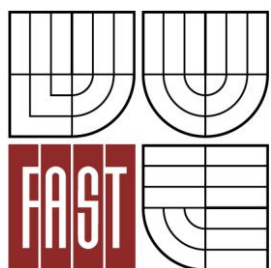




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ

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

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ TRVANLIVOSTI STŘÍKANÝCH BETONŮ

POSSIBILITIES OF INCREASING THE DURABILITY OF SHOTCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAEL MERTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michael Merta
Název	Možnosti zvyšování trvanlivosti stříkaných betonů
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání bakalářské práce	24. 5. 2013
V Brně dne 30. 11. 2012	

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

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

Podklady a literatura

Časopis beton TKS

Dudley R. Morgan: Shotcrete - A Compilation of Papers

Shotcrete Magazine - A quarterly publication of the American Shotcrete Association

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce bude shrnutí poznatků o stříkaných betonech, které jsou použity pro stupeň vlivu prostředí kategorie XA a XF. Důraz bude kladen zejména na dočasné konstrukce ze stříkaného betonu použité v agresivním prostředí XA a zároveň budou také sledovány sanace a trvalé konstrukce zhotovené ze stříkaného betonu, které jsou vystaveny účinkům prostředí XF. Důraz bude kladen zejména na popis specifických požadavků pro tyto druhy stříkaného betonu, zejména z pohledu vlivu na jeho trvanlivost

V rámci bakalářské práce bude postupováno dle těchto bodů:

- Shrnutí požadavků kladených na stříkané betony vystavené působení prostředí XA a XF,
- popis jednotlivých postupů pro sledování trvanlivosti stříkaných betonů,
- Posouzení možností zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů, zejména zvýšení vodotěsnosti betonu a odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek,
- popis opatření nezbytných pro dosažení vyšší trvanlivosti stříkaných betonů.

Část bakalářské práce bude zaměřena na praktické aplikace stříkaného betonu zhotoveného pomocí běžného laboratorního vybavení za účelem testování trvanlivosti těchto betonů. Sledovány budou zejména vodotěsnost betonu a odolnost proti působení vody a CHRL.

Rozsah práce cca 40 stran.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou stříkaných betonů a možnostmi zvyšování jejich trvanlivosti. Teoretická část je pojata formou rešerše o zjištěných dosavadních poznatcích týkajících se stříkaných betonů. Je kladen důraz zejména na možnosti použití stříkaných betonů v agresivním prostředí XA a XF. Experimentální část je zaměřena na laboratorní testování stříkaných betonů. Byla sledována vodotěsnost stříkaných betonů, odolnost povrchu betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám s ohledem na vývoj pevností v tlaku v průběhu jeho zrání.

Klíčová slova

stříkaný beton, technologie nástřiku, trvanlivost, stupeň vlivu prostředí, chemická agresivita, zmrazovací cykly

Abstract

This thesis deals with an issue of shotcrete and possibilities of increasing its durability. Theoretical part of the thesis is conceived in a form of summary of current knowledge concerning shotcrete. The emphasis is mainly on the possibilities of using shotcrete in exposure classes XA and XF. The experimental part focuses on laboratory testing of shotcrete. Waterproofness of shotcrete, its surface resistance to water and chemical de-icing agents was tested with regard to a development of its compressive strength during maturation.

Keywords

shotcrete, shotcreting process, durability, exposure class, chemical agresivity, freeze-thaw cycles

Bibliografická citace VŠKP

MERTA, Michael. *Možnosti zvyšování trvanlivosti stříkaných betonů*. Brno, 2013. 86 s., 86 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 24.5.2013

.....
podpis autora
Michael Merta

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D., za odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce. Poděkování patří také mým rodičům, kteří mě při studiu podporují.

Obsah

I. Úvod	13
II. Cíl práce	14
III. Teoretická část.....	15
1. Historie stříkaných betonů.....	15
2. Trvanlivost betonu.....	16
2.1. Fyzikální vlivy působící na trvanlivost betonu.....	16
2.1.1. Mrazuvzdornost.....	17
2.1.2. Odolnost vůči požáru	17
2.2. Chemické vlivy na trvanlivost betonu.....	18
2.2.1. Sulfatace	18
2.2.2. Karbonatace	19
3. Stupně vlivu prostředí	19
3.1. Stupeň vlivu prostředí bez nebezpečí koroze nebo narušení (X0).....	20
3.2. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem karbonatace (XC).....	20
3.3. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody (XD).....	21
3.4. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem chloridů z mořské vody (XS).....	21
3.5. Stupně vlivu prostředí při střídavém působení mrazu a rozmrazování (XF)	22
3.6. Stupně vlivu prostředí při chemickém působení (XA).....	23
3.7. Stupně vlivu prostředí při mechanickém působení (XM).....	24
4. Složky stříkaných betonů s ohledem na jejich trvanlivost	24
4.1. Cement.....	24
4.2. Kamenivo.....	25
4.3. Voda.....	26
4.3.1. Voda záměsová.....	26

4.3.2. Voda ošetřovací.....	27
4.4. Přísady.....	27
4.4.1 Přísady urychlující tuhnutí	27
4.4.2. Plastifikační a superplastifikační přísady	28
4.4.3. Provzdušňující přísady	29
4.4.4. Interní dodatečná přísada MEYCO TCC735.....	29
4.4.5. Další přísady	30
4.5. Příměsi.....	30
4.5.1. Inertní příměsi (druhu I)	30
4.5.1.1. Pigmenty	31
4.5.2. Aktivní příměsi - pucolánové a latentně hydraulické příměsi (druhu II)..	31
4.5.2.1. Mikromletý vápenec	32
4.5.2.2. Polétavý popílek	32
4.5.2.3. Křemičité úlety - mikrosilika (Silica Fume)	32
4.5.2.4. Jemně mletá vysokopecní struska.....	33
4.5.2.5. Metakaolin.....	33
4.5.2.6. Další příměsi druhu II	34
4.6. Vlákná (rozptýlená výztuž).....	34
4.6.1. Ocelová vlákna	34
4.6.2. Syntetická vlákna.....	35
5. Technologie nástřiku.....	35
5.1. Nástřik suchým způsobem.....	35
5.2. Nástřik mokrým způsobem.....	36
6. Požadavky kladené na stříkané betony.....	36
6.1. Klasifikace pevnosti stříkaného betonu.....	37
6.2. Třídy pevnosti mladého stříkaného betonu.....	37
6.3. Třídy pevnosti ztvrdlých stříkaných betonů.....	38

6.4. Požadavky kladené na stříkané betony vystavené působení agresivních prostředí XA a XF.....	39
6.4.1. Propustnost (permeabilita).....	39
6.4.2. Vodotěsnost	41
6.4.3. Mrazuvzdornost.....	41
6.4.4. Odolnost proti síranům	41
6.4.5. Odolnost vůči agresivním plynům	42
7. Zkoušení stříkaných betonů	42
7.1. Odběr vzorků.....	43
7.2. Zhotovení zkušební desky.....	43
7.3. Zkoušení pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu.....	43
7.4. Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu.....	44
7.5. Zkoušení stříkaných betonů z hlediska trvanlivosti.....	44
7.5.1. Stanovení propustnosti	44
7.5.2. Zkoušení vodotěsnosti betonu – hloubky průsaku tlakovou vodou.....	45
7.5.3. Zkoušení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL).....	45
7.5.4. Zkoušení mrazuvzdornosti betonu	46
8. Významné realizace stříkaného betonu vystaveného působení agresivního prostředí.....	47
8.1. Stříkaný beton v expozici prostředí XA.....	48
8.1.1. Tunel Löttinge (Stockholm, Švédsko)	48
8.1.2. Čistírna odpadních vod (Carson, Kalifornie)	49
8.1.3. Čistírna odpadních vod (Houston, Texas).....	51
8.1.4. Stříkaný beton v petrochemickém průmyslu	52
8.2. Stříkané betony vystavené prostředí XF.....	53
8.2.1. Přehrada na řece Jordan (Vancouver Island, Britská Kolumbie)	53
8.2.2. Maják Haute-Fond Prince (záliv Sv. Vavřince, Quebec).....	54

8.2.3. Bobová a sáňkařská dráha (Whistler, Britská Kolumbie)	56
8.2.4. Skatepark (Ružomberok, Slovensko).....	57
9. Posouzení možností a popis opatření pro zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů	59
9.1. Zvýšení vodotěsnosti stříkaných betonů.....	59
9.2. Zvýšení mrazuvzdornosti a odolnosti betonu proti vodě a CHRL.....	60
9.3. Volba vhodných složek stříkaných betonů pro zvýšení jejich trvanlivosti....	61
9.4. Vysokohodnotný stříkaný beton (HPS).....	62
9.5. Ošetřování stříkaných betonů.....	62
9.6. Vhodná technologie nástřiku.....	63
9.7. Finální úprava povrchu stříkaných betonů.....	63
9.7.1. Úprava hladítka	63
9.7.2. Krystalizační hmoty	63
9.7.4. Epoxidové nátěry.....	64
9.7.5. Injektáž.....	64
9.7.6. Drenážní systém.....	65
9.7.7. Další možnosti zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů	65
9.7.7.1. Stříkaný beton modifikovaný geopolymery	65
IV. Experimentální část práce	66
1. Složení betonu.....	66
2. Metodika práce	67
2.1. Příprava betonu.....	67
2.2. Zhotovení zkušebních těles.....	67
2.3. Zkoušení vlastností kameniva.....	68
2.4. Zkoušení vlastností betonu.....	68
3. Diskuze výsledků	75
V. Závěr	77
VI. Seznam použitých zdrojů	79

VII. Seznam použitých obrázků	84
VIII. Seznam tabulek	84
IX. Seznam grafů	86

I. Úvod

Stříkaný beton je jednou z více metod zpracování betonu (kompozitní směs skládající se z plniva, pojiva, vody přísad a příměsí), jež se pomocí speciálního zařízení na bázi stlačeného vzduchu stříká na podklad. Stříkaný beton vytváří homogenní vrstvu díky vlastní pohybové energii, která vzniká tlakem v trysce. Ostatní technologické požadavky musí být dodrženy stejně jako u běžného transportbetonu (vodní součinitel – w/c, množství cementu a kameniva, správná konzistence atd). Stříkaný beton (tzv „torkret“) neodmyslitelně patří ke stavebnímu materiálu, který se ve velké míře využívá ve stavitelství. Největší uplatnění nachází v podzemním stavitelství při vytváření dočasného i finálního ostění tunelů. Primární ostění zajišťuje stabilitu výrubu spolupůsobením betonu (popř. doplněného obloukovými nosníky, výztužemi nebo kotvami) s horninovým masivem (metoda ražby NRTM - Nová rakouská tunelovací metoda, mechanizované ražby pomocí tunelovacích strojů – TMB). Toto ostění přenáší tlaky vyvozené z horninového masivu do doby, než je provedeno definitivní ostění. Stříkaný beton slouží mnohdy jako konstrukční materiál finálního ostění, proto je třeba zajistit jeho potřebnou trvanlivost. Možnosti použití stříkaného betonu jako finálního ostění je rozmanité. Zde je několik příkladů: Novostavby, zajištění svahů, sanace různých konstrukcí, vodní stavitelství, ohnivzdorné nástřiky, zejména tvarově rozmanité struktury, kde by bylo problematické beton uložit do bednění a ztuhnout konvenčními metodami. Lze jej užít i pro ochranu konstrukce proti korozi a požáru. Dalším rozdílem mezi stříkaným betonem a běžným transportbetonem je předepsaná maximální velikost frakce kameniva. Pro stříkaný beton je maximální velikost frakce kameniva určena technologií nástřiku a vlastnosti podkladu či výztužení. Velkou výhodou stříkaných betonů je jejich flexibilita použití, rychlost provádění a hospodárnost.

II. Cíl práce

Cílem této práce je shrnutí dosavadních poznatků o stříkaných betonech, které jsou použity v agresivním prostředí a popis nezbytných opatření pro dosažení zvýšené trvanlivosti stříkaných betonů. Je kladen důraz zejména na trvanlivost stříkaných betonů v expozici stupňů vlivu prostředí XA a XF, sledování novostaveb i sanací realizovaných stříkanými betony, které jsou vystaveny těmto stupňům vlivu prostředí, popis specifických požadavků pro tyto stříkané betony a jednotlivých postupů pro hodnocení jejich trvanlivosti.

V rámci experimentální práce bylo cílem posouzení vlivu složení betonu a množství urychlující přísady na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Sledována byla vodotěsnost a trvanlivost betonu včetně pevnosti mladého stříkaného betonu a pevnosti v tlaku v průběhu zrání. Vlastnosti stříkaného betonu byly v závislosti na množství urychlující přísady srovnány s nulovým (referenčním) betonem – beton bez urychlující přísady.

III. Teoretická část

1. Historie stříkaných betonů

První myšlenka vznikla v roce 1895, kdy Dr. Carl Ethan Akeley (1864 – 1926) jako správce sbírky prehistorických zvířat v Muzeu přírodních věd v Chicagu, hledal způsob, kterým by vytvořil modely těchto tvorů. Právě on vynalezl stříkací zařízení známé jako „Cement Gun“, kterou později použil na opravy starých betonových domů. Tímto se zapsal do historie jako vynálezce stříkaného betonu. Metoda byla patentována včetně názvu „Gunité“ (stříkaná malta) v roce 1907 v Pensylvánii a posléze byla převzata Betonářskou společností Cement Gun Company. Zařízení bylo tvořeno tlakovou komorou, kde byla uložena směs písku s cementem. Pomocí proudu stlačeného vzduchu byla suchá směs dopravována výdejní hadicí k trysce, která byla vybavena hadicí s přívodem vody a ze které směs pod tlakem vylétala ven. V této trysce směs procházela proudem vody a docházelo k hydrataci. Tento druh betonu se začal používat na začátku 20. století v USA, kde se rychle rozšířil do celého světa. [1]



Obr. 1: Historický snímek stříkacího zařízení [1]



Obr. 2: Exponát ze stříkaného betonu [1]

Na počátku vývoje stříkaného betonu se používalo k nástřiku metody suchého nástřiku, v dnešní době převažuje technologie mokré směsi. Na rozdíl od suché směsi, jež je smíchána s vodou až v trysce, mokrá směs je smíchána s vodou a následně pomocí nástřiku aplikována. Technologie nástřiku mokrým způsobem se začala používat po 2. světové válce. Tímto se měnila i terminologie. Od názvu

„Gunité“ se přecházelo k „Sprayedconcrete“ či „Shotcrete“ (stříkaný beton). Vývojem stříkacích zařízení docházelo k automatizaci, tedy od ručního stříkání směsi k nástřiku pomocí manipulátorů. Díky zlepšování technologií dnešní stříkaný beton může dosahovat pevnosti v tlaku přesahující 80 MPa. V ČR jsme se setkali se stříkaným betonem v 30. letech minulého století, kde byl stříkaný beton použit na sanaci cihelné klenby tunelu Krasíkov. [1], [2], [4], [9]

2. Trvanlivost betonu

Trvanlivost je vlastnost materiálu, která charakterizuje jeho odolnost vůči působení vnějšího prostředí (fyzikální, chemické, biologické vlivy). Tyto nežádoucí vlivy způsobují degradaci betonu – skvrny, výkvěty, odprýskávání, trhlinky, deformace atd. Míra degradace závisí na agresivním prostředí (intenzita, druh a koncentrace působící látky, teplota, relativní vlhkost), povrchu a vlastnostech betonu (zejména vodotěsnost a mrazuvzdornost související s pórovitostí betonu). Dalším faktorem ovlivňující trvanlivost jsou trhlinky vyskytující se v cementové matici.

Trhlinky vznikají v důsledku vnitřních účinků (smršťování, teplotní roztažnost), nebo vnějších sil (zatížení, teplota). Zmiňované jevy vyvolávají v cementové matici lokální napětí, které je větší než pevnost matrice. Trhlinky snižují trvanlivost betonu vlivem rychlejšího působení agresivního prostředí do struktury betonu, proto je nutné technologickým i statickým návrhem předcházet jejich tvorbě. [29]

2.1. Fyzikální vlivy působící na trvanlivost betonu

Trvanlivost betonu je ovlivněna těmito fyzikálními pochody: Teplotou (zápornou – mráz, vysokou – požár), mechanickým otěrem. Odolnost betonu proti mrazu – mrazuvzdornost a požáru – žáruvzdornost bude dále podrobněji popsána.

2.1.1. Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost je odolnost vodou nasyceného betonu vůči působení zmrazovacím cyklům. Zmrazovací cyklus je děj, při kterém je beton podroben střídání mrazu a tání. Ve vodou nasyceném betonu lze rozlišit vodu volnou, fyzikálně a chemicky vázanou. Nejzásadnější vliv na trvanlivost betonu z hlediska působení mrazu má voda volná, nacházející se v betonu po jeho nasycení – v kapilárách větších než 10^{-7} m. V důsledku nasycení betonu vodou skrze kapiláry, dochází při teplotě cca $-0,5$ °C k přeměně skupenství vody z kapalného na pevné. Skupenství pevné – led, má o 9 % větší objem než původní voda, ze které vznikl. Při této expanzi vyvíjí tlak až 200 MPa, čímž narušuje strukturu cementové matrice. Z počátku se led tvoří na povrchu betonu a se snižující teplotou vlivem expanze, vniká do kapilár menších a postupuje hlouběji do struktury cementové matrice. Voda fyzikálně vázaná mrzne až při -73 °C a voda chemicky vázaná nemrzne vůbec.

Mrazuvzdornost závisí na těchto faktorech:

- Kontakt s vodním prostředím
- Pórovitost cementové matrice
- Provdzdušnění
- Pevnost betonu
- Stáří betonu

2.1.2. Odolnost vůči požáru

Při použití stříkaného betonu jako permanentní ostění, je kladen důraz i na jeho zvýšenou odolnost vůči vysokým teplotám (zejména v podzemním stavitelství).

Beton je nehořlavý materiál, avšak při teplotě nad 100 °C se pevnost betonu snižuje, až do teploty 1000 °C, kdy beton ztrácí podstatnou část své původní únosnosti. V důsledku zvýšené teploty dochází v ztvrdlém betonu k expanzi vodních par a vývoji takového tlaku, kvůli kterému dojde následně k popraskání a odpadání povrchových vrstev betonu. Rozdílná teplotní roztažnost složek v betonu nahrává k tomuto rozpadání.

Odolnost vůči ohni a vysokým teplotám je určeno trvanlivostí cementového kamene i odolností kameniva (druh kameniva, objemové změny – modifikace křemene).

2.2. Chemické vlivy na trvanlivost betonu

Beton je v důsledku působení chemicky agresivních látek korodován (koroze = degradační proces, u kterého se významněji uplatňuje chemická přeměna). Chemicky agresivní látkou způsobující korozi betonu může být kapalina, plyn i tuhá látka (vyluhována kapalinou). Jak bylo dříve zmíněno, koroze závisí na složení chemicky agresivní látky, teplotě a relativní vlhkosti vzduchu a vlastnostech betonu. Beton v expozici agresivního prostředí je korodován sulfáty, neboli sírany (SO_4^{2-}), nacházející se v zeminách, nebo síranových vodách (koroze vlivem tvorby novotvarů se zvětšeným objemem) a dalšími agresivními látkami – oxidem uhličitým (CO_2), ionty zejména vápenatými, amonnými a hořečnatými (Ca^{2+} , NH_4^+ , Mg^{2+}). Tyto chemicky agresivní látky podporují vyluhování cementové matrice z betonu. Podzemní voda s nižší koncentrací těchto látek (měkká voda) způsobuje rychlejší vyluhování portlanditu, než voda s koncentrací vyšší (tvrdá voda). Roztoky s $\text{pH} < 5,5$ jsou taktéž pro beton agresivní.

Mezi nežádoucí chemické pochody probíhající v důsledku působení škodlivých látek na beton patří zejména sulfatace a karbonatace betonu.

