



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

OVĚŘENÍ MOŽNOSTÍ VYUŽÍVÁNÍ SMĚSNÝCH CEMENTŮ CEM II A CEM III PRO BETONOVÉ VOZOVKY A MOSTY

VERIFICATION OF THE POSSIBILITIES OF USING MIXED CEMENTS CEM II AND CEM III FOR
CONCRETE ROADS AND BRIDGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kepák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Student: Ondřej Kepák
Vedoucí práce: prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ověření možností využívání směsných cementů CEM II a CEM III pro betonové vozovky a mosty

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti se betony pro stavby betonových vozovek a mostů vyrábějí z cementů CEM I. Tyto jsou nyní stahovány z ekologických důvodů z výroby. Na trhu se objevují nové směsné cementy CEM II a CEM III, se kterými nejsou v dopravním stavitelství zkušenosti zejména s ohledem na trvanlivost při cyklickém zmrazování a působení rozmrazovacích solí. Cílem práce bude ověřit jaké jsou bezpečné možnosti využívání těchto cementů.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

V teoretické části práce vypracujte přehled cementů, které jsou v ČR nyní vyráběny, včetně jejich charakteristik. Dále zjistěte stav užívání, vymezení oblastí a charakteristiky betonů z nich vyrobených ve vyspělých zemích.

V praktické části navrhnete 2 receptury betonů vhodné pro prostředí XF a XC. Ověřte vhodný typ superplastifikační a provzdušňovací přísady a experimentálně ověřte jejich chování na čerstvých betonech. Vyroberte odpovídající sady zkušebních těles pro stanovení pevností v tlaku, mrazuvzdornost a statické moduly pružnosti pro normové stáří betonů.

Proveďte celkové srovnání vlastností pro různé cementy.

Předpokládaný rozsah bakalářské práce 40 až 50 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

1. ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
2. ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace
3. Hela.R: Technologie betonu I a II, učební opory VUT FAST Brno
Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně / Veveří 331/95 / 602 00 / Brno

4.Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

5.České a zahraniční časopisy

6.Internetové zdroje, Science Direct apod.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 9. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje tématu ověření možností využívání směsných cementů CEM II a CEM III pro betonové vozovky a mosty. Cílem práce bylo ověřit možnosti bezpečného využívání těchto cementů. V teoretické části je vypracován přehled cementů vyráběných v České republice, včetně jejich charakteristik a stav využívání cementů a směsných cementů ve světě. V experimentální části jsou pak prezentovány zjištěné vlastnosti betonů vyrobených z vybraných směsných cementů a porovnávány s referenčním cementem bez přídavku druhotných surovin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cement, směsný cement, beton, druhotné suroviny, enviromentální politika, pevnost v tlaku betonu, pevnost v tahu za ohybu betonu, mrazuvzdornost betonu, odolnost povrchu betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek, statický modul pružnosti betonu

ABSTRACT

Bachelor thesis focuses on verifying the possibilities of using blended cements CEM II and CEM III for concrete roads and bridges. The objective of the thesis was to verify the possibilities of the safe use of these cements. In the theoretical part, an overview of the types of cement produced in the Czech Republic is developed, including their characteristics and the state of use of blended cements in the world. In the experimental part are then presented the properties of the concrete produced from selected blended cements and compared with the reference cement without the addition of secondary raw materials.

KEYWORDS

Cement, blended cement, concrete, secondary raw materials, environmental policy, compressive strength of concrete, flexural tensile strength of concrete, frost resistance of concrete, resistance of concrete surface to chemical deicing agents, static module of elasticity of concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KEPÁK, Ondřej. *Ověření možností využívání směsných cementů CEM II a CEM III pro betonové vozovky a mosty*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY *Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Ověření možností využívání směsných cementů CEM II a CEM III pro betonové vozovky a mosty je shodná s odevzdanou listinnou formou.**

V Brně dne 9. 1. 2023

Ondřej Kepák

Autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Ověření možností využívání směsných cementů CEM II a CEM III pro betonové vozovky a mosty* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2023

Ondřej Kepák

Autor

Poděkování

Rád bych poděkoval své rodině a přátelům za podporu při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval vedoucímu této práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborné vedení, cenné poznámky a připomínky, odborné konzultace, zajišťování materiálů a vedení při zpracování bakalářské práce. Také bych rád poděkoval všem zaměstnancům ústavu THD za rady, tipy, podporu a zajištění chodu laboratoří během tvorby bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	3
CÍL PRÁCE	3
TEORETICKÁ ČÁST	4
1. HISTORIE VÝROBY CEMENTU	4
2. PŘEHLED CEMENTÁREN A CEMENTŮ VYRÁBĚNÝCH V SOUČASNOSTI V ČESKÉ REPUBLICE A JEJICH CHARAKTERISTIKA.....	5
2.1. CEM I portlandský cement	7
2.2. CEM II portlandský cement směsný	8
2.3. CEM III Vysokopecní cement.....	10
2.4. CEM V Směsný cement	12
3. PRODUKCE CEMENTU VE VYSPĚLÝCH ZEMÍCH.....	12
3.1. Produkce cementu ve světě.....	12
3.2. Produkce cementu v Evropské unii	13
3.3. Green Deal, Fit for 55 a dopad na výrobu cementu	15
3.4. Směsné cementy ve vyspělých zemích	16
4. VYUŽITÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN PŘI VÝROBĚ SMĚSNÝCH CEMENTŮ.....	20
4.1. Vysokopecní struska	20
4.2. Elektrárenský popílek.....	21
4.3. Vápenec.....	22
5. VYUŽITÍ SMĚSNÝCH CEMENTŮ VE STAVEBNÍ PRŮMYSLU.....	23
5.1. Důvody využívání směsných cementů při výrobě betonu	23
5.2. Omezení využívání směsných cementů při výrobě betonu	24
5.3. Současný trend využívání směsných cementů při výrobě betonu....	25
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	26
6. CÍL EXPERIMENTU	26
7. POUŽITÉ MATERIÁLY A RECEPTURY BETONŮ	27
7.1. Směsné cementy	27
7.2. Kamenivo	29
7.3. Přísady.....	29
7.4. Receptury betonu, prostředí XF4 a XC3	31
8. OVĚŘOVANÉ VLASTNOSTI BETONŮ A METODIKA ZKUŠEBNÍCH POSTUPŮ.....	33
8.1. Konzistence čerstvého betonu	33
8.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu.....	33
8.3. Pevnost v tlaku.....	34
8.4. Pevnost v tahu za ohybu.....	34

8.5.	Statický modul pružnosti	35
8.6.	Mrazuvzdornost	35
8.7.	Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL.....	36
9.	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	36
9.1.	Konzistence čerstvého betonu	36
9.2.	Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu.....	37
9.3.	Pevnost v tlaku.....	38
9.4.	Pevnost v tahu za ohybu	40
9.5.	Statický modul pružnosti	42
9.6.	Mrazuvzdornost	44
9.7.	Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL.....	46
ZÁVĚR		47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		50
SEZNAM OBRÁZKŮ		52
SEZNAM GRAFŮ		52
SEZNAM TABULEK		53

ÚVOD

V současnosti se betony pro stavby cementobetonových krytů vozovek (CBK) a mostů vyrábějí z cementů CEM I. Tyto jsou nyní stahovány z ekologických důvodů z výroby. Hlavním aspektem těchto důvodů je rozhodnutí o zásadním snížení produkce skleníkových plynů, Green dealu přijaté v roce 2019. Ten iniciuje dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Balíček Fit for 55 má za cíl převést cíle dohody do právních předpisů. Přijetím tohoto nařízení se členské státy Evropské unie zavázaly snížit do roku 2030 produkci CO₂, alespoň o 55 % oproti produkci v roce 1990 a zároveň zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie na 40 %.

Snížení energetické náročnosti výroby cementu související se snížením podílu produkce oxidů uhlíku je tedy nezbytnou nutností pro zachování výroby cementu v souladu s tímto přijatým balíčkem.

Na trhu se z tohoto důvodu objevují nové směsné cementy CEM II a CEM III, u které je část slínku s vysokou energetickou náročností výroby a značnou uhlíkovou stopou nahrazena druhotnými surovinami. S těmito směsnými cementy však zatím nejsou v dopravním stavitelství dostatečné zkušenosti, zejména s ohledem na trvanlivost při cyklickém rozmrazování a působení rozmrazovacích solí na betony z nich vyráběné.

CÍL PRÁCE

Náplní předkládané práce je ověřit vlastnosti betonů připravovaných ze směsných cementů CEM II, především s ohledem na pevnostní charakteristiky, moduly pružnosti, mrazuvzdornost, odolnost proti CHRL, tedy vlastnosti požadované především u staveb v dopravním stavitelství a porovnat tyto vlastnosti s referenčním betonem připraveným z cementu CEM I. Cílem práce je pak zjistit, jaké jsou bezpečné možnosti využití směsných cementů v dopravním stavitelství.

TEORETICKÁ ČÁST

1. HISTORIE VÝROBY CEMENTU

Cement je jedním z nejpoužívanějších pojiv na světě. Jedná se o látku, skládající se z anorganických surovin, která má schopnost tuhnout a vázat další materiály dohromady.

Jako první, nám dochované záznamy o využívání hydraulických pojiv pochází z Egypta, již kolem roku 3600 př. n. l.. Tato tehdejší civilizace vyráběla pojiva za pomoci místních, tehdy dostupných zdrojů. [1] [2]

Okolo prvního století našeho letopočtu, po ovládnutí Egypta kolem roku 30 př. n. l., zlepšili tuto původní recepturu Římané. Zjistili, že přidáním vulkanické půdy z regionu Pozzuoli získá směs schopnost tuhnout i pod vodou. Oblast Pozzuoli se totiž nachází v blízkosti Neapole a při bližším geologickém prozkoumání bylo zjištěno, že zemina v závislosti na oblasti odběru je tvořena 60-90 % jílu a 10-40 % vápna. Právě z názvu této oblasti později vzniklo označení pucolánový cement. [1]

Další posun ve výrobě cementu nastal až kolem roku 1817, kdy francouzský inženýr Louis Vicat zkoumal hydraulické vlastnosti směsi z vápna a vulkanického prachu. Právě on byl první, kdo stanovil přesné množství podílu vápence a oxidu křemičitého, které je nutné pro získání směsi, která po vypálení za určité teploty a po jejím podrcení získá hydraulické pojivové vlastnosti. Jinými slovy, byl to právě on, kdo navrhl přesnou recepturu pro výrobu cementu a tím zajistil i její opakovatelnost. Bohužel své výsledky si nenechal patentovat. [1] [2]

V roce 1796 si britský duchovní James Parker nechal patentovat výrobu románského cementu. Jednalo se o postup drcení a pálení vápencové suroviny s příměsí hliněných součástí. [1]

V roce 1824 si pak britský vynálezce Joseph Aspdin nechal patentovat výrobu portlandského cementu. Jeho jméno vycházelo z portlandského kamene, jelikož směs po zatvrdnutí se mu podobala. Tento produkt byl zařazen do skupiny umělých tmelů, které měly konkurovat Parkerovu „římskému cementu“.

Jednalo se o rychle tuhnoucí nízkopevnostní cement, jelikož byl získáván pálením pod 1250 °C a proto neobsahoval alit, který je nositelem nárůstu prvotních pevností. [1] [3]

Následně v roce 1844 přišel I. Ch. Johnston na nutnost pálení suroviny až na mez slnutí, kdy při výpalu vzniká alit, neboli trikalciumaluminát, který vzniká při teplotách 1250 °C až 1950 °C a tak vznikl cement, který již známe dnes, jako základní pojivo pro výrobu betonů. [2] [3]

Koncem 19. století se používání betonu ve stavebnictví stalo již neodmyslitelnou součástí. Ostatně je tomu až do dnešních dní. Avšak ekologický trend dnešní doby se snaží snížit energetickou náročnost výroby cementu, a tak se nám ve 21. století stále více dostávají do popředí právě směsné cementy.

