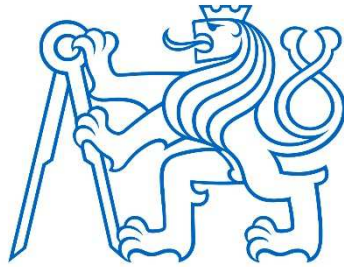


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Experimentální centrum



**Význam minerálních příměsí pro zajištění dlouhodobé trvanlivosti
betonu v dopravní infrastruktuře**

Importance of Mineral Additives for Ensuring the Long-term
Durability of Concrete in Transport Infrastructure

HABILITAČNÍ PRÁCE

Praha 2020

Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

Poděkování

Rád bych poděkoval všem kolegům, kteří se aktivně účastnili řady experimentálních programů. Samostatné poděkování se zaslouží věnovat Vítovi Šmilauerovi a Martinovi Keppertovi za hodnotné připomínky, podporu a ochotu spolupracovat, čehož si opravdu hluboce vážím.

Zvláštní poděkování patří partnerce Evě za její podporu a obrovskou míru tolerance.

Abstrakt

Předložená práce je zaměřena na vliv vybraných minerálních příměsí na dlouhodobou trvanlivost betonu pro konstrukce dopravní infrastruktury. Vybrané aspekty trvanlivosti jsou vedle literární rešerše dokumentovány realizovaným experimentálním programem, jež byl zaměřen především na permeabilitu betonu a predikci životnosti. Jako reflexe současného trendu v oblasti výzkumu ve využívání alternativních pojivových systémů byla rovněž poloprovozně ověřena možnost efektivního využití keramického odpadu. V samostatné části byla navržena metoda formulace směsného pojivového systému, při níž je zohledněn charakter dané aktivní příměsi. Tento postup návrhu byl posouzen na základě dosažených trvanlivostních parametrů studovaných směsí betonu. Realizovaný program akcentuje nezbytnost komplexního hodnocení trvanlivosti v oblasti betonových konstrukcí a nedostatky v současné praxi spočívající v podcenění zejména odolnosti betonu vůči karbonataci.

Klíčová slova

Minerální příměsí; trvanlivost betonu; průnik chloridových iontů; mrazuvzdornost; křemičito-alkalická reakce; karbonatace; smrštění; portlandský cement.

Abstract

Present work is focused on the influence of mineral additives on the long-term durability of concrete, which is intended for structures of transport infrastructure. Selected aspects of the durability are documented on the basis of literature review and performed experimental program with specific attention to the permeability and the prediction of the service life. Current research is globally focused on the incorporation of the alternative binding materials, hence the application of waste ceramic powder was verified in terms of set of operational tests. Separate part of this work deals with the novel approach of the formulation of blended binding system, which takes into consideration character of the used active additive. This procedure of the binder design was assessed in terms of final durability properties of the concrete mixtures. Realized experimental program accent the necessity of the complex evaluation of concrete durability and points out on the lacks in current praxis consisting of the suppressing of the concrete resistance to the process of carbonation.

Keywords

Mineral additives; durability of concrete; ingress of chloride ions; freeze-thaw resistance; alkali-silica reaction; carbonation; shrinkage; Portland cement.

Obsah

1. Úvod	7
2. Současné používané minerální příměsi	8
3. Současný přístup a vybrané degradační mechanismy	11
3.1 Dosavadní přístup při formulaci směsných pojiv	11
3.2 Křemičito-alkalická reakce (ASR)	11
3.3 Karbonatace	14
4. Smrštění betonu	17
4.1 Základní příčiny smrštění betonu	17
4.2 Experimentální program.....	19
4.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze	20
5. Mrazuvzdornost betonu	24
5.1 Způsob porušení betonu při působení mrazu	24
5.2 Experimentální program.....	25
5.3 Výsledky.....	26
6. Vliv chloridových rozmrazovacích prostředků na beton	31
6.1 Dopady zimní údržby při použití rozmrazovacích prostředků.....	31
6.2 Experimentální program.....	34
6.3 Výsledky experimentálního programu a jejich diskuze	35
7. Cihelný prach jako alternativní minerální příměs do betonu.....	37
7.1 Dosavadní zkušenosti s použitím cihelného prachu ve stavebnictví.....	37
7.2 Experimentální program.....	38
7.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze	43
7.4 Poloprovozní zkoušky	48
7.5 Perspektivy použití cihelného prachu	51
8. Racionální návrh betonových směsí s přídavkem minerálních příměsí	52
8.1 Dosavadní přístup při formulaci směsných pojiv	52
8.2 Experimentální program.....	52
8.2.1 Racionální návrh pojiva	53
8.2.2 Použité metody	55
8.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze	57
8.3.1 Čerstvý beton	57
8.3.2 Ztvrdlý beton	58
8.4 Zhodnocení navrženého racionálního návrhu.....	70
9. Závěr	71
Reference	72

1. Úvod

Beton na bázi portlandského cementu je s roční produkcí okolo deseti miliard tun nejpoužívanějším stavebním materiálem na světě (Assi *et al.*, 2018). Ve smyslu udržitelnosti je výroba cementu zodpovědná za 5-7 % celkových emisí CO₂ (Andrew, 2017). V roce 2014 byla roční produkce portlandského cementu na úrovni 2,8 miliard tun (Habert, 2014). Schneider *et al.* (2011) předpovídali, že objem jeho výroby do roku 2050 překročí čtyři miliardy tun. Naproti tomu Scrivener (2012) uvádí mnohem vyšší odhad; do roku 2050 bude roční produkce portlandského cementu okolo 5,8 miliardy tun. Nicméně podle U.S. Geological Survey (2020) byla celosvětová produkce cementu v roce 2018 na úrovni 4,1 miliardy tun. Monitoring rostoucího objemu výroby portlandského cementu je motivován především skutečností, že jedna tuna cementu je spojena s emisemi přibližně 0,73 – 0,99 t CO₂ v závislosti na složení slínku a použitém palivu (Hasanbeigi *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2015). Z tohoto důvodu je postupné snižování negativních dopadů spojených s výrobou cementu prioritní oblastí zájmu mnoha vědeckých týmů (Damtoft *et al.*, 2008; Wilinska & Pacewska, 2018; Al-Mansour *et al.*, 2019). Vedle snižování spotřeby energie při výrobě cementu (Schneider, 2015) je hlavním přístupem náhrada cementu jiným materiálem, který rovněž nabízí jisté pojivové vlastnosti. Navíc aplikace těchto materiálů nabízí mnohé technické výhody (Lothenbach *et al.*, 2011; Haider *et al.*, 2016; Paris *et al.*, 2016). I z těchto důvodů používání minerálních příměsí, kterými je nahrazována část portlandského cementu, postupně roste. V letech 2003 až 2010 klesl podíl portlandského slínku v pojivové části betonu z 85 % na 77 %; v následujících letech je očekáváno snížení až na 71 % (Schneider *et al.*, 2011). Na celkovou míru využití minerálních příměsí mají zásadní vliv i národní zvyklosti a dostupnost vhodných příměsí na trhu. V Evropské unii je většina používaných minerálních příměsí integrována do výroby prostřednictvím směsných cementů, které jsou dále distribuovány zpracovatelům (Uwasu, *et al.*, 2014). Naproti tomu v USA dominuje používání minerálních příměsí přímo na betonárnách, kde jsou používány až v 60 % případů (Kosmatka & Wilson, 2011). Na druhou stranu z výše uvedených bilancí je evidentní, že rostoucí poptávku po minerálních příměsích nebude do budoucna možné uspokojit pouze tradičními materiály jako je úletový popílek či struska, jejichž roční produkce se pohybuje okolo 1 miliardy tun v případě popílku, a 360 milionů tun v případě vysokopecní granulované strusky (Malhotra, 2006; Reynolds, 2009).

Motivace pro používání minerálních příměsí se v čase výrazně měnila. Před mnoha dekádami bylo použití minerálních příměsí otázkou hledání vhodného technického řešení při omezení hydratačního tepla či úspoře nákladného cementu (Dolen, 2010; Zabal *et al.*, 2013). V dnešní době je hlavní motivací globální potřeba snižovat emise CO₂. Avšak slepé a příliš vysoké náhrady cementu vedou ke zhoršení vybraných vlastností betonu v jeho raném stáří, mohou však vést i ke snížení trvanlivosti a tedy i životnosti celé konstrukce (Juenger & Siddique, 2015).

Přestože je výroba portlandského cementu náročná na spotřebu energie, minerální příměsí, jimiž jej lze částečně nahradit, nelze považovat na odpadní materiály, neboť jejich příprava k průmyslovému zpracování spočívající v sušení a mletí vyžaduje rovněž nemalé množství energie. Některé minerální příměsí jsou používány do té míry, že jsou již cíleně vyráběny, jako je tomu v případě křemičitého úletu.

Přínos minerálních příměsí, především těch aktivních, spočívá ve spotřebě rozpustného portlanditu, který je produktem hydratace cementu a nepřispívá k mechanickým vlastnostem. Postupnou reakcí aktivních fází příměsí s portlanditem dochází k zužování středních kapilárních pórů, což se pozitivně promítne na transportních vlastnostech ztvrdlého betonu (Kuzielová *et al.*, 2017). Při reakci s příměsí je tak rozpustný portlandit nahrazen nerozpustnými hydráty, které přispívají k mechanickým i trvanlivostním vlastnostem. Z tohoto důvodu jsou směsná pojiva s oblibou používána do chemicky agresivního prostředí (Shekarchi *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2012; Boháč *et al.*, 2014). Pokles pH ztvrdlého betonu při vhodném návrhu nezvyšuje riziko koroze výztuže, neboť je do jisté míry kompenzován vyšší hutností betonu a sníženým transportem vody a vlhkosti.

2. Současně používané minerální příměsi

Možnost nahradit určité množství cementu minerální příměsí je dána její povahou a vlastnostmi. V betonářském průmyslu mají obecně vyšší využití příměsi, které vykazují nějakou hydraulickou aktivitu. Nicméně i zcela inertní příměsi plnící funkci plniva mohou pozitivně ovlivňovat průběh hydratace výhradně fyzikální cestou. Jejich přínos spočívá ve zvětšení vnitřního prostoru, který pozitivně stimuluje nukleaci vznikajících hydrátů, a proto takovéto pojivové systémy často vykazují zvýšené mechanické parametry i vyšší stupeň hydratace. Naproti tomu význam aktivních minerálních příměsí je zdůrazňován především z dlouhodobého hlediska. Ovšem velmi jemné příměsi, jako křemičitý úlet, mohou přispět i ke zkrácení doby tuhnutí, neboť celý systém dosáhne potřebného přesycení vápnem v kratším čase (Lothenbach *et al.*, 2011).

Dlouhodobý průběh hydratace je u pojiv na bázi portlandského cementu monitorován celou řadou metod, nicméně termogravimetrie patří mezi ty nejpoužívanější. Vhodnost této metody je dána snadnou identifikací tepelného rozkladu portlanditu, jehož obsah v cementové pastě se mění v závislosti na aktivitě dané příměsi. Tato analytická metoda tak navazuje na tradiční postupy stanovení pucolánové aktivity jako jsou Chapelle test či Fratini test, kterými je stanovován úbytek Ca(OH)_2 v čase po přidavku daného množství příměsi. Nevýhodou těchto testů je nemožnost postihnout tzv. fyzikální efekt působení příměsí. Na druhou stranu podstata termogravimetrického měření přináší rovněž řadu nevýhod spočívající v přípravě vzorku, nutném předsušení a rozkladu fází, které se překrývají se studovanými hydráty.

Efektivita využití minerálních příměsí je nejčastěji vyjadřována indexem pevnosti *SI* („strength index“), který popisuje ztrátu nebo zisk pevnosti v tlaku při dané náhradě cementu (Bediako *et al.*, 2017; Xie & Visintin, 2018; Fan & Miller, 2018). V této podobě bylo použití minerálních příměsí integrováno i do technické praxe, kdy účinnost příměsí je popsána tzv. *k*-hodnotou. Tento přístup však zohledňuje požadavky na trvanlivost pouze maximální hodnotou vodního součinitele, navíc pro specifické aplikace je tato koncepce nevhodná. Gruyaert *et al.* (2013a) proto navrhli koncepci ekvivalentních vlastností betonu. Tento přístup umožňuje experimentální stanovení *k*-hodnoty na základě vybraného parametru, což se promítlo i do

řady národních předpisů (Van den Heede & De Belie, 2012). Nicméně i tento přístup dostatečně nezohledňuje otázky dlouhodobé trvanlivosti (Hooton & Bickley, 2014).

Úletový popílek je vedlejší produkt vznikající při výrobě elektrické energie v tepelných elektrárnách, které jako palivo používají uhlí. Kvalita použitého uhlí, režim spalování a odsiřovací technologie významným způsobem ovlivňují kvalitu popílku (Poon *et al.*, 2003; Ward & French, 2006; Cristelo *et al.*, 2016). Obsah uhlíku, který se může nárazově objevit při nedokonalém procesu spalování, způsobuje nežádoucí a neřízené provzdušnění čerstvé směsi. Z pohledu praktického použití popílku je však problematické kolísání i jeho vlastností v průběhu roku (Pacewska *et al.*, 2008; Turgut & Demir, 2019). Aktivace popílku může být realizována i použitím chemických přísad (NaOH, Na₂SO₄ a Na₂CO₃) (Pacewska & Wilinska, 2014).

Úletový popílek přispívá v bezpřísadovém systému ke zvýšení celkové pórovitosti, nicméně vzniklé póry jsou mnohem jemnější a tudíž nezvyšují permeabilitu (Da Silva & De Brito, 2015); mezi jemnými částicemi popílku navíc dochází ke vzniku drobných vzduchových dutin, které přispívají k mrazuvzdornosti (Puthipad *et al.*, 2016; Kurda *et al.*, 2017). V posledních dekádách se popílek stal nepostradatelnou součástí technologie betonu, protože pozitivně ovlivňuje řadu inženýrských vlastností. Kvůli redukci hydratačního tepla je často používán při výstavbě masivních konstrukcí (Zobal *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2016). S ohledem na pozitivní ovlivnění reologie čerstvého betonu je popílek jednou z klíčových složek při návrhu samozhutnitelných betonů (SCC), kde může nahradit až 60 % cementu (Da Silva & De Brito, 2015; Singh & Singh, 2016a). Nicméně takto vysoké náhrady cementu, i přes splněné mechanické parametry, již mohou představovat značné riziko z důvodů dlouhodobé trvanlivosti. Takto zaměřený výzkum realizoval Siddique (2011), který studoval SCC směsi s vysokými dávkami popílku a dopad na výslednou odolnost vůči karbonataci. Potvrdil trend způsobený klesajícím pH, kdy s rostoucí náhradou cementu rostla i hloubka karbonatační fronty. Jelikož však navržené směsi byly doplněny podstatnými dávkami chemických přísad, směs s nejvyšší dávkou popílku dosáhla hloubky karbonatace po 365 dnech pouze 1,85 mm.

Mletá vysokopecní granulovaná struska je druhou nejpoužívanější minerální příměsí používanou v betonářském průmyslu. Tato latentně hydraulická příměs na rozdíl od popílku umožňuje nahradit výrazně vyšší podíly cementu kvůli obsahu vápna. Nicméně pro její možné použití je klíčovým aspektem režim chlazení, který zajišťuje její dlouhodobou stabilitu (Pronina *et al.*, 2018). Optimální dávky vysokopecní strusky korespondují s klasifikací cementů dle ČSN EN 197-1 ed. 2 (2012), kde jsou uvedeny limity obsahu slínku pro jednotlivé typy cementů. Použitím vysokopecní strusky lze efektivně snížit množství hydratačního tepla, přispět k trvanlivosti ztvrdlého betonu či snížit smrštění (Lee *et al.*, 2006; Crossin, 2015). Některé experimentální práce i praktické zkušenosti upozorňují na sníženou mrazuvzdornost směsí s vysokopecní struskou kvůli zvýšené hutnosti (Osborne, 1999; Deja, 2003; Giergiczny *et al.*, 2009).

Metakaolinu je v posledních letech věnována v oblasti výzkumu značná pozornost, neboť nabízí zajímavé možnosti. Metakaolin je pucolánová příměs vznikající kalcinací křemičito-hlinitého jílu. Teplota kalcinace je závislá na aktuálním složení suroviny, nicméně obecně překračuje 800 °C (Vimmrová *et al.*, 2014; Badogiannis *et al.*, 2015), což je výrazně méně než

při výrobě portlandského slínku (1450 °C). Z tohoto důvodu je metakaolin zařazen mezi ekologická řešení, nicméně je nutné jej považovat už za komerční výrobek. Podobně jako u jiných pucolánů spočívá aktivace metakaolinu v reakci amorfních fází příměsí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vznikající hydratací cementu. Oproti ostatním příměsím je však reakce metakaolinu velice rychlá (Duan *et al.*, 2012; Boháč *et al.*, 2014). Vedle vzniku nerozpustných fází, snížení obsahu portlanditu a pórovitosti metakaolin modifikuje proporce různých produktů hydratace a vytváří nová místa pro nukleaci dalších hydrátů (Barbhuiya *et al.*, 2015).

Mletý vápenec je podle ČSN EN 206+A1 (2018) považován za příměs typu I, tedy za inertní, která přímo nevstupuje do hydratace cementu. Nicméně Matschei *et al.* (2007) popsali dvojí úlohu, kterou má mletý vápenec v systému s portlandským cementem. Vedle fyzikálního efektu, který spočívá v doplnění granulometrie a poskytnutí prostoru pro nukleaci hydrátů, byly popsány i nové produkty hydratace. Mletý vápenec primárně reaguje s hydratovanými hlinitany vápenatými za vzniku monokarbonátu hlinitého, který je jistou analogií monosulfátu hlinitého (AFm) (Poppe & De Schutter, 2005). Vznik této stabilní fáze je spojen se snížením pórovitosti a celkovým utěsněním struktury (Bonavetti *et al.*, 2000; Lothenbach *et al.*, 2008; Ipavec *et al.*, 2010). Mnohem větší význam má tato příměs v ternárních systémech, tedy kdy je portlandský cement modifikován společně s mletým vápencem i další příměsí. Vhodnou kombinací s mletým vápencem lze kompenzovat i některé nedostatky plynoucí z použití popílku, jako jsou např. pomalé náběhy počátečních pevností (Bentz *et al.*, 2012). Celik *et al.* (2014) studoval SCC směsi s vysokými náhradami cementu přírodním pucolánem společně s přídatkem mletého vápence. Bylo prokázáno, že náhradou cementu byla udržena konzistence čerstvé směsi bez nutnosti přidání superplastifikační přísady. Z pohledu dlouhodobých mechanických parametrů byla optimální dávka pucolánu 25 % a vápence 15 % hmotnosti cementu. Nicméně směsi bez mletého vápence, tedy pouze s pucolánem, vykazovaly lepší trvanlivostní parametry. Je však třeba dodat, že použitý pucolán měl výrazně větší specifický povrch. Podobné závěry prezentoval i Boel *et al.* (2006), který analyzoval propustnost betonů na bázi ternárního pojiva. I v této práci je poukázáno na pozitivnější dopad použití pucolánu ve srovnání s mletým vápencem. Ovšem význam vápence je silně závislý na vodním součiniteli; dojde-li ke snížení z 0,46 na 0,40, ternární systém obsahující mletý vápenec společně s pucolánem dosahuje výrazně vyšších trvanlivostních parametrů.

Minerální příměsi poskytují obrovský potenciál pro dosažení zlepšených reologických i mechanických parametrů betonu, nicméně jak plyne z dosud publikovaných prací je klíčovým parametrem při použití těchto materiálů vliv na dlouhodobou trvanlivost. Právě dlouhodobá trvanlivost je optimálním technickým řešením při redukci negativních dopadů stavebnicví, neboť dojde k výrazným úsporám při údržbě či výstavbě nových staveb. Podstatným faktorem je však různorodost jednotlivých příměsí i kolísavost jejich vlastností, které znemožňují zásadní zjednodušení pro technickou praxi. Je to dáno skutečností, že pojem trvanlivosti je značně široký a v různých expozicích se tak může vliv použití příměsí zásadně lišit, a navíc oblast trvanlivosti nelze zcela obsáhnout běžnými zkušebními postupy.

3. Současný přístup a vybrané degradační mechanismy

3.1 Dosavadní přístup při formulaci směsných poživ

Aplikace minerálních příměsí může mít v mnoha případech betonového stavitelství pozitivní dopady na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Použití základních typů aktivních minerálních příměsí do betonu, jakými jsou např. úletový popílek, vysokopecní granulovaná struska, křemičitý úlet, je detailně popsáno v platných předpisech. Obecně je jejich použití spojeno s požadavky na maximální hodnotu vodního součinitele a dávky cementu pro danou expozici. Tento poměrně rigidní přístup tak každé příměsí přisuzuje ekvivalentní hodnotu vůči cementu, jedná se o tzv. *k*-hodnotu. Využití tohoto empirického vztahu při výpočtu vodního součinitele a ekvivalentní dávky cementu je zřejmé z (3.1),

$$w/c = \frac{w}{m_c + k_i \cdot m_p} \quad (3.1)$$

kde *w/c* představuje vodní součinitel, *w* dávku záměsové vody, *m_c* dávku cementu, *m_p* dávku dané příměsí a *k_i* pak *k*-hodnotu pro danou příměs a dané podmínky použití. Limity pro použití tohoto přístupu jsou definovány v ČSN EN 206+A1 (2018), nicméně s ohledem na fluktuaci vlastností jednotlivých příměsí jsou navržené hodnoty značně konzervativní. Např. v případě mleté vysokopecní granulované strusky je předepsána hodnota 0,6, pro úletové popílky pak 0,4 a to pouze ve specifických případech a do náhrady 33 % hmotnosti cementu. Pokud chce dodavatel deklarovat jinou *k*-hodnotu pro svůj produkt, popisuje ČSN EN 206+A1 (2018) rámcový postup pro její stanovení. Nicméně tento postup nebyl v odborné veřejnosti akceptován a při revizi tohoto předpisu v průběhu roku 2020 byla příslušná příloha vyřazena. Z pohledu platné legislativy tak širší uplatnění minerálních příměsí do značné míry zaostává.

Požadavky na trvanlivost betonu jsou dále částečně upraveny podle příslušných resortních předpisů (TKP SPK 18, 2016; TKP SPK 06, 2015; TKP ŘVC ČR, 2017; TKP SSD, 2013), nicméně navazují na ČSN EN 206+A1 (2018). V případě výše uvedených resortních předpisů je např. upraveno množství zkušebních cyklů při stanovení mrazuvzdornosti nebo odolnosti betonového povrchu vůči chemickým rozmrazovacím látkám ve smyslu ČSN 731322 a ČSN 731326, které reflektují náročnost dané expozice a specifika dané oblasti. V případě dlouhodobé trvanlivosti se tak vychází především z primární odolnosti betonu, která je zajištěna použitím jeho vyhovujících složek. Hlavním aspektem při návrhu železobetonových konstrukcí a formulaci betonu je tak vodní součinitel, alternativně upraven dle (3.1) a tloušťka krycí vrstvy zajišťující ochranu zabudované výztuži po dobu plánované životnosti.

3.2 Křemičito-alkalická reakce (ASR)

Křemičito-alkalická reakce (ASR) patří mezi hlavní degradační procesy, které postupně, ovšem silně, poškozují ztvrdlý beton. Poprvé byl tento degradační proces popsán po dlouhodobém monitoringu v roce 1940 T.E. Stantonem (Stanton, 1940a). Podmínky rozvoje ASR jsou dány alkalickým prostředím a přítomností reaktivního kameniva v betonu. V případě použití portlandského cementu je alkalické prostředí způsobeno přítomností Ca(OH)₂, který tvoří přibližně čtvrtinu ze všech hydratačních produktů. Nicméně mnohem důležitějším aspektem je množství alkálií, tedy obsah Na₂O and K₂O (Hewlett, 2004). Takovéto silně alkalické prostředí vede v přítomnosti reaktivního kameniva ke zniku gelu, který dále proniká do

struktury ztvrdlého betonu. Tento proces je doprovázen značným vnitřním pnutím, které vede k celkovému rozvoji trhlin, viz Obr. 3.1. O významu tohoto degradačního procesu svědčí i míra výskytu na současných konstrukcích – dvanáct z patnácti zkoumaných mostních konstrukcí vykazují různou intenzitu poškození vlivem ASR. Obdobná situace je i v případě cementobetonových krytů, hrází apod. (Pertold *et al.*, 2014). Přestože v sousedním Německu už řadu let je důsledně prováděna kontrola vstupních materiálů, přibližně 5 % cementobetonových krytů je tímto degradačním procesem postiženo.



Obr. 3.1 Rozvoj trhlin vlivem ASR na betonovém prvku.

Mezi rizikové zdroje používané jako zdroj kameniva do betonu patří opál (amorfní), chalcedony, tridymit obsažený zejména ve vyvřelinách, mikro- až kryptokrystalický křemen vyskytující se v některých typech rohovců, rulách a kvarcitech. Rizikovými mohou v určitých případech být i některé typy břidlic, fylitů a droby, neboť vedle rizikových minerálů mohou obsahovat i reaktivní karbonáty. Z uvedeného výčtu je patrné, že s ohledem na surovinovou základnu ČR je na našem území riziko výskytu ASR značně vysoké. I z těchto důvodů je tak vlivem pokročilé diagnostické techniky indentikováno riziko ASR prakticky u všech dnes vyráběných betonů. Nicméně míra rizika je stanovována především s ohledem na velikost reaktivních zrn kameniva a jejich zastoupení v dané směsi, viz. Obr. 3.2. Nutnou podmínkou pro rozvoj ASR je i vysoká vlhkost; z pohledu dopravních staveb navíc mohou být významným zdrojem alkálií rozmrazovací prostředky používané během zimní údržby (Thomas, 2011; Reiterman & Keppert, 2020). Zde jsou nejrizikovějšími ty na bázi chloridu sodného, které jsou navíc na našem území preferovány.



Obr. 3.2 Ukázka betonu postiženého ASR.

Úvodní etapa ASR je tvořena reakcí hydroxylových iontů (OH^-) z pórového roztoku a přítomným reaktivním kamenivem. Alkálie zde přispívají k vysoké počáteční koncentraci hydroxylových iontů a později ke vzniku expanzivního gelu (Thomas, 2011). Reakce hydroxidu alkalického kovu a reaktivních minerálů vytváří vrstvu hydratovaného křemičitanu a pod ní vrstvu méně hydratovaného křemičitanu, který je tedy orientován blíže k zrnům reaktivního kameniva. Vnější vrstva přednostně reaguje s ionty Ca^{2+} , což vede ke vzniku pevného křemičitanu vápenatého za současného snížení objemu. Tato vrstva je však propustná pro alkálie, se kterými postupně reaguje vnitřní vrstva a pomalu vytváří gelovitý potah kolem celého reaktivního zrna. Tato vrstva alkalického křemičitanu vápenatého bývá označována jako reakční okraj (Ichakawa, 2009). V této fázi je vznikající gel považován za tekutý (Thomas, 2011). Nicméně řada prací zdůrazňuje, že tento gel není jediným důvodem porušení betonu (Thomas, 2011; Rajabipour *et al.*, 2015; Modrý, 2001). Vznik reakčního okraje předchází detekovanému porušení betonu. Je tak důležité připomenout význam přítomnosti $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve ztvrdlém betonu s ohledem na rozvoj ASR a následující expanzi (Miura & Ichakawa, 1996; Miura, 1997; Kim *et al.*, 2015; Vayghan *et al.*, 2016). Tyto mechanismy byly popsány včetně detailního rozboru ASR gelu v několika experimentálních studiích (Kim *et al.*, 2015; Vayghan *et al.*, 2016). Snížení obsahu portlanditu použitím úletového popílku, metakaolinu, křemičitého úletu, vysokopecní granulované strusky, keramického prachu, mletého perlitu či skla bylo potvrzeno celou řadou studií (Aquino *et al.*, 2001; Shehata & Thomas, 2002; Boddy *et al.*, 2003; Turanli *et al.*, 2003; Bektas *et al.*, 2005). Nicméně myšlenka na snížení rizika vzniku a rozvoje ASR není nová. První doporučení na použití směsných cementů se objevily krátce poté, kdy byl tento jev na betonové konstrukci diagnostikován (Stanton, 1940b). Alkalita pórové vody je dána procesem hydratace a použitým vodním součinitelem; nízký vodní součinitel vede ke zvýšené koncentraci alkálií v pórovém roztoku (Leemann *et al.*, 2011). Náhradou cementu aktivní minerální příměsí lze dosáhnout jistého naředění pórového roztoku, ovšem pouze za předpokladu, že použitá příměs nemá ve srovnání s cementem vyšší obsah alkálií.

Je velmi dobře znám pozitivní dopad použití aktivních minerálních příměsí na snížení permeability betonu, která je ukazatelem dlouhodobé trvanlivosti. Snížená propustnost betonu tak ve vztahu k rozvoji ASR významně blokuje transport vody, která je zásadním faktorem vzniku a rozvoje ASR. Vedle toho však vznikající hydratované křemičitany, hlinitany a hlinito-křemičitany mohou účinně fixovat alkálie a odstraňovat je tak z pórového roztoku (Miura, 1997; Duchesne & Berube, 1994; Shafaatian *et al.*, 2013). Schopnost fixace vykazují především příměsí se zvýšeným obsahem hlinitanů (Chappex & Scrivener, 2012). Z tohoto úhlu pohledu se tak zdají být výhodnější příměsí na bázi jílu, jako třeba metakaolin, mletá keramika či jiné kalcinované jíly (Turanli *et al.*, 2003; Aquino *et al.*, 2001; Rajabipour *et al.*, 2015).

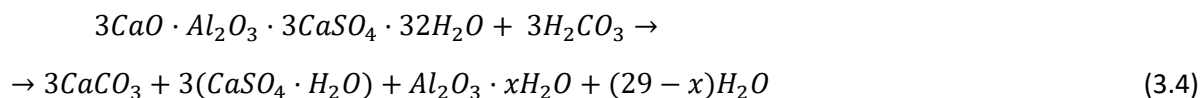
Je zřejmé, že použití aktivních minerálních příměsí nabízí chemickou i fyzikální cestu pro snížení rizika rozvoje ASR. Nicméně s ohledem na dosud publikované práce a výsledky monitoringu stávajících konstrukcí převládá názor, že dominantní podíl ke snížení rizika ASR má právě snížení koncentrace portlanditu ve ztvrdlém betonu (Furnier & Berube, 2000; Ulm *et al.*, 2000; Multon *et al.*, 2008).

3.3 Karbonatace

Železobetonové stavby jsou vystaveny v průběhu své životnosti celé řadě agresivních substancí, které je postupně poškozují. Mezi hlavní degradační činitele patří vzdušný oxid uhličitý způsobující tzv. karbonataci betonu, která je de facto projevem stárnutí betonu (Qiu, 2020). Obvyklý obsah CO_2 ve vzduchu je přibližně 0,03 % objemu, resp. 0,04 % hmotnosti, což představuje cca 60 mg CO_2 na 1 m³ vzduchu. Je třeba podotknout, že v průmyslových oblastech může být koncentrace CO_2 mnohem vyšší. Atmosférický CO_2 proniká do struktury betonu nenasyceným otevřeným pórovým systémem, kde se postupně rozpouští v pórovém roztoku a reaguje s produkty hydratace cementu za vzniku karbonátů (Peter *et al.*, 2008). Tento fyzikálně-chemický proces je řízen zákony difúze; jedná se tak fenomén velice pomalý, nicméně intenzivní. Z pohledu mechanických vlastností nemá karbonatace negativní vliv na ztvrdlý cementový tmel, jeho degradační význam spočívá v riziku koroze zabudované výztuže. Karbonatace postupně snižuje pH pórového roztoku postupnou reakcí s portlanditem; kritickou hodnotou je 9,5, kdy již dochází ke ztrátě ochrany ve formě depasivace výztuže. Tento tenký ochranný film vlivem nízkého pH je poškozen a zabudovaná výztuž je náchylná ke korozi vlivem vlhkosti, kyslíku či pronikajících chloridů. Se vznikem koroze výztuže nastává další riziko spojené se vznikem oxidů železa na povrchu, které se vyznačují vyšším objemem. Jejich vznik je tak doprovázen značným vnitřním pnutím, které často vede k rozvoji trhlin a následně odpadnutí krycí vrstvy betonu. Takovýmto lokálním snížením pasivní ochrany jsou vytvářeny přístupové cesty i pro další agresivní substance. Proces degradace betonu se tak výrazně zrychluje.

Proces karbonatace probíhá v několika časových na sebe navazujících fázích. Nejprve dochází k reakci s portlanditem za vzniku uhličitanu vápenatého, což je doprovázeno i postupným snížením pórovitosti (Groves *et al.*, 1991). U velmi hutných betonů může dojít i ke vzniku bariéry, která další difuzi CO_2 zastaví. Nicméně mechanické parametry betonu se zásadně nemění. S klesajícím pH postupně dochází i k reakci s dalšími hydratačními produkty za vzniku kalcitu, vateritu a především aragonitu. Pro každou fázi karbonatace jsou typické jisté

degradační produkty, ovšem jednotlivé fáze se vzájemně překrývají a závisí na složení betonu. Reakční mechanismy jsou uvedeny v rovnicích (3.2), (3.3) (Papadakis *et al.*, 1991) a (3.4).



Dochází tak k poklesu pH až k hodnotě 8, což vede k rozpadu hydratovaných silikátů i aluminátů, které jsou stabilní pouze v zásaditém prostředí. V Tab. 3.1 jsou uvedeny limitní hodnoty koncentrace vápna pro existenci hlavních minerálů, které přispívají k mechanickým vlastnostem betonu. Rozpad těchto hydrátů je doprovázen poklesem molárního objemu a tedy i postupnou ztrátou soudržnosti (Morandea *et al.*, 2014).

Tab. 3.1: Minimální koncentrace CaO pro existenci vybraných hydratačních produktů cementu (Modrý, 2001)

Minerál	Koncentrace roztoku (g CaO/l)	Přibližná hodnota pH
2CaO·SiO ₂ ·nH ₂ O	Saturovaný roztok	12,4
3CaO·2SiO ₂ ·nH ₂ O	1,10	10,3
CaO·SiO ₂ ·nH ₂ O	0,05	8,5
4CaO·Al ₂ O ₃ ·19H ₂ O	1,15	10,4
3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O	0,315 – 1,15	8,3 – 10,4
2CaO·Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O	0,17 – 0,315	8,0 – 8,3
4CaO·Fe ₂ O ₃ ·nH ₂ O	1,06	10,2
CaO·Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O	1,06 – 0,64	10,2 – 9,2

Průběh karbonatace atmosférickým CO₂ je však zásadním způsobem vázán na přítomnost vlhkosti. Nejrychleji karbonatace probíhá v rozmezí 75 – 92 %, naopak při vlhkosti pod 30 % či plném nasycení vodou karbonatace neprobíhá. Na průběh karbonatace mají vliv i další aspekty, které úzce souvisí s danou expozicí. Patrné je to zejména v případě přítomnosti chloridů (Han *et al.*, 2013), které zpomalují postup karbonatace, což bylo pozorováno v přímořských oblastech (Castro *et al.*, 2000; Samimi *et al.*, 2018). Je to však dáno obecně vyšší vlhkostí v těchto oblastech a hygroskopicitou chloridů.

Průběh karbonatace lze sledovat na základě pH pórového roztoku, ovšem tato měření jsou nejednoznačná. Je to dáno tím, že ve ztvrdlé cementové pastě je obsaženo velké množství dosud nezhydratovaných slínekových minerálů, které při přípravě vzorku mohou výsledek testu negativně ovlivnit. V technické i vědecké praxi se proto ustálila detekce za použití roztoku fenolftaleinu v alkoholu, který indikuje hranici karbonatační fronty pro pH přibližně 9,0. Zakotvení tohoto jednoduchého testu je dáno jeho použitím při diagnostice staveb během stanovení orientační pevnosti v tlaku pomocí Schmidtova kladívka, kdy je předepsáno odstranit zkarbonatovanou část před vlastním měřením. Nicméně nespornou výhodou je i skutečnost, že tento test indikuje kritickou hranici pH s ohledem na korozi výztuže. Na základě

hloubky karbonatační fronty, která vychází z uvedeného kolorimetrického měření, je odvozena celá řada prediktivních modelů (Papadakis *et al.*, 1991; Khunthongkeaw *et al.*, 2006; Wang & Lee, 2009; Zhang *et al.*, 2013). Nicméně nejčastěji je používána formulace uvedená v (3.5), z níž vychází i model používaný v doporučeních společnosti *fib* (Schiessl *et al.*, 2006; Guiglia & Taliano, 2013), kde K značí koeficient karbonatce, jehož velikost reflektuje transportní vlastnosti betonu, x (mm) hloubku karbonatační fronty a t čas (rok).

$$x = K\sqrt{t} \quad (3.5)$$

Přestože proces karbonatce betonu je jedním z přirozených procesů, které v betonu probíhají, tato oblast nebyla dosud uspokojivě vyřešena. Řada uvedených modelů zohledňuje i reakční potenciál daného betonu, ovšem s ohledem na měnící se pórovitost a komplikovaný stav nasycení kapilárního systému jsou tyto predikce značně nespolehlivé, zejména pro dlouhodobý odhad (Duprat *et al.*, 2014).