2.2.1. Sulfatace

V tomto případě je beton korodován vlivem objemových změn vznikajících novotvarů v cementové matrici, díky reakce sulfátových roztoků s trikalciumaluminátem (C_3A – minerál obsažený v portlandském slínku, jež je součástí cementu) za vzniku minerálu ettringit. Tento minerál má osminásobně větší objem než sloučeniny, ze kterých vznikl. V důsledku zvětšení objemu dochází k rozrušování cementové matrice. Vysoké koncentrace síranů v roztoku ($> 1200 \text{ mg SO}_4^{2-}$) jsou příčinou tzv. sádrového rozpínání vlivem vznikající sádry.

2.2.2. Karbonatace

CO₂ působící na beton, jehož podstatou jsou zásadité hydratační produkty, vyvolává neutralizační reakci za vzniku karbonátů. V rané fázi karbonatace se vytváří uhličitan vápenatý (CaCO₃), který je o 10 % objemnější, a tím utěsňuje póry cementové matrice. Postupem času krystalizují novotvary kalcitu a aragonitu a pevnost betonu klesá. Se zvyšujícím stupněm karbonatace klesá hodnota pH betonu a degradace betonu postupuje hlouběji do struktury cementového kamene. Rychlost karbonatace je 0,1 – 1 mm za rok. [29], [44]

3. Stupně vlivu prostředí

Na trvanlivost betonů jak běžně vibrovaných, tak stříkaných má zásadní vliv působení okolního prostředí. Tímto jsou definovány následující stupně vlivu prostředí – podle nich se odvíjí složení betonu, jeho vlastnosti i metody jeho zkoušení. Rozdělení jednotlivých stupňů vlivu prostředí je pro stříkané betony obdobné jako u běžných monolitických betonů dle ČSN EN 206-1 Beton Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Avšak mezní hodnoty pro složení betonu se odlišují. Jedná se o doporučené minimální množství cementu a vzduchu ve směsi stříkaného betonu. Doporučené minimální množství cementu musí být 400 kg/m³ pro mokré způsob a 370 kg/m³ pro suchý způsob nástřiku. Minimální obsah vzduchu není u stříkaných betonů specifikován. Zkušební metody pro stanovení obsahu vzduchu (ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody) v čerstvé směsi stříkaného betonu nevykazují důvěryhodné výsledky. Specifikace jednotlivých stupňů vlivu prostředí definuje. Na beton může působit více stupňů vlivu prostředí – posuzuje se kombinace těchto stupňů. V následující podkapitole budou rozděleny jednotlivé stupně vlivu prostředí. Znaky a informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí jsou uvedeny v tabulkách. [5], [14]

3.1. Stupeň vlivu prostředí bez nebezpečí koroze nebo narušení (X0)

Stupeň X0 představuje interiér budov, kde se nepředpokládá vlhké prostředí. I přes to je však nutné dodržet požadované krytí výztuže (nejméně 15 mm), aby nedocházelo k její korozi. [30]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
X0	Beton bez výztuže nebo kovových prvků, beton s výztuží ve velmi suchém prostředí	Beton uvnitř stavby s velmi nízkou relativní vlhkostí vzduchu ($\leq 30\%$), bez výztuží, bez vlivu mrazu

Tab. 1: Stupeň vlivu prostředí X0. [14]

3.2. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem karbonatace (XC)

Karbonatace je degradace betonu v důsledku působení oxidu uhličitého. Jedná se o vliv prostředí, který působí na beton obsahující kovovou výztuž. Stříkaný beton je vystaven ovzduší a vlhkosti. [14]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XC1	Suché, stále mokré	Beton uvnitř stavby s nízkou relativní vlhkostí vzduchu (30 - 60 %), beton trvale ponořen ve vodě
XC2	Mokré, občas suché	Povrch betonu vystavený dlouhodobému působení vody nebo vysoké relativní vlhkostí vzduchu ($\geq 85\%$)

XC3	Středně mokré, vlhké	Beton uvnitř stavby se střední vlhkostí vzduchu (60 - 85 %), povrch betonu exteriéru chráněný proti dešti, části staveb, ke kterým má častý přístup vnější vzduch
XC4	Střídavě mokré a suché	Povrchy betonů, které jsou ve styku s vodou, ale nejsou zahrnuty ve stupni vlivu prostředí XC2 a XC3, části staveb přímo vystavené srážkám

Tab. 2: Stupně vlivu prostředí XC. [14]

3.3. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody (XD)

Jedná se o chloridy např. z rozmrazovacích prostředků – posypových solí. Nedochozí zde ke střídavému zmrazování a rozmrazování. [14]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XD1	Středně mokré, vlhké	Povrchy betonů vystavené působení chloridů ve vzduchu
XD2	Mokré, občas suché	Beton vystavený působení průmyslových vod obsahujících chloridy
XD3	Střídavě mokré a suché	Beton vystavený postřiku, který obsahuje chloridy bez působení mrazu

Tab. 3: Stupně vlivu prostředí XD. [14]

3.4. Stupně vlivu prostředí s nebezpečím koroze vlivem chloridů z mořské vody (XS)

Stupně XS jsou rozděleny podle distance od mořské vody, která zapříčiňuje korozi betonu. [14]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XS1	Beton vystavený slanému vzduchu, ne však s mořskou vodou	Stavby blízko mořského pobřeží nebo na pobřeží
XS2	Beton trvale ponořen	Části staveb na moři
XS3	Smáčený a přílivem ostříkovaný beton	Části staveb na moři

Tab. 4: Stupně vlivu prostředí XS. [14]

3.5. Stupně vlivu prostředí při střídavém působení mrazu a rozmrazování (XF)

Jakmile na beton působí střídání mrazu a rozmrazování – zmrazovací cykly, klasifikuje se dle tabulky níže: [14]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XF1	Beton mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků	Vnější svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu
XF2	Beton mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky ¹⁾	Svislé beton. povrchy vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům, které jsou rozptýleny ve vzduchu
XF3	Beton značně nasycen vodou bez rozmraz. prostředků ¹⁾	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu
XF4	Beton značně nasycen vodou s rozmraz. prostředky ¹⁾	Vodorovné betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky, části staven na moři omývané vodou a vystaveny mrazu

Tab. 5: Stupně vlivu prostředí XF. [14]

¹⁾ Nutnost použít kamenivo s dostatečnou mrazuvzdorností podle EN 12620

3.6. Stupně vlivu prostředí při chemickém působení (XA)

Beton vystaven chemicky agresivnímu prostředí se klasifikuje se podle tab. 6 viz níže. Pokud jsou mezní hodnoty překročeny (viz tab. 7), na beton působí jiné chemikálie, nebo je zemina či voda chemicky znečištěná a její průtok je vysoký, k určení vlivu prostředí může být nutná zvláštní studie. Jestliže na beton působí dva a více vlivů v daném stupni, musí být určen vyšší stupeň prostředí. [14], [29]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XA1	Slabé agresivní prostředí	Nádrže čistíren odpadních vod
XA2	Středně agresivní prostředí ²⁾	Části staveb založených v agresivní zemině
XA3	Vysoce agresivní prostředí ²⁾	Průmyslové čistírny odpadních chemicky agresivních vod, chladicí věže s odvodem dýmových spalín

Tab. 6: Stupeň vlivu prostředí XA. [14]

²⁾ Při působení síranů je nutnost použít síranovzdorný cement

Označení stupně vlivu prostředí	Popis prostředí						
	Zemina		Podzemní voda				
	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Kyselost [mg/l]	pH [-]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	CO ₂ [mg/l]	NH ⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]
XA1	≥ 2 000 a ≤ 3 000	>200 Baumann-Gully	≤ 6,5 a ≥ 5,5	≥ 200 a ≤ 600	≥ 15 a ≤ 40	≥ 15 a ≤ 30	≥ 300 a ≤ 1 000
XA2	> 3 000 a ≤ 12 000	V praxi se nepoužívá	<5,5 a ≥ 4,5	>600 a ≤ 3 000	>40 a ≤ 100	>30 a ≤ 60	>1000 a ≤ 3 000
XA3	>12 000 a ≤ 24 000	V praxi se nepoužívá	<4,5 a ≥ 4,0	>3 000 a ≤ 6 000	>100	>60 a ≤ 100	>3 000

Tab. 7: Mezní hodnoty charakteristických látek pro stupně vlivu prostředí XA [14]

3.7. Stupně vlivu prostředí při mechanickém působení (XM)

Pokud je beton vystaven pohyblivému mechanickému namáhání, klasifikuje se dle tab. 8. [14]

Označení stupně vlivu prostředí	Znaky prostředí	Informativní příklady betonových konstrukcí pro dané prostředí
XM1	Beton mírně až středně namáhán obrušem	Průmyslové podlahy pojížděné vozidly s pneumatikami
XM2	Beton silně namáhán obrušem	Průmyslové podlahy pojížděné vozidly s pneumatikami nebo koly vysokozdvížných vozíků
XM3	Beton velmi silně namáhán obrušem	Průmyslové podlahy pojížděné koly vysokozdvížných vozíků, plochy pojížděné pásovými vozidly, vodní stavby vystavené intenzivnímu proudění vody

Tab. 8: Stupně vlivu prostředí XM. [14]

4. Složky stříkaných betonů s ohledem na jejich trvanlivost

Vlastnosti stříkaného betonu jsou ovlivněny množstvím i kvalitou jednotlivých složek. Mezi složky stříkaného betonu patří, stejně jako u běžného betonu, cement (vhodné chemické složení a měrný povrch), kamenivo (úprava křivky zrnitosti, a frakce), přísady (urychlení tuhnutí, zlepšení zpracovatelnosti), příměsí (vhodná mineralogie, hutnost – jemné podíly, barva), popřípadě vlákna (omezení trhlin a smrštění, zpracovatelnost). Poměr složek se volí, podle požadovaných vlastností stříkaného betonu (stupeň vlivu prostředí, nárůst počátečních pevností, konzistence aj.)

4.1. Cement

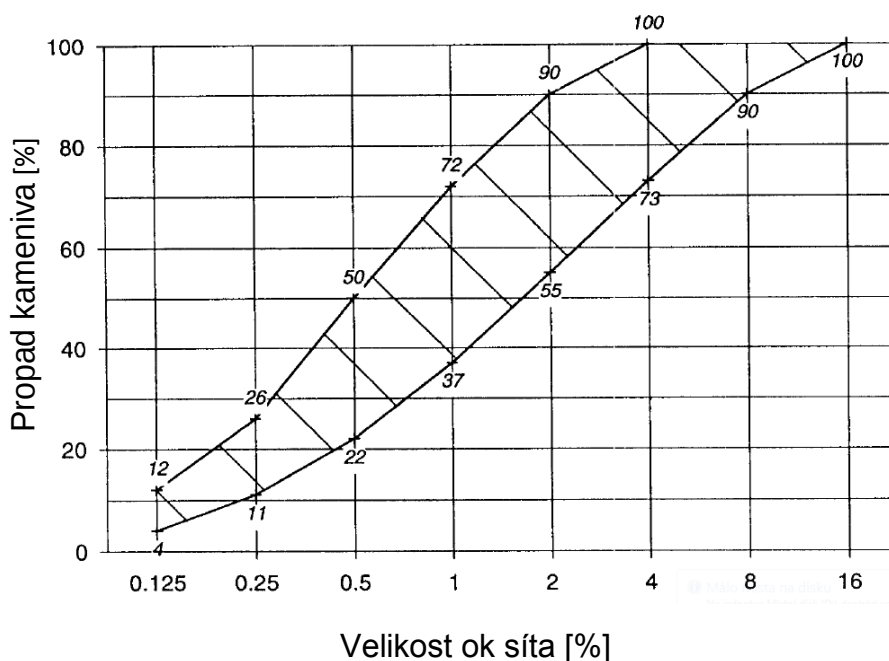
Cement je hlavní pojivovou složkou betonové směsi stříkaného betonu. Vhodnost použití cementu je nutno prokázat dle ČSN EN 197 Cement – Část 1:

Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Doporučovaným druhem cementu pro rychlý vývoj počátečních pevností je cement portlandský vyšších pevností a rychlých náběhů tuhnutí (CEM I 42,5 R a vyšší). Alternativní cementy pro speciální požadavky jsou např. síranovzdorné cementy (při zvýšené chemické agresivitě prostředí). Bylo prokázáno, že při použití směsného cementu CEM II 32,5 B/S dosahuje stříkaný beton vyšší odolnosti proti síranům. Množství cementu je obvykle udáváno 370 – 430 kg/m³ pro suchý způsob nástřiku a 400 – 450 kg/m³ pro mokrý způsob nástřiku. Obecně platí: Čím větší obsah C₃A, větší měrný povrch (dle Blaina 3500 – 5000 cm²/g), tím je cement reaktivnější a zajišťuje rychlejší náběh pevností. [1], [4]

4.2. Kamenivo

Kamenivo plní funkci plniva, musí být v souladu s normami ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu a ČSN EN 13055-1 Pórovité kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Kvalita kameniva hraje významnou roli v čerstvém i ztvrdlém betonu. Stejně tak procentuelní zastoupení frakcí kameniva – křivka zrnitosti. Vhodné křivky zrnitosti jsou vyobrazeny v grafu 1.

Maximální zrno kameniva u stříkaného betonu je 4, 5 nebo 8 mm, dle místa provádění (země). Pro mokrý způsob nástřiku se volí maximální velikost kameniva mezi 8 – 10 mm (max 10% nad 8 mm), kvůli nežádoucímu spadu. Množství jemných podílů (pod 0,125 mm) by mělo být v mezích 4 – 9 %. Příliš málo jemného materiálu způsobuje segregaci a možnost ucpání zařízení pro stříkání. U stříkaného betonu vyztuženého armaturou je maximální frakce kameniva $D_{\max} = 11,2$ mm. [1], [2], [5], [9]



Graf 1: Ideální křivky zrnitosti. [4]

4.3. Voda

Voda ve stříkaném betonu hraje významnou roli (hydratace cementu, ošetřování betonu, množství vody). Množství vody určujeme pomocí vodního součinitele – hmotnostním poměru vody a cementu (w/c). Vodní součinitel pro stříkaný beton by měl být v rozmezí 0,35 - 0,45. V případě nadbytku vody betonová směs špatně ulpívá na podkladu, v opačném případě se zvyšuje prašnost. Z technologického hlediska můžeme rozdělit vodu na vodu záměsovou, vodu obsaženou v kamenivu a vodu ošetřovací (k ošetřování již uloženého betonu). [1], [9], [10], [30]

4.3.1. Voda záměsová

Je voda, která je přidána do čerstvého betonu za účelem hydratace cementu (reakce cementu s vodou za tvorby pevné vazby mezi zrny kameniva) a správné zpracovatelnosti čerstvého betonu. Tímto se záměsová voda dále rozděluje na vodu hydratační a reologickou. Množství hydratační vody je závislé na mineralogickém složení cementu a na podmínkách hydratace. Udává se cca 23 % hmotnosti cementu. Reologická voda slouží k vytvoření správné reologie čerstvé betonové směsi (zpracovatelnost, pohyblivost, soudržnost). Záměsová voda nesmí být

znečištěná, aby nijak negativně neovlivnila výsledné zrání betonu. Její čistota vyplývá z jejího zdroje a tím je ovlivněno i její použití. Teplota vody ovlivňuje teplotu výsledné směsi a také hydrataci cementu. Větší množství vody způsobuje pórovitější cementový kámen, a tudíž negativně ovlivňuje jeho vlastnosti (nasákavost, vodotěsnost a tím i trvanlivost). Množství vody lze snižovat pomocí plastifikačních přísad. Požadavky na záměsovou vodu jsou uvedeny v normě ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. [1], [6], [9], [10]

4.3.2. Voda ošetřovací

Voda sloužící k ošetřování již uloženého betonu se nazývá voda ošetřovací. V důsledku hydratace cementu, při které dochází k odpařování fyzikálně vázané vody (voda adsorbovaná na povrchu jemných částic a v kapilárách) a vody volné (voda v pórech a dutinách), je použití vody ošetřovací nutné zejména při zrání ve vyšších teplotách. Tímto se zamezí vzniku smršťovacích trhlin (vliv na pevnost a trvanlivost), protože nedochází ke vzniku velkého kapilárního napětí v důsledku odpaření záměsové vody. [6]

4.4. Přísady

Přísady jsou ve většině případů kapalné látky (chemické sloučeniny), přidávané do betonu v malém množství za účelem zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Vyrábějí se i v práškové formě – prefabrikované směsi. Jejich původ je organický i anorganický. Použití přísad musí odpovídat normám ČSN EN 934-5: Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 5: Přísady do stříkaného betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem. [6], [25]

4.4.1 Přísady urychlující tuhnutí

Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu jsou látky, které zrychlují hydrataci cementu, a tím způsobují rychlejší nabývání pevností. Jejich použití přináší tyto výhody: Možnost nástřiku silnější vrstvy (nad 10 cm), jednotlivé vrstvy nanášet rychleji za sebou, schopnost betonové směsi ulpět na podkladu s minimálním

spadem kvůli zpětnému rázu atd. Efekt urychlovačů z hlediska nabývání počáteční pevností závisí na jejich chemickém základu, dávkování, chemickém složení pojiva – cementu a na teplotě.

Při suchém způsobu nástřiku je urychlující přísada (v práškové formě) přidávána přímo do suché směsi, na rozdíl od mokrého způsobu, kdy je směs předmíchána a urychlující přísada je pomocí stlačeného vzduchu dávkována do trysky stříkacího zařízení, kde se výsledná směs mísí. Urychlovače se dělí na nealkalické a alkalické.

Nealkalické urychlovače jsou používány přednostně, kvůli pracovní bezpečnosti, ekologii i technologii – snížení konečných pevností není tak razantní, jak při použití alkalických přísad. Použití nealkalických urychlovačů je nutné pro dosažení požadované hutnosti cementového kamene a při působení chemicky agresivního prostředí.

Urychlující přísada na bázi $C_{12}A_7$ (minerál mayenit), zaručuje rychlé náběhy počátečních pevností. $C_{12}A_7$ reaguje s vodou za tvorby jehlicovitých krystalů ettringitu ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). Když se $C_{12}A_7$ smíchá s hašeným vápnem a sádrou, jeho účinky se ještě zvětší. Urychlovač na bázi $C_{12}A_7$ zajišťuje rychlé náběhy pevností, zlepšuje trvanlivost stříkaného betonu zejména nepropustnost a mrazuvzdornost. [1], [2], [6], [8], [15]

4.4.2. Plastifikační a superplastifikační přísady

Plastifikační přísady neboli plastifikátory jsou chemické látky přidávané do betonu za účelem snížení množství vody (o více než 5 %) při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu. Dochází tedy k redukci záměsové vody, která je potřebná k dosažení vhodné konzistence betonu (zvýšení pevnosti, vodotěsnosti, trvanlivosti, snížení smrštění, dotvarování). Koncentrace plastifikátoru se vyjadřuje v % hmotnosti přísady na hmotnost cementu. [25], [29]

Superplastifikační přísady jsou ještě účinnější než plastifikátory. Snižují množství potřebné záměsové vody o více než 12 %. S rostoucím měrným povrchem cementu roste i potřebná dávka superplastifikátoru k dosažení určité konzistence. Plastifikátory nezasahují do tvorby hydratačních produktů. Z hlediska chemického jsou plastifikátory na bázi: Solí a derivátů ligninosulfonanů (LS), polykarboxylátů (PC) a polykarboxeterů (PCE), sulfonovaných naftalenformaldehydových (SNF)

a melaminformaldehydových (SMF) kondenzátů, nebo kopolymerů karboxylových kyselin s akrylestery (CAE). [6], [26], [29]

4.4.3. Provzdušňující přísady

Tyto přísady vytvářejí v čerstvém betonu velký počet mikrobublinek velikosti 25 – 300 μm , které jsou stabilní až do ztvdnutí betonu. Touto skutečností, provzdušňující přísady vhodně ovlivňují strukturu ztvrdlé cementové matrice. Použití provzdušňovacích přísad znamená zvýšení trvanlivosti betonu (mrazuvzdornost, odolnost proti CHRL atd.). [26]

Měření obsahu vzduchu čerstvé směsi stříkaných betonů nelze uskutečnit stejným způsobem jako u běžných monolitických betonů (podle ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody), kvůli jeho způsobu uložení – nástřikem na podklad, přičemž se vzduch obsažený v betonu má tendenci ze směsi uvolňovat. Jestliže se provzdušňovací přísada použije (kvůli zvýšení trvanlivosti), obsah vzduchu se zjišťuje ze vzorků odebraných v místě nástřiku. Obsah vzduchu v čerstvém betonu před nástřikem by měl být 6 – 7 %. Jak bylo řečeno dříve, vzduch přítomný v čerstvé směsi se nástřikem vytratí (při nástřiku mokřím způsobem je získání více než 4 % vzduchu v uloženém betonu obtížné). Při suchém způsobu nástřiku se určení množství vzduchu nedoporučuje. Ve ztvrdlém betonu se obsah vzduchu hodnotí dle ČSN EN 480-11 Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Zjišťovaným kritériem účinnosti na trvanlivost betonu je tzv. Spacing factor, který udává relativní vzdálenost mezi póry v ztvrdlé cementové matrici. [25], [26], [28]

4.4.4. Interní dodatečná přísada MEYCO TCC735

Jedná se o dodatečnou přísadu, která působí v betonu proti vysychání. Tímto se dosáhne lepší hydratace a trvanlivosti. Její použití je spojeno s termínem Zušlechťování betonu. Příklad se přidává během míchání čerstvého betonu. Přilnavost mezi vrstvami není nijak omezena. Tato přísada zlepšuje tyto vlastnosti: Hutnost, mrazuvzdornost, chemická odolnost, vodotěsnost. Také zmírňuje smršťování a tvorbu trhlin. V neposlední řadě zvyšuje konečnou pevnost,

čerpatelnost a zpracovatelnost stříkaných betonů. Její použití je bezpečné a finančně úsporné.