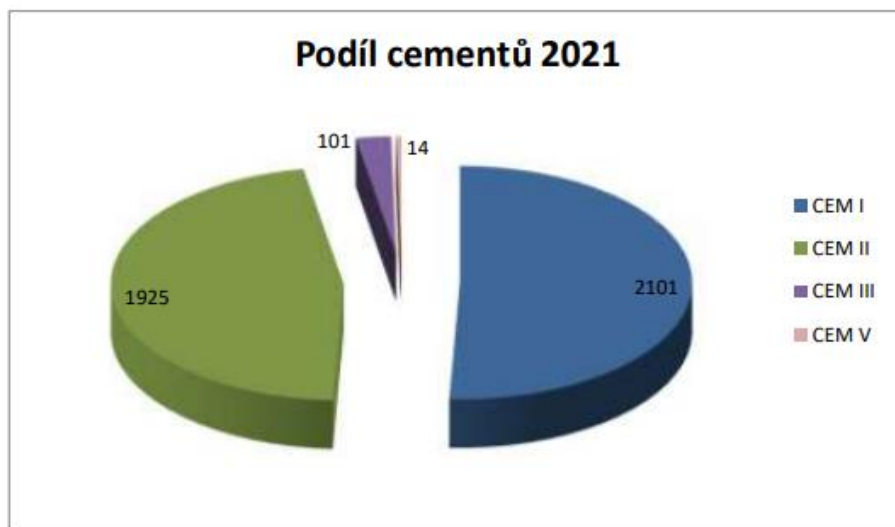
2. PŘEHLED CEMENTÁREN A CEMENTŮ VYRÁBĚNÝCH V SOUČASNOSTI V ČESKÉ REPUBLICI A JEJICH CHARAKTERISTIKA

Dle ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití se cementy dle složení dělí do pěti druhů cementů:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopevní cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

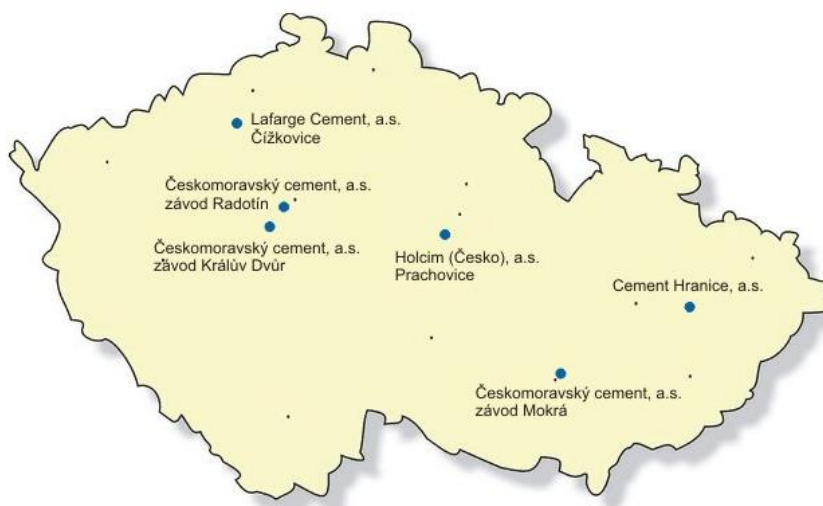
V ČSN EN 197-1 je rozdělení cementů do výše uvedených druhů specifikováno procentuálním podílem složek cementu z jeho hmotnosti.

V současné době máme na našem území šest cementáren, které mají ve svém výrobním sortimentu nejrůznější druhy cementů. Od CEM I až po CEM V ovšem s výjimkou CEM IV, jelikož na našem území se nevyskytují pucolánová ložiska. Podíl druhů cementů vyráběných na našem území je uveden v grafu číslo 1.



Graf 1: Podíl prodeje jednotlivých cementů na našem území v roce 2021 dle Svazu výrobců cementu

Mezi největší výrobce cementu u nás patří Českomoravský cement, a.s., který vlastní 3 z 6 těchto cementáren. Tato společnost je součástí předního světového výrobce stavebních materiálů Heidelberg Cement Group. Dále na našem území nalezneme společnost Lafarge Cement a. s., Cemex a.s. a Cement Hranice a.s. Tyto cementárny vyrobí ročně cca 4,5 milionů tun cementu, což je kolem 2 % celkové evropské produkce. [4] [5]



Obrázek 1: Producenti cementů v ČR dle VŠB

2.1. CEM I portlandský cement

Portlandský cement patří celosvětově i doposud na našem území k nejvyužívanějšímu druhu cementu. Dle ČSN EN 197-1 je možno za portlandský cement označit cement s obsahem 95-100 % portlandského slínku s maximálně 5 % doplňujících složek. [6]

Portlandský slínek se vyrábí pálením surovinové směsi ve formě moučky, těsta nebo kalu do meze slinutí. Surovinová směs obsahuje CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ a malá množství jiných látek. Výsledný portlandský slínek je hydraulická látka sestávající nejméně ze dvou třetin hmotnosti z křemičitanů vápenatých a ve zbytku jsou obsaženy fáze s obsahem hliníku, železa a jiných sloučenin. [7]

Portlandský cement se vyznačuje vysokým vývinem hydratačního tepla a rychlým nárůstem počátečních pevností. V důsledku toho je možno poměrně rychle provádět doformování dílců a konstrukcí a lze ho využít i v chladnějším prostředí.

Tento druh cementu je vhodný pro betony vyšších pevnostních tříd, předpínané mostní a tenkostěnné konstrukce, využívá se také pro výrobu betonových produktů, suchých maltových směsí, podlah a samozhutnitelných betonů. [8]

V současné době se v České republice vyrábějí následující druhy portlandského cementu:

CEM I 52,5 R a CEM I 42,5 R

Používají se pro betonové, železobetonové stavební konstrukce, drobné betonové dílce a velkorozměrové dílce, které jsou vystaveny velkému mechanickému namáhání. Oba tyto cementy jsou vhodné pro betony s požadavkem na vyšší pevnosti. 52,5 a 42,5 označuje minimální pevnost v tlaku v MPa po 28 dnech zrání a R označuje rychle tuhnoucí cement.

Tyto cementy na našem území vyrábějí Cement Hranice, a.s., Lafarge Cement, a.s., CEMEX Czech Republic, s.r.o, Heidelberg Českomoravský cement, a.s. s výjimkou Lafarge Cement, a.s., který ve svém výrobním sortimentu nenabízí CEM I 52,5 R.

CEM I 52,5 R (ra), CEM I 42,5 R (ra), CEM I 42,5 R (na)

Jedná se o portlandský cement s redukováným množstvím alkálií vyjádřeným jako Na_2O ekv. $\leq 0,8 \%$, čímž je splněno kritérium pro použití cementu pro stavby Ředitelství silnic a dálnic podle TP 137. Používá se především pro předpínané a mostní konstrukce.

Tyto cementy na našem území vyrábějí Lafarge Cement, a.s., CEMEX Czech Republic, s.r.o. a Heidelberg Českomoravský cement, a.s. s tím, že CEMEX Czech Republic, s.r.o, vyrábí pouze v pevnostní třídě 42,5 a Heidelberg Českomoravský cement, a.s. ho vyrábí pod označením (na) v pevnostní třídě 42,5.

CEM I 42,5 R (sc)

Jedná se o cement určený pro výrobu cementobetonových krytů, přípravu betonu, malt včetně injektážních a jiných směsí pro využití na stavbách. Cement má kromě redukováného množství alkálií Na_2O ekv. $\leq 0,8 \%$ také limitovaný obsah trikalciium aluminátu (C_3A) ve slínku max 8% snižující vývin hydratačního tepla.

Tento cement na našem území vyrábí Cement Hranice, a.s. a Heidelberg Českomoravský cement, a.s.

V současné době se v České republice vyrábějí následující druhy portlandského směsného cementu:

2.2. CEM II portlandský cement směsný

Portlandský cement směsný je zatím druhým nejvyráběnějším druhem cementu na našem území, ale u části cementáren jeho výroba může být i převažující. Dle ČSN EN 197-1 je možno za portlandský cement směsný označit cement s obsahem 65-94 % portlandského slínku. Tento cement se vyrábí v několika různých variantách dle přidávaných složek. Mezi hlavní složky patří vysokopecní struska, křemičité úlety, pucolány, popílky, kalcinovaná břidlice a vápenec.

Výhodou směsných cementů je nahrazení části portlandského slínku jiným materiálem, který je možno zpravidla považovat za druhotnou surovinu.

CEM II/A-S 52,5 R a CEM II/A-S 42,5 R

Pod označením A-S jsou vyráběny cementy s přidaným množstvím vysokopecní strusky 6-20 %.

Tyto cementy na našem území vyrábějí Lafarge Cement, a.s., CEMEX Czech Republic, s.r.o, Heidelberg Českomoravský cement, a.s. s výjimkou CEMEX Czech Republic, s.r.o, který ve svém výrobním sortimentu nabízí jako jediný z výše uvedených CEM II/A-S 52,5 R.

CEM II/B-S 32,5 R a CEM II/A-S 32,5 N

Pod označením B-S jsou vyráběny cementy s přidaným množstvím vysokopecní strusky 21-35 %. Označení N náleží normálně tuhajícímu cementu.

Cement CEM II/B-S 32,5 R vyrábí na našem území pouze Heidelberg Českomoravský cement, a.s. a CEM II/A-S 32,5 N zase Lafarge Cement, a.s.

CEM II/A-LL 52,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R

Pod označením A-LL jsou vyráběny cementy s přidaným množstvím vápence, jehož procentuální obsah je 6-20 %.

Zatím co CEM II/A-LL 42,5 R vyrábí na našem území CEMEX Czech Republic, s.r.o, Cement Hranice, a.s. i Heidelberg Českomoravský cement, a.s., tak výrobek CEM II/A-LL 52,5 R a CEM II/A-LL 32,5 R vyrábí na našem území pouze Lafarge Cement, a.s.

CEM II/B-LL 32,5 R

Pod označením B-LL jsou vyráběny cementy s přidaným množstvím vápence, jehož procentuální obsah je 21-35 %.

Tento druh cementu na našem území vyrábí pouze Lafarge Cement, a.s.

CEM II/A-M (S-LL)42,5 R

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky a vápence, který je 12-20 %

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území pouze Lafarge Cement, a.s.

CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Pod označením B-M (S-LL) jsou vyráběny cementy s přidaným množstvím vysokopecní strusky a vápence, jejichž procentuální obsah je 21-35 %.

Tyto cementy na našem území vyrábí Cement Hranice, a.s. a Heidelberg Českomoravský cement, a.s., který jako jediný má ve svém výrobním sortimentu právě CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.

CEM II/A-M (S-V) 42,5 R

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky a křemičitým popílkem, který je 12-20 %

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území pouze CEMEX Czech Republic, s.r.o.

2.3. CEM III Vysokopecní cement

Vysokopecní cement je třetím nejvyráběnějším druhem cementu na našem území, však dle grafu číslo 1, jeho procentuální podíl na trhu činí pouze 2,4 %, tudíž jeho prodej je oproti portlandskému a portlandskému směsnému nepatrný. Dle ČSN EN 197-1 je možno za vysokopecní cement označit cement s obsahem 5-64 % portlandského slínku. Zbylé procentuální množství tvoří vysokopecní struska.

Jeho výhodou je nahrazení značné části portlandského slínku vysokopecní struskou, což snižuje energetickou náročnost výroby tohoto cementu.

V současné době se v České republice vyrábějí následující druhy vysokopecního cementu:

CEM III/A 42,5 N

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky, která tvoří 36-65 % obsahu cementu.

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území pouze Cement Hranice, a.s.

CEM III/B 32,5 N-LH/SR, CEM III/B 32,5 L-LH/SR

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky, která tvoří 66-80 % obsahu cementu. LH v jejich názvu značí nízkou produkci tepla při hydrataci a SR odolnost proti síranům.

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území CEMEX Czech Republic, s.r.o. a Heidelberg Českomoravský cement, a.s.

CEM III/B 32,5 N-LH

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky, která tvoří 66-80 % obsahu cementu. LH v jejich názvu značí nízkou produkci tepla při hydrataci

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území pouze CEMEX Czech Republic, s.r.o.

2.4. CEM V Směsný cement

Směsný cement je nejméně vyráběný druh cementu na našem území, tudíž jeho prodej je oproti portlandskému a portlandskému směsnému cementu nepatrný. Dle ČSN EN 197-1 je možno za směsný cement označit cement s obsahem 20-64 % portlandského slínku. Zbylé procentuální množství tvoří vysokopecní struska, pucolány či popílky.

Jeho výhodou může být opět nahrazení značné části portlandského slínku vysokopecní struskou a tím snížení energetické náročnosti výroby tohoto cementu.

Výrobou tohoto cementu se na našem území zabývá pouze CEMEX Czech Republic, s.r.o. Možná právě z tohoto důvodu je zastoupení prodeje tohoto sortimentu dle uvedeného grafu číslo 1 na našem území tak nízké

V současné době se v České republice vyrábí pouze následující druh směsného cementu:

CEM V/A (S-V) 32,5 R

Takto jsou označeny cementy s procentuálním obsahem vysokopecní strusky, která tvoří 18-30 % obsahu cementu a s obsahem křemičitého popílku který tvoří také 18-30 % obsahu cementu.

Tento druh cementu má ve svém sortimentu na našem území pouze CEMEX Czech Republic, s.r.o.

3. PRODUKCE CEMENTU VE VYSPĚLÝCH ZEMÍCH

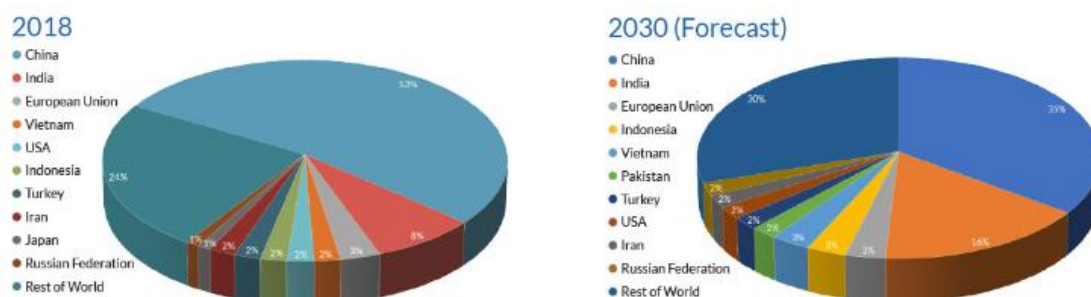
3.1. Produkce cementu ve světě

V souvislosti s výrazným rozvojem urbanizace především s jeho neustále se zvyšujícím trendem hlavně v oblasti jihovýchodní Asie se produkce cementu neustále zvyšuje. Celosvětově se pak od roku 1950 zvýšila až třicetinasobně.

