

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Konstrukce pozemních staveb

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Odolnost betonu proti CHRL

Vyhotovil: Bc. Jakub Hobza

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc, FEng.

Praha 2019


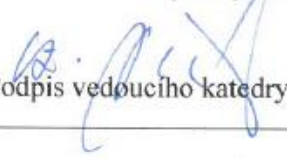


ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

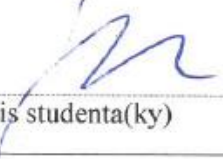
Příjmení: <u>Hobza</u>	Jméno: <u>Jakub</u>	Osobní číslo: <u>424450</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Odolnost betonu proti CHRL</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Resistance of concrete against de-icing salts</u>	
Pokyny pro vypracování: Experimentální ověření vlivu vodního součinitele Porovnání výsledků metod A a C pro určení odolnosti Porovnání odolnosti na různých površích (hlazený, z bednění)	
Seznam doporučené literatury: Evropské a české normy pro zkoušení pevnosti, odolnosti a mrazuvzdornosti betonu Bechyně, S.: Stavitelství betonové, Technologie betonu, SNTL, 1954 Časopis Beton, TKS, 2001-2018	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>1.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>1.10.2018</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	--

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Odolnost betonu proti CHRL** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne

.....

Jakub Hobza

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Janu L. Vítkovi, CSc, FEng za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce.

Děkuji panu Ing. Robertu Coufalovi Ph.D. za odborné a užitečné rady při zpracování diplomové práce.

Děkuji společnosti TBG Metrostav s.r.o. za bezplatné poskytnutí materiálů a vytvoření podmínek pro namíchání vzorků.

Děkuji Kloknerovu ústavu ČVUT v Praze za poskytnutí zázemí pro zkoušení vzorků.

Děkuji společnosti SQZ s.r.o. za poskytnutí zázemí pro zkoušení vzorků.

Děkuji MPO ČR. V práci byly využity některé výsledky projektu č. FV20472 (kap. 4.3).

ODOLNOST BETONU PROTI CHRL

RESISTANCE OF CONCRETE AGAINST DE-
ICING SALTS

Anotace

Předmětem diplomové práce je studie odolnosti betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část popisuje dva základní přístupy k návrhu betonové směsi. Protože trvanlivost betonu je důležitý parametr pro zajištění požadované životnosti konstrukce a zajištění udržitelných provozních nákladů, shrnuje práce požadavky na beton v prostředí XF a problematiku zkoušení odolnosti betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Experimentální část popisuje provedení experiment, zaměřující se na odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek, který byl rozdělen na zkoušení provzdušněných betonů a doplňkovou část zabývající se zkoušením betonů s nízkou porozitou.

Klíčová slova:

beton, trvanlivost, chemické rozmrazovací látky, CHRL, odolnost proti CHRL, výkonová specifikace, preskriptivní specifikace, provzdušnění

Summary

The purpose of this thesis is a study of resistance of concrete against de-icing salts. The thesis is divided into theoretical and experimental part. A theoretical part describes two basic principles of composing the concrete mixture. Because the durability is very important parameter to ensure required construction lifetime, the thesis summarizes requirements for concrete exposed to exposure classes XF and testing issues, which may appear during testing resistance of concrete against de-icing salts. An experimental part is focused on testing resistance of concrete against de-icing salts and it is also divided into two parts. The main part describes testing resistance of aerated concrete against de-icing salts and the other part describes testing resistance of low porosity concrete against de-icing salts.

Key words:

concrete, durability, de-icing salts, resistance against de-icing salts, performance-based specification, prescriptive specification, air entrainment

Obsah

1. ÚVOD	5
2. CÍLE PRÁCE	6
3. TEORETICKÁ ČÁST	7
3.1. VÝKONOVÁ SPECIFIKACE	7
3.2. PRESKRIPTIVNÍ SPECIFIKACE.....	9
3.3. RIZIKA A ODPOVĚDNOST.....	11
3.4. SPECIFIKACE BETONŮ V PROSTŘEDÍ XF	12
3.4.1. Česká republika	13
3.4.2. Slovensko.....	15
3.4.3. USA	16
3.4.4. Evropská unie	18
3.5. PŮSOBNÍ MRAZU NA BETON	19
3.5.1. Porušení vnitřní struktury	19
3.5.2. Povrchové poškození	21
3.6. METODY STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL	23
3.6.1. Česká republika	23
3.6.2. Slovensko.....	27
3.6.3. USA	27
3.6.4. Německo	28
3.7. PROBLÉMY SPOJENÉ SE STANOVENÍM ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL	30
3.7.1. Problémy při výrobě a ošetřování	30
3.7.2. Problémy spojené se samotným zkoušením	31
3.7.3. Problémy s vyhodnocením výsledků	32
3.8. POPIS ZKOUŠEK PROVEDENÝCH NA VYTVOŘENÝCH RECEPTURÁCH	32
3.8.1. Zkoušky na čerstvém betonu	32
3.8.2. Zkoušky na ztvrdlém betonu.....	35
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
4.1. KÓDOVÁNÍ RECEPTUR	37
4.2. ODOLNOST PROVZDUŠNĚNÝCH BETONŮ PROTI CHRL	38
4.2.1. Výroba	38
4.2.2. Vstupní suroviny.....	41
4.2.3. Naměřené hodnoty: Čerstvý beton	42
4.2.3.1. Konzistence	42

4.2.3.2. Obsah vzduchu	44
4.2.4. Naměřené hodnoty: Ztvrdlý beton	45
4.2.4.1. Pevnost v tlaku	45
4.2.4.2. Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu	47
4.2.4.3. Odolnost betonu proti CHRL	51
4.2.5. Porovnání metod A a C	54
4.2.6. Dílčí závěr (porovnání metod A a C)	62
4.2.7. Porovnání odolností různých povrchů betonu proti působení CHRL	62
4.2.8. Dílčí závěr (porovnání různých povrchů)	69
4.2.9. Trvanlivost provzdušněných betonů z hlediska Výkonové specifikace	70
4.2.10. Dílčí závěr (trvanlivost provzdušněných betonů)	73
4.3. TRVANLIVOST BETONŮ S NÍZKOU POROZITOU	74
4.3.1. Výroba a provedené zkoušky	74
4.3.2. Vstupní suroviny	75
4.3.3. Naměřené hodnoty	75
4.3.3.1. Konzistence	75
4.3.3.2. Pevnost v tlaku	77
4.3.3.3. Odolnost proti CHRL	78
4.3.4. Dílčí závěr (betony s nízkou porozitou)	81
5. REKAPITULACE VÝSLEDKŮ	82
5.1. PROVZDUŠNĚNÉ BETONY	82
5.2. BETONY S NÍZKOU POROZITOU	83
6. ZÁVĚR	84
6.1. SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE	84
6.2. ZÁVĚRY VZTAHUJÍCÍ SE KE STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL	85
6.3. ZÁVĚRY TÝKAJÍCÍ SE BETONŮ S NÍZKOU POROZITOU	86
6.4. PŘEDMĚT DALŠÍHO VÝZKUMU	87
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	88
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	92
9. SEZNAM TABULEK	96
10. SEZNAM PŘÍLOH	97

1. ÚVOD

S rozvíjejícím se důrazem na provozní náklady konstrukcí jde ruku v ruce požadavek na dostatečnou trvanlivost betonu. Zvláště když je beton jeden z nejvíce využívaných stavebních materiálů po celém světě. Trvanlivost betonu je tedy velmi sledovaným parametrem hlavně u konstrukcí vystavených venkovním podmínkám a u konstrukcí vystavených působení chemických rozmrazovacích látek.

Kvůli zajištění požadované trvanlivosti betonu nám norma ČSN EN 206+ A1 a ČSN P 73 2404 udává různé stupně vlivu prostředí, které specifikují prostředí konstrukce během její provozní doby. Daný stupeň vlivu prostředí poté udává minimální pevnostní třídu, maximální vodní součinitel, minimální množství cementu, minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu, maximální průsak tlakovou vodou a maximální odpad při zkoušce odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám, dále jen CHRL. Často se stává, že u náročnějších stupňů vlivu prostředí, např. XF (střídavé působení mrazu a rozmrazování s CHRL nebo bez nich), je většinou rozhodující minimální pevnostní třída daná ČSN EN 206+ A1, kvůli zajištění trvanlivosti než pevnost daná statickým výpočtem.

Dostatečnou trvanlivost betonu můžeme zajistit zaprvé dostatečnou hutností betonu, respektive hutností cementového tmele. Zprostředkovatelem škodlivého působení je hlavně voda, ta je nositelem různých chemických činidel, která jsou v ní rozpuštěna. Pokud bude mít beton dostatečnou hutnost cementového tmele, který zabrání vodě vstup do betonu, škodlivé vlivy mají možnost působit pouze povrchově. Zadruhé můžeme trvanlivost betonu zajistit kvalitním provzdušněním, přičemž provzdušnění betonu v čerstvém stavu se pohybuje většinou v rozmezí 4-7 %.

Pro beton, který musí udržet kvalitativní vlastnosti po dobu požadované životnosti v agresivním prostředí, je velmi důležitý správný návrh receptury. Návrh receptury lze rozdělit na dva způsoby, zaprvé návrh pomocí preskriptivní specifikace, kdy je předepsáno přesné složení betonu a zadruhé pomocí výkonové specifikace, kdy se sledují výsledné parametry pomocí zkoušek, nebo je možno využít kombinaci těchto dvou přístupů.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce bude studie problematiky odolnosti betonů proti působení chemických rozmrazovacích látek. V teoretické části bude cílem nejprve shrnout dva základní přístupy k návrhu betonové směsi. Následně shrnout požadavky na beton v prostředí XF. Dále prozkoumat metody zkoušení odolnosti betonu proti působení CHRL a shrnout problémy spojené se zkoušením.

V experimentální části bude cílem vytvořit sérii receptur, které budou podrobeny zkouškám na odolnost proti CHRL metodou A a C, receptury se budou odlišovat jak vodním součinitelem, tak množstvím cementu. Dalším cílem bude porovnání metod běžně používaných pro stanovení odolností betonů proti působení CHRL, tedy metody A a metody C, zároveň porovnání odolností různých typů povrchů a experimentální ověření vlivu vodního součinitele na odolnost proti CHRL.

3. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část popisuje přístup k návrhu receptur pomocí preskriptivní specifikace a výkonové specifikace. Stručně popisuje působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek na beton. Dále se zabývá specifikací betonů v prostředí XF jak v České republice, tak ve vybraných cizích zemích. Shrnuje metody zkoušení odolnosti betonu proti CHRL využívané v České republice a v zahraničí. Popisuje problematiku spojenou se zkoušením odolnosti betonu proti CHRL. Stručně specifikuje zkoušky betonu provedené v experimentu.

3.1. Výkonová specifikace

Výkonová specifikace neboli specifikace na základě výsledných, nebo konečných vlastností betonu (Performance-based specification of concrete) je podle National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, USA) definována jako: „Soubor instrukcí, které obsahují funkční požadavky pro ztvrdlý beton, s ohledem na jeho aplikaci. Tyto instrukce by měly být jasné, dosažitelné, měřitelné a vykonatelné.“ Skupina ACI's Innovative Task Group (ITG) definuje tuto specifikaci jako: „Specifikace na základě výsledných vlastností definuje požadovaný výsledek, kritéria k posouzení vlastností a ověření, bez požadavků na způsob, jak se těchto výsledků dosáhne.“ [1] [2] [3] [4]

Mezi výkonové charakteristiky můžeme zařadit všechny parametry, které popisují výsledný stav buďto čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Základní charakteristiky pro čerstvý beton: zpracovatelnost, sednutí kužele, čerpatelnost, segregace neboli oddělení některých složek (např. hrubého kameniva) od zbytku betonu, krvácení, obsah vzduchu, teplota a homogennost směsi. Charakteristiky pro ztvrdlý beton: pevnost v tlaku, pevnost v tahu, pevnost v tahu za ohybu, objemové změny, pórovitost, rozmístění pórů ve směsi, propustnost, odolnost proti mrazu, odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a cena. [1] [2] [3] [4]

Za příklad výkonové specifikace lze částečně považovat doplňkovou normu ČSN P 73 2404. Například pro stupeň vlivu prostředí XF4 jsou kromě preskriptivních parametrů (vodní součinitel, množství cementu) uvedeny i výkonové parametry, určující trvanlivost betonu v daném prostředí (maximální průsak, odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování). Čistá výkonová specifikace by znamenala specifikaci

pouze výkonových parametrů (max. průsak, odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování), bez specifikace preskriptivních parametrů (vodní součinitel, množství cementu). [4] [5] [6]

Proč tedy už nestačí dlouhodobě používaná preskriptivní specifikace? Důvodů je hned několik. Jak už bylo zmíněno, požadavky na betonové konstrukce nebo beton sám se velmi rychle vyvíjí. Z tohoto důvodu se také velmi rychle vyvíjí nové materiály a suroviny. Podle ACI Committee 329 jsou základní důvody k přechodu z preskriptivní specifikace na výkonovou specifikaci tyto:

- Poznání, že pro mnoho moderních aplikací betonu není pevnost v tlaku jediným nebo dokonce nejdůležitějším parametrem.
- Portlandský cement není jediný dostupný druh cementu.
- Obsah vody a velikost zrn kameniva nejsou jediné faktory ovlivňující sednutí kužele.
- Vodní součinitel není jediný faktor ovlivňující propustnost.

Je evidentní, že ohodnocení trvanlivosti betonu je mnohem náročnější než ohodnocení jeho pevnosti. Je složitější předvídat a zajistit dlouhodobou životnost betonových konstrukcí než předvídat krátkodobou únosnost. Obsah vzduchu v betonu je sice jednoduše měřitelný na stavbě u čerstvého betonu, ale odolnost proti zmrazovacím cyklům je více závislá na velikosti vzduchových pórů a jejich rozmístění v betonové pastě než na celkovém obsahu vzduchu v betonu. Příměsi a chemické přísady ovlivňují obsah vzduchu, zpracovatelnost, dobu tuhnutí, krvácení betonu a počáteční nárůst pevnosti. Všechny tyto přísady a příměsi mohou, ale také nemusí být vzájemně kompatibilní. Je tedy velmi složité napsat preskriptivní specifikaci tak, aby maximalizovala všechny výhody návrhu a zároveň omezila nástrahy, spojené se špatnou kombinací materiálů. [1] [2] [3] [4] [5]

Výhody výkonové specifikace: [1] [2] [3] [4]

- projektant se může soustředit na vlastnosti, které jsou vyžadovány, namísto jejich dosažení (ne všichni projektanti jsou seznámeni s tím, jak dosáhnout nejlepších výsledků)
- možnost soustředit se na vlastnosti betonu, na kterých skutečně záleží
- dodavatel betonu má technický a ekonomický vliv na výsledný produkt

- možnost využít různé materiály, nebo kombinaci materiálů z místních zdrojů
- možnost využít novou technologii, znalost, nebo odbornost
- flexibilita v dávkování dává možnost vytvořit celkově lepší, nebo cenově výhodnější betonovou směs, která splní všechny požadované vlastnosti
- vytvoření trvanlivějšího produktu vede ke snížení nákladů na životní cyklus stavby
- předpokládaný vztah mezi výslednými vlastnostmi a charakteristikami směsi může být nahrazen testováním vlastností betonu

Nevýhody výkonové specifikace: [1] [2] [3] [4]

- odpovědnost za dosažení požadovaných vlastností se více přiklání na stranu výrobce betonové směsi
- projektant si nemusí být jistý, jaké výkonové parametry použít, nebo jak je správně měřit
- problém s vytvořením spolehlivých testů, které budou schopny kvantifikovat požadované vlastnosti, tyto testy mohou být dražší než běžně používané testy
- konečné vlastnosti jsou ovlivňovány výběrem materiálů, dávkováním, kontinuální dodávkou, ukládáním, ošetřováním, každá zúčastněná strana má unikátní vliv na konečný výsledek, může být těžké odlišit vliv a odpovědnost zúčastněných stran za konečný výsledek

3.2. Preskriptivní specifikace

Preskriptivní specifikace definuje přesné metody výroby betonové směsi. Dále určuje nebo omezuje množství složek betonové směsi. Zaměřuje se převážně na vlastnosti vstupních složek, dávkování, míchání, dopravu a následné ošetřování. Tato metoda se opírá převážně o dlouhodobá zkoušení, zkušenosti a empirické vztahy a málokdy zohledňuje vztah mezi specifikovanými detaily a konečnými vlastnostmi betonu. Může se tedy stát, že výsledné vlastnosti (v našem případě trvanlivost betonu) neodpovídají původním požadavkům zákazníka. [1] [2] [3] [4]

Obecně mezi preskriptivní charakteristiky můžeme zařadit všechny charakteristiky, které udávají nebo omezují množství surovin v betonu. Základní preskriptivní charakteristiky tedy jsou: minimální množství cementu, druh a třída cementu, maximální nebo přesně stanovené množství příměsí, přísad a jejich specifikace, specifikace frakce kameniva, maximální vodní součinitel. [1] [2] [3] [4]

Za příklad preskriptivní specifikace betonu lze považovat specifikaci dle normy ČSN EN 206+ A1. Například pro stupeň vlivu prostředí XF4 je zde předepsán maximální vodní součinitel 0,45, minimální množství cementu 340 kg/m³ a obsah vzduchu minimálně 4 %. Není zde vůbec řešeno ověřování odolnosti finální receptury v daném prostředí a odolnost se pouze předpokládá na základě složení betonu a historických zkušeností. Z těchto požadavků je vidět, jak svazující vliv může mít preskriptivní návrh betonové směsi na výrobce betonu a na následující inovace v oblasti technologie betonu. Hlavním úkolem dodavatele betonu je především udržet požadovanou kvalitu surovin, dodržet správné množství, dávkování složek a dobu míchání. [5] [7]

Výhody preskriptivní specifikace: [1] [2] [3] [4]

- zadavatel specifikace má možnost kontrolovat většinu aspektů procesu při výrobě betonu, od výběru materiálů, dávkování, míchání, přepravy, ukládání až po ošetřování betonové směsi
- dodavatel betonu potřebuje pouze určené materiály v požadovaném množství, při typických aplikacích není požadována odborná znalost směsi
- předpisová specifikace jasně definuje zodpovědnost dodavatele a zákazníka
- někteří projektanti nebo zákazníci mají větší důvěru v tradiční preskriptivní přístup

Nevýhody preskriptivní specifikace: [1] [2] [3] [4]

- vztah mezi předpisovou specifikací a předpokládanými vlastnostmi nemusí být vždy stejný
- preskriptivní specifikace nemusí dokázat pokrýt zájem všech zúčastněných stran, jako je poskytovatel materiálu, výrobce betonu, zhotovitel, investor a uživatel

- pokud se drahými testy neprokáže chyba při ukládání a ošetřování betonu, zhotovitel nenese odpovědnost za špatné vlastnosti betonu
- dodavatel má omezenou kontrolu nad produktem, a to jak z technické, tak i z ekonomické a kreativní stránky
- pokud dodavatel splní všechna předepsaná omezení a investor nebude spokojen, je velmi složité domáhat se reklamace
- preskriptivní specifikace znemožňuje dodavateli optimalizaci betonové směsi
- projektant nemusí mít důvěru, že preskriptivní specifikace povedou k žádoucím vlastnostem, poté je použit zbytečně konzervativní návrh

3.3. Rizika a odpovědnost

Od výběru materiálů přes výrobu, ukládání a konečné ztvrdnutí v konstrukci, projde beton rukama mnoha zúčastněných stran. Je tedy důležité zabývat se odpovědností a riziky těchto subjektů. Při použití preskriptivní specifikace a výskytu neakceptovatelných výsledků ztvrdlého betonu je odpovědnost za tyto problémy často přisuzována výrobcí betonu nebo zhotoviteli. Z části proto, že odpovědnost za výsledek není často jasně specifikovaná. Při přechodu na výkonovou specifikaci by měla být odpovědnost zúčastněných stran jasně definovaná. [2] [4] [8]

Pokud má výrobce betonu přijmout plnou odpovědnost za konečné vlastnosti betonu, je rozumné poskytnout mu svobodu v návrhu betonové směsi tak, aby bylo zajištěno splnění všech požadavků. Při použití výkonové specifikace má projektant jasnou zodpovědnost za to, aby správně definoval konečné vlastnosti betonu. Je velmi složité určit, kde začíná a končí odpovědnost zúčastněných stran. Například při betonování stropu si zhotovitel objedná čerpadlo betonu a specifikuje požadavky na čerstvý beton. Pumpař na stavbě zjistí, že betonovou směs není schopný přečerpát. Měl by výrobce betonu změnit recepturu, nebo by měla firma poskytující čerpadlo použít vhodnější zařízení? Pokud statik navrhne velmi hustou výztuž a zároveň navrhne špatnou velikost kameniva, kdo je zodpovědný za špatně probetonovaný prvek? [2] [4] [8]

Výrobce betonu by měl být zodpovědný za betonovou směs od výroby až po doručení betonu na stavbu a jeho složení. Zároveň by měl nést odpovědnost za výsledné

vlastnosti betonu, jako jsou pevnost v tlaku, odolnost proti agresivnímu prostředí a další. Zhotovitel betonové konstrukce by měl nést odpovědnost za beton během jeho ukládání a ošetřování až do úplného vytvrdnutí. Pokud zhotovitel nedodrží podmínky a například přidá na stavbě do betonu vodu, aby docílil lepší zpracovatelnosti, může způsobit, že dojde k nedodržení požadované pevnostní třídy betonu. Totéž může nastat, nechá-li při ukládání beton padat z příliš velké výšky a dojde k oddělení velkého kameniva od zbylých složek. Odpovědnost za špatný výsledek by měl nést zhotovitel betonové konstrukce. Může se ale stát, že se pokusí přehodit tuto odpovědnost na výrobce betonu a žádat po něm sanaci. [2] [4] [8]

Pro omezení výskytu těchto problémů je důležité, aby každá zúčastněná strana byla dobře obeznámena s odpovědností, kterou na sebe bere při procesu výroby. Zároveň by také měla probíhat dostatečná kontrola jak zhotovitele betonové konstrukce, například formou přítomnosti technologa na stavbě nebo osoby seznámené se správným technologickým postupem, tak dostatečná kontrola výrobce betonu. Například aby odebírání vzorků probíhalo podle plánu odběru vzorků. Nejdůležitějším faktorem je ale dostatečná komunikace mezi zúčastněnými stranami. Správná komunikace je také důležitou prevencí před výskytem chyb a dosažením neuspokojivého výsledku. [2] [4] [8]

3.4. Specifikace betonů v prostředí XF

Prostředí XF je takové prostředí, kde je betonová konstrukce vystavena působení mrazu a rozmrazování, takzvaným mrazovým cyklům, společně s chemickými rozmrazovacími látkami nebo bez nich. Toto prostředí dělíme do čtyř kategorií, podle intenzity působení:

- XF1- mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků
 - svislé betonové plochy vystavené dešti a mrazu
- XF2- mírně nasycen vodou s chemickými rozmrazovacími látkami
 - svislé betonové povrchy konstrukcí vystavené mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám rozptýleným ve vzduchu
- XF3- značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků
 - vodorovné betonové konstrukce vystavené dešti a mrazu

- XF4- značně nasycen vodou s chemickými rozmrazovacími látkami
 - betonové povrchy vystavené přímému ostříku chemickými rozmrazovacími látkami a mrazu

3.4.1. Česká republika

Navrhování betonu se v České republice řídí normami ČSN EN 206+ A1 [7] a ČSN P 73 2404 [6]. Dle těchto norem musejí betony pro stupně vlivu prostředí XF1-4 splňovat následující požadavky:

Tab. 1-Tabulka F.1.1. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu [6], životnost 50 let

Pro předpokládanou životnost 50 let	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel	0,55	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Min. obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}
Max. průsak tlakovou vodou [mm]	50	50	35	35
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování- metoda/počet cyklů/odpad [g/m ²]	-	Metoda A 75 cyklů 1250 Metoda C 50 cyklů 1500	-	Metoda A 100 cyklů 1000 Metoda C 75 cyklů 1000

- a) Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, anebo vůbec), pokud jsou provedena příslušná opatření a vyhoví přitom kritériu odolnosti. Pokud beton nesplní při PZ kritéria odolnosti a vodonepropustnosti, je nutno beton provzdušnit.

Tab. 2-Tabulka F.1.2. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu [6], životnost 100 let

Pro předpokládanou životnost 100 let		XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel		0,55 ^{b)}	0,50	0,50	0,45
Min. pevnostní třída		C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Min. obsah cementu [kg/m ³]		300	300 ^{c)}	320 ^{c)}	340 ^{c)}
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	Zrnitost do 8 mm	-	4,5 ^{d)}	5,0 ^{a)}	5,5 ^{a)}
	Zrnitost do 16 mm	-	3,5 ^{d)}	4,0 ^{a)}	4,5 ^{a)}
	Zrnitost do 22-32 mm	-	3,0 ^{d)}	3,5 ^{a)}	4,0 ^{a)}
Minimální obsah mikropórů A ₃₀₀ ve ztvrdlém betonu [%]		-	1,0 ^{e)}	1,0 ^{e)}	1,8 ^{e) f)}
Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů L [mm]		-	0,24 ^{e)}	0,24 ^{e)}	0,20 ^{e) f)}
Max. průsak tlakovou vodou [mm]		50	30	20	20
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování- metoda/počet cyklů/odpad [g/m ²]		-	Metoda A 100 cyklů 1250 Metoda C 75 cyklů 1250	-	Metoda A 100 cyklů 1000 Metoda C 75 cyklů 1000

a) Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, anebo vůbec), pokud jsou provedena příslušná opatření a vyhoví přitom kritériu odolnosti.

b) Pro nosné konstrukce mostů se připouští vodní součinitel maximálně 0,50.

- c) Použití popílku je možné do maximální dávky 11 % z hmotnosti cementu, a to pouze v případě, že beton splní další požadavky
- d) Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, anebo vůbec), pokud je betonová konstrukce převážně v prostředí s přirozenou atmosférickou vlhkostí bez kapalných srážek, anebo s přirozenou atmosférickou vlhkostí v dosahu slané mlhy (chloridů rozptýlených ve vzduchu, části hydroizolací chráněných mostních konstrukcí), a vyhoví přitom kritériu odolnosti.
- e) Při PZ musí být hodnoty součinitele rozložení vzduchových pórů dosaženy o 20 % nižší a A_{300} o 20 % vyšší, než je uvedeno v tab. F.1.2.
- f) L a A_{300} se u vlivu prostředí XF4 při průkazných zkouškách ověřuje vždy.

Z obou tabulek vyplývá, že návrh betonové směsi je v České republice kombinace mezi preskriptivní a výkonovou metodou. Mezi preskriptivní požadavky tedy patří omezení maximálního vodního součinitele a minimálního množství cementu. Zbývající požadavky jsou výkonové, které se zaměřují na výsledné vlastnosti betonu jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém stavu. Preskriptivní požadavky jsou zde pro zaručení trvanlivosti betonu. V bakalářské práci Performance-based design složení betonové směsi [4], byla podrobně rozebrána problematika preskriptivních požadavků na různé vlastnosti, nicméně chyběly zkoušky na odolnosti proti CHRL. Pro kompletní zohlednění významu preskriptivních požadavků je nutné se v následujícím experimentu zaměřit na trvanlivost betonu, konkrétně v prostředí XF2 a XF4.

3.4.2. Slovensko

Návrh betonu se ve Slovenské republice řídí normou STN EN 206+ A1 [9]. Dle této normy musí beton pro stupně vlivu prostředí XF1-4 splňovat následující požadavky:

Tab. 3-Tabulka F.1, Odporúčané medzné hodnoty zloženia a vlastnosti betónu [9]

	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel	0,60	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Min. obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340

Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]		4,0	4,0	4,0	4,0
Max. průsak tlakovou vodou [mm]		-	50	50	50
Odolnost povrchu betonu proti působení vody a CHRL	Stupeň porušení 2	-	50	-	100
	Stupeň porušení 3		-		150

Z požadavků je vidět, že i na Slovensku je kladen důraz na preskriptivní charakteristiky (max. vodní součinitel, min. množství cementu), to obecně vyplývá z evropské normy EN 206. Provzdušnění betonu je specifikováno pouze hodnotou obsahu vzduchu v čerstvém betonu a chybí například součinitel rozložení vzduchových pórů nebo obsah mikroskopického vzduchu A_{300} , přitom obě tyto veličiny hrají zásadní vliv při posuzování trvanlivosti betonu.