4.4.5. Další přísady

Do stříkaných betonů lze použít řadu dalších přísad: Zpožďující, těsnící a další přísady, které upravují jejich vlastnosti. Při použití dvou a více přísad je nutné ověření kompatibility jednotlivých přísad stanovenými postupy.

4.5. Příměsi

Jsou většinou jemnozrnné anorganické práškovité látky, jejichž velikost zrn nepřevyšuje hranici 0,25 mm (za jemné podíly je vhodnější považovat zrna do 0,125 mm – cca velikost zrn cementu), které po přidání do čerstvého betonu zlepšují některé vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu, nebo docilují nových vlastností betonu. Přidávají se do betonu v takovém množství, aby negativně neovlivnily výsledné vlastnosti betonu (trvanlivost, koroze ocelových výztuží). [29]

Příměsi se rozdělují do 2 kategorií a to na: Inertní příměsi (příměsi druhu I) a pucolány a latentně hydraulické látky (příměsi druhu II). K příměsím se řadí i pigmenty, které se přidávají do betonu za účelem jeho zbarvení do různobarevných škál a organické polymery, které se přidávají do polymercementových betonů. Přidání vhodných příměsí k cementu, poskytuje větší kompaktnost cementového (menší pórovitost) tmele a tudíž větší pevnost v tlaku, mrazuvzdornost, či odolnost proti síranům. Z hlediska velikosti částic (do 0,125 mm) se příměsi nazývají jemné podíly tuhých částic. Do kategorie jemných podílů, podílející se na tvorbě cementové pasty, se zahrnují tyto složky: cement, podíl zrn kameniva, které jsou menší než 0,125 mm, příměsi druhu I, druhu II a barevné pigmenty. [1], [25], [29]

4.5.1. Inertní příměsi (druhu I)

Příměsi inertní, někdy označované příměsi druhu I, jsou jemnozrnné anorganické práškovité látky, které se nezúčastňují hydratačních procesů, ale podílí se na tvorbě cementového tmele (dokonalé obalení zrn kameniva, povrch výztuže). Dále zlepšují hutnost cementové matrice, vodotěsnost, přídržnost k podkladu, avšak je nutno počítat se zvýšeným množstvím vody, což zapříčiňuje snížení pevnosti

a zvýšení smrštění betonu. Pro stříkaný beton platí podmínka minimálního množství jemných podílů a to 550 kg/m^3 . Mezi tyto příměsi patří mleté horniny, kamenné moučky (fillery) a pigmenty. [4], [29]

4.5.1.1. Pigmenty

Pigmenty jsou organické i anorganické látky, které se přidávají do stříkaných betonů za účelem jeho probarvení. Organické pigmenty jsou však nevhodné pro svoji alkalickou a klimatickou nestálost – vyblednou cca za 1 rok. Anorganické pigmenty musí mít pro zachování požadované trvanlivosti následující vlastnosti: Minimální obsah rozpustných solí (SO_4^{2-} , Cl^- , SiO_3^{2-}), minimální vliv na pevnost betonu a na dobu tuhnutí a tvrdnutí betonu, hodnotu pH vyšší než 7 aj.

4.5.2. Aktivní příměsi - pucolánové a latentně hydraulické příměsi (druhu II)

Příměsi latentně hydraulické jsou látky, které mají schopnost tvrdnout při reakci s Ca(OH)_2 ve styku s vodou. Pucolánové příměsi mají obdobné vlastnosti, jsou charakteristické vysokým obsahem aktivního SiO_2 . Podmínkou této chemické reakce je zásadité prostředí, které je vytvářeno látkami nazývanými budiče hydraulicity (cement, vápno, NaOH). Výslednými produkty jsou kalcium hydrosilikáty (CSH). Příměsi zvyšují množství vody, kvůli absorpci množství vody na povrchu jejich zrn – vodní součinitel se uvažuje včetně k-hodnoty a množství příměsi. Vodní součinitel se stanoví následovně:

$$w = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p} \quad [-]$$

Kde: m_v, m_c, m_p – množství vody, cementu a příměsi [kg/m^3],

k – skutečná hodnota závisí na konkrétní příměsi

Z chemického hlediska se příměsi druhu II dělí na:

- Látky, které mají pucolánové vlastnosti, obsahující amorfni SiO_2 (nad 47%) – křemičité úlety, diatomity, opál
- Látky mající latentně hydraulické vlastnosti – popílký, struska, pálené jílové hlíny (obsahující metakaolinit).
- Látky obsahující sopečné sklo, které vzniklo rychlým ochlazením magmatu (pravé pucolány) – tufy, trasy, sopečné sklo. [14], [29]

4.5.2.1. Mikromletý vápenec

Mikromletý vápenec je minerální látka, vyráběná mletím drceného vápence. Z chemického hlediska se jedná o uhličitán vápenatý (CaCO_3). Mikromletý vápenec urychluje hydrataci trikalciúmsilikátu – C_3S , tudíž vyvíjí rychlejší počáteční pevnosti. Jemnost mletí a granulometrie má vliv na jeho vlastnosti. [26]

4.5.2.2. Polétavý popílek

Je anorganický materiál, který vzniká spalováním uhlí v práškovém stavu, je zachycován pomocí odlučovačů. Podle typu uhlí, spalovací technologie se odvíjí jeho mineralogické i chemické složení - jeho vlastnosti jsou variabilní, také granulometrie je u popílků proměnlivá. Velikost zrn se pohybuje v intervalu 10 – 30 μm , jejich tvar je přibližně kulový. Popílký bohaté na CaO (více než 16 %) jsou latentně hydraulické a popílký pucolánové mají zvýšený obsah SiO_2 (více než 47 %). Ztráta žíháním by měla být do 5 %. Přidávají se do betonu pro zlepšení zpracovatelnosti, snížení hloubky karbonatace, zvýšení dlouhodobé pevnosti. Fluidní popílký jsou do betonu nevhodné kvůli obsahu SO^{3-} (cca 20 %), vysoké ztráty žíháním (až 15 %). [29]

4.5.2.3. Křemičité úlety - mikrosilika (Silica Fume)

Je to velmi reaktivní anorganická pucolánová práškovitá látka s velkým měrným povrchem (15000 – 25000 m^2/kg) a vysokým podílem amorfniho SiO_2 (80 – 98 % hm.) ve formě kulatých zrn, jejichž průměr je cca 0,1 – 0,3 μm . Vzniká jako sekundární produkt z některých hutnických průmyslů při výrobě křemíku a jeho slitin (ferrosilicium). Ve stříkaném betonu se využívá pro markantní zlepšení jeho

vlastností: Zvýšení hutnosti cementového tmele (nižší vodopropustnost, vyšší mrazuvzdornost a síranovzdornost, snížená rychlost karbonatace), soudružnosti a čerpatelnosti čerstvého betonu. Křemičitý úlet také snižuje propustnost betonu vůči chloridům. Díky lepší soudružnosti respektive lepivosti betonu lze provádět nástřik silnějších vrstev ostění. Při suchém způsobu nástřiku, snižuje mikrosilika v záměsi spád kvůli zpětnému rázu až o 50% díky lepšímu přilnutí k podkladu. Křemičitý úlet se přidává do čerstvého betonu ve formě prášku nebo suspenze. Ztráta žíháním musí být maximálně 4 %. Maximální množství křemičitého úletu v betonové směsi je 15 % (obvykle 5 – 10 %) hmotnosti cementu. [1], [2], [4], [5], [9], [29]

4.5.2.4. Mletá granulovaná vysokopecní struska

Vzniká rychlým ochlazováním taveniny zásadité strusky vhodného složení, která je sekundární produkt při vysokopecní výrobě železa. Je to latentně hydraulická příměs, která nabývá hydraulických vlastností během hydratace cementu. Její hydratační produkty jsou hydrokalciumsilikáty (C-S-H), které vyplňují póry v cementové matici (zlepšení hutnosti). Tímto efektem a také schopností přetvářet větší póry na menší, zlepšuje nepropustnost, pevnost a trvanlivost betonu, především odolnost vůči agresivnímu prostředí - pronikání sulfátů a chloridů. Soudržnost mezi cementem, struskou a kamenivem je vyšší, což se projevuje na zvýšené ohybové pevnosti. Hydraulicita strusky je závislá na jejím chemickém složení i složení cementu, obsahu skelné fáze a jemnosti mletí. Bývá také používána při požadavku na vyšší pevnosti betonu a lepší zpracovatelnost. [26], [29]

4.5.2.5. Metakaolin

Metakaolin je pucolánová příměs vzniklá vypálením kaolínů, kaolinitických jíílů na teplotu 600 – 900°C. V přítomnosti $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a vody vznikají kalcium hydrosilikáty a alumináty, které zlepšují fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. Dochází ke zvýšení pevnosti, odolnosti proti CHRL a agresivnímu prostředí, snížení nasákavosti, omezení tvorby výkvětů a také zlepšení reologických vlastností betonu. Pojivo tvořené portlandským cementem a metakaolinem zpevňuje a dosahuje více homogenní struktury zhydratovaného cementového tmele, než samotný portlandský cement. Také lze sledovat větší kompaktnost mezifázové přechodové zóny mezi kamenivem a cementovým tmelem. Metakaolin zvýší mikrotvrdost cementové

matrice o 30 – 54 % (při $w = 0,5-0,6$). Principem zkoušení mikrotvrdosti je vtlačování tělíska definovaných rozměrů (podle Knoopova čtyřboký diamantový jehlan) do hmoty materiálu a podle hloubky vniknutí či velikosti otisku tělíska se stanoví tvrdost daného materiálu. [23], [24]

4.5.2.6. Další příměsi druhu II

I jemnozrnná cihelná drť (prach) nebo čedičová pemza jsou příměsi vhodné do stříkaného betonu. Jejich začlenění do betonové směsi zvyšuje odolnost proti síranům. Vhodné množství těchto příměsí je 15 % hmotnosti cementu. Tyto příměsi mají vliv na snížení finančních nákladů betonové směsi. [18]

4.6. Vlákná (rozptýlená výztuž)

Vlákná pro použití do stříkaného betonu jsou nejčastěji ocelová nebo syntetická. Přidávají se do betonové směsi za účelem zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého. Vlákná snižují vznik trhlin a smršťování betonu, naopak zvyšují odolnost proti dynamickému zatížení, snižují ztrátu betonu při odrazu na kladený povrch. Vlákná se musí použít takovým způsobem, aby netvořila shluky, lidově nazývány „ježky“. Navrhování stříkaných betonů je odlišné od navrhování běžných betonů. Každou recepturu stříkaného betonu s vlákny je třeba experimentálně ověřit, jestli je vhodná pro doporučené zpracování, jako je míchání a ukládání. Vlákná musí splňovat požadavky, které jsou uvedeny v normách ČSN EN 14889-1 pro ocelová a ČSN EN 14889-2 pro polymerová vlákna. Pro stříkaný beton existují normy, týkající se vláknobetonu, ČSN EN 14488 část 3,5 a 7. Jde o stanovení obsahu vláken ve směsi a definování ohybových zkoušek.

4.6.1. Ocelová vlákna

Ocelová vlákna jsou nejčastěji vyráběna z oceli tažené za studena. Jsou to přímé nebo tvarované drátky délky 25 – 35 mm, délka by neměla přesáhnout hranici 40 mm. Tvarování a profilování povrchu zlepšuje soudržnost drátků v betonu. Ocelové drátky lze získat i stříháním plechu či opracováváním ocelových těles. Možnost užití stříkaného drátkobetonu je při ražbě tunelů zejména v zemích severní Evropy, kde ostění tunelu je tvořeno kvalitním horninovým masivem. Díky disperzně

rozptýleným ocelovým vláknům odpadá částečně, nebo úplně nutnost vyztužování ostění, zlepšuje se houževnatost a rázová pevnost. K výhodám tohoto materiálu patří kvalita nástřiku a odstranění armovacích prací. Tímto nedochází k vytváření dutin, které by se nacházely se za pruty výztuže. U mokré směsi je také důležité větší množství jemné frakce kameniva pro čerpatelnost, zhutnění a přilnutí k podkladu. Také je prokázáno, že v místě dopadu na povrch dosahuje směs lepšího zhutnění. [2]

4.6.2. Syntetická vlákna

Nejpoužívanějším zástupcem syntetických vláken jsou vlákna polypropylenová. Použitím syntetických vláken docílíme zvýšení požární odolnosti, adheze a snížení vzniku trhlin od plastického smršťování. Nevhodné je použití v suché směsi, jelikož podstatná část vláken nedosáhne k podkladu, odlučují se a nepřilnou. Aby byla zachována správné reologie stříkaného betonu, musí být vlákna přidávána a rozmíšena takovým způsobem, aby se ve směsi pravidelně rozprostřela a směs byla použitelná pro mísení v běžných míchačkách a stříkání stříkacím zařízením. [11]

5. Technologie nástřiku

5.1. Nástřik suchým způsobem

Suchý způsob nástřiku byl prvotní technologií pokládání betonové směsi na podklad. Je to proces, při kterém se smísí suché složky betonové směsi ve strojním zařízení a poté je směs hnána stlačeným vzduchem k trysce, kde se smísí s vodou a urychlující přísadou v tekuté formě přivedenou z druhé hadice vedoucí do trysky. Z trysky již smíchaná směs vylétá vysokou rychlostí (až 30 m/s) ven a dopadá na podklad (horninový masiv, zemní těleso, zdivo, betonová, či jiná konstrukce). Suchá směs se ve většině případů skládá z cementu, vysušeného kameniva a případně příměsí. Urychlující přísadu dávkuje přímo do suché směsi (přísada je v práškové formě), v tekuté formě smíchanou se záměsovou vodou, nebo zvláštním odseparovaným přívodem v trysce. Lze použít

i směs s vlhkým kamenivem (vnitřní vlhkost kameniva musí být od 1,5–5%. Směs s vlhkým kamenivem lze použít pro stříkaný beton do třídy SB 15 (C 12/15). V dnešní době se suchý způsob nástřiku používá stále méně, používá se jen při aplikaci menšího objemu stříkaného betonu a tehdy, kdy by bylo obtížné mokrou betonovou směs dopravit na pracoviště. [1], [2], [3], [4]

5.2. Nástřik mokrým způsobem

Metoda „mokrý“ směsi je v dnešní době mnohem více používaná než nástřik suchým způsobem. Při technologii nástřiku mokrým způsobem je betonová směs klasicky smíchána předem a dávkována do stříkacího zařízení, kde je za stejného principu jako u „suchého“ způsobu, dopravována pomocí stlačeného vzduchu k trysce, kde směs zařízení opouští. Rychlost ukládání betonu je relativně vysoká. 1 pracovník obsluhující manipulátor dokáže uložit 7,5–12,5 m³ stříkaného betonu za 1 hod. Použitím plastifikačních přísad lze vodní součinitel (hmotnostní poměr vody a cementu – w/c) snížit pod 0,45. Urychlení hydratace směsi pomocí přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí lze dosáhnout dvěma způsoby. Buď je urychlovač přidán na počátku mísení všech složek směsi a dále postupuje zařízením až k trysce, kde je směs vrhána ven, nebo je přidáván až v trysce speciálním přívodem s dávkovačem. Výhodou je daleko menší spad mater (5 – 10 %), snížení prašnosti, přesné mísení složek (možnost mísení v betonárce jako u běžně vibrovaných betonů), zejména vodní součinitel w/c je přesnější, na rozdíl od suchého způsobu nástřiku, kde přítok vody (v trysce) nastavuje obsluhující pracovník. K nevýhodám patří omezená doba zpracovatelnosti (max. 1,5 hod.) a technologických přestávek během stříkání, vyšší nároky na organizaci práce a čištění stříkacího zařízení. [1], [2], [4], [9]

6. Požadavky kladené na stříkané betony

Základní technologické požadavky kladené na stříkané betony jsou definovány v různých dokumentech a předpisech. Jedná se např. o „Zásady pro používání stříkaných betonů“ vydané Českým tunelářským komitétem ITA/AITES“ a základní normy: ČSN EN 14487-1 Stříkaný beton – Část 1: Definice, specifikace a shoda,

ČSN EN 14487-2 Stříkaný beton – Část 2: Provádění. Stříkaný beton musí současně plnit také požadavky normy ČSN EN 206-1 včetně norem, které na tuto normu navazují.

Požadavky kladené na odolnost betonu, který je vystaven působení prostředí, lze splnit díky mezním hodnotám (maximální vodní součinitel, minimální množství cementu, pevnostní třída, další složky betonu) pro složení betonu a podle stanovených vlastností betonu. V opačném případě lze tyto požadavky odvodit z daného návrhu složení (požadovaná vlastnost betonu je zahrnuta ve složení betonu). V těchto požadovaných vlastnostech stříkaného betonu, specifikovaných v projektové dokumentaci, je také zahrnuta předpokládaná životnost betonové konstrukce. [14]

Stříkaný beton z hlediska kvality je hodnocen pomocí tříd stříkaného betonu. Jednotlivé typy stříkaného betonu definují jeho účel použití a jsou pro ně kladeny různé požadavky, jako je počáteční pevnost (pevnost mladého stříkaného betonu), hutnost potřebná k dosažení zvýšené trvanlivosti, tuhost, přilnavost atd. [4]

6.1. Klasifikace pevnosti stříkaného betonu

Stříkané betony se z hlediska pevnosti klasifikují zejména při rané fázi zrání (do 24 hodin) kvůli požadavkům na soudržnost jednotlivých vrstev, ovlivnění množství spadu nebo zajištění stability výrubu. Stříkaný beton v dalším stádiu zrání se zařazuje do pevnostních tříd podobně jako beton monolitický nebo transportbeton dle ČSN EN 206-1.