Hlavním výrobcem cementu ve světě je v současnosti Čína s padesáti tří procentním podílem na celosvětové produkci. Za ní následuje Indie, jejíž podíl na celosvětové produkci činí pouhých osm procent. Vzhledem k výraznému rozvoji urbanizace v Indii je však třeba předpokládat, že tento podíl se bude v budoucnu výrazně zvyšovat. Pro ilustraci výrazného rozvoje výroby cementu v jihovýchodní Asii, je možno uvést skutečnost, že Čína za poslední tři roky vyrobila více betonu, tedy i více cementu než USA za celé století. [9]

Co se týče produkce cementu v dalších regionech, tak pro srovnání je možno uvést, že produkce cementu v USA je okolo 2 % a Evropské Unie okolo 3 % z celosvětové produkce. [10]

Podíl na produkci cementu ve světě je zřejmý z následujícího grafu, ve kterém je uveden podíl jednotlivých zemí na celosvětové produkci cementu v roce 2018 a prognóza pro rok 2030. [10]

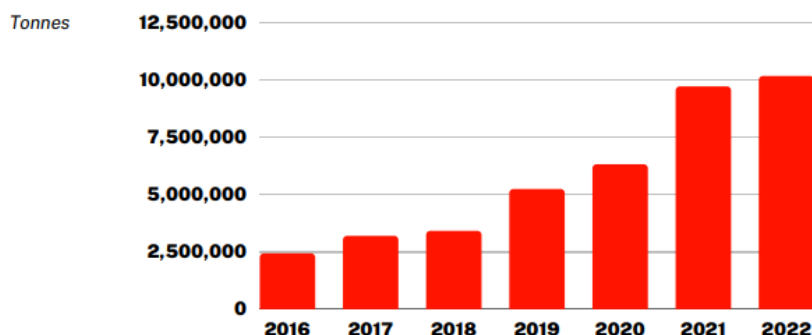


Graf 2: Podíl na produkci cementu ve světě v roce 2018 a prognóza pro rok 2030 dle World Cement Association

3.2. Produkce cementu v Evropské unii

Produkce cementu v Evropské unii dosahuje kolem tří procent celosvětové produkce cementu. Mezi největší výrobce patří Německo, Španělsko, Itálie a Francie. V posledních deseti letech však dochází k významnému nárůstu dovozu cementu do Evropské unie. Nejvíce cementu se do Evropské unie dováží z Turecka a Alžírsku. [11]

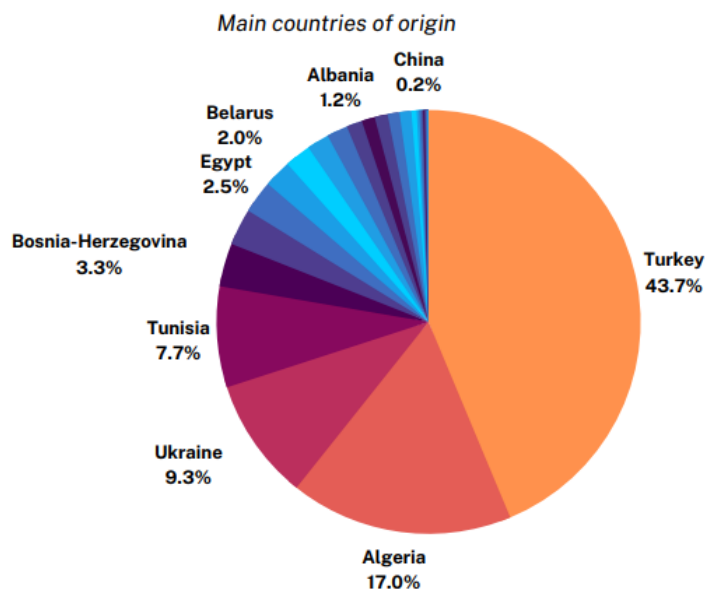
Následující graf popisuje trend nárůstu dovozu cementu a slínku do Evropské unie a procentuální podíl dovozu nejvýznamnějších dovozců. [11]



CEMENT+CLINKER IMPORTS TO THE EU

Graf 3: Dovoz cementu a slínku do Evropské unie dle European Cement Association

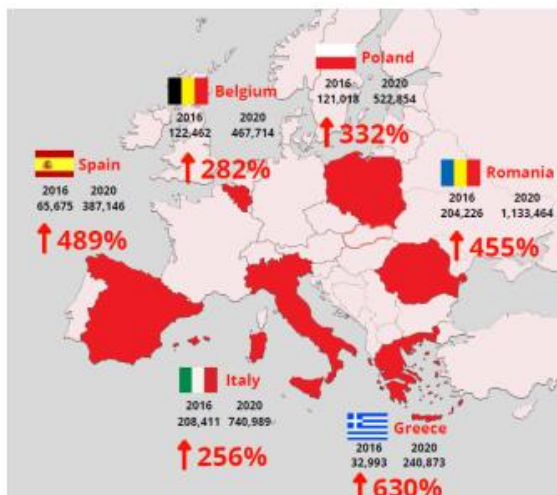
CEMENT+CLINKER IMPORTS TO THE EU



Graf 4: Procentuální podíl dovozu cementu a slínku nejvýznamnějších dovozců do Evropské unie dle European Cement Association

Nárůst dovozu cementu do Evropské unie v posledních letech je dán stále se zvyšující cenou poplatků za produkci CO₂ tzv. emisních povolenek a zvyšující se ceny plynu a elektřiny. Pro státy Evropské unie je v mnoha případech výhodnější dovážet lacinější cement z oblastí mimo Evropskou unii než ho doma draze vyrábět.

Procentuální nárůst dovozu cementu do vybraných evropských zemí je patrný z následujícího grafu: [9]



Obrázek 2: Procentuální nárůst dovozu cementu do vybraných evropských zemí dle European Cement Association

3.3. Green Deal, Fit for 55 a dopad na výrobu cementu

V rámci programů Green Deal Fit for 55 a Carbon Border Adjustment byly stanoveny mezinárodní klimatické cíle, kdy je požadováno, aby výroba cementu byla do roku 2050 klimaticky neutrální. [12]

Celosvětové emise CO₂ při výrobě cementu jsou v současné době odhadovány na 7-9 % z celkové produkce CO₂. Přestože velká většina cementu je vyráběna mimo Evropskou unii, je tato hlavním hybatelem tlaku na snižování emisí z jeho produkce. Jedním z nástrojů pro snížení emisí CO₂ jsou takzvané emisní povolenky, tedy v podstatě určitá forma daně za emise těchto plynů. Emisní povolenky jsou v současné době volně obchodovatelné na trhu a jejich cena se v průběhu času zvyšuje. K nejvyššímu nárůstu došlo v období mezi lety 2018 a 2023, kdy se cena emisní povolenky za jednu tunu CO₂ zvýšila z cirká 15 na cirká 90 euro, tedy téměř pětinasobně. [12] [13]

Pohyb ceny emisních povolenek v období od 2006 do 2023 je zřejmý z následujícího grafu: [13]



Graf 5: Pohyb ceny emisních povolenek v období 2006 až 2023 dle informací z burzy

V současné době je hlavním trendem snižování energetické a uhlíkové náročnosti výroby cementu nahrazení slínku druhotnými surovinami, a to v co největší přípustné míře tak, aby byly zachovány vlastnosti cementu v rámci jeho použití pro výrobu betonu. Tyto cementy jsou obecně označovány jako směsné cementy.

3.4. Směsné cementy ve vyspělých zemích

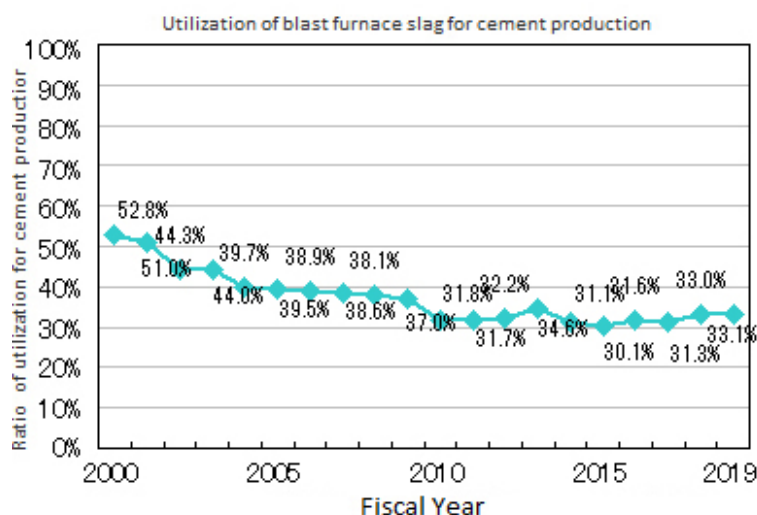
Výroba směsných cementů ve světě je závislá na řadě faktorů, mezi které patří místní stavební předpisy, produkce druhotných surovin a řada dalších technologických a ekonomických faktorů.

Z důvodů úspor nákladů na výrobu cementu a výhodám pro životní prostředí hlavně z důvodu snížení emisí oxidů uhlíku, se celosvětově očekává nárůst výroby směsných cementů o více než 2,5 % ročně. Nejvýznamnější část spotřeby směsných cementů je realizována v zemích jihovýchodní Asie, Brazílii, Rusku a Turecku, tedy v zemích, kde dochází k významnému rozvoji a nárůstu stavebních činností.

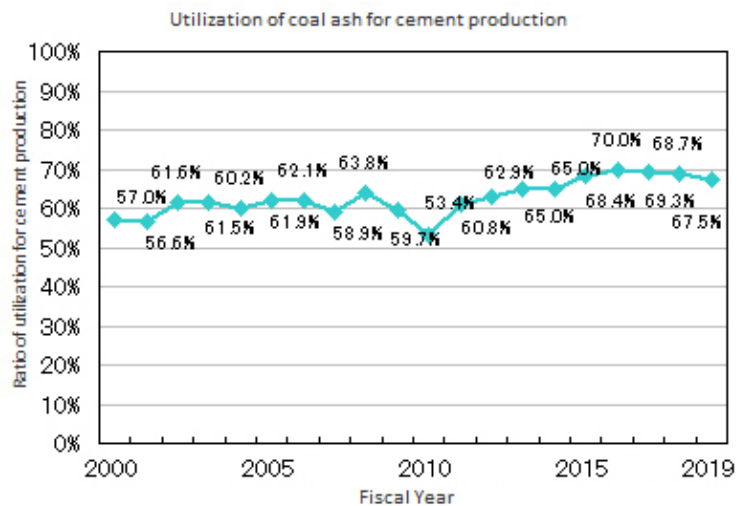
Z důvodu tlaku na enviromentální politiku dochází k významnému nárůstu spotřeby směsných cementů i v zemích Evropské unie, kde tato technologie umožňuje firmám naplnit přísné emisní normy, společně se snižováním energetické náročnosti výroby cementu. Rozdílnou cestou se vydaly státy severní Ameriky, Kanada a USA, kde směsný cement tvoří zanedbatelnou část celkové spotřeby a druhotné suroviny ve formě strusky a popílku jsou používány především ve formě přísad do betonů. [14]

Jako příklad jsou dále uvedeny základní informace o výrobě a použití směsných cementů ve dvou vybraných zemích. V rozvinutém Japonsku a rozvíjející se Indii.