Objevuje se zde ale požadavek na zkoušení odolnosti povrchu betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám. Zkoušení probíhá podle STN 73 1326 [10]. Tedy pro stupeň vlivu prostředí XF2 stačí provést 50 cyklů a odpad nesmí být vyšší než 500 g/m^2 . Pro stupeň vlivu prostředí XF4 je požadavek provést 100 cyklů, kdy odpad nesmí přesáhnout 1000 g/m^2 , nebo 150 cyklů a odpad nesmí být vyšší než 1500 g/m^2 .

3.4.3. USA

V USA se stupeň vlivu prostředí, kde je beton vystaven mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám, označuje F0-F3. Požadavky na beton vystavený tomuto prostředí udává ACI 318-14. [11]

- F0- beton není vystaven působení mrazových cyklů

- F1- beton je vystaven mrazovým cyklům s omezeným působením vody (prvky, které nejsou vystaveny akumulaci vody a sněhu, jako například venkovní stěny trámy, atd.)
- F2- beton je vystaven mrazovým cyklům s frekventovaným působením vody (prvky, které jsou vystaveny akumulaci vody a sněhu, jako například vnější desky, atd.)
- F3- beton je vystaven mrazovým cyklům s frekventovaným působením vody a přítomností chemických rozmrazovacích látek (například vodorovné parkovací plochy, atd.)

Tab. 4-Požadavky na beton pro stupně vlivu prostředí F0-F3 dle ACI 318-14 [11]

Prostředí		F0	F1	F2	XF4
Max. vodní součinitel		-	0,55	0,45	0,40
Min. pevnost betonu		2500 psi (17,2 MPa)	3500 psi (24,1 MPa)	4500 psi (31,0 MPa)	5000 spi (34,5 MPa)
Minimální obsah vzduchu [%]	D _{max} : 2 in (50,8 mm)	-	4	5	5
	D _{max} : 1 in (25,4 mm)		4,5	6	6
	D _{max} : 3/4 in (19 mm)		5	6	6

Požadavky na beton v USA se zaměřují primárně na omezení vodního součinitele a minimální pevnost betonu v tlaku, zároveň předepisují obsah vzduchu v čerstvém betonu. Minimální obsah vzduchu je závislý na maximální velikosti kameniva, konkrétně se zmenšující se frakcí je vzrůstající požadavek na množství vzduchu v čerstvém betonu. Chybí zde jakékoliv mezní hodnoty pro stanovení odolnosti povrchových vrstev betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám.

3.4.4. Evropská unie

V celé Evropské unii by měla platit stejná norma EN 206:2013+A1:2016. Požadavky na beton v prostředí XF jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5-Doporučené hodnoty pro mezní složení a vlastnosti betonu [7]

Stupeň vlivu prostředí	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel	0,55	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Min obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340
Minimální obsah vzduchu [%]	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a
Jiné požadavky	Kamenivo podle EN 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností			

- a) Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet podle příslušné zkušební metody ve srovnání s betonem, u kterého byla prokázána odolnost proti mrazu a rozmrazování (mrazovým cyklům), pro příslušný stupeň vlivu prostředí

Evropská norma udává pouze doporučené parametry. Chybí zde konkretizace obsahu vzduchu, konkrétně o množství mikroskopického vzduchu (vzduchové póry do průměru 0,3 mm) a součinitel rozložení vzduchových pórů, přitom autoři v odborných publikacích se shodují na tom, že tyto parametry jsou velmi důležité pro kvalitní provzdušnění betonů. Zároveň zde chybí jakékoliv výkonové parametry týkající se množství odpadu při porovnávání odolnosti betonu proti CHRL. Tato absence je pravděpodobně způsobena tím, že v Evropské unii není jedna standardizovaná metoda pro stanovení odolnosti betonu proti CHRL a je tedy nutné, aby se každý členský stát vypořádal s tímto problémem sám. Jak již bylo zmíněno, v České republice je tato absence vykompenzována normou ČSN P 73 2404, která podrobně popisuje požadavky na beton v prostředí XF. [6] [7]

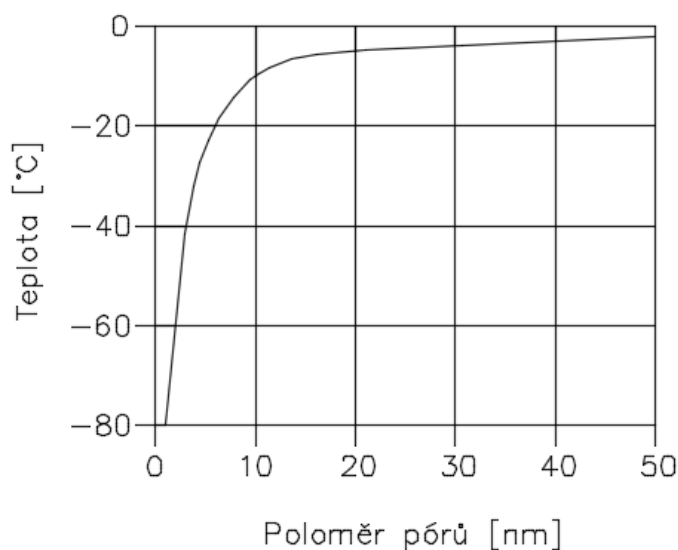
3.5. Působení mrazu na beton

Obecně můžeme rozdělit působení mrazu na beton na dva účinky, povrchové poškozování a porušení vnitřní struktury. Pro vysvětlení degradace betonu působením mrazu byla rozpracována řada teorií. Při popisování mechanismů poškozování se většina autorů shoduje na tom, že povrchové poškozování odpovídá jiným mechanismům než porušení vnitřní struktury [12]

3.5.1. Porušení vnitřní struktury

Porušení vnitřní struktury je způsobeno zmrznutím vody uvnitř betonu, dochází k degradaci mechanických vlastností betonu, což má významný vliv na trvanlivost. Jedna z prvních teorií říká, že část vody, která přejde do pevného skupenství, zvětší svůj objem a tlačí před sebou zbytek kapaliny. Takto vyvolaný hydraulický tlak způsobí narušení vnitřní struktury. Novější teorie je například teorie osmotických tlaků. Při zmrazování vody dojde k nárůstu koncentrace látek ve zbývající kapalině, vzniknou nerovnoměrné podmínky ve vnitřní struktuře betonu a tím dojde ke vzniku osmotických tlaků. Osmotické tlaky mají snahu vyrovnat koncentraci roztoků a tím narušují vnitřní mikrostrukturu. [13]

Chování vody ve ztvrdlém betonu je tedy důležité pro objasnění a pochopení mrazuvzdornosti. Vodu můžeme rozdělit na chemicky vázanou vodu a vodu v pórech. Chemicky vázaná voda se nemůže nikdy proměnit na led, je složkou pevných hydrátů v cementové pastě. Vodu v pórech můžeme rozdělit na gelovou vodu a kapilární vodu. Zároveň mikropóry v cementovém tmelu můžeme rozdělit na kapilární póry a gelové póry. Kapilární póry mají velikost od 0,1 μm do 10 μm , naopak gelové póry mají velikost od 1 nm do 10 nm. Jak již vychází z názvu, gelová voda je obsažená v gelových pórech a kapilární voda v kapilárních pórech. Gelové póry jsou natolik drobné, že téměř veškerá voda je v dosahu Van der Waalsových sil pevné fáze, naopak kapilární voda leží mimo dosah povrchových sil. Chemicky vázaná voda a gelová voda jsou spřaženy s objemem pevné fáze, obsah kapilární vody závisí na pórovitosti cementového tmele. [14]

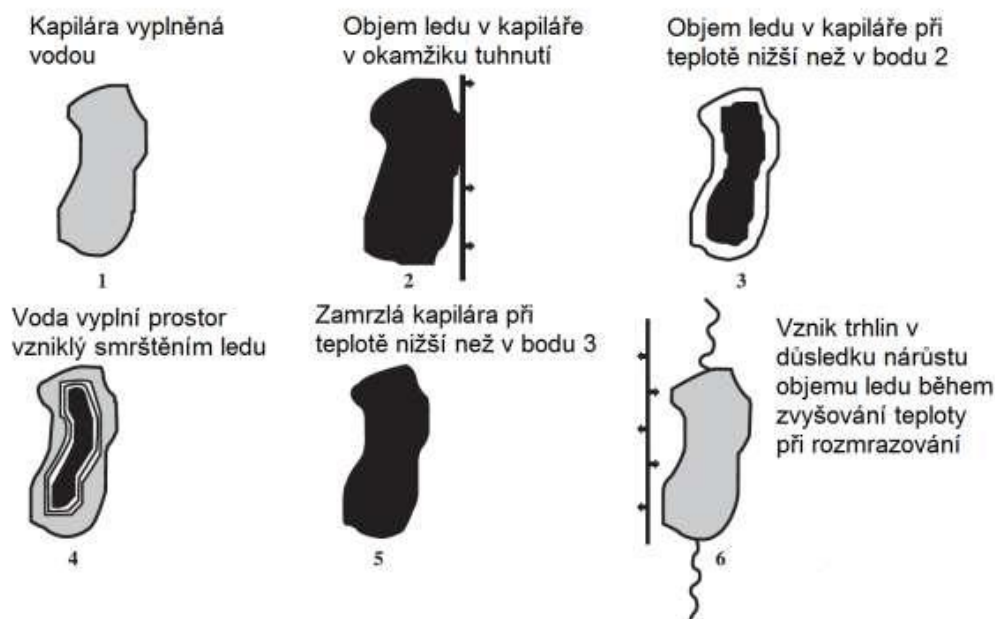


Obr. 1- Zamrznutí vody v pórech v závislosti na teplotě a velikosti pórů [15]

Teplota vody, při které dojde ke změně vody na led, je závislá na velikosti póru. Na obrázku 1 si můžeme prohlédnout graf závislosti velikosti pórů a potřebné teploty pro změnu vody na led. Voda v gelových pórech se může přeměnit na led ale pouze při velmi nízkých teplotách (okolo $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), zatímco voda v kapilárních pórech mrzne mnohem dříve. Poznatky, které mají vliv na degradaci, jsou následující. Vzniklý led má oproti vodě objem větší o 9 %, což vede k působení krystalického tlaku. Teplotní roztažnost betonu je 12×10^{-6} a teplotní roztažnost ledu je 51×10^{-6} . Při poklesu teploty dochází ke zvyšování hustoty ledu a zmenšování objemu. Dále je nutné vzít v úvahu, že led je z chemického hlediska tvořen pouze vodou, ale kapalná voda v sobě obsahuje rozpuštěné látky. Při tvorbě ledu dochází ke zvyšování koncentrace kapalného roztoku, a to následně ovlivní jeho teplotu tuhnutí. [12] [16]

Během ochlazování dochází v kapilárním póru k tvorbě ledu. Led zvětšuje svůj objem a postupně stlačuje kapalnou fázi. Pokud je rychlost zchlazení vysoká, vzniká hydraulický tlak, který vede ke vzniku trhlin. Během snižování teploty se beton ochlazuje od povrchu do středu, ale dosud nezmrzlá voda, která se nachází hlouběji v betonu, vyrovnává teplotu soustavy, tedy vykonává pohyb ze středu k povrchu. Tento jev se nazývá termoosmóza. K podobnému osmotickému jevu dochází při růstu koncentrace zbývající kapaliny. Méně koncentrovaný roztok má snahu koncentrovanější roztok ředit. Obě osmózy tedy způsobují pohyb kapaliny proti směru postupu chladu. S poklesem teploty dojde k smršťování ledu v kapilárních pórech. Vzniklý prostor je

zaplněn kapalinou, která postupuje proti směru chladu. Tato kapalina následně mrzne a vyplní celý pór ledem. Následně při nárůstu teploty dojde nejprve ke zvětšení objemu ledu v důsledku teplotní roztažnosti. A ten pak vyvodí další napětí na cementový tmel v okolí póru. Při ochlazování z 0 °C na -20 °C se led smrští o 0,31 %. Tato změna objemu není příliš významná, ale tento vliv se stane velmi podstatným při mnohonásobném opakování. Na obrázku 2 je vidět průběh popsaného děje. [14] [17]



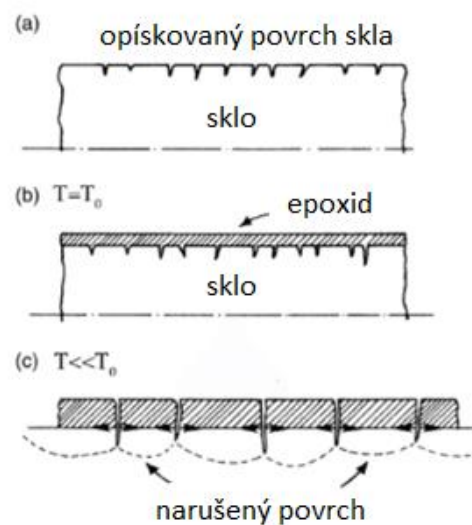
Obr. 2- Chování ledu a vody v kapilárním póru během zmrazovacího cyklu [14]

3.5.2. Povrchové poškození

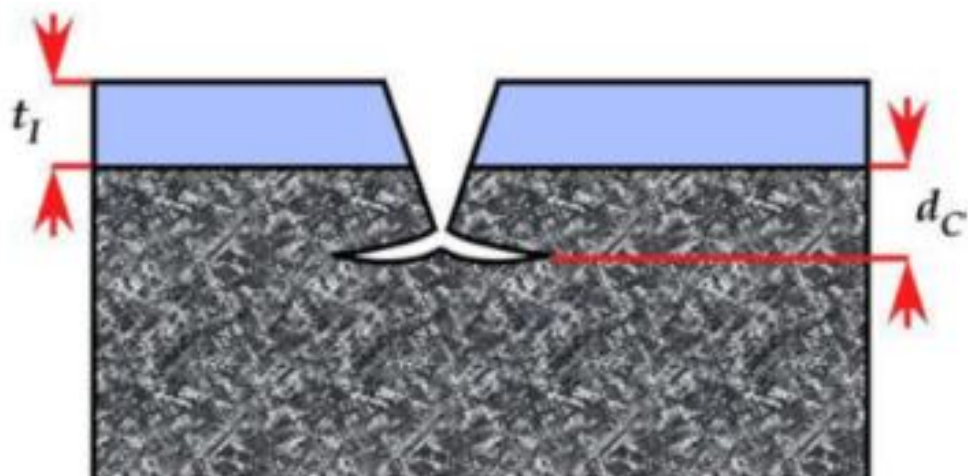
V České republice používáme slovo odpad, ten vzniká v povrchové vrstvě betonu, obvykle za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek a stupeň poškození je vyjádřen hmotností odloučeného betonu. Při povrchovém poškození nemusí nutně docházet k vnitřnímu poškození betonu. Při hledání příčiny povrchového poškození se můžeme setkat s více teoriemi, ale jako nejvíce pravděpodobná příčina povrchového poškození se jeví takzvaný „glue-spall“ mechanismus. [15] [16]

Tedy aby došlo k povrchovému poškození, musí na konstrukci působit dva kritické faktory, zaprvé jde o střídání mrazu a rozmrazování a zadruhé jde o přítomnost chemických rozmrazovacích látek. Pánové Verbeck a Klieger v roce 1957 přišli na to, že největší poškození betonového povrchu nastane při 3 % roztoku NaCl. A následně v roce 1982 pan Gulati a pan Hagy vysvětlili, proč je největší část povrchového poškození tvořena takzvaným glue-spall efektem. [15]

Povrchové poškození betonu vodou s rozpuštěnými solemi můžeme tedy přirovnat k nanášení epoxidu na opískované sklo. Pokud nanese vrstvu epoxidu na povrch skla, rozdílný součinitel teplotní roztažnosti způsobí, že se epoxid roztrhá na malé ostrůvky a zároveň naruší i povrch skla (obr. 3), na obrázku 4 poté uvidíme tento efekt aplikovaný na beton, tedy epoxidová vrstva simuluje vrstvu roztoku nasyceného 3 % roztokem NaCl a povrch skla simuluje povrch betonu. Zároveň je zde vidět, proč dochází k takzvanému odlupování betonového povrchu. [15]



Obr. 3- Schématické znázornění glue-spall efektu [15]



Obr. 4- Schématické znázornění glue-spall efektu na povrchu betonu [15]

3.6. Metody stanovení odolnosti betonu proti CHRL

Při zkouškách odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám stanovujeme odolnost povrchu betonu vystaveného působení vody s rozpuštěnými solemi (nejčastěji 3 % roztok NaCl) a zmrazovacím cyklům. Tyto zkoušky by měly napodobit skutečné prostředí, v kterém se betonová konstrukce vyskytuje.

3.6.1. Česká republika

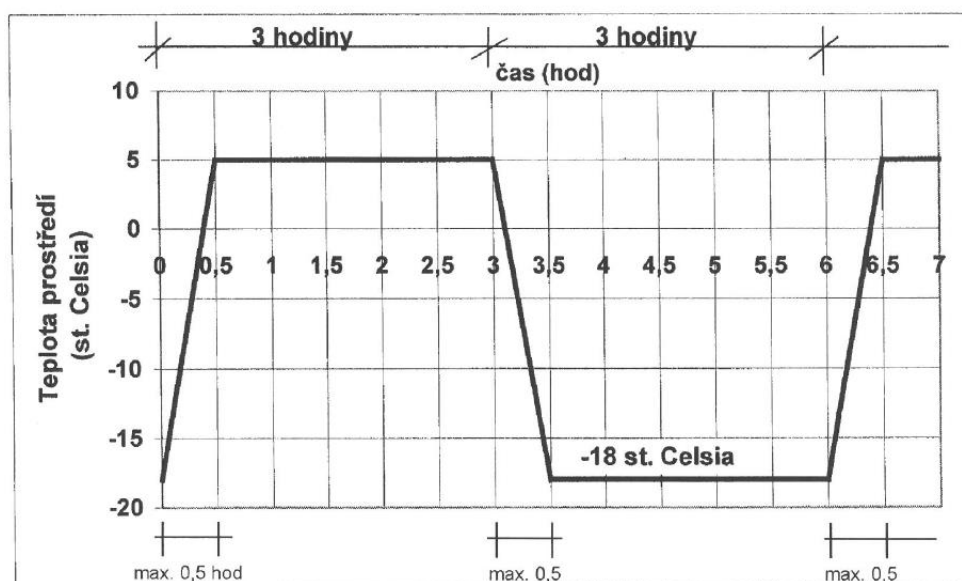
Nejčastěji využívané metody v České republice jsou metoda A a metoda C. Zajímavé je, že v oblasti Čech je beton převážně zkoušen metodou C a v oblasti Moravy převážně metodou A, tato skutečnost pravděpodobně vychází z požadavků ŘSD. Všechny metody by měly být kompatibilní a vzájemně porovnatelné. Následující část stručně popisuje čtyři normou stanovené možnosti zkoušení odolnosti betonu proti CHRL v České republice.

Metoda C- metoda automatického cyklování II

Tato metoda používá automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot, působících na celé těleso. Na povrch tělesa, který je ohraničen pryžovou objímkou, je nalit 3 % roztok NaCl. Metoda je založena na poznatku, že hlavním faktorem porušování povrchu betonové konstrukce je gradient koncentrace chloridů v povrchové vrstvě betonu. [18]

Základní zkušební těleso je 50 mm tlustý odřezek z válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm, nebo vývrt o průměru 150 mm. Zkušební těleso je opatřeno vodotěsnou objímkou, na zkušební těleso se nalije voda, která se na něm ponechá nejméně 2 dny, poté se voda odstraní, těleso se umístí do klimatizační komory a nalije se na něj 3 % roztok NaCl v tloušťce vrstvy přibližně 5 mm. [18]

Teplota cirkulujícího vzduchu se cyklicky mění z -18 na +5 °C, délka jednoho cyklu je 6 hodin. Po každých 25 cyklech se těleso vyjme z klimatizační skříně. Slaný roztok se slije a uvolněné částice se splaví do misky pomocí stříčky. Omytý povrch se okartáčuje hrubším kartáčem a znovu omyje. Pro omyté zkušební těleso se znovu opakuje postup až do 75 cyklů. Uvolněné částice se v misce plně vysuší a stanoví se jejich hmotnost s přesností na 0,1 g a přepočtem na plochu povrchu zkušebního tělesa se stanoví odpad betonu g/m². [18]



Obrázek 1 – Teplotní cyklus

Obr. 5- Schéma průběhu teploty při metodě C [18]

Metoda A- Metoda automatického cyklování I

Při metodě automatického cyklování se zkouší krychle o hraně 150 mm. Vzorky se vloží do misky, kam se následně vlije 3 % roztok NaCl, tak aby byl vzorek ponořen na výšku 5 mm. Ve zkušebním cyklu se vzorky podrobí střídavému zmrazování a rozmrazování. Cyklus je rozdělen na zchlazení zkušební plochy na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota se udržuje po dobu 15 minut. Pak následuje ohřev zkušební plochy na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota se opět udržuje po dobu 15 minut. [19]

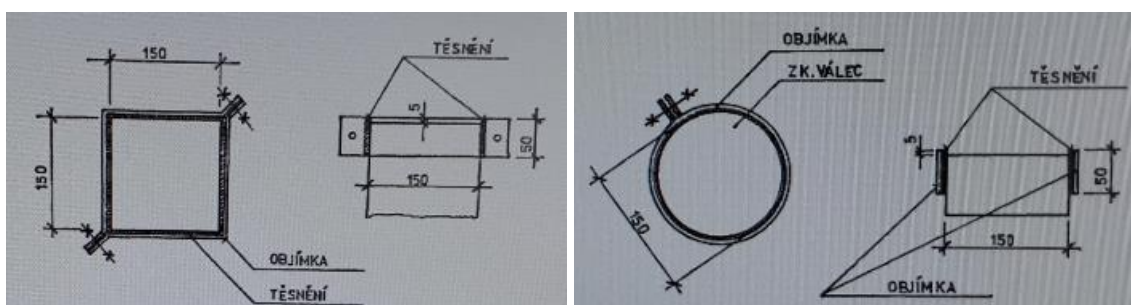
Po každých 25 cyklech se vzorky s miskou vyjmou a proudem vody ze stříčky se splaví uvolněné částice ze zkušební plochy do misky. Odpady se následně vysuší při teplotě $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ a hmotnost odpadu se zváží s přesností na 0,1 g. [19]

Metoda B- Metoda ruční manipulace

Zkušební tělesa se opatří objímkou, tak aby spojení tělesa s objímkou bylo vodotěsné a nad zkušebním povrchem vznikl prostor minimálně 5 mm vysoký. Na zkoušený povrch se nalije voda do výšky 2 mm. Při rozmrazování chemickými látkami se tělesa v prvním cyklu zmrazují po dobu 16 hodin při teplotě $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté se na led vytvořený na deskách nasype nebo nalije potřebné množství rozmrazovací látky, při použití chloridu sodného (NaCl) se jedná o množství 270 g/m^2 . Rozmrazování trvá 1 hodinu. Potom se tělesa vyjmou z mrazícího prostoru a omývají se vodou o teplotě $+20$

°C po dobu 0,5 hodiny. Druhý a každý další cyklus musí mít dobu zmrazování dlouhou nejméně 5 hodin, rozmrazování 1 hodinu a omývání 0,5 hodiny. [19]

Během zkoušky se sleduje povrch těles a jeho stupeň narušení, který se hodnotí jako: Nenarušený, malé povrchové odlupování, vylupování zrn drobného kameniva, poškozený povrch. Odolnost povrchu betonu se hodnotí podle výsledků provedených zkoušek na základě požadovaného stavu povrchu těles při daném počtu zmrazovacích cyklů. Stav povrchu vzorku se označí slovně podle dosaženého stupně narušení a současně se uvede počet cyklů, při němž byl dosažen popsáný stav. [19]



Obr. 6- Schéma připevnění objímky na vzorek [19]

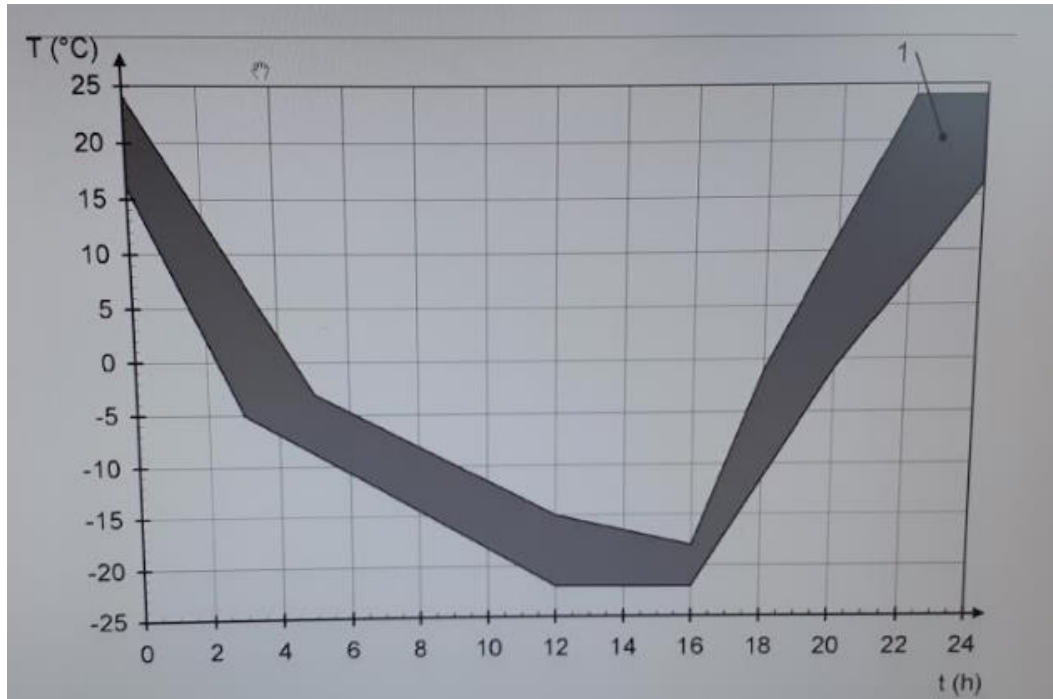
Metoda odlupování- zkouška na desce (referenční metoda)

Zkouška se také nazývá Slab-test. Zkušební tělesa deskového tvaru, která se vyříznou z betonových zkušebních těles, jsou podrobena působení zmrazování a rozmrazování ve 3 mm 3 % roztoku NaCl. Jako zkušební tělesa se využívají krychle o hraně 150 mm. Po 21 dnech se z každé krychle vyřízne kolmo k hornímu povrchu deska o tloušťce 50 mm, tak, že zkoušený povrch je umístěn uprostřed krychle. Při stáří betonu 25 dní se na všechny povrchy zkušebního tělesa, kromě povrchu zkoušeného, přilepí gumové těsnění. Okraj gumového těsnění přesahuje přes zkoumaný povrch o 20 mm. Při stáří 28 dnů se na povrch zkušebního tělesa nalije 3 mm vysoká vrstva o teplotě 20 °C. Nasycování pokračuje po dobu 72 hodin a během této doby musí být udržována vrstva vody asi 3 mm. [20]

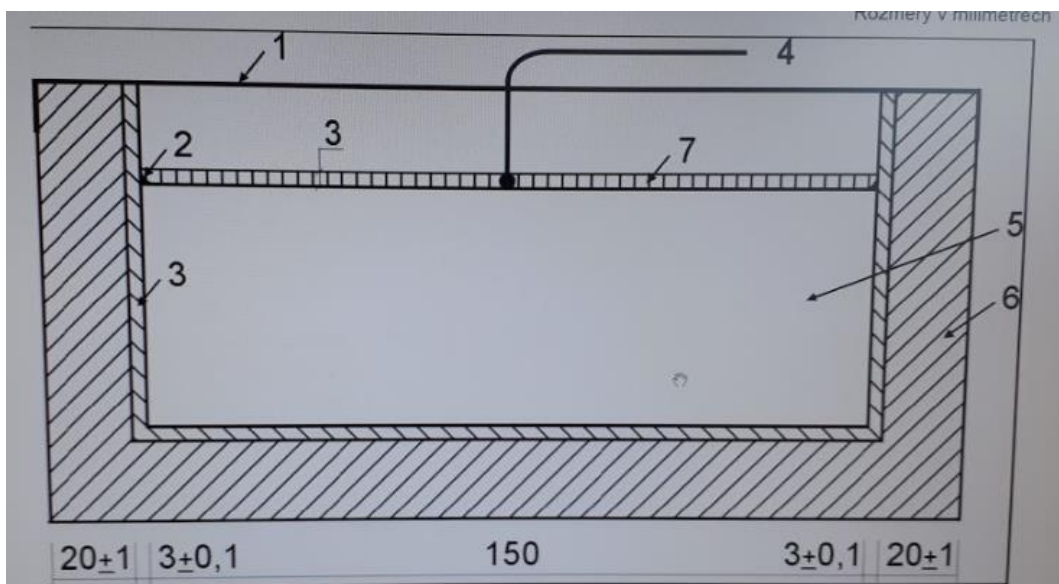
Před samotnou zkouškou se všechny povrchy tělesa, kromě povrchu zkoušeného zaizolují 20 mm tlustou vrstvou polystyrenu. Zkouška začíná při stáří betonu 31 dní. Na povrch, který je chráněn fólií proti odpařování, se nalije zmrazovací roztok. Tělesa se umístí do zmrazovací komory a povrch zkušebního tělesa se opatří teploměrem. [20]