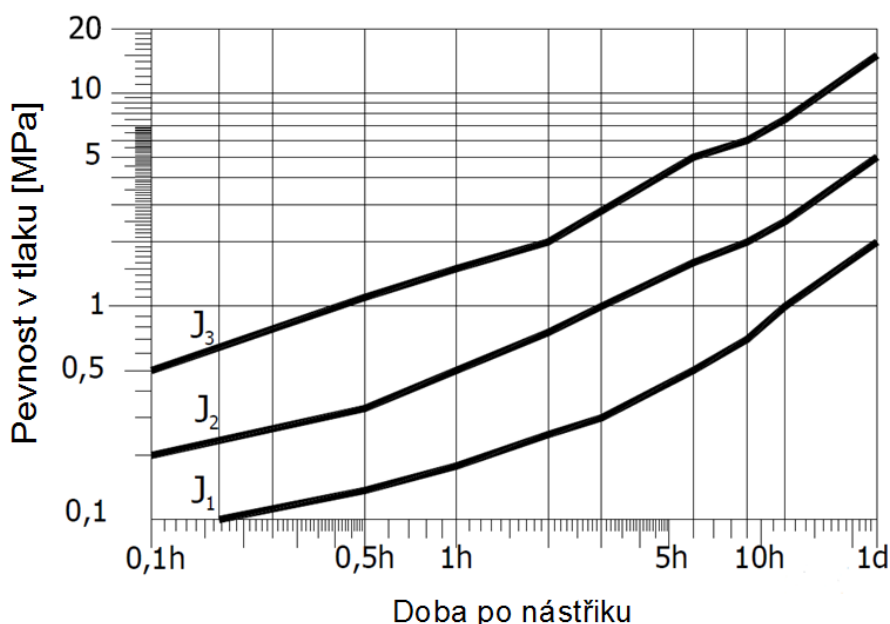
6.2. Třídy pevnosti mladého stříkaného betonu

Mladý stříkaný beton je definován jako stříkaný beton stárí max. 24 hodin po jeho nástřiku. Pro požadovanou rychlost zrání a vývoj pevností je nezbytné použití určitého množství urychlující přísady. Druh urychlující přísady je nutno volit s ohledem na snížení konečné pevnosti oproti referenčnímu betonu bez urychlovače – referenční beton. Jak bylo zmíněno dříve, nárůst pevností stříkaného betonu v prvních minutách je velmi důležitý. Je-li nárůst pevností pomalý, riziko spadu betonu z konstrukce je vysoké (zejména v aplikacích nad hlavou) – technologické přestávky při nástřiku dalších vrstev musí tento jev respektovat, protože podkladní vrstva ještě nemá požadovanou přídržnost k podkladu. Na druhé straně, velmi rychlý

vývoj pevností zapříčiňuje špatné spojení více vrstev betonu, kvůli odrazu kameniva (větší frakce) od podkladní vrstvy. Graf 2 zobrazuje stříkané betony klasifikující se podle různých rychlostí nárůstu pevností do tříd – oborů J1, J2 a J3, podle „Směrnice pro stříkaný beton“ (Rakouský betonářský spolek, 1998). Jestliže je mladý stříkaný beton definován pevnostní třídou J1, jeho závislost pevnosti v čase spadá mezi křivky J2 a J1. Vyšší třídy se určují obdobně. [2], [4], [10]

[MPa]	Doba po nástřiku									
	[Minuty]			[Hodiny]						
	6	10	30	1	2	3	6	9	12	24
Křivka J1	-	0,10	0,14	0,18	0,25	0,30	0,50	0,70	1,00	2,00
Křivka J2	0,20	0,25	0,33	0,50	0,75	1,00	1,60	2,00	2,50	5,00
Křivka J3	0,50	0,75	1,10	1,50	2,00	2,80	5,00	6,00	7,50	15,00

Tab. 9: Nejnižší požadované pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu dle křivek J1 – J3. [4]



Graf 2: Obory pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu. [10]

6.3. Třídy pevnosti ztvrdlých stříkaných betonů

Třídy pevnosti stříkaného betonu se rozdělují podle charakteristické pevnosti betonu v tlaku. Pevnost se zjišťuje na ztvrdlém betonu, kde vzorky jsou získány

odvrtáním jádrových vývrtů (průměr i výška válce 100 mm). Pokud je poměr těchto dvou rozměrů 1:1, lze na základě normy ČSN EN 12504-1 dosaženou hodnotu válcové pevnosti považovat za pevnost krychelnou. Pro splnění zvláštních požadavků na stříkaný beton je nutno použít min. pevnostní třídu SB 25. Hodnoty (viz tab. 11) jsou průměrnými hodnotami získanými z nejméně 3 vzorků, jejichž stáří je 28 dnů. Pevnosti se zjišťují na vzorcích stáří 28 dní, může se však uvádět i 56 a 90 denní pevnost. [4]

Třída pevnosti stříkaného betonu	Průměrná hodnota krychelné pevnosti v tlaku [MPa]
SB 15 (C 12/15)	15
SB 20 (C 16/20)	20
SB 25 (C 20/25)	25
SB 30 (C 25/30)	30

Tab. 11: Třídy pevnosti tlaku ztvrdlého stříkaného betonu. [4]

6.4. Požadavky kladené na stříkané betony vystavené působení agresivních prostředí XA a XF

Stříkaný beton umístěný v agresivním prostředí XA může být vystaven působení několika škodlivých látek. Tyto chemicky agresivní látky různými, dříve zmíněnými, způsoby degradují strukturu betonu.

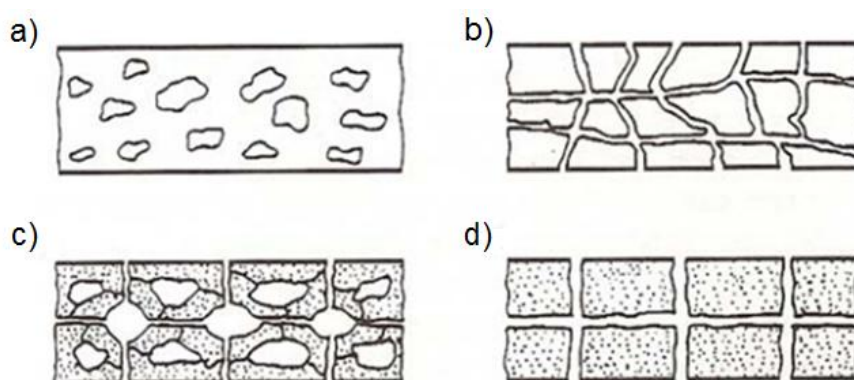
Důležité opatření, které vede ke zvýšené odolnosti proti tomuto vlivu prostředí je zejména razantní snížení propustnosti betonu - zvýšení homogenity betonu.

6.4.1. Propustnost (permeabilita)

Propustnost neboli permeabilita patří mezi hlavní faktory, které ovlivňují konečnou trvanlivost stříkaného betonu. Definuje se pomocí pronikání média (kapaliny, plynu), nebo toku energie přes pórovitou strukturu cementové matrice. Úzce tedy souvisí s hutností, respektive pórovitostí cementové matrice i na druhu použitého kameniva. Jestliže je kamenivo hutné a tedy nepropustné, permeabilita je závislá na pórovitosti cementové matrice.

Přes pórovitou strukturu pronikají lépe tekutiny i teplo. Rozhodujícím faktorem je velikost, rozmístění a tvar pórů. Jsou-li kapiláry nespojité, póry malé, permeabilita betonu je nižší. Jestliže jsou otevřené kapiláry větší než 10^{-7} m, prochází jimi voda. [4], [16]

Druhy pórovitých betonů: a) pórovitý, nepropustný
(viz obr. 3) b) pórovitý, propustný
c) vysoce pórovitý, nepropustný
d) málo pórovitý, vysoce propustný



Obr. 3: Druhy pórovitých betonů. [16]

Jednotlivé vlastnosti určující míru permeability jsou: Hydroskopičnost (schopnost absorbovat vzdušnou vlhkost), nasákavost (schopnost nasycení díky otevřeným pórům a hydrostatického tlaku v kapilárách) a vzlínavost (postup vody v kapilárách díky kapilárním silám a povrchovému napětí vody).

Dalším zásadním faktorem jsou trhliny v betonu. Permeabilita je poté závislá na šířce, délce, tvaru trhliny a na hydraulickém spádu vody. Smršťováním a dotvarováním vlivem teploty dochází ke tvorbě trhlin. [4], [16]

6.4.2. Vodotěsnost

Požadavky na vodotěsný beton jsou zřejmé z umístění betonu v konstrukci s důrazem na ohled omývací vody (její hladinu), ze statické funkce a rozměru konstrukce. Klade se ohled na rozměry a statickou funkci konstrukce ze stříkaného betonu, polohu a chemismus omývací vody.

Hloubka průsaku vody stříkaného betonu vystaveného v prostředí XF1, XF2 a XA1 musí být maximálně 50 mm. U prostředí XF3, XF4 a XF2 je specifikována maximální hloubka průsaku 30 mm a u XA3 max. 20 mm.

Z hlediska vodotěsnosti tunelů, je určováno kritérium „měrných průsaků q “. Pro technologické prostory s požadavkem na vyšší vodotěsnost je stanovená mezní hodnota $q = 0,02 - 0,01 \text{ l/m}^2$ za den.

Vodotěsnost cementového kamene je ovlivněna těmito činiteli: kvalitou i kvantitou cementu, přísadami (provzdušnění), příměsmi (mikrosilika, vysokopecní struska, popílek), pórovitostí (vodní součinitel), mezerovitostí (křivka zrnitosti) a homogenitou uložení stříkaného betonu. [4], [13], [17], [25]

6.4.3. Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost byla již zmíněna v kap. 2.1.1. Účinky mrazových cyklů jsou nebezpečnější pro horizontální konstrukce, než pro konstrukce vertikální. Voda, která je ve styku s povrchem vertikální konstrukce, má možnost vlivem gravitace stékat dolů, což nepřináší, tak velké nasycení, jako je tomu u konstrukcí horizontálních. Po zmrznutí vody je tedy tato konstrukce namáhána více.

U stříkaného betonu, který je vystaven mrazu a nepůsobí na něj soli, není nutno stanovení dalších požadavků na mrazuvzdornost mimo provedení zkoušky mrazuvzdornosti – třída stupně vlivu prostředí XF1. V případě expozice stříkaného betonu v třídách stupně vlivu prostředí XF2, XF3 a XF4 je nutno prokázat splnění požadavků na mrazuvzdornost a odolnost odlupování povrchu. [4], [17], [26]

6.4.4. Odolnost proti síranům

Tato vlastnost se specifikuje u stříkaných betonů vystavených působení prostředí XA. Zvýšení odolnosti proti chemicky agresivnímu prostředí je dáno pórovitostí a především propustností cementové matrice.

Je-li stříkaný beton použit v agresivním prostředí např. ve styku s vodou se zvýšeným obsahem síranů, hloubka prosáknutí musí být maximálně 30 mm. Křemičitý úlet neboli mikrosilika upravuje čáru zrnitosti kameniva, s cílem vytvořit co nejhutnější cementový tmel. Při použití stříkaného betonu v agresivním prostředí, kde by mohly vzniknout nežádoucí síranové chemické reakce, tj. v podzemní vodě s obsahem SO_4^{2-} nad 600 mg/l, je třeba použít portlandský cement se zvýšenou síranovzdorností podle ČSN EN 206-1, případně i jiné přísady. Avšak přidání 6 % (z hm. cementu) mikrosiliky poskytuje srovnatelnou síranovzdornost betonu s portlandským cementem tak jako síranovzdorný cement. Vhodnější je použít portlandský cement (rychlejší náběh počátečních pevností) než cement síranovzdorný. Tento cement má malý obsah C_3A , který minimalizuje chemickou reakci, musí se však zohlednit jeho možné retardační účinky. [2], [4], [5], [7], [9]

6.4.5. Odolnost vůči agresivním plynům

V případě působení agresivních plynů na povrch stříkaného betonu, musí být zajištěna jeho odolnost. Mezi agresivní plyny lze zařadit: CO_2 , SO_2 , NH_3 , H_2S , sloučeniny dusíku a další. Koncentrace těchto plynů je závislá na míře znečištění ovzduší – největší podíl na znečištění mají spalovací procesy a energetika. [44]

7. Zkoušení stříkaných betonů

Zkoušení pevností stříkaných betonů probíhá odlišně oproti běžně hutněným betonům. Stříkaný beton nelze uložit a ztuhnout v běžně používané zkušební formě (150x150x150 mm, 100x100x400 mm), protože vlivem protitlaku, který působí od formy, dochází k segregaci kameniva - směs ve formě je nehomogenně rozprostřena. Zkušební forma pro stříkané betony má rozměry nejméně 500x500x150 mm pro ruční nástřik a 1000x1000x150 mm pro strojní nástřik. Požadované vlastnosti stříkaných betonů se ověřují na základě jeho způsobu použití v konstrukci, dle ČSN EN 14488-1 až 6. [2], [32]

7.1. Odběr vzorků

Odběr vzorků se provádí vhodným způsobem v závislosti na zjišťované vlastnosti a tím i zkušební metodě. Vzorky čerstvého betonu lze odebrat ze základní směsi, ze zkušební desky nebo z konstrukce na staveništi. Vzorky ze ztvrdlého betonu se odebírají vyříznutím nebo vyvrtáním z konstrukce na staveništi nebo ze zkušební desky. [21]

7.2. Zhotovení zkušební desky

Beton je nastříkán stejným postupem jako při skutečném nástřiku. Poté se vzorky ošetří proti ztrátě vlhkosti tak, jak konstrukce na staveništi. Vzorky nelze odebírat z tzv. nedokonalých zón (část betonové směsi kolem kraje zkušební desky). Tyto zóny jsou široké jako tloušťka zkušební desky. [21]

7.3. Zkoušení pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu

Nejsledovanější vlastností stříkaných betonů obvykle bývá nárůst pevnosti do 24 hodin po uložení. Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu se hodnotí dle ČSN EN 14488-2 pomocí penetrační jehly (metoda A) a zarážení hřebu (metoda B). Metoda stanovení pevnosti v tlaku penetrační jehlou je vhodná pro stanovení pevností od 0,2 do 1,2 MPa a metoda zarážení hřebu je vhodná pro zjištění pevnosti v rozsahu od 3 do 16 MPa.

Principem metody stanovení pevnosti v tlaku penetrační jehlou je měření síly potřebné k vniknutí penetrační jehly nebo jehly penetrometru (siloměr) určitých rozměrů do hloubky $15 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ pod povrch stříkaného betonu. Principem metody zarážení hřebu je stanovení hloubky průniku hřebu, který se do stříkaného betonu zarazí a síla potřebná k jeho vytažení. Zarážení hřebu je uskutečněno pomocí zarážecího zařízení, které je schopno nastřelit hřeb do betonu nejméně 20 mm. Vytahovací zařízení je kalibrováno k odečítání síly nutné k vytáhnutí hřebu. Výhodou těchto zkušebních metod je možnost měření na jakémkoliv místě. Zkušební těleso specifických rozměrů není požadováno. Pro zkoušení je však vyžadována nejméně 100mm vrstva stříkaného betonu. Stanovení pevností se určí pomocí kalibračních křivek a vztahů (pevnosti jsou pouze informativní). Tyto metody lze provádět in situ (v místě aplikace). [22]

7.4. Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu

Stanovení pevnosti v tlaku probíhá analogicky jako u běžně hutněných betonů dle ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku

7.5. Zkoušení stříkaných betonů z hlediska trvanlivosti

Míra poškození betonu při jeho umístění v prostředí s mrazovými cykly včetně působení rozmrazovacích látek na bázi chloridů se zkouší metodou odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL).

Zdali je stříkaný beton mrazuvzdorný, je otázkou mimo jiné i jeho propustnosti a vodotěsnosti.

7.5.1. Stanovení propustnosti

Propustnost lze relativně přesně určit pomocí rychlosti toku média (voda, plyn, elektrický náboj) skrze vrstvu betonu. Pro ustálený tok kapaliny skrz pórovitý materiál platí tento vztah pro průtokovou rychlost v [m/s] dle Darcyho zákona:

$$v = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{A} = k \cdot \frac{\Delta h}{l} \quad [\text{m/s}]$$

Kde: $\frac{dq}{dt}$ – průtoková rychlost [m^3/s],

A – plocha průřezu vzorku [m^2],

k – součinitel permeability [m/s],

Δh – pokles hydrostatické výšky [m],

l – šířka vzorku [m]

Nepropustnost je vyjádřena součinitelem permeability (propustnosti). Součinitel permeability je závislý na objemu vody, která protekla plochou průřezu vzorku za časovou jednotku. Stanovuje se pomocí zařízení, které se nazývá

permeabilimetr. Tato metoda však není v praxi běžná, povětšinou se nepropustnost betonu proti vodě - vodotěsnost hodnotí pomocí měření hodnoty průsaku tlakové vody. [16]

7.5.2. Zkoušení vodotěsnosti betonu – hloubky průsaku tlakovou vodou

Vodotěsnost stříkaného betonu se posuzuje analogicky jako u betonu běžně hutněné podle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Principem této zkoušky je působení vody tlaku 500 ± 50 kPa na povrch zkušební tělesa po dobu 72 ± 2 hodin. Po uplynutí této doby se zkušební těleso vyjme ze zkušebního zařízení a pomocí zkušební lisu se rozlomí v polovině, kolmo k povrchu, kde působila tlaková voda. Výsledkem zkoušky je hloubka průsaku vody, která se změří na celé milimetry. Zkušební tělesa ze stříkaného betonu jsou vývrtky o průměru nejméně 150 mm a výšce 100 mm.

7.5.3. Zkoušení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL)

Zkoušení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL posuzuje dle normy ČSN 73 1326/Z1 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Běžnými zkušebními tělesy jsou krychle o straně 150 mm nebo válec o průměru a minimální výšce 50 mm. Zkušební těleso ze stříkaného betonu je vývrt o průměru nejméně 100 mm a výšce 100 mm. Zkouší se horní povrch betonu a lze hodnotit metodami: A – metodou automatického cyklování I a C – metodou automatického cyklování II.

Metoda A:

Podstatou zkoušky je zjištění množství odpadu, odpadlého ze zkušební povrchu betonu, který degradoval vlivem určitého počtu zmrazovacích cyklů a působení chemické látky do které je vzorek ponořen do výšky 5 mm. Chemická rozmrazovací látka je 3% roztok NaCl, který se používá na odstranění nebo zamezení vytvoření náledí na povrchu betonu. Zmrazovací cyklus tvoří ochlazení

zkušebního povrchu tělesa na teplotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, poté se povrch ohřeje na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na obou teplotách je 15min izotermická výdrž. Poté následuje další zmrazovací cyklus. Po každých 25 cyklech, je nutno odpadlé částice z degradovaného betonu slít do misky, v sušárně vysušit do konstantní hmotnosti, zvážit, případně provést síťový rozbor. Ukončení zkoušky je provedeno po dosažení stanoveného počtu cyklů nebo dosažení povoleného množství odpadu. Vyhodnocení zkoušky je provedeno podle množství celkového odpadu v g/m^2 . Výsledkem je zařídění zkušební povrchu podle míry porušení včetně určení množství zmrazovacích cyklů. Zkušební zařízení je zmrazovací box s regulovatelnou teplotou, sušárna, síta pro stanovení síťového rozboru a váhy.