V Japonsku se pro výrobu směsných cementů používá především vysokopecní struska z oceláren a popílek z výroby energie. Poměr vyprodukovaných druhotných surovin a jejich využití v cementových produktech se pohybuje mezi 30-70 % v závislosti na časovém období a druhu suroviny. Poměr použitého množství těchto druhotných surovin vyplývá z následujících grafů: [15]

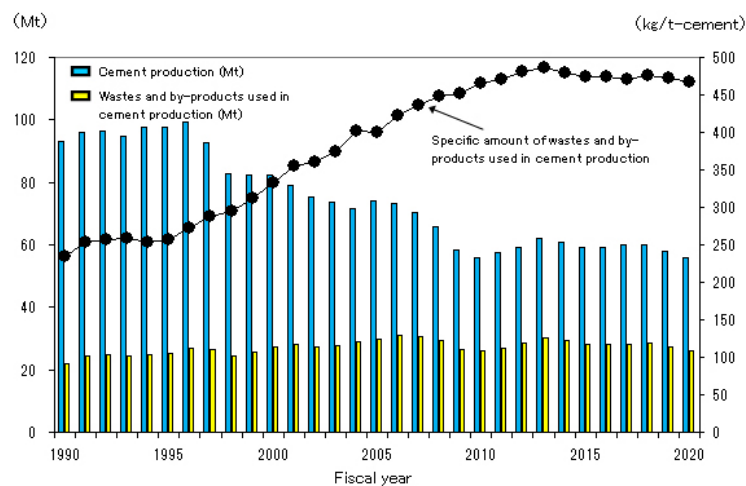


Graf 6: Poměr použitého množství vysokopecní strusky z oceláren v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association



Graf 7: Poměr použitého množství popílku v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association

Vliv na zvyšující se podíl výroby směsných cementů v Japonsku má především fakt, že zatímco od roku 1990 výrazně klesá celková výroba cementu, podíl druhotných surovin při jeho výrobě mírně roste. Tento trend je zřejmý z následujícího grafu. [15]



Graf 8: Výroba cementu v Japonsku a podíl druhotných surovin v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association

V Indii se pro výrobu směsných cementů používá především popílek, jelikož velké zastoupení při výrobě energie tvoří uhelné elektrárny. V roce 2019-2020 se v této zemi vyrobilo 226 miliónu tun popílku. Tato odpadní surovina je z 83 % spotřebována ve stavebním odvětví, přičemž právě cementářský průmysl je největším spotřebitelem v této zemi. Následující tabulka uvádí výrobu a následné využití popílku v cementářském průmyslu v roce 2016 a do poloviny roku 2021. [16] [17]

Tabulka 1: Výroba a využití popílku v cementářském průmyslu dle Cement Manufacturees Association of India

Fly ash generation and utilisation in India				
Year	Fly Ash Generation Million Tonnes	Fly Ash Utilised Million Tonnes	Fly Ash Utilisation by Cement Industry Million Tonnes	Fly Ash Utilisation by Cement Industry % of total generation
2016-17	169.25	107.10	40.59	23.98
2017-18	196.44	131.87	50.29	25.60
2018-19	217.04	168.40	58.34	26.88
2019-20	226.13	187.81	57.88	25.60
2020-21 (Q1,2)	106.37	84.22	26.86	25.25

Dále je zde pro výrobu směsných cementů využívána struska jako druhotná surovina při výrobě železa ve vysokých pecích. [17]

Hlavními druhy vyráběných směsných cementů jsou v Indii PPC (Portlandský popílkový cement), který se vyrábí mletím běžného slínku s pucolánovými materiály jako je popílek spolu s přidáním sádry. Tento cement je běžně používán ve všech druzích staveb například při stavbě přehrad, prefabrikovaných konstrukcí, mořských staveb a staveb v blízkosti mořského prostředí. PPC poskytuje lepší zpracovatelnost, zvýšenou voděodolnost a vyšší odolnost v důsledku alkalické reakce i v síranovém prostředí. Také má nižší vývin hydratačního tepla. Dalším vyráběným druhem je PSC (Portlandský struskový cement), který se vyrábí vhodnou náhradou běžného portlandského cementu jemně mletou vysokopecní granulovanou struskou (GGBFS) spolu s přidáním aktivátoru síranu vápenatého. Podíl granulované strusky v cementu je mezi 45-50 %. Využívá se hlavně při stavbě mostu, přístavů, a především tam, kde dochází ke styku betonu se slanou vodou. Výsledný beton je odolný vůči kyselému i zásaditému prostředí. [17]

4. VYUŽITÍ DRUHOTNÝCH SUROVIN PŘI VÝROBĚ SMĚSNÝCH CEMENTŮ

4.1. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká jako vedlejší produkt při redukci surového železa ve vysokých pecích. Jedná se tedy o nekovové doprovodní prvky hutní výroby vzniklé roztavením hlušiny rudy s přidavkem vápence, který v procesu hraje struskotvornou roli. Ve strusce jsou obsaženy i minerální podíly z tuhých paliv. Hlavním kritériem pro vhodnost použití strusky při výrobě směsných cementů je modul bazicity, který vyjadřuje podíl zásaditých a kyselých oxidů, tedy podíl CaO a MgO ku SiO₂ a Al₂O₃. Pro výrobu směsných cementů je možno použít pouze strusku s modulem bazicity větším než jedna. [18]

Chemicky je struska složena z CaO (42 %), SiO₂ (38 %), Al₂O₃ (10 %), MgO (6 %), Fe₂O₃ (2 %) a MnO (2 %). Dle přítomnosti oxidu manganatého je možno chemickým rozbohem identifikovat, že byl beton vyroben z cementu s přidavkem vysokopecní strusky. [18] [19]

Mineralogicky je struska tvořena z 90 % Melilithem, což je izomorfní směs gehlenitu a ackermanitu. Dále je ve strusce přítomen α -C₂S, β -C₂S, Mervinit C₃MS₂ a Pseudowollastonit β -CS. [18] [19]

Vysokopecní struska má latentně hydraulickou vlastnost, tedy schopnost podílet se na hydrataci. Společně s cementem tedy dochází k jejímu vytvrdnutí ve vodním prostředí. [20]

Struska ve směsných cementech ovlivňuje výsledné vlastnosti betonu, kdy má pozitivní vliv na pórovitost a distribuci pórů s vlivem na zvýšení trvanlivosti betonu. Betony s cementy s přidavkem strusky vykazují pomalejší nárůst pevností v tlaku. Nižší je také vývin hydratačního tepla a zlepšuje se zpracovatelnost betonu v čerstvém stavu. [21]

Dle ČSN EN 197-1 ed.2 je cement s přísávkem vysokopecní strusky dělen do dvou druhů. CEM II je označen jako portlandský struskový cement. Jedná se o cement označený CEM II/A-S, s přísávkem strusky 6-20 % a CEM II/B-S, s přísávkem strusky 21-35 %. CEM III je pak označován jako vysokopecní cement. Jedná se o cement označený CEM III/A, s přísávkem strusky 36-65 %, CEM III/B, s přísávkem strusky 66-80 % a CEM III/C, s přísávkem strusky 81-95 %.

4.2. Elektrárenský popílek

Elektrárenský popílek je nejjemnější frakce, která vzniká při spalování tuhých paliv, nejčastěji v tepelných elektrárnách. Tyto jemné podíly se poté zachycují na odlučovačích. Jedná se o malé duté kuličky křemičitého skla. V popílcích se z krystalických složek vyskytuje nejčastěji křemen a mulit, dále se v popílcích také mohou vyskytovat v určité množství původního paliva v různých stupních jeho přeměny. [19]

Měrný povrch popílku se pohybuje v rozmezí 200-400 m²/kg. Jeho syrná hmotnost je v intervalu od 800-1100 kg/m³ a velikost zrn se pohybuje v rozmezí 0,001-0,1 mm. Objemová hmotnost popílku se pohybuje okolo 2000-2500 kg/m³. [18]

Co se týče chemického složení, tak má v popílku nejvyšší zastoupení SiO₂ (Oxid křemičitý) a to okolo 40-45 % a Al₂O₃ (Oxid hlinitý) a to okolo 15-30 %, dále je v něm přítomen CaO (Oxid vápenatý) okolo 5-15 %, Fe₂O₃ okolo 5-18% a SO₄²⁻ <2 % [19]

Při náhradě slínku popílkem u směsných cementů dochází v betonové směsi ke zvýšení vodního součinitele, dále popílek snižuje vývin hydratačního tepla a zpomaluje tím i tuhnutí betonové směsi. Popílek zlepšuje zpracovatelnost a čerpatelnost betonové směsi v čerstvém stavu. Díky tomu, že se skládá z jemných podílů, zlepšuje po vytvrdnutí betonu nepropustnost a tím i celkovou trvanlivost finálního výrobku. [18] [20]

Popílký se dle typu spalování dělí na vysokopecní a fluidní. Rozdíl mezi klasickým vysokopecním a modernějším fluidním spalováním spočívá v tom, že při klasickém spalování jsou spaliny odsiřovány vápennou vypírku kouřových plynů za separátory popílků v absorběru za vzniku vedlejšího produktu energosádrovce. Teplota spalování se pohybuje v rozmezí 1100-1600 °C. V případě fluidního spalování dochází k odsíření ve fluidním loži spolupůsobením přidaného drceného vápence již k palivu a SO₂ se plně váže do popele. Teplota spalování je cca 850 °C. Z uvedeného je zřejmé, že fluidní spalování přináší nižší energetickou náročnost a dále odpadá poměrně složitá technologie odsiřování pomocí vápenné vypírky v absorběru. Vysokopecní popílký se dále dělí dle obsahu CaO na křemičité s obsahem aktivního CaO do 5 % a vápenaté s obsahem aktivního CaO nad 5 %. Křemičitý popílek má pucolánové vlastnosti a vápenatý popílek může mít navíc i hydraulické vlastnosti. Fluidní popílký se pak dělí na ložové a úletové, dle místa odběru. [19]

Dle ČSN EN 197-1 ed.2 je cement s přídavkem popílký označován jako portlandský popílkový cement a řadí se tak do portlandských cementů směsných s označením CEM II. V této skupině jsou směsné cementy s přídavkem křemičitého popílký s označením CEM II/A-V, s přidaným množstvím popílký 6-20 % a CEM II/B-V, s přidaným množstvím popílký 21-35 %. Dále směsné cementy s přídavkem vápenatého popílký s označením CEM II/A-W, s přidaným množstvím popílký 6-20 % a CEM II/B-W s přidaným množstvím popílký 21-35 %.

4.3. Vápenec

Jedná se o sedimentační horninu, složenou z převážné většiny z uhličitanu vápenatého. Pro použití jako přísada do směsných cementů se používá jemně mletý vápenec, vyráběný mletím podrceného vápence. Vlastnosti jemně mletého vápence závisí především na jeho zrnitosti, tvaru zrn a nasákavosti. [22]

Vápenec pro použití do cementů musí splňovat požadavky ČSN EN 197-1.

Obsah uhličitanu vápenatého (CaCO_3), vypočítaný z obsahu oxidu vápenatého, musí být nejméně 75 % hmotnosti.

Obsah jílového podílu, stanovený zkouškou methylenovou modří, podle EN 933-9 nesmí být větší než 1,2 g/100 g pro tuto zkoušku musí být vápenec pomlet na jemnost asi 5000 cm^2/g stanovenou jako měrný povrh podle EN 196-6

Celkový obsah organického uhlíku (TOC) při zkoušení podle EN 13639 musí vyhovět jednomu z následujících kritérií:

LL - obsah TOC nesmí být větší než 0,2 % hmotnosti.

L - obsah TOC nesmí být větší než 0,5 % hmotnosti

Dle ČSN EN 197-1 ed.2 je cement s přídavkem jemně mletého vápence označován jako portlandský cement s vápencem a řadí se tak do portlandských cementů směsných s označením CEM II. V této skupině jsou směsné cementy s přídavkem vápence s označením CEM II/A-L a CEM II/A-LL, s přidaným množstvím vápence 6-20 % a CEM II/B-L a CEM II/B-LL, s přidaným množstvím vápence 21-35 %.

5. VYUŽITÍ SMĚSNÝCH CEMENTŮ VE STAVEBNÍM PRŮMYSLU

5.1. Důvody využívání směsných cementů při výrobě betonu

Hlavní důvody nutnosti nárůstu podílu směsných cementů při výrobě betonu jsou enviromentální a ekonomické.

Z hlediska ekonomiky výroby betonů se cement výrazně podílí na jeho celkové ceně. Jedním z hlavních nákladů při výrobě cementu jsou ceny energií pro výrobu portlandského slínku. Náhradou slínku druhotnými surovinami tedy dochází k úspoře energie nutné pro výrobu cementu. Dopad do ekonomiky výroby i enviromentální politiky pak mají takzvané emisní povolenky.

Z ekologických důvodů byla výroba produktů s emisemi oxidů uhlíku zatížena daní ve formě emisních povolenek jako forma kompenzace a tlaku na celkové snížení emisí. Čím bude dosaženo vyšší náhrady slínkových minerálů druhotnými surovinami, tím bude dosaženo nižších objemů emisí oxidu uhlíku, tedy jak snížení nákladů na výrobu cementu, tak i dopadů pro životní prostředí.

Z hlediska environmentální politiky je obecně využívání druhotných surovin při výrobě cementu považováno za pozitivní. Druhotné suroviny jsou opět vraceny do výrobního procesu a odpadá jejich ukládání a likvidace na skládkách.

Zvýše uvedeného je zřejmé, že využívání směsných cementů při výrobě betonu z hlediska ekonomiky výroby a environmentální politiky je ryze pozitivní.

Za další důvody využívání směsných cementů je možno považovat i to, že betony z nich vyrobené mohou mít odlišné vlastnosti od běžných betonu vyráběných ze slínkového cementu. Jedná se především o lepší zpracovatelnost a nižší vývin hydratačního tepla. Dle použitých druhotných surovin je pak možno dosáhnout nebo spíše ovlivnit požadované specifické vlastnosti výsledného betonu. Často je v tomto případě zmiňována zvýšená odolnost proti různým vnějším vlivům například chemická odolnost, nebo odolnost proti působení mrazu.