Teplota v mrazícím boxu se musí udržovat v mezích následujícího grafu (obr. 8). Jeden cyklus tedy trvá 1 den a zkouška se ukončí po 56 cyklech. Po 7, 14, 28, 42 a 56

cyklech se ze zkoušeného povrchu tělesa shromáždí do nádoby odloupený materiál pomocí stříčky a okartáčuje se. Na zkoušený povrch se nalije čerstvý zmrazovací roztok a zkušební těleso se opět umístí do mrazícího boxu. Odloupený materiál se vysuší při teplotě 110 °C a zváží s přesností na 0,1 g. [20]



Obr. 7- Mezní křivky pro průběh teploty v mrazícím boxu [20]



Obr. 8- Schematický řez zkoušeným vzorkem [20]

Legenda: 1. Polyethylenová folie

2. Proužek lepidla

3. Gumové těsnění

4. Zřízení pro měření teploty, které je v kontaktu s zkoušeným povrchem

5. Zkušební těleso

6. Tepelná izolace

7. Zmrazovací roztok

3.6.2. Slovensko

Na Slovensku se odolnost betonu proti CHRL zkouší dle normy STN 73 1326 [10]. Tato metoda se zde nazývá také metodou A a je velmi podobná České verzi zkoušky. Nicméně je zde jeden rozdíl, který má významný vliv na výsledky zkoušky. Po vytvrdnutí těles, před osazením vzorků do mrazícího boxu se musí na nezkoušené strany tělesa nanést ochranná vrstva, která zabrání odpadávání částí povrchu bočních stěn. [10]

Konkrétně po vyndání z vodní lázně se nechají vzorky jeden den oschnout a následně se provedou nátěry ochranné vrstvy. Ochranná vrstva se vytvoří na bočních stěnách okolo zkoušeného povrchu do výšky zhruba 50 mm od zkoušeného povrchu. Ochranná vrstva se může udělat z jakéhokoliv vhodného materiálu, nicméně za referenční materiál se považuje neředěné vodní sklo. Vodní sklo se nanáší na osušený povrch zbavený prachových částic. Norma vyžaduje nanést minimálně 3 vrstvy, a to vždy po zaschnutí předchozí vrstvy, nejmenší časový interval mezi nátěry je 8 hodin. Po nanesení všech 3 nátěrů je nutné ochrannou vrstvu nechat vyschnout po dobu minimálně 24 hodin a úprava bočních stěn se ukončí do 33 dnů od vyrobení zkušebních těles. Ochranná vrstva má zabránit nepříznivým vlivům na zkoušku jako jsou hranový efekt a vztlínání vody po stěnách zkušebních těles. [10]

3.6.3. USA

V Severní Americe se pro stanovení odolnosti betonu proti CHRL používá metoda ASTM C672. Zkouška je principiálně podobná Metodě odlupování (zkouška na desce). Nicméně Americká metoda má významné odlišnosti, které mohou zkreslovat výsledky zkoušek. [21]

Hladina solného roztoku není zakryta folií, takže může docházet k odpařování solného roztoku, laboratorní pracovník musí pravidelně doplňovat hladinu roztoku,

kteřá musí mít výšku 6 mm. Pro přípravu solného roztoku se nepoužívá 3 % roztok NaCl, ale 4 % roztok CaCl₂. Není zde specifikována úprava povrchu zkoušeného vzorku, která má zásadní vliv na výsledky. Teplotní průběh během cyklu je stejný jako při metodě desek, ale není zde požadavek na měření teploty. Průběh zkoušky je dlouhý 50 cyklů a výsledky se zaznamenávají každých 5 cyklů do 25 cyklů a následně po 50 cyklech. Následně se zkoušený povrch zkouší pouze vizuálně a je zaříděn do jedné ze šesti kategorií. Kvůli velké variabilitě výsledků se v Americe intenzivně pracuje na vývoji nové metody ASTM WK 9367. [21]

Při zkoušení metody ASTM WK 9367 musí být zhotoveny minimálně dva vzorky, s minimálním povrchem 0,045 m² a výškou minimálně 75 mm. Spodek formy musí být vystlán geotextilií o tloušťce 7 mm a hmotnosti 900 g/m², aby se zabránilo krvácení betonu. Povrch těles se upraví pilovitým pohybem dřevěného pravítka. Vzorky jsou skladovány ve vodě po dobu 14 dnů a následně jsou po dobu dalších 14 dnů vysušeny na vzduchu s relativní vlhkostí 5 % a teplotou 23 °C. Následně je na povrch vzorků nalit 3 % NaCl po dobu 7 dnů a až poté se začíná se samotným zkoušením. Provádí se 50 zmrazovacích cyklů, každý cyklus trvá 24 hodin a teplota se pohybuje od 5 °C do -18 °C. [21]

3.6.4. Německo

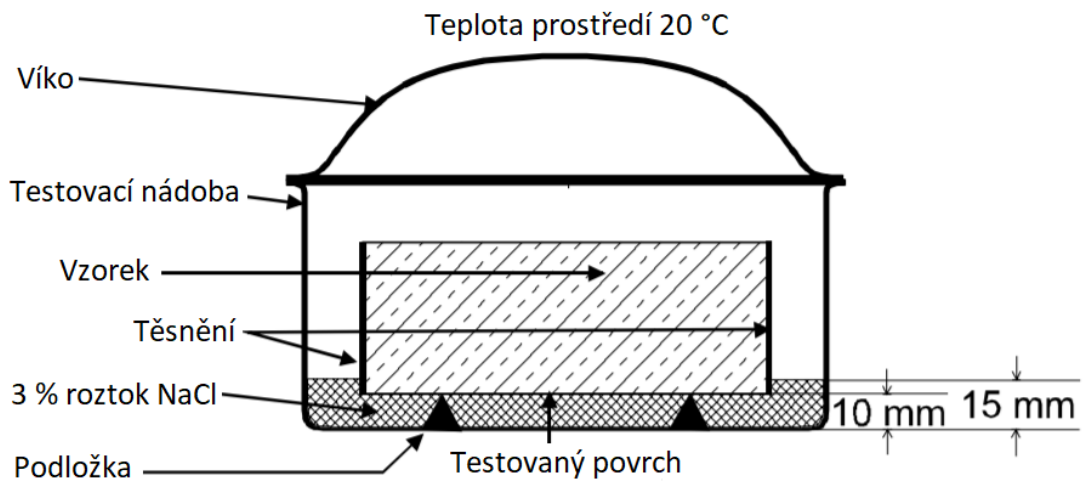
V Německu se pro stanovení odolnosti betonu proti CHRL využívá metoda RILEM TC 117-FDC/CDF. Tato metoda připomíná Českou metodu A, nicméně je mnohem sofistikovanější a má přesněji definovaný postup zkoušky. Zkouška probíhá v třech fázích, skladování vzorků v suchém prostředí, kapilární vzlínání a zmrazovací cykly. [22]

Skladování vzorků v suchém prostředí začíná ve stáří 7 dnů a končí ve stáří vzorků 28 dnů, po dobu prvních 7 dnů jsou vzorky uloženy ve vodním prostředí. Teplota prostředí musí být okolo 20 °C a relativní vlhkost 65 %. Úbytek vlhkosti je měřen pomocí úbytku hmotnosti. Během této fáze musí dojít k zaizolování nezkoušených stran vzorku, pomocí gumového těsnění nebo pomocí epoxidové pryskyřice. [22]

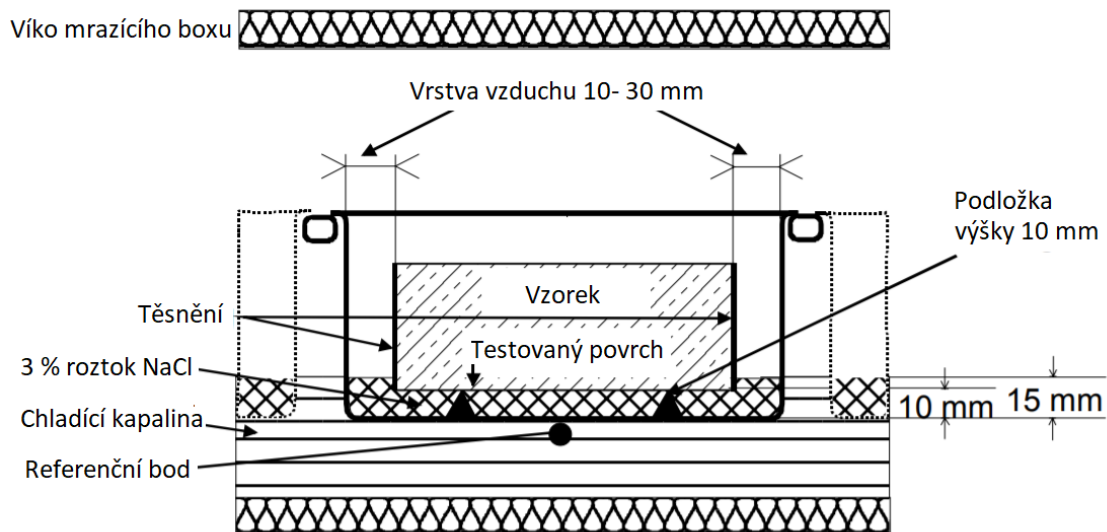
Následuje fáze kapilárního vzlínání, zaizolované vzorky jsou umístěny do testovací nádoby. Jsou ponořeny v 15 mm solného roztoku 3 % NaCl po dobu 7 dnů, aby docházelo ke kapilárnímu vzlínání, po celou dobu je v nádobě udržována teplota 20 °C. Po tuto dobu musí být kontejner zakryt zakřiveným víkem, aby nedocházelo

ke skapávání zkondenzované vody na povrch vzorku. Během této fáze by měla být kontrolována výška hladiny roztoku a zároveň měřena váha vzorku. [22]

Následně začíná fáze zmrazovacích cyklů. Teplota začíná na 20 °C a postupně se sníží během 4 hodin na -20 °C, s konstantním ochlazováním 10 K/h. Následují 3 hodiny výdrže při teplotě -20 °C a poté začíná konstantní oteplování 10 K/h až na 20 °C, kde se teplota udržuje po dobu 1 hodiny. Při stanovení odpadových částic se vzorek ponoří do ultrazvukové lázně, ultrazvuk působí na vzorek po dobu 3 minut, následně je voda přefiltrována a papírový filtr s přefiltrovaným odpadem je vysušen při 105 °C po dobu 24 hodin a zvážen. Stanovení odpadů probíhá každých 14 cyklů do hodnoty 28 cyklů, je však doporučeno provádět stanovení odpadů také při 4 nebo 6 cyklech. [22]



Obr. 9- Schéma umístění vzorku při fázi kapilární vztlínání [22]



Obr. 10- Schéma umístění vzorku při fázi zmrazovacích cyklů [22]

3.7. Problémy spojené se stanovením odolnosti betonu proti CHRL

Autoři v odborné literatuře se shodují na tom, že metodika zkoušení odolnosti betonu proti CHRL není jasně dořešena a různorodost výsledků je extrémní. Zároveň se většina autorů shoduje na tom, že by postupy zkušebních metod měly být dostatečně specifikované a co možná nejlehčí, aby se co nejvíce omezily vlivy okrajových podmínek. V České republice se běžně využívají pouze dvě metody: metoda A a metoda C. Další metody zkoušení uvedené v kapitole 2.6 jsou uvedeny spíše pro bližší představu problematiky. Každá metoda skrývá své úskalí, ale pro přehlednost by se problémy spojené se zkoušením odolnosti betonu daly rozdělit do následujících skupin: Problémy při výrobě a ošetřování zkušebních těles, problémy spojené se samotným zkoušením, problémy s vyhodnocováním výsledků.

3.7.1. Problémy při výrobě a ošetřování

Jelikož se zkouší povrch vzorků, velkou roli hraje již hutnění, zvláště délka a kvalita. Pokud dojde k převibrování vzorků, může dojít k následné segregaci kameniva, což výrazně ovlivní kvalitu zkoušeného povrchu, kamenivo sedá ke dnu a nahore zůstává cementový tmel. Dalším velkým problémem je kvalita uhlazení. Norma nám říká, že by se povrch měl zarovnat pilovitým pohybem ocelového pravítka, ale tuto formulaci může každý zhotovitel vzorku pochopit jinak, a přitom právě kvalita uhlazení

má veliký vliv na celkové výsledky. Dalším důležitým faktorem je materiál a kvalita jednotlivých forem. Použití dané formy není nikde specifikováno, takže může být zvolena jakákoliv forma (ocel, polypropylen, polyuretan). Zároveň byl prokázán velký vliv uložení vzorků na odolnosti proti CHRL (vodní, vlhké, laboratorní). Oba tyto faktory byly experimentálně ozkoušeny v článku: Vliv zkušebních forem a ošetřování těles na výsledky zkoušek fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu [23]. Dalším problémem je například zkoušení jádrových vývrtů, pokud je na konstrukci omítka. V takovém případě je nutné vývrt seříznout, což vede ke zkoušení řezu betonu a ne povrchu. [23] [24]

3.7.2. Problémy spojené se samotným zkoušením

Norma neuvádí, jak správně připravit solný roztok, jestli použít destilovanou vodu, nebo pitnou vodu a zda použít kuchyňskou, nebo technickou sůl. Různé kombinace těchto surovin mohou následně vést k různým výsledkům. Dalším problémem je zaplnění prostoru mrazícího boxu, protože různé zaplnění může mít různý vliv na charakter zmrazovacích cyklů, zcela zaplněný box bude mít jinou tepelnou setrvačnost než prázdný box obsahující jen pár vzorků. [24] [25]

Zaměříme se nyní na metodu A. Samotné nalití solného roztoku do misky může vést k různým výsledkům. Může se stát, že při prostém nalití solného roztoku do misky mohou vzniknout vzduchové bubliny mezi spodní stranou vzorku a dnem misky. Pokud první zkušební odstraní vzduch zpod vzorku a jiný ho tam nechá, každý poté zkouší v podstatě jiný povrch. Pokud není miska výrazně větší než zkušební krychle, kontrola výšky hladiny je velmi obtížná. Velikým problémem je tvar zkušebních těles (krychle), při zkoušení není ponořen pouze zkoušený povrch do roztoku, ale i sousedící hrany, až do výšky cca 5 mm. Tento fakt vede k takzvanému hranovému efektu, kdy se může odloupnout více materiálu při laboratorní zkoušce než při reálném zatěžování. Dalším problémem je vzlínání chemického roztoku po bocích zkušebního tělesa. Pracovníci laboratoří se s tímto jevem vypořádávají každý po svém. Tedy někteří nanášejí na nezkoušenou plochu nátěr (například vodní sklo), jiní navlékají na krychle gumové pásky a někteří tento problém neřeší vůbec. Zajímavé je, že při všech ostatních zahraničních metodách je v kontaktu pouze zkoušená plocha a zbytek stran je zaizolován, aby nepřišly se solným roztokem do kontaktu. Tedy odpadá problém vzlínání a hranového efektu. [24] [25]

Pro metodu C, i když je formulace postupu v normě přesnější, je největší úskalí kartáčování povrchu po 25 cyklech. Každý pracovník může na kartáček přitlačit jinou silou, a to může vést znovu k velmi různorodým výsledkům. [25]

3.7.3. Problémy s vyhodnocením výsledků

Výčet všech těchto problémů vede k velmi různorodým výsledkům. Pro stavební zkušebnictví obecně a pro relevantnost výsledků jsou velmi důležité termíny: Opakovatelnost a reprodukovatelnost. „*Opakovatelnost vyjadřuje, že rozdíl mezi dvěma výsledky zkoušek z téhož vzorku, provedených stejným pracovníkem na tomtéž zařízení, v nejkratším možném časovém intervalu, nebude překračovat hodnotu opakovatelnosti r průměru ne více než jednou ve 20 případech při běžném a správném provádění metody*“ [25]. „*Reprodukovatelnost vyjadřuje, že výsledky zkoušek na tomtéž vzorku, získané v nejkratším možném časovém intervalu dvěma pracovníky, kteří použili každý své zařízení, se nebudou lišit hodnotou reprodukovatelnosti R v průměru ne více než jednou ve 20 případech při běžném a správném provádění metody*“ [26]. Hodnoty reprodukovatelnosti se při stanovování odolnosti betonu proti CHRL mohou blížit až k 300 %. [26]

Možným řešením části výše popsaných problémů by mohlo být zavedení metody odlupování do praxe (viz kapitola 2.6.1). Postup samotné zkoušky je velmi přesně popsán a při vytváření této metody byla snaha eliminovat již popsané problémy. Bohužel samotná zkouška je velmi náročná, jak na vybavení, tak na přesnost, čas. Citlivost této zkoušky také nepřinesla požadované zpřesnění a není dlouhodobě ozkoušena jako používání metody A a C. [25]

3.8. Popis zkoušek provedených na vytvořených recepturách

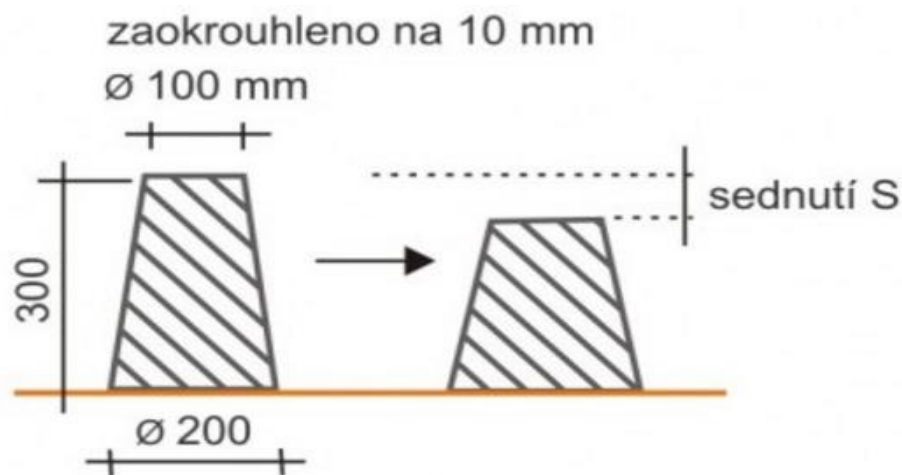
3.8.1. Zkoušky na čerstvém betonu

Zkouška sednutí kužele

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12350-2. Princip zkoušky: čerstvý beton se zhutní ve formě tvaru komolého kužele. Po zvednutí komolého kužele udává konzistenci betonu výška, o kterou poklesl beton. [27]

Forma i podkladní deska se navlhčí a forma se poté položí na podkladní desku, Během plnění musí být forma přichycena k podkladní desce (nejčastěji přišlápnutím). Forma se plní ve třech vrstvách, každá přibližně do jedné třetiny výšky. Každá vrstva se zhutní 25 vpichy kovovou tyčí. Pokud po zhutnění poslední vrstvy vznikl nedostatek betonu, je nutné doplnit beton, aby vznikl nad horním okrajem formy přebytek. Tento přebytek se poté odstraní příčným pohybem propichovací tyčí. Forma se opatrně odstraní svislým pohybem vzhůru. Neprodleně po zvednutí formy se měří sednutí, a to zjištěním rozdílu mezi výškou formy a nejvyšším bodem betonu. [27]

Výsledek zkoušky je platný pouze tehdy, jestliže dojde ke skutečnému sednutí (beton zůstane neporušen). Pokud se beton zborstí, musí se zkouška opakovat s novým vzorkem. [27]



Obr. 11- Zkouška sednutí kužele [28]

Obsah vzduchu

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12350-7. Princip zkoušky: Tlakoměrná metoda, Známy objem vzduchu o známém tlaku je propojen v uzavřené nádobě s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu. Kruhová stupnice tlakoměru je nastavena v procentním podílu vzduchu ve vzorku betonu. [29]

Nádoba se naplní betonem buď v jedné vrstvě, nebo ve více vrstvách, podle konzistence betonu. Obvykle pro beton s konzistencí sednutí alespoň S3 postačí jedna vrstva. Proveďte se zhutnění na vibračním stole, vibruje se po dobu nezbytně nutnou pro úplně zhutnění betonu. [29]

Zhutněný beton v nádobě se zarovná propichovací tyčí a povrch se uhladí ocelovým hladítkem. Příruba nádoby a víka se důkladně očistí. Víko se neprodyšně připevní k nádobě svorkami. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavře a otevrou se ventily A a B. Jedním ventilem (A či B) vstříkujeme vodu tak dlouho, dokud nevytéká z druhého ventilu. Následně do vzduchové komory napumpujeme vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Ventily A a B se uzavrou a otevře se hlavní ventil vzduchu. Poklepeme na boční stěny nádoby a tlakoměr a odečte se hodnota tlaku na tlakoměru, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu A_1 .

Obsah vzduchu v betonu v nádobě, A_c , se vypočítá ze vztahu (1):

$$A_c = A_1 - G(1)$$

Kde A_1 je obsah vzduchu ve zkoušeném vzorku betonu

G je opravný součinitel pro kamenivo, $G=0$, pokud není uveden

Obsah vzduchu se vyjádří v procentech, zaokrouhlených na 0,1 %. [29]



Obr. 12- Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu



Obr. 13- Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu-detail

3.8.2. Zkoušky na ztvrdlém betonu

Pevnost v tlaku

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12390-3. Princip zkoušky: Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu. Z maximálního zatížení při porušení tělesa se vypočte pevnost betonu v tlaku. [30]

Před každou zkouškou dojde k změření všech stran tělesa a zvažení. Těleso se umístí na střed spodní tlačené desky. Zkušebními tělesy mohou být krychle, válce nebo vývrty. Krychle se osadí kolmo na směr hutnění vzorku. Pevnost v tlaku se určí ze vztahu (2). [30]

V našem případě byla pevnost v tlaku zkoušena na krychlích o hraně 150 mm a válcích o výšce 300 mm a průměru podstavy 150 mm.

Pevnost v tlaku je dána vztahem:

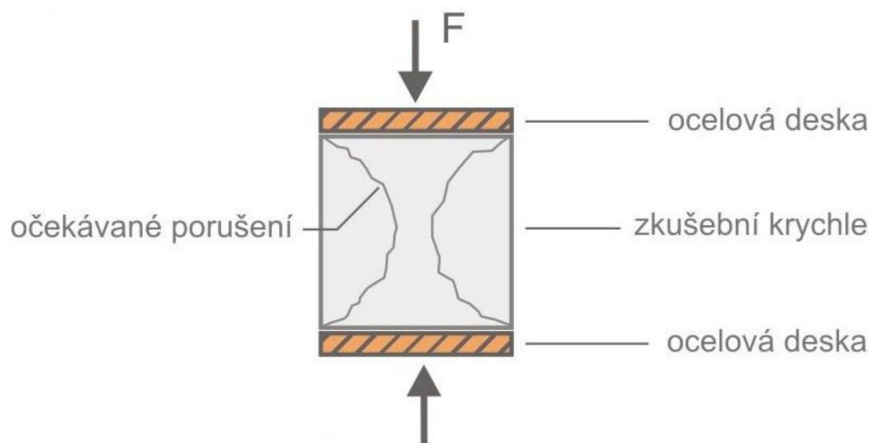
$$f_c = \frac{F}{A_c} (2)$$

kde f_c je pevnost v tlaku, v MPa (N/mm^2)

F je maximální zatížení při porušení, v N

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, v mm^2

pevnost v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa. [30]



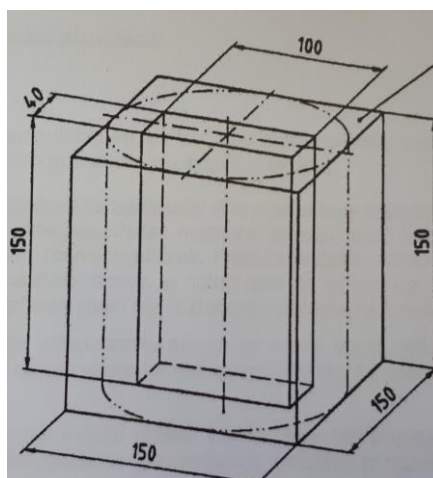
Obr. 14- Zkouška pevnosti v tlaku [31]

Stanovení charakteristik vzduchových pórů

Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu se řídí normou ČSN EN 480-11. Princip zkoušky: Výroba zkušebních vzorků probíhá tak, že se zhotoví řez zkušebním tělesem z provzdušněného betonu, řez je kolmý k ploše hutnění. Vzorky se

následně brousí a leští, tak aby byl vytvořen rovný a hladký povrch vhodný ke zkoumání mikroskopem. Struktura vzduchových pórů se zjišťuje podrobným snímáním podél řady měřících přímek, vedených rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Následně se zaznamená počet vzduchových pórů protnutých měřícími přímkami, společně s délkami tětív. [32]

Vhodná zkušební tělesa jsou krychle o hraně 150 mm nebo válec průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm. Zkušební vzorek se vyřízne ze zkušebních těles, výška zkušební vzorku je přibližně 150 mm, šířka 100 mm a tloušťka 20 mm (viz. Obr. 13). Pro každou zkoušku jsou potřeba dva zkušební vzorky, pro každý zkušební vzorek je požadována minimální délka měřících přímek 1200 mm, tedy pro oba vzorky 2400 mm. Měřící přímky se rozloží následovně: V horní oblasti se umístí 4 měřící přímky, nejvyšší přímka by měla být nejméně 6 mm od horního okraje, následující přímky jsou umístěny přibližně 6 mm od sebe. Další 4 přímky se umístí ke spodnímu povrchu se stejnými rozestupy jako vrchní přímky. Další 4 měřící přímky se umístí ve středové oblasti ve vzdálenosti 6 mm od sebe. Následně se povrch pozoruje mikroskopem. [32]



Obr. 15- Schéma vyříznutí zkušební vzorky ze zkušebního tělesa [32]

Po matematickém vyhodnocení zkoušky získáme důležité parametry, Součinitel rozložení vzduchových pórů (L) a obsah mikroskopického vzduchu (A_{300}), to znamená obsah kulovitých uzavřených pórů do průměru 300 μm . Oba tyto parametry mají zásadní vliv při určování trvanlivosti betonu zejména v prostředí s CHRL (XF2, XF4).

Odolnosti betonu proti působení CHRL

Odolnost betonu proti působení CHRL byla stanovena metodou A a metodou C. Popis obou metod lze nalézt v kapitole 3.6.1

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje provedené experimenty, výrobu zkušebních těles a vyhodnocení výsledků provedených zkoušek. Tato část je rozdělena na zkoušení odolnosti betonu proti CHRL u provzdušněných betonů a na doplňkovou část, která se zaměřuje na zkoušení odolnosti betonu, který vzdoruje CHRL a zmrazovacím cyklům svojí hutností a nízkou pórovitostí.

4.1. Kódování receptur

Tato kapitola se zabývá pro větší přehlednost vysvětlením kódování receptur. Provzdušněné receptury mají kódy obsahující vždy 8 pozic (např. PZ34B-O50). Receptury s nízkou porozitou mají kódy obsahující vždy 7 pozic (např. PZ75D-25).

1. a 2. pozice značí betonové receptury, betonové receptury mají vždy označení PZ. 3. a 4. pozice značí množství cementu v 1 m³ vyděleno 10. 5. pozice označuje etapu, ve které byly dané receptury míchány: etapa 1=C; etapa 2=A; etapa 3=B; etapa 4=D. 6. pozice označuje superplastifikační přísadu: přísada O, nebo přísada S, u betonů s nízkou porozitou je 6. pozice vynechána. 7. a 8. pozice značí poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu (voda/cement) vynásoben 100.