Metoda C:

Při zkoušce automatického cyklování II je zkušebním tělesem odřez válce o průměru 150 mm a výšce 50 mm. Těleso se opatří vodotěsnou objímkou, která dostatečně převyšuje okraj tělesa. Do objímky na povrch tělesa se nalije voda, která se nechá v objímce dva dny. Poté je těleso připraveno k podrobení zmrazovacími cykly. Voda se nahradí stejným roztokem jako u metody A. Zmrazovací cykly i úrovně teploty jsou odlišné oproti metodě A. Zařízení a pomůcky jsou téměř stejné, s rozdílem sledování teplot – u metody C se sleduje teplota vzduchu ve zkušebním zařízení a u metody A teplota kapaliny. [29]

7.5.4. Zkoušení mrazuvzdornosti betonu

Mrazuvzdornost betonu se stanovuje podle normy ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Nasycené zkušební tělesa se zkouší střídavým zmrazováním a rozmrazováním určitým počtem cyklů. Počet vzorků je určeno dle množství zmrazovacích cyklů. Část zkušebních těles se zmrazovacím cyklům nepodrobují – vzorky referenční. Tyto vzorky se posléze porovnávají se vzorky zmrazovanými kvůli posouzení ztráty pevnosti, hmotnosti. Zmrazování vzorků probíhá následovně: Zmrazování na vzduchu na teplotu -15 až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 4 hodin a rozmrazování ve vodě s teplotou $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 2 hodin (1 zmrazovací cyklus). Zmrazovací etapa trvá 25 – 150 cyklů. Po jejím uplynutí se vzorky osuší, změří, zváží, stanoví se objemová hmotnost a zkouší se pevnost v tlaku. V případě zkoušení trámů se stanoví pevnost v tahu za ohybu a na zlomcích pevnost v tlaku.

Sledovaným parametrem je součinitel mrazuvzdornosti – poměr mezi pevností v tahu za ohybu zmrazovaných vzorků a pevností v tahu za ohybu nezmrazovaných vzorků. Referenční vzorky se zkouší stejným způsobem. Pro tuto zkoušku je potřeba zkušební zařízení, schopné ve zkušební komoře vyvolat změny teploty prostředí zmiňované dříve a navíc schopno vzorky nasytit vodou. Dalším nutným zařízením je zkušební lis pro stanovení pevností, a běžné laboratorní pomůcky. Podle normy se zkouší jen trámce.

Dudley R. Morgan et al. ve své práci uvádějí pro stříkané betony faktor trvanlivosti DF (Durability Factor), který je definován:

$$DF = \frac{PN}{M} \quad [-]$$

Kde: N = počet zmrazovacích cyklů, při kterém P dosáhne specifické minimální hodnoty odpadu pro přerušení testu

M = stanovený počet zmrazovacích cyklů. [36]

Dalšími zkouškami mrazuvzdornosti se zabývají normy:

- ČSN P CEN/TS 12390-9 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – Odlupování
- ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury

8. Významné realizace stříkaného betonu vystaveného působení agresivního prostředí

Následující kapitola je věnována realizacím vybraných projektů i sanací, které byly vytvořeny pomocí stříkaného betonu. Ve všech případech je stříkaný beton vystaven agresivnímu prostředí, sledovány byly zejména stupně vlivu XA a XF.

8.1. Stříkaný beton v expozici prostředí XA

Stříkaný beton, který je vystaven chemicky agresivnímu prostředí XA je napadán škodlivými látkami obsaženými v zemině nebo rozpuštěnými ve vodě. Jedná se o podzemní či průmyslovou chemicky agresivní vodu. Stříkaný beton se v těchto případech nachází v konstrukcích nebo jejich částech např. v podzemním stavitelství – tunelech. Mezi další možné výskyty stříkaných betonů v tomto prostředí jsou nádrže čističek odpadních vod, kanalizace nebo komíny těžkých průmyslů – v tomto případě je beton atakován chemicky agresivními kouřovými plyny.

8.1.1. Tunel Löttinge (Stockholm, Švédsko)

Tento 1,1km dlouhý tunel je situován v severní části Stockholmu. Realizace tohoto projektu byla uskutečněna mezi lety 2005 a 2006. Před ražbou bylo provedeno několik vrtů, které sloužily k odebrání vzorků podzemní vody. Nejvyšší hodnoty jednotlivých zkoušených parametrů chemického rozboru vody jsou uvedeny v tab. 12. [43]

Parametr	Hodnota
pH [-]	5,9
CO ₂ [mg/l]	70,0
NH ⁺ [mg/l]	< 0,01
Ca ²⁺ [mg/l]	12,0
Cl ⁻ [mg/l]	4,9
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	11

Tab. 12: Chemický rozbor podzemní vody nacházející se v oblasti tunelu Löttinge. [43]

Z výše uvedených hodnot je zřejmé, že konstrukce je vystavena působení vlivu prostředí XA2. Výška hladiny podzemní vody musela být kvůli ražbě snížena - vytvoření injektáží. Ražení tunelu, jehož šířka je 18 m, bylo provedeno pomocí trhacích prací. Horninový masiv v této lokalitě je tvořen horninami s největším zastoupením žuly, ruly a pegmatitu.

Konstrukce tunelu je tvořena kotvícími hřeby, drenážním systémem a stříkaným betonem C35/45 s ocelovými vlákny. V důsledku agresivního prostředí byl použit síranovzdorný cement. Použité kamenivo je frakce 0-8. Ocelová vlákna Dramix 65/35, pracující jako rozptýlená výztuž, byla míchána s cementem. Obr. 4 zobrazuje jednotlivé jízdní pruhy, které jsou odseparovány zdí z betonových prefabrikátů podpírající vrchol tunelu. [43]



Obr. 4: Pohled do tunelu Löttinge. [43]

8.1.2. Čistírna odpadních vod (Carson, Kalifornie)

Čistírna odpadních vod (ČOV) nacházející se ve městě Carson má rozlohu přes 140 ha a denně skrze ni protéká $1,3 \cdot 10^9$ l znečištěné odpadní vody. ČOV (viz obr. 5) dodává vodu pro více než 35 000 000 lidí. Navzdory těmto číslům a agresivní vodě, povrch betonu byl v „relativně dobré kondici“. Avšak některé části konstrukcí, jež byly ve styku s odpadní vodou s nízkým pH (6,1) a vysokým průtokem byly zdegradovány takovým způsobem, že docházelo k obnažení hrubých frakcí kameniva. Také karbonátace zde hrála svou roli.



Obr. 5: Pohled na čistírnu odpadních vod v Carsonu [12]

Na sanaci ČOV rozlohy cca 25000 m² bylo použito 2500 t prefabrikované pytlované směsi SikaRepair 224 uložené technologií suchého způsobu nástřiku. Po kvalitním odstranění zdegradovaných částí konstrukce vysokotlakým (207 MPa) vodním paprskem, byl na řadě stříkaný beton.

Materiál byl čerpán na vzdálenost 150 m s pracovní produktivitou více než 54 t/den. Kvůli velkým těmto velkým objemům, byl materiál dodáván v pytlicích vážících přes 1,1 t.

Použitý stříkaný beton měl vynikající přilnavost, vlivem kvalitního provedení velkou hutnost a malou propustnost. Mezi zásadní složky směsi SikaRepair 224 patří Mikrosilika a ocelová vlákna. Stříkaný beton byl testován v laboratoři po předchozím zhotovení zkušebních desek na místě stavby. Výsledky zkoušených vlastností jsou uvedeny v tab. 13. Finální povrchová úprava byla provedena hladítkem z tvrdé oceli. Pohled na dokončenou část projektu ČOV je zachycen na obr. 6. Sanace proběhla v roce 2001 a trvala pouhých 41 dní. [12]

Zkoušená vlastnost	Požadovano	Skutečně dosaženo
Pevnost v tlaku po 7 dnech	28 MPa	56 MPa
Množství pórů (ASTM C 642)	< 15 %	12 %
Nasákavost	< 8 %	6 %

Tab. 13: Zkoušky testovaných vlastností stříkaného betonu použitého v čistírně odpadních vod v Carsonu [12]



Obr. 6: Pohled do části vodní nádrže po rekonstrukci čistírny odpadních vod v Carsonu [12]

8.1.3. Čistírna odpadních vod (Houston, Texas)

Firma Epoxy Design Systems, Inc. se zabývá sanacemi konstrukcí, které jsou degradovány vlivem chemicky agresivního prostředí. Následující realizace sanace je provedena stříkaný betonem s mikrosilikou a speciální povrchovou úpravou. Sanace probíhá následovně: Důkladné odstranění kontaminované části konstrukce, očištění povrchu tlakovou vodou, nástřik stříkaného betonu a opatření chemicky odolného povlaku.

Stříkaný beton je ve formě suché prefabrikované směsi (QUIKRETE® Shotcrete mix). Výrobce uvádí vysokou odolnost proti chloridům i zmrazovacím cyklům. Technologie nástřiku je provedeno suchou metodou (viz obr. 7). Odolnost povrchu proti škodlivým

látkám je dosažena pomocí povrchové úpravy - epoxidovým nátěrem NovoRez® 351. [41], [42].



Obr. 7: Nástřik stěny nádrže čistírny odpadních vod v Houstnu [41]

8.1.4. Stříkaný beton v petrochemickém průmyslu

V tomto odvětví s velmi agresivním prostředím lze použít speciální žáruvzdorný stříkaný beton. Žáruvzdorný stříkaný beton je odolný proti působení vysokých teplot (až 1100 °C) a působení agresivního prostředí. Stříkaný beton použitý v petrochemickém průmyslu se aplikuje jako vnitřní vyzdívka pro kotle či bojler, kde je stříkaný beton ve styku s roztavenou sítou. Základními surovinami pro výrobu žáruvzdorného kameniva pro tyto betony jsou bauxit a vápenec. Tavbou těchto materiálů vzniká tavenina hlinitanu vápenatého, která se následně ochladí za tvorby pevného těžkého materiálu s nízkou pórovitostí. Materiál se dále drtí na požadovanou jemnost. Spolu s hlinitanovým cementem dosahuje velmi kompaktní struktury s nízkou pórovitostí. Také počáteční pevnosti dosahují vysokých hodnot – 51MPa za 24 hodin. Žáruvzdorný beton může dosahovat vysoké odolnosti proti otěru díky použití speciálních ocelových vláken. Po nástřiku se povrch ošetřuje mlžením vodou proti vzniku smršťovacím trhlinkám. Spad takového stříkaného betonu činí 15 % na vertikální ploše a 20 - 30 % při nástřiku nad hlavou. Stříkaný beton byl použit v několika dalších společnostech petrochemického průmyslu jako je Exxon, Texaco a PeMex. [34], [45]



Obr. 8: Nástřik stříkaného betonu v petrochemickém průmyslu [45]

8.2. Stříkané betony vystavené prostředí XF

Stříkané betony použity jako definitivní ostění, nacházející se v prostředí XF, jsou nasyceny vodou a podrobeny zmrazovacím cyklům. Tyto vlivy byly již dříve rozebrány, v následujících odstavcích jsou popsány realizace stříkaných betonů vystavené působení prostředí XF.

8.2.1. Přehrada na řece Jordan (Vancouver Island, Britská Kolumbie)

Přehrada je 40 m vysoká, její realizace proběhla mezi lety 1912 a 1913. Konstrukce je tvořena šikmou železobetonovou deskou, která se opírá o pilíře. Deska i podpůrné prvky byly během let degradovány vlivem nasycení vodou, jejím prouděním a prosakováním mezi spoji prvků a zejména mrazem. Aby byla přehrada udržena v provozuschopném stavu, byly zde během let 1969 - 1971 provedeny řady sanací pomocí stříkaných betonů vyztužených ocelovými sítěmi. Sanace neproběhla zcela kvalitně, proto byla v roce 1990 provedena nová sanace provzdušněným stříkaným betonem s křemičitými úlety, který byl nastříkán mokřím způsobem. Použitá aplikace stříkaného betonu byla zhotovena v tloušťce 65 mm. Konstrukce byla vyztužena ocelovými sítěmi, které byly ukotveny do líce desky přehrad. Vlastnosti stříkaného betonu, které jsou zobrazeny v tab. 14, prokázaly jeho výbornou kvalitu. [38]



Obr. 9: Přehrada na řece Jordan

Vlastnost	Hodnota
Pevnost v tlaku	51.0 MPa
Obsah vzduchu	4.0 %
Spacing factor	0,17 mm
Hloubka karbonatace	0 - 1 mm

Tab. 14: Vlastnosti stříkaného betonu užitého pro sanaci přehrady na řece Jordan.

[38]

8.2.2. Maják Haute-Fond Prince (záliv Sv. Vavřince, Quebec)

Tento maják byl postaven roku 1964. Spodní nosná část majáku, tvořena betonovými a ocelovými dílci, byla vystavena agresivnímu prostředí moře po několik let. Ač je maják vystaven působení mořské vody (stupeň vlivu prostředí XS), je vystaven velmi silným mrazům severského prostředí Quebecu působících na pilíř majáku, který je podroben částečnému zamrzání (XF4) a v neposlední řadě mechanickému poškození vlivem eroze plovoucích ker ledu. Tímto docházelo k velmi rozsáhlé degradaci ocelových plátů i betonu pod nimi – statická stabilita majáku byla téměř narušena. Oprava pilíře započala v roce 1996. Po odstranění degradovaných částí konstrukce byl hlavní pilíř sanován stříkaným betonem, jak lze vidět na obr. 10.

Složení stříkaného betonu je uvedeno v tab. 15. a testované vlastnosti tohoto stříkaného betonu v tab. 16. [38]



Obr. 10: Pohled na maják Haute-Fond Prince [38]

Složka	Zastoupení složky [%]
Cement (typ 30)	20,0
Křemičitý úlet	2,5
Drobné kamenivo (0-5 mm)	61,1
Hrubé kamenivo (2,5-10 mm)	14,8
Urychlující přísada	1,0
Ocelová vlákna	1,7

Tab. 15: Složení stříkaného betonu majáku Haute-Fond Prince. [38]

Vlastnost	Požadováno	Dosaženo
Pevnost v tlaku po 7 dnech	20,0 MPa	39,1 MPa
Opad vlivem působení solí (ASTM C 457)	-	1,53 kg/m ³
Spacing factor	<300 μm	200 μm

Tab. 16: Zkoušené vlastnosti stříkaného betonu použitého na sanaci majáku Haute-Fond Prince. [38]

8.2.3. Bobová a sáňkařská dráha (Whistler, Britská Kolumbie)

Tato velice komplexní bobová a sáňkařská 1,7km dlouhá dráha se nachází v Britské Kolumbii, provincii ležící na jihozápadě Kanady ve městě Whistler. Dráha byla postavena pro Olympijské a Paralympijské hry 2010. Investorem projektu byl Vancouverský Organizační výbor pro Olympijské a Paralympijské hry 2010, realizace byla provedena firmou ConCreate USL Ltd.

Na obr. 11 lze pozorovat nosnou část konstrukce, která byla vytvořena pomocí různých profilů žebírkové a jiné výztuže a pletiva sloužící pro stříkaný beton jako podklad. Mezi profily jsou zakomponovány chladicí systémy, které slouží k vytvoření ledové plochy tratě.

Prvotním záměrem bylo použít vysokohodnotný stříkaný beton (viz kap. 9.4.), avšak nakonec byl tento návrh zamítnut kvůli vysokému hydratačnímu teplu a velmi rychlým počátečním pevnostem. Výsledkem byla nepřesnost rovinnosti kvůli nedostatku času k pečlivému zpracování povrchu (byla požadována max. tolerance 1 mm/1 m) i estetická nedokonalost – barevné rozdíly na povrchu.

Na konstrukci bylo nakonec použito téměř 2000 m³ stříkaného betonu, jehož hlavní složky lze nalézt v tab. 17. Ve stříkaném betonu byla použita také plastifikační přísada Polyheed, provzdušňující přísada Microair a retardační přísada Delvo. Stříkaný beton byl úspěšně uložen a zpracován s požadovanou tolerancí rovinnosti. Zkoušky betonu v laboratoři prokázaly 6,5% obsah vzduchu a pevnost v tlaku cca 55 MPa.

Složka	Zastoupení složky [kg/m ³]
Cement	420
Popílek	65
Drobné kamenivo	1200
Hrubé kamenivo	420

Tab. 17: Hlavní složky směsi stříkaného betonu použitého na bobovou dráhu ve Whistleru [31]

Povrch byl upravován hladítky do požadovaného tvaru a posléze zdrsňen kartáči pro zvýšenou adhezi vrstvy lední plochy. Ošetřování bylo provedeno vodními postřiky. Dráha byla úspěšně dokončena a připravena pro dříve zmiňovanou olympiádu, na které mohly 4místné boby dosahovat rychlostí až 100 km/h a přetížení 5g. [31], [46]



Obr. 11: Armatura bobové dráhy [46]



Obr. 12: Dokončený povrch bobové dráhy [46]



Obr. 13: Bobová dráha v provozu [46]

8.2.4. Skatepark (Ružomberok, Slovensko)

Skatepark, speciálně upravená plocha pro kolečkové sporty ležící v údolí Nízkých Tater, byl realizován firmou FIVERAMPS v roce 2012. Tento projekt

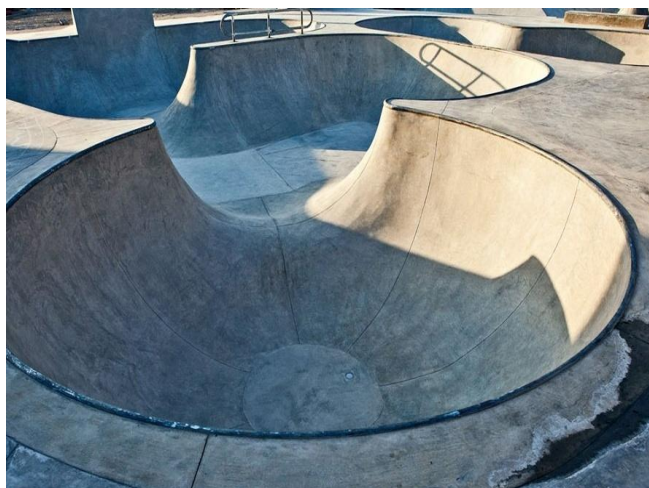
je názornou ukázkou výhody použití stříkaného betonu pro různě deformované geometrické plochy. Podklad pro stříkaný beton byl vytvořen úpravou zemního tělesa do požadovaných tvarů. Poté byl instalován kanalizační systém, zejména do podlah „bazénů“, pro odvedení dešťové vody. Do vyhloubených jam v zemním tělese, kopírující výsledný tvar skateparku, je následně ukládáno armování v podobě KARI sítí. Okraje bazénů jsou tvořeny pomocí ohýbaných ocelových trubek.

Stříkaný beton byl uložen technologií mokrého způsobu nástřiku. Nástřik betonu je zobrazen na obr. 14. Mezi základní složky stříkaného betonu patřil cement CEM I 42,5 R, těžené kamenivo frakcí 0-4 a 4-8 a voda. Složky stříkaného betonu byly voleny tak, aby se povrch stříkaného betonu dal co nejlépe zpracovat pomocí hladítek a dosahoval co nejvyšší kvality.

Betonu se po nastříkání shrnul do požadovaného tvaru latí a následně vyhladil různými druhy ocelových hladítek. Uhlazený povrch takto „uzavřel“ pórovitou strukturu betonu proti působení vnějších vlivů. Ošetření povrchu betonu bylo provedeno nástřikem parotěsné látky Sikafloor[®], která zabránila vysychání betonu – omezení vzniku trhlin, dosažení správné hydratace cementu. Finální vzhled skateparku je na obr. 15 a skatepark v provozu na obr. 16. [27], [47]



Obr. 14: Nástřik betonu skateparku



Obr. 15: Finální vzhled skateparku



Obr. 16: Skatepark v provozu

9. Posouzení možností a popis opatření pro zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů

Pro zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů je nutné dodržet mnoho zásad a opatření, přičemž jakýkoliv chybný krok může znamenat jejich nedostatečnou odolnost, zejména vůči působení agresivních prostředí. Mezi jednotlivé faktory ovlivňující trvanlivost stříkaných betonů patří vhodná volba složek betonu, technologie nástřiku, ošetřování a mnoho dalších.

9.1. Zvýšení vodotěsnosti stříkaných betonů

Vodotěsnost cementového kamene je ovlivněna zejména propustností cementové matrice související s její pórovitostí, hutností a homogenitou. Použitím superplastifikátorů lze výrazně redukovat množství potřebné záměsové vody, tímto při odpařování reologické vody z betonu nedochází k zásadnímu vzniku kapilárních pórů.