5.2. Omezení využívání směsných cementů při výrobě betonu

Při využívání druhotných surovin při výrobě směsných cementů se jako hlavní problém jeví nerovnoměrnost jejich vlastností. Jako příklad je možno uvést variabilitu složení, kdy tyto suroviny pochází z různých výrobních jednotek a z různé technologie výroby s různými vlastnostmi vstupních surovin.

Jistým paradoxem je také skutečnost, že v současné době dochází v Evropské unii k tlaku na ukončení výroby energie z uhlí, kdy je konec používání uhlí pro výrobu energie například v České republice stanoven již na rok 2038. S odstavením uhelných elektráren dojde také k ukončení výroby elektrárenského popílku. V rámci Evropské unie také dochází k zásadnímu útlumu výroby železa, čímž bude docházet k ubytku produkce vysokopeční strusky na evropském trhu. Otázkou je možnost využívání "starých druhotných surovin" ze složišť.

5.3. Současný trend využívání směsných cementů při výrobě betonu

V současné době zaznamenáváme téměř celosvětově zvýšený tlak na využívání směsných cementů při výrobě betonu, a to především z důvodů uvedených v předchozích kapitolách. Tedy důvodů ekonomických a enviromentálních. V Evropské unii je pak přechod na jejich výrobu v podstatě, vzhledem ke Green Deal, Fit for 55, ekonomickou nutností pro zachování výroby cementu v tomto regionu.

Vzhledem k tomu, že betonové konstrukce ze směsných cementů zatím nejsou dostatečně ověřeny "jejich věkem", je třeba věnovat zvýšenou aktivitu testování těchto betonů především s ohledem na jejich základní charakteristické vlastnosti a trvanlivost.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6. CÍL EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo navrhnout dvě receptury betonu, pro cemento betonové kryty vozovek a mosty s využitím směsných cementů, vhodné pro třídu prostředí XF4 a XC3. Ověření vhodného dávkování superplastifikační a provzdušňovací přísady a stanovení pevnosti v tlaku, mrazuvzdornosti, odolnosti proti působení chemických rozmrazovacích látek (CHRL) a statického modulu pružnosti na zkušebních tělesech pro normové stáří betonu. Dále provést celkové srovnání zjištěných vlastností betonu pro různé směsné cementy a referenční portlandský cement.

Třída prostředí XF pro beton vystavený střídavému působení mrazu a rozmrazování. Třída prostředí je dále členěna na třídu prostředí XF1 až XF4. Třída prostředí XF1 a XF3 pro beton vystavený mrazu a rozmrazování, třída prostředí XF2 a XF4 ještě za současného vlivu CHRL. Třída prostředí XF4 je dána pro vozovky a mostovky, betonové povrchy, omývaná část staveb na moři. Vystavené vysokému nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky. Ověřované betony byly navrženy pro třídu prostředí XF4.

Třída prostředí XC pro beton vystavený prostředí s nebezpečím koroze vlivem karbonatace. Třída prostředí je dále členěna na třídu prostředí XC1 až XC4, dle míry vlhkosti prostředí, kterému je beton vystaven. Ověřované betony byly navrženy pro třídu prostředí XC3.

Ověřované druhy cementů

CEM II/A-S 42,5 R, portlandský struskový cement

CEM II/B-S 32,5 R, portlandský struskový cement

CEM I 42,5 R (sc), portlandský cement

Všechny od výrobce Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

7. POUŽITÉ MATERIÁLY A RECEPTURY BETONŮ

7.1. Směsné cementy

Pro přípravu referenčního betonu byl použit cement CEM I 42,5 R (sc) z cementárny Mokrá, výrobce Českomoravský cement a.s.

CEM I 42,5 R (sc)

Obsah složek

Hlavní složka	Portlandský slínek	95-100%
Doplňující složka		0-5%

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Chemické vlastnosti

Obsah SO ₃ [%]	3,23
Obsah Cl ⁻ [%]	0,025
Na ₂ O ekvivalent [%]	0,64
Nerozpustný zbytek [%]	0,42
Ztráta žíháním [%]	1,62
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	49,0
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	58,3
Pevnost v tlaku po 90 dnech [MPa]	64,4
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	8,8
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	9,3
Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech [MPa]	9,7

Cement CEM I 42,5 R (sc) je vhodný pro použití do cementobetonových krytů vozovek podle ČSN 73 6123-1.

Pro přípravu testovaných betonů byly použity cementy CEM II/A-S 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R z cementárny Mokrá, výrobce Českomoravský cement a.s.

CEM II/A-S 42,5 R

Obsah složek

Hlavní složky	Portlandský slínek	80-97%
	Granulovaná vysokopecní struska	6-20%
Doplňující složka		0-5%

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Chemické vlastnosti

Obsah SO ₃ [%]	2,68
Obsah Cl ⁻ [%]	0,069
Na ₂ O ekvivalent [%]	0,69
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	neuvedena
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	57,9
Pevnost v tlaku po 90 dnech [MPa]	72,9
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	neuvedena
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	9,4
Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech [MPa]	10,1

CEM II/B-S 32,5 R

Obsah složek

Hlavní složky	Portlandský slínek	65-79%
	Granulovaná vysokopecní struska	21-35%
Doplňující složka		0-5%

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Chemické vlastnosti	
Obsah SO ₃ [%]	2,49
Obsah Cl ⁻ [%]	0,063
Na ₂ O ekvivalent [%]	0,69
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	34,1
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	50,4
Pevnost v tlaku po 90 dnech [MPa]	64,8
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	6,7
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	9,5
Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech [MPa]	10,0

7.2. Kamenivo

Pro přípravu betonu bylo použito následující kamenivo:

Frakce 0/4, těžené kamenivo z pískovny Žabčice

Frakce 8/16, drcené kamenivo z lomu Lomnička u Tišnova

Frakce 11/22, drcené kamenivo z lomu Lomnička u Tišnova

Kameniva z lomu Lomnička i kamenivo z pískovny Žabčice splňují, dle prohlášení o shodě, požadavky ČSN EN 12620 + A1 - Kamenivo do betonu.

7.3. Přísady

Dle zadání BP byly vybrány následující přísady do betonu.

Stachement 2489

Jedná se o **superplastifikační přísadu** na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem.

Používá se při výrobě transportbetonu a betonů, z důvodu dosažení čerpatelné konzistence betonu za použití nižšího množství záměsové vody a také kvůli jeho schopnosti prodloužit dobu zpracovatelnosti cementové směsi. [13]

Vlastnosti výrobku:

druh přísady	Superplastifikační přísada EN 934-2: T 3.1/3.2
č. certifikátu	0921-CPR-2000
řízení výroby	Dle ČSN ISO 9001 a ČSN EN 934 – 2/6
vzhled	Červenohnědá homogenní kapalina
hustota	$1055 \pm 25 \text{ kg m}^{-3}$
sušina	$25 \pm 1 \text{ hm. \%}$
pH	5 – 7
Maximální obsah chloridů	0,1 % hm.
Maximální obsah alkálií	1,5 % ekv. Na_2O
Korozivní vlastnosti	Schváleno dle ČSN EN 934-1, obsahuje pouze složky uvedené v příloze A.1 z EN 934-1:2008 [23]

Microporan

Jedná se o **provzdušňovací přísadu**, která při míchání vytváří v čerstvém betonu vzduchové póry o průměru 10-300 μm . Používá se při výrobě betonů, z důvodu zvýšení jejich odolnosti proti mrazu a působení chemických rozmrazovacích látek [13]

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	$1015 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$
Sušina	$4,5 \pm 0,5 \text{ hm. \%}$
pH	9 - 11
Maximální obsah chloridů	0,1 % hm.
Maximální obsah alkálií	8 % ekv. Na_2O
Korozivní vlastnosti	Schváleno dle ČSN EN 934-1, obsahuje pouze složky uvedené v příloze A.1 z EN 934-1:2008 [23]

Použití přísad pro jednotlivé receptury betonu:

Receptura 1 prostředí XC3	Stachement 2489
Receptura 2 prostředí XF4	Stachement 2489, Microporan [13]

7.4. Receptury betonu, prostředí XF4 a XC3

Pro níže uvedené receptury, byly použity následující druhy cementů:

CEM II/A-S 42,5 R, portlandský struskový cement

CEM II/B-S 32,5 R, portlandský struskový cement

CEM I 42,5 R (sc), portlandský cement

Všechny od výrobce Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

7.4.1. Receptura 1 třída prostředí XC3

Tabulka 2: Receptura pro prostředí XC3

Třída pevnosti betonu	-	C 30/37
Třída prostředí	-	XC3
Cement	kg	350
DTK 0/4 Žabčice	kg	900
HDK 8/16 Lomnička	kg	630
HDK 11/22 Lomnička	kg	424
Plastifikátor (Stachement 2489)	kg	2,8
voda	l	170

7.4.2. Receptura 2 třída prostředí XF4

Tabulka 3: Receptura pro třídu prostředí XF4

Třída pevnosti betonu	-	C 30/37
Třída prostředí	-	XF4
Cement	kg	374
DTK 0/4 Žabčice	kg	797
HDK 8/16 Lomnička	kg	593
HDK 11/22 Lomnička	kg	369
Plastifikátor (Stachement 2489)	kg	3,0
Provzdušňovací přísada (Microporan)	kg	0,23
voda	l	158

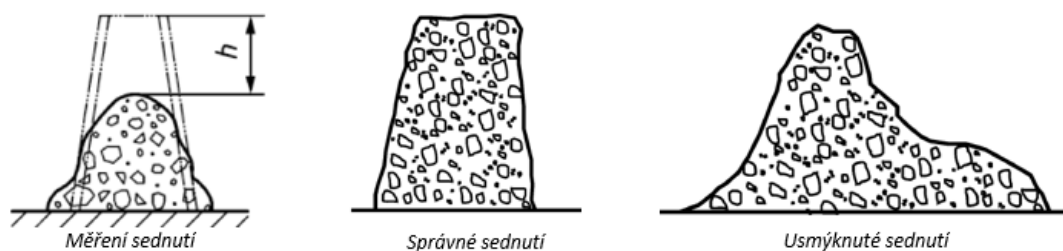
8. OVĚŘOVANÉ VLASTNOSTI BETONŮ A METODIKA ZKOUŠEBNÍCH POSTUPŮ

8.1. Konzistence čerstvého betonu

Konzistence čerstvého betonu byla stanovena zkouškou sednutí dle normy ČSN EN 12350-2: 2020 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.

Pomůcky: dutý kužel, propichovací tyč, pravítko, lopatka, stopky, násypka, hadřík, nádoba, podkladní deska.

Princip: Čerstvý beton se naplní do formy, která má tvar kužele, v několika vrstvách a každá vrstva se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí. Po zvednutí kužele udává konzistenci betonu změřená vzdálenost, o kterou poklesl beton.



Obrázek 3: Zkouška konzistence čerstvého betonu

8.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Stanovení obsahu vzduchu bylo provedeno dle normy ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody.

Pomůcky: zkušební tlakoměrná nádoba, tlakové víko, tlakoměr, stříčka s vodou, vibrační stůl, lopatka, nádoba na promíchání, lopata, palička, vlhký hadřík, propichovací tyč.

Princip: Naplníme nádobu na vibračním stole ve dvou vrstvách a zhutníme. Hutníme, dokud se na povrchu neobjevují velké vzduchové bubliny. Beton zarovnáme, okraj nádoby očistíme, aby došlo ke správnému uzavření tlakové nádoby. Víko přichytíme k nádobě svorkami.

Uzavře se hlavní ventil vzduchu a otevrou se dva boční, nádoba se začne pomocí stříčky plnit vodou do hadičky, dokud nebude z druhé hadičky plynule vytékat voda. Nádobu poklepeme paličkou a stříčkou doplníme potřebnou vodu, natlakujeme nádobu za rysku, případně upustíme nebo připustíme vzduch. Uzavřeme hlavní ventil a provedeme měření. Hodnotu si zapíšeme. Obsah vzduchu se vypočítá na základě vztahu:

$$A_c = A_1 - G$$

A₁ obsah vzduchu ve zkoušeném vzorku betonu
G opravný součinitel, G=0 (pokud není stanoveno)

8.3. Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti betonu v tlaku bylo provedeno dle ČSN EN 12390-3: 2020 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Pomůcky: zkušební lis.

Princip: Zkušební tělesa zatěžujeme až do porušení ve zkušebním lisu. Vypočítáme pevnost v tlaku z naměřeného maximálního zatížení při rozdrčení tělesa.

$$f_c = \frac{F}{A_c} [MPa]$$

f_c pevnost v tlaku [MPa]
F maximální zatížení při porušení [N]
A_c průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

8.4. Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu bylo provedeno dle ČSN EN 12390-5: 2020 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Pomůcky: zkušební lis

Princip: Tělesa se vloží do zkušebního lisu a postupně se zatěžují. Vyhodnocení se provede dosazením do uvedeného vzorce:

$$R_f = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \text{ [MPa]}$$

R _f	pevnost v tahu za ohybu [MPa]
b	šířka trámců [mm]
h	výška trámců [mm]
F	síla vynaložená na střed trámce při zlomení [N]
l	vzdálenost mezi podporami [mm] = 100 mm

8.5. Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti v tlaku E_c představuje pružnostní charakteristiku vyjadřující deformační vlastnosti materiálu v tlaku. Zjišťuje se z deformací, které nastávají při známém zatížení na základě Hookova zákona. Statický modul pružnosti v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \text{ [MPa]}$$

Δσ	rozdíl napětí
Δε	rozdíl poměrného přetvoření

8.6. Mrazuvzdornost

Stanovení mrazuvzdornosti betonu bylo provedeno dle ČSN 73 1322 – Stanovení mrazuvzdornosti betonu.