V souvislosti s potlačením rozvoje karbonatce patří mezi základní opatření délka ošetřování, která má i dlouhodobý charakter (Atis, 2003; Zhao *et al.*, 2016). Je to způsobeno vytvořením jemnější struktury hydrátů, která zajistí snížení otevřené pórovitosti. Navíc vlivem ošetřování a probíhající hydratace dojde ke zvýšenému obsahu fyzikálně vázané vody (Rahimi-Aghdam *et al.*, 2019), která postup karbonatce efektivně blokuje. Ovšem dlouhodobý kontakt s vodou může být na závadu s ohledem na riziko vyluhování portlanditu (Isgor & Razaqpur, 2004).

Ošetřování betonu má značný význam především při použití minerálních příměsí, jejichž hydratace je ve srovnání s běžným portlandským cementem pomalejší (Younsi *et al.*, 2013). Vliv minerálních příměsí je však protichůdný. Na jedné straně svou postupnou hydratací snižují množství portlanditu, čímž dochází ke snížení pH a tedy i ke zvýšení karbonatační rychlosti. Na druhé straně se však vznikající hydráty významnou měrou podílejí na snižování permeability, čímž blokují průnik atmosférického oxidu uhličitého do betonu (Massana *et al.*, 2018). Hydratace aktivních příměsí je závislá na přítomnosti vody v pórovém systému. Právě nesplnění této podmínky způsobuje zejména u vysokých dávek příměsí sníženou odolnost vůči karbonatci. Vliv stupně hydratace na výslednou odolnost výstižně popsal Roziere *et al.* (2009). Sérii vzorků s přídatkem vystavili akcelerované karbonatační zkoušce, kdy část vzorků byla po dosažení 50 % pevnosti dle pevnostní třídy uchovávána mimo vodní lázeň, druhá část vzorků byla 28 uložena ve vodním prostředí. Výsledek zkoušky je uveden na Obr. 3.3, kde spodní řada vzorků představuje druhou sadu – 28 dní ve vodním lázni.



Obr. 3.3: Výsledky karbonatační zkoušky pro vzorky s popílkem pro různé režimy ošetřování (Roziere *et al.*, 2009).

Na druhou stranu i výrazně prodloužené ošetřování v případě vysokých dávek aktivních příměsí nemusí přinést dostatečnou ochranu vůči karbonataci jak dokumentuje výzkum Gruyaert *et al.* (2013b). Z pohledu karbonatace se vysoké dávky příměsí nejeví efektivně ani z důvodu environmentálních, kdy takto koncipované směsi vedou ke snížení životnosti (Pacheco-Torgal *et al.*, 2012; Van den Heede & De Belie, 2014). Tímto ovšem není snižován význam minerálních příměsí, což dobře deklaruje předchozí výzkum zaměřený na trvanlivostní parametry betonů s recyklovaným kamenivem (Kubissa *et al.*, 2017). V realizovaném programu bylo použitím křemičitého úletu či metakaolinu dosaženo srovnatelných výsledků karbonatační zkoušky i přes zvýšenou dávku záměsové vody z důvodu zachování zpracovatelnosti. Při vhodném dávkování tedy může použití minerální příměsí vykompenzovat negativní vlastnosti recyklovaného kameniva, které použití tohoto materiálu přináší (Silva *et al.*, 2015). Nicméně při současném působení chloridů jsou směsi s vyššími dávkami aktivních příměsí náchylnější k přenosu chloridů do zatím nekarbonatové části betonu vlivem rozpadu sekundárních hydrátů, které v první fázi chloridy zafixovaly (Ye *et al.*, 2016).

4. Smrštění betonu

4.1 Základní příčiny smrštění betonu

Při návrhu konstrukcí z betonu je nutné brát v úvahu vedle mechanických parametrů především jeho trvanlivost. V této široké oblasti hraje důležitou roli smrštění, které je nedílnou součástí technologie betonu. Tento faktor totiž může vést ke vzniku trhlin, které zásadně zvyšují transport agresivních látek do betonu a snižují tak životnost celého díla (Wang *et al.*, 1997; Aitcin, 2000; Holt & Leivo, 2004).

Základním důvodem objemových změn betonu je hydratace pojiva na bázi portlandského cementu, která je doprovázena smrštěním (Yodsuddjai & Wang, 2013). Hydratační produkty cementu se totiž vyznačují nižším molárním objemem v porovnání s původními složkami. Díky tomu lze dobře odhadovat tzv. chemické smrštění na základě znalosti přesného složení pojiva (Bullard *et al.*, 2011; Davidová & Reiterman, 2019). Souvisejícím fenoménem je pak i množství hydratačního tepla, které zejména v případě masivních konstrukcí může být příčinou značných poruch. V Tab. 4.1 jsou uvedeny experimentálně stanovené hodnoty objemových změn pro jednotlivé slínkové minerály.

Tab. 4.1: Vybrané vlastnosti slínkových minerálů.

Slínkové minerály	Hydratační teplo (kJ/kg)	Chemické smrštění (cm ³ /g) (Paulini, 1994)	Chemické smrštění (cm ³ /g) (Yodsudjai & Wang, 2013)
C ₃ S 3CaO·SiO ₂	500	0,0532	0,0704
C ₂ S 2CaO·SiO ₂	250	0,0400	0,0724
C ₃ A 3CaO·Al ₂ O ₃	910	0,1113	0,115
C ₄ AF 4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	420	0,1785	0,086

Eliminace negativních projevů při hydrataci portlandského cementu byla jednou z hlavních motivací pro používání směsných pojiv, tedy náhradu cementu minerální příměsí (Van den Heede *et al.*, 2013). S ohledem na technologii betonu a provádění staveb má významné místo smrštění od vysychání. Dochází k němu po uložení betonu, kdy ztrátou vody dochází ke snížení objemu. Z tohoto důvodu mezi základní opatření při výstavbě patří kroky k zamezení náhlé ztráty vlhkosti. Kritickými faktory je především účinek větru a slunečních paprsků (Vinkler & Vítek, 2019). Vnější projev smrštění od vysychání je vznik trhlin, Obr. 4.1. V tomto případě byl beton uložený v bedně chráněn nadměrné ztrátě vlhkosti pouze na bočních stranách; horní povrch byl vystaven velmi suchému prostředí, což vedlo ke vzniku trhliny. V případě nežádoucích podmínek může být tento jev umocněn ještě objemovými změnami vlivem vývinu hydratačního tepla a nerovnoměrného ochlazování.



Obr. 4.1: Důsledek smrštění od vysychání.

V případě vyztužené konstrukce nepravidelného průřezu se uplatňují ještě další vlivy detailně popsané v práci Kayondo *et al.* (2019). V případě exponovaných konstrukcí, u nichž je požadavek na mrazuvzdornost pak zásadní vliv hraje i míra provzdušnění, které zásadním způsobem mění charakter pórového systému a komplikuje i použití standardních měřících postupů. Piasta a Sikora (2015) studovali vliv provzdušnění na smrštění betonů s obsahem minerálních příměsí. Množství použité příměsi bylo dáno typem použitého cementu. V tomto výzkumu byl potvrzen negativní vliv provzdušnění na dosažené smrštění, které bylo stanovováno tradiční kontaktní metodou bez ohledu na typ použitého cementu. Na druhou stranu směsná pojiva vykazovala nižší smrštění oproti referenční směsi. V tomto výzkumu byl navíc dokumentován i spojitý charakter pórového systému provzdušněných betonů.

Smrštění betonu je komplexní proces zahrnující více jevů, což je zohledněno i na úrovni Eurokódu 2 (2018), avšak odvozené vztahy vykazují shodu zejména pro tradiční vibrované směsi. Ovšem u moderních betonů, které se vyznačují vynikající zpracovatelností a vysokými dávkami minerálních příměsí, naráží tento přístup na své limity. Oliveira *et al.* (2017) provedl soubor zkoušek samozhutnitelných betonů různých pevnostních tříd, který potvrdil, že doporučené postupy pro odhad celkového smrštění dle Eurokódu 2 (2018) podhodnocují autogenní smrštění, což je dáno vyšším podílem jemných částic i pojiva ve směsi, na druhou stranu zároveň nadhodnocují hodnoty smrštění od vysychání. V konečném důsledku se tyto jevy vzájemně kompenzují, je však evidentní, že pro moderní směsi jsou současné postupy zastaralé.

Itim *et al.* (2011) provedli výzkum zaměřený na smrštění při použití vybraných minerálních příměsí a to v autogenních podmínkách i při vysychání. Zatímco náhrada cementu mletým vápencem vykazovala podobné hodnoty jako referenční směs, použitím aktivních příměsí, zejména vysokopecní strusky, došlo k výraznému poklesu smrštění autogenního i od vysychání úměrně s náhradou cementu. Dosažené hodnoty smrštění vykazovaly lineární závislost s aktuální pevností v tlaku, což koresponduje s přístupem dle Eurokódu 2 (2018). Odlišné výsledky byly dosaženy v práci Hu *et al.* (2017), které potvrdily u směsných i ternárních pojiv vyšší tendenci ke smrštění od vysychání vzhledem k referenční směsi. Je to dáno pomalejším procesem vytvrzování u směsných pojiv, který přispívá k vyšší propustnosti vytvrzované směsi a tedy i vyšší ztrátě vlhkosti vedoucí ke značnému smrštění od vysychání. Na druhou stranu v případě použití minerálních příměsí směsi vykazují menší tendenci k rozvoji trhlin při vázaném smrštění, což bylo potvrzeno i v předchozím výzkumu (Šmilauer & Reiterman, 2020), kdy směsi s pomalejším vytvrzováním vykazují sice vyšší smrštění od vysychání, ale díky stále běžícímu procesu hydratace vykazují nižší tendenci ke vzniku trhlin při vázaném smrštění.

Zjevný nedostatek spočívá i v používaných měřících postupech, kdy vlastní měření je zahájeno až po 24 hodinách, kdy lze se zkušebními tělesy manipulovat. Uvážíme-li hlavní složky smrštění – autogenní a vysychání, je evidentní, že zahájení vlastního měření může u rychlovazných pojiv nadhodnocovat dosažený výsledek, neboť do výsledného smrštění nebude započtena podstatná část autogenního smrštění proběhlého během prvních 24 hodin. Právě na tuto skutečnost byl zaměřen experimentální program, kdy byly použity různé typy cementů včetně těch směsných (Davidová & Reiterman, 2020).

4.2 Experimentální program

Pro měření byly použity vybrané typy tuzemských cementů, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 4.2. Z těchto cementů byly vyrobeny sady zkušebních malt s w/c 0,45. Pro výrobu zkušebních malt byly použity standardní CEN písky předepsané granulometrie v souladu s ČSN EN 196-1 (2005), kdy poměr pojiva a písku odpovídá 1:3. Z těchto malt byly následně vyrobeny zkušební trámce 20×20×100 mm pro měření smrštění a standardní trámce 40×40×160 mm pro stanovení mechanických parametrů. Zkušební trámce pro měření smrštění byly ošetřovány za různých podmínek – první sada vzorků byla po 24 hodinách vystavena normálním laboratorním podmínkám, zbytek vzorků byl po 24 hodinách uložen do vody. Nicméně po třech dnech byla část vzorku z vodní lázně vyjmuta a dále byla ošetřována v normálním laboratorním prostředí. Cílem bylo mimo jiné i posoudit vliv prodlouženého ošetřování.

Tab. 4.2: Vlastnosti zkušebních cementů.

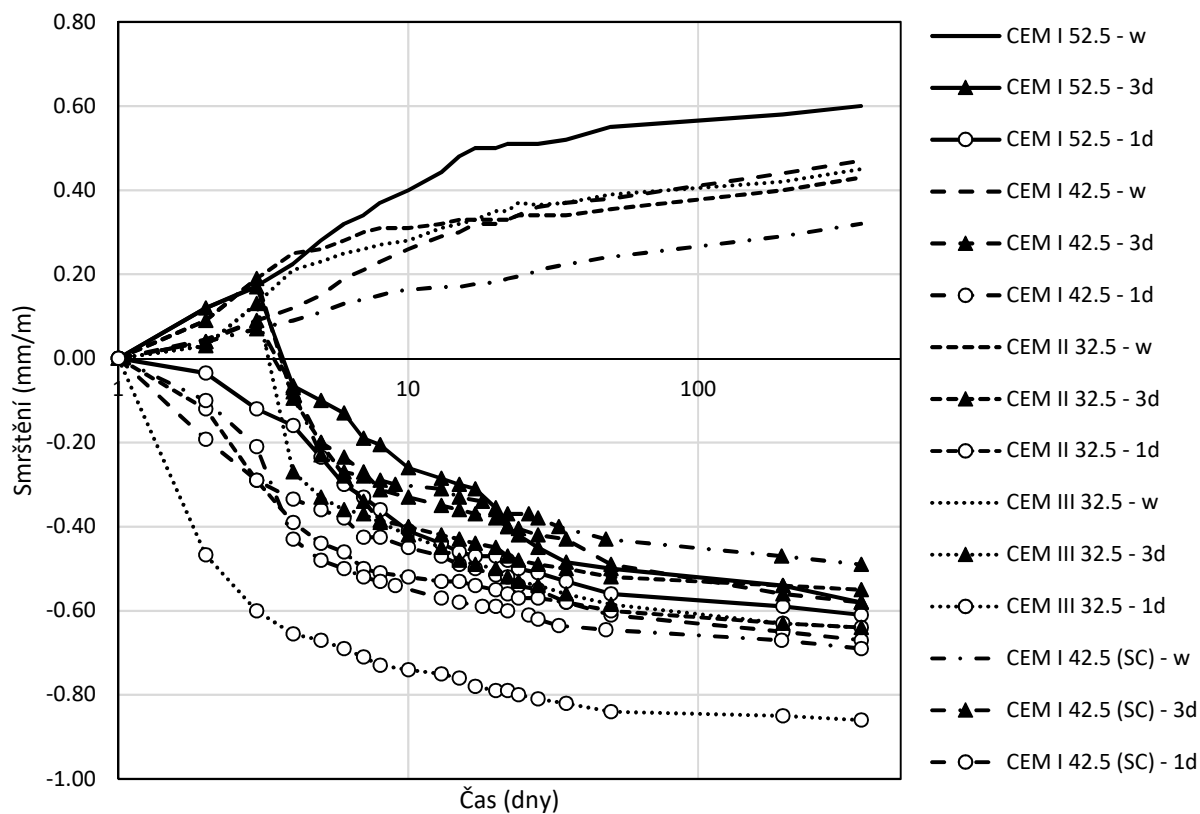
	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	LOI (%)	Blaine (m ² /kg)
CEM I 52.5	63,5	20,3	4,8	3,4	1,5	3,1	0,8	0,2	1,6	509
CEM I 42.5	61,2	21,7	5,7	3,2	2,6	2,9	0,8	0,3	1,3	351
CEM II/B-S 32.5	50,5	27,2	7,9	2,7	3,8	2,9	0,8	0,4	1,1	345
CEM III 32.5	44,3	32,1	7,8	1,4	6,1	3,0	0,7	0,6	1,0	378
CEM I 42.5 (SC)	63,8	20,6	4,8	3,4	1,4	3,2	0,7	0,2	1,4	311

Jelikož zkoumané cementy vykazují odlišnou kinetiku hydratace, bylo do měření zahrnuto i stanovení stupně hydratace pomocí termální analýzy. Pro tato měření byla vyrobena zkušební tělesa z cementových past s totožným vodním součinitelem jako v případě malt. Stupeň hydratace byl stanoven na základě obsahu chemicky vázané vody (H_{hyd}) podle (4.1), kde w_{105} a w_{450} představují hmotnost vzorku při dané teplotě.

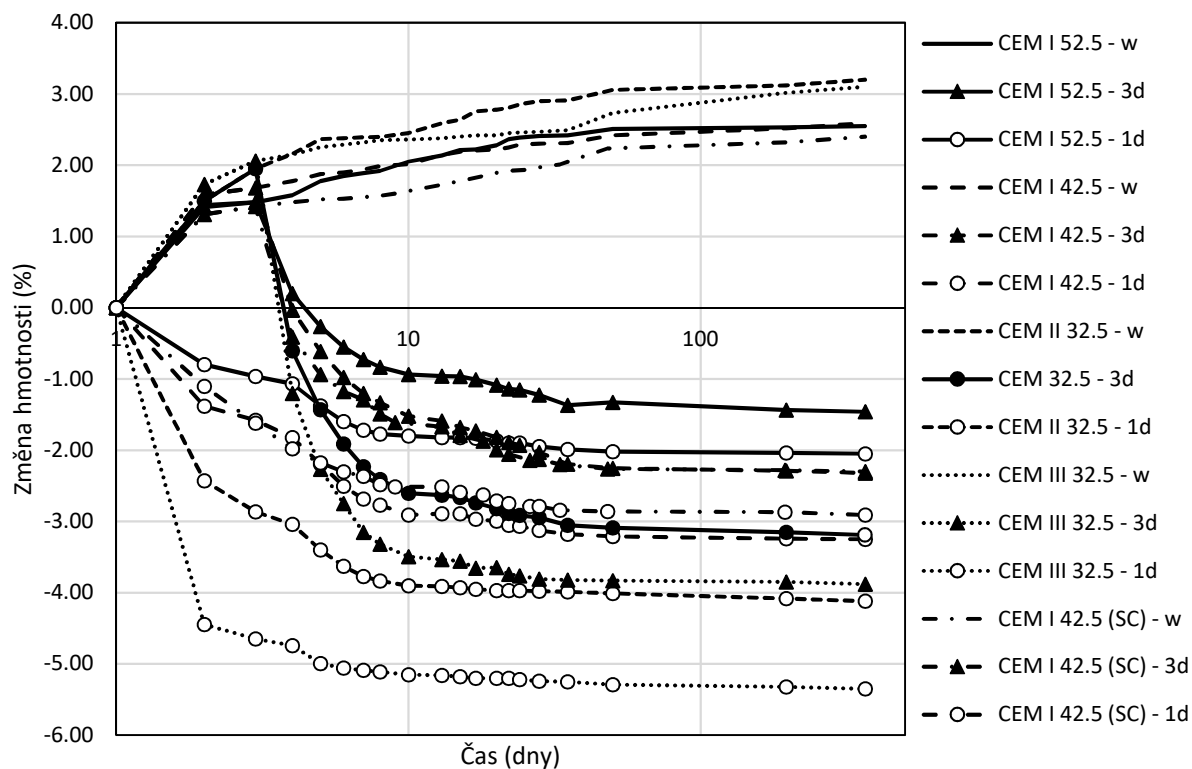
$$H_{hyd} = \frac{w_{105} - w_{450}}{w_{105}} \quad (4.1)$$

4.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze

Dosažené hodnoty smrštění v tomto programu jsou uvedeny v logaritmickém měřítku na Obr. 4.2, kde je zřejmé, že režim ošetřování měl na vývoj smrštění značný vliv. Vzorky uložené trvale ve vodní lázni (w) vykazovaly postupnou expanzi, což koresponduje se závěry, které publikoval Rasoolinejad *et al.* (2019). V této práci je podrobně vysvětlen mechanismus fixace vody v kapilárních pórech v průběhu hydratace cementu. Výsledky smrštění velmi dobře korespondovaly se změnami hmotnosti zkušebních trámů, což je evidentní na Obr. 4.3. V daném programu velice dobrých výsledků dosáhl silniční cement (sc). Na druhou stranu cementy směsné při tomto uspořádání zkoušky vykazovaly značnou tendenci ke ztrátě vlhkosti, což se projevilo i značným smrštěním. Bohužel tento přístup byl v minulých letech promítnut i do národních předpisů, které při výstavbě cementobetonových krytů předepisují použití čistých portlandských cementů. Nicméně na tuto problematiku je třeba pohlížet z širší perspektivy.

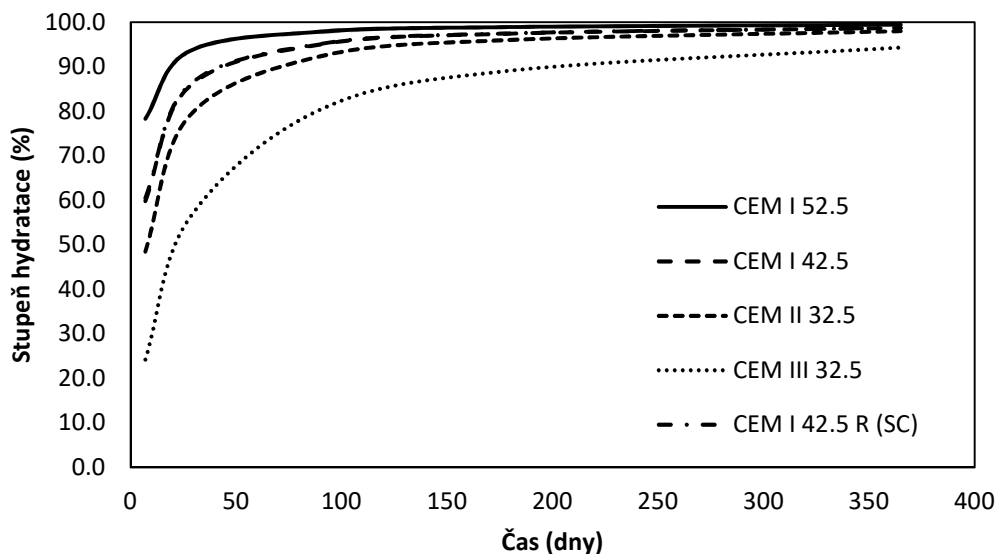


Obr. 4.2: Smrštění zkušebních malt.



Obr. 4.3: Ztráta hmotnosti zkušebních malt.

Na Obr. 4.4 je na základě stanovených hodnot chemicky vázané vody znázorněn průběh hydratace v průběhu 365 dní. Je evidentní, že jednotlivé cementy mají v tomto ohledu značně odlišné parametry, které se naplno projeví právě při vysychání, které je řízeno difúzí. Proto směsi s pomalým náběhem mechanických parametrů vlhkost ztrácí velmi rychle, neboť ještě není vázána dostatečnými kapilárními silami (Holt & Leivo, 2004). Závislost chemicky vázané vody v hydrátech je znázorněna na Obr. 4.5.

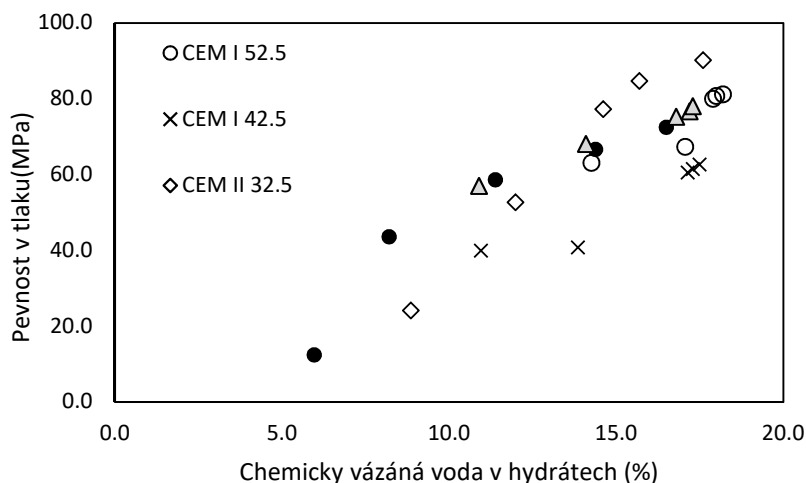


Obr. 4.4: Odhad procesu hydratace zkušebních past na základě termogravimetrického stanovení chemicky vázané vody.

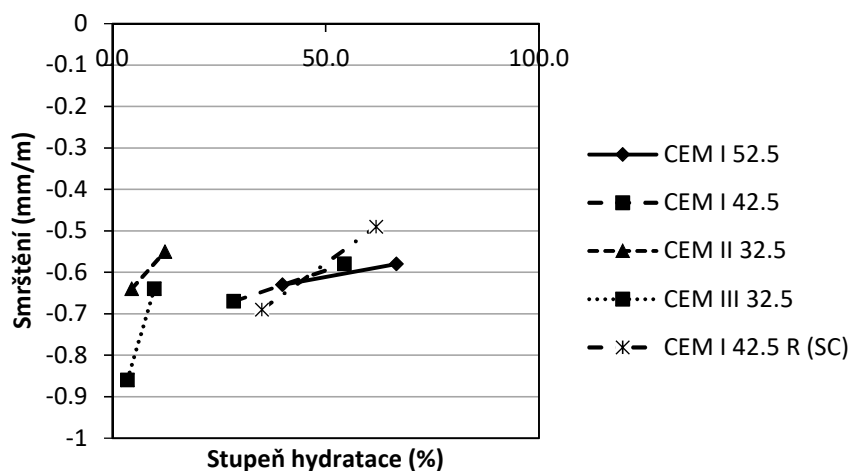
Stanovené hodnoty obsahu chemicky vázané vody rovněž dobře korespondovaly s vývojem mechanických parametrů. Pro lepší přehled jsou hodnoty stupně hydratace pro stáří, kdy byly vzorky vystaveny vysychání, uvedeny v Tab. 4.3. Na druhou stranu prodloužené ošetřování mělo v případě směsných cementů velmi pozitivní dopad, neboť došlo k velmi rychlému snížení konečného smrštění. Význam ošetřování pak dobře ilustruje Obr. 4.6, kde je znázorněno konečné smrštění v závislosti na stupni hydratace v čase, kdy je vzorek vystaven vysychání.

Tab. 4.3: Stupeň hydratace zkušebních past po 1 a 3 dnech.

	Stupeň hydratace (%)	
	1 d	3 d
CEM I 52,5	39,9	66,5
CEM I 42,5	28,4	54,4
CEM II 32,5	4,5	12,3
CEM III 32,5	3,5	9,8
CEM I 42,5 (SC)	35,0	61,8

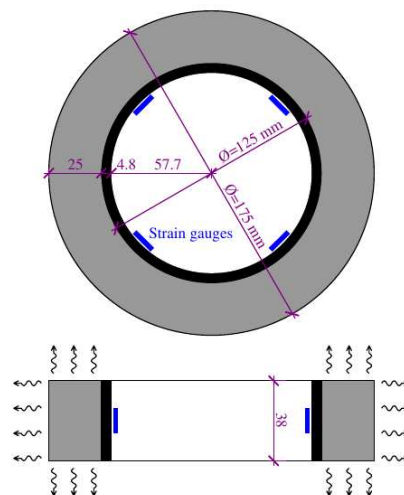


Obr. 4.5: Závislost pevnosti v tlaku a chemicky vázané vody v hydrátech.

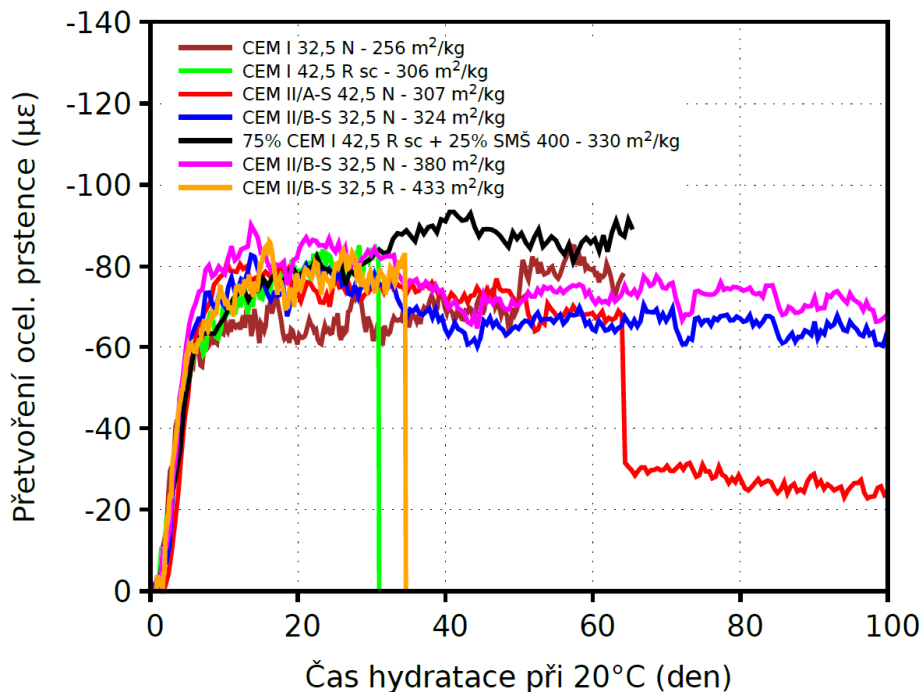


Obr. 4.6: Vliv stupně hydratace při vysychání na konečné smrštění.

Pomalá hydratace směsných cementů má pozitivní dopad na odolnost vůči vzniku trhlin, neboť probíhající hydratace umožňuje překlenout vznikající deformace. Naproti tomu cementy s rychlým náběhem pevností vykazují při kritickém zatížení křehké porušení. Tyto poznatky potvrzují i dosavadní testy probíhající v souvislosti s návrhem na revizi normy ČSN EN 13877-1 (2013). Za tímto účelem byla do posuzování vhodnosti výběru pojiva zařazena zkouška vázaného smrštění, viz. Obr. 4.7. Při této zkoušce je prstavec zkušební malty vystaven po 24 hodinách volnému vysychání za současného monitoringu deformance na vnitřní části ocelového prstence, který brání smrštění. Po překročení pevnosti v tahu vlivem smrštění dochází ke skokovému poklesu napětí v ocelovém prstenci, což je zaznamenáno dvěma páry tenzometrů a měřící ústřednou.



Obr. 4.7: Schéma smršťovacího kroužku.



Obr. 4.8: Záznam zkoušky vázaného smrštění.

V literatuře lze narazit na různé geometrie prstenců i vlastního měřeného vzorku, případně i režimu vysychání, nicméně použité uspořádání odpovídá sestavě, kterou použili Carlson & Reading (1988). Výstupem zkoušky je pak čas do vzniku trhliny. Ten se může lišit v závislosti na uspořádání zkoušky. Dosavadní výsledky zkoušek potvrzují vhodnost směsných pojiv pro použití při výstavbě cementobetonových krytů, viz. Obr. 4.8.

Smrštění od vysychání je komplexní problém, pro jehož posouzení je nutné využít i netradiční testy, pro které není dosud opora v jakémkoli předpisu či normě. Z představených výsledků je evidentní, že současně používané přístupy značně podhodnocují technicky vhodnější řešení; navíc doporučují výběr pojiva, které není s ohledem na dlouhodobou trvanlivost výhodné. Při hlubší analýze tohoto problému tak jasně plyne vhodnost směsných pojivových systémů.

5. Mrazuvzdornost betonu

5.1 Způsob porušení betonu při působení mrazu

Mrazuvzdornost betonu je velice důležitá vlastnost v inženýrské praxi, neboť zásadním způsobem ovlivňuje životnost stavebního díla. Poškození betonu vlivem mrazu je způsobováno především expanzí adsorbované vody, klesne-li teplota pod bod mrazu a začne-li se ve vnitřní struktuře betonu tvořit led. Expanze vody činí přibližně 9 % (Yazici, 2008; Wang *et al.*, 2017). Vnitřní napětí způsobuje strukturní porušení a rozvoj trhlin, čímž postup destrukce zásadně akceleruje. Osvědčeným způsobem pro potlačení negativního vlivu mrazu je provzdušnění betonové směsi, tedy cílené vnesení vzduchových bublin, které po vytvrdnutí betonu vytvoří prostor pro expanzi ledu. Pro dosažení dobré mrazuvzdornosti je vyžadováno provzdušnění okolo 5 %, nicméně vlastní údaj o obsahu vzduchu není dostatečný, neboť je třeba zohlednit prostorové rozložení pórů, tzv. *spacing factor* (Coussy & Monteiro, 2008; Setzer & Auberg, 2006). Optimální průměr póru je cca 300 μm . Řízené provzdušnění betonu má však negativní dopad na mechanické vlastnosti, kdy tak dojde ke snížení přibližně o jednu pevnostní třídu. Existují však i alternativní způsoby provzdušnění, např. použitím gumového granulátu, který ve směsi betonu vytváří totožný efekt (Hora & Reiterman, 2016). Tento nedostatek tak musí být kompenzován dalšími kroky, jakými jsou zejména zvýšení dávky cementu či snížení dávky vody, které ve výsledku vedou ke zvýšení pevnosti v tlaku. To má však negativní dopad na smrštění a riziko vzniku trhlin. Významnou roli hraje aktuální úroveň nasycení betonu, tedy množství adsorbované vody. Z tohoto důvodu, dnes již neplatná národní norma ČSN 73 1325 (1972), popisovala indikativní hodnoty mrazuvzdornosti na základě povrchové nasákavosti. Jako maximální hodnoty po 10 a 1440 minutách byly stanoveny 2,5 a 6,5 %. Tento předpoklad však spolehlivě platí pouze pro směsi bez chemických přísad. Jak prokázal dřívější výzkum, který byl zaměřen na použití metakaolinu, se zvyšující se náhradou cementu narůstala i povrchová nasákavost, přesto výsledná mrazuvzdornost měla zcela opačný trend (Reiterman, 2018). Tento fenomén je způsoben tím, že při porušení mrazem se uplatňují ještě další mechanismy.

Jedním z nich je charakter pórového systému, který zásadně ovlivňuje chování ztvrdlého betonu při účinku nízkých teplot (Claisse, 2014). Adsorbovaná voda je fyzikálně vázána

v kapilárních pórech silami, jež jsou nepřímo úměrné jejich průměru (Powers, 1949; Jackson & Chalmers, 1958). Expandující led tak zvyšuje hydraulický tlak a může dojít k porušení (Sun & Scherer, 2010; Liu *et al.* 2014a). Z tohoto důvodu na základě Powersovy teorie existuje řada numerických modelů (Bazant *et al.*, 1988; Coussy & Monteiro, 2008; Liu *et al.*, 2014b; Setzer, 2001). Nicméně tento proces je přímo úměrný rychlosti poklesu teploty (Sun & Scherer, 2010; Zhou a& Li, 2012). Vznikající led navíc může interagovat se stěnami kapilár. Z tohoto pohledu je tak provzdušnění výhodné i v tom, že nukleace krystalů ledu probíhá v oblastech nejnižšího hydraulického tlaku (Sun & Scherer, 2010), tedy ve vytvořených bublinách. Slabinou Powersovy teorie je skutečnost, že nebere v úvahu objemové změny, které v betonu probíhají vlivem změn teplot.

Vedle fyzikálně, tzv. volně, vázané vody tak hraje důležitou roli i voda chemicky vázaná v hydratačních produktech. Jak již bylo uvedeno výše, smrštění doprovázející pokles teploty zvyšuje hydraulický tlak, tato situace se může výrazně zhoršovat s přibývajícím počtem zatěžovacích cyklů. Za předpokladu použití dostatečně mrazuvzdorného kameniva, je tak odezva betonu na účinek nízkých teplot řízena výhradně pojivovým systémem. Balapour *et al.* (2018) provedl rozsáhlou rešerši na porovnání nano-siliky a ostatních minerálních příměsí ve smyslu vybraných technických vlastností. Prokázal, že odolnost betonu vůči cyklickému zmrazování je přímo úměrná obsahu nerozpustných hydrátů v cementové pastě. Podobné závěry formulovali i Behfarnia a Salemi (2013), kteří popsali pozitivní dopad Al_2O_3 . Je zřejmé, že smrštění vlivem nízkých teplot, expanze ledu a povaha pojivového systému působí synergicky a je obtížné posoudit některý z těchto faktorů samostatně. Komplexnost mrazuvzdornosti potvrdil i dřívější výzkum probíhající na maltách (Reiterman *et al.*, 2019).