Potřebná hutnost cementové matrice je dána především vhodnou skladbou křivky zrnitosti kameniva a dalšími vlastnostmi kameniva. Tato tvrzení však nejsou dostačující. K vysoké hutnosti cementové matrice je potřebné zvýšené množství jemných podílů, což je podle zásad návrhu stříkaného betonu splněno (550 kg/m^3).

Použití latentně hydraulických nebo pucolánových příměsí je vhodné, protože jejich hydratační produkty mají schopnost utěšňovat póry cementové matrice.

Použitím provzdušňujících přísad se zvyšuje vodotěsnost vlivem přerušení kapilární sítě pomocí mikrobublinek. Urychlující přísady snižují vodotěsnost. Důležité je přecházení vzniku trhlin a to opatřeními: Technologickými (vývoj hydratačního tepla při tvrdnutí betonu, nízký w/c, polypropylenovými vlákny), stavebně technickými (technologie nástřiku, ošetřování betonu)

Mimo tyto opatření je možností zvýšení vodotěsnosti zamezení styku vody s povrchem betonu (povlaky, nátěry, drenáž atd.). [4], [17], [25]

9.2. Zvýšení mrazuvzdornosti a odolnosti betonu proti vodě a CHRL

Ke zvýšené mrazuvzdornosti je potřeba zejména zvýšenou vodotěsnost. Voda, která se nedostane do struktury cementové matrice vlivem její vysoké hutnosti, ji nemůže vlivem přeměny na led rozrušit. Tím pádem složky betonu a další opatření jsou téměř totožná. Přítomností mikrobublinek vytvořených provzdušňující přísadou jsou vytvořeny v cementové matici póry, do kterých může led expandovat. Tímto nedojde k závažnému porušení cementové matrice. Provzdušňující přísady zlepšují odolnost i proti CHRL.

V případě použití aktivních příměsí na zvýšenou mrazuvzdornost je nejvhodnější příměsí mikrosilika a mletá granulovaná vysokopecní struska – popílek odolnost částečně snižuje.

Je nutné brát v úvahu pomalejší hydrataci aktivních příměsí. V případě použití většího množství pucolánových nebo latentně hydraulických příměsí jako je mikrosilika, popílek či vysokopecní struska je mrazuvzdornost při 28 denním stáří betonu horší než při 90 denním stáří – kvůli dosud nehydratovanému pojivu).

Hydratace takovýchto příměsí je značně ovlivněna teplotou a vlhkostí v průběhu zrání betonu.

Další možností zvýšení mrazuvzdornosti je zaručení vyšší pevnosti betonu resp. cementové matrice. Pevnější struktura odolává více expanzi ledu. Rozdílně upravený povrch má odlišné vlastnosti z hlediska působení CHRL.

9.3. Volba vhodných složek stříkaných betonů pro zvýšení jejich trvanlivosti

Jestliže je předpoklad, že stříkaný beton bude vystaven agresivnímu prostředí bez jakékoli povrchové úpravy, volba jeho složení je zásadní.

Cementem lze ovlivnit trvanlivost především vůči síranům – použití síranovzdorného cementu. Tento cement má nízký obsah C_3A – ettringit nevzniká v takové míře. Také jiné druhy cementu (např. portlandský směsný s vyšším obsahem strusky, nebo rozpínavý) jsou vhodné pro docílení speciálních vlastností stříkaných betonů.

Kamenivem (s vysokým obsahem SiO_2 , dolomitické, vápencové) je možno částečně zvýšit odolnost proti síranům. Také lehké pórovité kamenivo může zlepšit trvanlivost. Předpokládá se, že lehké kamenivo má otevřenou pórovitost a tím vytváří prostory, které by částečně přejímaly případné expanzní tlaky od vznikajících novotvarů (ettringitu), jež vznikají důsledkem agresivního prostředí. Použitím lehkého pórovitého kameniva je docíleno vyšší odolnosti vůči vysokým teplotám díky tomu, že u tohoto druhu kameniva nedochází k modifikačním přeměnám křemene (do $1000^\circ C$) a hodnota teplotní roztažnosti není tak odlišná od cementové matrice, jak je tomu u kameniva hutného. Při požadavku na vysokou mrazuvzdornost stříkaných betonů je nutné použít mrazuvzdorné kamenivo.

Vodu je nutno použít čistou – z vodovodního řadu, aby negativně neovlivnila hydrataci cementu.

Přísadami lze ovlivnit zejména vodní součinitel (použitím superplastifikátorů lze dosáhnout vyšší hutnosti cementové matrice) a mrazuvzdornost. Přísada urychlující tuhnutí, by měla být zvolena nealkalická (bez hlinitanů). V případě styku chemicky agresivní vody (s obsahem síranů) se stříkaným betonem „urychleného“ alkalickou přísadou, by docházelo ke tvorbě nežádoucího minerálu ettringit.

Příměsí zlepšující hutnost matrice se používají pro zvýšenou chemickou agresivitu stejně jako je tomu u požadavku na vodotěsnost. Nejlepší vlastnosti, díky vysokému měrnému povrchu má již několikrát zmíněná mikrosilika.

Vlákna z hlediska trvanlivosti snižují smrštění a tím rozvoj trhlinek. Nejčastější ochranou stříkaného betonu vůči požáru je použití polypropylenových vláken.

Při teplotě nad cca $160^\circ C$ dojde k tání polypropylenu, a tím dochází k vytvoření pórů. Následek expanze páry přitom není tak závažný, jelikož pára

má větší možnost úniku z cementové matrice. Stříkaný beton s vhodným složením, který je má zvýšenou trvanlivost a taky pevnost se nazývá vysokohodnotný. [6], [20], [33]

9.4. Vysokohodnotný stříkaný beton (HPS)

Vysokohodnotný stříkaný beton (HPS – high performance shotcrete) je charakterizován těmito vlastnostmi: Nepropustnost, trvanlivost, vysoká zpracovatelnost (nulového) referenčního betonu (sednutí kužele 210 – 220 mm), snížení odražení zrn kameniva (<10 %), dobrá a rovnoměrná zhutnitelnost a vysoká pevnost.

Vysoká trvanlivost díky zvýšené nepropustnosti je dána snížením vodního součinitele (až na 0,35) pomocí superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů, současně s použitím mikrosiliky a bezalkalické urychlující přísady. Těmito opatřeními se výrazně zlepší tranzitní zóna mezi kamenivem a cementovou maticí a dosáhne se razantního snížení kapilární pórovitosti. Tímto se beton stává velmi odolným i vůči vysokému stupni agresivního prostředí.

Při použití pucolánového nebo vysokopecního cementu je navíc zvýšena odolnost proti síranům. Pevnost v tlaku dosahuje kolem 20 MPa po 1 dni a po vyžrání 55 – 70 MPa. [30]

9.5. Ošetřování stříkaných betonů

Pro dosažení vysoké hutnosti stříkaných betonů je třeba dbát na jeho vhodné ošetřování při zrání, které zaručí nepřerušovanou hydrataci cementu po celou dobu jeho tuhnutí a tvrdnutí. Technologickým i statickým návrhem a způsobem ošetřování betonové konstrukce lze předejít vývoji trhlinek. Trhlinky vznikají vlivem smrštění v důsledku odpařování vody z betonu. Trhlinky zvyšují rychlost proudění škodlivých látek do betonu - snižují trvanlivost. Ošetřování se provádí pomocí pravidelného stříkání nebo mlžení povrchu konstrukce v jednotlivých intervalech, překrytím povrchu betonu fólií nebo vlhkou tkaninou, nebo nástřikem parotěsné látky na povrch betonu (většinou emulze na bázi parafínů) – vytvoření ochranného filmu. [29]

9.6. Vhodná technologie nástřiku

Volba technologie nástřiku, výkon zařízení a lidský faktor operátora trysky (naklonění a vzdálenost trysky, dovednost, fyzická zdatnost) může znamenat velmi odlišnou kvalitu výchozí konstrukce. Stejná záměs betonu, podmínky i způsob nástřiku nemusí znamenat stejný výsledek při nekvalifikovaně provedeném nástřiku (viz obr. 17).



Obr. 17: Kvalita betonu zhotoveného různými operátory trysky. [2]

9.7. Finální úprava povrchu stříkaných betonů

Stříkaný beton lze chránit před agresivním prostředím různými druhy povrchových úprav.

9.7.1. Úprava hladítky

Je-li nutná konečná úprava povrchu stříkaných betonů, povrch čerstvého betonu lze upravit hladítky. Je však nutné brát v potaz možné narušení povrchu betonu při započetí jeho zrání. Zasahování do již částečně hydratovaného povrchu betonu by mohlo vést k rozrušení cementové matrice a tímto snížení trvanlivosti. [17], [35]

9.7.2. Krystalizační hmoty

Na českém i evropském trhu je dostupných mnoho krystalizačních hmot (např. Krystol, Aquafin), které zlepšují trvanlivost betonu z hlediska propustnosti

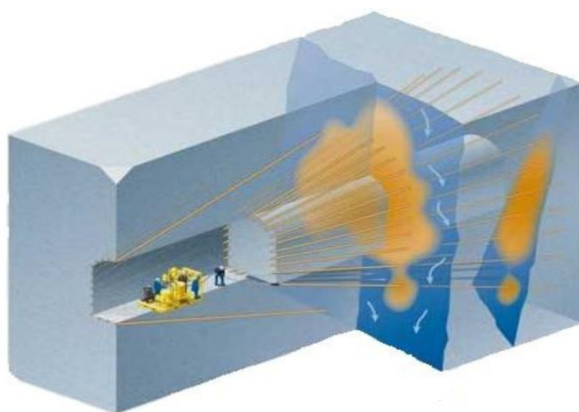
plynů. Aby byl beton nepropustný pro plyny, tudíž plynotěsný, lze povrch betonu opatřit takzvanou krystalizační nátěrovou hmotou. Krystalizační hmoty snižují hloubku vniknutí potenciálního nežádoucího, agresivního plynu. Při takovém ošetření povrchu, lze dosáhnout až o 90 % větší plynotěsnosti než u referenčního betonu bez nátěru. [9], [18]

9.7.4. Epoxidové nátěry

Epoxidové nátěry jsou vysoce odolné vůči působení vody i chemickým látkám. Výše zmiňovaný epoxidový nátěr NovoRez 351 používaný firmou Epoxy Design Inc. je jejich vhodným zástupcem. Mezi typické aplikace epoxidových nátěrů patří krytí betonu v nádržích s vyskytující se chemicky agresivní vodou, ochrana podlah v chemických průmyslech apod.

9.7.5. Injektáž

Injektáž neboli spárování se provádí v podzemním stavitelství, kde je výskyt podzemní agresivní vody, s cílem udržet vnitřní prostředí tunelu suché. Injektáž lze provést před i po ražbě tunelu. Podstatou injektáže je vyvrtání vhodně rozmístěných vrtů, které se vyplní rozpínavým materiálem (cement, křemičitý sol atd.). Materiál vyplní dutiny, kde by mohla voda téct. Tato metoda je běžná zejména ve Švédsku např. ve výše zmiňovaném tunelu Löttinge (viz kap. 8.1.1.). Obr. 18 vyobrazuje injektáž před ražbou. [43]



Obr. 18: Postup injektáží. [43]

9.7.6. Drenážní systém

Zejména v podzemním stavitelství i vhodně provedený drenážní systém může zvýšit trvanlivost stříkaných betonů. Podzemní chemicky agresivní voda, která je vhodně odvedena pomocí hydroizolace a drenážního systému, nemá přístup k samotnému betonu, tudíž nemůže na něj působit. Otázkou je, jak vhodně lze drenáž provést a jak moc upustit od pasivní ochrany betonu (vhodná volba složek, nízký vodní součinitel apod.), aby se zaručila požadovaná trvanlivost stříkaného betonu. [43]

9.7.7. Další možnosti zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů

Působení agresivního prostředí na strukturu stříkaného betonu lze eliminovat použitím vysokohodnotného stříkaného betonu. Také vhodná modifikace matrice je možnost, jak lze zajistit potřebnou trvanlivost stříkaných betonů. [30]

9.7.7.1. Stříkaný beton modifikovaný geopolymery

Geopolymery jsou hlinitokřemičité látky vznikající alkalickou aktivací, po které následně kondenzují. Stříkaný beton, jehož matrice je na bázi kopolymerů lze v porovnání s matricí portlandského cementu zhodnotit jako odolnější vůči chemicky agresivním vlivům. Také rychlost počátečních náběhu pevností i konečné pevnosti jsou relativně vysoké. Základními složkami geopolymerní matrice je např. metakaolin a vodní sklo, které pracuje jako alkalický aktivátor. V praktickém využití je však nutno eliminovat vysokou citlivost geopolymerní matrice na obsah alkálií obsažených v kamenivu. Další nutností je přidání vhodných regulátorů počátečních náběhů pevností a omezení kolísání mechanických vlastností kompozitu. Předpokládá se, že stříkaný beton s takto modifikovanou matricí taky více odolává extrémním teplotám. [39]

IV. Experimentální část práce

V rámci experimentální části práce byly sledovány a posuzovány vlastnosti čerstvého a ztvrdlého stříkaného betonu, zejména vliv složení betonu a množství urychlující přísady na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.

Hodnocena byla pevnost mladého stříkaného betonu a pevnost v tlaku po 3, 7, 14 a 28 dnech, vodotěsnost betonu a odolnost povrchu betonu proti CHRL. Vlastnosti stříkaného betonu byly srovnány s nulovým betonem (bez urychlující přísady). Beton byl připraven laboratorní metodou, která sestává z hutnění betonu s přitlakem. Zkoumán byl také vliv aktivní příměsi – mleté granulované vysokopecní strusky na trvanlivost betonu. Testovaná receptura neobsahovala provzdušňující přísadu – v dalším pozorování trvanlivosti může sloužit jako porovnávací.

1. Složení betonu

Složení betonu se odvíjelo od dostupných a případně často používaných vstupních surovin. Byly vytvořeny 3 varianty stříkaného betonu, každá s různým množstvím urychlující přísady a 1 referenční receptura, bez urychlovače, která sloužila k porovnání a zjištění základních vlastností. Množství urychlující přísady bylo 5, 7 a 9 % z hmotnosti cementu (m_c). Složení betonu je uvedeno v tab. 18.

Složka	Množství [kg/m ³]	
Cement CEM I 42,5 R Mokrá	420	
Záměsová voda	185	
Kamenivo frakce 0-4 Žabčice	1109	
Kamenivo frakce 4-8 Olbramovice	475	
Mletá granulovaná vysokopecní struska Dětmárovice	85	
Plastifikační přísada Sika® ViscoCrete® - 2700	4,62	
Urychlující přísada Sika® Sigunit® L-93 AF	5 % z m_c	21,0
	7 % z m_c	29,4
	9 % z m_c	37,8

Tab. 18: Složení testovaného stříkaného betonu

2. Metodika práce

Metodika práce se skládala z následujících kroků.

2.1. Příprava betonu

Jednotlivé navážené složky byly dávkovány do bubnové míchačky s vertikální osou otáčení. Nejdříve byla dávkována hrubá frakce kameniva (4-8), poté písek (0-4) a na závěr cement a struska. Po homogenizaci suchých složek byla dávkována voda. Část záměsové vody (1/3) se do míchačky přidala po 1 minutě míchání spolu s plastifikační přísadou. Po 3 minutách byla směs plně zhomogenizována. V této fázi byla provedena zkouška konzistence dle normy ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Receptura byla volena tak, aby byl dosažen stupeň sedutí kužele S4. Poslední složkou v přípravě ostatních záměsů byla urychlující přísada. S urychlující přísadou byly záměsi homogenizovány po dobu 30 sekund.

Výroba čerstvého stříkaného betonu s urychlovačem laboratorním způsobem probíhala v laboratoři následovně: Pro urychlení způsobu uložení betonu z míchačky do zkušebních desek byla míchačka umístěna k vibračnímu stolu proto, aby byl co nejvíce zkrácen časový interval mezi hutněním betonu a zahájením zkoušek na mladém stříkaném betonu. Tento krok byl proveden zejména kvůli rychlému náběhu počátečních pevností, zvláště u záměsů s 9 % urychlovače.

2.2. Zhotovení zkušebních těles

Čerstvý nulový beton byl uložen do forem ve formě krychlí o hraně 150 mm a zhutněn ve dvou vrstvách na vibračním stole. Poté byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu.

Složky stříkaného betonu byly dávkovány z míchačky přímo do zkušební formy 500x500x150 mm, která byla položena na vibračním stole. Důvodem byla nutnost zpracovat čerstvý beton rychleji, kvůli jeho rychlým náběhům pevností.

Hutnění bylo provedeno ve 2 vrstvách s přitlakem. 1. vrstva byla hutněna přitlačnou deskou po dobu 30 sekund, 2. vrstva s deskou a závažím po dobu 60 sekund. Celkový přitlak desky a závaží byl 250 kg/m². Hmotnost přitlaku byla

určena jako nejvhodnější, podle výzkumu, který proběh dříve na Ústavu THD. Výzkumem se zabývali Ing. Marek Liška a Ing. Tomáš Helan.

Po zhutnění čerstvého betonu bylo ihned zahájeno měření pevností v tlaku mladého stříkaného betonu. Zkušební tělesa stříkaného betonu byla vytvořena pomocí jádrových vývrtů. [32]

2.3. Zkoušení vlastností kameniva

Na jednotlivých frakcích použitého kameniva byl proveden síťový rozbor, objemová hmotnost a sypaná hmotnost volně sypaného i setřeseného kameniva.

2.4. Zkoušení vlastností betonu

Na nulovém betonu byly provedeny tyto zkoušky:

- Stanovení konzistence dle ČSN EN 12350-2.
- Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6.
- Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12350-7.
- Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-3 po 3, 7, 14 a 28 dnech na zkušebních tělesech – krychlích uložených ve vlhkém prostředí.
- Stanovení vodotěsnosti betonu dle ČSN EN 12390-8 po 14 dnech na zkušebních tělesech – krychlích uložených ve vodě.
- Stanovení odolnosti povrchu betonu proti vodě a CHRL dle ČSN 731326/Z1 po 14 dnech na zkušebních tělesech uložených ve vodě – krychlích metodou A – 100 zmrazovacích cyklů.

Na laboratorně připraveném stříkaném betonu byly provedeny tyto zkoušky:

- Stanovení pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu dle ČSN EN 14488-2. Měření bylo provedeno 3, 6, 15, 30, 60, 90, 120 a 180 minutách od zhutnění betonu metodou penetrační jehly a po 6, 9 a 24 hodinách metodou zarážení hřebů.
- Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12350-7 na vývrtech o průměru 100 mm.

- Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12504-1 po 3, 7, 14 a 28 dnech na vývrtech o průměru 100 mm uložených ve vlhkém prostředí.
- Stanovení vodotěsnosti bylo provedeno stejným způsobem jako u nulového betonu, avšak na vývrtech o průměru 150 mm.
- Stanovení odolnosti povrchu betonu proti vodě a CHRL bylo provedeno stejným způsobem jako u nulového betonu, avšak na vývrtech o průměru 100 mm.

Výsledky prováděných zkoušek jednotlivých frakcí kameniva jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech.