Cílem zkoušky je stanovit součinitel mrazuvzdornosti betonu vyjádřený jako poměr průměrných pevností betonu v tahu za ohybu zmrazovaných vzorků betonu ku vzorkům porovnávacím. Zkouška mrazuvzdornosti betonu se provádí na vzorcích ve formě trámců 100x100x400 mm. Testované vzorky betonu jsou cyklicky zmrazovány. Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 %.

8.7. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL

Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL bylo provedeno dle ČSN 73 1326, metoda A - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.

Stanoví se na sadě těles ve formě krychlí uložených ve 3 % roztoku NaCl. Výsledkem je určení plošného úbytku hmotnosti zkoušených těles v gramech na mm² plochy tělesa.

Odolnost povrchu betonu se hodnotí pomocí součinitelů D1 - D5 kdy:

- D1 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1000 g/m²
- D2 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 2000 g/m²
- D3 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 3000 g/m²
- D4 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 4000 g/m²
- D5 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 5000 g/m²

9. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

9.1. Konzistence čerstvého betonu

Betonové směsi byly připravovány v konzistenci S3. Konzistence betonu byla měřena na čerstvé betonové směsi po jejím zamíchání metodou sednutí kužele. Interval hodnot sednutí kužele byl stanoven od 80 do 120 mm. Dávky vody, uvedené v recepturách 1 a 2. se snižovaly, dle aktuální vlhkosti používaného kameniva.

Výsledky konzistence betonu jednotlivých směsí byly následující:

Pro třídu prostředí XC3

Betonová směs s cementem CEM II/A-S, hodnota sednutí kužele 80 mm.

Betonová směs s cementem CEM II/B-S, hodnota sednutí kužele 90 mm.

Betonová směs s cementem CEM I, hodnota sednutí kužele 90 mm.

Pro třídu prostředí XF4

Betonová směs s cementem CEM II/A-S, hodnota sednutí kužele 80 mm.

Betonová směs s cementem CEM II/B-S, hodnota sednutí kužele 100 mm.

Betonová směs s cementem CEM I, hodnota sednutí kužele 80 mm.

Všechny hodnoty sednutí kužele odpovídají požadavku pro betonovou směs konzistence S3.

9.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Betonové směsi pro třídu prostředí XF4 byly připravovány jako provzdušněné. Požadavek na množství vzduchu byl stanoven v intervalu od 4 do 6 %, tak aby provzdušněním betonové směsi nedocházelo ke snižování pevnosti betonu a zároveň byl beton dostatečně odolný proti působení mrazu. Dávkování provzdušňovací přísady se lišilo. U betonů obsahující cement CEM I 42,5 R (sc) a CEM II/A-S 42,5 R byla použita dávka, dle receptury 2, a to 0,06 % z dávky cementu. U betonů obsahující cement CEM II/B-S 32,5 R se dávka musela snížit na 0,04 % z množství cementu.

Pro třídu prostředí XF4

Betonová směs s cementem CEM II/A-S, množství vzduchu 6,0 %.

Betonová směs s cementem CEM II/B-S, množství vzduchu 4,2 %.

Betonová směs s cementem CEM I, množství vzduchu 5,3 %.

Všechny hodnoty množství vzduchu odpovídají stanovenému požadavku.

Betonové směsi pro třídu prostředí XC3 byly připravovány jako neprovzdušněné.

Procento vzduchu v neprovzdušněné betonové směsi se pohybuje kolem 2 %.

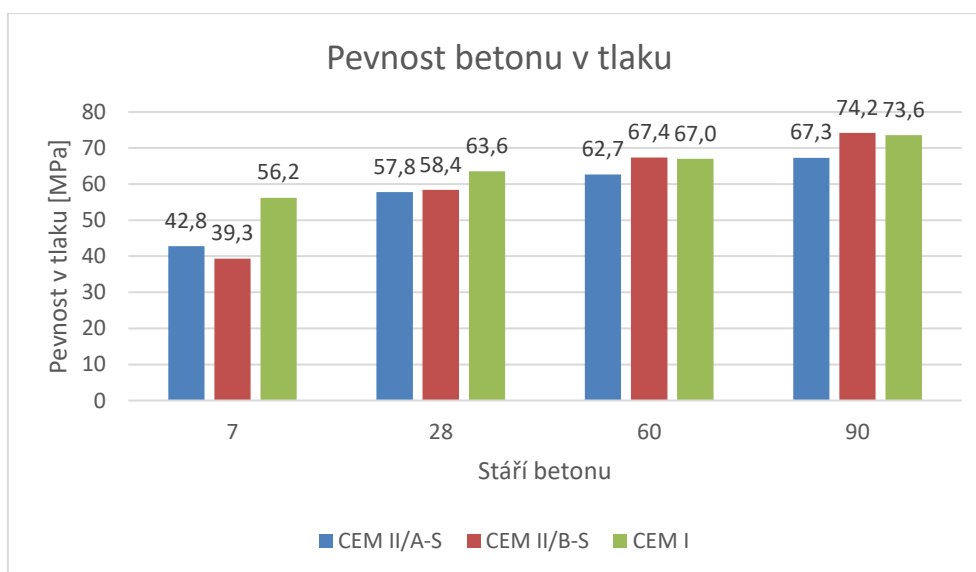
9.3. Pevnost v tlaku

9.3.1. Receptura 1 pro C30/37 XC3

Pevnost betonu v tlaku byla stanovena ve staří 7, 28, 60 a 90 dní s využitím tří různých druhů cementu. Receptura betonu byla navržena pro prostředí XC3. Zkušební tělesa byla po dobu zrání uložena ve vodním uložení. V tabulce 3 jsou uvedeny naměřené hodnoty pevnosti v tlaku.

Tabulka 4: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3

Stáří betonu [dny]	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
7	42,8	39,3	56,2
28	57,8	58,4	63,6
60	62,7	67,4	67,0
90	67,3	74,2	73,6



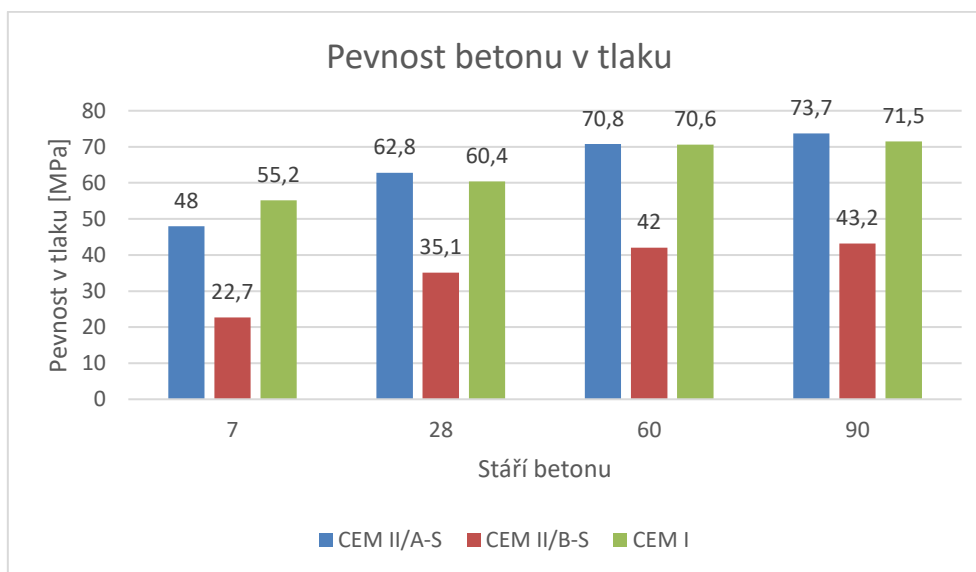
Graf 9: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3

9.3.2. Receptura 2 pro C30/37, XF4

Pevnost v tlaku betonu byla stanovena ve staří 7, 28, 60 a 90 dní s využitím tří různých druhů cementu. Receptura betonu byla navržena pro prostředí XF4. Zkušební tělesa byla po dobu zrání uložena ve vodním uložení. V tabulce 4 jsou uvedeny naměřené hodnoty pevnosti v tlaku.

Tabulka 5: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XF4

Stáří betonu [dny]	druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
7	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 48,0	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 22,7	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 55,2
28	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 62,8	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 35,1	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 60,4
60	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 70,8	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 42,0	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 70,6
90	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 73,7	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 43,2	Pevnost v tlaku f_c [MPa] 71,5



Graf 10: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, třída prostředí XF4

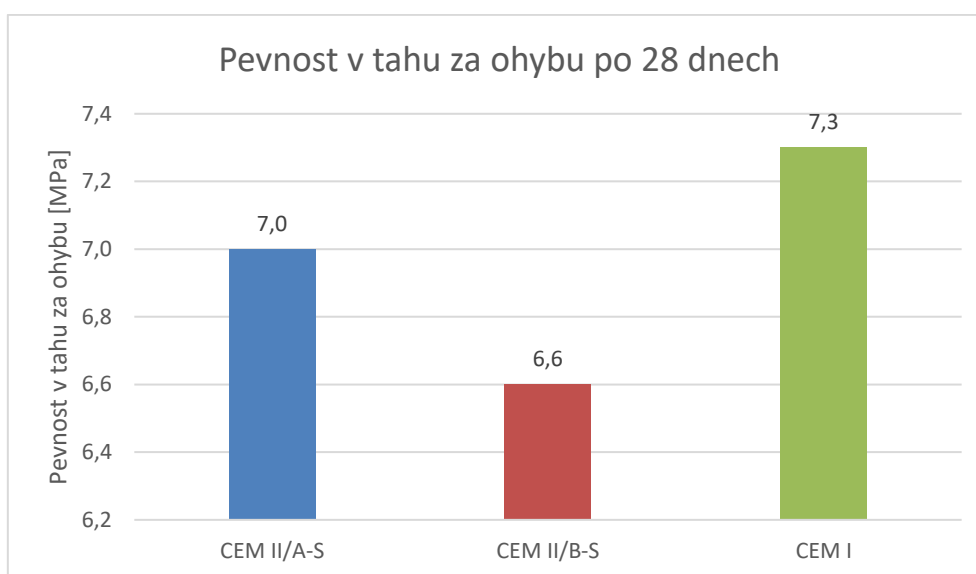
9.4. Pevnost v tahu za ohybu

9.4.1. Receptura 1 pro C30/37, XC3

Pevnost v tahu za ohybu betonu byla stanovena ve staří 28 dní s využitím tří různých druhů cementu. Receptura betonu byla navržena pro pevnostní třídu C30/37 a prostředí XC3. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 5 jsou uvedeny naměřené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu.

Tabulka 6: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XC3

Stáří betonu [dny]	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]
28	7,0	6,6	7,3



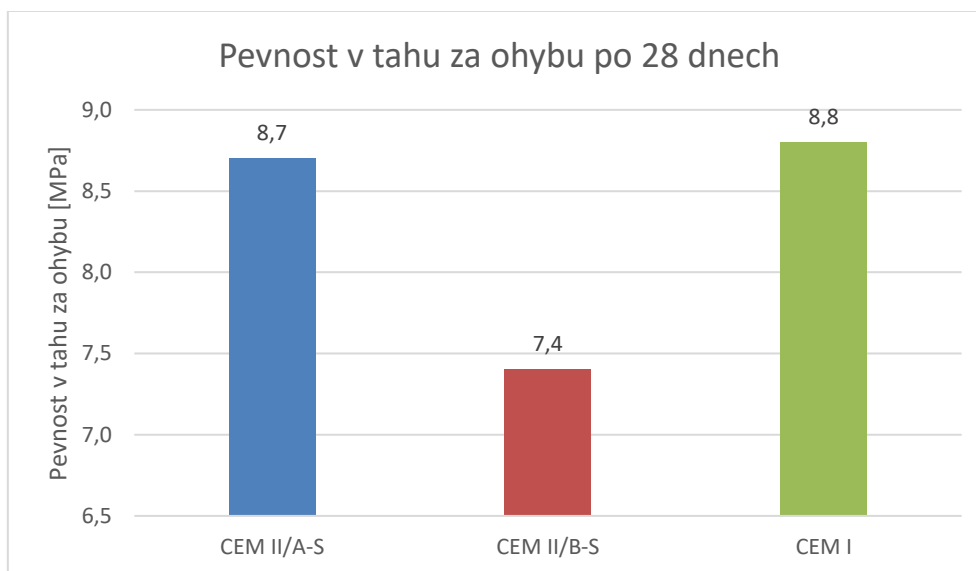
Graf 11: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XC3

9.4.2. Receptura 2 pro C30/37, XF4

Pevnost v tahu za ohybu betonu byla stanovena ve staří 28 dní s využitím tří různých druhů cementu. Receptura betonu byla navržena pro pevnostní třídu C30/37 a prostředí XF4. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu.