5.2 Experimentální program

V realizovaném programu (Reiterman *et al.*, 2019) byly vyrobeny série zkušebních malt, u nichž byla postupně zvyšována náhrada cementu vybranými příměsemi – úletovým popílkem, mletým keramickým střepelem a mletou vysokopepni granulovanou struskou. Pro výrobu malt bylo použito čisté křemičité kamenivo frakcí 0,063 – 4,0 mm, portlandský cement CEM I 52,5 R. Jednotlivé směsi měly konstantní konzistenci, která byla regulována dávkou záměsové vody. Konzistence všech směsí odpovídala dle rozlivové zkoušky 135 mm (ČSN EN 1015-3, 2000). Obsah vzduchu v čerstvé směsi byl kontrolován pomocí tlakové zkoušky (ČSN EN 12350-7, 2009) s ohledem na plánované zkoušky mrazuvzdornosti. Náhrady minerálními příměsemi byly prováděny po 12,5 % až do maximální náhrady 50,0 % pro každou příměs. Společně s maltovými vzorky byly vyráběny vzorky past, tedy směsi pojiva a vody, kdy dávka vody odpovídala dávce vody v maltě. Vzorky past byly použity pro monitoring obsahu chemicky vázané vody v hydrátech H_{hyd} v čase. Vzorky past byly uchovávány ve vodním prostředí. Množství chemicky vázané vody probíhalo pomocí termální analýzy na základě rozpadu past v daných teplotních pásmech. Tato metodika vychází z experimentálních prací (De Weerd *et al.*, 2011; Bílek *et al.*, 2015). Chemicky vázaná voda (H) a množství portlanditu (CH) byly vyjádřeny vzhledem k suchému vzorku dle (5.1), (5.2) a (5.3).

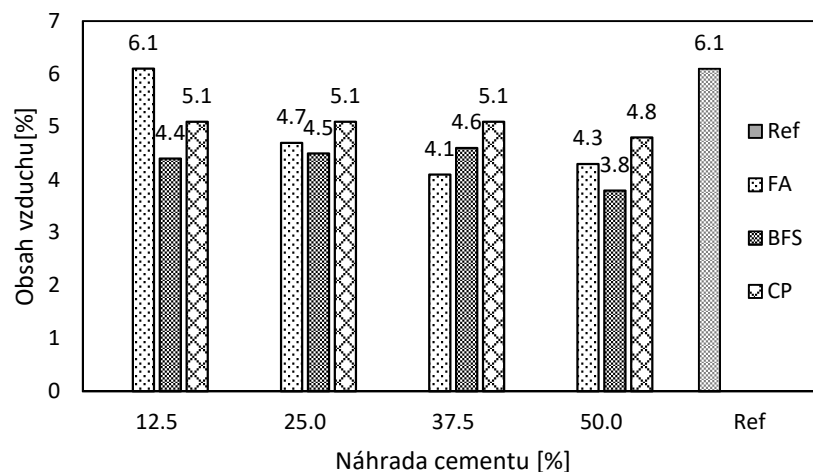
$$H = \frac{W_{105} - W_{550}}{W_{550}} \quad (5.1)$$

$$CH = \frac{w_{450} - w_{550}}{w_{550}} \cdot \frac{74}{18} \quad (5.2)$$

$$H_{hyd} = H - H_{CH} \quad (5.3)$$

5.3 Výsledky

Výsledky tohoto programu potvrdily zásadní vliv minerálních příměsí na vlastnosti čerstvé směsi, především pak obsahu vzduchu, jak je patrné z Obr. 5.1. Kromě směsi s popílkem s nejnižší aplikovanou náhradou vykázaly všechny ostatní směsi výrazně nižší obsah vzduchu, což se zdá z pohledu mrazuvzdornosti poměrně nevýhodné. Tento efekt je pravděpodobně způsoben zlepšením granulometrie a tedy lepším vyplnění mezizrnečného prostoru. Hlavní náplní programu však bylo posouzení mrazuvzdornosti jednotlivých malt; detailní výsledky mechanických zkoušek pro různá stáří a množství zmrazovacích cyklů jsou uvedeny v Tab. 5.1. Zkoušení probíhalo podle ČSN 731322 (2003), kdy bylo poškození zkušebních těles monitorováno i nedestruktivně dle ČSN 731371 (2005).



Obr. 5.1: Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%].

Výsledky potvrzují rychlý vývoj mechanických parametrů v případě referenční směsi, což je dáno typem použitého cementu. Na druhou stranu, použitím popílku bylo z dlouhodobého hlediska dosaženo prakticky totožných parametrů. Hodnoty mechanických parametrů byly v případě popílku srovnatelné s referenční směsí po 28 dnech pouze pro směs s nejnižší použitou náhradou popílkem, tedy 12,5 %. Po 90 dnech pak úroveň referenční směsi dosáhla i směs s náhradou 25 %. Jelikož dalším zvýšením náhrady nedošlo k výraznějšímu zlepšení mechanických parametrů, zdá se tato dávka popílku jako optimální.

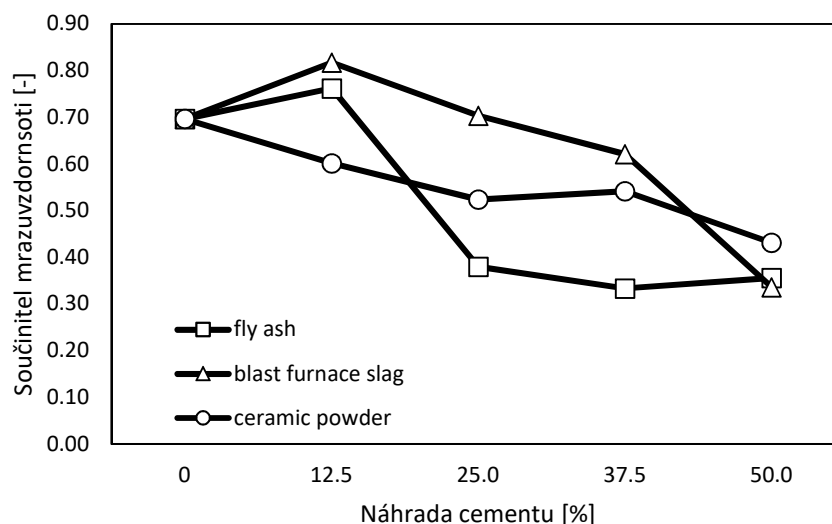
V případě použití vysokopecní strusky nedošlo v průběhu času k výraznějšímu nárůstu mechanických parametrů, které byly celkově nižší. Směsi s touto příměsí však vykazovaly výrazně vyšší pevnosti v tahu ohybem, oproti ostatním směsím. Náhrada cihelným prachem vedla k systematickému snížení mechanických parametrů, což bylo způsobeno výrazně vyššími dávkami záměsové vody z důvodu konstantní zpracovatelnosti. Směs s nejvyšší použitou náhradou (50 %) vykázala po 90 dnech přibližně poloviční hodnoty mechanických parametrů.

Celkově byl nárůst pevností v čase zanedbatelný. Na druhou stranu byly dosažené hodnoty velice podobné těm při použití vysokopecní strusky.

Tab. 5.1: Detailní výsledky mechanických vlastností během zkoušek mrazuvzdornosti.

stáří	Směs	Pevnost v ohybu [MPa]			Pevnost v tlaku [MPa]			Dynamický modul pružnosti [GPa]		
		0	25	50	0	25	50	0	25	50
Počet zmrazovacích cyklů										
28	Ref	6,1	5,3	4,9	47,9	48,1	49,0	48,3	47,2	41,6
90	Ref	7,9	7,8	5,5	52,3	52,5	52,9	49,6	49,0	42,7
28	FA-12.5	7,2	6,1	3,1	47,8	44,5	40,3	48,1	44,2	34,0
	FA-25.0	5,7	2,8	2,5	41,3	35,7	32,7	48,3	40,9	29,3
	FA-37.5	5,6	2,3	1,8	35,2	24,8	32,7	48,1	33,6	22,6
	FA-50.0	4,8	1,5	1,3	26,8	21,5	20,4	37,5	37,9	12,0
90	FA-12.5	8,4	7,3	6,4	54,6	38,4	45,8	50,7	48,0	41,5
	FA-25.0	7,9	8,2	3,0	51,8	52,5	41,5	44,0	39,2	14,9
	FA-37.5	7,2	6,1	2,4	42,8	38,4	32,0	43,9	37,1	14,5
	FA-50.0	5,9	3,7	2,1	28,8	23,4	24,3	38,3	35,7	28,6
28	BS-12.5	6,3	4,4	4,7	39,8	45,9	42,0	41,1	20,9	13,7
	BS-25.0	5,4	4,3	3,6	34,0	34,8	37,1	38,6	11,0	17,7
	BS-37.5	5,3	3,4	2,5	26,1	31,1	28,4	35,1	10,1	4,6
	BS-50.0	4,6	1,6	0,5	27,8	21,7	6,5	35,3	2,3	0,0
90	BS-12.5	6,8	7,7	5,6	38,5	44,7	42,6	28,5	18,9	17,9
	BS-25.0	6,4	5,5	4,5	35,2	37,8	36,4	35,3	15,4	17,5
	BS-37.5	5,9	4,8	3,6	27,6	34,5	31,3	23,9	20,3	18,5
	BS-50.0	5,0	4,1	1,7	25,7	31,6	20,0	23,1	7,6	10,0
28	CP-12.5	7,8	4,3	2,7	38,5	40,5	33,6	40,6	18,9	10,4
	CP-25.0	6,0	4,3	2,5	33,2	36,7	30,1	39,2	19,1	8,4
	CP-37.5	5,3	5,2	3,7	23,2	30,6	27,3	34,0	25,6	15,3
	CP-50.0	3,9	3,9	1,1	20,3	26,3	11,6	33,5	17,6	0,0
90	CP-12.5	7,7	6,5	4,6	39,9	39,2	38,5	29,2	19,6	24,5
	CP-25.0	5,7	4,5	3,0	33,3	36,2	32,0	25,7	16,1	6,7
	CP-37.5	5,4	4,1	2,9	26,0	29,5	30,0	23,2	22,3	13,8
	CP-50.0	4,2	3,3	1,8	26,5	21,0	20,3	24,2	11,9	8,0

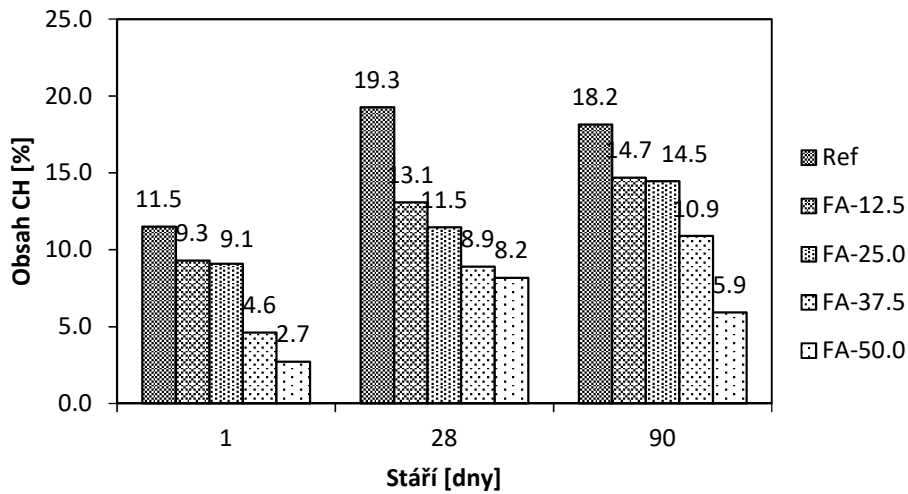
Zkoušky mrazuvzdornosti byly realizovány ve stáří 28 a 90 dní, ovšem s ohledem na charakter použitých pojiv, mají význam především hodnoty dosažené po 90 dnech. Je celkem zajímavé, že v případě některých směsí bylo vlivem zmrazování dosaženo vyšších pevností v tlaku. Tento jev byl pozorován i v jiných experimentech (Chung *et al.*, 2010; Sahmaran *et al.*, 2013; Soriano *et al.*, 2013), nicméně v tomto případě byl způsoben pravděpodobně režimem ošetřování. Na druhou stranu hodnoty pevnosti v tlaku v případě mrazuvzdornosti nemají technickou relevanci. Pro možný rozvoj trhlin je v drtivé většině používána pro identifikaci mrazuvzdornosti hodnota pevnosti v tahu ohybem. Výsledné hodnoty součinitele mrazuvzdornosti po 90 dnech pro jednotlivé směsi jsou uvedeny v Obr. 5.2.



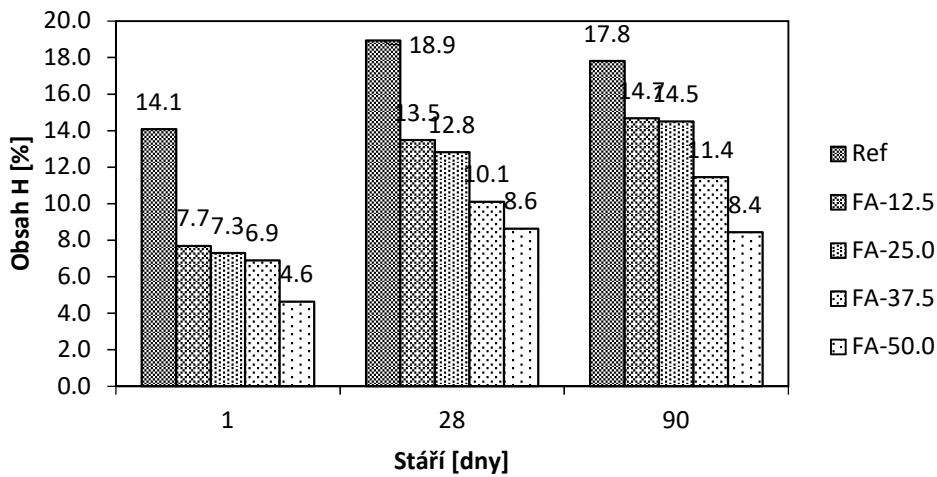
Obr 5.2: Součinitel mrazuvzdornosti po 90 dnech.

Na výsledné odolnosti vůči působení cyklického zmrazování měla stejně jako v případě mechanických vlastností vliv dávka záměsové vody, což vedlo ke zvýšení kapilární pórovitosti. V případě popílku to lze pozorovat u směsi s 25 % náhradou, u které musela být dávka vody z důvodu konzistence zvýšena. Nicméně u nejnižší náhrady popílkem lze pozorovat výrazné zlepšení oproti referenční směsi. Podobný trend vykazovaly i směsi se struskou, kde se jako optimální dávka jeví úroveň 12,5 %. Naproti tomu směsi, u nichž byl použit cihelný prach, vykazovaly systematický pokles. Přihlédneme-li však ke zvýšeným dávkám záměsové vody u této příměsi, nejsou dosažené výsledky zcela špatné. Při náhradě 25 % již tato příměs vykazovala lepší mrazuvzdornost oproti směsi s popílkem, který je třeba vnímat jako příměs kvalitativně lepší. Z dosažených výsledků je evidentní, že na výslednou mrazuvzdornost má, vedle mechanických parametrů, provzdušnění a kapilární pórovitosti, značný vliv i další aspekt, který charakterizuje vlastní pojivový systém. Jeho vlastnosti byly monitorovány na doprovodných vzorcích past pomocí termogravimetrie.

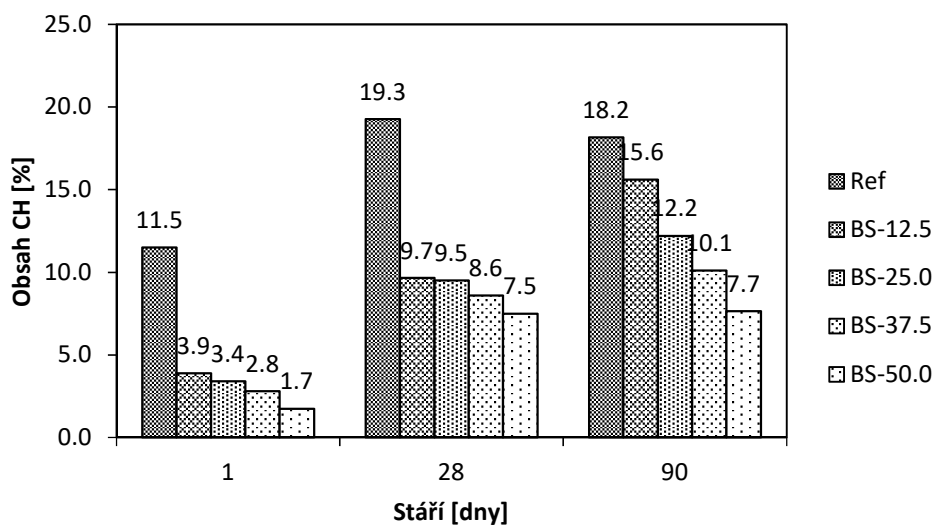
Měření zaměřená na stanovení podílu portlanditu a chemicky vázané vody dobře korespondují s vývojem mechanických vlastností. Všechny použité minerální příměsi vykazovaly postupný úbytek portlanditu a nárůst množství chemicky vázané vody vlivem vzniku nových produktů hydratace, jak je patrné na Obr. 5.3 až 5.8. Nejrychlejší vývoj, mimo referenční směsi, vykazovaly směsi s popílkem. Nicméně náhrady vyšší než 37,5 % se zdají být již neefektivní. Naproti tomu pasty s vysokopecní struskou dosáhly velmi pomalého vývoje v čase, ovšem z použitých minerálních příměsí dosáhly nejvyššího podílu hydratačních produktů. Tato skutečnost bývá spojována se sníženou odolností proti mrazu (Bílek *et al.*, 2015), nicméně v tomto programu to nebylo potvrzeno. Navíc tyto výsledky dobře dokumentují potenciál pro výrazně vyšší náhrady cementu vysokopecní struskou. Nejnižší míru aktivity vykázal použitý cihelný prach. Vhodnost jeho použití je limitována dle dosažených výsledků do 12,5 %. Na druhou stranu, neaktivní části cihelného prachu zvyšují vnitřní plochu, což přispívá ke vzniku nových hydrátů. Lze tak konstatovat, že v případě cihelného prachu dominuje fyzikální efekt. Závislost mezi dosaženou odolností vůči mrazu vyjádřenou součinitelem mrazuvzdornosti a vodou obsaženou v hydrátech (H_{hyd}) je znázorněna na Obr. 5.9.



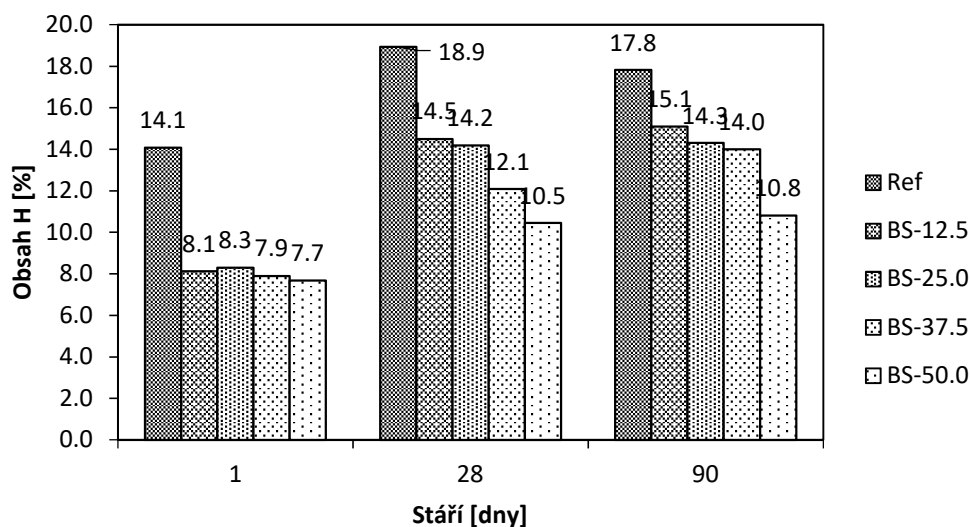
Obr. 5.3: Vývoj obsahu Ca(OH)_2 v čase v cementových pastách s přidavkem popílku.



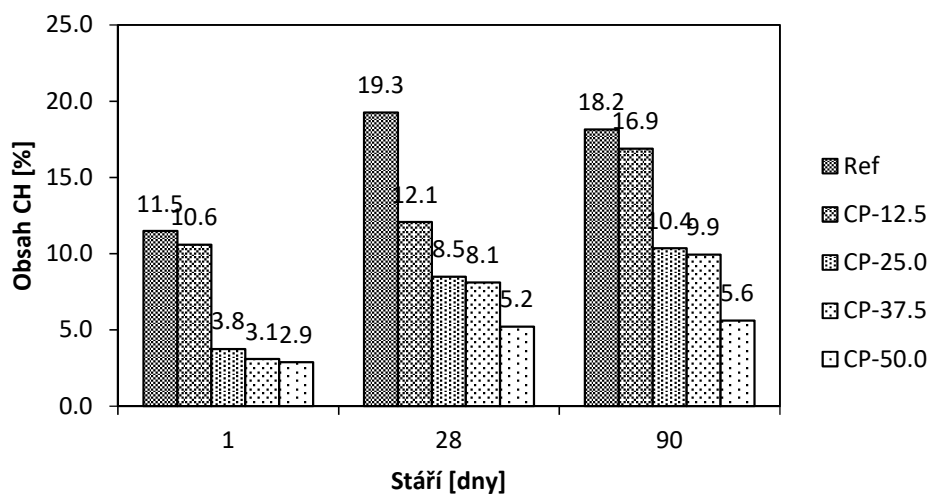
Obr. 5.4: Vývoj obsahu vody vázané v hydrátech past s přidavkem popílku.



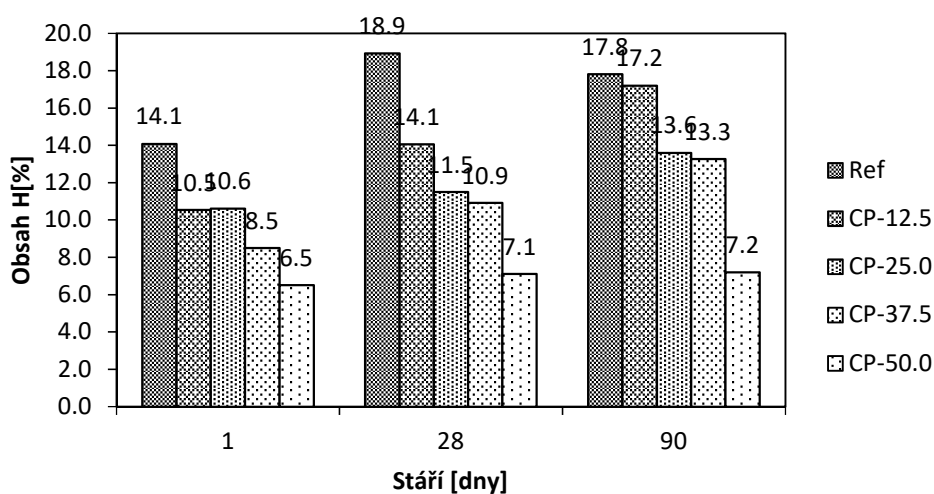
Obr. 5.5: Vývoj obsahu Ca(OH)_2 v čase v cementových pastách s přidavkem vysokopecní strusky.



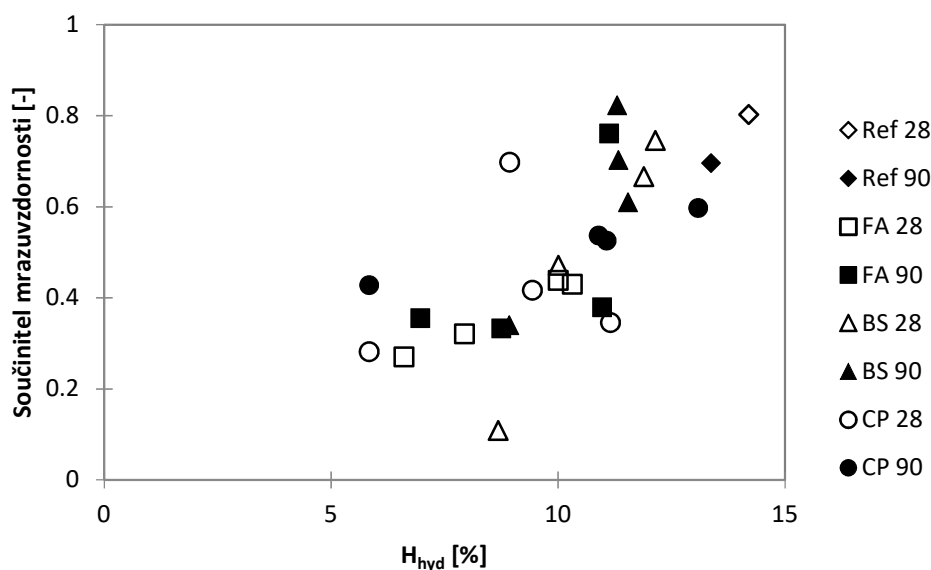
Obr. 5.6: Vývoj obsahu vody vázané v hydrátech past s přidavkem vysokopecní strusky.



Obr. 5.7: Vývoj obsahu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v čase v cementových pastách s přidavkem cihelného prachu.



Obr. 5.8: Vývoj obsahu vody vázané v hydrátech past s přidavkem cihelného prachu.



Obr. 5.9: Závislost mezi součinitelem mrazuvzdornosti a chemicky vázanou vodou v hydrátech (vyjádřeno na základě pevnosti v tahu za ohybu po 50 cyklech).

Je zřejmé, že mrazuvzdornost je úměrná obsahu hydrátů v daném materiálu. Tyto výsledky korespondují se závěry i jiných autorů (Wang *et al.*, 2017; Balapour *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). Je tak potvrzeno, že povaha pojivého systému ovlivňuje mrazuvzdornost, nicméně tento trvanlivostní parametr je převážně determinován charakterem pórového systému. Význam příměsí tak spočívá převážně ve snížení kapilární pórovitosti, což vede ke zvýšení kritické teploty (Scherer, 1999; Coussy & Monteiro, 2008). Bohužel tento materiálový nástroj není ve stavební praxi aplikován. Navíc preferované provzdušnění do značné míry popsany efekt minerálních příměsí tlumí (Peng *et al.*, 2007). Tento nedostatek dobře dokládají výsledky malt s přidavkem cihelného prachu, které i přes vhodný obsah vzduchu v čerstvé směsi nakonec vykazaly nejnižší odolnost vůči působení cyklického zmrazování. Nicméně tento odpadní materiál má nemalý potenciál pro praktické využití.

6. Vliv chloridových rozmrazovacích prostředků na beton

6.1 Dopady zimní údržby při použití rozmrazovacích prostředků

Betonové konstrukce dopravní infrastruktury jsou v průběhu zimního období vedle povětrnosti vystaveny i účinkům rozmrazovacích prostředků, které jsou používány pro zajištění bezpečnosti provozu. Toto povrchové ošetření se projevuje prostřednictvím odlupování povrchových vrstev, rozvojem trhlin a postupným rozpadem směrem od povrchu (Wang *et al.*, 2006; Dang *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2017). Navíc postupný průnik chloridových iontů vede k reakci s některými produkty hydratace cementu, což ve výsledku vede ke ztrátě trvanlivosti a akceleraci koroze betonu (Shi *et al.*, 2011; Liu & Hansen, 2015). Tyto procesy tak vedou ke korozi výztuže (Pruckner & Gjorv, 2004; Xu *et al.*, 2011) a snížení životnosti konstrukce za současného zvýšení nákladů potřebných na údržbu (Shi *et al.*, 2012).

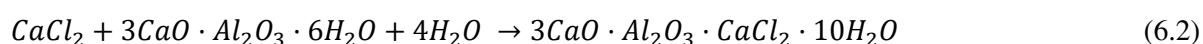
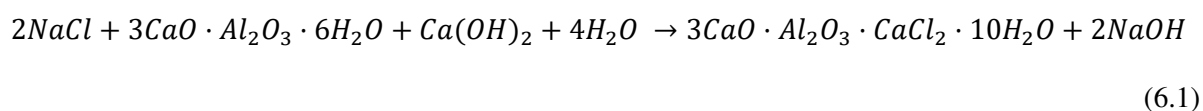
V neposlední řadě mají používané rozmrazovací prostředky negativní dopad i další kovové prvky dopravní infrastruktury včetně samotných vozidel (Shi *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2017). Účinnost jednotlivých prostředků na bázi chloridů je uvedena v Tab. 6.1.

Tab. 6.1: Vlastnosti vybraných rozmrazovacích prostředků na bázi chloridů.

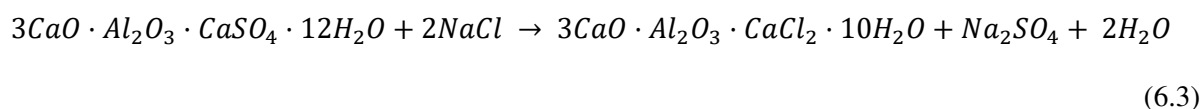
Vzorec	Poznámka	Eutektický bod	Bod tání 3% roztoku
NaCl	Používaný prostředek	-21 °C	-1,8 °C
CaCl ₂	Bezvodý CaCl ₂	-51 °C	-1,8 °C
80 % NaCl + 20 % CaCl ₂	Používaný prostředek	-45 °C	-5,0 °C
MgCl ₂	V ČR zakázaný	-35 °C	-2,0 °C

Poškození betonu, zejména v případě cementobetonových krytů, nastává nejprve v blízkosti spár a napojení, tedy v místech se zvýšenou koncentrací vody. Povrchové odlupování má tedy jistou souvislost s působením mrazu (Spragg *et al.*, 2011; Álava *et al.*, 2016; Tian & Han, 2018). Případná míra saturace vodou je popsána v ČSN EN 206+A1 (2018) a zohledněna v míře agresivity jednotlivých stupňů vlivu prostředí. Efekt působení střídavého zmrazování a rozmrazování společně s účinkem solí byl v minulosti intenzivně studován (Suprenant, 1985; Bager & Sellevold, 1986; Shang *et al.*, 2009), nicméně řada otázek při takovémto namáhání je stále nezodpovězena. Je to způsobeno především komplikovanou druhotnou krystalizací ve ztvrdlé cementové pastě, vznikem nových sloučenin s obsahem chloridů, které postupně do betonu pronikají, a transformací některých produktů hydratace cementu (Xu *et al.*, 2011; Farnam *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2018a). Negativní dopad chloridů je značně závislý na jejich aktuální podobě.

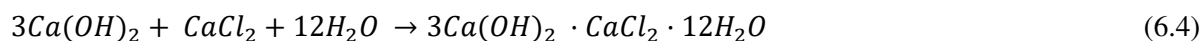
Účinky chloridu sodného na ztvrdlý beton. Chlorid sodný patří kvůli své efektivitě mezi nejčastěji používané rozmrazovací prostředky. Je to dáno především jeho nízkou cenou, účinností a nízkou mírou poškození, které způsobuje. Jeho mírný dopad na ztvrdlý beton je dán dvěma hlavními faktory. Prvním z nich je skutečnost, že pH pórového roztoku zůstává stále relativně vysoké, což zajišťuje potřebnou ochranu pro zabudovanou výztuž, a Friedelova sůl, jakožto sekundární produkt působení NaCl na ztvrdlý beton, působí preventivně, neboť ve své struktuře chemicky váže pronikající chloridy (Brown & Bothe, 2004; Farnam *et al.*, 2015). Nicméně zvýšený podíl sodíku v pórové vodě podporuje rozvoj ASR. Na druhou stranu průnik NaCl do betonu nezpůsobuje pokles pH, což je patrné z (6.1). Friedelova sůl může alternativně vznikat i podle (6.2) (Pruckner & Gjorv, 2004).



Je evidentní, že Friedelova sůl vzniká z hydratovaných hlinitanů vápenatých, nicméně v přítomnosti chloridů může vznikat i Kuzelova sůl primárně z hlinitanových a železitých fází hydratované cementové pasty (Csizmadia *et al.*, 2001; Qiao *et al.*, 2018a). Reakční mechanismus je velmi podobný tomu popsanému v (6.1) a (6.2). Vznik Friedelovy soli je doprovázen expanzí vedoucí ke vzniku trhlin (Valenza *et al.*, 2005). Výše popsaný mechanismus je jedním z důvodů pro omezení trikalciumpilokátu (C₃A) v silničních cementech. Na druhou stranu byl potvrzen i vznik Friedelovy soli z monosulfátaluminátu (AFm) (Suryavanshi & Swamy, 1996), (6.3).



Účinky chloridu vápenatého na ztvrdlý beton. Chlorid vápenatý je ve srovnání s chloridem sodným mnohem škodlivější, neboť reaguje s portlanditem za vzniku oxychloridu podle (6.4) (Wang *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2011; Qiao *et al.*, 2018b). Oxychlorid může být alternativně zapisován jako 3CaO·CaCl₂·15H₂O (Álava *et al.*, 2016).

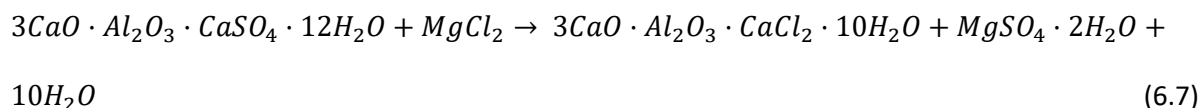


Spotřeba portlanditu při působení chloridu vápenatého je doprovázena masivním vyluhováním a poklesem pH, které ve výsledku vede ke korozi výztuže (Pruckner & Gjorv, 2004; Xu *et al.*, 2011), ovšem tento proces je silně závislý na teplotě (Pruckner & Gjorv, 2004). Škodlivý efekt oxychloridu vápenatého spočívá navíc v poměrně širokých podmínkách jeho existence.

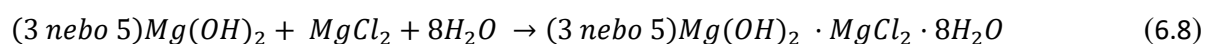
Účinky chloridu hořečnatého na ztvrdlý beton. Chlorid hořečnatý je v zahraničí velmi často užívaný prostředek na zimní údržbu z důvodu jeho vysoké účinnosti a nízké ceny, nicméně z rozmrazovacích prostředků na bázi chloridů se jedná o ten suverénně nejvíce beton poškozující (Farnam *et al.*, 2015; Sutter *et al.*, 2006). Je to způsobeno tím, že při působení MgCl₂ na beton dochází ke vzniku celé řady sekundárních produktů, jakými jsou např. brucit, Friedelova sůl, hydratovaný křemičitan hořečnatý (M-S-H), oxychlorid hořečnatý i oxychlorid vápenatý. Vedle toho je působení MgCl₂ doprovázeno rozvojem trhlin a podstatnou ztrátou mechanických vlastností vlivem podstatných změn v mikrostruktuře ztvrdlé cementové pasty. Vznik brucitu (Mg(OH)₂) lze názorně popsat podle rovnice (6.5). Ovšem chlorid vápenatý ochotně reaguje i s dalšími produkty hydratace cementu – hydratovanými křemičitany vápenatými (C-S-H), jak je uvedeno v (6.6). Je zde velmi dobře patrné, že hořčík v CSH fázích, nositeli mechanických parametrů, nahrazuje vápník (Peterson *et al.*, 2013; Farnam *et al.*, 2015). Tento proces je velice pomalý, nicméně je to hlavní důvod destruktivního účinku této soli.



MgCl₂ přispívá ke vzniku Friedelovy soli svou reakcí s AFm. Pravděpodobný mechanismus je uveden v (6.7). Je však třeba zdůraznit, že účinek Friedelovy soli je v tomto ohledu marginální.



Dalším zvyšováním koncentrace $MgCl_2$ dochází ke vzniku oxychloridu vápenatého a sekundárního oxychloridu hořečnatého, (6.8). Ten může existovat ve dvou různých formách obsahující odlišný počet molekul $Mg(OH)_2$ – tři a pět. Pětimolekulová forma je méně stabilní, neboť při změně koncentrace konvertuje na formu třímolekulovou (Farnam *et al.*, 2015).



Účinek různých chloridových solí na ztvrdlý beton má poškozující dopad především kvůli vzniku nových produktů a rozpadu původních produktů hydratace cementu, což vede ke ztrátě vnitřní integrity. Pozorovatelným projevem je povrchové odlupování a vyluhování často spojené s inkrustací. Zásadními dopady působení $MgCl_2$ je především vznik vápenatého oxychloridu, M-S-H fází a hořečnatého oxychloridu. Jejich krystalizace je spojena se snížením pH a postupnou ztrátou mechanických parametrů.