Kamenivo frakce 0-4 Žabčice	[kg/m ³]
Objemová hmotnost	2540
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1650
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	1760

Tab. 19: Vlastnosti kameniva frakce 0-4 Žabčice

Kamenivo frakce 4-8 Olbramovice	[kg/m ³]
Objemová hmotnost	2670
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	1380
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	1750

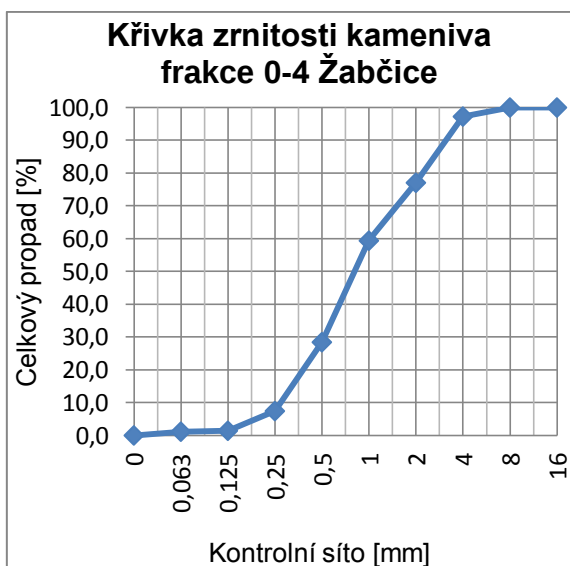
Tab. 20: Vlastnosti kameniva frakce 4-8 Olbramovice

Kamenivo frakce 0-4 Žabčice					
Kontrolní síto [mm]	Dílčí zbytek na síti [g]	Zbytek na síti [%]	Celkový zbytek na síti [%]	Celkový propad sítím [%]	Podíl frakcí [%]
16	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0	
4	23,6	2,8	2,8	97,2	92,6
2	172,7	20,2	22,9	77,1	
1	151,1	17,7	40,6	59,4	
0,5	264,9	31,0	71,6	28,4	
0,25	179,6	21,0	92,6	7,4	
0,125	51,4	6,0	98,6	1,4	7,4
0,063	2,4	0,3	98,9	1,1	
0	9,8	1,1	100,0	0,0	
Σ	855,5	100,0	-	-	100,0

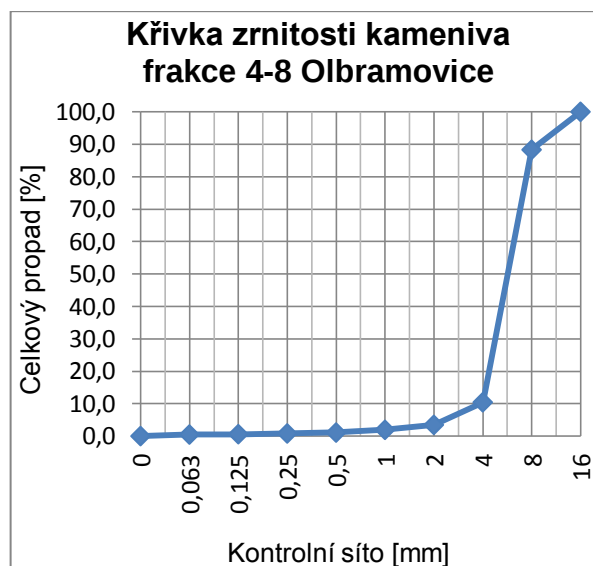
Tab. 21: Sítový rozbor kameniva frakce 4-8 Olbramovice

Kamenivo frakce 4-8 Olbramovice					
Kontrolní síto [mm]	Dílčí zbytek na síti [g]	Zbytek na síti [%]	Celkový zbytek na síti [%]	Celkový propad sítem [%]	Podíl frakcí [%]
16	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
8	88,9	11,7	11,7	88,3	
4	591,3	77,9	89,6	10,4	87,5
2	52,9	7,0	96,5	3,5	
1	11,6	1,5	98,1	1,9	
0,5	6,4	0,8	98,9	1,1	
0,25	2,1	0,3	99,2	0,8	
0,125	1,7	0,2	99,4	0,6	0,8
0,063	0,9	0,1	99,5	0,5	
0	3,6	0,5	100,0	0,0	
Σ	759,4	100,0	-	-	100,0

Tab. 22: Sítový rozbor kameniva frakce 4-8 Olbramovice



Graf 3: Křivka zrnitosti kameniva 0-4



Graf 4: Křivka zrnitosti kameniva 4-8

Výsledky výše zmiňovaných a prováděných zkoušek a porovnání sledovaných vlastností jak stříkaného, tak nulového betonu, je provedeno v následujících tabulkách a grafech.

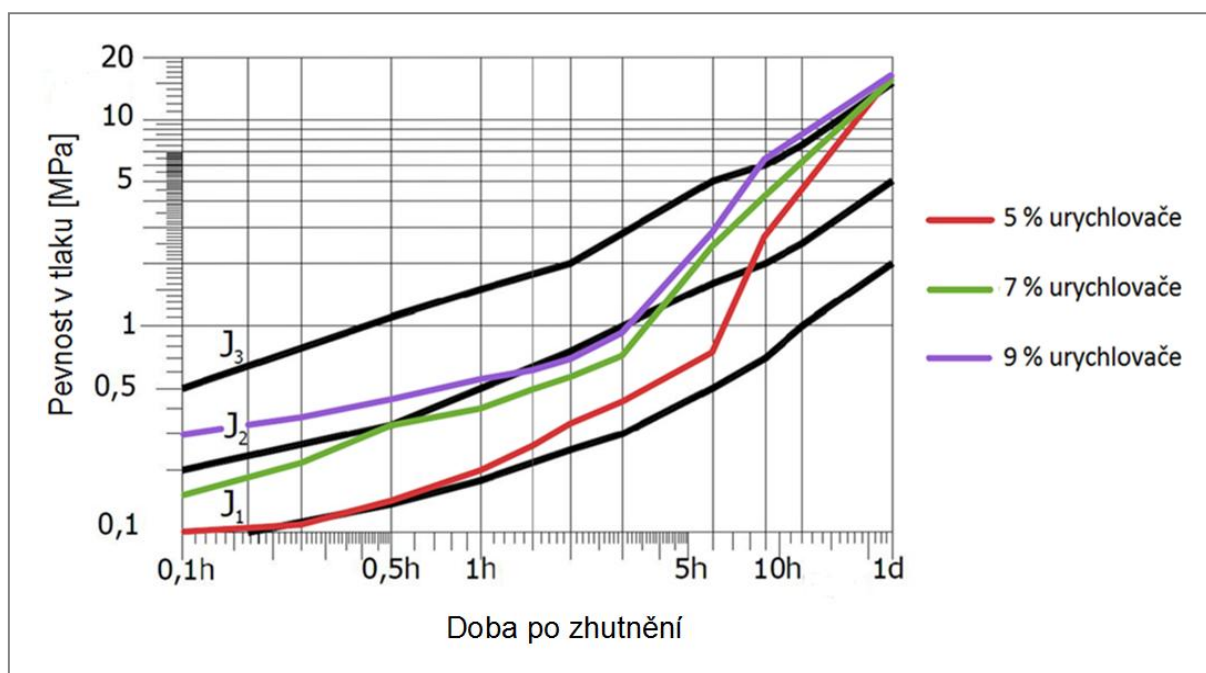
Na čerstvém nulovém betonu byla stanovena zkouška sednutí kužele 190 mm – S4 a objemová hmotnost 2270 kg/m³.

Přehled průměrných počátečních pevností v tlaku a teplot jednotlivých testovaných mladých stříkaných (% je označeno množství urychlovače) je zobrazeno v tab. 23. Grafické znázornění těchto betonů včetně oborů J1 – J3 je vyobrazeno v grafu 5.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu jednotlivých zkušebních těles byla vyhodnocena vždy před zkouškou pevnosti v tlaku v daném stáří zkušebních těles. Průměrné hodnoty jsou srovnány v tab. 23 a grafu 6.

		Doba po zhutnění										
		[minuty]				[hodiny]						
		3	6	15	30	1	1,5	2	3	6	9	24
5 %	[MPa]	0,00	0,00	0,11	0,15	0,20	0,27	0,34	0,43	0,75	2,72	16,38
	[°C]	26,8	26,7	26,4	25,0	24,7	24,0	23,5	23,2	23,5	23,4	-
7 %	[MPa]	0,12	0,15	0,21	0,32	0,40	0,49	0,56	0,71	2,44	4,29	15,62
	[°C]	28,3	28,1	27,9	27,0	26,8	25,9	25,4	23,0	23,2	23,5	-
9 %	[MPa]	0,25	0,30	0,36	0,43	0,52	0,60	0,69	0,95	2,87	6,42	16,19
	[°C]	27,5	27,1	27,0	25,5	25,1	24,7	24,1	23,9	23,8	23,6	-

Tab. 23: Průměrné počáteční pevnosti v tlaku a teploty testovaných betonů

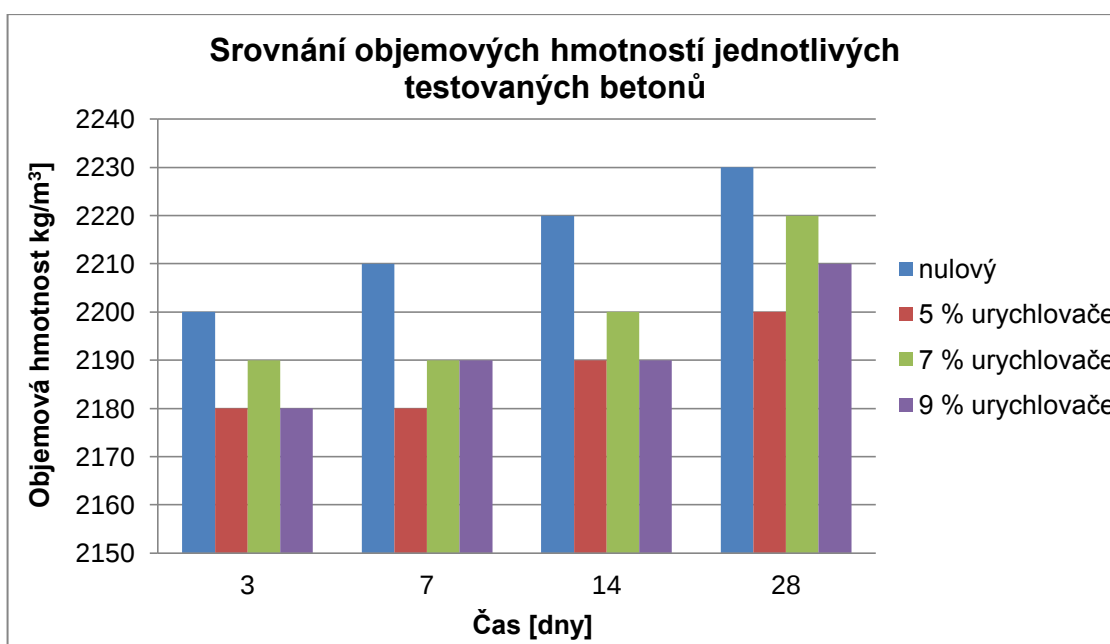


Graf 5: Průměrné počáteční pevnosti v tlaku testovaných betonů

Na zkušební tělesech jednotlivých záměsí byla provedena zkouška pevnosti v tlaku. Průměrné hodnoty jsou srovnány v tab. 25 a grafu 7.

Objemová hmotnost [kg/m ³]	Stáří testovaných betonů [dny]			
	3	7	14	28
nulový	2200	2210	2220	2230
5 % urychlovače	2180	2180	2190	2200
7 % urychlovače	2190	2180	2200	2220
9 % urychlovače	2180	2170	2190	2210

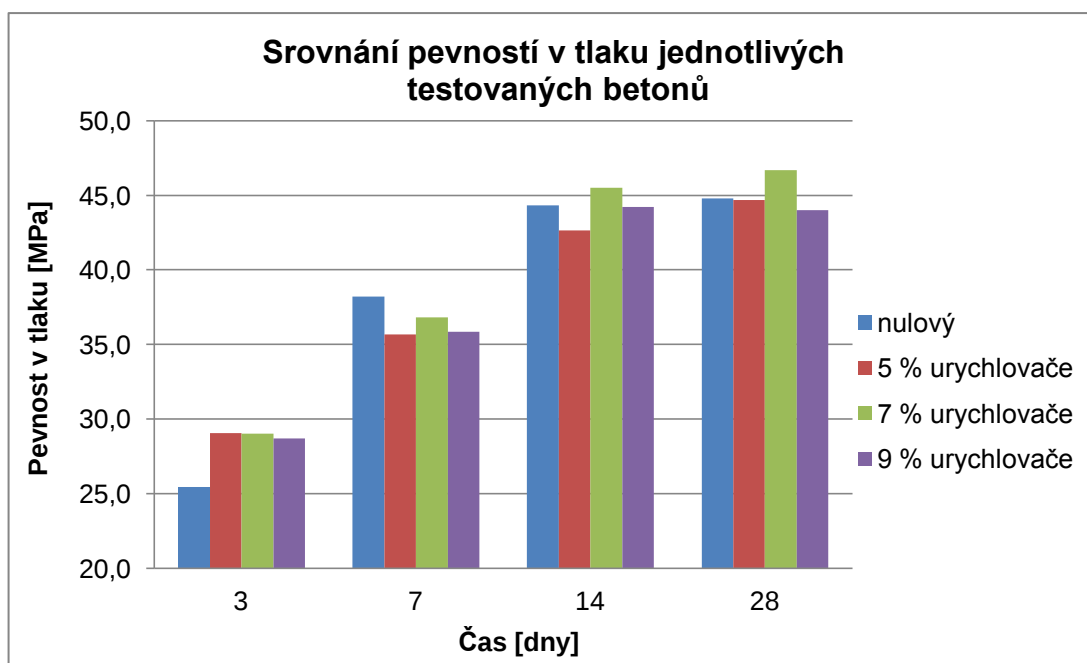
Tab. 24: Objemové hmotnosti jednotlivých testovaných betonů



Graf 6: Objemové hmotnosti jednotlivých testovaných betonů

Pevnost v tlaku [MPa]	Stáří testovaných betonů [dny]			
	3	7	14	28
nulový	25,4	38,2	44,3	44,8
5 % urychlovače	29,1	35,7	42,6	44,7
7 % urychlovače	29,0	36,8	45,5	46,7
9 % urychlovače	28,7	35,9	44,2	44,0

Tab. 25: Pevnosti v tlaku jednotlivých testovaných betonů

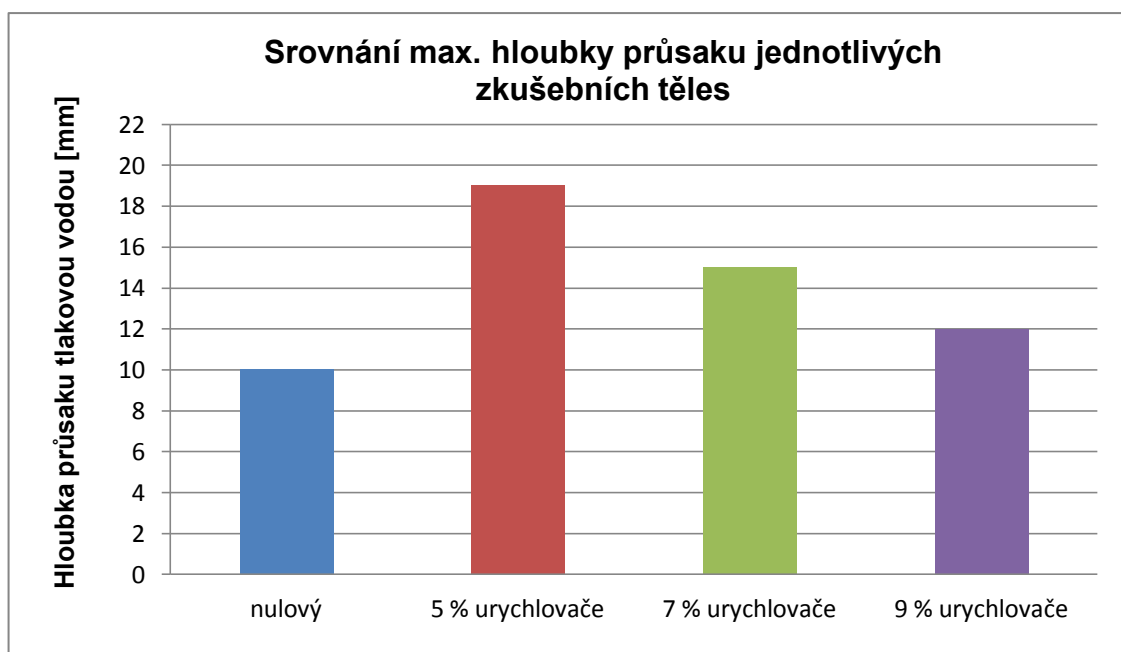


Graf 7: Pevnosti v tlaku jednotlivých testovaných betonů

Mezi hlavními sledovanými vlastnosti zkušebních těles ztvrdlého betonu byla hloubka průsaku tlakovou vodou. Vyhodnocené výsledky této zkoušky jsou vyhodnoceny v tab. 26 a grafu 8.

Označení testovaných betonů	Max. hloubka průsaku tlakovou vodou [mm]
nulový	10
5 % urychlovače	19
7 % urychlovače	15
9 % urychlovače	12

Tab. 26: Maximální hloubka průsaku jednotlivých testovaných betonů

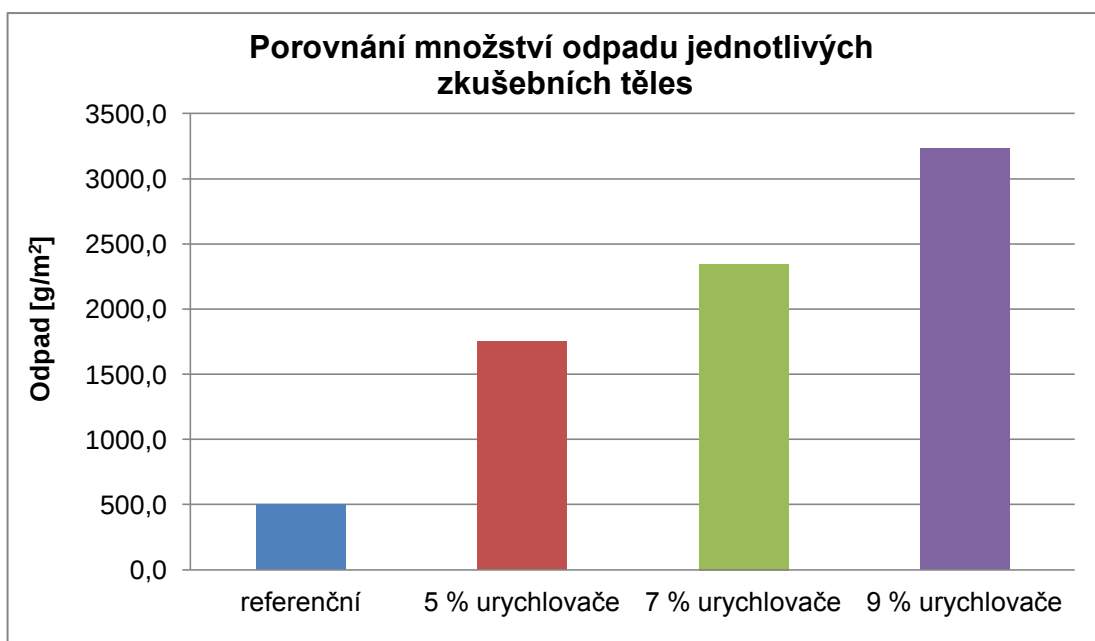


Graf 8: Maximální hloubka průsaku jednotlivých testovaných betonů

V neposlední řadě byla testována odolnost povrchu betonu proti vodě a CHRL. Vyhodnocené výsledky lze nalézt v tab. 27 a grafu 9.

Označení testovaných betonů	Odpad [g/m ²]
nulový	501,5
5 % urychlovače	1754,1
7 % urychlovače	2345,8
9 % urychlovače	3232,8

Tab. 27: Odpady z jednotlivých zkušebních testovaných betonů



Graf 9: Odpady z jednotlivých testovaných betonů

3. Diskuze výsledků

U testovaného nulového a stříkaného betonu s různou dávkou urychlující přísady byly sledovány a porovnány vlastnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu, zejména vývoj pevností betonu v průběhu zrání a jejich. Z výše uvedených výsledků počátečních pevností mladých stříkaných betonů lze říci, že mladý stříkaný beton s 5 a 7 % urychlovače splňuje požadavky oboru J1. Počáteční pevnosti mladého stříkaného betonu s 9 % urychlovače se pohybují na hranici oboru J1 a J2 - podstatná část křivky nárustu počátečních pevností směsi s 9 % urychlovače však leží v oboru J2.