Tabulka 7: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XF4

Stáří betonu [dny]	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]
28	8,7	7,4	8,8



Graf 12: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XF4

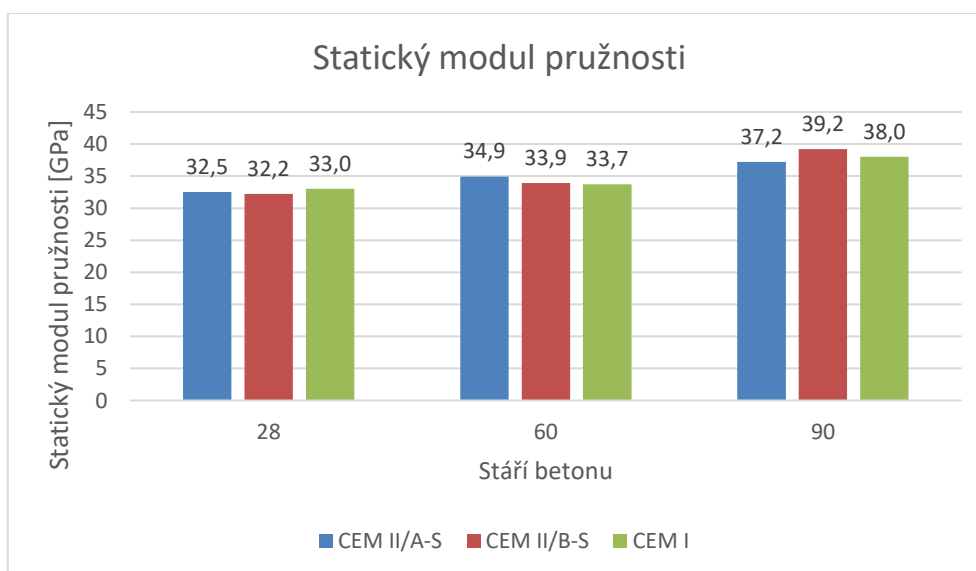
9.5. Statický modul pružnosti

9.5.1. Receptura 1 pro C30/37, XC3

Statický modul pružnosti betonu byl stanoven ve staří 28, 60 a 90 dní s využitím tří různých druhů cementu. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty statického modulu pružnosti.

Tabulka 8: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3

Stáří betonu [dny]	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
28	32,5	32,2	33,0
60	34,9	33,9	33,7
90	37,4	39,2	38,0



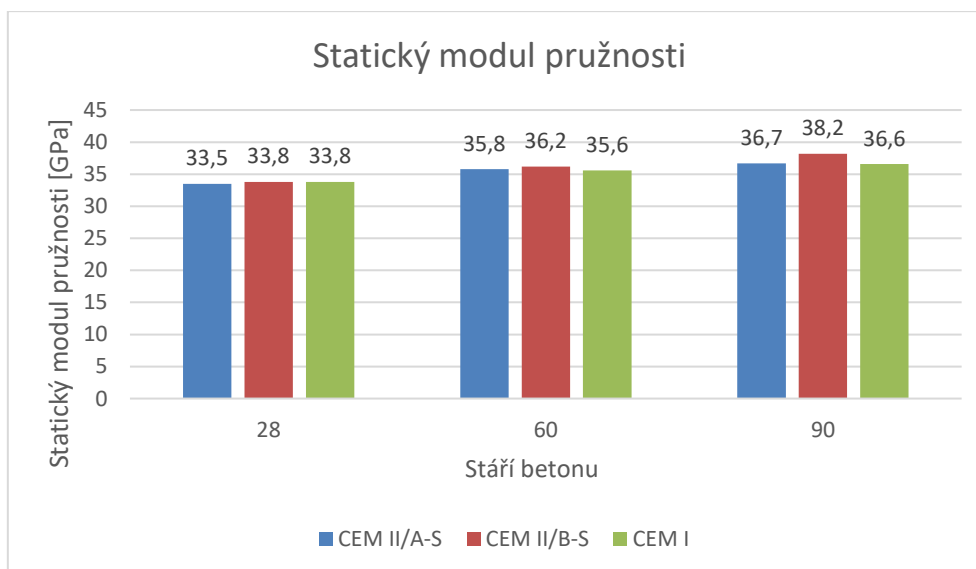
Graf 13: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3

9.5.2. Receptura 2 pro C30/37, XF4

Statický modul pružnosti betonu byl stanoven ve staří 28, 60 a 90 dní s využitím tří různých druhů cementu. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty statického modulu pružnosti.

Tabulka 9: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XF4

Stáří betonu [dny]	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
28	33,5	33,8	33,8
60	35,8	36,2	35,6
90	36,7	38,2	36,6



Graf 14: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, i XF4

9.6. Mrazuvzdornost

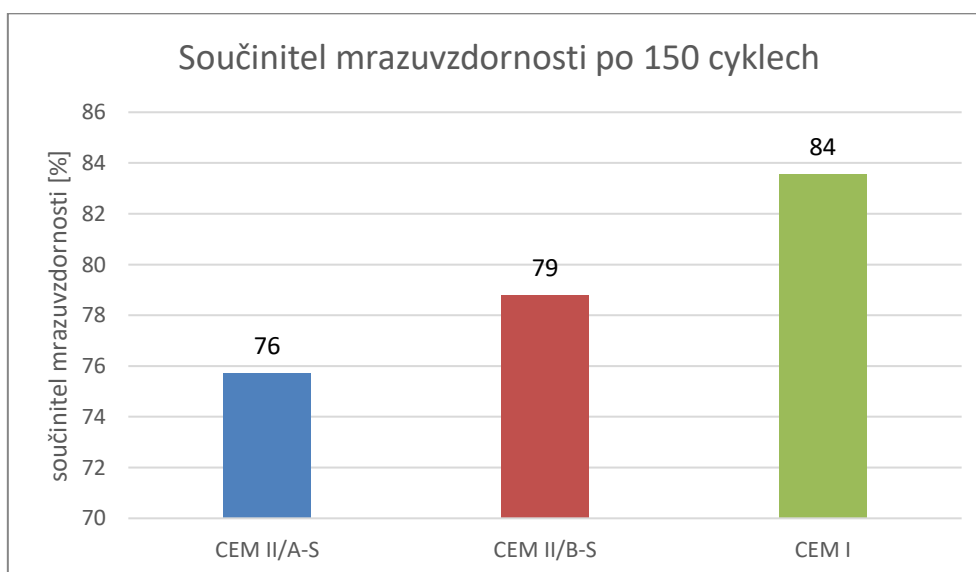
9.6.1. Receptura 1 pro C30/37, XC3

Mrazuvzdornost betonu byla stanovena ve staří 28 dní s využitím tří různých druhů cementu. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty mrazuvzdornosti po 150 zmrazovacích cyklech.

Tabulka 10: Mrazuvzdornost betonu, C30/37, XC3

	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
Stav betonu	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]
Srovnávací	7,0	6,6	7,3
Po 150 cyklech	5,3	5,2	6,1

Součinitel mrazuvzdornosti [%]		
76	79	84



Graf 15: Součinitel mrazuvzdornosti betonu po 150 zmrazovacích cyklech, C30/37, XC3

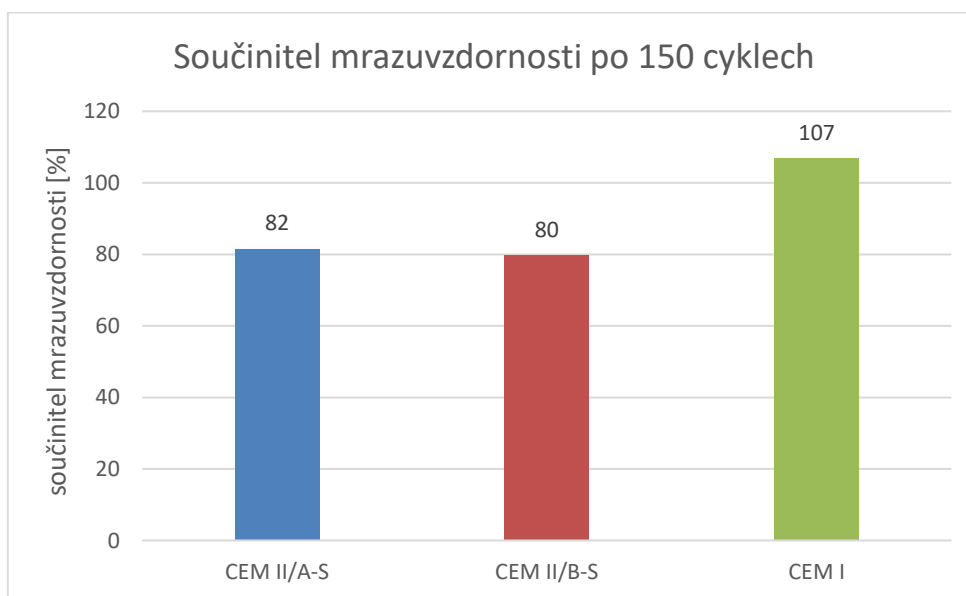
9.6.2. Receptura 2 pro C30/37, XF4

Mrazuvzdornost betonu byla stanovena ve staří 28 dní s využitím tří různých druhů cementu. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty mrazuvzdornosti po 150 zmrazovacích cyklech.

Tabulka 11: Mrazuvzdornost betonu, C30/37, XF4

Stav betonu	Druhy cementů		
	CEMII/A-S	CEM II/B-S	CEM I
	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu $f_{c,k}$ [MPa]
Srovnávací	8,7	7,4	8,8
Po 150 cyklech	7,1	5,9	9,4

Součinitel mrazuvzdornosti [%]		
82	80	107



Graf 16: Součinitel mrazuvzdornosti betonu po 150 zmrazovacích cyklech, C30/37, XF4

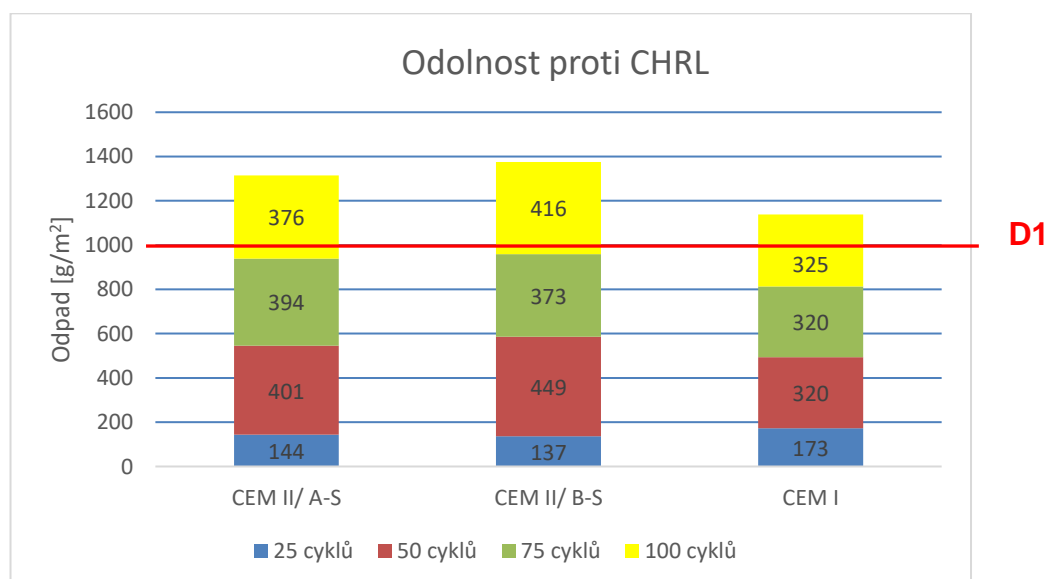
9.7. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL

9.7.1. Receptura 2 pro C30/37, XF4

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla stanovena ve staří 28 dní s využitím tří různých druhů cementu. Zkušební tělesa byla uložena ve vodním uložení. V tabulce 11 jsou uvedeny naměřené hodnoty odpadů v g/m² po jednotlivých sadách zmrazovacích cyklů.

Tabulka 12: Hodnoty odpadu v g/m² po jednotlivých sadách zmrazovacích cyklů, C30/37, XF4

Druhy cementu	Odpad po cyklech [g/m ²]			
	25	50	75	100
CEM II/ A-S	144	545	939	1315
CEM II/ B-S	137	586	960	1375
CEM I	173	493	813	1137



Graf 17: Hodnoty odpadu v g/m² po jednotlivých sadách zmrazovacích cyklů, C30/37, XF4

- D1 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1000 g/m²
D2 počet cyklů, po kterých je odpad betonu 2000 g/m²

ZÁVĚR

Teoretická část byla rozdělena na pět kapitol. V první kapitole byla popsána historie výroby cementu. Ve druhé kapitole byl popsán přehled cementáren a cementů vyráběných v současnosti v České republice a byla popsána charakteristika jednotlivých cementů. Třetí kapitola se zabývá produkcí cementů a směsných cementů ve světě, dopadem enviromentální politiky s požadavky na snížení produkce oxidů uhlíku a jejím vlivem na výrobu cementu. Ve čtvrté kapitole je popsáno využití druhotných surovin při výrobě směsných cementů se zaměřením na vysokopeční strusku, elektrárenský popílek a vápenec. Je zde popsán jejich způsob výroby, složení, vlastnosti a cementy z nich vyráběné. Pátá kapitola se zabývá využitím směsných cementů ve stavebním průmyslu se zaměřením na důvody jejich použití, omezení a na současný trend využívání směsných cementů při výrobě betonu.