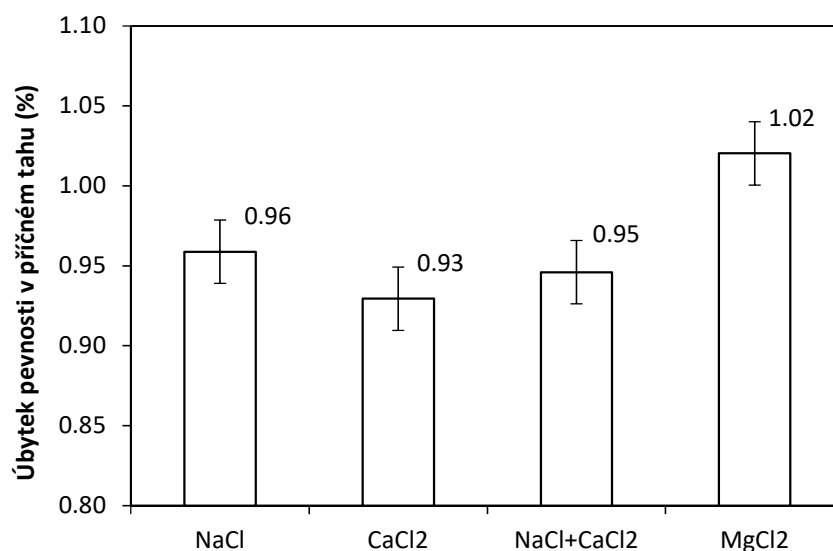
Preventivní opatření. Použití aktivních minerálních příměsí je nejefektivnější prevence pro potlačení negativních účinků chloridových iontů na ztvrdlý beton (Santagata & Collepari, 2000; Bassuoni & Rahman, 2016; Álava *et al.*, 2016). Jejich efekt je i zde chemický i fyzikální. Na jednu stranu snižují permeabilitu, čímž razantně snižují dotaci chloridů. Na druhou stranu snižují reakční potenciál, neboť přispívají ke vzniku méně rozpustných produktů, především s ohledem na portlandit. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu v případě betonu již zkarbonatovaného. Álava *et al.* (2016) zaznamenali postupné vyluhování karbonátů vlivem vzniku oxychloridů. Proces jejich rozkladu je řízen vyšším pH nebo při použití vysokých dávek cementu. Je však rovněž vzít v úvahu vliv nízkých teplot a s tím související stability korozních produktů (Balonis, 2019).

6.2 Experimentální program

S problematikou minerálních příměsí úzce souvisí i mobilita jednotlivých chloridových solí ve struktuře betonu, tedy hloubka, do které jsou schopny ztvrdlý beton penetrovat. Za tímto účelem byl v předchozím výzkumu realizován program na posouzení agresivity jednotlivých rozmrazovacích prostředků na bázi chloridů na beton (Reiterman & Keppert, 2020). V rámci tohoto programu byla zkušební tělesa vyrobena z betonu C35/45 XF4 a ve stáří 28 dní vystavena zkoušce odolnosti povrchu betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) dle ČSN 731326 – metoda A (1984). Během této zkoušky jsou tělesa částečně ponořena do 3% roztoku soli a cyklicky teplotně zatěžována od -18°C do 20°C . Tato receptura betonu prezentovala směs používanou pro výstavbu cementobetonových krytů na vybraných úsecích rekonstruované D1. Výsledkem této zkoušky je zpravidla povrchový odpad vyjádřený na 1m^2 . Během programu byly použity 3% roztoky NaCl, $CaCl_2$, směsi NaCl a $CaCl_2$ (80:20) a $MgCl_2$, které byly každých 25 cyklů obměněny. Vedle průniku jednotlivých chloridů byla monitorována i ztráta mechanických vlastností pomocí pevnosti v příčném tahu (ČSN EN 12390-6, 2009).

6.3 Výsledky experimentálního programu a jejich diskuze

Po celkem 400 zatěžovacích cyklech byl u všech roztoků zaznamenán jistý povrchový odpad, nicméně s ohledem na dosažené hodnoty a množství provedených cyklů byly tyto hodnoty zanedbatelné. Mnohem zajímavější již byly výsledky reziduálních pevností v příčném tahu, které jsou představeny na Obr. 6.1.

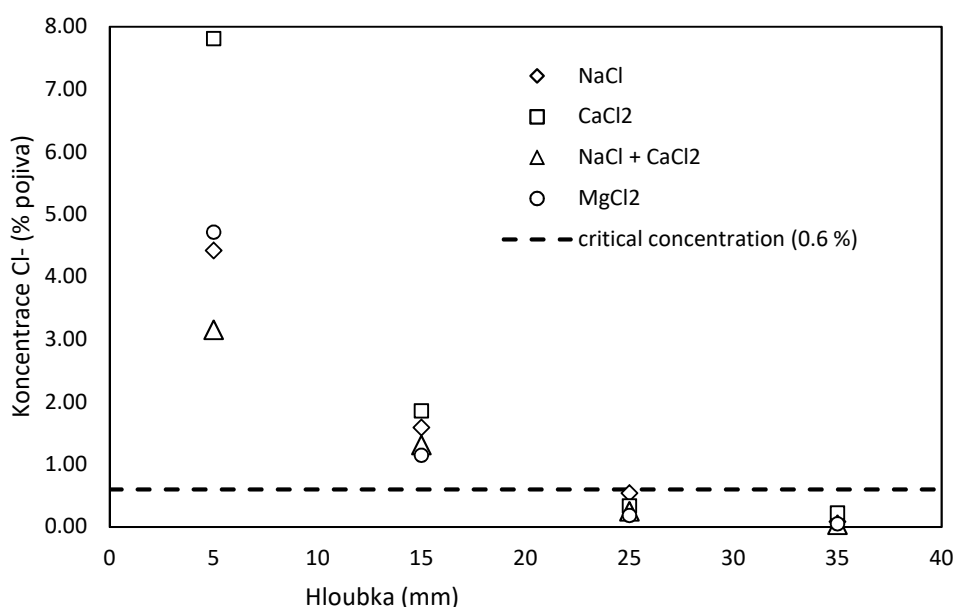


Obr. 6.1: Ztráta pevnosti v příčném tahu po 400 cyklech.

Nejvyšší úbytek zaznamenala tělesa vystavená roztoku chloridu vápenatému. Naproti tomu tělesa vystavená účinkům chloridu hořečnatému zaznamenala nepatrné zlepšení, což koresponduje se závěry Ghazyho a Bassuonih (2017), kteří se zabývali agresivitou různých rozmrazovacích prostředků, avšak monitoringem dynamického modulu pružnosti. Nicméně během svého výzkumu používali velmi silné koncentrace (20 %). Znatelné poškození zaznamenali až po 80 dnech expozice nebo devíti cyklech, během kterých byla tělesa vysušována a saturována. Největší poškození vykazovala referenční směs bez minerální příměsi. Podobné závěry publikoval Lee *et al.* (2017). Podrobná analýza, kterou provedli Qiao *et al.* (2018b) pak potvrdila společný vliv působení vznikajícího ledu a transformace hydratačních produktů cementu.

V rámci tohoto výzkumu byla monitorována i koncentrace chloridů, které pronikly do struktury betonu formou stanovení chloridových profilů. Dle očekávání se zvyšující se hloubkou koncentrace chloridů postupně klesala, což je dobře patrné z Obr. 6.2. Nejvyšší koncentrace chloridů bylo dosaženo v blízkosti povrchu při použití CaCl₂, ovšem hlouběji tato sůl pronikala už obtížně. Zásadní rozdíly mezi hloubkou penetrace chloridů do betonu zaznamenal i Álava *et al.* (2016), kteří hodnotili vliv vysokopecní granulované strusky. Bylo potvrzeno, že se zvyšujícím se množstvím strusky docházelo k významné koncentraci chloridů v povrchových vrstvách a velmi rychlému poklesu koncentrace se zvyšující se hloubkou, což indikuje fixační schopnost této příměsi. Podstatnou roli zde hrálo i nižší pH těchto betonů. Vedle použitého pojiva pozitivně ovlivňuje akumulaci chloridů v povrchové vrstvě i charakter pórového systému (Bernal *et al.*, 2016). Zbylé studované chloridy v druhé vrstvě (10-20 mm)

jsou velice podobné, ovšem v jejich případě nebyla zaznamenána tak vysoká akumulace u povrchu. Obdobné výsledky publikoval i Peterson *et al.* (2013), který popsal utěšňující efekt vznikajícího oxychloridu v povrchové vrstvě a dramatické snížení dalšího pronikání chloridů. Naproti tomu Ghazy a Bassuoni (2017) jako klíčový faktor pro eliminaci průniku chloridů do betonu zdůrazňují nízké pH, tedy posílení primární odolnosti betonu výběrem vhodného pojiva. V provedeném programu nejnižší průnik do betonu vykazala směs NaCl a CaCl₂, což koresponduje i s publikovanými doporučeními (Suraneni *et al.*, 2017).



Obr. 6.2: Chloridové profily jednotlivých rozmrazovacích prostředků.

Ovšem průnik chloridů do betonu je třeba hodnotit s ohledem na možnou iniciaci koroze výztuže (Otieno *et al.*, 2016; Hájková *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2017). Zabudovaná výztuž je chráněna před korozí díky pasivačnímu filmu, jehož dlouhodobá stabilita je závislá na aktuální koncentraci chloridových iontů. Mezní hodnota koncentrace, při které dochází k iniciaci koroze je označována jako kritická koncentrace chloridů C_{cr} a je vztahována k obsahu pojiva. Její hodnota se liší podle typu expozice dané konstrukce, nicméně běžně se pohybuje mezi 0,4 a 0,7 % pro konstrukce krátkodobě smáčené. Výrazně vyšších hodnot dosahuje v případě konstrukcí a prvků, které jsou trvale ponořeny v agresivním prostředí (Hájková *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2017). Tato hodnota však platí pouze v případě, kdy není beton poškozen rozvojem trhlin (Kwon *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2017). Obecně používaná hodnota pro C_{cr} je 0,6 (Hájková *et al.*, 2018), ta byla rovněž použita při zhodnocení experimentu. Vzhledem k reziduálním mechanickým vlastnostem byly dosažené profily průniku chloridů inverzní. Při interpolaci hodnot by bylo dosaženo kritické koncentrace pro NaCl v hloubce 24 mm, CaCl₂ 21 mm, pro směs NaCl a CaCl₂ rovněž, a v případě MgCl₂ již v 18 mm hloubky. Tyto výsledky tak velmi dobře dokreslují komplexnost této problematiky.

Z pohledu omezení rizika koroze výztuže vlivem průniku chloridů se tak snížení permeability a zvýšení primární odolnosti betonu jeví jako efektivní přístup. Z pohledu vzniku nových korozních produktů hraje klíčovou roli portlandit, který patří mezi hlavní reaktanty. Z tohoto

pohledu poskytuje použití minerálních příměsí značné výhody (Álava *et al.*, 2016; Qiao, *et al.*, 2018a; Santagata & Collepari, 2000; Bassuoni & Rahman, 2016; Ghazy & Bussuoni, 2017).

Dřívější výzkum (Reiterman, 2018) potvrdil, že již 7,5% náhrada cementu metakaolinem koeficient migrace chloridových iontů snížil o 50 %. Metakaolin však dosud nenašel širšího uplatnění v oblasti transport-betonů; na našem území je mnohem používanější úletový popílek. Ghazy a Bussuoni (2017) potvrdili, že 30% náhrada popílkem může snížit průnik chloridů do betonu až o 80 %; mnohem intenzivnějšího zlepšení lze dosáhnout přidáním křemičitého úletu. Zatímco binární systém (cement-křemičitý úlet) vykázal zlepšení o 57,4 %, systém ternární (cement-úletový popílek-křemičitý úlet) dosáhl přibližně 23,9 % hodnot kontrolní směsi připravené pouze s popílkem. V tomto ohledu se však uplatňuje i fyzikální efekt přísad, což se projevuje i na zlepšené mrazuvzdornosti (Kurda, 2017; Shon *et al.*, 2018), neboť tyto betony nemají tendenci ke vzniku trhlin, které jinak přispívají k transportu nejen chloridových iontů. Klíčovým faktorem je v případě použití ternárních pojivových systémů množství vody v betonu (Glinicki *et al.*, 2016) a množství chemicky vázané vody ve ztvrdlé cementové pastě (Reiterman *et al.*, 2019; Bílek *et al.*, 2015), která je použitím minerálních příměsí značně zvýšena. Tyto závěry byly potvrzeny i v další studii, kde byl studován vliv popílku (Qiao *et al.*, 2018a). Bylo potvrzeno, že přes snížené mechanické parametry vlivem přidávku popílku vedl zvýšený podíl Al_2O_3 v této příměsi ke zvýšenému vzniku Friedelovy soli. Oxid hlinitý je tak pravděpodobně klíčovým faktorem pro vznik tohoto sekundární korozního produktu, což potvrdily i stanovené hodnoty objemových změn. Vedle fixace chloridů v povrchových vrstvách betonu, je možné je i efektivně vymýt v průběhu zimní údržby, což prokázal pomocí simulací skutečných podmínek Bernal *et al.* (2016). Tento efekt byl zaznamenán u směsi s vysokopecní struskou či křemičitým úletem. Vyšší procenta náhrady však nejsou vhodné s ohledem na rychlou karbonataci povrchové vrstvy (Álava *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2016). Nicméně efekt chloridů v případě zkarbonatovaného betonu není zcela vysvětlen (Farnam *et al.*, 2016). Vedle úpravy složení betonové směsi jako efektivní nástroj pro snížení penetrace chloridů betonu mohou být i nejrůznější povrchové úpravy (Dang *et al.*, 2014). Dalším nepřímým postupem ochrany betonových konstrukcí před negativními důsledky zimní údržby se zdá být použití směsných posypových materiálů (Suraneni *et al.*, 2017), což potvrdil i provedený výzkum.

7. Cihelný prach jako alternativní minerální příměs do betonu

7.1 Dosavadní zkušenosti s použitím cihelného prachu ve stavebnictví

V posledním dvou dekadách je intenzivní výzkum věnován řadě alternativních materiálů, které vykazují jisté pucolánové vlastnosti a mohly by tak efektivně nahradit část portlandského cementu. Tento přístup má své opodstatnění nejen z hlediska technického, kdy směsné pojivové systémy mají řadu již dříve uvedených výhod, ale i environmentálního i ekonomického, neboť řada těchto materiálů jsou odpady bez dalšího využití. Jedním z těchto materiálů je i cihelný prach vzniklý z demoličního odpadu nebo přímo cihelny (Kinuthia & Nidzam, 2011). Využití odpadní keramiky má v historii stavebnictví hluboké kořeny (Drdáček *et al.*, 2013). Nicméně z pohledu moderního stavitelství jsou zajímavé odpady využitelné jako minerální příměsí, které nejsou zatížené historií následného užívání. Proto i s ohledem na

charakter surovinové základny je v posledních letech věnována značná pozornost využití cihelného obrusu, který vzniká např. při výrobě přesných cihelných bloků (Baronio & Binda, 1997; Cheng *et al.*, 2014).

Dostatečné trvanlivostní parametry vápenných malt s přídavkem cihelného prachu byly prokázány v experimentální práci, kterou publikoval Schackow *et al.* (2015), ovšem současná technologie výroby cihel vede k výrazně nižší pucolánové aktivitě prachu u dnešních produktů v porovnání se starověkými technologiemi (Baronio & Binda, 1997). Mechanismus aktivace cihelného prachu v přítomnosti vápna v závislosti na jeho fázovém složení podrobně popsaly Navrátilová a Rovnaníková (2016). Bylo prokázáno, že průběh pucolánové reakce má zásadní vliv na vývoj mechanických parametrů a je závislý na granulometrii daného materiálu (Ercikdi *et al.*, 2015). Naceri a Hamina (2009) studovali vliv cihelné drtě, která byla přidávána při mletí slínku, na vlastnosti výsledného směšného cementu. Vedle prokázaného intenzifikačního účinku při mletí byla však horní hranice náhrady do 10 hm.% slínku. Na druhou stranu Pavlík *et al.* (2016) nahrazovali cement až do 24 hm.% a prokázali značné snížení otevřené pórovitosti, která má význam v souvislosti s trvanlivostí. Podobné výsledky publikoval i Kannan *et al.* (2017), který studoval vlastnosti vysokohodnotných betonů. Podobně jako Pavlík *et al.* (2016) zaznamenal pokles pevností v tlaku, ovšem trvanlivostní parametry byly prakticky totožné s referenční směsí. Pozitivní dopad použití cihelného prachu na trvanlivostní parametry betonu publikoval i Turanli *et al.* (2003), kde byla pozornost věnována potlačení rozvoje ASR. Nicméně v této práci bylo poukázáno na fakt, že náhrada cihelným prachem může zhoršovat některé inženýrské vlastnosti jako např. zpracovatelnost, což je hlediska praktického použití klíčový faktor (Ganjian *et al.* 2015, Akinyele *et al.* 2016, Abdulmatin *et al.* 2017). Na druhou stranu tento nedostatek lze snadno kompenzovat dávkou účinné plastifikační přísady, kdy lze dosáhnout s touto příměsí i samozhutnitelného betonu (Subasi *et al.*, 2017).

7.2 Experimentální program

Jedním z podstatných problémů používaných minerálních příměsí je kolísání vlastností v průběhu roku. V případě použití úletových popílků pak tyto drobné změny vlastností mají za následek zásadní změny ve vlastnostech betonu. Tyto změny jsou primárně způsobeny kolísáním kvality paliva, především pak obsahu SO₃ (Keppert *et al.*, 2019). Z pohledu stability vlastností je tak cihelný prach pocházející přímo z výroby značně spolehlivý materiál, což je dáno charakterem cihlářského průmyslu. V Tab. 7.1 je uvedeno složení sledovaného cihelného prachu v průběhu dvou let, které velmi dobře dokládá velmi nízkou variabilitu vlastností. Mineralogické složení je v uvedeno v Tab. 7.2.

Nicméně vedle chemického složení cihelného obrusu, které je odlišné pro jednotlivé lokality, hrají důležitou roli i další aspekty určující příspěvek k pucolánové reakci. Jedním z nich je granulometrie daného cihelného prachu. Z tohoto pohledu se jedná o materiál výrazně hrubší ve srovnání s popílkem. Vliv granulometrie cihelného prachu na jeho pucolánovou aktivitu byl studován v předchozím výzkumu (Reiterman & Keppert, 2017) za použití termogravimetrie.

Tab. 7.1: Chemické vlastnosti cihelného prachu (lokalita Hevlín).

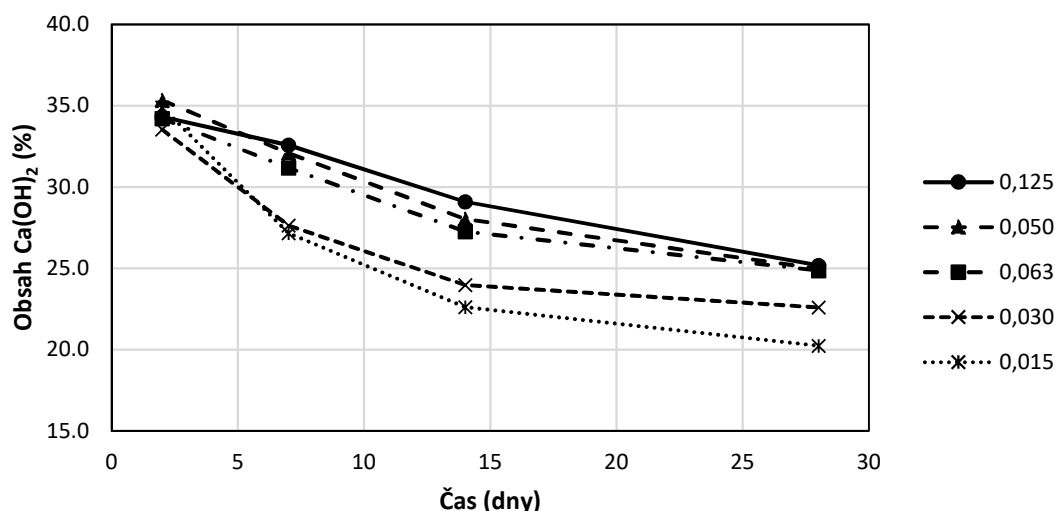
	2013	2014
	[hm. %]	[hm. %]
SiO₂	50,7	51,3
Al₂O₃	20,0	20,0
Fe₂O₃	6,2	6,0
CaO	11,6	11,5
MgO	4,8	4,5
K₂O	3,2	3,2
Na₂O	1,3	1,3
TiO₂	0,8	0,8
SO₃	1,0	1,0

Tab. 7.2: Mineralogické složení cihelného prachu.

Složka	(%)
Amorfní podíl	45,3
křemen	26,8
Albit	7,2
Mikroklín	6,3
Muskovit	3,1
Åkermanit	3,2
Hedenbergit	4,1
sádrovec	0,6
Hematit	1,9

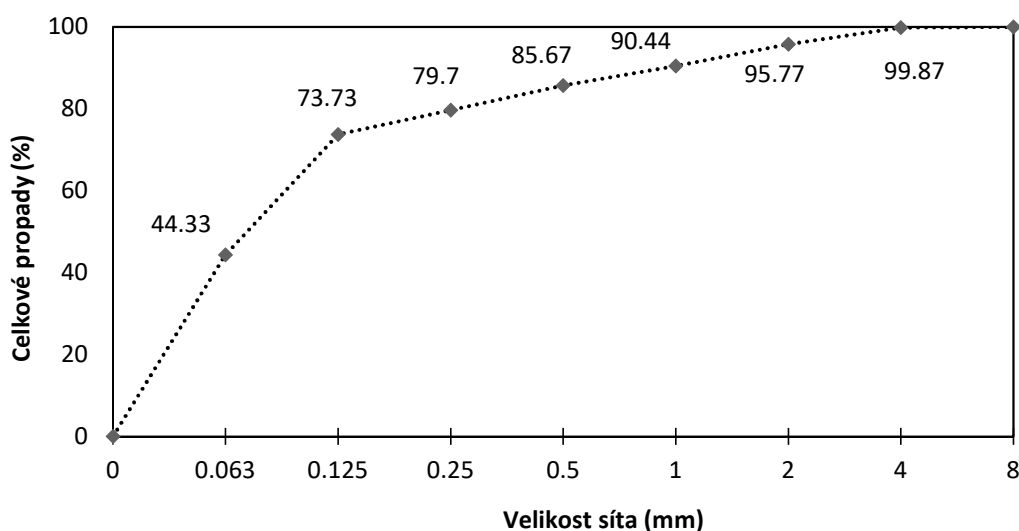
V provedeném programu byly sledovány laboratorně mletím upravené cihelné prachy, které byly následně separovány na frakce s D_{\max} 0,125, 0,063, 0,050, 0,030 a 0,015 mm. Z takto připraveného materiálu byly společně s vodou a vápenným hydrátem vyrobeny zkušební pasty, na nichž byl v čase sledován úbytek $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který signalizuje průběh pucolánové reakce. Provedený program prokázal, že cihelný prach s D_{\max} 0,015 mm vykazuje téměř maximální reaktivitu s přihlédnutím k obsahu amorfních fází v daném cihelném prachu, jak je patrné z Obr. 7.1. Celkem očekávaně pak s narůstajícím obsahem hrubších částic reaktivita cihelného prachu klesá nebo má reakce výrazně dlouhodobější charakter.

Jak je již patrné z Tab. 7.2, kapacita pro pucolánovou reakci cihelného prachu je výrazně menší v porovnání s jinými používanými příměsmi, což je dáno nižším obsahem amorfních fází. Tento nedostatek by bylo možné řešit následným mletím, nicméně při tomto procesu dochází k další spotřebě energie, a navíc i nežádoucímu spékání mletého materiálu. Z těchto důvodů byl v navazujícím programu, který byl zaměřen na použití v betonu, použit dále neupravovaný cihelný prach.



Obr. 7.1: Pokles obsahu portlanditu vlivem pucolánové reakce cihelného prachu různé zrnitosti

Provedený experimentální program byl zaměřen na studium betonu s přidavkem cihelného prachu, který vzniká při výrobě přesných cihelných bloků. Aplikovaná náhrada dosahovala 30 hm.% použitého portlandského cementu (Reiterman *et al.*, 2020). Studovaná alternativní příměs vzniká přímo v cihelnách při broušení ložných ploch vypálených cihelných bloků. Denní produkce se pohybuje okolo 10 tun pro jeden provoz. V dnešní době tento materiál nemá další využití a skládkován v těžební jámě. Chemické vlastnosti této příměsi a použitého cementu jsou uvedeny v Tab. 7.1. Vznikající prach není dále tříděn, proto obsahuje i poměrně hrubá zrna – odštěpky od hran. Distribuce částic je uvedena na Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Čára zrnitosti použitého cihelného prachu.

Na výrobu betonových směsí byl použit přírodní křemičitý písek frakce 0-4 mm z lokality Dobříň a drcené přírodní kamenivo z lokality Zbraslav ve frakcích 4-8 mm a 8-16 mm. Jelikož byla očekávána snížená zpracovatelnost čerstvých směsí s narůstající náhradou cihelným prachem, byla použita ztekucující přísada na bázi polykarboxylátů. Detailní složení je uvedeno v Tab. 7.3.

Tab. 7.3: Složení betonových směsí [kg/m³].

Složky	Směs	C0	C05	C10	C15	C20	C25	C30
	CEM I 42.5 R	400	380	360	340	320	300	280
	Cihelný prach	0	20	40	60	80	100	120
	Kamenivo 0 – 4 mm	930	930	930	930	930	930	930
	4 – 8 mm	315	315	315	315	315	315	315
	8 – 16 mm	600	600	600	600	600	600	600
	plastifikátor	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	voda	176	176	176	176	176	176	176

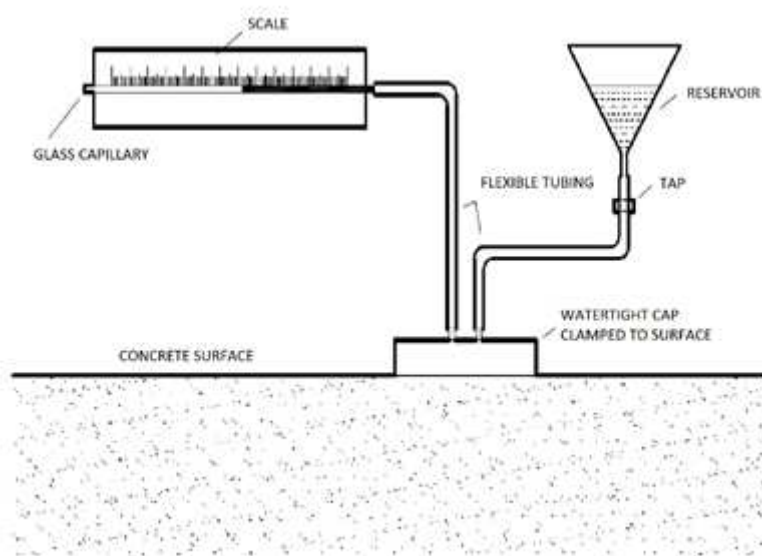
Zkušební směsi byly vyrobeny pomocí laboratorní horizontální míchačky, kdy byly nejprve homogenizovány veškeré suché složky, poté byla přidána část záměsové vody. Nakonec byl postupně přidáván zbytek záměsové vody společně s plastifikační přísadou. Každá směs byla vyrobena jako jedna záměs. Přibližně po pěti minutách byla provedena zkouška konzistence čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-2 (2009) a souběžně s ní i stanovení obsahu vzduchu dle ČSN EN 12350-7 (2009), které má význam pro mrazuvzdornost. Zbytek čerstvého betonu byl využit na výrobu zkušebních těles.

Ztvrdlý beton. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla stanovena na základě aktuálních rozměrů a hmotnosti zkušebních těles. Pevnost v tlaku byla stanovována ve zvolených časových intervalech podle ČSN EN 12390-3 (2009) vždy na sadě zkušebních krychlí o hraně 150 mm.

Součástí programu bylo i stanovení mrazuvzdornosti podle ČSN 731322 (2003) užitím zkušebních trámců 100×100×400 mm. Podstatou zkoušky je cyklické zmrazování a rozmrazování vodou saturovaných těles. Při zkušebním cyklu jsou tělesa automaticky zmrazována na -18 °C, tato fáze trvá 4 hodiny. Poté je zkušební komora automaticky zaplavena vodou na 2 hodiny, čímž dojde k postupnému ohřevu zkušebních těles. Po vypuštění zkušební komory následuje další zkušební cyklus začínající opět fází zmrazování. Výsledná odolnost vůči působení mrazu se vyjadřuje součinitelem mrazuvzdornosti, který značí podíl ohybové pevnosti nezmrzaných těles před začátkem cyklování a ohybové pevnosti těles zmrazovaných po předepsaném nebo zvoleném počtu zmrazovacích cyklů. Každých 25 cyklů je prováděna vizuální kontrola a monitoring případné ztráty hmotnosti, která nesmí přesáhnout 5 %. Ohybová zkouška je prováděna dle ČSN EN 12390-5 (2009) jako čtyřbodový ohyb, kdy vzdálenost podpor je 300 mm a břemena jsou umístěna ve třetinách rozpětí.

Propustnost betonu, která je řídicím parametrem trvanlivosti, byla sledována pomocí zkoušky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 (2010), kdy je zkušební krychle vystavena účinku tlaku vody 0,5 MPa po dobu 72 hodin. Poté je porušena příčným tahem a je zaznamenán maximální viditelný průsak. Další zkouškou zaměřenou na permeabilitu byla zkouška ISAT

(Initial Surface Absorption Test). Jedná se poměrně jednoduchou zkoušku prováděnou na povrchu betonu, jejíž schéma je na Obr. 7.3.



Obr. 7.3: Schéma zkoušky ISAT.

Zkoušený povrch je vystaven tlaku vodního sloupce 200 mm (2 kPa) a pomocí kapiláry se stupnicí je zaznamenáváno množství vody absorbované betonem v daném čase [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]. Pro indikaci trvanlivosti se obvykle používá hodnota dosažená po 10 minutách (Wilson *et al.*, 1998). orientační hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.4.

Tab. 7.4: Indikativní hodnoty propustnosti betonového povrchu pomocí ISAT (Chan & Ji 1999, Claisse 2014).

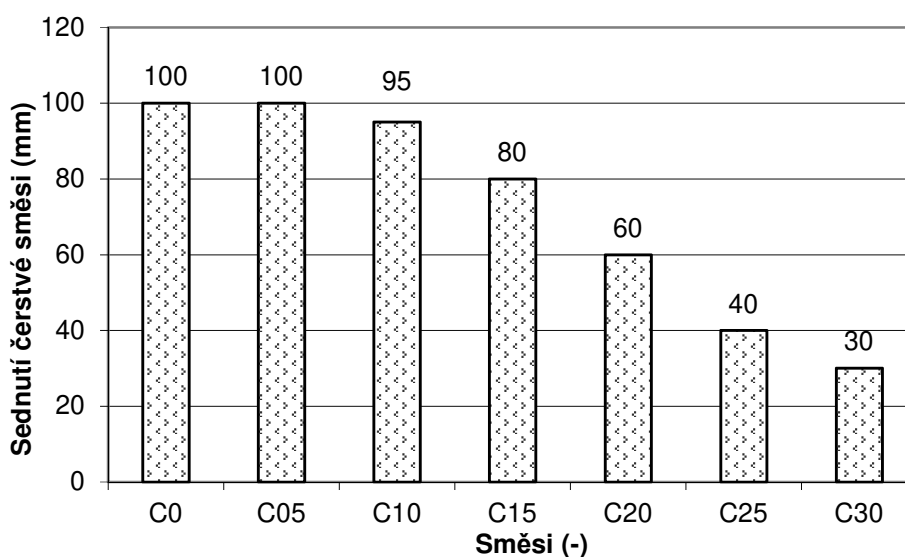
Klasifikace permeability povrchu betonu dle ISAT			
	nízká	průměrná	vysoká
ISAT _{10min} [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	< 0,25	0,25 – 0,50	> 0,50

Zrychlená zkouška karbonatce byla prováděna na zkušebních trámcích podle ČSN EN 13295 (2004). Zkušební tělesa jsou během zkoušky trvající 56 dní uložena v prostředí s 1 % CO₂ a relativní vlhkosti přibližně 70 %. Hloubka karbonatce je prováděna pomocí tradičního fenolftaleinového testu.

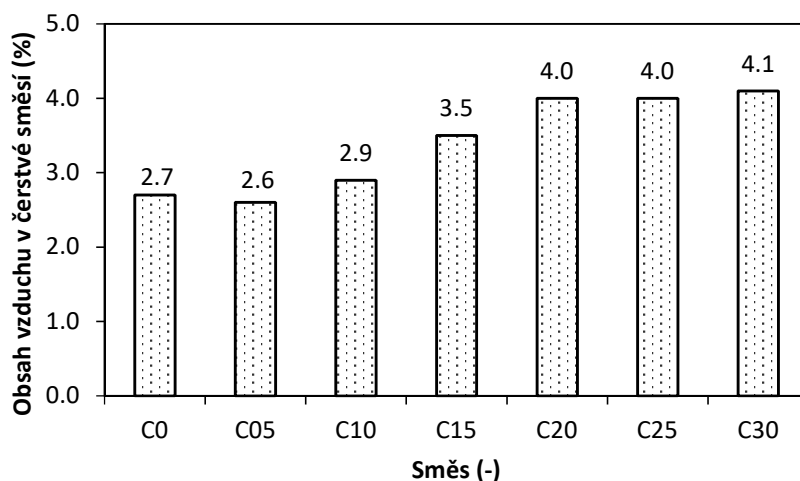
Do zkušebního programu byly zařazeny i zkoušky na cementových pastách, které svým složením odpovídaly testovaným směsím betonu. Vzorky past byly uchovávány společně se vzorky. Ve vybraných časových intervalech byl z těchto vzorků mletím připraven prášek, který byl podroben termogravimetrii pomocí přístroje Shimadzu DTG-60H užívající při měření normální vzdušné prostředí. Nárůst teploty při zkouškách byl nastaven na 10 °C/min. Tyto testy byly určeny pro monitoring pucolánové reakce, kdy na základě teplotního rozpadu hydratované cementové pasty bylo určeno hmotnostní podíly vody vázané v hydrátech (H) a portlanditu (CH). Přesné hranice rozpadu byly určeny na základě derivační křivky (DTG). Tato metodika koresponduje s postupem doporučeným De Weerd *et al.* (2011).

7.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze

Realizovaný program byl zaměřen na studium vlivu cihelného prachu na vlastnosti betonu. Vliv cihelného prachu na vlastnosti čerstvých směsí je uveden na Obr. 7.4 a 7.5. Je zde patrný negativní dopad použití této příměsi na zpracovatelnost čerstvé směsi. Tyto výsledky částečně korespondují s dřívějším výzkumem, kde Polozhyi *et al.* (2015) sledoval nutnost zvýšení dávky záměsové vody pro udržení stejné zpracovatelnosti. Tento jev je způsoben převážně přítomností hrubších částic cihelného prachu, které mají vysokou nasákavost (Torkittikul & Chaipanich; 2010). Na druhou stranu hrubší zrna přispívají k množství vzduchu v čerstvé směsi, jak je patrné na Obr. 7.4.



Obr. 7.4: Konzistence čerstvého betonu studovaných směsí.



Obr. 7.5: Obsah vzduchu v čerstvé směsi.

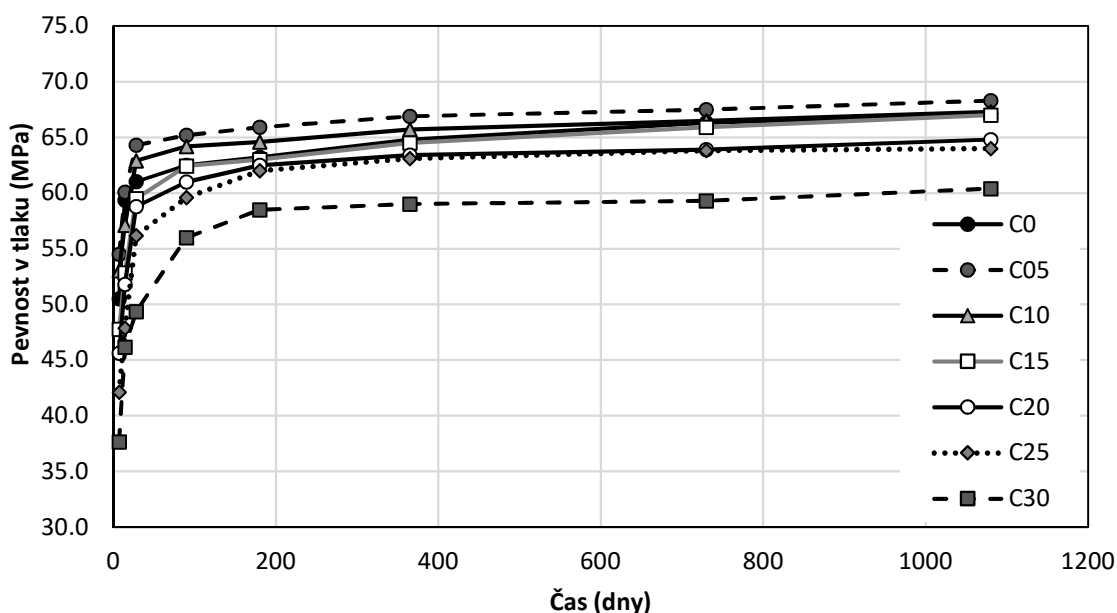
Provzdušnění vlivem použitého cihelného prachu se projevilo i na hodnotách objemové hmotnosti, jak je patrné z Tab. 7.5. Hodnoty objemové hmotnosti klesají úměrně s náhradou

cementu cihelným prachem, nicméně vlivem nižšího obsahu vzduchu u směsi s nejnižší náhradou cementu bylo zaznamenáno nepatrné zvýšení hodnot objemové hmotnosti. Vlivem postupné hydratace byl v čase u všech směsí zaznamenán nepatrný nárůst.