Příklad kódování provzdušněných receptur:

Kód receptury: P Z 3 4 B - O 5 0

Pozice: 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

PZ= betonová receptura

34= 340 kg cementu v 1 m³

B= 2. etapa

O= superplastifikační přísada O

50= poměr hmotnost vody ku hmotnosti cementu je 0,50

Příklad kódování receptur s nízkou porozitou:

Kód receptury: P Z 7 5 D - 2 5

Pozice: 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

PZ= betonová receptura

75= 750 kg cementu v 1 m³

D= 4. etapa

25= poměr hmotnost vody ku hmotnosti cementu je 0,25

4.2. Odolnost provzdušněných betonů proti CHRL

Cílem experimentu bylo vytvořit receptury, které se od sebe budou odlišovat různým množstvím cementu, různým vodním součinitelem a různým provzdušněním betonu. Na všech recepturách provzdušněných betonů byla na čerstvém betonu provedena zkouška konzistence pomocí zkoušky sednutí Abramsova kužele a byl změřen obsah vzduchu. Na ztvrdlém betonu byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, odolnost betonu proti CHRL pomocí metod A a C a bylo provedeno stanovení charakteristik vzduchových pórů.

4.2.1. Výroba

Míchání bylo rozděleno do tří etap. V první etapě byla zkoušena jedna receptura, která měla nastínit porovnání výsledků z běžně používaných metod pro stanovení odolnosti betonu v České Republice, tedy metody A a metody C. V druhé etapě byly namíchány receptury, které se od sebe odlišují různým vodním součinitelem a různým množstvím cementu, v této etapě byla snaha dosáhnout provzdušnění na spodní hranici povolených hodnot, tedy 4 %. Ve třetí etapě byly namíchány receptury, které mají stejný vodní součinitel, ale liší se množstvím cementu a obsahují různé superplastifikační přísady, zároveň byla snaha namíchat takové receptury, aby jejich provzdušnění odpovídalo 5 %. V této etapě byly zkoušeny různé druhy povrchů betonu. Další důležitou podmínkou bylo, aby konzistence všech receptur byla co nejvíce podobná. Tabulka 6. ukazuje rozdělení receptur do etap a znázorňuje množství použitého cementu, vodní součinitel a typ použitého superplastifikátoru. Značka x značí vytvořenou recepturu.

Tab. 6-Schéma vytvořených receptur

Etapa	Vodní součinitel	Množství cementu [kg/m ³]					
		340		380		390	
		Typ superplastifikátoru					
		S	O	S	O	S	O
1	0,52				x		
2	0,45	x				x	
	0,50	x				x	
3	0,50	x	x			x	x

Výroba byla provedena na betonárně TBG Metrostav s.r.o. v Radlicích. Jedná se o horizontální betonárnu s mísícím jádrem PEMAT o objemu 2 m³, řízenou vyspělým elektronickým řídicím systémem. Z mísacího jádra byl beton vysypán do autodomíchávače, ze kterého se následně odebralo potřebné množství pro výrobu vzorků. Po zatvrdnutí byly vzorky převezeny do laboratoře SQZ s.r.o. na Zbraslavi, kde byly podrobeny výše zmíněným zkouškám. Velikost záměsi byla 1 m³ a míchací časy byly nastaveny tak, aby se míchání co nejvíce podobalo reálným podmínkám při běžné výrobě betonu.



Obr. 16- Betonárna TBG Metrostav v Radlicích

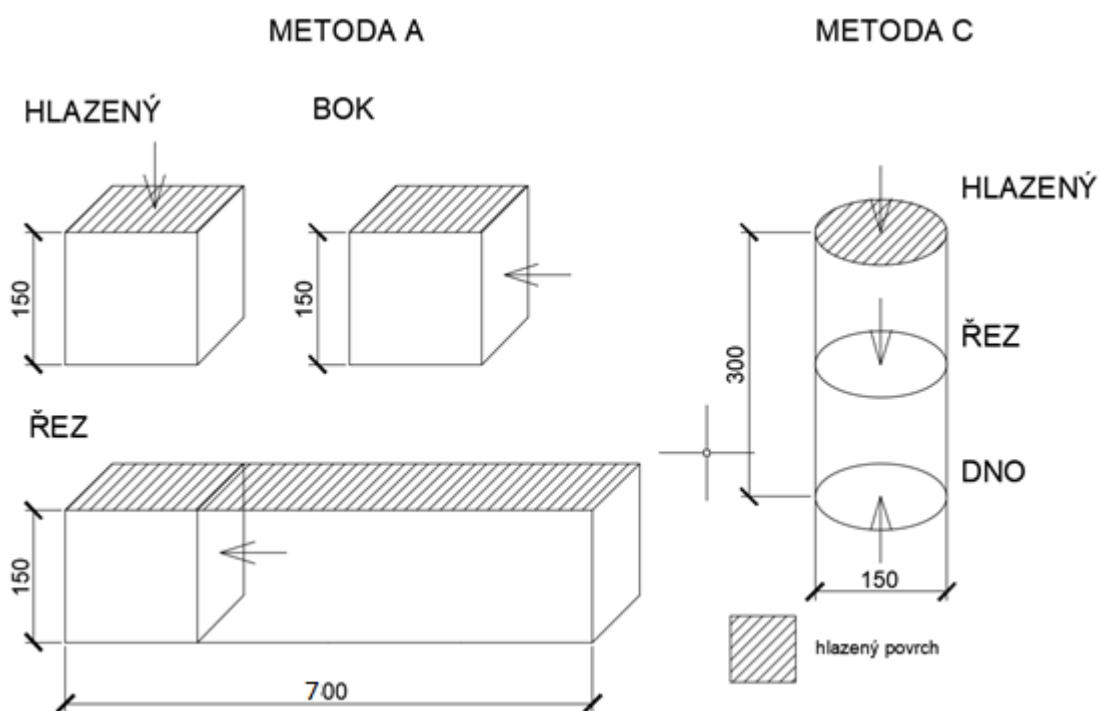


Obr. 17- Tvrdnutí vyrobených vzorků



Obr. 18- Odebírání betonu pro výrobu vzorků

Po odbednění byly vzorky uloženy ve vodě v laboratoři SQZ s.r.o. na Zbraslavi. Povrch vzorků byl upraven pilovitým pohybem ocelového hladítka. Ve třetí etapě byly zároveň ozkoušeny různé typy povrchů, pro metodu A se jednalo o povrchy nazvané: hlazený, řez a bok, pro metodu C se jednalo o povrchy nazvané: hlazený, řez a dno. Následující obrázek (obr. 19) schematicky ukazuje vytvořené vzorky.

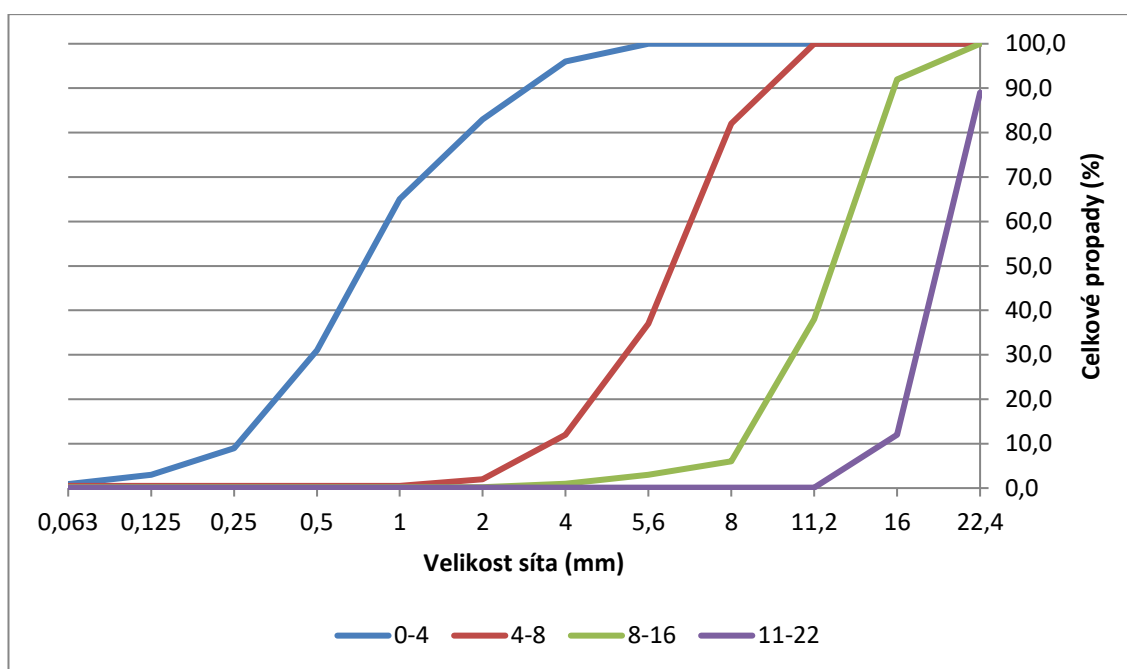


Obr. 19- Schéma zkoušených povrchů ve 3. Etapě

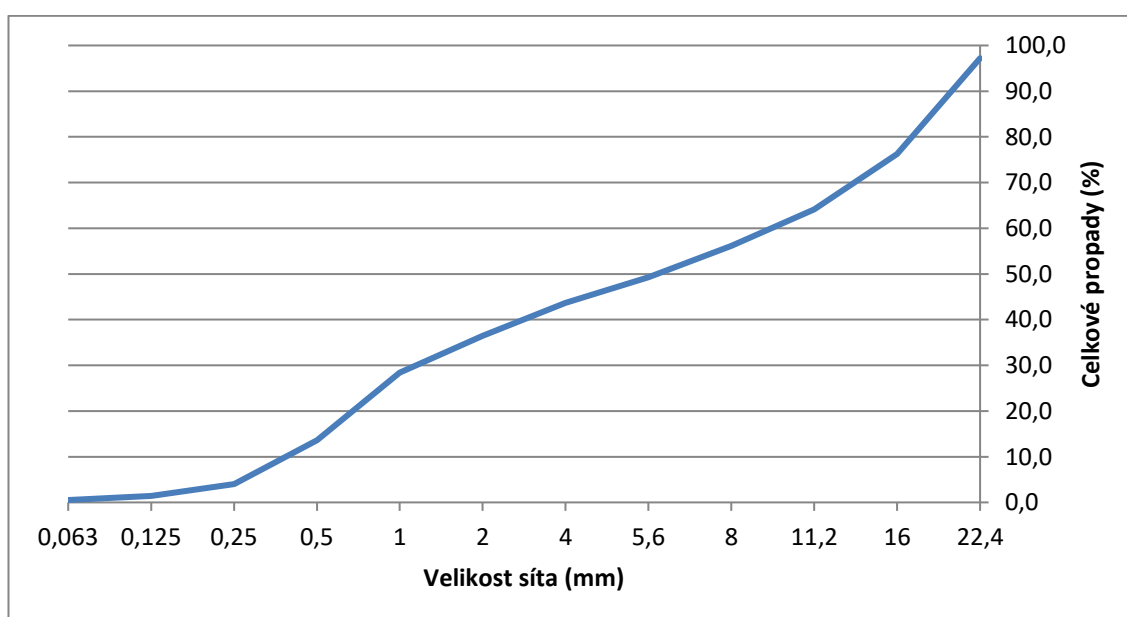
4.2.2. Vstupní suroviny

Kamenivo

Jako kamenivo bylo použito těžené kamenivo frakcí 0/4, 4/8, 8/16, 11/22. Jedná se o těžené kamenivo ze Zálezlic. U všech receptur zůstává poměr kameniva vždy stejný, tedy křivka zrnitosti je pro všechny receptury stejná. Obr. 20 znázorňuje křivky zrnitosti jednotlivých frakcí, obr. 21. znázorňuje křivku zrnitosti vytvořených receptur.



Obr. 20- Křivka zrnitosti jednotlivých frakcí



Obr. 21- Křivka zrnitosti výsledných receptur

Cement

Pro výrobu byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Radotín. Cement byl uložen v zásobním cementovém silu. Pro výrobu byly použity dávky cementu o hmotnosti 340, 380 a 390 kg/m³.

Přísady

Pro výrobu byly použity dva různé typy superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátu. První typ je značen jako S a druhý jako O, obě přísady se od sebe lišily různým systémem odpěnění. Jako provzdušňovací přísada byla použita přísada Sika FRO-V5 od společnosti Sika CZ, s.r.o.

Voda

Pro výrobu byla použita pitná voda z vodovodního řadu.

4.2.3. Naměřené hodnoty: Čerstvý beton

Zkoušky na čerstvém betonu byly prováděny bezprostředně po namíchání směsí na betonárně TBG Metrostav s.r.o. v Radlicích.

4.2.3.1. Konzistence

Konzistence čerstvého betonu byla měřena pomocí zkoušky sednutí Abramsova kužele. Zároveň byl během míchání sledován odporový konzistoměr na míchacím jádře. Každá receptura má různé množství cementu a různý vodní součinitel, proto vzhledem ke snaze namíchat všechny receptury se stejnou konzistencí, musel být tento fakt vyrovnán různým množstvím superplastifikačních přísad. Pro výpočet vodního součinitele byl uvažován pouze poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu a nebyla uvažována nasákavost kameniva. Reálný vodní součinitel je určen zpětně se započtením reálného množství vody a vlhkosti kameniva. Následující tabulka (Tab. 7) ukazuje hodnoty sednutí kužele a odporového konzistoměru. Obrázky jednotlivých sednutí receptur jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 7-Porovnání konzistence receptur pomocí sednutí kužele a odporového konzistoměru

Etapa	1.	2.			
Receptura	PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50
Typ superplastifikační přísady	O	S	S	S	S
Vodní součinitel: předpokládaný	0,52	0,45	0,5	0,45	0,5
Vodní součinitel: reálný	0,52	0,44	0,49	0,45	0,50
Množství vody v 1 m ³ [kg]	198	148	168	174	195
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	380	340	340	390	390
Konzistoměr	34	22	3	16	4
Sednutí kužele [mm]	160	190	190	170	200
Etapa	3.				
Receptura	PZ34B-S50	PZ34B-O50	PZ39B-S50	PZ39B-O50	
Typ superplastifikační přísady	S	O	S	O	
Vodní součinitel: předpokládaný	0,5	0,5	0,5	0,5	
Vodní součinitel: reálný	0,49	0,49	0,49	0,50	
Množství vody v 1 m ³ [kg]	167	166	190	194	
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	340	340	390	390	
Konzistoměr	28	27	20	19	
Sednutí kužele [mm]	220	210	210	220	

Všechny receptury, kromě zkušební receptury z první etapy PZ38C-O52, se pohybují na horní hranici třídy S4. Receptury s vyšším vodním součinitelem nebo vyšším množstvím cementu byly méně viskózní, tedy jejich celková zpracovatelnost byla lepší. Například receptura PZ34A-S45 měla sice hodnotu sednutí 190 mm, ale její viskozita byla výrazně vyšší a tím pádem měla horší zpracovatelnost než receptura PZ39A-S45, která měla hodnotu sednutí 170 mm. Ve stejném trendu je i porovnání receptur PZ34B-S50 a PZ39B-S50. Zároveň bylo prokázáno, že přísada O má po zamíchání lepší zpracovatelnost než přísada S a vytváří méně viskózní beton.

Viskozita betonu je dobře porovnatelná pomocí hodnot odporového konzistoměru. Čím vyšší je hodnota konzistoměru, tím je vyšší viskozita betonu. Při porovnání betonů se stejným vodním součinitelem klesá viskozita betonu při zvyšování dávky cementu. Pokud zvýšíme dávku cementu při stejném vodním součiniteli, zvýší se i absolutní množství vody v záměsi, zvýší se množství cementového tmele v 1 m³, a tedy můžeme použít menší množství plastifikačních přísad pro dosažení stejné konzistence.

Zkouška sednutí je rychlá, levná a lehce proveditelná zkouška jak na betonárně, tak na stavbě, může ale zkreslovat zpracovatelnost betonu, hlavně u receptur s vyšším množstvím plastifikačních přísad. Měření konzistence betonu pomocí odporového

konzistoměru je rychlá kontrola možná pouze při míchání směsi, ale hodnoty mohou být zkruseny například provzdušněním betonu, nebo různou velikostí záměsí.

Ideální kontrola zpracovatelnosti betonu se jeví jako kombinace obou popsaných postupů, jak měření viskozity betonu pomocí odporového konzistoměru, tak zkouška sednutí kužele.

4.2.3.2. Obsah vzduchu

Obsah vzduchu byl měřen pomocí tlakoměrné metody. V tabulce 8 jsou zaznamenány hodnoty provzdušnění jednotlivých receptur.

Tab. 8-Výsledky měření obsahu vzduchu na čerstvém betonu

Etapa	1.	2.			
Receptura	PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50
Typ superplastifikační přísady	O	S	S	S	S
Vodní součinitel: předpokládaný	0,5	0,45	0,5	0,45	0,5
Vodní součinitel: reálný	0,52	0,44	0,49	0,45	0,50
Množství vody v 1 m ³ [kg]	198	148	168	174	195
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	380	340	340	390	390
Obsah vzduchu [%]	5,0	3,7	3,9	4,1	4,1
Etapa	3.				
Receptura	PZ34B-S50	PZ34B-O50	PZ39B-S50	PZ39B-O50	
Typ superplastifikační přísady	S	O	S	O	
Vodní součinitel: předpokládaný	0,5	0,5	0,5	0,5	
Vodní součinitel: reálný	0,49	0,49	0,48	0,50	
Množství vody v 1 m ³ [kg]	167	166	189	194	
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	340	340	390	390	
Obsah vzduchu [%]	5,5	5,0	5,3	5,5	

Jak již bylo zmíněno, ve druhé etapě byla snaha docílit provzdušnění v čerstvém betonu okolo 4 % a v třetí etapě docílit provzdušnění okolo 5 %. Přestože aspektů, které ovlivňují množství vzduchu v čerstvém betonu, je velké množství, naměřené hodnoty v čerstvém betonu se velmi blíží zamýšleným hodnotám.

Zásadní faktory, které mají vliv na množství vzduchu v betonu, jsou typ, koncentrace a množství provzdušňovací přísady a typ cementu, případně jeho složení a původ. Další faktory, které ovlivňují hodnoty vzduchu, jsou množství jemných podílů v betonu, množství cementu a vody v záměsí, délka míchacího času a typ míchacího jádra. Míchání ukázalo, že provzdušnění viskóznějších receptur nebo receptur, které

obsahují menší množství vody a cementu, je náročnější a musí být použita větší dávka provzdušňovací přísady.

4.2.4. Naměřené hodnoty: Ztvrdlý beton

Zkoušky na ztvrdlém betonu probíhaly v laboratoři společnosti SQZ s.r.o. na Zbraslavi a v laboratoři společnosti Betotech s.r.o.

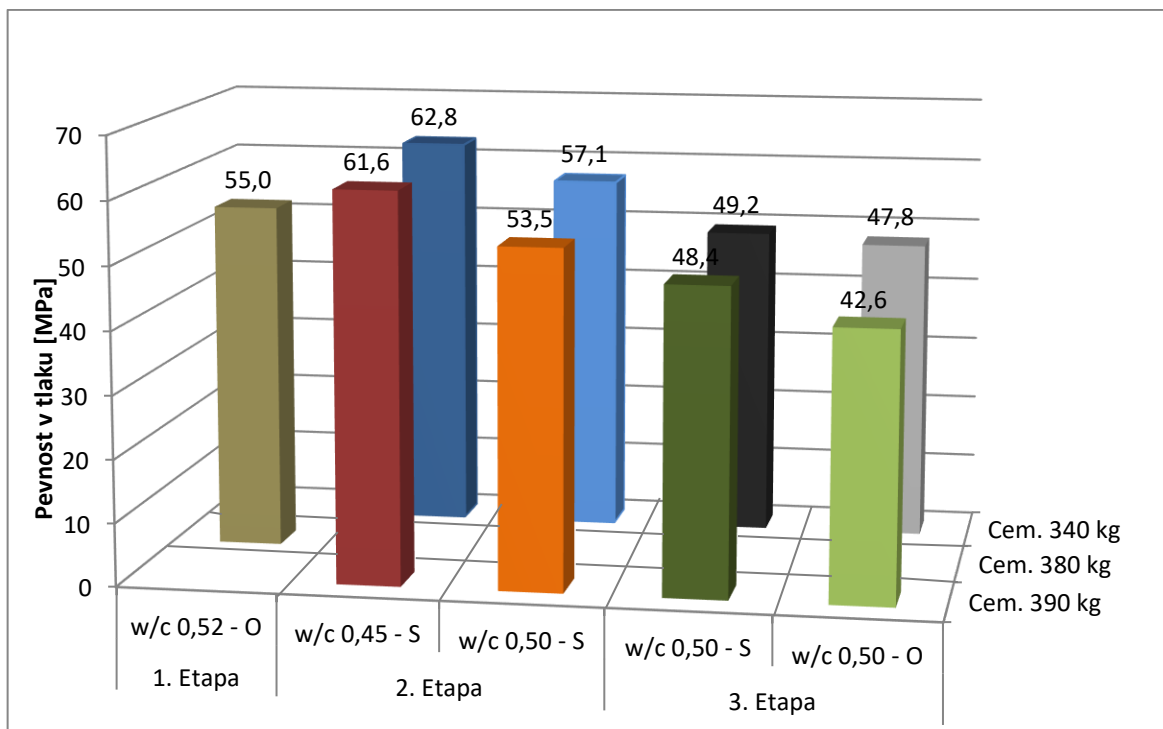
4.2.4.1. Pevnost v tlaku

Pevnost betonu v tlaku byla měřena na krychlich o hraně 150 mm ve stáří 30 dnů. Tabulka 9. a následující graf (Obr. 22) ukazují naměřené hodnoty krychlené pevnosti betonu v tlaku. Kompletní výsledky naměřených pevností betonu v tlaku jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 9-Výsledky krychelných pevností v tlaku pro jednotlivé receptury

Etapa	1.	2.			
Receptura	PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50
Typ superplastifikační přísady	O	S	S	S	S
Vodní součinitel	0,52	0,45	0,50	0,45	0,50
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	380	340	340	390	390
Stáří betonu	30	30	30	30	30
Obsah vzduchu [%]	5,0	3,7	3,9	4,1	4,1
Krychelná pevnosti v tlaku [Mpa]	55,0	62,8	57,1	61,6	53,5
Etapa	3.				
Receptura	PZ34B-S50	PZ34B-O50	PZ39B-S50	PZ39B-O50	
Typ superplastifikační přísady	S	O	S	O	
Vodní součinitel	0,50	0,50	0,50	0,50	
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	340	340	390	390	
Stáří betonu	30	30	30	30	
Obsah vzduchu [%]	5,5	5,0	5,3	5,5	
Krychelná pevnosti v tlaku [Mpa]	49,2	47,8	48,4	42,6	

Pevnost v tlaku prokazatelně souvisí s pórovitostí cementového tmele, čím více pórů obsahuje cementový tmel, tím má beton menší pevnost. Tento vztah objevil a popsal T. C. Powers již v roce 1958 [32]. Množství pórů v cementovém tmelu souvisí s velikostí provzdušnění, hodnotou vodního součinitele a s absolutním množstvím vody v záměsi.



Obr. 22- Graf znázorňujúci výsledné pevnosti betonu v tlaku v závislosti na vodní součiniteli, množství cementu a typu přísady

Při porovnání receptur, které mají stejný vodní součinitel a různé množství cementu, zjistíme, že pevnost v tlaku klesá se zvyšujícím se množstvím cementu. Například receptura PZ34B-S50, která obsahuje 340 kg/m^3 cementu a vodní součinitel 0,5 má krychelnou pevnost v tlaku 49,2 MPa, při provzdušnění 5,5 %, zatímco stejná receptura PZ39B-S50, která se liší pouze množstvím cementu, konkrétně obsahuje 390 kg/m^3 cementu, má při stejném vodním součiniteli krychelnou pevnost v tlaku 48,4 MPa, při provzdušnění 5,3 %. Znovu se tedy potvrdil fakt, že se zvyšujícím se množstvím cementu při stejném vodním součiniteli klesá pevnost betonu v tlaku. Důvodem je větší množství vody v záměsi, větší množství vody v záměsi vytvoří více pórovitý cementový kámen, tedy jeho pevnosti budou menší. Tento jev tedy platí u provzdušněných i neprovzdušněných receptur. Tento jev byl podrobně popsán u neprovzdušněných betonů v bakalářské práci Performance-based design složení betonové směsi [4].

To ale neznamená, že zvýšení dávky cementu v receptuře nemá smysl. Nejprve je nutné si uvědomit vztah mezi zpracovatelností a množstvím vody. Čím více vody použijeme, tím dosáhneme lepší zpracovatelnosti betonu. Například pokud použijeme recepturu s množstvím cementu 400 kg/m^3 , můžeme si dovolit použít vodní součinitel

0,45, tedy množství vody 180 l/m^3 a výsledná zpracovatelnost směsi bude přijatelná. Pokud použijeme recepturu s množstvím cementu 300 kg/m^3 a vodním součinitelem 0,45, tedy množství vody bude 135 l/m^3 . Výsledná směs bude mít velmi špatnou zpracovatelnost a konzistence se bude pohybovat na hranici možnosti převézt směs v autodomíchávači. Tedy aby bylo docíleno stejné konzistence, musíme výrazně zvýšit vodní součinitel.

Přidáním cementu, při zachování stejného vodního součinitele, zvýšíme množství cementového tmele a absolutní množství vody v záměsi, tedy zlepšíme zpracovatelnost. Nebo můžeme přidáním cementu docílit snížení vodního součinitele, při zachování stejné zpracovatelnosti.

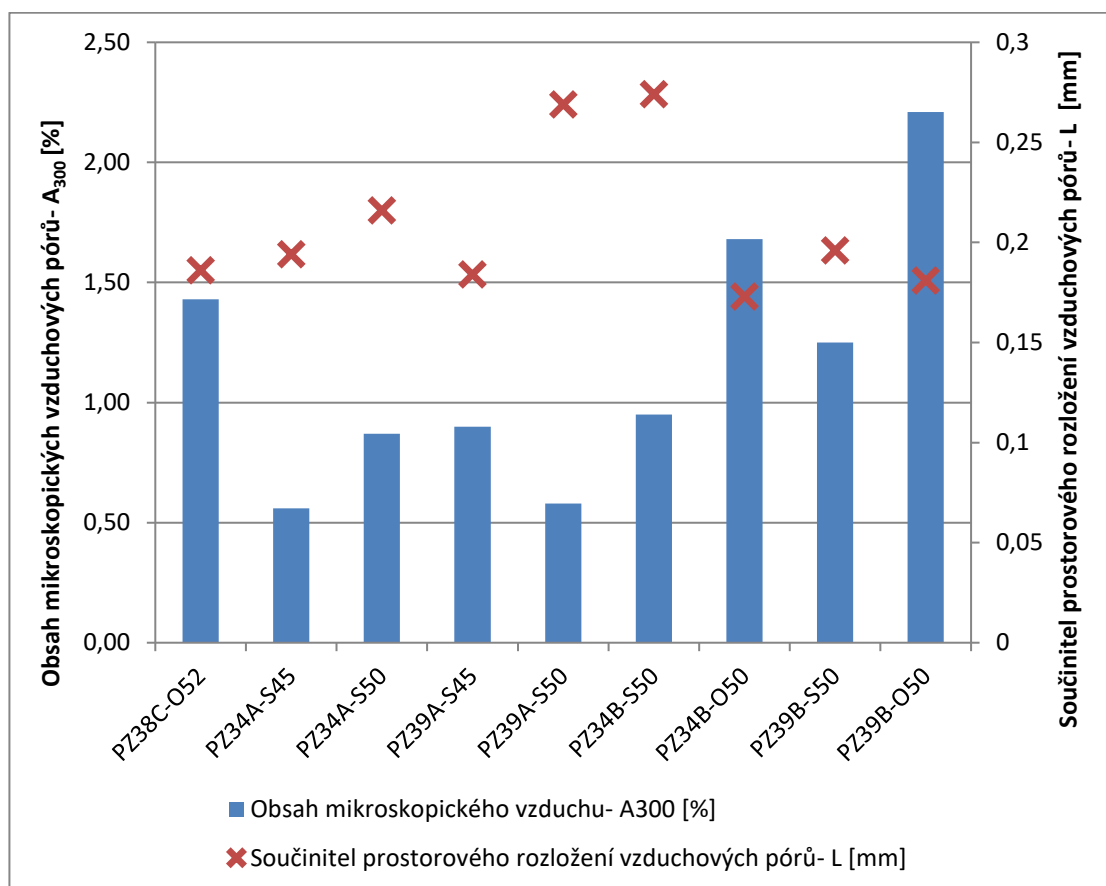
4.2.4.2. Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Na všech recepturách byly stanoveny charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Autoři se v odborných publikacích shodují na tom, že hlavním ukazatelem kvalitního provzdušnění, a tedy dobré odolnosti betonu proti CHRL je množství aktivního vzduchu, tedy množství mikroskopických pórů do velikosti průměru $300 \mu\text{m}$, tento parametr se označuje A_{300} . Druhým důležitým parametrem je součinitel rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu neboli spacing factor. Spacing factor má označení L a udává maximální vzdálenost jakéhokoliv bodu v cementovém tmelu od kraje vzduchového póru a je uváděn v mm. Tabulka 10. a obrázek 23. znázorňuje obsah mikroskopických vzduchových pórů A_{300} a spacing factor L pro jednotlivé receptury.

