárůst hmotnosti [%]								
REF	0	0,185	0,278	0,339	0,339	0,355	0,385	0,385	0,431
K1	0	0,180	0,315	0,345	0,345	0,345	0,374	0,374	0,419
K2	0	0,202	0,332	0,375	0,375	0,375	0,390	0,390	0,433
K3	0	0,254	0,353	0,395	0,395	0,409	0,409	0,409	0,452
M	0	0,256	0,313	0,356	0,356	0,370	0,370	0,384	0,427
Průměr	0,216%	0,318%	0,362%	0,362%	0,371%	0,386%	0,389%	0,432%	0,216%
Rozptyl	0,000%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,001%
Odchylka	0,033%	0,025%	0,021%	0,021%	0,022%	0,014%	0,012%	0,011%	0,033%



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty

Tab. 27 – Velikost odpadů ze zkoušky CHRL

Směs	Hmotnost odpadů [g]					Průměr vzorku [mm]	Plocha vzorku [mm ²]	Odpad [g/m ²]	Součinitel odolnosti
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	Celkem				
REF_1/3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	150,00	17671,46	22,6	D1
REF_2/3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	150,00	17671,46	22,6	D1
REF_3/3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	150,33	17749,30	22,5	D1
K1_1/3	5,0	3,0	1,0	1,0	10,0	149,38	17525,68	570,6	D1
K1_2/3	2,0	0,5	1,0	2,0	5,5	150,67	17829,68	308,5	D1
K1_3/3	0,5	1,0	1,0	0,4	2,9	150,50	17789,46	163,0	D1
K2_1/3	0,1	0,1	1,0	1,0	2,2	149,67	17593,79	125,0	D1
K2_2/3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	149,67	17593,79	28,4	D1
K2_3/3	0,1	0,1	0,4	0,4	1,0	150,67	17829,68	56,1	D1
K3_1/3	0,1	0,1	0,4	0,4	1,0	150,33	17749,30	56,3	D1
K3_2/3	0,5	0,1	2,0	1,0	3,6	149,67	17593,79	204,6	D1
K3_3/3	1,5	1,0	2,0	1,0	5,5	149,67	17593,79	312,6	D1
M_1/3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	150,83	17867,56	22,4	D1
M_2/3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,7	150,33	17749,30	39,4	D1
M_3/3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	149,83	17631,43	22,7	D1

Tab. 28 – Průměrné hodnoty výsledků zkoušek referenční směsi vyrobené firmou STRABAG a.s. [40]

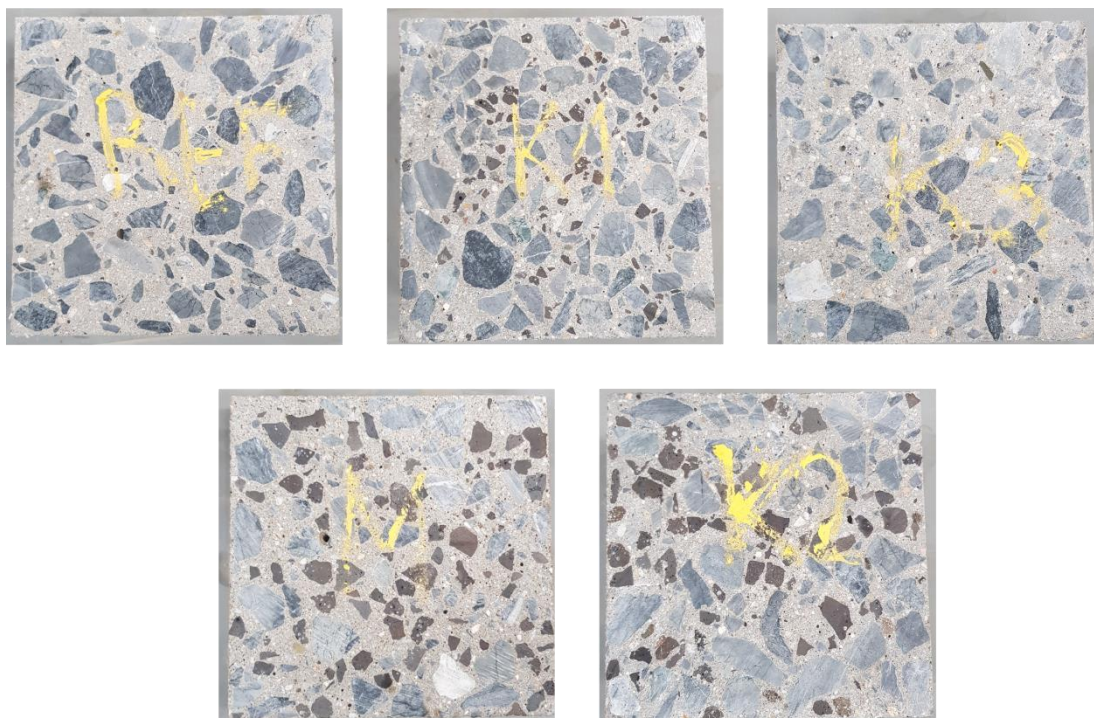
Průměrná hodnota výsledků zkoušek referenční směsi						
Sednutí kužele	Konzistence	Obsah vzduchu	Objemová hmotnost	Pevnost v tlaku	Odpad	Součinitel odolnosti
[mm]		[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[g/m ²]	
76	S2	5,7	2404,4	42,9	403	D1



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty



Obr. 37 – Zkušební tělesa po odbednění ponořená v kádi s vodou



Obr. 38 – Příčný řez krychlemi s texturou kameniva v betonu



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Vliv náhrad drceného kameniva na bázi strusky na vybrané vlastnosti
betonů pro CB kryty



Obr. 39 – Siloměr tlakového lisu EDB 400



Obr. 40 – Siloměr čtyřbodového lisu EU 40



Obr. 41 – Čtyřbodový lis EU 40



Obr. 42 – Tlakový lis EDB 400



Obr. 43 – Klimatizační box



Obr. 44 – Kotoučová pila při odřezávání puků z
válců