Tab. 7.5: Hodnoty objemové hmotnosti ztvrdlého betonu v čase.

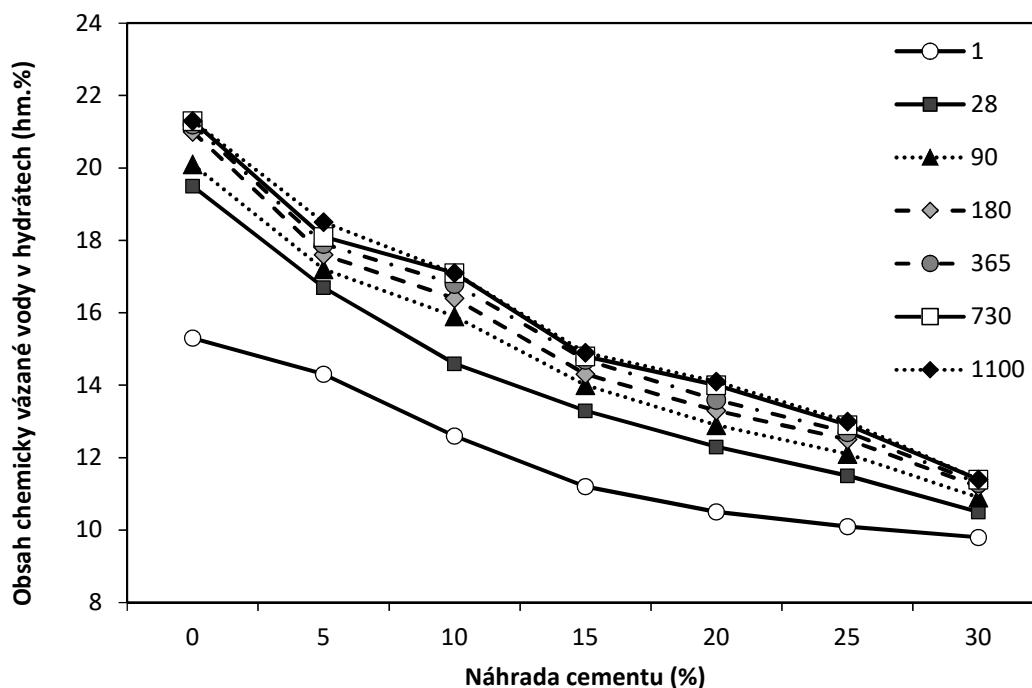
Hodnoty objemové hmotnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]						
Směs	28 dní	90 dní	180 dní	360 dní	720 dní	1080 dní
C0	2320	2330	2335	2335	2340	2340
C05	2330	2340	2345	2345	2345	2345
C10	2320	2325	2325	2330	2330	2330
C15	2295	2300	2300	2305	2310	2310
C20	2280	2285	2285	2285	2285	2290
C25	2270	2275	2280	2280	2280	2285
C30	2265	2270	2275	2275	2275	2280

Probíhající pucolánová reakce se významně projevila na dlouhodobých hodnotách pevnosti v tlaku, Obr. 7.6. Kromě směsi s nejvyšší aplikovanou náhradou cementu všechny ostatní směsi vykazovaly stejné nebo vyšší pevnosti v tlaku v porovnání s referenční sadou vzorků (C0). Postupný nárůst pevnosti v tlaku vlivem pucolánové reakce je patrný při porovnání směsí C0 a C25, která obsahuje 25% náhradu cementu, po jednom roce. Nicméně s ohledem na hodnoty dosažené po 90 dnech je evidentní, že cihelný prach působí i jako plnivo, kdy tedy vhodně doplňuje granulometrickou křivku.

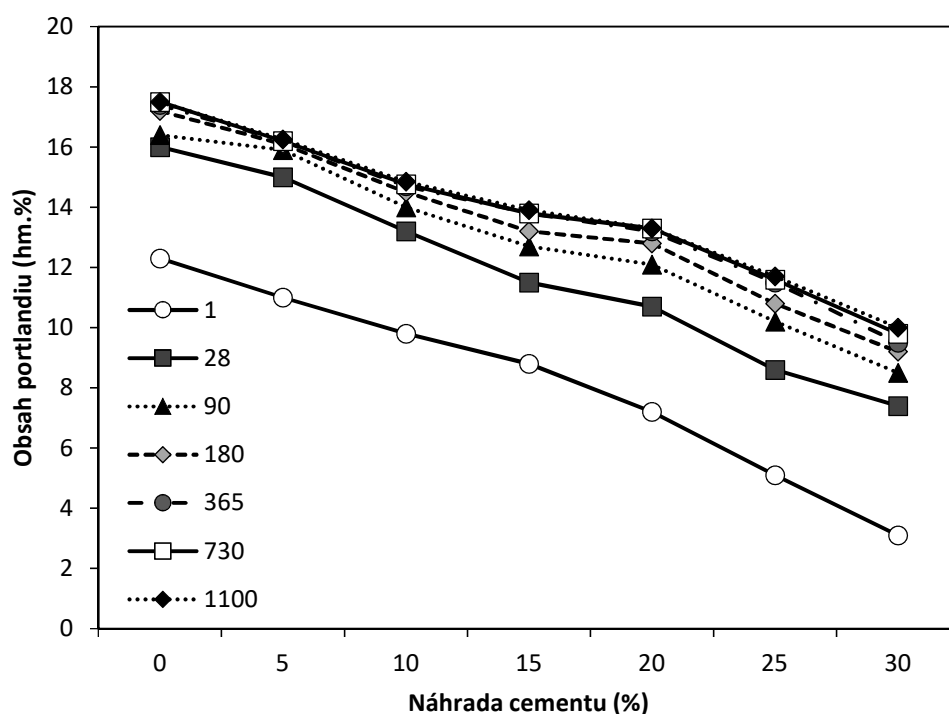


Obr. 7.6: Vývoj pevnosti v tlaku v čase.

Postupný vývoj mechanických vlastností dobře koresponduje s výsledky termogravimetrických měření na cementových pastách, na kterých byl sledován přírůstek chemicky vázané vody a obsah Ca(OH)_2 v čase, Obr. 7.7 a 7.8. V obou případech je patrný nárůst podílu hydrátů i portlanditu v čase, navíc však podíl hydrátů roste s rostoucí náhradou cementu cihelným prachem. Je však důležité podotknout, že podíl hydrátů stanovený uvedeným postupem zahrnuje i oblast rozkladu ettringitu. Dosažené výsledky korespondují se závěry, které publikovali De Weerd *et al.* (2011) a Bílek *et al.* (2015), kteří uvedenou metodu rovněž použili při studiu pojiv s obsahem úletového popílku či metakaolinu. Změny v obsahu sledovaných produktů hydratace se mění zásadně pouze během prvních 180 dní hydratace, následně jsou dosažená data velice podobná. V porovnání s výše uvedenými pracemi obsahuje použitý cihelný prach přibližně 40 % amorfních fází, které se mohou účastnit hydratace, zbytek je tvořen převážně inertními živci a křemenem (Keppert *et al.*, 2017). Tedy pokud cihelný prach nahrazuje cement v hmotnostním poměru 1:1, jako v tomto případě, celkový obsah hydratujících částí se snižuje s rostoucí náhradou cementu, což vede k postupnému poklesu množství chemicky vázané vody v hydrátech. Nicméně s ohledem na dosažené výsledky je zřejmé, že cihelný prach nevstupuje do pucolánové reakce pouze svými reaktivními fázemi, ale že inertní části cihelného prachu stimulují systém k vyšší aktivitě. Tento fyzikální efekt cihelného prachu je způsoben vyšší nasákavostí hrubších zrn cihelného prachu, které po smícháním s vodou efektivně sníží vodní součinitel směsi a při následné hydrataci poskytují hydratujícímu pojivu dostatek vody. Jedná se tedy o jistou formu vnitřního ošetřování. Tento efekt byl popsán v pracích, které publikovali Aslam *et al.* (2016), Kevern & Nowasell (2018) či Zou *et al.* (2018).



Obr. 7.7: Obsah chemicky vázané vody v hydrátech v cementových pastách.



Obr. 7.8: Obsah portlanditu v cementových pastách v čase.

Zkoušky ISAT byly provedeny ve vybraných časových intervalech na vzorcích ošetřovaných v laboratorním prostředí. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.6. Hodnoty dosažené po 28 dnech signalizují dobrou trvanlivost všech studovaných směsí. Nicméně se zvyšující se náhradou cementu docházelo ke zvyšování propustnosti povrchové vrstvy, což bylo do jisté míry způsobeno hrubšími zrny keramického prachu, která se vyznačují vysokou nasákavostí (Alves *et al.*, 2014). Dobře to dokládají výsledky, které publikovali Gonzales-Corominas & Etxeberria (2014), kteří nahradili hrubé kamenivo cihelným recyklátem, ale i přes vynikající mechanické parametry permeabilita směsí s vyšším podílem cihelného recyklátu rostla. Na hodnotách dosažených zkouškou ISAT se promítla postupná ztráta vlhkosti zkušebních směsí, ale i postupná karbonatace povrchové vrstvy, která přispívala k postupnému utěšňování struktury betonu. Dosažené výsledky korespondují s podobným programem, který byl zaměřený na různé minerální příměsi (Borosnyói, 2016).

Tab. 7.6: Hodnoty ISAT_{10min} [g·m⁻²·s⁻¹] v čase.

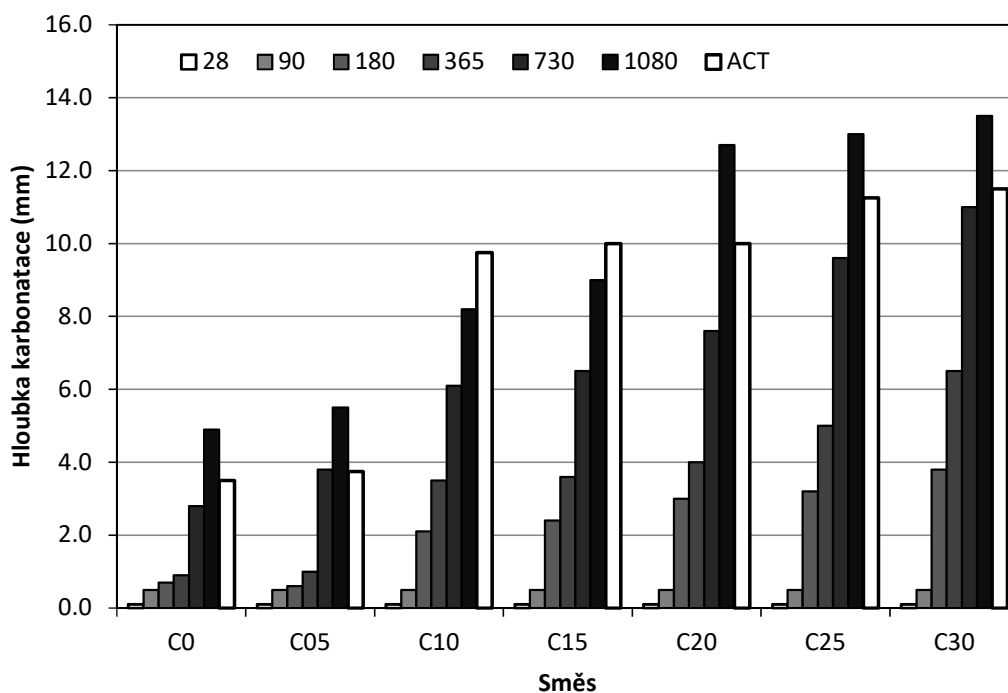
Směs	Hodnoty zkoušky ISAT _{10min} [g·m ⁻² ·s ⁻¹]					
	28 dní	90 dní	180 dní	365 dní	730 dní	1080 dní
C0	0,13	0,19	0,19	0,20	0,19	0,17
C05	0,12	0,17	0,20	0,22	0,22	0,21
C10	0,12	0,16	0,21	0,23	0,23	0,22
C15	0,16	0,17	0,21	0,21	0,23	0,24
C20	0,16	0,19	0,21	0,25	0,25	0,25
C25	0,16	0,18	0,20	0,21	0,25	0,27
C30	0,16	0,17	0,18	0,20	0,25	0,28

Výsledky zkoušek hloubky průsaku tlakovou vodou, prezentované v Tab. 7.7, stejně jako zkoušky ISAT indikovaly zvýšení propustnosti betonu se zvyšující se náhradou cementu. Minerální příměsi obvykle vedou k postupnému snižování propustnosti betonu (Lee *et al.*, 2012), ovšem s ohledem na granulometrii použitého cihelného prachu nelze tuto příměs srovnávat s jinými mnohem jemnějšími příměsmi. Uvážíme-li způsob provádění zkoušky a možnou přesnost měření, jsou dosažené hodnoty pro jednotlivé směsi poměrně konstantní. Na základě dosažených hodnot lze odhadnout, že na každých 5 % náhrady cementu cihelným prachem připadá zvýšení průsaku o přibližně 1,5 mm. Tomuto trendu se vymyká pouze směs s nejnižším podílem cihelného prachu, což je dáno i vyšší objemovou hmotností.

Tab. 7.7: Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou (mm) v čase.

Směs	Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou [mm]					
	28 dní	90 dní	180 dní	365 dní	730 dní	1080 dní
C0	22	20	18	18	20	21
C05	25	25	25	23	20	19
C10	23	20	20	18	20	22
C15	30	22	24	22	23	22
C20	32	25	25	22	21	22
C25	28	20	22	20	21	22
C30	30	30	30	31	30	31

Zvýšenou permeabilitu směsí s přidavkem cihelného prachu potvrdily i karbonatační zkoušky, které byly provedeny na vzorcích ošetřovaných v laboratorním prostředí. Zrychlený test karbonatce (ACT) byl proveden na vzorcích stáří 90 dní, Obr. 7.9.



Obr. 7.9: Vývoj hloubky karbonatce v čase.

Výsledky zrychleného testu korespondovaly s hloubkou karbonatace dle fenolftaleinového testu po 3 letech v přirozených podmínkách. Referenční směs vykazovala po třech letech hloubku karbonatace 4,9 mm, ovšem se zvyšující se náhradou cementu cihelným prachem docházelo k postupnému zvyšování na 5,5, 8,2, 9,0, 12,7, 13,0 a 13,5 mm. Na zhoršenou odolnost vůči karbonataci směsí s přidavkem cihelného prachu upozornil ve svém výzkumu i Cheng *et al.* (2014). Je to do značné míry důsledek poklesu pH vlivem spotřeby portlanditu během purolánové reakce.

Tab. 7.8: Součinitel mrazuvzdornosti (-) v čase.

Směs	Součinitel mrazuvzdornosti (-)				
	90 dní	180 dní	365 dní	730 dní	1080 dní
C0	0,90	0,92	0,93	0,94	0,93
C05	1,07	1,04	1,02	1,00	0,98
C10	1,14	1,09	1,07	1,07	1,06
C15	1,05	1,05	1,02	1,00	0,99
C20	0,92	0,93	0,91	0,90	0,91
C25	0,81	0,84	0,83	0,83	0,84
C30	0,77	0,78	0,78	0,79	0,80

Výsledná odolnost vůči mrazuvzdornosti byla vyjádřena pomocí součinitele mrazuvzdornosti po 100 cyklech pro jednotlivá stáří zkušebních těles, Tab. 7.8. Dosažené výsledky korespondují se zvýšením reziduálních mechanických parametrů vzorků vystavených cyklickému zmrazování v případě použití aktivních minerálních příměsí (Sahmaran *et al.* 2013, Soriano *et al.* 2013). Tento jev bývá vysvětlován zpřístupněním nezhydratovaných částí pojiva vlivem mrazu, čímž takto zatížené vzorky betonu dosáhnou vyššího stupně hydratace. Tento předpoklad potvrzuje i klesající trend mrazuvzdornosti v čase i u směsí, které dříve vykazovaly její zvýšení. Podobný jev byl dokumentován i v navazujícím výzkumu, který byl zaměřen na vliv popílku (Huňka & Reiterman, 2019).

7.4 Poloprovozní zkoušky

Výsledky laboratorních zkoušek, které obsahovaly i akcelerované trvanlivostní zkoušky, poukázaly na dobré mechanické parametry betonu s příměsí cihelného prachu, nicméně z pohledu dlouhodobé trvanlivosti není použití této příměsí vhodné v případě vyztuženého konstrukčního betonu. A to především vlivem zvýšené permeability, která determinuje výslednou odolnost vůči vnějšímu prostředí. Z tohoto důvodu byla jako perspektivní aplikace studována možnost využití cihelného prachu při výrobě nevyztužených vibrolisovaných prvků, Obr. 7.10. V navazující experimentální části byla tedy pozornost věnována poloprovozním testům, při nichž byly vyrobeny série vzorků vibrolisovaných prvků, které byly v čase podrobeny sérii vybraných testů. Prvky byly vyrobeny v reálných průmyslových podmínkách ve dvou krocích. Jelikož cihelný prach ovlivňuje výsledný odstín betonu (Bertolini & Lollini, 2011), byla tato příměs dávkována pouze do jádrového betonu, který tvoří nosnou část vibrolisovaného prvku, Obr. 7.11.



Obr. 7.10: Vyrobené vibrolisované prvky.

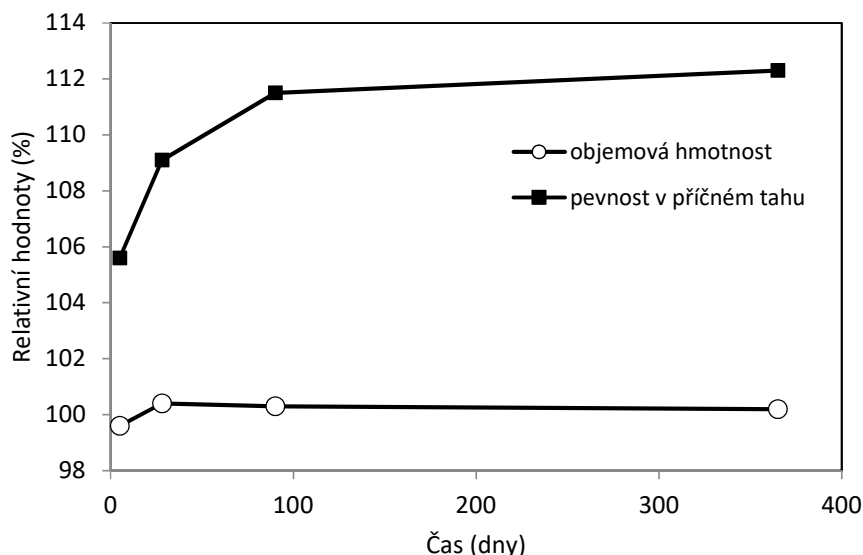
Složení nášlapné, tedy viditelné, části prvku tloušťky přibližně 10 mm nebylo měněno. Formy jsou tak nejprve naplněny směsí pro nášlapnou vrstvu a poté jsou naplněny tzv. jádrovým betonem. Při těchto zkouškách byla sledována pouze 15% náhrada cementu cihelným prachem. V průběhu výroby nebylo nutné přidávat další záměsovou vodu. Při těchto zkouškách byla vyrobena i série referenčních zkušebních těles bez přídavku studované příměsi. Zkoušky na ztvrdlém betonu byly zaměřeny na pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 1338 (2004) a mrazuvzdornost dle ČSN 731322 (2003).



Obr. 7.11: Řez vyrobeným vibrolisovaným prvkem.

Vedle eliminace nebezpečí koroze výztuže zvolený charakter výrobku pro poloprovozní testování potlačuje i negativní dopad cihelného prachu na zpracovatelnost čerstvé směsi (Sadek & Nouhy, 2014; De Brito *et al.*, 2005). Zvolená míra náhrady cementu respektovala požadavek na počáteční hodnoty mechanických parametrů, což je pro vibrolisované prvky klíčový aspekt s ohledem na jejich rychlou distribuci.

Jelikož si komerční partner, u něhož byla poloprovozní výroba realizována, nepřál zveřejnění absolutních hodnot, jsou dosažené výsledky částečně prezentovány jako relativní hodnoty vůči referenční směsi. Rozdíly v objemové hmotnosti a pevnosti v příčném tahu směsi s přídavkem cihelného prachu jsou prezentovány na Obr. 7.12. Z praktického pohledu jsou velice pozitivní hodnoty pevnosti v příčném tahu po pěti dnech, které byly přibližně o 5 % vyšší než referenční směs prezentující běžnou výrobu. Výsledky objemové hmotnosti jsou u směsi s cihelným prachem nepárně vyšší, což naznačuje vyšší míru zhutnění. Tyto výsledky korespondují se závěry výzkumu, který byl zaměřen na využití mramorového prachu (Gencel *et al.*, 2012), který podobně jako cihelný prach zhoršuje zpracovatelnost čerstvé směsi (Ashish, 2018).

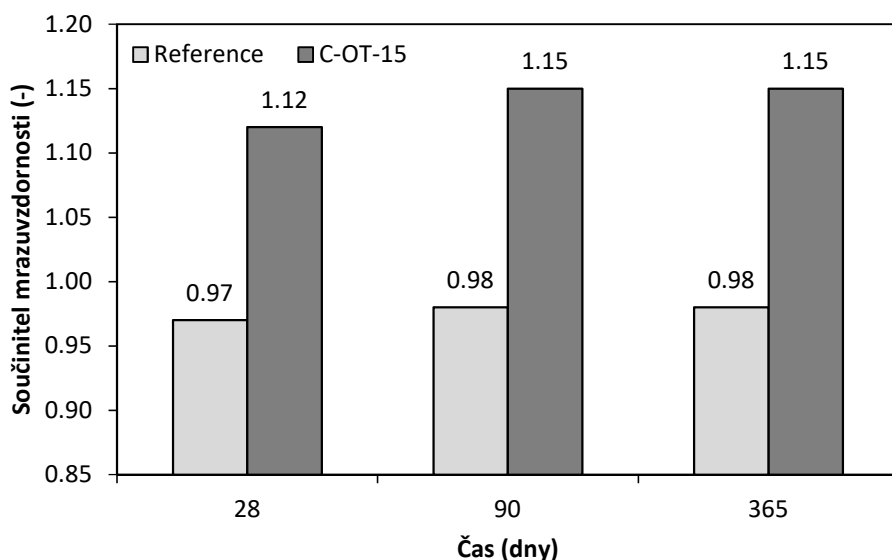


Obr. 7.12: Vývoj vlastností vibrolisovaných prvků.

Hlavní částí poloprovozních zkoušek však bylo ověření trvanlivostních parametrů vibrolisovaných prvků, u nichž byla část cementu jádrového betonu nahrazena cihelným prachem. V případě těchto prvků se jedná o mrazuvzdornost (Wang *et al.*, 2014). Výsledné hodnoty po 100 cyklech stanovené pro stáří 28, 90 a 365 dní jsou uvedeny na Obr. 7.13. Z výsledků je evidentní, že náhradou cementu cihelným prachem došlo k zásadnímu zlepšení odolnosti vůči mrazu. Podobných výsledků bylo dosaženo v případě použití mramorového prachu (Gencel *et al.*, 2012).

Producent cihelného prachu odhadl cenu tohoto materiálu na přibližně 15 Kč/tunu, což je v porovnání s cementem výrazně nižší hodnota. Navíc distribuce cihelného prachu by mohla být realizována rovněž pneumaticky, tudíž by u koncového uživatele nemuselo dojít k zásadním technologickým opatřením. S ohledem na provedenou náhradu a nezhoršené parametry vůči referenční směsi, která prezentuje současnou výrobu, byla proveden odhad

úspor při použití cihelného prachu. Ten činil přibližně 1 Kč/m² hotové dlažby. Tato zdánlivě nepatrná úspora však při objemech výroby vibrolisované dlažby může činit značnou konkurenční výhodu. S ohledem na výrazné zlepšení parametrů směsi s cihelným prachem je oprávněné se domnívat, že úroveň náhrady cementu cihelným prachem u vibrolisovaných prvků může být ještě vyšší. Bohužel širší uplatnění tohoto materiálu je blokováno absencí automatického zařízení pro odběr vznikajícího prachu v místě jeho vzniku, tedy u producenta, pro kterého by vstup na trh s tímto materiálem znamenal počáteční investice okolo 30 mil. Kč.



Obr. 7.13: Součinitel mrazuvzdornosti vibrolisovaných prvků (-).

7.5 Perspektivy použití cihelného prachu

Provedený program byl zaměřen na možnosti využití cihelného prachu jakožto náhrady portlandského cementu. Poloprovozní testy, které následovaly po fázi laboratorních zkoušek, potvrdily jistý praktický potenciál. Dosažené výsledky mohou být shrnuty následovně:

- Použitím cihelného prachu dochází ke zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu v případě tradičního transportu betonu. Z tohoto pohledu je tak 10% náhrada limitní.
- Náhrada do 15 % cementu nevede ke ztrátě mechanických parametrů, nicméně podle termogravimetrických měření je efekt působení cihelného prachu spíše povahy fyzikální.
- Se zvyšující se dávkou cihelného prachu klesá hodnota objemové hmotnosti.
- Zkoušky zaměřené na permeabilitu prokázaly negativní vliv cihelného prachu na beton. Zejména dosažené hodnoty odolnosti vůči karbonataci signalizují značné riziko při použití do vyztuženého betonu.
- Odolnost vůči mrazu se zvyšuje do 15% náhrady cementu cihelným prachem.
- Poloprovozní testy prokázaly použitelnost cihelného prachu do jádrového betonu při úrovni náhrady 15 %. Při této kompozici vykazovaly srovnatelné nebo lepší parametry vůči referenční směsi. Použití cihelného prachu může přinést značné finanční úspory.

8. Racionální návrh betonových směsí s přidavkem minerálních příměsí

8.1 Dosavadní přístup při formulaci směšných pojiv

I když současný výzkum potvrdil široký potenciál různých minerálních příměsí, které vybočují z ČSN EN 206+A1 (2018), je zde zřejmý nedostatek v absenci efektivního nástroje pro posouzení vhodnosti dané příměsí do betonu na základě jejího charakteru. Tento systémový nedostatek značně přispívá ke snížené efektivitě ve využívání odpadních materiálů, což ve svém důsledku blokuje snižování negativních dopadů plynoucích z výroby cementu na životní prostředí; zároveň rovněž snižuje možnosti využívání z dlouhodobého pohledu výhodnějších pojiv. Proto byl na modelovém případě otestován tzv. racionální návrh pojiva, který zohledňuje reálný reakční potenciál dané příměsí plynoucí z jejího fázového složení. Tento přístup byl testován na sérii samozhutnitelných betonových směsí s použitím ternárního pojivového systému – portlandský cement – mletý vápenec – úletový popílek. Vhodnost tohoto přístupu byla posuzována na základě komplexního systému metod se zaměřením na trvanlivost a predikci životnosti. Nicméně tento nový koncept by mohl významně přispět k širšímu uplatnění dalších alternativních příměsí. Výsledky níže uvedeného programu již byly publikovány (Reiterman *et al.*, 2020).

8.2 Experimentální program

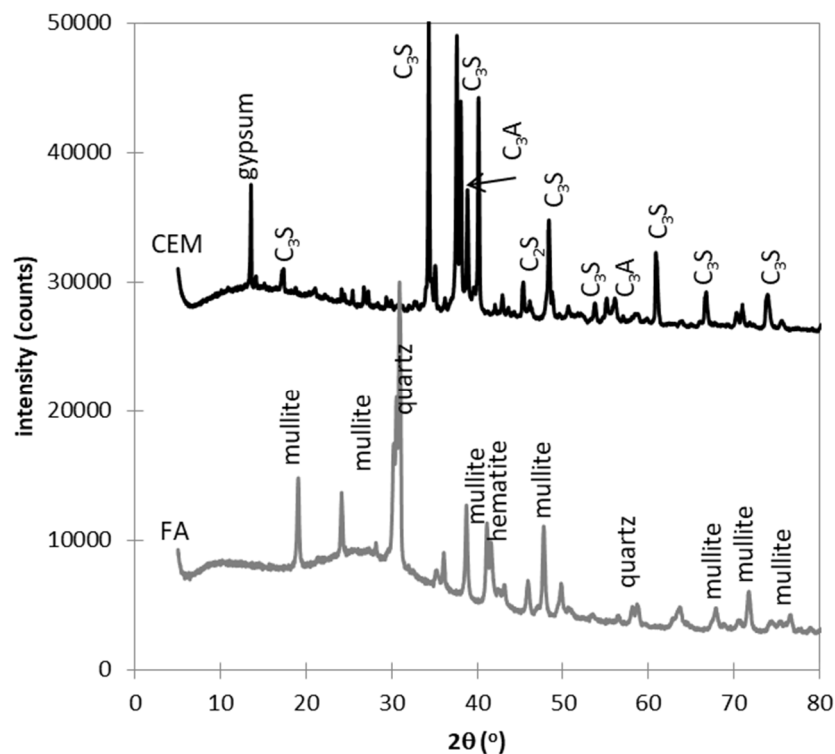
Provedený experimentální program byl zaměřen na racionální návrh směsí samozhutnitelného betonu nižších pevnostních tříd, kde byla použita kombinace mletého vápence (LS) a úletového popílku (FA) jakožto částečné náhrady cementu (PC). Hlavním cílem programu bylo zohlednění charakteru použité aktivní minerální příměsí při návrhu pojivového systému, tedy pouze aktivní části dané příměsí, která vstupuje do pucolánové reakce. Chemické vlastnosti použitých aktivních příměsí stanovené pomocí XRF (Thermo ARL 9400 XP) jsou uvedeny v Tab. 8.1. XRD analýza byla provedena užitím přístroje PAnalytical Aeris a software Profex (verze 3.12.1). Množství amorfního podílu, které bylo pro návrh klíčové, bylo stanoveno pomocí vnitřního standardu (20 % ZnO). Výsledný difraktogram je uveden na Obr. 8.1. Numerické vyjádření dosažených hodnot pro popílek je uvedeno v Tab. 8.2.

Tab. 8.1: Chemické složení a vlastnosti použitých aktivních příměsí.

Pojivová složka	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)
Cement	18.1	6.4	2.4	64.9	1.0	0.3	4.9	1.2	0.8	1.1
popílek	52.4	35.9	4.9	1.2	0.8	-	0.2	1.4	2.4	2.8

Tab. 8.2: Mineralogické složení použitého popílku.

Amorfní podíl	60.0 %
Křemen	7.9 %
Mulit	28.8 %
Magnesioferit	1.5 %
Anhydrit	0.7 %
Hematit	1.2 %



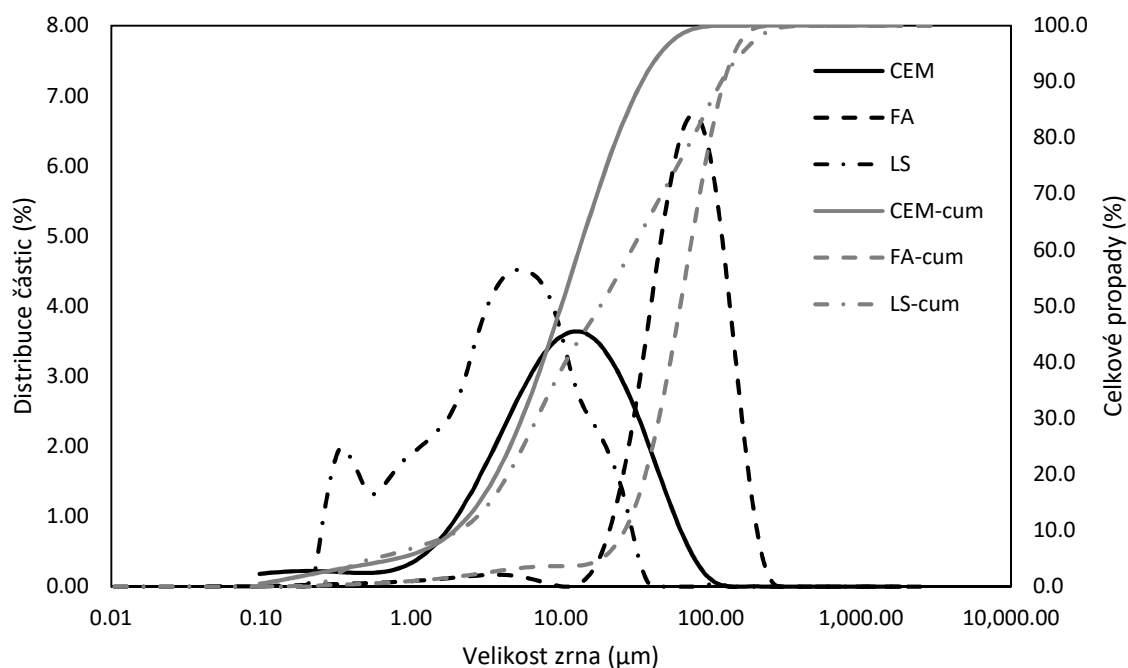
Obr. 8.1: Difraktogram použitého cementu a popílku.

8.2.1 Racionální návrh pojiva

Tento nový přístup pro formulaci pojiva je založen na zohlednění fázového složení použité aktivní minerální příměsi. Použitý popílek obsahoval 60 % amorfního podílu (Tab. 8.2), který se může účastnit pucolánové reakce, zbylá část pak působí jako inertní filer. Při vlastním návrhu pojiva je tak cement nahrazován výhradně amorfní částí popílku. Inertní část popílku byla při návrhu pojiva kompenzována snížením dávky mletého vápence, který je rovněž považován za inertní plnivo. Tato filozofie návrhu směsi byla představena v práci, kterou publikoval Keppert *et al.* (2017) věnovanou výzkumu vápenných malt s příměsí cihelného prachu. V tomto výzkumu však byla inertní část cihelného prachu kompenzována snížením dávky písku. Nicméně v případě ternárních směsí tento návrh dosud nebyl použit. Zásadní výhodou tohoto konceptu je snadné využití i pro další příměsi, které vykazují nějakou pucolánovou aktivitu. V tomto programu byla náhrada cementu zvyšována po 10 % až do náhrady 30 %. U jednotlivých směsí tak se zvyšující se náhradou cementu klesal podíl mletého vápence. D_{50} použitého vápence bylo 17 μm , celkový obsah CaCO_3 byl 99,2 %, zbytek je tvořen převážně MgCO_3 . Jako cement byl použit CEM I 52,5 R o D_{50} 10 μm . Vedle toho použitý popílek bylo možné charakterizovat D_{50} 62 μm a pucolánovou aktivitou dle Chapelle testu 627 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. Distribuce částic jednotlivých pojivových složek je uvedena na Obr. 8.2. Složení jednotlivých směsí je uvedeno v Tab. 8.3, kde označení jednotlivých samozhutnitelných směsí označuje použitou náhradu cementu dle výše popsaného postupu. Proporce jednotlivých směsí, které konvenují tradičnímu pohledu jsou rovněž uvedeny v Tab. 8.3.

Tab. 8.3: Složení zkušebních směsí samozhutnitelného betonu (kg/m³).

Složky	FA-R	FA-10	FA-20	FA-30
CEM I 52.5 R (PC) (kg/m ³)	355.0	319.5	284.0	248.5
Mletý vápenec (LS) (kg/m ³)	95	71.3	47.7	24.0
Úletový popílek (FA) (kg/m ³)	0	59.2	118.3	177.5
písek 0–4 mm (kg/m ³)	1030	1030	1030	1030
Drť 4–8 mm (kg/m ³)	270	270	270	270
Drť 4–8 mm (kg/m ³)	400	400	400	400
plastifikátor (kg/m ³)	3.8	3.8	3.8	3.8
Zpomalovač tuhnutí (kg/m ³)	1.5	1.5	1.5	1.5
voda (kg/m ³)	190	190	190	190
PC-FA-LS (%)	79.0-0-21.0	71.0-13.1-15.9	63.1-26.2-10.6	55.2-39.4-5.3
w/(PC + FA + LS)	0.42	0.42	0.42	0.42
w/(PC + FA)	0.54	0.50	0.47	0.45



Obr. 8.2: Distribuce částic použitých pojivových složek.