Tab. 10-Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu pro jednotlivé receptury

Etapa	1.	2.			
Receptura	PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50
Mn. Cem. [kg/m^3]	380	340	340	390	390
w/c	0,52	0,45	0,5	0,45	0,5
Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	5,0	3,7	3,9	4,1	4,1
Obsah vzduchu v ztvrdlém betonu [%]	4,64	3,16	3,61	3,22	3,45
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů-L [mm]	0,186	0,194	0,216	0,184	0,269
Obsah mikroskopického vzduchu- A_{300} [%]	1,43	0,56	0,87	0,90	0,58

Etapa	3.			
Receptura	PZ34B-S50	PZ34B-O50	PZ39B-S50	PZ39B-O50
Mn. Cem. [kg/m ³]	340	340	390	390
w/c	0,5	0,5	0,5	0,5
Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	5,5	5,0	5,3	5,5
Obsah vzduchu v ztvrdlém betonu [%]	4,41	4,60	4,51	5,33
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů-L [mm]	0,274	0,173	0,196	0,181
Obsah mikroskopického vzduchu-A ₃₀₀ [%]	0,95	1,68	1,25	2,21

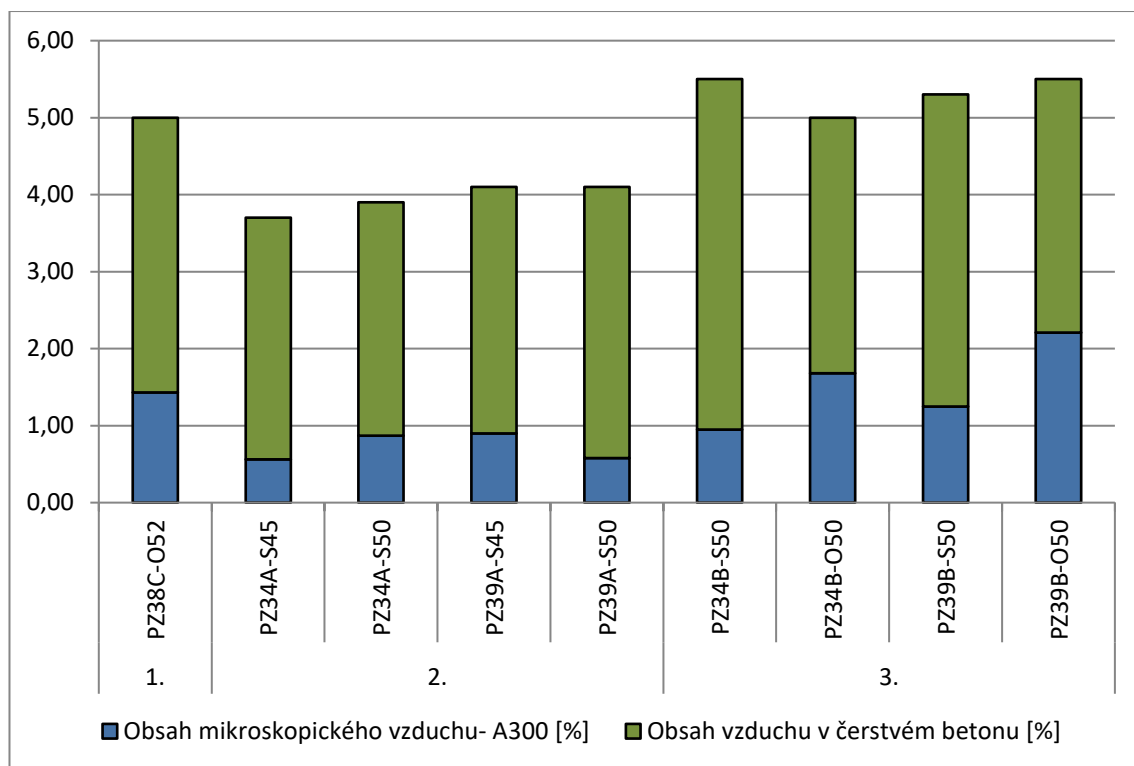


Obr. 23- Graf znázorňující výsledné hodnoty obsahu mikroskopického vzduchu a součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů

ČSN EN 74 2404 vyžaduje pro konstrukce se životností 100 let minimální hodnotu obsahu mikroskopického vzduchu v prostředí XF2 1 % a v prostředí XF4 1,8 %. Zároveň tato norma vyžaduje maximální hodnotu součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů v prostředí XF2 0,24 mm a v prostředí XF4 0,2 mm. Požadavky pro

stupeň vlivu prostředí XF4 splňují pouze 2 receptury PZ34B-O50 a PZ39B-O50. Pro dosažení kvalitní odolnosti betonu proti CHRL je velmi podstatné, co nevíce zvýšit obsah mikroskopického vzduchu a co nejméně snížit součinitel rozložení vzduchových pórů. Je ale nutné nezapomínat, že zvyšování provzdušnění snižuje pevnost betonu v tlaku, při zvětšení obsahu vzduchu o 1 % se sníží pevnost betonu v tlaku o zhruba 4-8 %.

Zkoušky prokázaly, že obsah vzduchu v čerstvém betonu není přímo úměrný množství obsahu mikroskopického vzduchu. Obrázek 24 znázorňuje graf, na kterém je porovnáno množství obsahu vzduchu v čerstvém betonu s množstvím mikroskopického vzduchu (A_{300}).



Obr. 24- Graf znázorňující obsah vzduchu v čerstvém betonu a obsah mikroskopického vzduchu

Jak již bylo zmíněno, z grafu je patrné, že obsah mikroskopického vzduchu není přímo úměrný obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Ve třetí etapě byl prokázán vliv superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátů na obsah mikroskopického vzduchu. Receptury se superplastifikační přísadou O měly výrazně vyšší obsah mikroskopického vzduchu než receptury se superplastifikační přísadou S. Například Receptura PZ39B-O50 se odlišuje od receptury PZ39B-S50 pouze typem superplastifikační přísady, ale její obsah mikroskopického vzduchu je o 0,96 % větší,

což je nárůst přibližně o 78 %. Pokud budeme předpokládat, že odolnost betonů proti CHRL je závislá především na obsahu mikroskopického vzduchu, můžeme dojít k závěru, že požadavky uvedené v normě ČSN EN 206+ A1 [7], kde je specifikováno pouze množství vzduchu v čerstvém betonu pro prostředí XF2-XF4, jsou nedostatečné, protože zde není jistota, že beton bude obsahovat dostatečné množství mikroskopického vzduchu.

Zajímavé je, že naměřené hodnoty obsahu vzduchu na čerstvém betonu jsou vždy vyšší než hodnoty určené stanovením charakteristik vzduchových pórů na ztvrdlém betonu. Obsah vzduchu na čerstvém betonu (i mikroskopického) se dá také určit pomocí metody AVA (air-viod analyser). Jako vzorek se odebírá přímo část cementového tmelu bez větší frakce kameniva a doba trvání zkoušky je zhruba 30 minut. Díky možnosti zjištění obsahu mikroskopického vzduchu na čerstvém betonu se pravděpodobně jedná o velmi dobrý kontrolní a doplňkový mechanismus, jak zajistit trvanlivost betonu. [25]



Obr. 25- AVA: Odebrání vzorku, aparatura, měření [34]

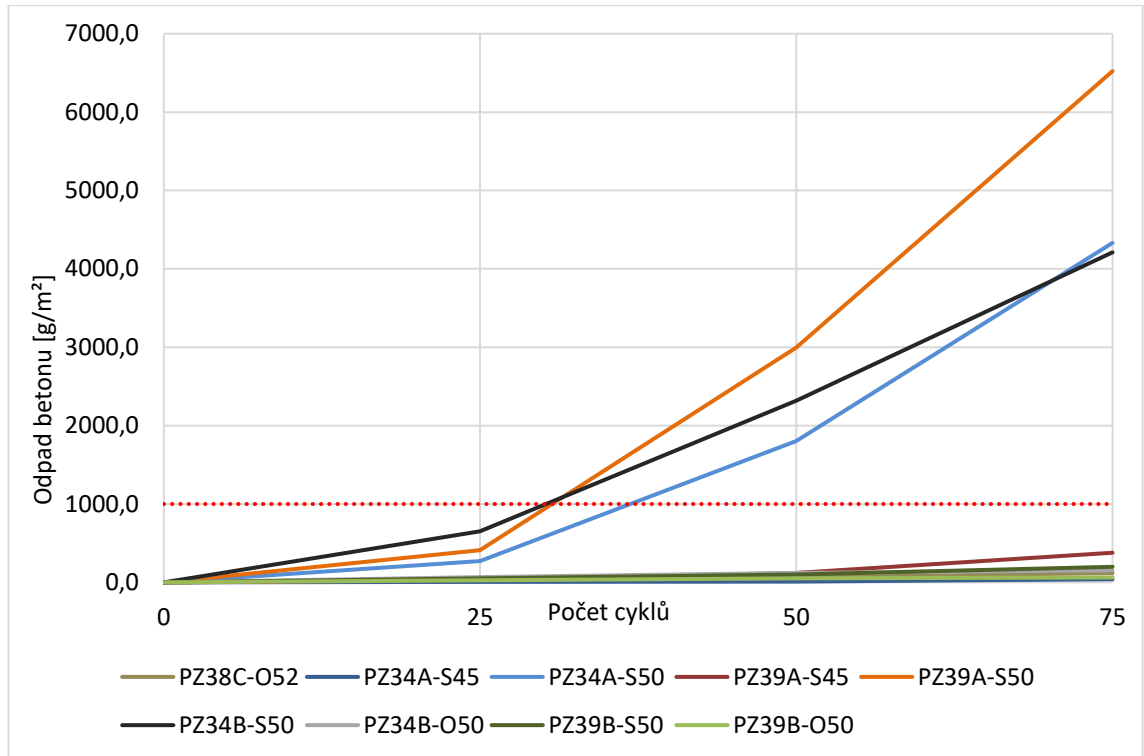
4.2.4.3. Odolnost betonu proti CHRL

Všechny receptury byly zkoušeny na odolnosti betonu proti CHRL metodou A a C, ve třetí etapě byly zároveň ozkoušeny různé povrchy zkušebních těles. Tabulka 11. Ukazuje všechny naměřené odpady pro jednotlivé metody, receptury a povrchy. Obrázek 26 znázorňuje graf odpadů hlazených povrchů ze všech receptur zkoušených metodou C a obrázek 27 znázorňuje graf odpadů hlazených povrchů ze všech receptur zkoušených metodou A. Červená tečkovaná čára značí limitní hodnotu odpadů udávanou normou ČSN P 73 2404 pro prostředí XF4. Obrázky jednotlivých povrchů lze nalézt v příloze 3.

Tab. 11- Výsledky naměřených odpadů pro různé metody, receptury a povrchy

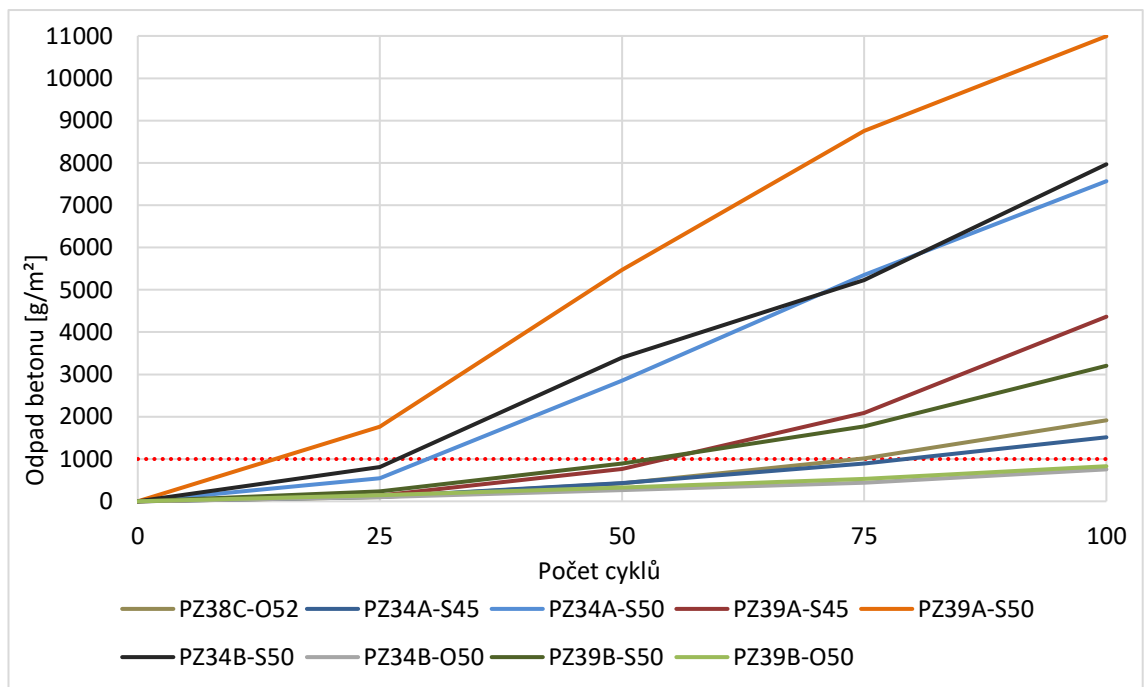
Etapa		1.		2.				
Receptura		PZ38C-O52		PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50	
Povrch		Hlazený		Hlazený	Hlazený	Hlazený	Hlazený	
Odpady [g/m ²]	Metoda A	25	101,8	106,4	546,9	137,1	1763,2	
		50	426,9	429,7	2856,7	763,9	5469,2	
		75	1014,3	895,0	5351,5	2088,0	8753,8	
		100	1915,1	1513,9	7566,8	4364,0	10993,0	
	Metoda C	25	22,7	5,7	272,9	28,6	409,1	
		50	62,3	11,4	1802,0	120,3	2994,6	
		75	119,0	39,8	4331,7	378,0	6523,3	
Etapa		3.						
Receptura		PZ34B-S50			PZ34B-O50			
Povrch		Hlazený	Řez	Bok/Dno	Hlazený	Řez	Bok/Dno	
Odpady [g/m ²]	Metoda A	25	808,5	687,4	2198,1	101,3	389,3	1229,3
		50	3394,7	1673,3	5070,5	264,8	727,5	2669,3
		75	5227,5	2957,8	7167,4	436,2	1053,0	3684,0
		100	7966,8	5071,1	9891,7	755,6	1572,9	4835,2
	Metoda C	25	651,8	1383,0	1241,1	68,1	232,7	221,3
		50	2318,2	3032,3	3519,8	119,2	465,3	879,6
		75	4211,3	4523,0	5735,9	153,2	737,7	1861,3
Etapa		3.						
Receptura		PZ39B-S50			PZ39B-O50			
Povrch		Hlazený	Řez	Bok/Dno	Hlazený	Řez	Bok/Dno	
Odpady [g/m ²]	Metoda A	25	235,6	285,5	720,6	141,6	292,8	170,2
		50	895,2	535,7	2142,5	326,5	484,2	402,3
		75	1774,7	809,5	3404,6	527,1	679,4	750,4
		100	3203,8	1163,2	4845,9	829,9	925,4	986,4
	Metoda C	25	51,0	628,8	79,3	28,3	5,7	22,7
		50	102,0	1512,5	402,2	51,0	5,7	51,0
		75	198,3	2316,9	1138,6	62,4	11,3	90,7

Metoda C



Obr. 26- Odpady hlazených povrchů zkoušených metodou C

Metoda A



Obr. 27- Odpady hlazených povrchů zkoušených metodou A

Z provedených zkoušek se dá určit, že na odolnost betonu proti CHRL má zásadní vliv velikost, a hlavně kvalita provzdušnění, kvalitou provzdušnění je myšleno množství kulovitých uzavřených mikroskopických pórů (průměr do 300 μm) a součinitel rozložení vzduchových pórů. Dále pórovitost cementového tmele, s čímž je výrazně spojeno celkové množství vody v záměsi a úprava povrchu.

Kvalitní provzdušnění je velmi dobrý způsob, jak zajistit odolnost betonu proti CHRL, což je vidět hlavně z výsledků 3. etapy, kdy receptury PZ34B-O50, PZ39B-S50 a PZ39B-O50 mají obsah mikroskopického vzduchu vyšší jak 1,25 % a jejich odolnosti proti CHRL jsou velmi dobré. Naopak receptura PZ34B-S50 měla sice provzdušnění 5,5 % v čerstvém stavu, ale obsah mikroskopického vzduchu je pouze 0,95 % a její odolnosti proti CHRL jsou velmi malé.

Receptura PZ34A-S45 měla sice provzdušnění čerstvého betonu relativně malé 3,7 % a obsah mikroskopického vzduchu byl také relativně malý 0,56 %, ale její výsledky zvláště z metody C jsou velmi dobré, to je způsobeno malou porozitou cementového tmele, čemuž nasvědčuje i vysoká pevnost betonu v tlaku 62,8 MPa. Při snížení absolutního množství vody v záměsi dojde ke snížení porozity cementového tmelu a zvýšení jak pevností, tak odolností betonu proti CHRL. Receptura PZ34A-S45 obsahovala vodní součinitel 0,45 a množství cementu 340 kg, tedy obsahovala nejmenší množství vody, konkrétně 153 l. Bohužel konzistence této receptury byla velmi viskózní, a tedy její výsledná zpracovatelnost neakceptovatelná pro běžné použití transportbetonů.

Na první pohled je vidět, že metoda A má výrazně vyšší hodnoty odpadů, než metoda C. Při zkoušení metodou A splnily podmínku maximálního množství odpadů 1000 g/m^2 pro prostředí XF4 pouze 2 receptury, PZ34B-O50 a PZ39B-O50 (obr. 27). Zatímco při zkoušení receptur metodou C tuto podmínku splnilo hned 6 receptur (obr. 26). Problematika porovnání agresivnosti metod A a C je více rozebrána v následující kapitole 4.2.5.

4.2.5. Porovnání metod A a C

Dílním tématem práce bylo porovnat běžně používané metody pro stanovení odolnosti betonu proti CHRL v České republice. Jak již bylo zmíněno, v běžné praxi se většinou setkáváme s měřením odolnosti betonu pomocí metody C v Čechách a s měřením pomocí metody A na Moravě, tento fakt je pravděpodobně způsoben požadavky ŘSD. Následující kapitola tedy shrnuje porovnání metod A a C, jejichž výsledky by dle předpokladu normy ČSN P 73 2404 měly být srovnatelné.

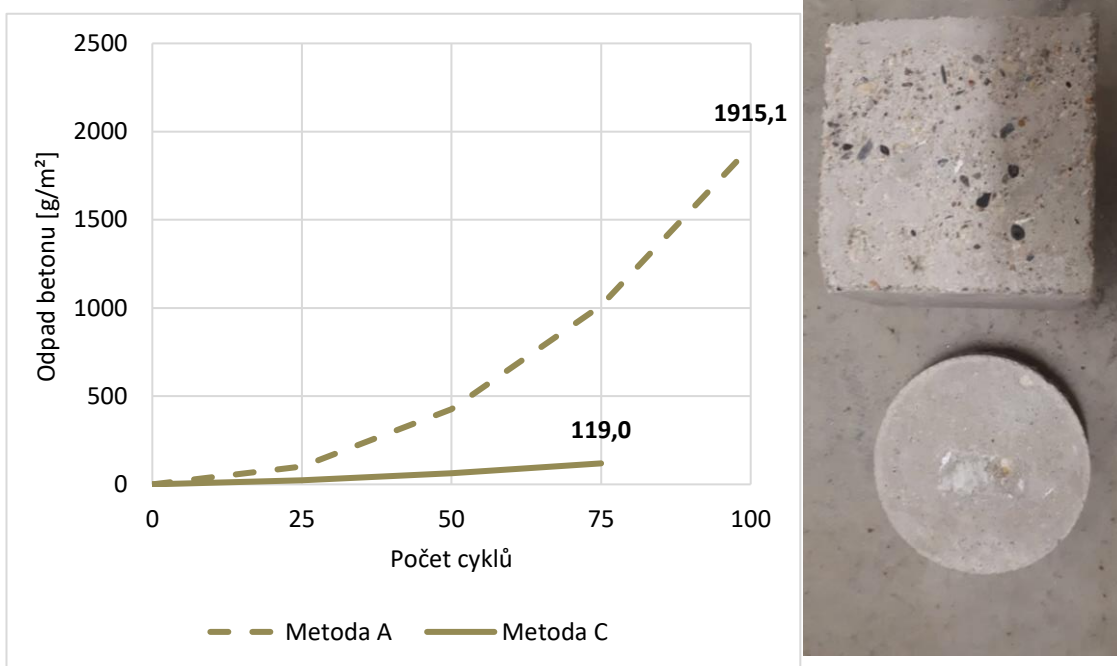
Protože byla snaha během experimentu eliminovat co nejvíce možných druhů okrajových podmínek, byly všechny zkoušky provedeny jednou zkušební laboratoří a jedním mrazícím zařízením. Z tohoto důvodu nebylo možné vždy osadit vzorky ve stejný čas, protože průběhy cyklů se liší pro metodu A (délka trvání zkoušky zhruba 7 dnů) a metodu C (délka trvání zkoušky zhruba 19 dnů). Tabulka 12 ukazuje stáří vzorků při nasazení do mrazícího zařízení, protože byl použit rychlovazný cement CEM I 42,5 R z cementárny Radotín. Autor se domnívá, že vliv na výsledky způsoben různým stářím vzorků nebude mít markantní vliv, a tedy se může zanedbat. V první a druhé etapě byla nejprve zkoušena metoda A, následně pak metoda C. Pro ukázání zanedbatelnosti stáří zkušebních těles bylo pořadí ve třetí etapě prohozeno.

Tab. 12- Stáří vzorků při začátku zkoušky odolnosti betonu proti CHRL

Etapa		1.	2.				
Receptura		PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50	
Povrch		Hlazený	Hlazený	Hlazený	Hlazený	Hlazený	
Stáří vzorků [den]	Metoda A	31	30	30	30	30	
	Metoda C	39	39	39	39	39	
Etapa		3.					
Receptura		PZ34B-S50			PZ34B-O50		
Povrch		Hlazený	Řez	Bok/Dno	Hlazený	Řez	Bok/Dno
Stáří vzorků [den]	Metoda A	51	51	51	51	51	51
	Metoda C	30	30	30	30	30	30
Etapa		3.					
Receptura		PZ39B-S50			PZ39B-O50		
Povrch		Hlazený	Řez	Bok/Dno	Hlazený	Řez	Bok/Dno
Stáří vzorků [den]	Metoda A	51	51	51	51	51	51
	Metoda C	30	30	30	30	30	30

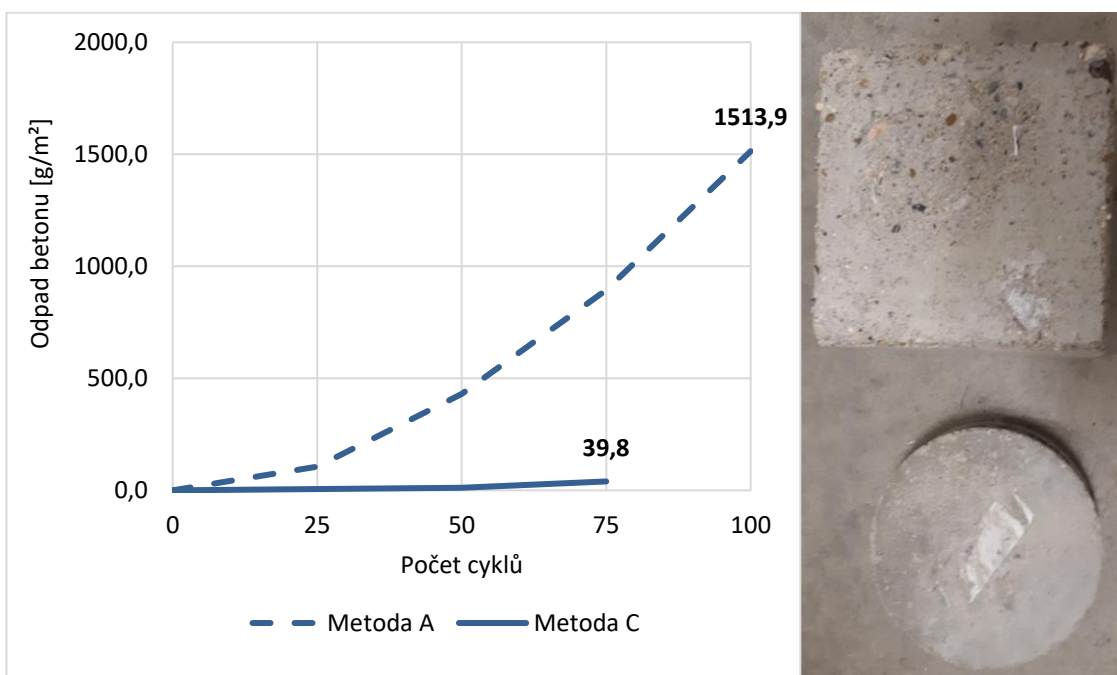
Následující grafy (obr. 28-36) detailně porovnávají odpady jednotlivých receptur hlazených povrchů zkoušených na odolnost betonu proti CHRL metodou A (100 cyklů) a metodou C (75 cyklů).