Experimentální část byla rozdělena na čtyři kapitoly. V první kapitole experimentální části je popsán cíl bakalářské práce, srovnání vlastností betonů ze směsných cementů s vlastnostmi betonu z portlandského cementu pro jejich použití v dopravním stavitelství pro třídy prostředí XF4 a XC3. Pro každé z těchto prostředí byly ověřovány vlastnosti betonu z cementů vyráběných v České republice firmou Heidelberg Českomoravský cement, a.s., závod v Mokrá, konkrétně se jednalo o cementy CEM II/A-S 42,5 R a CEM II/B-S 32,5 R. Jako referenční cement pro srovnání byl vybrán cement od stejného výrobce s označením CEM I 42,5 R (sc). Ve druhé kapitole jsou popsány základní vlastnosti materiálů použitých pro výrobu betonu z testovaných a referenčního cementu, tedy cementů, kameniva a použité plastifikační a provzdušňovací přísady. Dále jsou zde uvedeny receptury pro výrobu betonu pro prostředí XF4 a XC3. Ve třetí kapitole je uveden výčet ověřovaných vlastností betonů a metodiky zkušebních postupů.

Ve čtvrté kapitole experimentální části jsou uvedeny výsledky jednotlivých provedených zkoušek. Konzistence čerstvého betonu měřená metodou sednutí kužele byla určena v rozmezí 80-120 mm. Při výrobě všech betonových směsí byl tento požadavek dodržen. Betonové směsi pro třídu prostředí XF4 byly připravovány jako provzdušněné. Požadavek na množství vzduchu byl stanoven v intervalu od 4 do 6 %. Při tomto procentuálním provzdušnění by beton neměl ztratit svou pevnost, ale zároveň by měl být dostatečně odolný proti působení mrazu. Měřením množství vzduchu bylo zjištěno, že připravená betonová směs s cementem CEM II/A-S obsahovala 6,0 % vzduchu, betonová směs s cementem CEM II/B-S obsahovala 4,2 % vzduchu a betonová směs s cementem CEM I obsahovala 5,3 % vzduchu. Všechny připravené betonové směsi pro třídu prostředí XF4 vyhověly stanovenému požadavku na množství obsahu vzduchu. Krátkodobé pevnosti v tlaku betonů vyrobených ze směsných cementů pro třídu prostředí XC3 ve stáří sedm dní zaostávaly za referenčním betonem, zvláště pak u betonu vyrobeného z cementu CEM II/B-S 32,5 R, kdy byla sice použita stejná dávka cementu, ovšem s menší pevnostní třídou. Ve stáří šedesáti dní se však již pevnosti všech zkoušených vzorků začaly vyrovnávat. U betonů vyrobených pro třídu prostředí XF4 byl trend nárůstu pevností podobný, ovšem s tím rozdílem, že beton připravený z cementu CEM II/B-S 32,5 R, dosahoval samozřejmě značně nižších pevností, a to jak krátkodobých, tak dlouhodobých. Pevnost v tahu za ohybu betonu ve stáří 28 dní dosahovala téměř shodných hodnot u betonu připravených z cementů v pevnostní třídě 42,5. Betony s cementem v pevnostní třídě 32,5 pak dosahovaly logicky pevností mírně nižších. Toto je shodné pro obě receptury betonu. Statický modul pružnosti betonů připravených ze směsných cementů byl pro obě dvě receptury, a to ve všech testovaných stářích betonu v podstatě shodný s výsledky referenčního betonu. Obecně však platí, že moduly pružnosti betonů ze směsných cementů by měly být o 15 % menší, což se v tomto experimentu nepotvrdilo. Součinitel mrazuvzdornosti po 150 cyklech se u betonů pro prostředí XC3 vyrobených ze směsných cementů pohyboval na spodní hranici přípustné hodnoty. U betonu srovnávacího pak dosáhl běžné hodnoty pro daný typ betonu. Je tedy zřejmé, že betony vyrobené ze směsných cementů se struskou bez provzdušnění nejsou příliš odolné proti působení mrazu.

Součinitel mrazuvzdornosti po 150 cyklech pak u provzdušněných betonů určených pro třídu prostředí XF4 vyrobených ze směsných cementů dosáhl bezpečně vyhovujících hodnot. Referenční beton přesáhl hodnotu sta procent, tedy pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaného betonu byly vyšší než hodnoty betonu nezmrazovaného. Toto je zřejmě způsobeno tím, že zatímco srovnávací beton byl zkoušen ve stáří 28 dní, tak zmrazovaný beton byl zkoušen až po dokončení zmrazovacích cyklů. V průběhu zmrazování tedy ještě došlo k takzvanému dozrávání betonu, tedy nárůstu jeho pevností. Odolnost povrchu betonu proti působení CHRL byla stanovena pouze pro beton vyrobený pro prostředí XF4. Betony připravené ze směsných cementů dosáhly po 100 cyklech vyšších hodnot odporu než referenční beton. Rozdíl však není příliš výrazný. Všechny betony překročily po 100 cyklech hranici 1000 g/m². Nižší odolnost proti působení CHRL u betonů ze směsných cementů může být způsobena náhradou části slínku vysokopepční struskou.

Betony z testovaných směsných cementů navrhované na pevnostní třídu C30/37 pro třídu prostředí XC3 splnily podmínky použití v dopravním stavitelství z hlediska jejich pevnostních charakteristik, poměrně nízká je však jejich odolnost proti působení mrazu.

U betonů z testovaných směsných cementů navrhovaných na pevnostní třídu C30/37 pro třídu prostředí XF4 splnil podmínky použití v dopravním stavitelství z hlediska jejich pevnostních charakteristik pouze beton s cementem CEM II/A-S 42,5 R. Beton s cementem CEM II/B-S 32,5 R nedosáhl ve stáří 28 dní požadovaných pevností v tlaku pro tuto pevnostní třídu. Tento stav je dán jeho nižší pevnostní třídou, kdy pevnosti narůstají výrazně pomaleji. Odolnost proti působení mrazu a odolnost povrchu betonu proti působení CHRL jsou u obou testovaných betonů kupodivu vyhovující.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LAFARGE Historie cementu [online] [2023-04-15] Dostupné z: https://www.lafarge.cz/2_2_3-Historie-cementu
- [2] KLEČKA T. *Příručka technologa Beton*, 2010, 3-7 s
- [3] WALTER, Martin. *Vlastnosti portlandských cementů s ohledem na ekonomickou a ekologickou efektivitu výroby* [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/29854>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Marcela Fridrichová.
- [4] JIRÁSEK J., *Neorstné suroviny a jejich využití*, [Online]. [2023-04-14]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html.
- [5] S. v. cementu, *Svaz výrobců cementu v ČR*, [Online]. [2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.svcement.cz/>.
- [6] ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití,“ Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [7] PEŘKA L., *Profesní informační systém ČKAIT*. [Online]. 2020. [2023-04-16]. Dostupné z: <https://profesis.ckait.cz/dokumenty-ckait/tp-2-2/#2-1>.
- [8] S. CEMEX Research Group AG, *Beton.cz*, [Online]. 2023. [2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.beton.cz/o-nas/slovník-pojmu/portlandsky-cement.html>
- [9] W. C. ASSOCIATION, *About cement*, [Online]. [2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.worldcementassociation.org/about-cement>
- [10] T. E. C. ASSOCIATION, *EU cement industry trade statistics*, [Online]. 2022. [2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.cembureau.eu/media/js3ke4ou/eu-cement-industry-trade-statistics-2022.pdf>
- [11] T. E. C. ASSOCIATION, *Cembureau statement on rising carbon prices and recent eu cement import trends*, [Online]. [2023-04-20]. Dostupné z: <https://cembureau.eu/media/ptvg0yaq/cembureau-statement-evolution-of-carbon-price-and-cement-imports.pdf>
- [12] S. v. c. ČR, *Snižování emisí skleníkových plynů při výrobě cementu a betonu*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2022/06/RoadMap-dekarbonizace-SVC-C%CC%8CR-2022-final.pdf>.
- [13] K. CZ, *Cena emisních povolenek € - Aktuální cena a vývoj cen*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/emisni-povolenky-cena/>
- [14] F. GROUP, *Global Blended Cement*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/global-blended-cement-4218.htm?fbclid=IwAR3KWA0GHDPHdsL33JkePinJInluCeaHYcHcs9FNOOsAAaWwe9ryGhzCoUI>.
- [15] J. ASSOCIATION, *Use of wastes and by-products*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: https://www.jcassoc.or.jp/cement/2eng/e_01d.html
- [16] C. M. A. O. INDIA, *The Cement Industry: Largest Consumer of Fly Ash*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.cmaindia.org/the-cement-industry-largest-consumer-of-fly-ash>

- [17] C. M. A. O. INDIA, *Varieties od cement*, [Online]. [2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.cmaindia.org/about-cement-and-varieties-of-cement>
- [18] BOHÁČ, M., *Vývoj cementových směsí pro sklovláknobetonový kompozit*. Brno, 2011. Disertační práce. Masarykova univerzita. Fakulta přírodovědecká. Vedoucí práce Miroslava GREGEROVÁ
- [19] DROCHYTKA, MATULOVÁ, R. a P. *Lehké stavební látky*, Brno: Vysoké učení technické, *přednášky* 2006.
- [20] EBETON, *Popílky pro výrobu cementu*, [Online]. [2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/popilky-v-w/>
- [21] HOOTON, D, NOKKEN, M, THOMAS, M.D.A., Cement Association of Canada, Portland-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis For CSA A 3000. Toronto, 2007. University of Toronto
- [22] JAROLÍM, T., *Studium vlivu směsných cementů, zejména vápencových, na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů*, Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Rudolf HELA
- [23] STACHEMA, *Přísady do betonu*, [Online]. 2023. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/>.
- [24] ČTK ČESKÉ NOVINY, *Výroba cementu v Česku loni stoupla o 4,6 procenta na 4,72 milionu tun*, [Online]. 2022. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/2252937>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Producenti cementů v ČR dle VŠB	6
Obrázek 2: Procentuální nárůst dovozu cementu do vybraných evropských zemí dle European Cement Association	15
Obrázek 3: Zkouška konzistence čerstvého betonu	33

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Podíl prodeje jednotlivých cementů na našem území v roce 2021 dle Svazu výrobců cementu	6
Graf 2: Podíl na produkci cementu ve světě v roce 2018 a prognóza pro rok 2030 dle World Cement Association	13
Graf 3: Dovoz cementu a slínku do Evropské unie dle European Cement Association	14
Graf 4: Procentuální podíl dovozu cementu a slínku nejvýznamnějších dovozců do Evropské unie dle European Cement Association	14
Graf 5: Pohyb ceny emisních povolenek v období 2006 až 2023 dle informací z burzy	16
Graf 6: Poměr použitého množství vysokopecní strusky z oceláren v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association	17
Graf 7: Poměr použitého množství popílku v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association	18
Graf 8: Výroba cementu v Japonsku a podíl druhotných surovin v cementářském průmyslu dle Japan Cement Association	18
Graf 9: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3	38
Graf 10: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, třída prostředí XF4	39
Graf 11: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XC3	40
Graf 12: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XF4	41
Graf 13: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3	42
Graf 14: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XF4	43
Graf 15: Součinitel mrazuvzdornosti betonu po 150 zmrazovacích cyklech, C30/37, XC3	44
Graf 16: Součinitel mrazuvzdornosti betonu po 150 zmrazovacích cyklech, C30/37, XF4	45
Graf 17: Hodnoty odpadu v g/m ² po jednotlivých sadách zmrazovacích cyklů, C30/37, XF4	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výroba a využití popílku v cementářském průmyslu dle Cement Manufacturees Association of India.....	19
Tabulka 2: Receptura pro prostředí XC3.....	32
Tabulka 3: Receptura pro třídu prostředí XF4	32
Tabulka 4: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3	38
Tabulka 5: Pevnost betonu v tlaku po 7, 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XF4.....	39
Tabulka 6: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XC3	40
Tabulka 7: Pevnost betonu v tahu za ohybu po 28 dnech, C30/37, XF4.....	41
Tabulka 8: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XC3	42
Tabulka 9: Statický modul pružnosti po 28, 60 a 90 dnech, C30/37, XF4	43
Tabulka 10: Mrazuvzdornost betonu, C30/37, XC3.....	44
Tabulka 11: Mrazuvzdornost betonu, C30/37, XF4	45
Tabulka 12: Hodnoty odpadu v g/m ² po jednotlivých sadách zmrazovacích cyklů, C30/37, XF4	46