Obsah přírodního těžného křemičitého písku frakce 0-4 mm a drceného kameniva frakcí 4-8 mm a 8-16 mm byl totožný pro všechny směsi. Do směsí byl přidávány dvě chemické přísady pro úpravu vlastností čerstvých směsí. Použitý plastifikátor na bázi polykarboxylátů byl použit z důvodu požadavku na samozhutnitelnost směsí bez potřeby zvyšovat vodní součinitel. Jelikož je u SCC směsí vyžadována obvykle delší doba zpracovatelnosti, byl použit i zpomalovač tuhnutí. Dávkování použitých chemických přísad reflektovalo doporučení výrobce a předchozí zkušenosti. Použitá dávka vody i přísad byla totožná pro všechny použité směsi.

8.2.2 Použité metody

Zpracovatelnost čerstvé směsi byla posuzována pomocí třech tradičních metod pro SCC směsi – zkouška rozlitím (ČSN EN 12350-8, 2010), J-ring (CSN EN 12350-12, 2010) a L-box (CSN EN 12350-10, 2010). S ohledem na plánované zkoušky byl pomocí tlakové metody stanovován i obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7 (2009). Vlastnosti čerstvých směsí byly měřeny přibližně po 10 minutách od zamíchání.

Navazující zkoušky ztvrdlého betonu byly zaměřeny na stanovení základních mechanických parametrů a vybraných trvanlivostních zkoušek. Pevnost v tlaku byla stanovována ve vybraných časových etapách užitím standardních zkušebních krychlí o hraně 150 mm podle ČSN EN 12390-3 (2009); v totožných časových intervalech byla stanovována i pevnost v tahu ohybem užitím zkušebních trámů 100 × 100 × 400 mm při čtyřbodovém uspořádání dle ČSN EN 12390-5 (2009).

Zkouška ISAT byla použita pro orientační stanovení povrchové nasákavosti povrchu betonu. Pro tuto zkoušku byly použity zkušební krychle, které byly před vlastní zkouškou 72 hod. vysoušeny při 60 °C a poté ponechány v laboratorním prostředí na dalších 24 hodin. Indikativní posouzení permeability povrchu betonu touto zkouškou bylo představeno v předchozí kapitole.

Propustnost ztvrdlého betonu byla sledována i použitím zkoušky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 (2009), kdy je zkušební krychle vystavena tlakové vodě o 0,5 MPa po 72 hodin. Poté je těleso porušeno příčným tahem a je zaznamenána maximální viditelná hloubka průsaku.

Pro posouzení trvanlivosti byla použita i zkouška migrace chloridových iontů provedená podle doporučení NT Built 492 (1999). Koeficient migrace chloridových iontů při neustáleném toku D_{ssm} je vypočten na základě průniku chloridů do válcového tělesa o průměru 100 mm a výšce 50 mm. Délka trvání testu a použité napětí je závislé na prvotní odezvě zkušební vzorku při zahájení testu. Výsledný průnik je detekován užitím 0,1 M roztoku dusičnanu stříbrného. Klasifikace kvality betonu na základě této zkoušky je uvedena v Tab. 8.4.

Tab. 8.4: Klasifikace betonu dle D_{ssm} .

Koeficient migrace chloridových iontů D_{ssm} [m ² /s]	Odolnost vůči průniku chloridů			
	nepřijatelná	přijatelná	dobrá	Velmi dobrá
	$> 16 \cdot 10^{-12}$	$8 - 16 \cdot 10^{-12}$	$2 - 8 \cdot 10^{-12}$	$< 2 \cdot 10^{-12}$

Zkoušky mrazuvzdornosti byly prováděny dle doporučení ČSN 731322 (2003) na trámcích 100 × 100 × 400 mm. S ohledem na délku trvání zkoušky a charakter zkušebních směsí byly testy zahájeny až po 90 dnech zrání.

Volné smrštění bylo stanovováno na válcích průměru 100 mm a výšky 200 mm. Tyto testy byly prováděny pro dva různé režimy ošetřování – vodní uložení a normální laboratorní prostředí. Každý ze zkušebních válců byl vybaven kovovými terčíky pro fixaci digitálního úchylkoměru, kterým byla zaznamenávána délková změna zkušebních těles. Měření bylo zahájeno ihned po odbednění.

Zrychlená zkouška karbonatace (ACT) byla provedena podle ČSN 13295 (2004), která doporučuje užití 1% koncentraci CO₂ po dobu 56 dní při relativní vlhkosti 70-80 %. Zkušební trávce 100 × 100 × 400 mm byly po 90 dnech vodního uložení na 4 týdny ponechány v normálním laboratorním prostředí, poté byly podrobeny zrychlené zkoušce. Referenční sada těles byla po 90 dnech vodního uložení trvale uložena v laboratorních podmínkách. Hloubka karbonatace byla prováděna pomocí běžného fenolftaleinového testu. Výsledek zkoušky byl vyjádřen pomocí koeficientu karbonatace K_{field} podle prvního Fickova zákona (8.2),

$$d(t) = d_0 + K_{field} \times \sqrt{t} \quad (8.2)$$

kde $d(t)$ je hloubka karbonatace (mm) po délce expozice t (rok), d_0 je počáteční hodnota hloubky karbonatace (0 mm) a K_{field} je koeficient karbonatace (mm/rok^{0,5}).

Predikci životnosti konstrukce z vyztuženého betonu lze provést na základě požadavku na pasivaci výztuže, tedy minimální hodnotu pH betonu. Charakteristická hloubka karbonatace $x_{c,c}$ může být snadno odvozena z modelu dle EHE-08 (2008) (8.3),

$$x_{c,c}(t_{SL}) = K_{field} \sqrt{\gamma_f \times t_{SL}} \quad (8.3)$$

kde γ_f je bezpečnostní faktor ($\gamma_f = 1.10$ podle EHE 08) a t_{SL} je navrhovaná životnost odvislá podle významu stavby. Betonové konstrukce patřící do klíčové infrastruktury jako např. mosty, dálnice případně jiné civilní stavby mají předepsanou životnost 100 let. Tento postup pro posouzení životnosti použil Sáez del Bosque *et al.* (2020).

Jelikož do experimentálního programu bylo zařazeno více trvanlivostních parametrů, byl pro celkové zhodnocení použit index ztráty trvanlivosti DLI (durability loss index), který je vypočítáván na základě úbytku dané vlastnosti vůči referenční směsi dle (8.4),

$$DLI = 100 \times \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i \cdot f_i}{f_{i,control}} \quad (8.4)$$

kde α_i je váha pro danou vlastnost, jejíž hodnota se pohybuje od 0 do 1, přičemž součet všech α_i je roven 1; f_i je absolutní hodnota vybrané vlastnosti dané směsi betonu; a $f_{i,control}$ je absolutní hodnota totožné vlastnosti u kontrolní směsi. Hodnota α_i může být volena podle celkového významu dané vlastnosti a může být výrazně odlišná pro jednotlivé zkušební postupy či očekávanou expozici. Pokud nemá pro posouzení trvanlivosti některá ze studovaných vlastností význam, může ji být v takovém případě přidělena nulová hodnota. Uvedený postup umožňuje snadnou diskretizaci pro posouzení celkové trvanlivosti mnoha směsí, při jejichž hodnocení byly použity totožné metody a která navíc nemůže být stanovena pomocí jedné zkoušky. Tuto metodu použil ve svém výzkumu Mostofinejad *et al.* (2016).

V realizovaném programu nebyly do výpočtu DLI zahrnuty mechanické parametry, protože ty nejsou primárními ukazateli trvanlivosti betonu. Celkově bylo zahrnuto šest aspektů, což představuje průměrnou hodnotu α 0,17 pro každou studovanou vlastnost, pokud bychom chtěli každému zkušebnímu postupu stejnou váhu. Tento přístup použil Mostofinejad *et al.* (2016). Nicméně z návrhu experimentálního programu je zřejmé, že některé procedury jsou si poměrně podobné nebo jejich význam není příliš zásadní. Proto použitým šesti parametrům

byly přiděleny odlišné váhové hodnoty, které tak lépe vystihovaly význam dané vlastnosti i s ohledem na celkovou strukturu experimentu.

Pro sestavený program experimentů byla váha zvýšena u mrazuvzdornosti s ohledem na strukturní porušení betonu a rozvoj trhlin, které zásadním způsobem přispívají ke korozi výztuže. Ze stejného důvodu byla navýšena i váha pro zrychlenou karbonatační zkoušku. Nepatrně vyšší hodnota byla navržena v případě zkoušky migrace chloridových iontů, která má význam zejména s ohledem na zimní údržbu v rámci dopravních staveb. Navíc průnik chloridových iontů přispívá ke korozi výztuže a podporuje rozvoj ASR. Naproti tomu pro zkoušku ISAT byla váhová hodnota α snížena, protože permeabilita byla částečně zohledněna při zkoušce průniku chloridových iontů; navíc povrchové porušení je snadno detekováno a opraveno. Rovněž v případě zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou byla hodnota α snížena i s ohledem na nízkou rozlišovací schopnost tohoto postupu. Byl snížen i význam volného smrštění, neboť to je zohledněno už při návrhu vložení výztuže. Navržené hodnoty váhového koeficientu α pro jednotlivé postupy jsou uvedeny v Tab. 8.5.

Tab. 8.5: Navržené hodnoty váhového koeficientu α (-).

mrazuvzdornost	ISAT	ACT	D _{ssm}	Hloubka průsaku tlakovou vodou	smrštění
0,25	0,10	0,25	0,20	0,10	0,10

8.3 Dosažené výsledky a jejich diskuze

Provedený experimentální program byl zaměřen na posouzení nového konceptu návrhu ternárního pojiva použitého pro samozhutnitelný beton. Referenční směs byla formulována na základě ternárního pojivového systému, který se skládal z cementu, úletového popílku a mletého vápence. Ve zkušebních směsích byl použitý cement nahrazován amorfním podílem úletového popílku, přičemž inertní část popílku byla kompenzována snížením dávky mletého vápence. Posouzení této metody se týkalo vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu se zaměřením na dlouhodobou trvanlivost a odhad životnosti.

8.3.1 Čerstvý beton

Pro prokázání samozhutnitelnosti betonu je zapotřebí použít širší sadu zkoušek, aby byly postiženy všechny aspekty takto koncipované směsi. V provedeném programu byly použity tři postupy používané pro popis vlastností čerstvého samozhutnitelného betonu, výsledky jsou uvedeny v Tab. 8.6. Jelikož byla prováděna i zkouška mrazuvzdornosti na ztvrdlém betonu, byl na čerstvých směsích stanovován i obsah vzduchu, rovněž uvedený v Tab. 8.6.

Tab. 8.6: Vlastnosti čerstvých směsí.

Vlastnosti čerstvé směsi	FA-R	FA-10	FA-20	FA-30
Obsah vzduchu (%)	5,0	5,3	5,2	4,9
Rozlití (mm)	620	690	650	620
J-Ring test (mm)	590	680	620	590
L-Box test (-)	0,92	0,95	0,96	0,95

K potlačení vlivu cyklického zmrazování jsou u běžného betonu vyžadovány přibližně 4 % vzduchu (Sun & Scherer, 2010). V případě použití minerálních příměsí dochází ke zvýšení obsahu vzduchu v čerstvém betonu, zvláště jsou-li dávkovány jako náhrada cementu (Puthipad

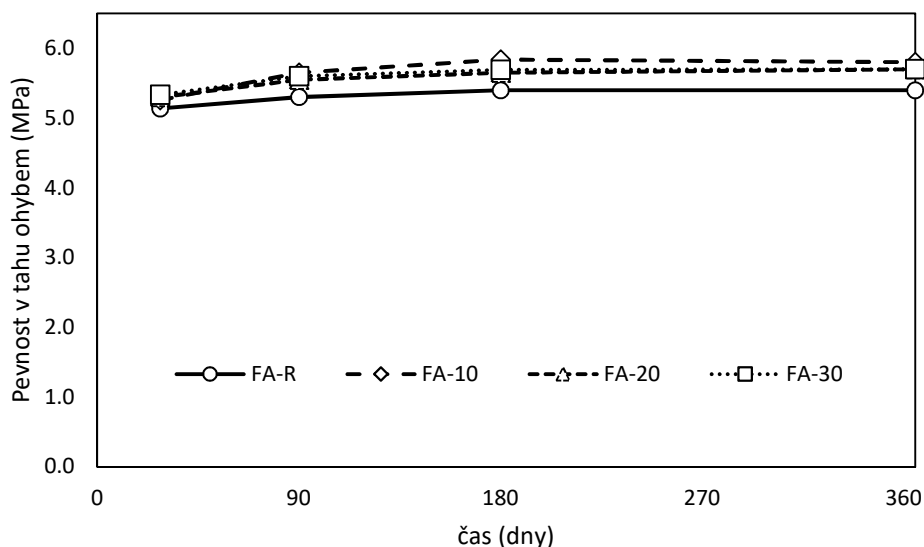
et al., 2016; Rath *et al.*, 2017; Güneyisi *et al.*, 2013). Distribuce jemných pórů v betonu je dána ložiskovým efektem popílku, kdy jejich počet narůstá se zvyšující se dávkou popílku (Kurda *et al.*, 2017). Vedle toho je však důležitá stabilita vzduchových bublin během ukládání a tuhnutí, která může být zlepšena prodloužením času míchání (Rath *et al.*, 2017), úpravou složení směsi (Puthipad *et al.*, 2016; Puthipad *et al.*, 2018), použitím chemických přísad (Jones *et al.*, 2016; Mendes *et al.*, 2017) nebo jinými speciálními postupy (Ghorbani *et al.*, 2019). Obecně je množství vzduchu v čerstvé směsi dáno podílem jemných částic (Zhang, 1996). Nicméně v dosažených výsledcích je vidět, že u směsí s 10% a 20% náhradou cementu došlo ke zvýšení obsahu vzduchu. Vedle toho nejvyšší použitá náhrada vedla k nepatrnému snížení v porovnání s referenční směsí. Tento jev byl zaznamenán i v jiných pracích (Puthipad *et al.*, 2016), kde byl sledován vliv zvyšující se dávky popílku na vlastnosti čerstvé směsi. Je však třeba podotknout, že v provedeném programu se zvyšujícím se podílem popílku klesala dávka mletého vápence, proto není možné změny obsahu vzduchu přičítat pouze výhradně popílku.

Výsledky zkoušky rozlití, J-ring testu a zkoušky L-box vykázaly velmi podobný trend, tedy u směsi s nejvyšší náhradou mírné zhoršení u všech měřených parametrů. Nicméně s ohledem na velmi malé rozdíly ve výsledcích a s přihlédnutím k rozlišovací schopnosti daných zkoušek je nutné dosažené výsledky obsahu vzduchu a reologických parametrů považovat za prakticky totožné. V případě samozhutnitelných betonů je úletový popílek v betonářské praxi s oblibou používán, neboť zlepšuje tekutost čerstvé směsi (Kurda *et al.*, 2017; Jiang & Malhotra, 2000), což dobře koresponduje s dosaženými parametry dle zkoušky L-box. Ke zlepšeným reologickým vlastnostem betonu však významnou měrou přispívá i již zmíněný ložiskový efekt zrn popílku (Puthipad *et al.*, 2016; De Matos *et al.*, 2019). Nicméně vyšší jemnost popílku nepatrně zvyšuje tekutost čerstvé směsi (Moghaddam *et al.*, 2019). Nelineární vývoj vlastností se zvyšující se náhradou cementu je i v tomto případě značně ovlivněn různými proporcemi pojivových částí, které měly odlišnou granulometrii. Pro dvě nejnižší úrovně náhrady cementu (10 a 20 %) bylo zaznamenáno zlepšení reologických parametrů. Nicméně ve srovnání s referenční směsí se jeví proporce 71,0%:13,1%:15,9% (PC:FA:LS) jako optimální.

8.3.2 Ztvrdlý beton

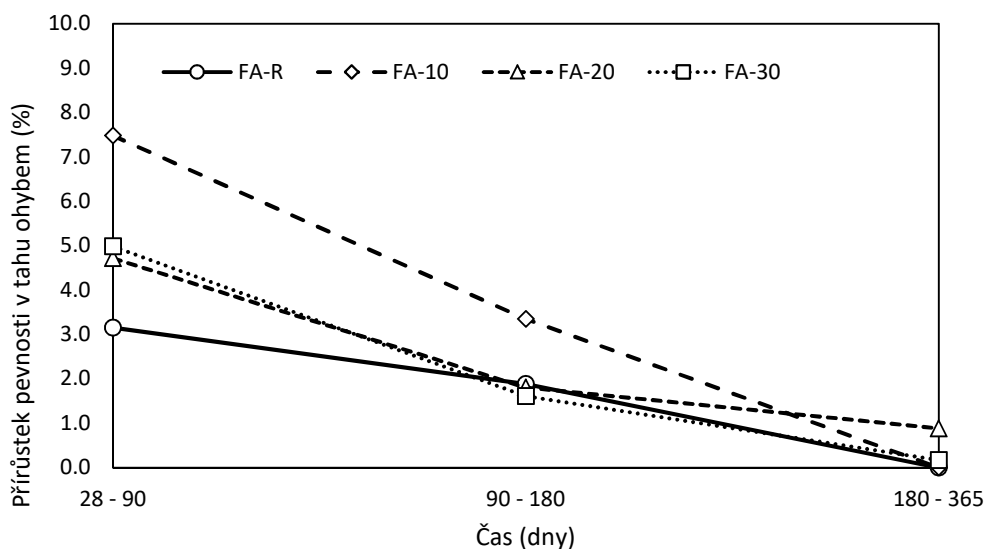
Mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti pomocí zkoušky tahu ohybem byly prováděny na ztvrdlém betonu ve stáří 28, 90, 180 a 360 dní. Všechny studované směsi vykazovaly postupný nárůst pevnosti v tahu ohybem, jak je patrné z Obr. 8.3. Trochu atypicky vykazovala referenční směs nejnižší pevnosti v tahu ohybem v průběhu celého experimentálního programu. Esquinas *et al.* (2018a) realizoval podobný program, ovšem zvyšováním dávky popílku docházelo k postupnému snižování pevnosti v tahu ohybem, tedy referenční směs dosáhla nejvyšších absolutních hodnot. Podobné výsledky byly publikovány i v jiných pracích (Siddique, 2011; Liu, 2010). V případě směsí FA-10 a FA-20 by bylo možné takové chování vysvětlit lepším zhutněním, které bylo ovlivněno lepšími reologickými vlastnostmi. Ovšem v případě směsi FA-30 bylo kromě zkoušky L-box dosaženo nepatrně horších reologických vlastností, zároveň však tato směs měla i menší obsah vzduchu. Na druhou stranu směsi bez minerálních příměsí se vyznačují velmi křehkým způsobem porušení, který může umocnit vliv zhoršeného zhutnění, protože tato zkouška je velice citlivá na homogenitu betonu. Pro tento jev pravděpodobně neexistuje jednoduché vysvětlení, neboť se jedná o kombinaci několika faktorů např. i vlivu smrštění. Po 180 dnech zrání směs FA-30 dosáhla vyšší pevnosti v tahu

ohybem než FA-20 s nižším podílem popílku, ovšem dosažené rozdíly jsou na hranici chyby měření.



Obr. 8.3: Vývoj pevnosti v tahu ohybem.

Pokračující pucolánové reakce je dobře patrná na Obr. 8.4, kde jsou znázorněny přírůstky pevnosti v tahu v čase. Kinetika reakce je nejnižší v případě referenční směsi a nejvyšší při použití nejnižší dávky popílku (FA-10), ovšem dalším zvyšováním podílu popílku docházelo k významnému snížení počátečního náběhu pevnosti. Z pohledu pevnosti v tahu ohybem jsou směsi FA-20 a FA-30 na samé hranici vhodnosti.

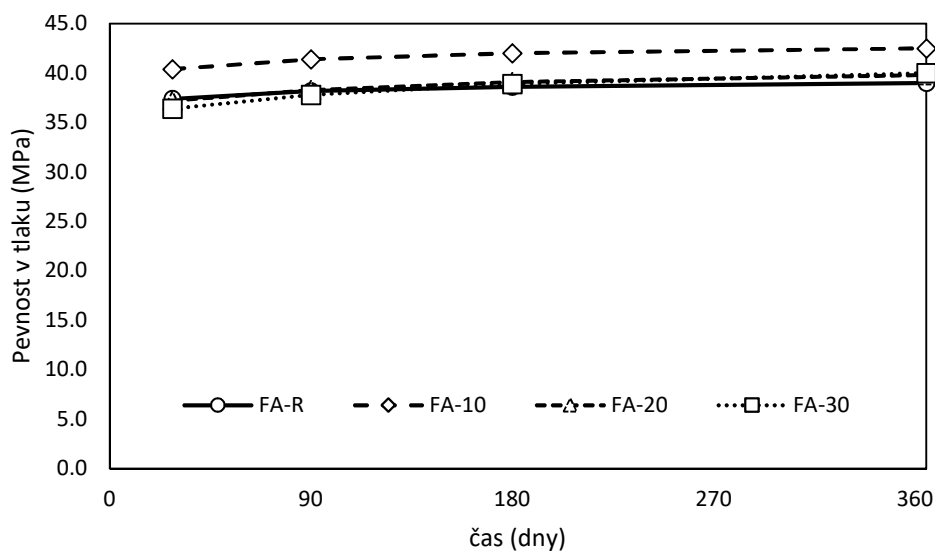


Obr. 8.4: Přírůstky pevnosti v tahu ohybem v čase.

Dřívější výzkum prokázal, že limitním množstvím pro dávku popílku je přibližně 35 hm.% cementu, kdy jsou ještě zaručeny srovnatelné vlastnosti s referenční směsí. Nicméně použitý způsob formulace pojiva snížil tuto hranici pod 20 hm.%. Velmi nízké přírůstky pevností v čase

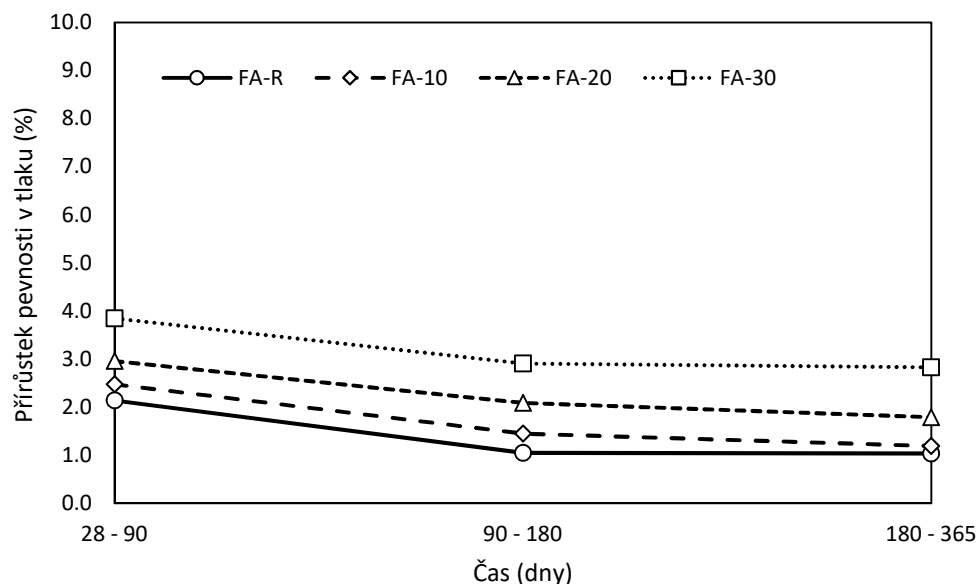
u referenční směsi jsou dány typem použitého cementu (CEM I 52,5 R), který dosahuje velice vysokých počátečních mechanických vlastností. Po 28 dnech zrání dosáhla referenční směs přibližně 90 % svých finálních vlastností; po 90 dnech už to bylo prakticky 100 %. Po 180 dnech již jsou přírůstky v čase u všech směsí velice malé a značně podobné, což koresponduje s výsledky i jiných prací (Yu *et al.*, 2017; De Weerd *et al.*, 2011).

Vývoj pevnosti v tlaku vykazoval podobný trend jako v případě pevnosti v tahu ohybem zejména z dlouhodobého pohledu, jak je patrné na Obr. 8.5. Směs s nejnižší dávkou popílku dosáhla nejvyšších pevností v tlaku v čase; průběh vývoje pevnosti u této směsi je vůči ostatním systematicky posunut o přibližně 3 MPa. Ostatní směsi dosáhly velmi podobných pevností v tlaku v čase, nicméně po 180 dnech směsi s popílkem vykazovaly nepatrně vyšší hodnoty, což je způsobeno pucolánovou aktivitou (De Matos *et al.*, 2019). Směsi s lepší zpracovatelností obecně dosáhly lepších pevností v tlaku, tedy směs s 10% náhradou představuje optimální poměr složek pro takto koncipované směsi. Je však třeba zdůraznit, že dosažené optimum reflektuje použité poměry kameniva a v případě změny jeho granulometrie by bylo pravděpodobně dosaženo odlišného výsledku. Duran-Herrera *et al.* (2019) realizovali podobný experimentální program, kde zkoumali betony na bázi ternárního pojiva obsahují portlandský cement, mletý vápenec a popílek s různými vzájemnými poměry. Prokázali, že mletý vápenec přispívá k nukleaci hydrátů v průběhu hydratační reakce. Zároveň i zvýšení vnitřního povrchu podporuje formování hydrátů, což bylo potvrzeno při studiu systémů PC-FA a nano-vápenec (De Weerd *et al.*, 2011; Shaikh & Supit, 2014), PC-FA a ultra jemný FA (Shaikh and Supit, 2015) nebo PC-FA s metakaolinem (Jones *et al.*, 2016). Na druhou stranu bylo termodynamickými simulacemi a následně i experimentálně potvrzeno, že CaCO_3 ovlivňuje transformaci AFt na AFm. Tento efekt je umocněn právě použitím popílku, který celý systém dotuje podstatným zvýšením obsahu aluminátů. Nicméně platné předpisy klasifikují mletý vápenec jako příměs typu I, tedy jako inertní. Vhodnost proporcí směsi FA-10 je dobře dokumentována i celkovým posunem dosažených pevností v čase.



Obr. 8.5: Vývoj pevnosti v tlaku v čase.

Postupné přírůstky pevnosti v čase jsou znázorněny na Obr. 8.6, kde je dobře patrná jejich úměrnost vůči použité dávce popílku. Tyto výsledky dobře korespondují se závěry, které publikoval De Matos *et al.* (2019), který doložil nepatrné přírůstky pevnosti v tlaku v čase u referenční směsi a ternárních směsí s přidavkem metakaolinu (PC-FA-MK) po 180 dnech zrání. Nicméně během prvních 90 dní bylo dosaženo výrazně vyšších přírůstků v čase.

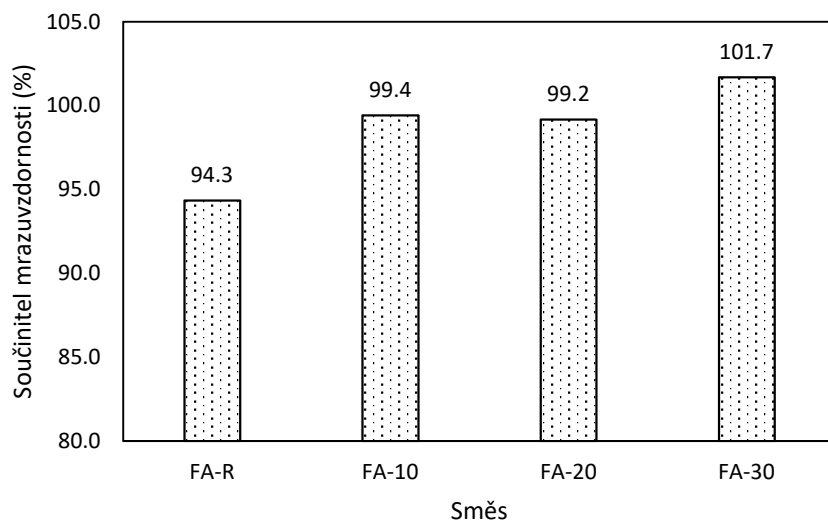


Obr. 8.6: Přírůstky pevností v tlaku v čase.

Z pohledu studovaného způsobu návrhu pojiva jsou dosažené výsledky vynikající, neboť dosažené hodnoty pevnosti v tlaku byly velice podobné. Jednotlivé směsi vykázaly jen nepatrné rozdíly v absolutních hodnotách v čase, proto zejména směsi FA-R, FA-20 a FA-30 mohou být klasifikovány jako totožné, uvážíme-li standardní nejistotu měření při stanovování mechanických vlastností. Zároveň je třeba připomenout, že značení směsí je provedeno dle aplikované náhrady cementu, což přímo koresponduje s podílem popílku a nepřímo pak s podílem mletého vápence. Přírůstky pevnosti v tlaku v čase jsou do značné míry odrazem charakteru pórového systému.

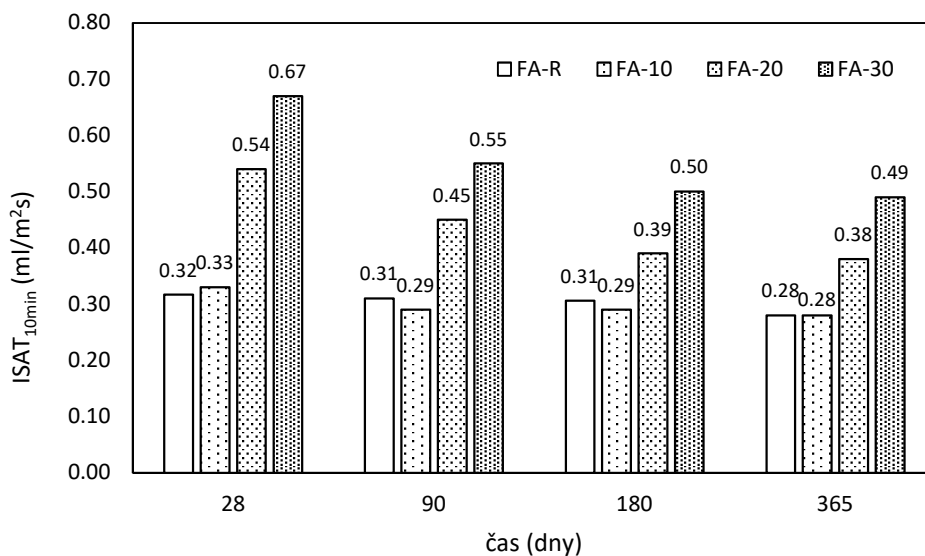
Mrazuvzdornost. Mrazuvzdornost zkušebních směsí byla stanovována ve stáří 90 dní, kdy byla zkušební tělesa vystavena 100 zmrazovacím cyklům, Obr. 8.7. Dosažené výsledky prokázaly vynikající odolnost všech směsí vůči cyklickému zmrazování. Při zkoušce nedošlo ke ztrátě hmotnosti vlivem odlupování. Na vynikajícím výsledku se podepsalo i dobré provzdušnění všech směsí především u směsí s obsahem popílku, což koresponduje s výsledky dřívějšího výzkumu (Sahmaran *et al.*, 2013; Soriano *et al.*, 2013; Reiterman *et al.*, 2019). Směs FA-20 vykázala mírný pokles součinitele mrazuvzdornosti v porovnání se směsí FA-10, nicméně tento nepatrný rozdíl je způsoben běžnými odchylkami, ke kterým při měření dochází. U směsi s nejvyšším obsahem popílku bylo dosaženo hodnot koeficientu více než 100 %, což je dáno faktem, že tělesa po předepsaném počtu zmrazovacích cyklů vykazovala vyšší hodnoty pevnosti v tahu ohybem než sada těles referenčních, tedy nezmrzaných. Tento jev je

vysvětlován sekundární aktivací popílku, kdy se působením mrazu a rozvoji mikrotrhlinek voda dostává k částem dosud nezhratovaného cementu (De Belie *et al.*, 2018).



Obr. 8.7: Mrazuvzdornost po 90 dnech.

ISAT. Výsledky zkoušky ISAT jsou uvedeny na Obr. 8.8. Na základě této zkoušky a doporučených limitů, Tab. 7.4, lze provést kvalifikovaný odhad propustnosti povrchové vrstvy betonu. Referenční směs betonu a směs s nejmenším podílem popílku vykazovaly průměrnou permeabilitu po celou dobu trvání experimentálního programu.

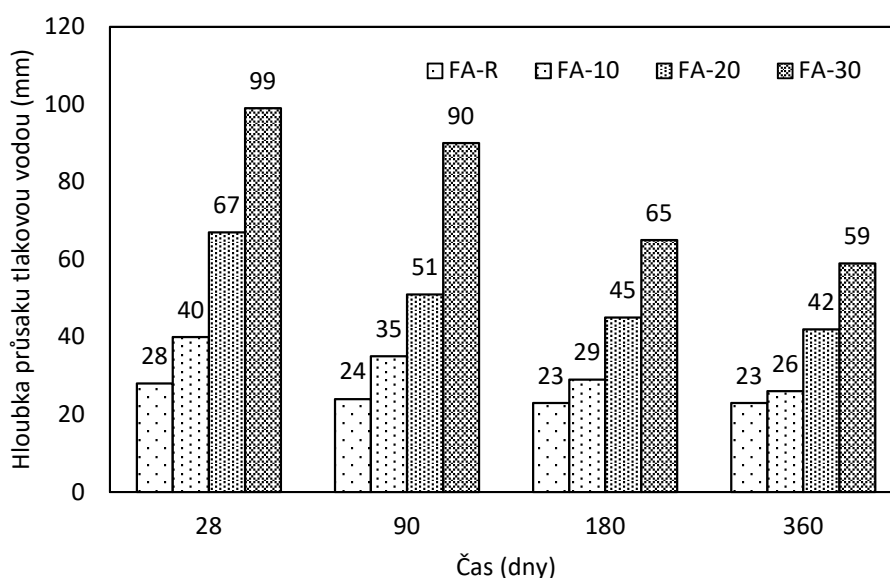


Obr. 8.8: Výsledky ISAT v čase.

Z pohledu nového způsobu návrhu směsí jsou výsledky těchto dvou směsí velice pozitivní. Zbylé dvě směsi s vyšším podílem popílku vykazovaly výrazně vyšší hodnoty povrchové propustnosti, které však v čase postupně klesaly až na průměrnou úroveň propustnosti. Ovšem tohoto postupného zlepšení bylo dosaženo až po jednom roce pravděpodobně díky pucolánové reakci. Nicméně směs s nejvyšší použitou dávkou popílku dosáhla velice vysoké

míry propustnosti, což koresponduje se závěry jiných prací (Shaikh & Supit, 2015; Silva & De Brito, 2015), kde bylo poukázáno na vysokou otevřenou pórovitost. Základním problémem u směsí s velmi vysokým obsahem popílku je skutečnost, že purolánové reakce se účastní jen malá část celkové dávky a zbytek příměsí tak ve směsi působí jako aktivní filer (Lothenbach *et al.*, 2011; Silva & De Brito, 2015). Výsledkem je tak zvýšená propustnost takovýchto betonů, zvláště mají-li navíc i vyšší vodní součinitel. V realizovaném programu je však nutné vzít i v úvahu různé granulometrie použitých příměsí, kdy mletý vápenec, jehož dávka byla s narůstající dávkou popílku snižována, byl výrazně jemnější. Je tak pravděpodobné, že směsi s vyšším obsahem popílku neměly optimální granulometrii pojivových složek.

Hloubka průsaku tlakovou vodou. Dosažené hodnoty průsaku při působení tlakovou vodou se zvyšovaly s narůstajícím podílem popílku ve směsi, jak je patrné z Obr. 8.9. Všechny směsi vykazovaly postupné zlepšení proti 28-denním hodnotám v čase vlivem pokračující hydratace. Uvedené zlepšení vodotěsnosti betonu se zvyšovalo s klesajícím podílem mletého vápence ve směsích, konkrétně 17,9 % (FA-R), 35,0 % (FA-10), 37,3 % (FA-20) a 40,4 (FA-30).