PZ38C-O52



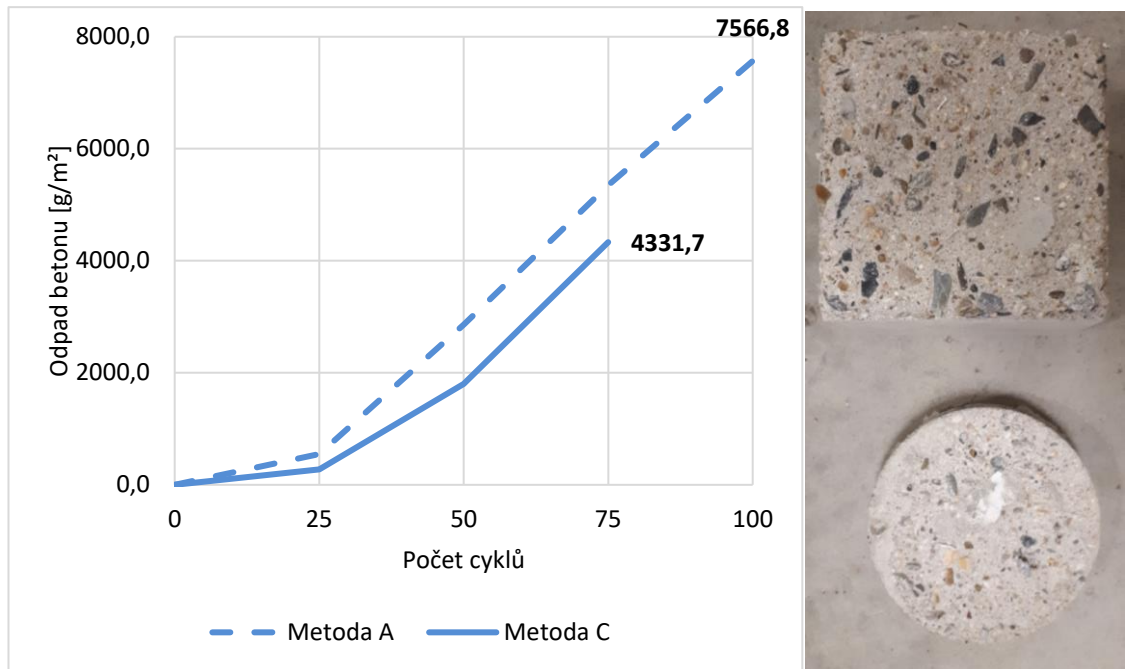
Obr. 28- Receptura: PZ38C-O52, povrch: Hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ34A-S45



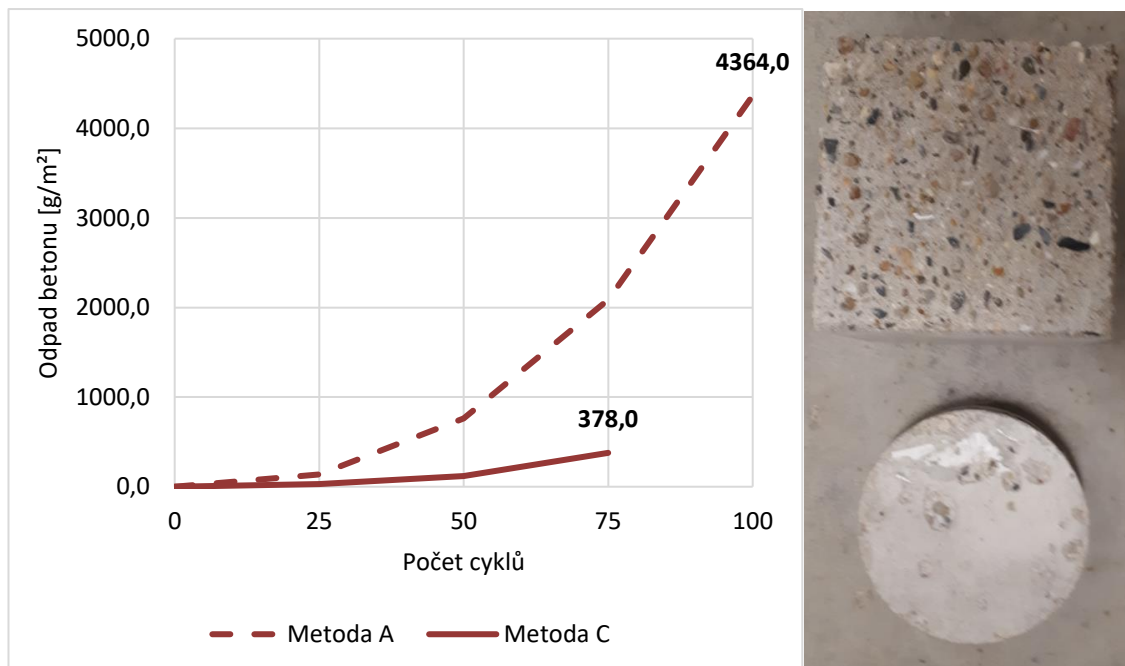
Obr. 29- Receptura: PZ34A-S45, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ34A-S50



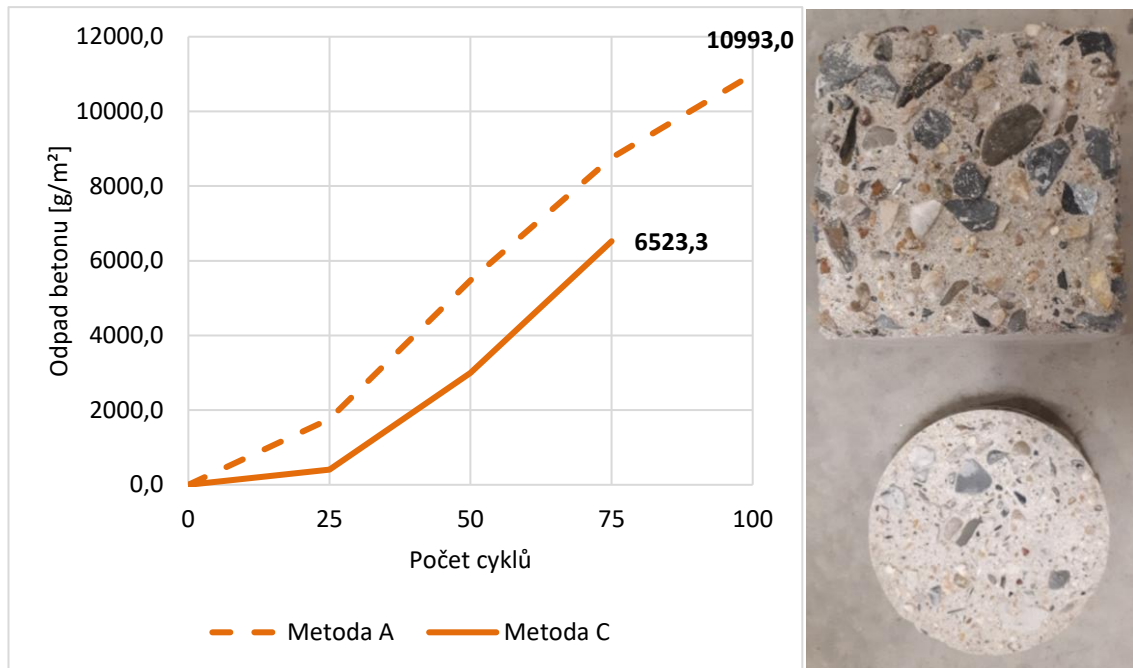
Obr. 30- Receptura: PZ34A-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ39A-S45



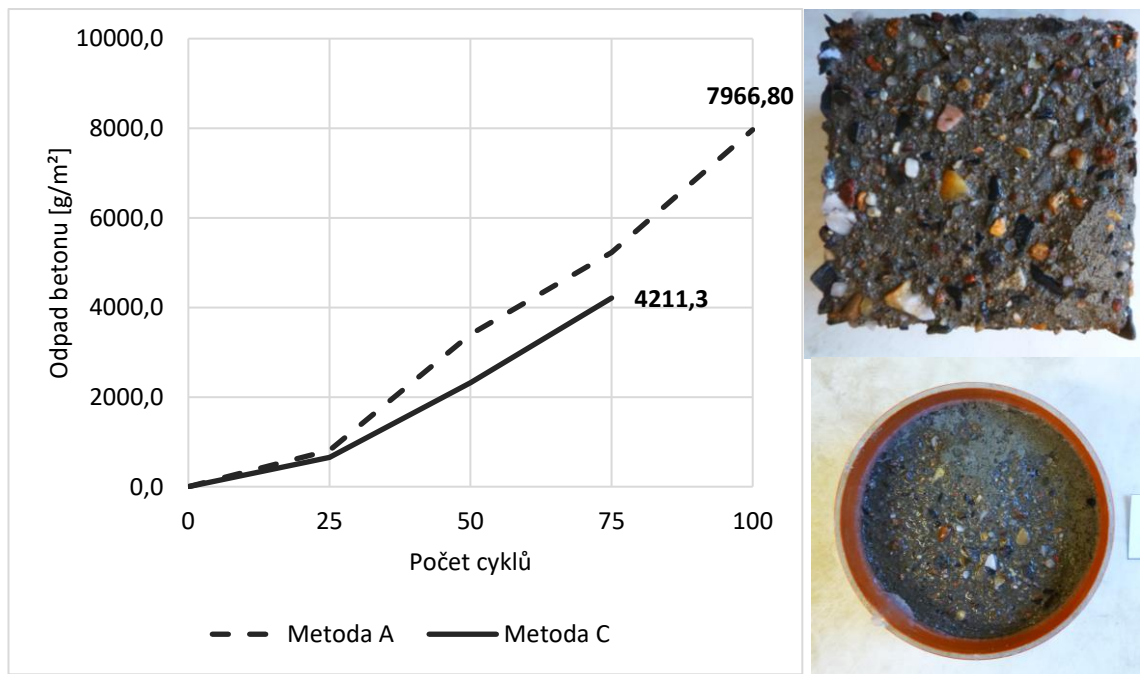
Obr. 31- Receptura: PZ39A-S45, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ39A-S50



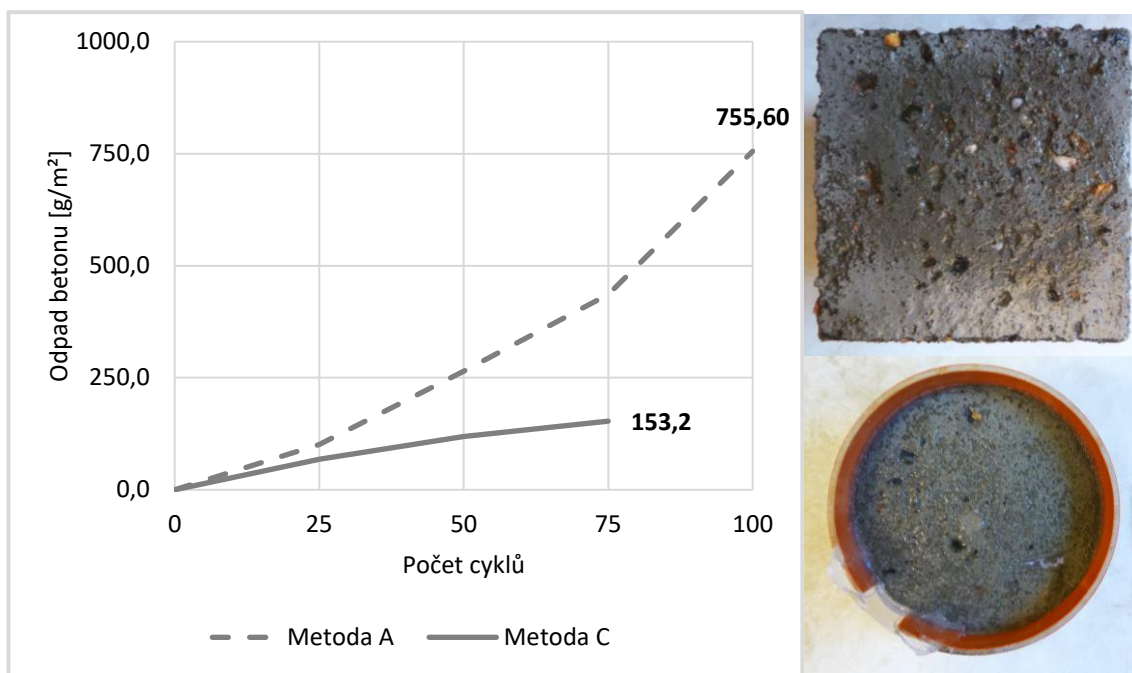
Obr. 32- Receptura: PZ39A-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ34B-S50



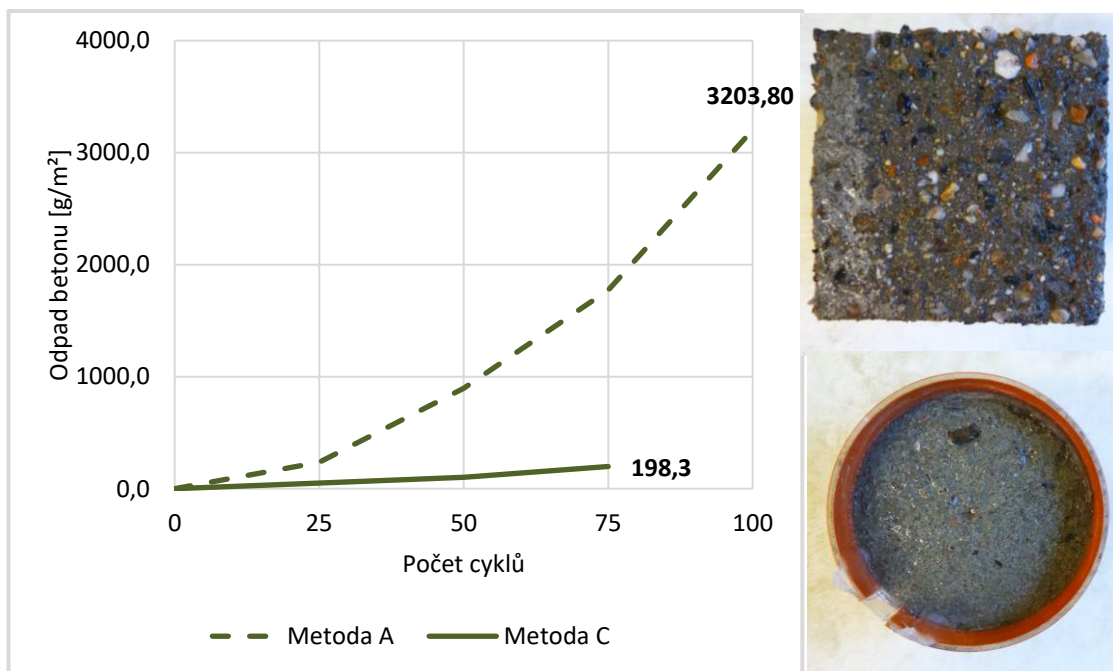
Obr. 33- Receptura: PZ34B-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ34B-O50



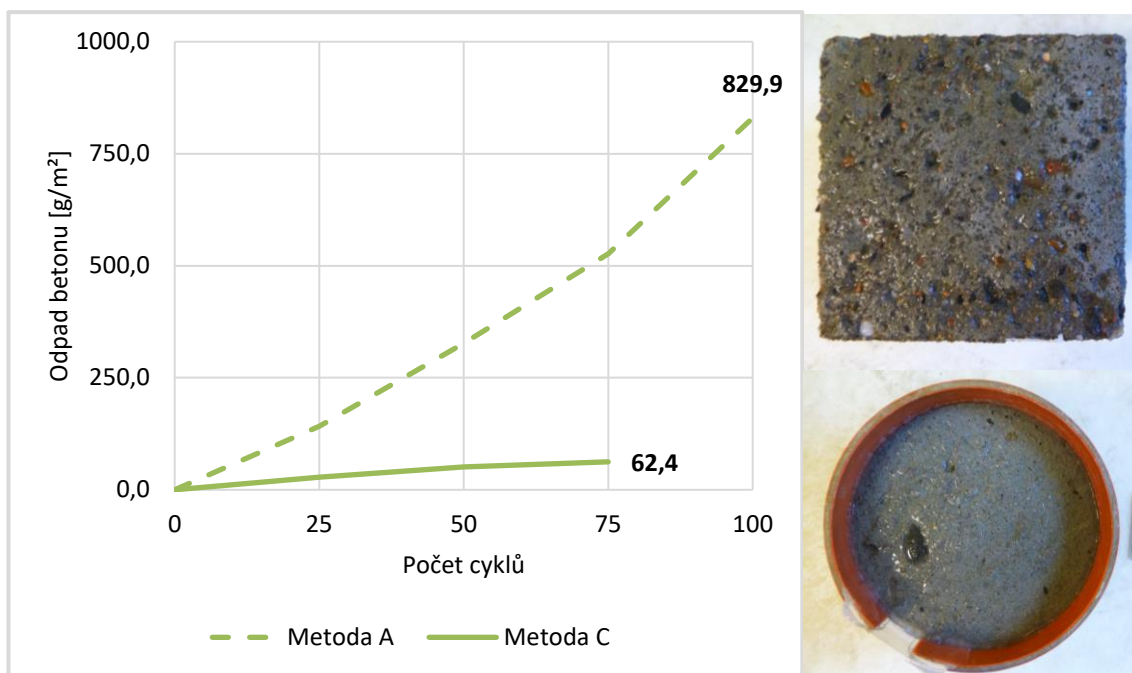
Obr. 34- Receptura: PZ34B-O50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ39B-S50



Obr. 35- Receptura: PZ39B-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

PZ39B-O50



Obr. 36- Receptura: PZ39B-O50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků

Norma ČSN P 73 2404 [6] uvádí jako limitní hodnotu odpadů 1000 g/m^2 pro stupeň vlivu prostředí XF4, a to jak pro metodu A po 100 cyklech, tak pro metodu C po 75 cyklech. To znamená, že metody by měly být srovnatelně citlivé a výsledky by měly korespondovat. Navíc uvádí, při životnosti na 50 let pro stupeň vlivu prostředí XF2, limity odpadů 1250 g/m^2 pro metodu A při 75 cyklech a limity odpadů 1500 g/m^2 pro metodu C při 50 cyklech, z čehož vyplývá, že tato norma dokonce uvažuje metodu C jako lehce agresivnější.

Z výsledků provedených zkoušek vyplývá, že metoda A je výrazně agresivnější než metoda C. Obě metody dokáží poměrně spolehlivě určit nevyhovující beton, což je vidět například u receptur PZ34A-S50, PZ34B-S50 a PZ39A-S50. Všechny tři receptury mají vodní součinitel 0,5, obsahují superplastifikační přísadu S a mají malý obsah mikroskopického vzduchu, vždy pod 1 %. U takto velmi nevyhovujících receptur je metoda A agresivnější a odpady z testovaných vzorků jsou výrazně vyšší. Zajímavé je, že u těchto tří receptur odpady z metody A po 75 cyklech se velmi blíží odpadům z metody C po 75 cyklech. U málo odolných receptur proti CHRL by porovnatelnost metod mohla být podobná pro stejné množství cyklů.

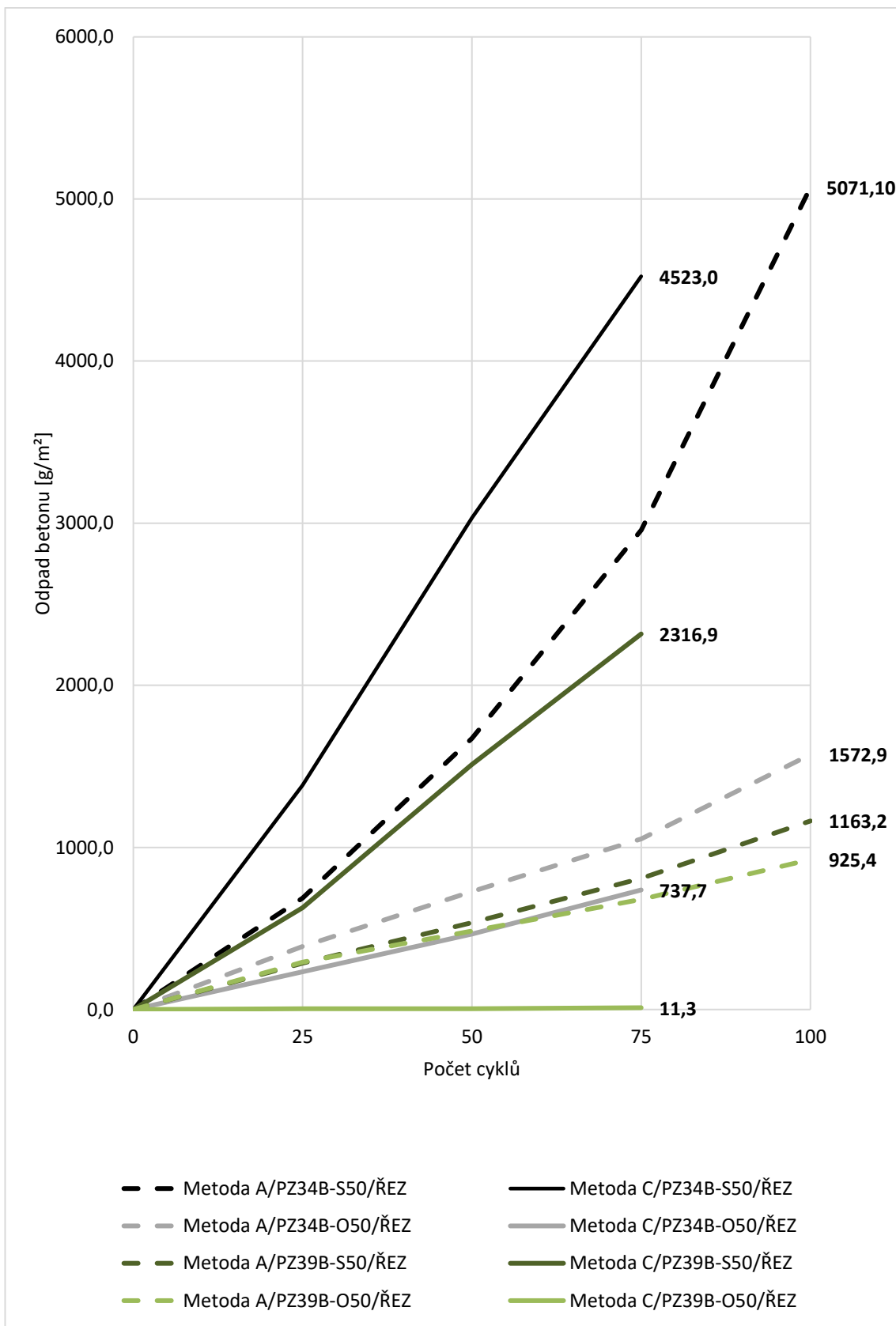
Velký problém při porovnání metod A a C nastává u receptur PZ38C-O52, PZ34A-S45 a PZ39B-S50, výsledky z metody C ukazují, že se jedná o beton velmi odolný proti

působení CHRL, jehož odpady dosahují maximální hodnoty do 200 g/m², nicméně výsledky z metody A ukazují, že se jedná o nevyhovující beton, tedy beton, který není odolný proti působení CHRL s odpady převyšující 3000 g/m². Všechny tři receptury se od sebe liší množstvím provzdušnění, vodním součinitelem, množstvím cementu i použitím různé superplastifikační přísady. Receptura PZ39A-S45 měla odpady při použití metody C kolem 400 g/m², ale odpady při použití metody A se blíží k 4400 g/m². Znovu se tedy metoda A ukazuje jako více agresivní než metoda C a v případě těchto receptur není možné tyto dvě metody porovnávat.

Pouze dvě receptury vyhověly limitu 1000 g/m² při použití metody A i C, jedná se o PZ34B-O50 a PZ39B-O50, receptury mají stejný vodní součinitel 0,5, liší se množstvím cementu a mají stejnou superplastifikační přísadu. Hlavní důvod, proč byly obě receptury schopné vyhovět při použití obou metod, je jejich kvalitní provzdušnění. Obsah mikroskopického vzduchu je pro recepturu PZ34B-O50 1,68 % a pro PZ39B-O50 2,21 %. Nicméně odpady při metodě C byly do 150 g/m² a odpady při metodě A do 850 g/m². I u receptur s velmi kvalitním provzdušněním se potvrdila větší agresivita metody A.

Obrázek 37 znázorňuje graf, který porovnává metody A a C na vzorcích, jejichž zkoušený povrch byl řez tělesem, viz. obrázek 19. Směr řezu vzorků zkoušených metodou C byl veden horizontálně, zatímco řez vzorků zkoušených metodou A byl veden vertikálně. Při porovnávání řezů odpadá vliv úpravy zkoušeného povrchu a je tedy zkoušen přímo beton sám o sobě.

Výsledky porovnávaných řezů jsou velmi různorodé, pravděpodobně proto, že řez vzorkem pro metodu C probíhal rovnoběžně s hutněnou plochou, zatímco řez vzorkem pro metodu A probíhal kolmo s hutněnou plochou. U receptur PZ34B-O50 a PZ39B-O50 se znovu ukazuje metoda A jako agresivnější, stejně jako u srovnání hlazených povrchů. Receptura PZ34B-S50 má podobné odpady na zkoušených řezech pro obě metody a receptura PZ39B-S50 má dvojnásobné odpady při použití metody C oproti metody A, pravděpodobně se jedná o lokální výkyv, protože všechny ostatní zkoušky prokázaly větší agresivitu metody A. Porovnání odolností různých povrchů proti CHRL, zahrnující i porovnání řezů, je provedeno v kapitole 4.2.7.



Obr. 37- Porovnání zkoušených řezů metodou A a C pro receptury PZ34B-S50, PZ34B-O50, PZ39B-S50 a PZ39B-O50

4.2.6. Dílčí závěr (porovnání metod A a C)

Přestože ČSN P 73 2404 uvažuje metodu A i metodu C jako srovnatelně agresivní, možná dokonce metodu C jako agresivnější, výsledky provedeného experimentu ukázaly, že metoda A je výrazně agresivnější než metoda C. Čtyři receptury byly klasifikovány podle metody C jako vyhovující, tedy s velmi vysokou odolností proti CHRL (odpady do 400 g/m²), metoda A klasifikovala tyto receptury jako nevyhovující, tedy s nízkou odolností proti CHRL (odpady do 4400 g/m²).

Pokud je tedy beton zkoušen metodou A, musí být provedeno kvalitnější provzdušnění betonu, než při zkoušení metodou C. Při požadavku na beton odolný proti CHRL, tedy beton vystavený prostředí XF2 a XF4, by měl specifikátor zároveň určit metodu, kterou se bude beton hodnotit, protože metoda A a metoda C nejsou navzájem porovnatelné, zvláště pro beton s limitními hodnotami provzdušnění.

Metoda A je se řídí normou ČSN 73 1326 z roku 1984 a nebyla tedy modifikována více jak 34 let, zároveň je výrazně agresivnější pravděpodobně kvůli jevům zvaným hranový efekt a vzlínání solného roztoku po stěnách tělesa. Oběma těmito jevy se dá jednoduše zamezit pomocí zaizolování nezkoušených stran tělesa, podobně jako je zaizolování nezkoušených stran tělesa vyžadováno ostatními zkouškami popsány v kapitole 3.6. Protože správná zkušební metoda se pozná tak, že co nejlépe vystihuje reálné působení. Zůstává zde otázka, která z metod nejlépe vystihuje reálné působení agresivního prostředí na konstrukci.

4.2.7. Porovnání odolností různých povrchů betonu proti působení

CHRL

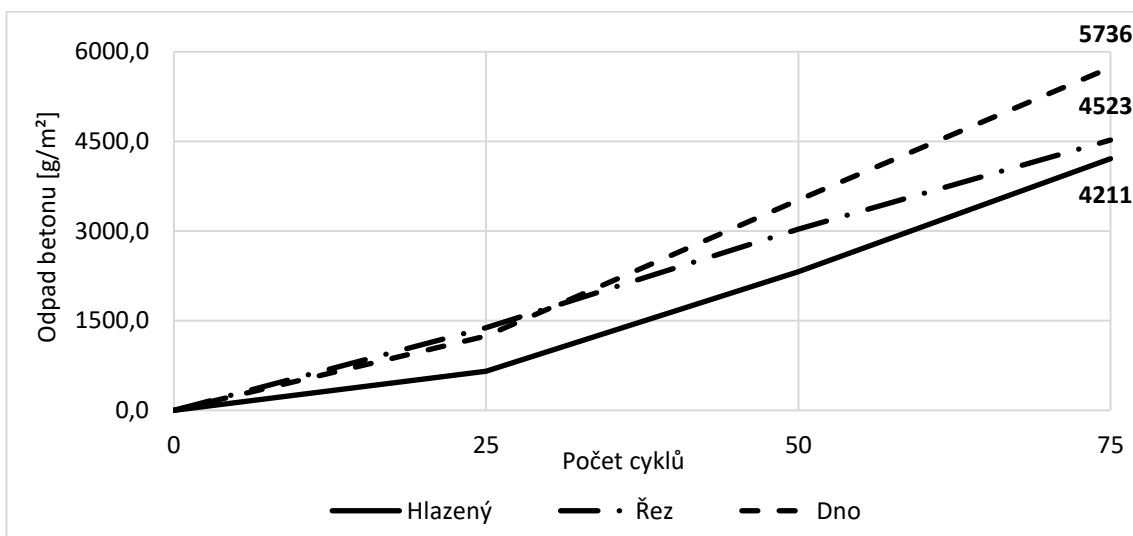
Dalším dílčím tématem práce bylo porovnat různé povrchy vzorků. Norma ČSN 73 1326 Z1 uvádí, že se povrch zkušebních těles musí zarovnat pilovitým pohybem ocelového pravítka. Nastává zde otázka, zda takto upravený povrch odpovídá povrchům z reálných konstrukcí, například svislému povrchu z bednění. Ve třetí etapě byly zkoušeny čtyři receptury (PZ34B-S50, PZ34B-O50, PZ39B-S50, PZ39B-O50), z každé receptury bylo vytvořeno šest zkušebních těles, tři pro metodu A a tři pro metodu C.