Pevnosti a objemové hmotnosti ztvrdlých betonů lze komentovat takto: Pevnosti v tlaku i objemové hmotnosti po 3 dnech nabývaly u sledovaného nulového betonu vyšších hodnot než u stříkaného betonu s urychlovači. V průběhu času se však tyto rozdíly odlišovaly poněkud více. Lze přepokládat, že s vyšším stářím zkušebních těles budou rozdíly pevností v tlaku i objemové hmotostí mezi nulovým a stříkaným betonem větší. Z tohoto jevu lze soudit, že laboratorně připravený stříkaný beton nabývá nižších objemových hmotností, kvůli rychlému nabývání počátečních pevností – výsledná hutnost stříkaného betonu je nižší než u betonu nulového (běžně hutněného). Také je možné předpokládat negativní působení urychlující přísady na strukturu cementové matrice za současného snižování

konečných pevností. Nejvyšších pevností nabýval po 28 dnech stříkaný beton s 5 % urychlovače. Z hlediska pevnosti v tlaku po 28 dnech lze stříkané betony klasifikovat třídou pevnosti SB37 (C30/37) – analogicky dle tříd stříkaného betonu.

Referenční beton vykazoval vyšší vodotěsnost oproti betonům stříkaným, kterou lze přisuzovat vyšší hutnosti cementové matrice – objemová hmotnost referenčního betonu dosahovala vyšších hodnot. Z vyhodnocených zkoušek odolnosti betonu vůči působení tlakové vody vyplývá, že všechny testované směsi vyhověly požadavkům na odolnost betonu vystaveného působení prostředí XA i XF, kde je nejkritičtějším požadavkem z hlediska hloubky průsaku tlakovou vodou, hodnota maximálního průsaku 20 mm. Nejvyšší hodnota průsaku tlakovou vodou byla dosažena u betonu s 5 % urychlovače a to 19 mm.

Povrch betonů, zejména u betonů s urychlovačem, vykazoval velmi nízkou odolnost proti vodě a CHRL. Nulový beton dosáhl nejlepší odolnosti - lze usuzovat, že kvůli vyšší hutnosti. Vysoký odpad byl dán zejména díky použitému urychlovači – rychlejší počáteční pevnost je dosažena na úkor výsledné hutnosti struktury cementové matrice. Další možnou příčinou výrazného zhoršení odolnosti povrchu betonu proti vodě a CHRL u stříkaných betonů, je zhotovení zkušebních těles. Na základě dosažených výsledků nelze testovaný stříkaný beton charakterizovat jako odolný vůči prostředí XF.

V. Závěr

V důsledku zvyšujícího se užívání stříkaného betonu jako definitivního ostění, rostou i nároky na jeho trvanlivost a odolnost. Odolnost ostění či jiné konstrukce ze stříkaného betonu musí být taková, aby zůstala bezpečná a provozuschopná po celou dobu její životnosti.

V bakalářské práci byly sledovány vlastnosti stříkaných betonů, týkající se zejména jejich trvanlivosti. Byly sledovány možné vlivy agresivního prostředí při přímém působení na stříkané betony, důraz byl kladen zejména na posuzování působení stupňů vlivu prostředí XA a XF. Zkoumán byl zejména vliv složek stříkaných betonů, z hlediska možného zvýšení jejich trvanlivosti. Bylo provedeno shrnutí zkoušení stříkaných betonů, u kterých jsou kladeny požadavky na zvýšenou trvanlivost. V neposlední řadě byly posouzeny a popsány hlavní faktory, ovlivňující trvanlivost stříkaných betonů.

I přes zpočátku méně časté použití provzdušňovací přísady do stříkaných betonů, kvůli obtížnějšímu dosažení požadovaného obsahu vzduchu v betonu, je tato ochrana proti agresivnímu prostředí (zejména při působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek na povrch betonu) nutná. Tuto skutečnost lze pozorovat v mnoha zejména zahraničních realizacích, kde je provzdušnění běžně požadováno.

Ve většině případů je však zvýšení trvanlivosti podmíněno dosažením lepší hutnosti (kompaktnosti) a homogenity cementového kamene. Hutný tmel s menším počtem a velikostí pórů je méně nasákavý, tedy méně propustný a tudíž trvanlivější. Díky snížené propustnosti, dochází ke sníženému pronikání škodlivých látek do betonu, jak fyzikálního tak chemického charakteru - agresivní CO_2 (karbonatace), ionty SO_4^{2-} (sulfatace), chloridy, kyseliny, alkálie a další.

Hutnost cementové matrice je dosažena nízkým vodním součinitelem pomocí superplastifikačních přísad a vhodné příměsi – mikrosiliky, která je v realizacích stříkaného betonu, jež je vystaven agresivnímu prostředí, velmi užívaná. Obecně platí, že čím je prostředí agresivnější (vyšší obsah agresivního činitele), tím musí být vodní součinitel nižší.

Dalšími aspekty ovlivňujícími trvanlivost jsou: Technologie nástřiku, kvalita povrchu, ošetřování betonu, zamezení styku škodlivých látek s povrchem betonu pomocí nátěrů apod.

Mezi netradiční možnosti zvýšení trvanlivosti stříkaných betonů při působení chemicky agresivního prostředí, lze zařadit např. použití žáruvzdorného stříkaného betonu, nebo stříkaného betonu modifikovaného geopolymery.

V rámci experimentální části byla absence provzdušňovací přísady zřetelná, a to zejména v posouzení trvanlivosti stříkaných betonů. V dalších experimentech by proto měla patřit mezi základní složky stříkaného betonu.

VI. Seznam použitých zdrojů

[1] SPRAYED CONCRETE ASSOCIATION. *Introduction to sprayed concrete* [online]. 1999 ISBN 1 87098008 5. Dostupné z:

http://www.sca.org.uk/pdf_word/Intro_to_Sprayed_Concrete.pdf

[2] HILAR, M. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. 1. vyd. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. 272 p. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES, svazek 3. ISBN 978-80-254-1262-6.

[3] BAŠKOVÁ, R. *Realizácia betónových konštrukcií*. 1. vyd. Turany: Stavebný trh. Časopis o stavároch a stavebníctve, 2008. ISBN 978-80-969877-4-0.

[4] PRACOVNÍ SKUPINA ČESKÉHO TUNELÁŘSKÉHO KOMITÉTU PRO STŘÍKANÝ BETON. *Zásady pro používání stříkaného betonu*. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2003. 32 p.

[5] HUBÁČEK, A., HELA, R. *Technické kvalitativní podmínky staveb ŘVC ČR*. Stříkaný beton, kapitola 2, 1.vyd. Praha: Česká republika – Ředitelství vodních cest ČR, 2009. 22 p.

[6] HANUŠ, V., VRBA, L., ŠTEMBERK, P., ŠEVČÍK, O. *Vliv současných chemických přísad na výsledné vlastnosti betonu*. [online]. ČVUT, vydáno za podpory Fondu rozvoje vysokých škol – FRVŠ, 2011/2012 [cit. 18.4.2013]. Dostupný z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesi.pdf

[7] DUFKA, A., ŠNIRCH, Z. Možnosti zvyšování odolnosti stříkaných betonů vůči působení chemicky agresivních prostředí. In: *CIDEAS 09 – Integrované navrhování progresivních stavebních konstrukcí* [online]. Ostrava, 2009. [cit. 20. března 2013]. Dostupné z: http://www.cideas.cz/IDEAS/IDEAS%2009_Sbornik_abstraktu.pdf

[8] PRUDÊNCIO, L. R. Accelerating admixtures for shotcrete. *Cement and Concrete Composites*. 1998, vol. 20, no. 2-3, p. 213-219.

[9] MEYLBYE, T. *Sprayed concrete for rock support*. Zurich: Division of BASF Construction Chemicals (Switzerland) Ltd, 1994. 279 p.

- [10] KOPECKÝ, L. Příspěvek jakosti stříkaných betonů. In: *Juniorstav 2011 13. konference doktorského studia sborník anotací*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o., 2011. p. 103-104. ISBN 978-80-7399-931-5.
- [11] LAMONTAGNE, A., PIGEON, M. The influence of polypropylene fibers and aggregate grading on the properties of dry-mix shotcrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, no. 2, p. 293-298.
- [12] SYED, A., GILLESPIE, T. MORGAN, D. R. Water pollution control plant structures successfully repaired with shotcrete. *Shotcrete* [online]. 2007, Summer [cit. 2.4.2013]. Dostupné z: http://www.shotcrete.org/media/Archive/2007Sum_SyedGillespie.pdf
- [13] ZÁVORA, K., HASÍK, O., KOCHÁNEK, M. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací. Kapitola 24 Tunely [online]. Praha: Ministerstvo dopravy: Odbor infrastruktury, 2006. [cit. 25.4. 2013]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/TKP_24.pdf
- [14] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [15] PARK, H. G., SUNG, S. K., PARK, CH. G., PIL, J. W. Influence of a C₁₂A₇ mineral-based accelerator on the strenght and durability of shotcrete. *Cement and Concrete Research*. 2008, vol. 38, no. 3, p. 379-385.
- [16] VYTLAČILOVÁ, V., DVORSKÝ, T. Permeabilita a vodotěsnost betonu. In: *Juniorstav 2008 10. odborná konference doktorského studia*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o., 2008.
- [17] EFNARC. *European specification for sprayed concrete* [online]. 1996 ISBN 0 9522483 1 X. Dostupné z: <http://www.efnarc.org/pdf/EuroConcreteSpecEng.pdf>
- [18] BINICI, H., KAPUR, S., AROCENA, J., KAPLAN, H. The sulphate resistance of cements containing red brick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intra-pore gypsum and ettringite as strengtheners. *Cement & Concrete Composites*. 2012, vol. 34, p. 279-287.

- [19] BOHUŠ, Š. Zvyšování plynotěsnosti betonu použitím krystalizačních hmot. In: KRÍŽOVÁ, K., PAZDERA, L. *XII. Mezinárodní vědecká konference. Materiálové inženýrství*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM[®], s.r.o. Brno, 2009, p. 35-38. ISBN 978-80-7204-629-4.
- [20] DUFKA, A. Stříkané betony odolné vůči působení extrémních teplot. In: KRÍŽOVÁ, K., PAZDERA, L. *XII. Mezinárodní vědecká konference. Materiálové inženýrství*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM[®], s.r.o. Brno, 2009, p. 55-58. ISBN 978-80-7204-629-4.
- [21] ČSN EN 14488-1. *Zkoušení stříkaného betonu – Část 1: Odběr vzorků čerstvého a ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [22] ČSN EN 14488-2. *Zkoušení stříkaného betonu - část 2: pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [23] ASBRIDGE, A. H., PAGE, C. L., PAGE, M. M. Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars. *Cement and concrete research*. 2002, vol. 32, p. 1365-1369.
- [24] Metakaolin – Technický list. [online]. Dostupný z: <http://www.sedlecky-kaolin.cz/cz/ke-stazeni/download/technick%E9%20listy/Metakaolin.pdf>
- [25] HELA, R. *Technologie betonu I*. VUT Brno, Brno, 2005.
- [26] HELA, R. *Technologie betonu II*. VUT Brno, Brno, 2007.
- [27] HOLÝ, F., MARTAUS, D. *Skatepark Ružomberok* [online]. [cit. 28.4. 2013]. Dostupné z: <http://fiveramps.com/index.php/cs/skateparks/item/91-skatepark-ru%C5%BEomberok-dokon%C4%8Den>
- [28] ACI 506.2-95. *Specification for shotcrete*. American Concrete Institute. 1995 [cit. 10. květen 2013]. Dostupné z: http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/5062_95.pdf
- [29] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 390 p. Učebnice sv. 1. ISBN 80-214-1647-5

- [30] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. 342 p. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757
- [31] MORGAN, D. R., TOTTEN, L. Structural shotcrete specification. In: *Shotcrete for Africa Conference* [online]. South Africa, 2. - 3. March 2009. 2009 [cit. 26.4. 2013]. Dostupné z:
<http://www.saimm.co.za/Conferences/Shotcrete2009/06%20Structural%20Shotcrete%20Specifications.pdf>
- [32] HELAN, T. *Možnosti laboratorní přípravy a testování stříkaných betonů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické. Fakulta stavební.
- [33] DUFKA, A., BYDŽOVSKÝ, J. Vývoj stříkaných betonů odolných vůči působení chemicky agresivních prostředí. In: *Sanace betonových konstrukcí mezinárodní symposium: sborník přednášek*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2009, p. 271-278. ISBN 9771211370008
- [34] E-mailová korespondence s Fitzgerald Mark [online], 16.4. 2013, mark.fitzgerald@kerneos.com
- [35] URBAN, J., KLEČKA, T. Vliv úpravy povrchu čerstvého betonu na odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám. In: *8. konference speciální betony*. Skalský Dvůr: SEKURKON s.r.o., 2011, p. 21-29. ISBN 978-80-86604-54-1.
- [36] MORGAN, D. R., KIRKNESS, A. J., McASKILL, N., DUKE, N. Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibres. In: MORGAN, D. R. *Shotcrete: A Compilation of Papers*. American Concrete Institute, 2009, p. 51-58.
- [37] MORGAN, D. R. Freeze-thaw durability of shotcrete. In: MORGAN, D. R. *Shotcrete: A Compilation of Papers*. American Concrete Institute, 2009, p. 59-66.
- [38] MORGAN, D. R. Advances in shotcrete technology for infrastructure rehabilitation. *Shotcrete* [online]. 2006, Winter [cit. 2.4. 2013]. Dostupné z:
http://www.shotcrete.org/media/Archive/2006Win_Morgan.pdf

- [39] DUFKA, A., BYDŽOVSKÝ, J. Vývoj stříkaných betonů s matricí na bázi geopolymerů. *Zpravodaj WTA CZ*. 2009, vol. 8. p. 14-15.4.
- [40] ROMER, M. Detachment of shotcrete linings due to long term interaction with ground water [cit. 25. 4. 2013]. Dostupné z:
http://www.sheffield.ac.uk/polopoly_fs/1.142959!/file/10.pdf
- [41] E-mailová korespondence s Taylor Hank [online], 15.4. 2013,
hank@epoxydesign.com
- [42] Shotcrete MS – Technický list [online]. Dostupný z:
http://www.quikrete.com/PDFs/DATA_SHEET-Shotcrete%201228-1229.pdf
- [43] LIDÉN, P., SAGLAMOGU, S. Groundwater chemistry and its influence on the selection of construction materials – A review of four traffic tunnels in Sweden and evaluation of technical requirements. Göteborg, Sweden, 2012. Master's thesis. Chalmers University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering.
- [44] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. *Atmosférická koroze betonu*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998. 171 p. ISBN 80-902558-0-9.
- [45] FITZGERALD, M. W., TALLEY, J., ALT, CH. W. Calcium aluminate technology and its application in refractory shotcrete. Dostupné z:
<http://www.readbaq.com/shotcrete-pdf-files-0403fitzgerald>
- [46] AMERICAN SHOTCRETE ASSOCIATION. 2007 Outstanding infrastructure project whistler sliding centre. *Shotcrete* [online]. 2008, Summer [cit. 15.4. 2013]. Dostupné z:
http://www.shotcrete.org/media/Archive/2008Sum_07OutstandingInfrastructure.pdf
- [47] Ing. Filip Holý – ústní sdělení (Fiveramps, Poděbradova 1069/35, Ostrava) dne 27.4. 2013.

VII. Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Historický snímek stříkacího zařízení. [1]

Obr. 2: Exponát ze stříkaného betonu. [1]

Obr. 3: Druhy pórovitých betonů. [16]

Obr. 4: Pohled do tunelu Löttinge. Dostupné z:

<http://www.midrocelectro.se/Referenser/Norrortsleden.aspx>

Obr. 5: Pohled na čistírnu odpadních vod v Carsonu. [12]

Obr. 6: Pohled do části vodní nádrže po rekonstrukci čistírny odpadních vod v Carsonu. [12]

Obr. 7: Nástřík stěny nádrže čistírny odpadních vod v Houstonu. [41]

Obr. 8: Nástřík stříkaného betonu v petrochemickém průmyslu. [45]

Obr. 9: Přehrada na řece Jordan. Dostupné z:

<http://maplemusketeer.deviantart.com/art/Jordan-River-Diversion-Dam-253764646>

Obr. 10: Pohled na maják Haute-Fond Prince. [38]

Obr. 11: Armatura bobové dráhy. [46]

Obr. 12: Dokončený povrch bobové dráhy [46]

Obr. 13: Bobová dráha v provozu. [46]

Obr. 14: Nástřík betonu skateparku. Dostupné z:

<http://fiveramps.com/index.php/cs/faq>

Obr. 15: Finální vzhled skateparku. Dostupné z:

<http://fiveramps.com/index.php/cs/faq>

Obr. 16: Skatepark v provozu. Fotografie autora.

Obr. 17: Kvalita betonu zhotoveného různými operátory trysky. [2]

Obr. 18: Postup injektáží. [43]

VIII. Seznam tabulek

Tab. 1: Stupeň vlivu prostředí X0. [14]

Tab. 2: Stupně vlivu prostředí XC. [14]

Tab. 3: Stupně vlivu prostředí XD. [14]

Tab. 4: Stupně vlivu prostředí XS. [14]

Tab. 5: Stupně vlivu prostředí XF. [14]

Tab. 6: Stupeň vlivu prostředí XA. [14]

Tab. 7: Mezní hodnoty charakteristických látek pro stupně vlivu prostředí XA. [14]

Tab. 8: Stupně vlivu prostředí XM. [14]

Tab. 9: Nejnižší požadované pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu dle křivek J1 – J3. [4]

Tab. 10: Třídy pevnosti tlaku ztvrdlého stříkaného betonu. [4]

Tab. 11: Třídy pevnosti tlaku ztvrdlého stříkaného betonu. [4]

Tab. 12: Chemický rozbor podzemní vody nacházející se v oblasti tunelu Löttinge. [43]

Tab. 13: Zkoušky testovaných vlastností stříkaného betonu použitého v čistírně odpadních vod v Carsonu. [12]

Tab. 14: Vlastnosti stříkaného betonu užitého pro sanaci přehrady na řece Jordan. [38]

Tab. 15: Složení stříkaného betonu majáku Haute-Fond Prince. [38]

Tab. 16: Zkoušené vlastnosti stříkaného betonu použitého na sanaci majáku Haute-Fond Prince. [38]

Tab. 17: Hlavní složky směsi stříkaného betonu použitého na bobovou dráhu ve Whistleru. [31]

Tab. 18: Složení testovaného stříkaného betonu

Tab. 19: Vlastnosti kameniva frakce 0-4 Žabčice

Tab. 20: Vlastnosti kameniva frakce 4-8 Olbramovice

Tab. 21: Sítový rozbor kameniva frakce 4-8 Olbramovice

Tab. 22: Sítový rozbor kameniva frakce 4-8 Olbramovice

Tab. 23: Průměrné počáteční pevnosti v tlaku a teploty testovaných betonů

Tab. 24: Objemové hmotnosti jednotlivých testovaných betonů

Tab. 25: Pevnosti v tlaku jednotlivých testovaných betonů

Tab. 26: Maximální hloubka průsaku jednotlivých testovaných betonů

Tab. 27: Odpady z jednotlivých zkušebních testovaných betonů

IX. Seznam grafů

Graf 1: Ideální křivky zrnitosti. [4]

Graf 2: Obory pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu [10]

Graf 3: Křivka zrnitosti kameniva 0-4

Graf 4: Křivka zrnitosti kameniva 4-8

Graf 5: Průměrné počáteční pevnosti v tlaku testovaných betonů

Graf 6: Objemové hmotnosti jednotlivých testovaných betonů

Graf 7: Pevnosti v tlaku jednotlivých testovaných betonů

Graf 8: Maximální hloubka průsaku jednotlivých testovaných betonů

Graf 9: Odpady z jednotlivých testovaných betonů