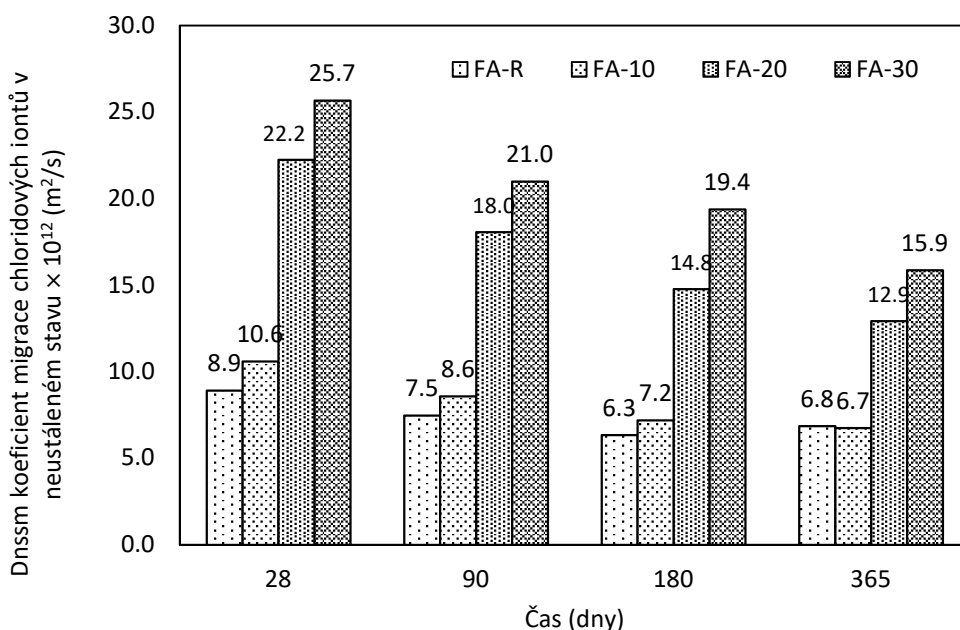


Obr. 8.9: Hloubka průsaku tlakovou vodou zkušebních směsí v čase.

Podle ČSN EN 206-A1 (2018) referenční směs splňuje požadavky pro třídu prostředí XF4 a XA2, podobné odolnosti dosáhla i směs FA-10, ovšem pouze v případě prodlouženého ošetřování. Uspokojivých hodnot průsaku tlakovou vodou dosáhla i směs FA-20, která po 90 dnech zrání byla na hranici limitního průsaku 50 mm. Směs s nevyšším podílem popílku pak z pohledu této zkoušky dosáhla neuspokojivého výsledku; zajímavý je však výše uvedené zlepšení v čase. Výsledky této zkoušky dobře korespondují se zkouškou ISAT, která rovněž u směsí s vyšším podílem popílku indikovala zvýšenou propustnost.

Zkouška migrace chloridových iontů. Zkouška migrace chloridových iontů byla prováděna ve vybraných časových intervalech podle instrukcí a doporučení NT Built 492 (1999). Dosažené výsledky uvedené na Obr. 8.10 částečně korespondují s výsledky ISAT a zkoušky průsaku tlakovou vodou. Všechny směsi vykazovaly v čase postupné zlepšení, tedy snížení propustnosti především v případě směsí s nejvyšším podílem popílku. Nicméně podobně jako v případě

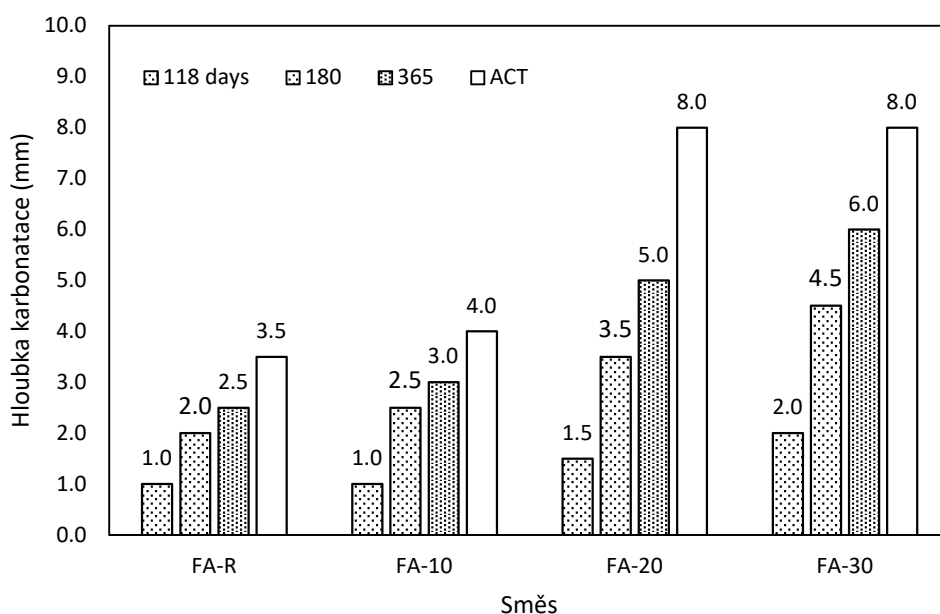
zkoušky ISAT i zde jsou hodnoty koeficientu migrace pro směs FA-20 a FA-30 výrazně posunuty vůči zbylým dvěma směsím. Přestože však směsi s vyšším obsahem popílku dosáhly zvýšené propustnosti, všechny směsi podle doporučené klasifikace měly koeficient migrace nižší než $16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Soulad mezi výsledky pomocí této zkoušky a skutečnou expozicí v mořském prostředí potvrdil Li *et al.* (2019). Dosažené výsledky jsou v rozporu s obecným povědomím a zkušenostmi s betony, u nichž byl použit úletový popílek, kdy tato aktivní příměs výrazně přispívá k eliminaci transportu chloridových iontů (Thomas, 2016). Nicméně je třeba podotknout, že studované směsi představují konstrukční betony nižších tříd s relativně vysokým w/b. Oproti tomu směsi betonu používané pro konstrukce v kontaktu s mořem mají zpravidla vodní součinitel do 0,40, čímž je dosažena dostatečná odolnost a uplatní se efekt vázání chloridových iontů na hlinitanové části popílku (Moffat *et al.*, 2017). I zde je nutné připomenout měnící se poměr jednotlivých pojivových částí, který evidentně vedl k vyšší otevřené pórovitosti. Tyto výsledky tak zdůrazňují potřebu návrhu pojiva i s ohledem na celkovou granulometrii. Podobné závěry publikoval Celik *et al.* (2015), který studoval SCC směsi a stejný ternární pojivový systém. Ve srovnání s binárními pojivovými systémy bylo dosaženo vyšších hodnot koeficientu migrace chloridových iontů právě vlivem zvýšené otevřené pórovitosti.



Obr. 8.10: Koeficient migrace chloridových iontů D_{ssm} .

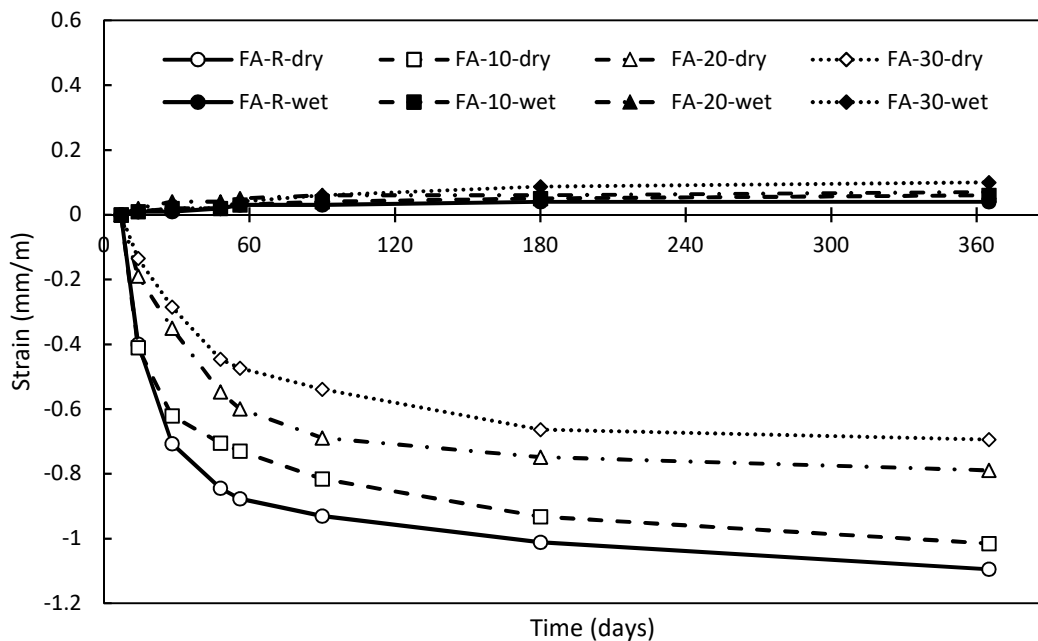
Karbonatace. Hloubka karbonatační fronty byla monitorována pomocí fenolftaleinového testu ve vybraných časových intervalech během celého experimentálního programu. Nicméně první měření bylo provedeno po 118 dnech, kdy na 90-denní uložení vzorků navázalo uložení v normálních laboratorních podmínkách po dobu čtyř týdnů. Další hodnoty pak byly stanovovány po 180 a 365 dnech na vzorcích, které byly rovněž od stáří 90 dní uloženy v laboratorních podmínkách. Výsledky uvedené na Obr. 8.11 ukazují, že v souladu s výsledky předchozích testů referenční směs a směs s nejnižším obsahem popílku dosáhly velmi podobných výsledků. Zbylé dvě směsi s popílkem projevovaly nižší odolnost vůči karbonataci. Je to do značné míry způsobeno rychlým postupem karbonatační fronty po změně uložení

vzorků, což koresponduje s dříve publikovanými výsledky věnované studiu SCC směsí s vysokým podílem úletového popílku (Singh & Singh, 2016a), kde byl doporučen přídavek metakaolinu pro zpomalení postupu karbonatace. K podobným závěrům dospěl i Esquinas *et al.* (2018a), kde rovněž zaznamenali sníženou odolnost vůči karbonataci se zvyšujícím se obsahem popílku u SCC směsí, nicméně tento nedostatek efektivně kompenzovali přídavkem křemičitého úletu. Účinným opatřením pro zlepšení odolnosti vůči karbonataci je i snížení vodního součinitele nebo prodloužené ošetřování (Jiang & Malhotra, 2000). Silva & De Brito (2016) upozornili na sníženou odolnost vůči karbonataci u binárních pojivových systémů v případě použití vysokých dávek popílku nebo mletého vápence. V tomto kontextu se tak zdají být ternární pojiva mnohem výhodnější, neboť vhodnými proporcemi pojivových částí lze dosáhnout optimální granulometrie, která přispěje ke snížení propustnosti. Doporučená hodnota popílku v ternárním systému společně s mletým vápencem byla do 30 % cementu, což dobře koresponduje s výsledky realizovaného programu, přestože byl použit jiný postup návrhu pojiva.



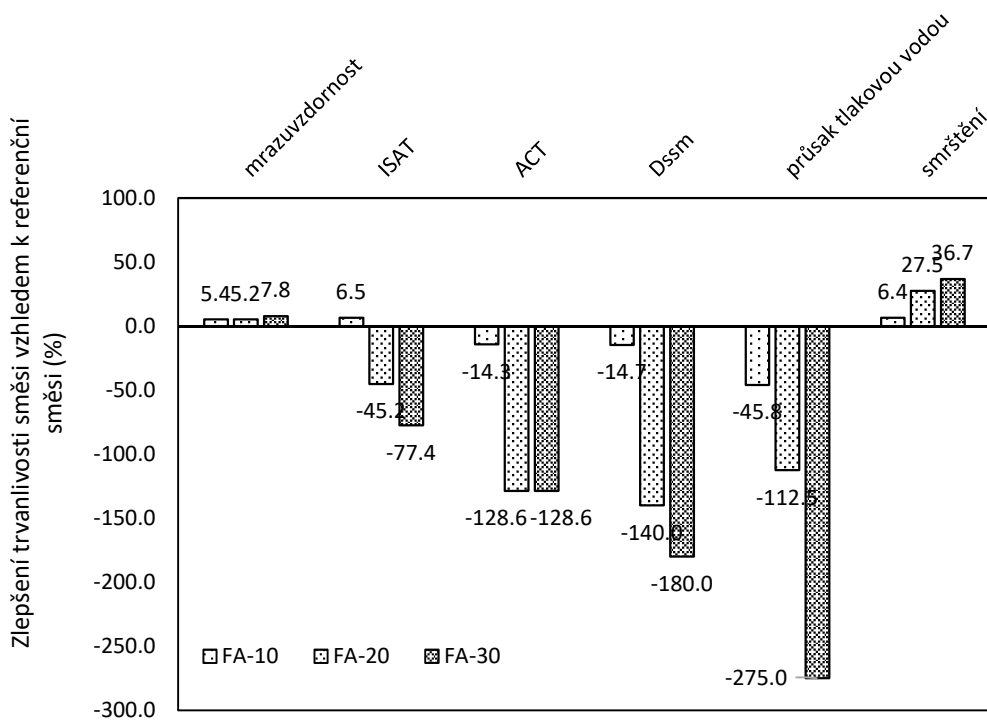
Obr. 8.11: Porovnání hloubky karbonatace za přirozených podmínek a při zrychlené zkoušce.

Smrštění. Se zvyšujícím se obsahem popílku ve směsi bylo dosaženo dle očekávání nižších hodnot volného smrštění, jak je patrné z Obr. 8.12. Hodnoty smrštění po jednom roce uložení v laboratorních podmínkách odpovídaly 1,09 (FA-R), 1,02 (FA-10), 0,79 (FA-20) a 0,69 (FA-30) mm/m. Pozitivní dopad popílku na hodnoty smrštění je dán pomalým průběhem pucolánové reakce než třeba v případě velmi reaktivního křemičitého úletu. Dosažené výsledky dobře korespondují se závěry jiných experimentálních prací (Gesoglu *et al.*, 2009; Silva & De Brito, 2016; Esquinas *et al.* 2018b). Sady vzorků uložené ve vodě vykazovaly mírnou expanzi v čase, která se pohybovala mezi 0,04 a 0,10 mm/m. tento jev byl vysvětlen postupnou fixací vody v kapilárách (Rahimi-Aghdam *et al.*, 2019).



Obr. 8.12: Výsledky smrštění zkušebních směsí v čase.

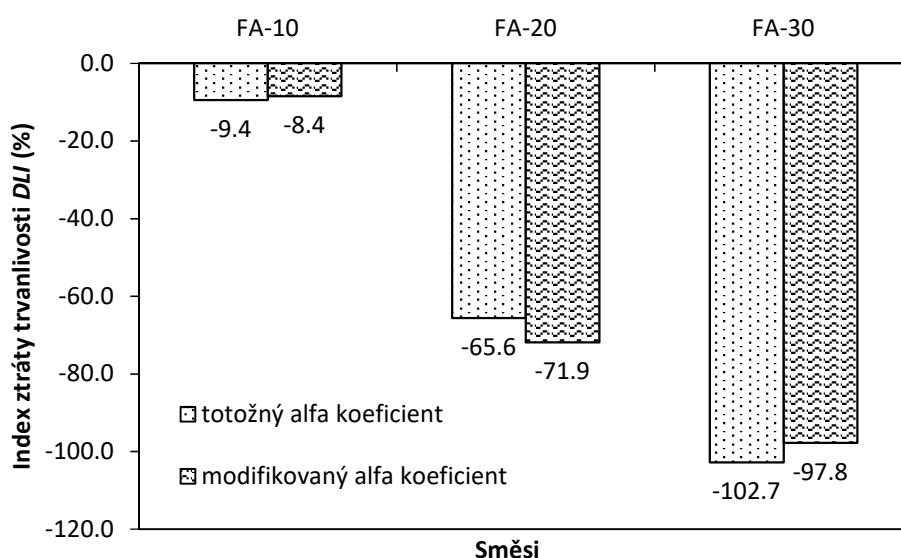
Provedený experimentální program potvrdil nezbytnost komplexního posouzení aspektů trvanlivosti při návrhu složení betonu. Všechny zkušební směsi vykázaly postupné zhoršování trvanlivostních parametrů se zvyšujícím se množstvím popílku u všech zkušebních postupů navazujících na permeabilitu betonu. Je to pravděpodobně způsobeno vyšší jemností mletého vápence, jehož dávkování bylo systematicky snižováno se zvyšující se dávkou hrubšího popílku. Celkové porovnání trvanlivosti studovaných směsí je uvedeno na Obr. 8.13.



Obr. 8.13: Celkové posouzení trvanlivosti vzhledem k referenční směsi.

Prezentované hodnoty jsou vztaženy k referenční směsi; byly použity hodnoty odpovídající stáří 90 dní. Je zřejmé, že studovaný postup návrhu směsi je vhodný pouze s ohledem na smrštění, mrazuvzdornost a v případě nejnižší dávky popílku i na počáteční povrchovou nasákavost. Ostatní zkušební postupy vykázaly značný pokles se zvyšující se dávkou popílku. Je však třeba připomenout, že se jedná o postupy kontrolované propustností betonu, která je indikátorem trvanlivosti.

Index ztráty trvanlivosti (DLI). Index ztráty trvanlivosti byl použit z důvodu použití řady zkušebních postupů a rozdílnosti složení zkušebních směsí, které měly ve výsledku i mírně odlišné mechanické parametry. Pro výpočet *DLI* byly aplikovány dvě kombinace váhových koeficientů α , které přidělují význam každé použité metodě hodnocení. V první fázi byla použita totožná hodnota váhového koeficientu α pro všechny použité metody; ve druhé fázi byl zohledněn význam jednotlivých vlastností a byly použity hodnoty uvedené v Tab. 8.5. Jak je patrné z Obr. 8.14 obě použité varianty vykazovaly stejný trend. Výsledné hodnoty *DLI* byly ovlivněny především výsledky zrychlené karbonatační zkoušky, migrace chloridů a průsaku tlakovou vodou, jak je ostatně zřejmé z Obr. 8.13. Zároveň je evidentní, že změny v α_i nevedly k zásadním změnám dosažených hodnot *DLI*. Lze tedy konstatovat, že se zvyšující se dávkou popílku byl u zkušebních směsí zaznamenán pokles trvanlivosti. Zároveň je ale třeba zdůraznit, že navržené hodnoty α_i reflektují výběr aplikovaných zkušebních postupů tohoto programu a jejich význam s ohledem na očekávanou expozici. Např. v případě konstrukcí trvale ponořených ve vodě by váhový koeficient pro zkoušku karbonatace mohl být roven nule.

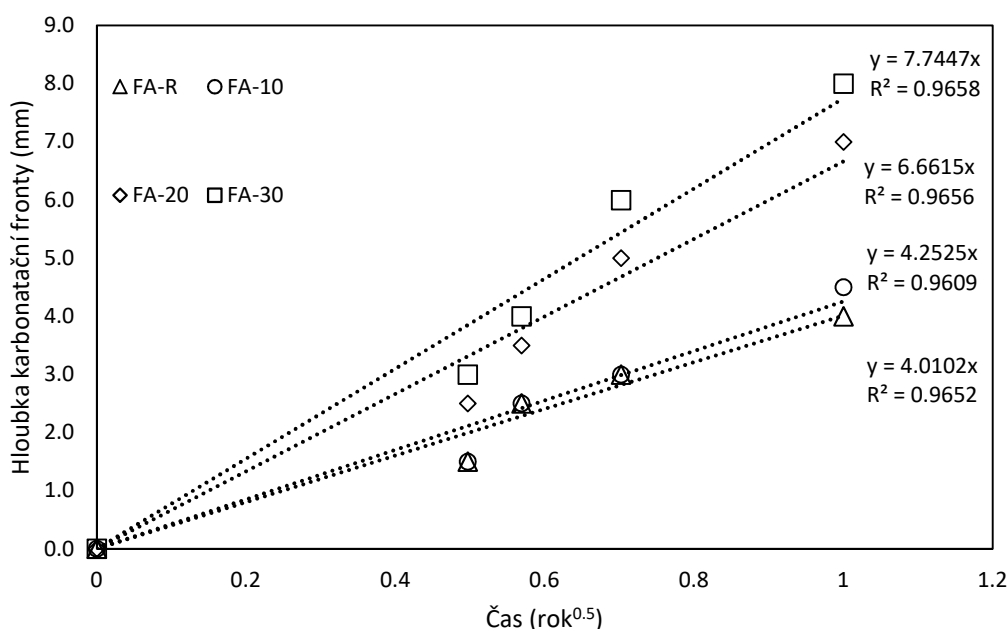


Obr. 8.14: Vypočtené hodnoty indexu ztráty trvanlivosti.

Navržený přístup návrhu směsí, který zohledňuje mineralogické složení použité příměs, potvrdil potenciál pro širší použití pouze z pohledu mechanických parametrů. Dosažené vlastnosti byly prakticky téměř totožné, nebo mírně vyšší v případě FA-10. Z pohledu trvanlivosti není studovaný postup vhodný, neboť směsi navržené na základě tohoto přístupu vykazovaly postupnou ztrátu trvanlivosti ze zvyšující se dávkou popílku. Na druhou stranu směs FA-10, u níž bylo z konvenčního pohledu popílkem nahrazeno 18,5 % cementu, dosáhla ztráty trvanlivosti pouze 10 %. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že ternární pojiva

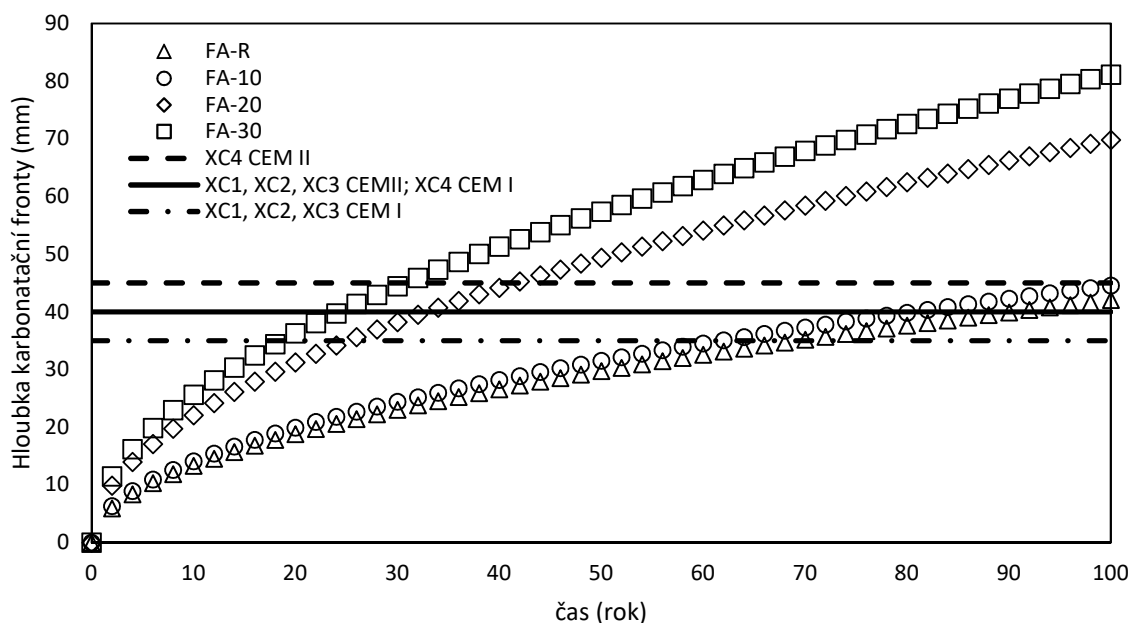
u SCC směsí nižších pevnostních tříd v kombinaci s vyšším vodním součinitelem vedou ke ztrátě trvanlivosti a z dlouhodobého hlediska představují riziko. Na základě vypočteného DLI není možné věrohodně stanovit optimální kompozici pojiva, neboť náhrada cementu probíhala v kroku po 10 %. Nicméně směs s nejnižší dávkou popílku (FA-10), jejíž proporce pojiva byly 71,0%:13,1%:15,9% (PC:FA:LS), vykazovala sice mírný pokles v oblasti trvanlivosti, ovšem dosažené výsledky byly ještě stále akceptovatelné.

Obdržené hodnoty DLI byly velkou měrou ovlivněny především výsledky akcelerovaných zkoušek. Je však třeba podotknout, že tyto výsledky jsou ovlivněny prodlouženou dobou ošetřování. Proto pro realistické hodnocení studovaných směsí je třeba pozornost zaměřit na výsledky dosažené při ošetřování v normálních laboratorních podmínkách. Z tohoto důvodu byl podrobně analyzován vliv karbonatace a byla provedena predikce životnosti na základě hloubky karbonatační fronty dosažené při uložení v normálních laboratorních podmínkách. Na Obr. 8.15 jsou uvedeny hodnoty součinitele karbonatace K_{field} , který byl stanoven dle (8.2). Tyto hodnoty byly následně použity pro predikci životnosti studovaných směsí.



Obr. 8.15: Vypočtené hodnoty koeficientu karbonatace K_{field} studovaných směsí.

Predikce životnosti. Predikce životnosti byla provedena dle doporučení EHE-08 (2008) (8.3). Požadavky na zvýšenou odolnost betonu vůči karbonataci zohledňují pouze pasivní přirozenou rezistenci betonu vůči průniku vzdušného CO_2 . Proto zvýšené riziko postupu karbonatace betonu je kompenzováno zvyšováním nominální tloušťky krycí vrstvy betonu, která poskytuje ochranu zabudované výztuži. Provedená predikce reflektující požadavky ČSN EN 206-1+A1 (2018) je uvedena na Obr. 8.16. Numerické hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.7.



Obr. 8.16: Predikce životnosti na základě průběhu karbonatace.

Tab. 8.7: Odhadnutý čas deparivace a minimální tloušťka krycí vrstvy.

Směs	Čas deparivace (rok)			Minimální tloušťka krycí vrstvy pro dosažení životnosti 100 let na základě dosažených parametrů (mm)
	CEM I XC1, XC2, XC3	CEM I XC4 CEM II XC1, XC2, XC3	CEM II XC4	
FA-R	69	91	115	42
FA-10	62	81	102	45
FA-20	25	33	42	70
FA-30	19	24	31	81

Dosažené výsledky korespondují se závěry, které publikoval Wang *et al.* (2020); byl zde sledován vliv zatížení na postup karbonatační fronty. V tomto výzkumu byla prokázána snížená odolnost betonu vůči karbonataci, pokud náhrada cementu přesahovala 40 %. Nicméně při posuzování vlivu minerálních příměsí na odolnost vůči karbonataci je třeba zohlednit i zpracovatelnost čerstvých směsí. Singh a Singh (2016b) studovali odolnost vůči karbonataci SCC směsí s využitím recyklovaného kameniva s přidavkem popílku a metakaolinu. Jejich výsledky potvrdily zvýšenou odolnost studovaných směsí, avšak důležitým aspektem bylo zaznamenané zlepšení zpracovatelnosti čerstvých směsí, které významně přispělo k vyšší hutnosti ztvrdlého betonu. Fyzikální efekt v případě masivního použití minerálních příměsí zdůrazňuje i Pacheco Torgal *et al.* (2012).

Sníženou odolnost betonu vůči karbonataci v případě použití směsných systémů podrobně studoval Marques *et al.* (2013), který porovnal výsledky prediktivních modelů použitím výsledků zkoušek karbonatace s požadavky EN 206-1+A1 (2018). Dosažené výsledky rovněž potvrdily, že vyšší dávky popílku v pojivovém systému PC-FA-LS vedou ke zvýšenému průniku CO₂ a tedy vyššímu riziku koroze výztuže vlivem karbonatace.

Provedený experimentální program prokázal, že směsi navržené na základě nového přístupu vykazovaly úměrně se zvyšující se náhradou cementu popílkem sníženou odolnost vůči

průniku chloridových iontů, karbonatů a průniku vody, což jsou klíčové aspekty s ohledem na korozi výztuže. Bylo to pravděpodobně způsobeno zhoršením granulometrie pojiva, protože mletý vápenec, jehož dávka byla postupně snižována, měl vyšší jemnost v porovnání s použitým popílkem. Bohužel tak studované SCC směsi nižších pevnostních tříd, které jsou v dnešní době poměrně oblíbené, představují značné riziko z pohledu dlouhodobé trvanlivosti, neboť mají podstatně vyšší propustnost. Navíc náhrada cementu nad 30 % je zároveň spojena s nižším pH ztvrdlého betonu, což rovněž přispívá k rychlejšímu postupu karbonatce (Yazici, 2008).

8.4 Zhodnocení navrženého racionálního návrhu

Provedený experimentální program byl zaměřen na ověření vhodnosti nového přístupu k formulaci pojiva SCC směsí za základě trvanlivostních parametrů studovaných směsí. Základem nového přístupu návrhu bylo zohlednění množství amorfních fází použité minerální příměsi. Studované směsi byly posouzeny na základě širší skladby zkušebních postupů, které byly následně vyhodnoceny pomocí indexu ztráty trvanlivosti (*DLI*), jež umožňuje snadné posouzení směsí betonu na základě více kritérií. Dosažené závěry lze shrnout následujícím způsobem.

- Směsi navržené na základě nového přístupu vykazovaly stejnou nebo srovnatelnou zpracovatelnost v porovnání s referenční směsí, neboť všechny směsi splnily kritéria samozhutnitelnosti bez nutnosti zvyšovat dávku vody či ztekucující přísady.
- Navržený postup návrhu pojiva zajišťuje prakticky totožné mechanické parametry ztvrdlého betonu zejména z dlouhodobého pohledu.
- Vývoj mechanických parametrů byl po 180 dnech u všech směsí již minimální. Směsi s popílkem vykazovaly vyšší hodnoty pevnosti v tahu ohybem v porovnání s referenční směsí. Směs s nejnižší dávkou popílku dosáhla vyšších hodnot pevnosti v tlaku o přibližně 10 %, nicméně dalším zvýšením dávky popílku bylo docíleno srovnatelných hodnot pevností v tlaku s referenční směsí, tedy nebyl zaznamenán pokles.
- Postupné zvyšování dávky popílku vedlo k výraznému snížení volného smrštění a zlepšení mrazuvzdornosti.
- Náhrada cementu popílkem provedená na základě nového přístupu vedla k výraznému zvýšení propustnosti, což se negativně projevilo na výsledcích karbonatce, průsaku tlakovou vodou a průniku chloridových iontů, tedy vlastností mající přímý dopad na riziko koroze výztuže.
- SCC směs s nejnižší dávkou popílku vykazovala sice nižší trvanlivostní parametry ve srovnání v referenční směsí, nicméně dosažené hodnoty byly stále akceptovatelné. Kromě zvýšeného průniku vody měla tato směs totožnou odolnost vůči průniku chloridových iontů a karbonatci.
- Vypočtené hodnoty indexu ztráty trvanlivosti *DLI* byly ovlivněny především výsledky zrychlené zkoušky karbonatce. Index ztráty trvanlivosti *DLI* poskytuje výhodný nástroj pro posouzení betonových směsí na základě více kritérií. Výhodnost tohoto přístupu spočívá i v tom, že vybraným kritériím lze přidělit vyšší význam a zohlednit tak např. jinou třídu expozice. Vypočtené hodnoty *DLI* indikují, že v provedený program by byla optimální dávka popílku okolo 13 % cementu.

9. Závěr

Minerální příměsi představují klíčový komponent pro formulaci budoucích betonových směsí, u nichž bude kladen důraz především na dlouhodobou trvanlivost a rovněž na ekologické parametry. Nicméně systematické používání minerálních příměsí vedoucí k trvanlivým betonům a tedy konstrukcím s prodlouženou životností je samo o sobě i přístupem environmentálním, neboť se snižuje množství CO₂ vázané na opravy či výstavbu nové konstrukce. V experimentálních částech byla věnována pozornost několika vybraným minerálním příměsím, které mají širší potenciál pro komerční využití a respektují materiálovou základnu ČR. Na základě provedené práce je možné formulovat následující závěry:

- Obsah vzduchu v čerstvém betonu v případě použití směsného pojivového systému nezbytně nezlepšuje výslednou mrazuvzdornost. Tato vlastnost je kontrolována především charakterem pórového systému a výsledného hydraulického tlaku při působení nízkých teplot. Nicméně zásadnější vliv má v daných případech i množství chemicky vázané vody v hydrátech;
- Cihelný prach má potenciál pro praktické využití, ovšem kvůli negativnímu vlivu na zpracovatelnost čerstvé směsi pouze v kombinaci s účinnou plastifikační přísadou. Provozní testy prokázaly vhodnost této příměsi do jádrového betonu vibrolisovaných prvků, kde může přinést při 15% náhradě cementu úsporu přibližně 1,- Kč/m²;
- Betony na bázi směsných pojiv jsou kvůli pomalejšímu náběhu mechanických parametrů náchylnější ke smrštění od vysychání. Prodlouženým ošetřováním lze dosáhnout nižších konečných hodnot smrštění;
- S ohledem na odlišnou povahu jednotlivých minerálních příměsí je vhodné pro jejich širší využití aplikovat princip ekvivalentních vlastností;
- I přes vyhovující mechanické parametry betonů hraje karbonatace podstatnou roli v případě dlouhodobé trvanlivosti směsných pojivových systémů. Při vyšších náhradách cementu představuje značné riziko kvůli související ztrátě ochrany výztuže;
- Samozhutnitelné betony nižších pevnostních tříd na bázi ternárních pojivových systémů se nevyznačují dlouhodobou odolností vůči karbonataci;
- Racionální návrh betonových směsí, při kterém je zohledněn charakter použité příměsi, je spolehlivý zejména v případě vlastností čerstvé směsi a mechanických parametrů takto navržených betonů, nikoliv však z pohledu trvanlivosti;
- Oblast trvanlivosti je nutné při posuzování betonových směsí studovat na základě komplexního systému metod, což nekoresponduje se současně užívanými postupy. Vhodným nástrojem je DLI, díky kterému lze jednoduše posoudit vlastnosti betonu na základě různých vlastností a zároveň definovat priority pro vybranou expozici.

Pokračující výzkum možností využití alternativních pojivových systémů, kterými by bylo možné částečně redukovat spotřebu portlandského cementu, bude nutné zaměřit na vybalancování přínosů a nedostatků plynoucích z jejich použití. V tomto ohledu bude klíčovým aspektem dlouhodobá trvanlivost, ale i u podstatná úprava dosavadního přístupu i platných předpisů.