Povrchy pro metodu A jsou značené jako: Hlazený, řez a bok. Povrchy pro metodu C jsou značené jako: Hlazený, řez a dno. Schéma vytvořených těles je znázorněno na obrázku 19. Hlazený povrch byl zarovnán pilovitým pohybem ocelového pravítka. Řez pro metodu A byl proveden kolmo na směr hutnění z trámce o velikosti 700x150x150

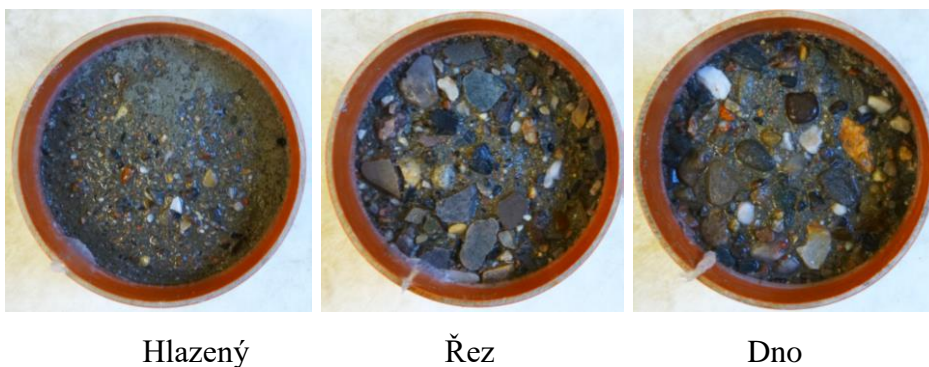
mm. Řez pro metodu C byl proveden rovnoběžně se směrem hutnění z válce o průměru podstavu 150 mm a výšce 300 mm. Hlazený povrch je uvažován jako referenční, bok a dno simulují reálné povrchy konstrukcí z bednění a řez simuluje přímou odolnost betonu bez vlivu povrchové úpravy.

Následující grafy a obrázky (Obr. 38-45) popisují výsledky odolnosti různých povrchů proti CHRL u receptur PZ34B-S50, PZ34B-O50, PZ39B-S50, PZ39B-O50 pro metodu C, hodnoty odpadů jsou uvedeny v tabulce 11.

PZ34B-S50

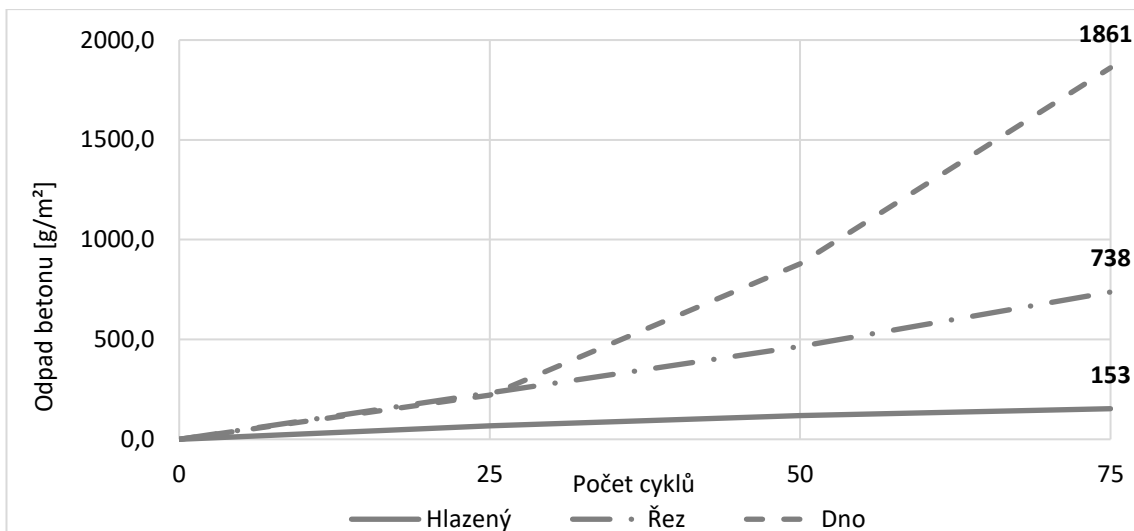


Obr. 38- Receptura: PZ34B-S50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL

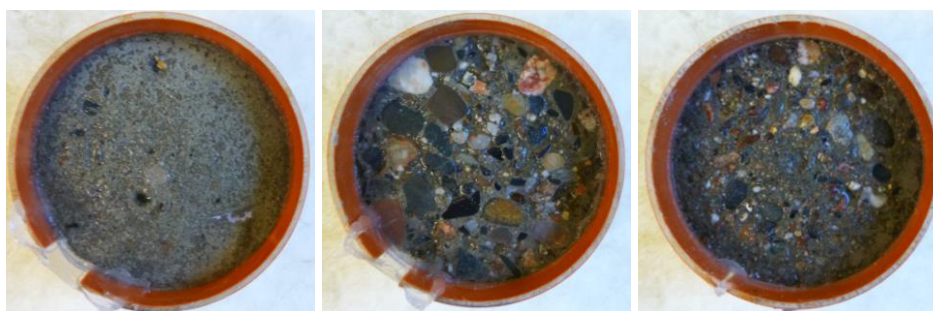


Obr. 39- Receptura: PZ34B-S50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech

PZ34B-O50



Obr. 40- Receptura: PZ34B-O50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



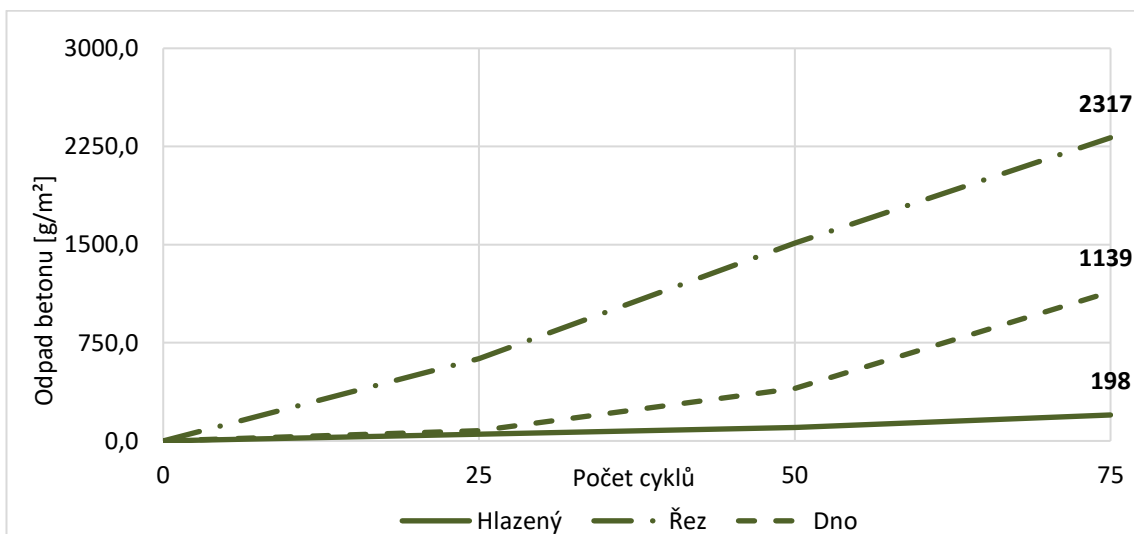
Hlazený

Řez

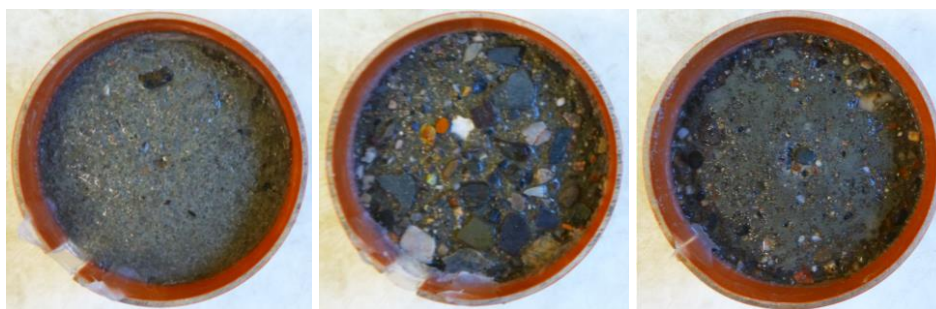
Dno

Obr. 41- Receptura: PZ34B-O50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech

PZ39B-S50



Obr. 42- Receptura: PZ39B-S50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



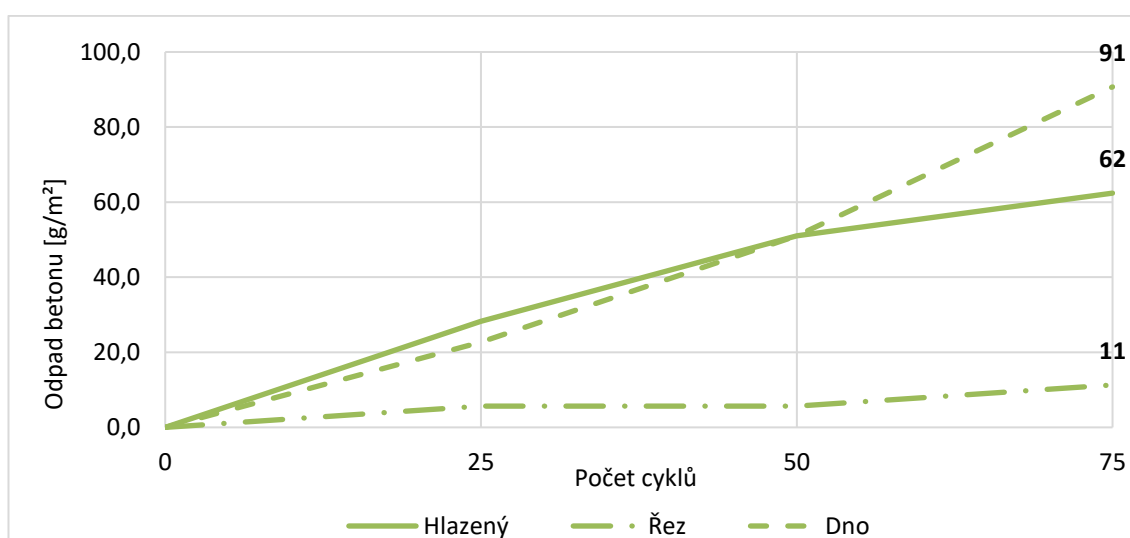
Hlazený

Řez

Dno

Obr. 43- Receptura: PZ39B-S50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech

PZ39B-O50



Obr. 44- Receptura: PZ39B-O50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



Hlazený

Řez

Dno

Obr. 45- Receptura: PZ39B-O50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech

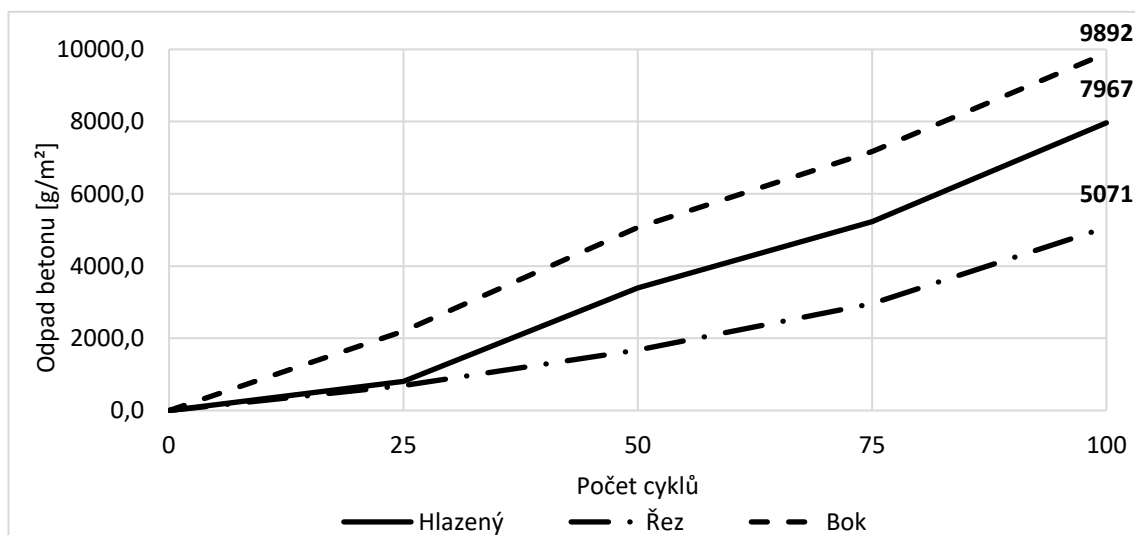
Z výsledků zkoušek odolnosti betonu proti CHRL metodou C vyplývá, že pokud beton není odolný proti CHRL, tak každý ze série povrchů bude vykazovat velké odpady. To potvrzuje receptura PZ34B-S50, jejíž odolnosti proti CHRL, zkoušené metodou C, byly velmi nízké, a tedy odpady ze všech tří povrchů (hlazený, řez, dno)

ukazují hodnoty mezi 4000 až 6000 g/m². Naopak receptura PZ39B-O50 měla velmi dobrou odolnost proti CHRL zkoušenou metodou C, a tudíž všechny tři povrchy (hlazený, řez, dno) mají minimální odpady do 100 g/m².

Receptury PZ34B-O50 a PZ39B-S50 měly velmi dobré odolnosti betonu proti CHRL při zkoušení hlazeného povrchu (odpady do 200 g/m²). Zkoušený řez u obou receptur dopadl výrazně hůře: pro recepturu PZ34B-O50 jsou odpady do 800 g/m² a pro recepturu PZ39B-S50 jsou odpady 1200 g/m². I když odpady z receptury PZ34B-O50 splnily limitní hodnotu pro prostředí XF4 1000 g/m² a odpady z receptury PZ39B-S50 ne, dá se říci, že jejich odolnost je velmi podobná. Zkoušené dno, tedy povrch simulující plochu z bednění, mělo u obou receptur nejhorší odolnost proti CHRL. Odpady se v obou případech pohybovaly okolo hodnoty 2000 g/m². Z provedených zkoušek tedy vyplývá, že nejlepší odolnost proti CHRL vykazoval hlazený povrch (zarovnaný pilovitým pohybem ocelového pravítka), řez betonem vykazoval střední odolnosti a nejhorší odolnosti ukázaly spodní povrchy válců (dno).

Následující grafy a obrázky (Obr. 46-53) popisují výsledky odolnosti proti CHRL různých povrchů receptur PZ34B-S50, PZ34B-O50, PZ39B-S50, PZ39B-O50 pro metodu A, hodnoty odpadů jsou uvedeny v tabulce 11.

PZ34B-S50



Obr. 46- Receptura: PZ34B-S50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



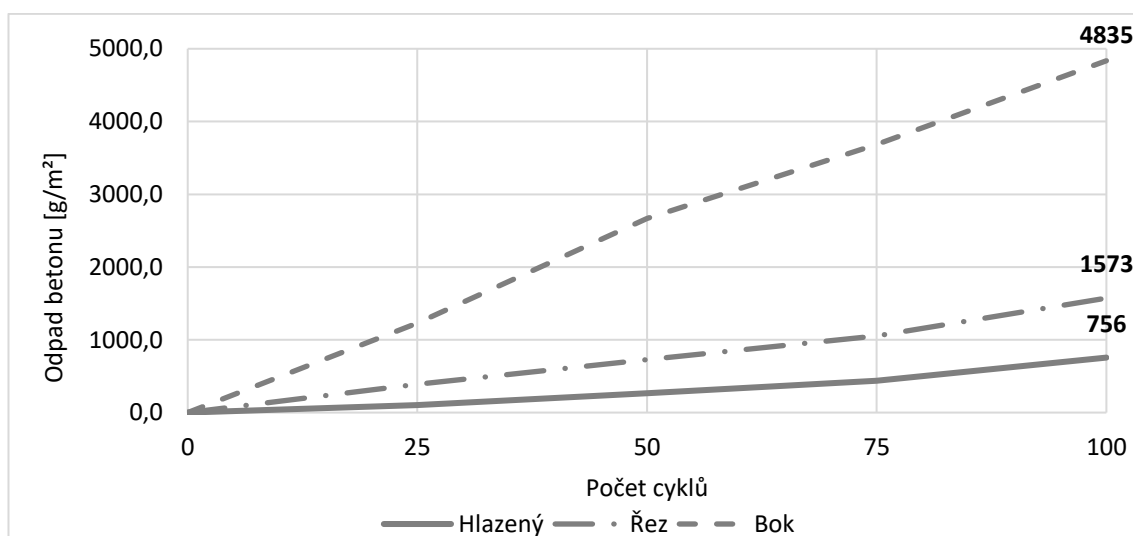
Hlazený

Řez

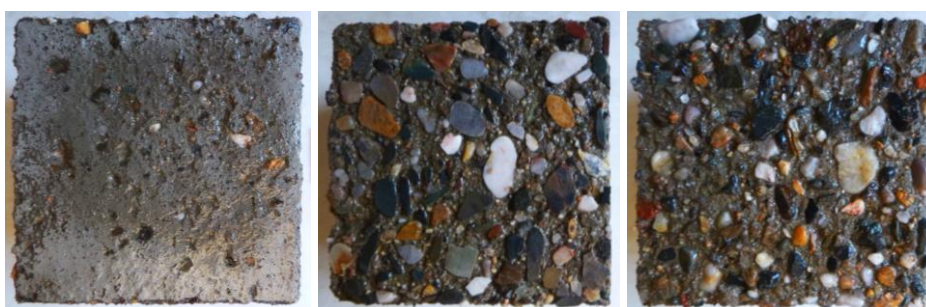
Bok

Obr. 47- Receptura: PZ34B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech

PZ34B-O50



Obr. 48- Receptura: PZ34B-O50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



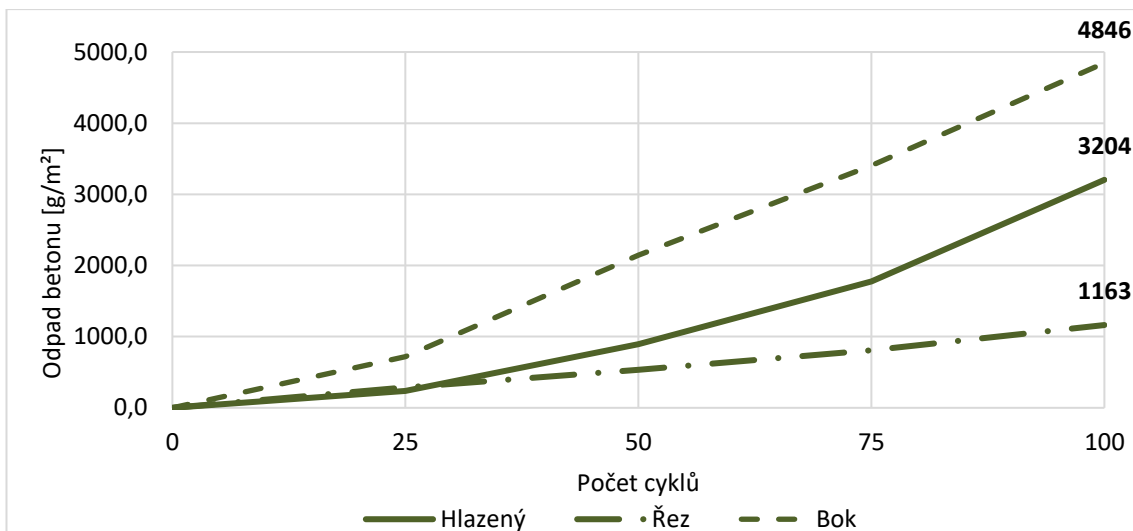
Hlazený

Řez

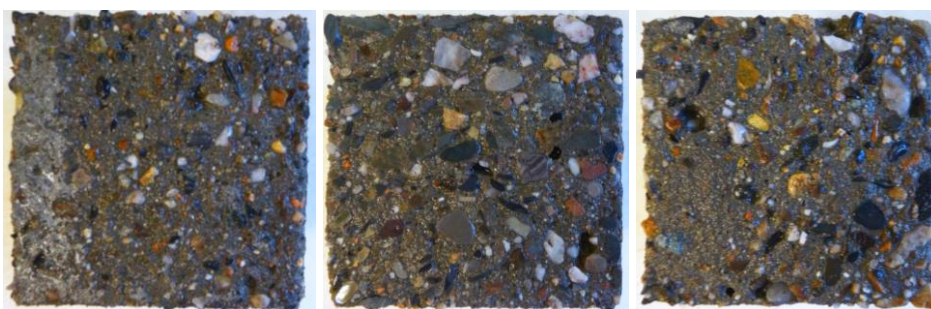
Bok

Obr. 49- Receptura: PZ34B-O50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech

PZ39B-S50



Obr. 50- Receptura: PZ39B-S50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



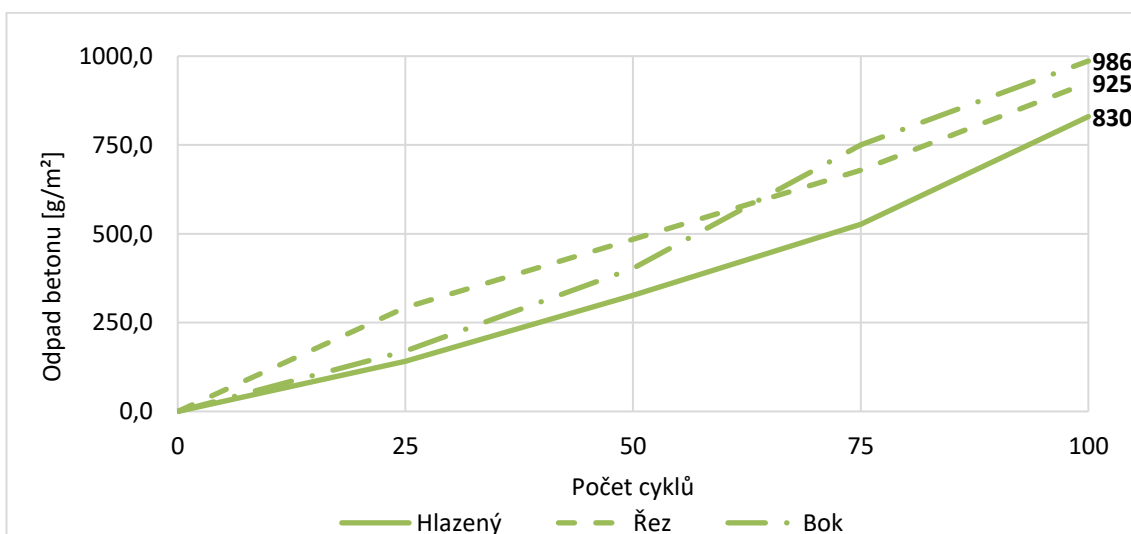
Hlazený

Řez

Bok

Obr. 51- Receptura: PZ39B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech

PZ39B-O50



Obr. 52- Receptura: PZ39B-O50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL



Hlazený

Řez

Bok

Obr. 53- Receptura: PZ39B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech

Výsledky z metody A znovu ukázaly, že receptura PZ34B-S50 měla velmi nevyhovující odolnosti proti CHRL, a to na všech zkoušených površích, odpady ze všech povrchů přesáhly 5000 g/m^2 a odpady z povrchu bok byly až k 10000 g/m^2 . I přes velmi nevyhovující výsledky se povrch bok ukázal jako nejméně odolný. Naopak receptura PZ39B-O50 vykazovala nejlepší odolnosti proti CHRL, ze všech povrchů byly odpady do 1000 g/m^2 . V případě receptury PZ39B-O50 můžeme mluvit o srovnatelné odolnosti všech povrchů proti CHRL, tato odolnost je dána velmi kvalitním provzdušněním. Znovu se prokázala větší agresivita metody A oproti metodě C.

U receptury PZ39B-S50 byly u hlazeného povrchu překvapivě vysoké odpady, pravděpodobně došlo k lokálnímu výkyvu, protože ostatní povrchy vykazují velmi podobné hodnoty s recepturou PZ34B-O50, a to jak při zkoušení metodou A, tak při zkoušení metodou C. nejmenší odolnost proti CHRL měl boční povrch krychle, který má simulovat povrch konstrukce z bednění.

U receptury PZ34B-O50 byly naměřeny nejvyšší odolnosti hlazeného povrchu (odpady do 800 g/m^2) a nejnižší odolnosti bočního povrchu (odpady do 5000 g/m^2). Řez krychlí vykazoval střední odolnosti (odpady do 1600 g/m^2). Přestože velikost odpadů z hlazeného povrchu hodnotí recepturu jako vyhovující pro prostředí XF4, velikost odpadů z boční strany krychle hodnotí beton jako velmi nevyhovující i v prostředí XF2. Zůstává zde tedy otázka, pokud vyhoví hlazený povrch zkušebních vzorků na odolnosti proti CHRL, vyhoví zároveň i skutečný povrch konstrukce z bednění?

4.2.8. Dílčí závěr (porovnání různých povrchů)

V provedeném experimentu byly testovány tři různé typy povrchů metodami A i C na čtyřech recepturách. Hlazený povrch, tedy povrch zarovnaný pilovitým pohybem ocelového pravítka, byl uvažován jako referenční. Povrch nazvaný řez měl ozkoušet

odolnost betonu proti CHRL bez vlivu povrchových úprav a povrch nazvaný dno/bok simuloval reálný povrch konstrukce z bednění.

Výsledky ukázaly, že pokud se jedná o velmi kvalitně provzdušněný beton, tedy beton s vysokou odolností betonu proti CHRL, nemá volba a úprava zkoušených povrchů vliv na výsledky, zároveň pokud má beton velmi malou odolnost proti CHRL, všechny povrchy vykazují velmi vysoké odpady. Dále bylo zjištěno, že úprava povrchu má kladný vliv na odolnosti betonu proti CHRL, tedy povrchy označené jako hlazené měli lepší odolnost proti CHRL než řezy (povrchy neovlivněné povrchovou úpravou). Nejhorší odolnost proti CHRL měly povrchy, které měly simulovat povrch z bednění, tedy povrchy nazvané dno/bok.

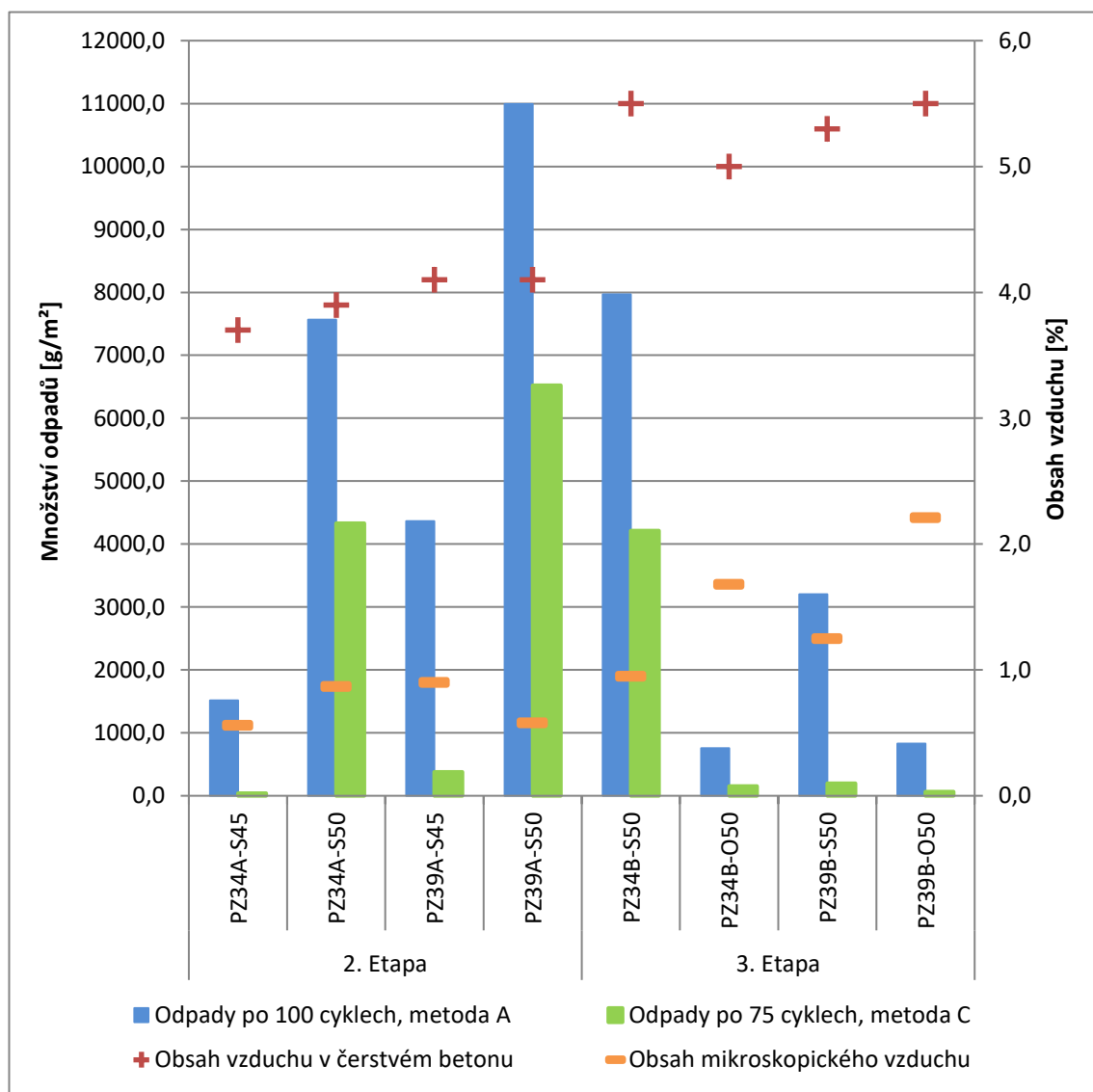
Můžeme tedy konstatovat, že i když hlazený povrch (upravený pilovitým pohybem ocelového pravítka) splní kritéria stanovená ČSN P 73 2404 pro prostředí XF4, neznamena to, že svislá strana (povrch nazvaný dno/bok) splní kritéria pro prostředí XF2. V praxi to znamená, že pokud v laboratoři vyjde odolnost betonu proti CHRL, není zaručeno, že svislý povrch konstrukce z bednění bude mít také požadované odolnosti. To prokázala například receptura PZ34B-O50 zkoušená metodou A i C, nebo receptura PZ39B-S50 zkoušená metodou C. Pro detailní a přesné porovnání je potřeba vyzkoušet vývrty z konstrukce, které nebudou zkresleny velikostí vzorku.