Reference

- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2017). Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(12), 1467–1484. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1355265>
- Aitcin, P.-C. (2000). Cements of yesterday and today. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349–1359. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00365-3)
- Akinyele, J. O., Salim, R. W., & Kupolati, W. K. (2016). Production of Lightweight Concrete from Waste Tire Rubber Crumb. *Engineering Structures and Technologies*, 8(3), 108–116. <https://doi.org/10.3846/2029882x.2016.1209727>
- Álava, H.E., De Belie, N., & De Schutter, G. (2016). Proposed mechanism for the formation of oxychloride crystals during sodium chloride application as a deicer salt in carbonated concrete. *Construction and Building Materials*, 109, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.047>
- Al-Mansour, Chow, Feo, Penna, & Lau. (2019). Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability*, 11(19), 5145. <https://doi.org/10.3390/su11195145>
- Alves, A. V., Vieira, T. F., de Brito, J., & Correia, J. R. (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037>
- Andrew, R. (2017). Global CO2 Emissions From Cement Production [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.831455>
- Ashish, D. K. (2018). Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, 15, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2017.11.024>
- Aslam, M., Shafiq, P., Jumaat, M. Z., & Lachemi, M. (2016). Benefits of using blended waste coarse lightweight aggregates in structural lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 119, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.071>
- Assi, L., Carter, K., Deaver, E. (Eddie), Anay, R., & Ziehl, P. (2018). Sustainable concrete: Building a greener future. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1641–1651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>
- Atiş, C. D. (2003). Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*, 17(3), 147–152. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(02)00116-2)
- Aquino, W., Lange, D. A., & Olek, J. (2001). The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali–silica reaction products. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 485–493. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(00\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(00)00096-2)

- Bager, D. H., & Sellevold, E. J. (1986). Ice formation in hardened cement paste, Part II — drying and resaturation on room temperature cured pastes. *Cement and Concrete Research*, 16(6), 835–844. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90006-2)
- Balonis, M. (2019). Thermodynamic modelling of temperature effects on the mineralogy of Portland cement systems containing chloride. *Cement and Concrete Research*, 120, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.011>
- Baronio, G., & Binda, L. (1997). Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, 11(1), 41–46. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(96\)00032-3](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(96)00032-3)
- Bassuoni, M. T., & Rahman, M. M. (2016). Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure. *Cement and Concrete Research*, 79, 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.006>
- Bazant, Z. P., Chern, J.-C., Rosenberg, A. M., & Gaidis, J. M. (1988). Mathematical Model for Freeze-Thaw Durability of Concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 71(9), 776–783. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb06413.x>
- Balapour, M., Joshaghani, A., & Althoey, F. (2018). Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 181, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>
- Bediako, M., Purohir, S. S., & Kevern, J. T. (2017). An Investigation into Ghanaian Calcined Clay as a Supplementary Cementitious Material. *ACI Materials Journal*, 114(6). <https://doi.org/10.14359/51700896>
- Badogiannis, E., Aggeli, E., Papadakis, V. G., & Tsvilis, S. (2015). Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion – Binding model and of the k-value concept. *Cement and Concrete Composites*, 63, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.012>
- Barbhuiya, S., Chow, P., & Memon, S. (2015). Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 95, 696–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.101>
- Behfarnia, K., & Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 580–584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088>
- Bektas, F., Turanli, L., & Monteiro, P. J. M. (2005). Use of perlite powder to suppress the alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2014–2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.029>
- Bentz, D. P., Sato, T., de la Varga, I., & Weiss, W. J. (2012). Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.004>
- Bernal, J., Fenaux, M., Moragues, A., Reyes, E., & Gálvez, J. C. (2016). Study of chloride penetration in concretes exposed to high-mountain weather conditions with presence of deicing salts. *Construction and Building Materials*, 127, 971–983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.148>

- Bertolini, L., & Lollini, F. (2011). Effects of weathering on colour of concrete paving blocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(6), 939–957. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9695281>
- Bílek, V. Mec, P., Zidek, L., & Moravec, T. (2015). Concretes with ternary binders – Thinking about frost resistance, *Cement Wapno Beton*, 2015, 72-78.
- Chung, C.-W., Shon, C.-S., & Kim, Y.-S. (2010). Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1739–1745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.015>
- Boddy, A. M., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A. (2003). The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33(8), 1263–1268. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00058-9)
- Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G., Heirman, G., Vandewalle, L., Desmet, B., & Vantomme, J. (2006). Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash. *Materials and Structures*, 40(5), 507–516. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9159-z>
- Boháč, M., Palou, M., Novotný, R., Másilko, J., Všianský, D., & Staněk, T. (2014). Investigation on early hydration of ternary Portland cement-blast-furnace slag–metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, 64, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.018>
- Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., & Irassar, E. (2000). Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 703–708. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00217-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00217-9)
- Borosnyói, A. (2016). Long term durability performance and mechanical properties of high performance concretes with combined use of supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, 112, 307–324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.224>
- Brown, P., & Bothe, J., Jr. (2004). The system CaO-Al₂O₃-CaCl₂-H₂O at 23±2 °C and the mechanisms of chloride binding in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1549–1553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.011>
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Carlson, R.W., & Reading, T.J. (1988). Model Study of Shrinkage Cracking in Concrete Building Walls. *ACI Structural Journal*, 85(4), 395-404.
- Castro, P., Moreno, E. I., & Genescá, J. (2000). Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1565–1571. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00344-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00344-6)
- Celik, K., Jackson, M. D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.-H., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>

Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 56, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>

Claisse, P. A. (2014). Surface tests to determine transport properties of concrete – I: the tests. In *Transport Properties of Concrete* (pp. 26–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781782423195.26>

Coussy, O., & Monteiro, P. J. M. (2008). Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures. *Cement and Concrete Research*, 38(1), 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.006>

Cristelo, N., Tavares, P., Lucas, E., Miranda, T., & Oliveira, D. (2016). Quantitative and qualitative assessment of the amorphous phase of a Class F fly ash dissolved during alkali activation reactions – Effect of mechanical activation, solution concentration and temperature. *Composites Part B: Engineering*, 103, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.001>

Crossin, E. (2015). The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute. *Journal of Cleaner Production*, 95, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.082>

Csizmadia, J., Balázs, G., & Tamás, F. D. (2001). Chloride ion binding capacity of aluminoferrites. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 577–588. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00458-6](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00458-6)

ČSN 731322 – Stanovení mrazuvzdornosti, Česká republika (2003).

ČSN 73 1325: Stanovení mrazuvzdornosti betonu zkrácenými zkouškami, Česká republika (1972).

ČSN 731326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, Česká republika (1984).

ČSN 731371: Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, Česká republika (2005).

ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku), Česká republika (2000).

ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím, Česká republika (2009).

ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody, Česká republika (2009).

ČSN EN 12350-8: Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlítí, Česká republika (2010).

ČSN EN 12350-10: Zkoušení čerstvého betonu – Část 10: Samozhutnitelný beton – Zkouška L-truhlíkem, Česká republika (2010).

ČSN EN 12350-12: Zkoušení čerstvého betonu – Část 12: Samozhutnitelný beton – Zkouška J kroužkem, Česká republika (2010).

ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Česká republika (2009).

ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Flexural strength of test specimens, Česká republika (2009).

ČSN EN 12390-6: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles, Česká republika (2009).

ČSN EN 12390-8: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, Česká republika (2009).

ČSN EN 13295: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení odolnosti proti karbonataci, Česká republika (2004).

ČSN EN 1338: Betonové dlažební bloky – Požadavky a zkušební metody, Česká republika (2004).

ČSN EN 13877-1: Cementobetonové kryty – Část 1: Materiály, Česká republika (2013).

ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti, Česká republika (2005).

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

ČSN EN 206+A1: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Česká republika (2018).

Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>

Dang, Y., Xie, N., Kessel, A., McVey, E., Pace, A., & Shi, X. (2014). Accelerated laboratory evaluation of surface treatments for protecting concrete bridge decks from salt scaling. *Construction and Building Materials*, 55, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.014>

Davidová, V., & Reiterman, P. (2019). Autogenous Shrinkage of Composites Based on Portland Cement. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 22, 22–25. <https://doi.org/10.14311/app.2019.22.0022>

Davidová, V., & Reiterman, P. (2020). Shrinkage of Various Types of Portland Clinker-Based Cement with Respect to their Hydration Degree. *Acta Polytechnica*, 60(2), 88–97. <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0088>

Da Silva, R. V., Neves, R., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017>

De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J.-M., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1800074. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>

De Brito, J., Pereira, A. S., & Correia, J. R. (2005). Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005>

Deja, J. (2003). Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 357–361. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00052-5](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00052-5)

De Matos, P. R. de, Foiato, M., & Prudêncio, L. R., Jr. (2019). Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074>

De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>

Dolen, T. P. (2010). *Advances in Mass Concrete Technology-The Hoover Dam Studies*. Hoover Dam. Hoover Dam 75th Anniversary History Symposium. [https://doi.org/10.1061/41141\(390\)5](https://doi.org/10.1061/41141(390)5)

Drdácký, M., Fratini, F., Frankeová, D., & Slížková, Z. (2013). The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – A comprehensive assessment. *Construction and Building Materials*, 38, 1117–1128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>

Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2012). Influence of metakaolin on pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment. *Construction and Building Materials*, 36, 947–953. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.073>

Duchesne, J., & Bérubé, M. A. (1994). The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms part 1: Concrete expansion and portlandite depletion. *Cement and Concrete Research*, 24(1), 73–82. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90084-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90084-1)

Duprat, F., Vu, N. T., & Sellier, A. (2014). Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 66, 597–605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.103>

Duran-Herrera, A., De-León-Esquivel, J., Bentz, D. P., & Valdez-Tamez, P. (2019). Self-compacting concretes using fly ash and fine limestone powder: Shrinkage and surface electrical resistivity of equivalent mortars. *Construction and Building Materials*, 199, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.191>

Esquinas, A. R., Ledesma, E. F., Otero, R., Jiménez, J. R., & Fernández, J. M. (2018a). Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with non-conforming fly ash from coal-fired power plants. *Construction and Building Materials*, 182, 385–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.094>

Esquinas, A. R., Álvarez, J. I., Jiménez, J. R., & Fernández, J. M. (2018b). Durability of self-compacting concrete made from non-conforming fly ash from coal-fired power plants. *Construction and Building Materials*, 189, 993–1006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.056>

EHE-08 Instrucción Hormigón Estructural; Ministerio de Fomento, Madrid, Spain, 2008.

Ercikdi, B., Külekci, G., & Yılmaz, T. (2015). Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineral admixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings. *Construction and Building Materials*, 93, 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.042>

Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part1: General Rules for Building. European Standard. European Committee for Standardization, 2018, pp. 28-31.

Fan, C., & Miller, S. A. (2018). Reducing greenhouse gas emissions for prescribed concrete compressive strength. *Construction and Building Materials*, 167, 918–928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.092>

Farnam, Y., Villani, C., Washington, T., Spence, M., Jain, J., & Jason Weiss, W. (2016). Performance of carbonated calcium silicate based cement pastes and mortars exposed to NaCl and MgCl₂ deicing salt. *Construction and Building Materials*, 111, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.098>

Farnam, Y., Wiese, A., Bentz, D., Davis, J., & Weiss, J. (2015). Damage development in cementitious materials exposed to magnesium chloride deicing salt. *Construction and Building Materials*, 93, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.004>

Fournier, B., & Bérubé, M.-A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 167–191. <https://doi.org/10.1139/l99-072>

Ganjian, E., Jalull, G., & Sadeghi-Pouya, H. (2015). Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 77, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048>

Gao, T., Shen, L., Shen, M., Chen, F., Liu, L., & Gao, L. (2015). Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. *Journal of Cleaner Production*, 103, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.026>

Gao, Y., Zhang, J., Zhang, S., & Zhang, Y. (2017). Probability distribution of convection zone depth of chloride in concrete in a marine tidal environment. *Construction and Building Materials*, 140, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.134>

Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., & Özbay, E. (2009). Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1847–1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015>

Ghazy, A., & Bassuoni, M. T. (2017). Resistance of concrete to different exposures with chloride-based salts. *Cement and Concrete Research*, 101, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.001>

Giergiczny, Z., Glinicki, M. A., Sokołowski, M., & Zielinski, M. (2009). Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2451–2456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.001>

- Glinicki, M. A., Jaskulski, R., & Dabrowski, M. (2016). Design principles and testing of internal frost resistance of concrete for road structures - critical review. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 1, 21–43. <https://doi.org/10.7409/rabdim.016.002>
- Gonzalez-Corominas, A., & Etxeberria, M. (2014). Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>
- Groves, G. W., Brough, A., Richardson, I. G., & Dobson, C. M. (1991). Progressive Changes in the Structure of Hardened C3S Cement Pastes due to Carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(11), 2891–2896. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06859.x>
- Gruyaert, E., Maes, M., & De Belie, N. (2013a). Performance of BFS concrete: k-Value concept versus equivalent performance concept. *Construction and Building Materials*, 47, 441–455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.006>
- Gruyaert, E., Van den Heede, P., & De Belie, N. (2013b). Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>
- Guiglia, M., & Taliano, M. (2013). Comparison of carbonation depths measured on in-field exposed existing r.c. structures with predictions made using fib-Model Code 2010. *Cement and Concrete Composites*, 38, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.014>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Algin, Z. (2013). Performance of self-compacting concrete (SCC) with high-volume supplementary cementitious materials (SCMs). In *Eco-Efficient Concrete* (pp. 198–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.2.198>
- Habert, G. (2014). Assessing the environmental impact of conventional and ‘green’ cement production. In *Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 199–238). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.199>
- Haider, U., Bittnar, Z., Kopecky, L., Šmilauer, V., Pokorný, J., Zaleska, M., Prošek, Z., & Hrbek, V. (2016). DETERMINING THE ROLE OF INDIVIDUAL FLY ASH PARTICLES IN INFLUENCING THE VARIATION IN THE OVERALL PHYSICAL, MORPHOLOGICAL, AND CHEMICAL PROPERTIES OF FLY ASH. *Acta Polytechnica*, 56(4), 265–282. <https://doi.org/10.14311/ap.2016.56.0265>
- Hájková, K., Šmilauer, V., Jendele, L., & Červenka, J. (2018). Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Engineering Structures*, 174, 768–777. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.006>
- Han, S.-H., Park, W.-S., & Yang, E.-I. (2013). Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. *Construction and Building Materials*, 48, 1045–1049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.057>

- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220–6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>
- P. C. Hewlett, ed. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4th ed. Oxford: Elsevier, xxi, 1057 p., 2004
- Holt, E., & Leivo, M. (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 521–530. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(03\)00068-4](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(03)00068-4)
- Hooton, R. D., & Bickley, J. A. (2014). Design for durability: The key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials*, 67, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.016>
- Hora, M., & Reiterman, P. (2016). Assessment of the air-entraining effect of rubber powder and its influence on the frost resistance of concrete. *Revista Romana de Materiale*, 46, 327-333.
- Hu, X., Shi, Z., Shi, C., Wu, Z., Tong, B., Ou, Z., & de Schutter, G. (2017). Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Construction and Building Materials*, 149, 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.113>
- Huňka, P., & Reiterman, P. (2019) Monitoring of Structural Changes of Concrete with Fly Ash Addition during Freezing-thawing. *Brittle Matrix Composites 12 – Proceedings of the 12th International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw*, pp. 69-76.
- Chan, S. Y. N., & Ji, X. (1999). Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. *Cement and Concrete Composites*, 21(4), 293–300. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(99\)00010-4](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(99)00010-4)
- Chappex, T., & Scrivener, K. (2012). Alkali fixation of C–S–H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 42(8), 1049–1054. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.010>
- Cheng, Y., Huang, F., Li, G., Xu, L., & Hou, J. (2014). Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.023>
- Ichikawa, T. (2009). Alkali–silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 716–726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.004>
- Ipavec, A., Gabrovšek, R., Vuk, T., Kaučič, V., Maček, J., & Meden, A. (2010). Carboaluminate Phases Formation During the Hydration of Calcite-Containing Portland Cement. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), 1238–1242. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04201.x>
- Itim, A., Ezziane, K., & Kadri, E.-H. (2011). Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3603–3609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055>
- Isgor, O. B., & Razaqpur, A. G. (2004). Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 57–73. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00125-7](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00125-7)

- Jackson, K. A., & Chalmers, B. (1958). Freezing of Liquids in Porous Media with Special Reference to Frost Heave in Soils. *Journal of Applied Physics*, 29(8), 1178–1181. <https://doi.org/10.1063/1.1723397>
- Jiang, L. H., & Malhotra, V. M. (2000). Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1785–1789. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00397-5](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00397-5)
- Jones, M. R., Ozlutas, K., & Zheng, L. (2016). Stability and instability of foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 68(11), 542–549. <https://doi.org/10.1680/macr.15.00097>
- Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Kannan, D. M., Aboubakr, S. H., EL-Dieb, A. S., & Reda Taha, M. M. (2017). High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 144, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>
- Kayondo, M., Combrinck, R., & Boshoff, W. P. (2019). State-of-the-art review on plastic cracking of concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 886–899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197>
- Keppert, M., Davidová, V., Jelínek, J., & Reiterman, P. (2019). The detailed study of the variability of Portland cement composition, *Brittle Matrix Composites 12 – Proceedings of the 12th International Symposium on Brittle Matrix Composites*, Warsaw, pp. 45-51.
- Keppert, M., Urbanová, M., Brus, J., Čáchová, M., Fořt, J., Trník, A., Scheinherrová, L., Záleská, M., & Černý, R. (2017). Rational design of cement composites containing pozzolanic additions. *Construction and Building Materials*, 148, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.032>
- Kevern, J. T., & Nowasell, Q. C. (2018). Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 161, 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055>
- Kim, T., Olek, J., & Jeong, H. (2015). Alkali–silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. *Cement and Concrete Research*, 71, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.017>
- Kinuthia, J. M., & Nidzam, R. M. (2011). Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste in sustainable construction. *Waste Management*, 31(8), 1867–1878. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.020>
- Kuzielová, E., Žemlička, M., Bartoničková, E., & Palou, M. T. (2017). The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement–slag–silica fume–metakaolin. *Construction and Building Materials*, 135, 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.105>
- Kosmatka, M.L., & Wilson, S.H. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*, 15th ed. Port. Cem. Assoc, Illinois, USA.

- Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2017). Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 84, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.009>
- Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., & Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.052>
- Kubissa, W., Jaskulski, R., & Reiterman, P. (2017). Ecological Concrete Based on Blast-Furnace Cement with Incorporated Coarse Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash Addition. *Journal of Renewable Materials*, 5(1), 53–61. <https://doi.org/10.7569/jrm.2017.634103>
- Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., & Jung, S. H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*, 31(1), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.03.004>
- Liu, Z., & Hansen, W. (2015). Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt. *Cement and Concrete Research*, 74, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.015>
- Lee, C.-L., Huang, R., Lin, W.-T., & Weng, T.-L. (2012). Establishment of the durability indices for cement-based composite containing supplementary cementitious materials. *Materials & Design*, 37, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.030>
- Lee, B. D., Choi, Y. S., Kim, Y. G., Kim, I. S., & Yang, E. I. (2017). A comparison study of performance and environmental impacts of chloride-based deicers and eco-label certified deicers in South Korea. *Cold Regions Science and Technology*, 143, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.010>
- Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., & Kim, G. Y. (2006). Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1279–1285. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.005>
- Leemann, A., Lothenbach, B., & Thalmann, C. (2011). Influence of superplasticizers on pore solution composition and on expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Construction and Building Materials*, 25(1), 344–350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.019>
- Li, K., Zhang, D., Li, Q., & Fan, Z. (2019). Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. *Cement and Concrete Research*, 115, 545–558. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.006>
- Liu, M. (2010). Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.012>
- Liu, L., Shen, D., Chen, H., Sun, W., Qian, Z., Zhao, H., & Jiang, J. (2014a). Analysis of damage development in cement paste due to ice nucleation at different temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 53, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.007>

- Liu, L., Wu, S., Chen, H., & Haitao, Z. (2014b). Numerical investigation of the effects of freezing on micro-internal damage and macro-mechanical properties of cement pastes. *Cold Regions Science and Technology*, 106–107, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.07.003>
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>
- Malhotra, V.M. (2006) Reducing CO2 emissions, *Concrete International*, 28(9), 42-45.
- Marques, P. F., Chastre, C., & Nunes, Â. (2013). Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 37, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.007>
- Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N., & Sánchez-Espinosa, E. (2018). Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100>
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>
- Mendes, J. C., Moro, T. K., Figueiredo, A. S., Silva, K. D. do C., Silva, G. C., Silva, G. J. B., & Peixoto, R. A. F. (2017). Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. *Construction and Building Materials*, 145, 648–661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.024>
- Miura, M. & Ichikawa, T. (1996). The role of calcium ion in the formation of crack in concrete by alkali–silica reaction, *Kensetsuyou Genzairyou* 6, 43–48.
- Miura, M. (1997). Alkali–Aggregate Reaction in Concrete, PhD. Thesis, Hokkaido University.
- Modrý, S. (2001). Trvanlivost betonu a železobetonu. *Sekurkon*, Praha, p. 247.
- Moffatt, E. G., Thomas, M. D. A., & Fahim, A. (2017). Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. *Cement and Concrete Research*, 102, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>
- Modrý, S. (2001). Durability of Concrete and Reinforced Concrete: selected topics, *Sekurkon*, Prague, p. 246.
- Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>

- Morandea, A., Thiéry, M., & Dangla, P. (2014). Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. *Cement and Concrete Research*, 56, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>
- Mostofinejad, D., Nosouhian, F., & Nazari-Monfared, H. (2016). Influence of magnesium sulphate concentration on durability of concrete containing micro-silica, slag and limestone powder using durability index. *Construction and Building Materials*, 117, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.091>
- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N., & Petit, L. (2008). Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 38(3), 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.013>
- Naciri, A., & Hamina, M. C. (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 29(8), 2378–2384. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>
- Navrátilová, E., & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
- Nordtest Method NT Build 492. Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from non-Steady-State Migration Experiments, Finland, 1999.
- Oliveira, M. J., Ribeiro, A. B., & Branco, F. G. (2017). Shrinkage of self-compacting concrete. A comparative analysis. *Journal of Building Engineering*, 9, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.12.002>
- Osborne, G. J. (1999). Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 11–21. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(98\)00032-8](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(98)00032-8)
- Otieno, M., Beushausen, H., & Alexander, M. (2016). Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete – Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. *Cement and Concrete Research*, 79, 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.009>
- Pacewska, B., Blonkowski, G., & Wilińska, I. (2008). Studies on the pozzolanic and hydraulic properties of fly ashes in model systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94(2), 469–476. <https://doi.org/10.1007/s10973-008-9179-8>
- Pacewska, B., & Wilińska, I. (2014). Comparative investigations of influence of chemical admixtures on pozzolanic and hydraulic activities of fly ash with the use of thermal analysis and infrared spectroscopy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(1), 119–127. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4334-x>
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. (1991). Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*, 46(5–6), 1333–1338. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)85060-b](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)85060-b)

- Pacheco Torgal, F., Miraldo, S., Labrincha, J. A., & De Brito, J. (2012). An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials*, 36, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Paulini, P. (1994). A through solution model for volume changes of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 24(3), 488–496. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90137-6)
- Pavlík, Z., Trník, A., Kulovaná, T., Scheinherrová, L., Rahhal, V., Irassar, E., & Černý, R. (2016). DSC and TG Analysis of a Blended Binder Based on Waste Ceramic Powder and Portland Cement. *International Journal of Thermophysics*, 37(3). <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2043-3>
- Peng, G.-F., Ma, Q., Hu, H.-M., Gao, R., Yao, Q.-F., & Liu, Y.-F. (2007). The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60MPa grade concrete. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1034–1039. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.002>
- Pertold, Z., Šachlová, Š., Šťastná, A., Bílek ml., V., Krutilová, K., Bílek st., V., & Topolář, L. (2014). Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace, *Beton TKS 2*, 34-41.
- Peter, M. A., Muntean, A., Meier, S. A., & Böhm, M. (2008). Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. *Cement and Concrete Research*, 38(12), 1385–1393. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.003>
- Peterson, K., Julio-Betancourt, G., Sutter, L., Hooton, R. D., & Johnston, D. (2013). Observations of chloride ingress and calcium oxychloride formation in laboratory concrete and mortar at 5°C. *Cement and Concrete Research*, 45, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.001>
- Piasta, W., & Sikora, H. (2015). Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes. *Construction and Building Materials*, 99, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.018>
- Polozhiy, K., Siddique, J. A., & Reiterman, P. (2015). Low Cost Cement Floor Screed. *Materials Science Forum*, 824, 77–80. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.824.77>
- Poon, C. S., Qiao, X. C., & Lin, Z. S. (2003). Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1857–1865. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00213-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00213-8)
- Poppe, A.-M., & De Schutter, G. (2005). Cement hydration in the presence of high filler contents. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2290–2299. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.008>
- Pronina, N., Krüger, S., Bornhöft, H., Deubener, J., & Ehrenberg, A. (2018). Cooling history of a wet-granulated blast furnace slag (GBS). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 344–349. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.054>

- T.C. Powers, (1949). The air requirement of frost-resistant concrete, Highway Research Board Proceedings 184.
- Pruckner, F., & Gjrv, O. E. (2004). Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1209–1217. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.015>
- Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S., & Attachaiyawuth, A. (2016). Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 128, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.087>
- Puthipad, N., Ouchi, M., & Attachaiyawuth, A. (2018). Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state. *Construction and Building Materials*, 180, 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.138>
- Qiao, C., Suraneni, P., & Weiss, J. (2018a). Damage in cement pastes exposed to NaCl solutions. *Construction and Building Materials*, 171, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.123>
- Qiao, C., Suraneni, P., & Weiss, J. (2018b). Flexural strength reduction of cement pastes exposed to CaCl₂ solutions. *Cement and Concrete Composites*, 86, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.021>
- Reiterman, P. (2018). Influence of metakaolin additive and nanoparticle surface treatment on the durability of white cement based concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1504235>
- Qiu, Q. (2020). A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. *Construction and Building Materials*, 247, 118503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118503>
- Rahimi-Aghdam, S., Masoero, E., Rasoolinejad, M., & Baant, Z. P. (2019). Century-long expansion of hydrating cement counteracting concrete shrinkage due to humidity drop from selfdesiccation or external drying. *Materials and Structures*, 52(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1307-8>
- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J. H., & Thomas, M. D. A. (2015). Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research*, 76, 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.024>
- Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., & Baant, Z. P. (2019). Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4. *Materials and Structures*, 52(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1331-3>
- Rath, S., Ouchi, M., Puthipad, N., & Attachaiyawuth, A. (2017). Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. *Construction and Building Materials*, 148, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.105>

- Rozière, E., Loukili, A., & Cussigh, F. (2009). A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Construction and Building Materials*, 23(1), 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
- Reiterman, P., & Keppert, M. (2017). Effect of Ceramic Powder Particle Size Distribution on its Reactivity in Lime-Based Binders. *Materials Science Forum*, 908, 40–44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.908.40>
- Reiterman, P., & Keppert, M. (2020). Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 1, 51–64. <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.003>
- Reiterman, P., Holčapek, O., Zobal, O., & Keppert, M. (2019). Freeze-Thaw Resistance of Cement Screed with Various Supplementary Cementitious Materials. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 58(1), 66–74. <https://doi.org/10.1515/rams-2019-0006>
- Reiterman, P., Jaskulski, R., Kubissa, W., Holčapek, O., & Keppert, M. (2020). Assessment of Rational Design of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash and Limestone Powder in Terms of Long-Term Durability. *Materials*, 13(12), 2863. <https://doi.org/10.3390/ma13122863>
- Rivera, F., Martínez, P., Castro, J., & López, M. (2015). “Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates”. *Cement and Concrete Composites*, 63, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001>
- Reynolds, S. (2009). *The future of ferrous slag, Market Forecast to 2020*, Pira International Ltd. Leatherhead, UK.
- Sadek, D. M., & El Nouhy, H. A. (2014). Properties of paving units incorporating crushed ceramic. *HBRC Journal*, 10(2), 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.11.006>
- Sáez del Bosque, I. F., Van den Heede, P., De Belie, N., Sánchez de Rojas, M. I., & Medina, C. (2020). Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. *Construction and Building Materials*, 234, 117336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117336>
- Sahmaran, M., Yildirim, G., & Erdem, T. K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.013>
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S., & Maghsoudi, A. A. (2018). Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. *Construction and Building Materials*, 165, 247–263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.235>
- Santagata, M. C., & Collepardi, M. (2000). The effect of CMA deicers on concrete properties. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1389–1394. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00334-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00334-3)
- Scrivener, K. (2012). Issues in sustainability in cements and concrete, *American Ceramic Society Bulletin* 91, 47-50.

Setzer, M.J., & Auberg, R. (2006). Damages caused by freeze-thaw cycles with de-icing salt Topical results - Recommendations for practice, *Concrete Precasting Plant and Technology*, 72, 96-97.

Setzer, M. J. (2001). Mechanical Stability Criterion, Triple-Phase Condition, and Pressure Differences of Matter Condensed in a Porous Matrix. *Journal of Colloid and Interface Science*, 235(1), 170–182. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7317>

Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 70, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.099>

Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*, 82, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068>

Shang, H., Song, Y., & Ou, J. (2009). Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(3), 261–266. [https://doi.org/10.1016/s0894-9166\(09\)60273-1](https://doi.org/10.1016/s0894-9166(09)60273-1)

Shafaatian, S. M. H., Akhavan, A., Maraghechi, H., & Rajabipour, F. (2013). How does fly ash mitigate alkali–silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? *Cement and Concrete Composites*, 37, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.004>

Shehata, M. H., & Thomas, M. D. A. (2002). Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali–silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 341–349. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00680-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00680-9)

Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., & Mobasher, B. (2010). Transport properties in metakaolin blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2217–2223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.035>

Shi, X., Fay, L., Yang, Z., Nguyen, T. A., & Liu, Y. (2009). Corrosion of Deicers to Metals in Transportation Infrastructure: Introduction and Recent Developments. *Corrosion Reviews*, 27(1–2), 23–52. <https://doi.org/10.1515/corrrev.2009.27.1-2.23>

Shi, X., Fay, L., Peterson, M. M., Berry, M., & Mooney, M. (2011). A FESEM/EDX investigation into how continuous deicer exposure affects the chemistry of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 957–966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.086>

Shi, X., Fortune, K., Fay, L., Smithlin, R., Cross, D., Yang, Z., & Wu, J. (2012). Longevity of corrosion inhibitors and performance of anti-icing products after pavement application: A case study. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.06.009>

Shi, J., Ming, J., Sun, W., & Zhang, Y. (2017). Corrosion performance of reinforcing steel in concrete under simultaneous flexural load and chlorides attack. *Construction and Building Materials*, 149, 315–326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.092>

Shon, C.-S., Abdigaliyev, A., Bagitova, S., Chung, C.-W., & Kim, D. (2018). Determination of air-void system and modified frost resistance number for freeze-thaw resistance evaluation of ternary blended

concrete made of ordinary Portland cement/silica fume/class F fly ash. *Cold Regions Science and Technology*, 155, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.003>

Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S. L., & Segadães, A. M. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 62, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019> G.W. Scherer, Crystallization in pores, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 1347–1358.

Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1347–1358. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00002-2)

Schneider, M. (2015). Process technology for efficient and sustainable cement production. *Cement and Concrete Research*, 78, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.014>

Schiessl, P., Bamforth, P., Baroghel-Bouny, V., Corley, G., Faber, M., Forbes, J., Gehlen, C., Helene, P., Helland, S., Ishida, T., Markeset, G., Nilsson, L.-O., Rostam, S., Siemes, A. J. M., & Walraven, J. (2006). fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design. In fib Bulletins. fib. The International Federation for Structural Concrete. <https://doi.org/10.35789/fib.bull.0034>

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*, 32(3), 1501–1507. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.043>

Silva, P. R., & de Brito, J. (2015). Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, 86, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110>

Silva, P., & de Brito, J. (2016). Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(4), 430–453. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1131200>

Singh, N., & Singh, S. P. (2016a). Carbonation resistance and microstructural analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete containing Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 127, 828–842. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.067>

Singh, N., & Singh, S. P. (2016b). Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 121, 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009>

Soriano, L., Monzó, J., Bonilla, M., Tashima, M. M., Payá, J., & Borrachero, M. V. (2013). Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 42, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.007>

Spragg, R. P., Castro, J., Li, W., Pour-Ghaz, M., Huang, P.-T., & Weiss, J. (2011). Wetting and drying of concrete using aqueous solutions containing deicing salts. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.009>

Stanton, T.E. (1940a). Influence of cement and aggregate on concrete expansion, *Eng. News Rec.* February 1, 59–61.

Stanton, T. E. (1940b). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 66 (10), 1781–181.

Subaşı, S., Öztürk, H., & Emiroğlu, M. (2017). Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>

Sun, Z., & Scherer, G. W. (2010). Effect of air voids on salt scaling and internal freezing. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.027>

Suprenant, B. A. (1985). Freezing concrete as a construction practice. *Cold Regions Science and Technology*, 11(2), 195–197. [https://doi.org/10.1016/0165-232x\(85\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0165-232x(85)90018-7)

Suraneni, P., Monical, J., Unal, E., Farnam, Y., & Weiss, J. (2017). Calcium Oxychloride Formation Potential in Cementitious Pastes Exposed to Blends of Deicing Salt. *ACI Materials Journal*, 114(4). <https://doi.org/10.14359/51689607>

Suryavanshi, A. K., & Narayan Swamy, R. (1996). Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 729–741. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(96\)85010-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(96)85010-1)

Sutter, L., Peterson, K., Touton, S., Van Dam, T., & Johnston, D. (2006). Petrographic evidence of calcium oxychloride formation in mortars exposed to magnesium chloride solution. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1533–1541. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.022>

Šmilauer, V. & Reiterman, P. (2020). Interní výzkumná zpráva č. 312 3121805A132 – 2020 – 2: Výsledky laboratorních zkoušek nových směsných silničních cementů CEM II/A-S a CEM II/B-S.

Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací (TKP STK), Kapitola 6: Cementobetonový kryt, Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, 2015.

Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací (TKP STK), Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty, Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, 2016.

Technické kvalitativní podmínky staveb ŘVC ČR, Kapitola 1: Provádění betonových konstrukcí, Ředitelství vodních cest ČR, 2017.

Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah, Kapitola 17: Beton pro konstrukce, Správa železniční dopravní cesty, 2013.

- Thomas, M. (2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>
- Thomas, M. (2016) The durability of concrete for marine construction: Materials and properties. In *Marine Concrete Structures*; Alexander, M.G., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, pp. 151–170.
- Tian, W., & Han, N. (2018). Pore characteristics (>0.1 mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.027>
- Torkittikul, P., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004>
- Turanli, L., Bektas, F., & Monteiro, P. J. M. (2003). Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1539–1542. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00101-7](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00101-7)
- Turgut, P., & Demir, F. (2019). The influence of disposed fly ash on Ca²⁺ leaching and physico-mechanical properties of mortars. *Journal of Cleaner Production*, 226, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.105>
- Ulm, F.-J., Coussy, O., Kefei, L., & Larive, C. (2000). Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(3), 233–242. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2000\)126:3\(233\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2000)126:3(233))
- Uwasu, M., Hara, K., & Yabar, H. (2014). World cement production and environmental implications. *Environmental Development*, 10, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.02.005>
- U.S. Geological Survey (2020), dostupné z <https://www.usgs.gov/>
- Vayghan, A.G., Rajabipour, F., & Rosenberger, J. L. (2016). Composition–rheology relationships in alkali–silica reaction gels and the impact on the gel’s deleterious behavior. *Cement and Concrete Research*, 83, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.011>
- Valenza, J.J., Vitousek, S., & Scherer, G.W. (2005). Expansion of hardened cement paste in saline solutions, creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, London, pp. 207-212.
- Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Van den Heede, P., & De Belie, N. (2014). A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation. *Construction and Building Materials*, 55, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.033>

- Van den Heede, P., Furniere, J., & De Belie, N. (2013). Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 37, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.005>
- Vimmrová, A., Keppert, M., Michalko, O., & Černý, R. (2014). Calcined gypsum–lime–metakaolin binders: Design of optimal composition. *Cement and Concrete Composites*, 52, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.05.011>
- Vinkler, M., & Vítek, J. L. (2019). Drying and shrinkage of massive concrete wall segments—3 years experiment and analytical observations. *Materials and Structures*, 52(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1329-x>
- Wang, K., Jansen, D. C., Shah, S. P., & Karr, A. F. (1997). Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(3), 381–393. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(97)00031-8)
- Wang, K., Nelsen, D. E., & Nixon, W. A. (2006). Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.07.006>
- Wang, X.-Y., & Lee, H.-S. (2009). A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. *Construction and Building Materials*, 23(2), 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019>
- Wang, X., Wang, K., Li, J., Garg, N., & Shah, S. P. (2014). Properties of self-consolidating concrete containing high-volume supplementary cementitious materials and nano-limestone. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3(3–4), 245–255. <https://doi.org/10.1080/21650373.2014.954155>
- Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., & Chen, Z. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 147, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.172>
- Wang, X.-H., Val, D. V., Zheng, L., & Jones, M. R. (2020). Carbonation of loaded RC elements made of different concrete types: Accelerated testing and future predictions. *Construction and Building Materials*, 243, 118259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118259>
- WARD, C., & FRENCH, D. (2006). Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry. *Fuel*, 85(16), 2268–2277. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.12.026>
- Wilińska, I., & Pacewska, B. (2018). Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(1), 823–843. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6915-y>
- Wilson, M. A., Taylor, S. C., & Hoff, W. D. (1998). The initial surface absorption test (ISAT): an analytical approach. *Magazine of Concrete Research*, 50(2), 179–185. <https://doi.org/10.1680/mac.1998.50.2.179>

- Xie, T., & Visintin, P. (2018). A unified approach for mix design of concrete containing supplementary cementitious materials based on reactivity moduli. *Journal of Cleaner Production*, 203, 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.254>
- Xu, J., Jiang, L., Wang, W., & Jiang, Y. (2011). Influence of CaCl₂ and NaCl from different sources on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 663–669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.023>
- Yazıcı, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>
- Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., & Huang, T. (2016). Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. *Construction and Building Materials*, 112, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>
- Yu, J., Lu, C., Leung, C. K. Y., & Li, G. (2017). Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 147, 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- Yodsudjai, W., & Wang, K. (2013). Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements. *Construction and Building Materials*, 40, 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.053>
- Younsi, A., Turcry, Ph., Aït-Mokhtar, A., & Staquet, S. (2013). Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying. *Cement and Concrete Research*, 43, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.008>
- Zhang, D. S. (1996). Air entrainment in fresh concrete with PFA. *Cement and Concrete Composites*, 18(6), 409–416. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(96\)00033-9](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(96)00033-9)
- Zhang, X., Zhou, X., Zhou, H., Gao, K., & Wang, Z. (2013). Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. *Applied Clay Science*, 79, 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.020>
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Vogel, M., Müller, H. S., & Zhao, T. (2017). Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete. *Cement and Concrete Research*, 100, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>
- Zhao, Q., He, X., Zhang, J., & Jiang, J. (2016). Long-age wet curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.065>
- Zhou, J., & Li, D. (2012). Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil. *Cold Regions Science and Technology*, 72, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.006>
- Zobal, O., Padevet, P., Smilauer, V., Kopecký, L., & Bittnar, Z. (2013). Experimental analysis of mechanical and material properties of concrete Orlik dam after 50 years, 30th DANUBIA-ADRIA

Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Primosten, Croatia, 25.-28.9.; Alfirevic, I., Semenski, D., Eds.; Croatian Society of Mechanics, 189-190.

Zou, D., Li, K., Li, W., Li, H., & Cao, T. (2018). Effects of pore structure and water absorption on internal curing efficiency of porous aggregates. *Construction and Building Materials*, 163, 949–959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.170>