4.2.9. Trvanlivost provzdušněných betonů z hlediska Výkonové specifikace

Výkonová specifikace se soustředí primárně na výkonové parametry betonu, tedy výsledné vlastnosti. Naopak preskriptivní specifikace se primárně soustředí na předpisové parametry, jako je například předepsaný vodní součinitel, nebo předepsané množství cementu. ČSN EN 206+ A1 a ČSN P 73 2404 předepisuje maximální vodní součinitel a minimální množství cementu hlavně kvůli zaručení požadované trvanlivosti betonu. Cílem této kapitoly je tedy porovnat vyzkoušené receptury se stejným vodním součinitelem a různým množstvím cementu a receptury s různým vodním součinitelem a stejným množstvím cementu. Zároveň byly ve třetí etapě porovnávány stejné receptury, které se od sebe odlišují pouze superplastifikační přísadou na bázi polykarboxylátu, přičemž přísady se od sebe liší jiným typem odvzdušnění.

Trvanlivost receptur byla zkoušená pomocí odolnosti betonu proti CHRL. Pro odolnost běžných betonů proti CHRL je ale nejdůležitější kvalitní provzdušnění betonu.

Následující obrázek (obr. 54) znázorňuje graf závislosti provzdušnění a množství mikroskopického vzduchu na množství odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL metodou A a C.



Obr. 54- Graf znázorňující množství čerstvého a mikroskopického vzduchu a hodnoty odpadů pro metodu A a C

Z výsledků z druhé etapy vyplývá, že receptury (PZ34A-S45, PZ39A-S45) s vodním součinitelem 0,45 mají výrazně lepší odolnosti, než receptury (PZ34A-S50, PZ39A-S50) s vodním součinitelem 0,5. tento jev platí jak pro množství cementu 340 kg tak pro množství cementu 390 kg. Můžeme tedy říci, že se zvyšujícím se vodním součinitelem klesají kvalitativní vlastnosti betonu (v našem případě odolnosti betonu proti CHRL), kromě zpracovatelnosti. Tento fakt je dlouhodobě odzkoušený a obecně

přijímaný odbornou veřejností. Zvyšující se množství záměsové vody vytvoří více pórovitý cementový kámen a sníží výslednou kvalitu ztvrdlého betonu.

Z výsledků z druhé etapy zároveň vyplývá, že při stejném vodním součiniteli a podobném provzdušnění, se zároveň se zvyšujícím se množstvím cementu snižuje odolnost betonu proti CHRL. Konkrétně receptura PZ34A-S45 měla vodní součinitel 0,45 a množství cementu 340 kg a její odolnost proti CHRL byla vyhovující, přitom hodnoty množství vzduchu v čerstvém betonu i množství mikroskopického vzduchu jsou poměrně malé. Naopak receptura PZ39A-S45 měla vodní součinitel 0,45 a množství cementu 390 kg, při podobném provzdušnění byla její odolnost proti CHRL menší, zvláště odolnost změřená metodou A. Obě receptury se od sebe liší pouze množstvím cementu. Tento trend můžeme sledovat i při porovnání receptur PZ34A-S50 a PZ39A-S50, které mají vodní součinitel 0,5 a množství cementu 340 a 390 kg. Tento jev je znovu způsoben absolutním množstvím vody v záměsi, čím více vody v záměsi použijeme, při stejném vodním součiniteli, tím horší kvalitativní vlastnosti ztvrdlého betonu dostaneme.

Při porovnání receptur ze třetí etapy, konkrétně receptury PZ34B-S50, která obsahuje 340 kg cementu a vodní součinitel 0,5 a receptury PZ39B-S50, která obsahuje vodní součinitel 0,5 a množství cementu 390 kg, je situace opačná. Tedy receptura s množstvím cementu 390 kg má výrazně lepší odolnosti proti CHRL než receptura s množstvím cementu 340 kg. Nicméně to je pravděpodobně způsobeno kvalitnějším provzdušněním, tedy obsahem mikroskopického vzduchu. Receptura PZ39B-S50 měla obsah mikroskopického vzduchu 1,25 %, zatímco receptura PZ34B-S50 měla obsah mikroskopického vzduchu pouze 0,95 %.

Receptura PZ34B-O50 se od receptury PZ34B-S50 liší pouze typem superplastifikační přísady, jejich odolnosti proti působení CHRL jsou velmi odlišné. Výsledky ukázaly, že při použití přísady s označením O bylo docíleno mnohem kvalitnějšího provzdušnění. Receptura PZ34B-O50 má obsah mikroskopického vzduchu 1,68 %, ale receptura PZ34B-S50 má obsah mikroskopického vzduchu pouze 0,95 %. Stejný trend byl poté pozorován i při porovnání receptur PZ39B-O50 a PZ39B-S50, které se od sebe liší opět jen typem použité superplastifikační přísady. Pravděpodobně přísada s označením O má lepší systém odvodu vzduchu z betonu, a proto je schopná lépe ponechat v receptuře malé vzduchové bublinky a velké vzduchové bubliny odvést pryč z betonu.

4.2.10. Dílčí závěr (trvanlivost provzdušněných betonů)

Preskriptivní charakteristiky jsou velmi obtížně zjistitelné na ztvrdlém betonu, například hodnota vodního součinitele je skoro nezjistitelná. Zůstává zde tedy otázka, zda striktně předepisovat složení betonu, anebo se soustředit na jeho výkonové parametry.

Z provedených zkoušek vyplývá, že při splnění požadavků stanovených normou ČSN EN 206+ A1, není vždy zaručena odolnost betonu proti působení CHRL. Zároveň můžeme konstatovat, že nelze spoléhat pouze na preskriptivní specifikaci betonu, ale je nutné kontrolovat jeho výsledné vlastnosti. ČSN EN 206+ A1 stanovuje pouze požadavek na množství vzduchu v čerstvém betonu, konkrétně 4 %. Jak je vidět z výsledků provedených zkoušek, dostatečný obsah vzduchu v čerstvém betonu není vždy zárukou odolnosti betonu proti působení CHRL. Norma ČSN P 73 2404 stanovuje kromě preskriptivních požadavků na minimální množství cementu a maximální vodní součinitel i výkonové požadavky specifikující odolnost betonu proti CHRL pomocí zkoušek, minimální hodnoty mikroskopického vzduchu a maximální velikosti součinitele rozložení vzduchových pórů.

Dá se konstatovat, že odolnost betonu proti CHRL výrazně souvisí s množstvím mikroskopického vzduchu, se součinitelem rozložení vzduchových pórů a s hutností betonu. Hutnost betonu závisí hlavně na absolutním množství vody v záměsi a množství cementu. Obsah vzduchu je závislý na množství provzdušňovací přísady, typu superplastifikační přísady, množství jemných podílů, typu a délce míšení a konzistencibetonu. I malá změna ve složení receptury má vliv na výsledné odolnosti betonu proti CHRL. Je tedy nutné nespoléhat pouze na preskriptivní složení betonu a průkazní zkoušky, ale průběžně ověřovat odolnosti betonu proti působení CHRL kontrolními zkouškami.

4.3. Trvanlivost betonů s nízkou porozitou

Jak již bylo zmíněno, odolnost betonu proti CHRL lze zaručit kvalitním provzdušněním nebo dostatečnou hutností betonu. V této části práce byly namíchány tři receptury, které mají velmi nízkou porozitu. Jedná se o ultra vysokohodnotný beton (UHPC), který neobsahuje drátky. Tyto tři receptury se od sebe odlišují různým množstvím vody při stejném množství cementu. Nízká porozita byla zaručena plynulou křivkou zrnitosti od nejjemnějších podílů po nejhrubší frakci kameniva a velmi malým množstvím záměsové vody. [13] [36]

4.3.1. Výroba a provedené zkoušky

Míchání probíhalo na betonárně TBG Metrostav s.r.o. na Rohanském ostrově. Jedná se o vertikální betonárnu s mísicím jádrem Liebherr o objemu 2 m³, řízenou vyspělým elektronickým řídicím systémem. Z míchacího jádra byl beton vysypán do autodomíchávače, ze kterého se následně odebralo potřebné množství pro výrobu vzorků. Po zabetonování byly vzorky opatřeny nástřikem proti odparu vody a po odbednění byly vzorky uloženy ve vodě. Velikost záměsi byla 0,4 m³. Vzorky byly následně odvezeny do Kloknerova ústavu ČVUT v Praze, kde byly podrobeny dále popsaným zkouškám.

V čerstvém stavu byla měřena konzistence betonu pomocí zkoušky rozlití kužele a byl měřen čas T_{500} [35], tedy čas měřený od začátku zkoušky po dosažení kružnicové hranice vyznačené na rozlivové desce, o průměru 500 mm. Ve ztvrdlém stavu byla měřena pevnost v tlaku a odolnost betonu proti CHRL metodou A a C.



Obr. 55- Odebírání betonu s nízkou porozitou z autodomíchávače

4.3.2. Vstupní suroviny

Kamenivo

Pro výrobu byl použit speciální druh slévárenského písku s vysokým obsahem SiO₂.

Cement

Pro výrobu byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Radotín. Cement byl uložen v zásobním cementovém silu. Pro výrobu byla použita dávka 750 kg/m³.

Přísady

Pro výrobu byla použita superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátu.

Příměsi

Pro výrobu byla použita mikrosilika, jedná se o latentně hydraulickou příměs s vysokým měrným povrchem.

Voda

Pro výrobu byla použita pitná voda z vodovodního řádu.

4.3.3. Naměřené hodnoty

V této kapitole jsou popsány naměřené hodnoty při zkoušení receptur s nízkou porozitou.

4.3.3.1. Konzistence

Konzistence byla měřena bezprostředně po vyrobení betonu pomocí zkoušky rozliv kužele, při níž byl zároveň měřen čas T₅₀₀ [35]. Během míchání byl sledován odporový konzistoměr, díky kterému lze kontrolovat viskozitu dané směsi. Následující tabulka (Tab. 13) znázorňuje množství cementu v 1 m³, množství vody v 1 m³, dopočítaný poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu, bez zohlednění množství příměsí, hodnoty odporového konzistoměru, naměřený rozliv a určený čas T₅₀₀.

Tab. 13- Konzistence receptur s nízkou porozitou

Receptura	PZ75D-28	PZ75D-25	PZ75D-22
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	750	750	750
Voda/cement	0,28	0,25	0,22
Konzistoměr	5	9	10
Rozliv kužele [mm]	800	790	770
T ₅₀₀ [s]	4,0	4,9	4,4

Konzistence ultra vysokohodnotných betonů je obecně velmi medová, tedy jejich viskozita je velmi vysoká, to znamená, že zpracovatelnost tohoto typu betonu je dosti obtížná, a proto je nutné vyrábět tento materiál jako samozhutnitelný. Zpracovatelnost se s množstvím přidávané vody zlepšovala, čemuž odpovídají jak naměřené hodnoty rozlití, tak hodnoty odporového konzistoměru. Tedy při zvyšování vodního součinitele docházelo ke zlepšení zpracovatelnosti betonu.



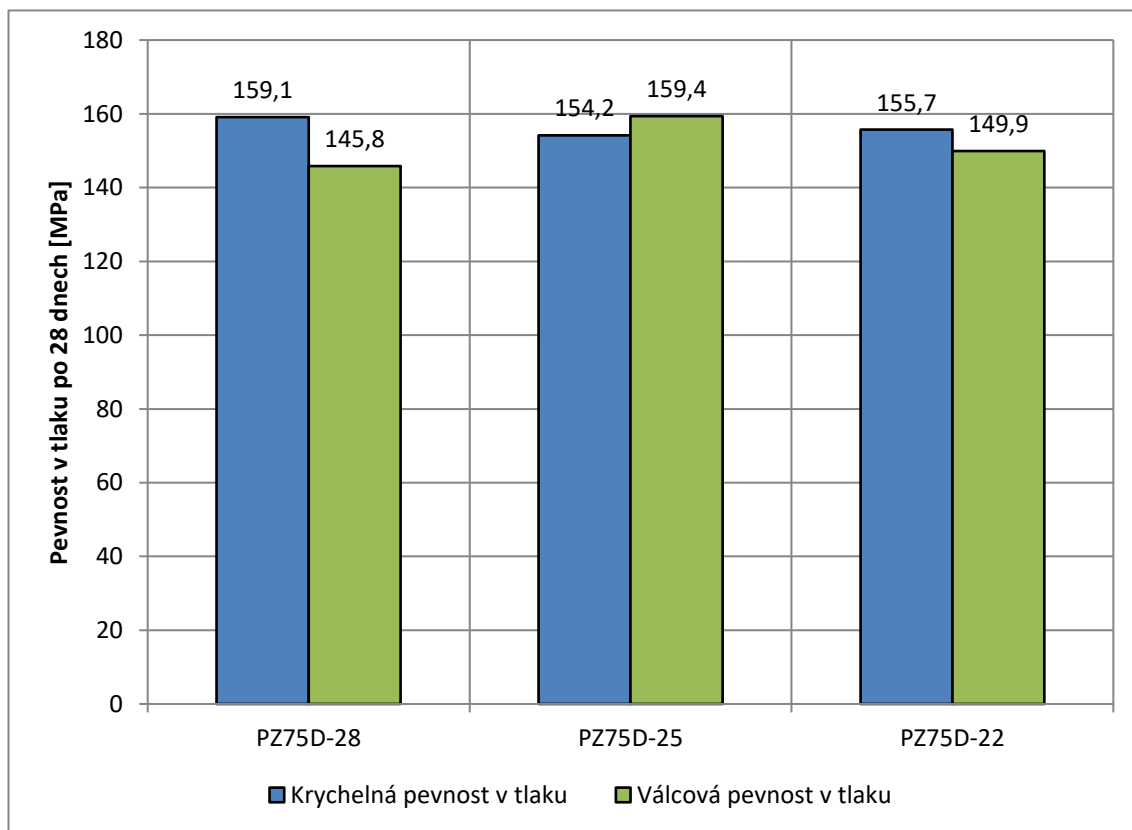
Obr. 56- Měření konzistence rozlitím kužele a času T₅₀₀

4.3.3.2. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla měřena po 28 dnech na krychlích o hraně 100 mm a válcích o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm. Tabulka 14 a obrázek 57 znázorňuje naměřené hodnoty pevnosti v tlaku.

Tab. 14-Naměřené hodnoty pevností v tlaku

Receptura	PZ75D-28	PZ75D-25	PZ75D-22
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	750	750	750
Množství vody v 1 m ³ [kg]	210	187	165
Voda/cement	0,28	0,25	0,22
Pevnost v tlaku: krychle 100 mm [MPa]	159,1	154,2	155,7
Pevnost v tlaku: válec [MPa]	145,8	159,4	149,9



Obr. 57- Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech pro receptury s nízkou porozitou

Naměřené hodnoty pevností v tlaku po 28 dnech jsou poměrně rozporuplné. Při porovnání krychelných pevností v tlaku zjistíme, že receptura PZ75D-28 (poměr voda/cement je 0,28) má nejvyšší krychelnou pevnost, zatímco receptura PZ75D-25 (poměr voda/cement je 0,25) má nejnižší krychelnou pevnost. Nicméně rozdíly mezi jednotlivými výsledky krychelných pevností jsou tak malé, že jsou v podstatě

srovnatelné. Naopak výsledky z válcových pevností ukazují, že receptura PZ75D-25 se středním obsahem záměsové vody (poměr voda/cement je 0,25) má nejvyšší válcovou pevnost v tlaku.

Pro dosažení pevností v tlaku okolo 150 MPa je nutné správně poskládat plynulou křivku zrnitosti od nejjemnějších částic po největší a zároveň použít velmi malé množství vody, tak aby vznikl co nejméně pórovitý cementový tmel. Při určování plynulé křivky zrnitosti se předpokládá, že určitá část cementových zrn nezhydratuje a vyplní mikroskopické póry. Poměr nezhydratovaných a zhydratovaných zrn cementu je velmi těžko určitelný. Zvyšování množství záměsové vody do určité míry může způsobit hydrataci většího množství cementových zrn, tedy poměr zhydratovaných a nezhydratovaných cementových zrn bude příznivější, a proto mohou pevnosti se zvyšujícím se množstvím vody narůstat. [36]

Z provedeného experimentu nelze určit, zda v tomto konkrétním případě zvyšování množství vody (konkrétně ze 165 kg/m^3 na 210 kg/m^3) přineslo prokazatelné zlepšení požadovaných vlastností, protože krychelné pevnosti nekorrespondují s válcovými pevnostmi a hodnoty krychelných pevností jsou v podstatě srovnatelné. Můžeme ale pozorovat, že u tohoto typu materiálu neplatí obecně přijímaná závislost mezi krychelnou a válcovou pevností, tedy že válcová pevnost dosahuje zhruba 80 % krychelné pevnosti. Je tedy nutné vždy experimentálně ověřit převodní vztah mezi krychlenou a válcovou pevností.

Jistý problém mohl také nastat při vytváření vzorků. Beton byl odebrán z autodomíchače do vaničky o objemu 200 l, z této vaničky byly následně plněny vzorky, protože se jedná o samozhutnitelný beton, nebyl podroben vibraci. Beton se ve vaničce nacházel v poměrně vysoké vrstvě a vzhledem k jeho velmi tekuté konzistenci, mohlo dojít k segregaci materiálu, která nebyla okem patrná z důvodu velmi jemných zrn kameniva.

4.3.3.3. Odolnost proti CHRL

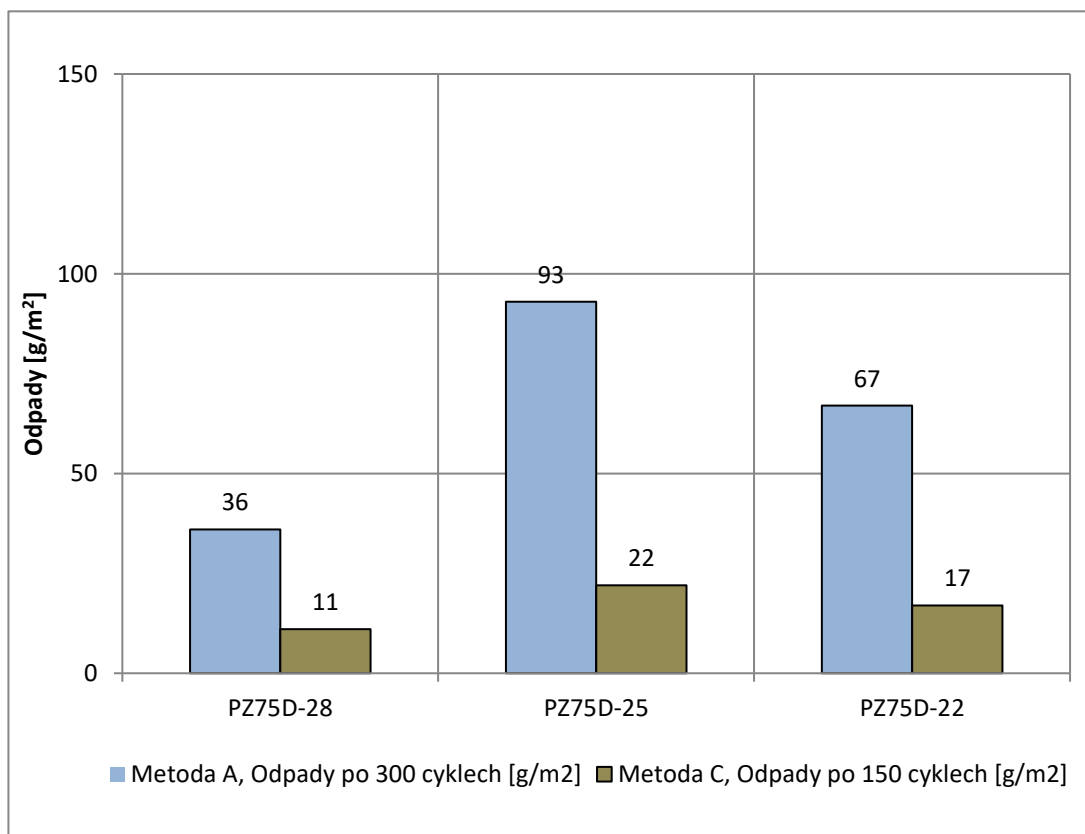
U všech tří receptur byla zkoušena odolnost proti působení CHRL pomocí metody A i metody C. Protože předpokladem bylo, že ultra vysokohodnotný beton bude mít výrazně lepší odolnost proti CHRL než klasické provzdušněné betony, bylo zvoleno čtyřnásobné množství cyklů pro obě metody, tedy 400 cyklů pro metodu A a 300 cyklů pro metodu C. Protože průběh zkoušek je poměrně dlouhý a množství cyklů veliké,

experiment stále probíhá. Budou zde tedy uvedeny průběžně naměřené hodnoty odolnosti proti CHRL, konkrétně odpady po 300 cyklech metodou A a 150 cyklech metodou C, protože metoda A je časově méně náročná, proběhlo zatím více cyklů. Při výrobě vzorků nebyly zkoušené povrchy nijak upravovány.

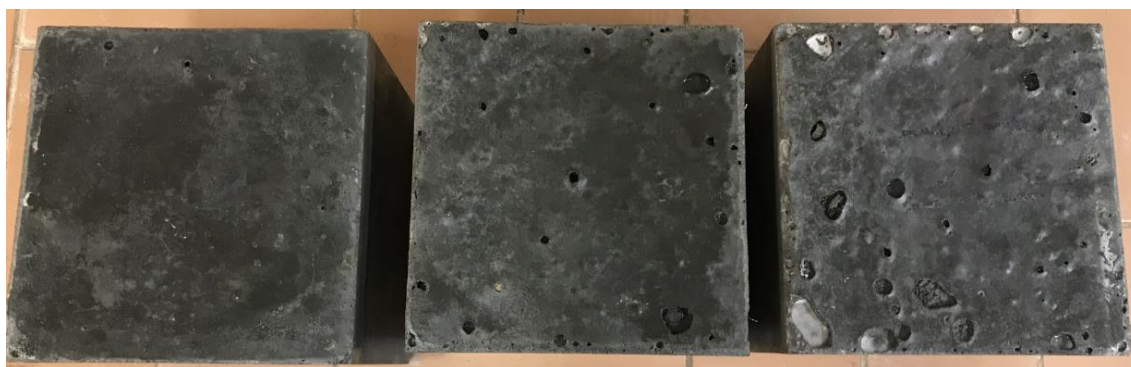
Následující tabulka (Tab. 15) a obrázek (Obr. 58) znázorňují průběžně naměřené hodnoty odpadů, při zkoušení odolnosti proti CHRL, po 150 cyklech metodou C a 300 cyklech metodou A. Obrázek 59 ukazuje zkoušené povrchy jednotlivých receptur po provedení 300 cyklů metodou A a obrázek 60 ukazuje zkoušené povrchy jednotlivých receptur po provedení 150 cyklů metodou C.

Tab. 15-Naměřené průběžné hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti proti CHRL

Receptura	PZ75D-28	PZ75D-25	PZ75D-22
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	750	750	750
Množství vody v 1 m ³ [kg]	210	187	165
Voda/cement	0,28	0,25	0,22
Metoda A, Odpady po 300 cyklech [g/m ²]	36	93	67
Metoda C, Odpady po 150 cyklech [g/m ²]	11	22	17



Obr. 58- Graf znázorňující odpady receptur s malou porozitou při zkouškách odolností proti CHRL



PZ75D-28

PZ75D-25

PZ75D-22

Obr. 59- Ukázky povrchů jednotlivých receptur po provedení 300 cyklů metodou A



PZ75D-28

PZ75D-25

PZ75D-22

Obr. 60- Ukázky povrchů jednotlivých receptur po provedení 150 cyklů metodou C

Přestože zkoušení není stále u konce, můžeme konstatovat, že všechny receptury mají výbornou odolnost proti CHRL, a to na základě naměřených odpadů i vizuálního hodnocení, nejhůře se zatím jeví receptura PZ75D-25, ale rozdíly v odpadech oproti ostatním recepturám jsou velmi malé. Konkrétně rozdíl mezi recepturou PZ75D-28 s nejlepší odolností proti CHRL a recepturou PZ75D-25 s nejhorší odolností proti CHRL je po provedení 300 cyklů metodou A 57 g/m^2 , tedy reálně naměřený hmotnostní rozdíl mezi odpady z receptury PZ75D-25 a PZ75D-28 je 1,45 g.

Zajímavé je, že receptura PZ75D-28 s největším množstvím vody (poměr voda/cement je 0,28) má vizuálně nejhezčí povrch, to je pravděpodobně způsobeno konzistencí betonu, protože tato receptura měla díky největší dávce vody nejméně viskózní konzistenci.

4.3.4. Dílčí závěr (betony s nízkou porozitou)

Rozporuplné výsledky pevností v tlaku svědčí o tom, že se v daném experimentu nepodařilo prokázat vliv zvyšujícího se množství vody z 165 l/m³ (poměr voda/cement= 0,22) na 210 l/m³ (poměr voda/cement= 0,28) na pevnost v tlaku u ultra vysokohodnotných betonů. Krychelné pevnosti v tlaku byly pro všechny tři receptury srovnatelné a neodpovídaly válcovým pevnostem v tlaku. Zároveň tedy nebylo možné určit, při jakém poměru voda/cement dojde k nejuhodnějšímu poměru zhydratovaných a nezhydratovaných cementových zrn, v návaznosti na pevnost v tlaku.

Experiment ale prokázal, že u ultra vysokohodnotných betonů můžeme očekávat jiné chování materiálu, než je tomu u běžných betonů. Například pro vztah mezi krychelnou a válcovou pevností neplatí předpoklad, že válcová pevnost odpovídá 80 % krychelné pevnosti. Z výsledků vyplývá, že válcové pevnosti se blíží krychelným pevnostem, například u receptury PZ75D-25 byly naměřené válcové pevnosti vyšší než krychelné. To znamená, že uvádět pevnostní třídu C 130/150 může být velmi scestné. Při běžné praxi se pevnost betonu v tlaku zkouší na krychlích většinou o hraně 150 mm, zatímco statický výpočet podle ČSN EN 1992-1-1 [37] se řídí válcovými pevnostmi. Je tedy nutné v případě ultra vysokohodnotných betonů vždy experimentálně stanovit převodní vztah mezi krychelnými a válcovými pevnostmi.

Průběžné výsledky odolností ultra vysokohodnotných betonů proti působení CHRL ukázaly, že se jedná o nadměrně odolný materiál, který může být vystaven velmi extrémnímu prostředí. Odborná veřejnost uvádí trvanlivost materiálu až 200 let. Výsledky potvrdily, že využití materiálu jako ochranné vrstvy běžného betonu před velmi agresivním prostředím, je vhodné, konkrétně pro betony vystavené prostředí XF2 a XF4.

5. REKAPITULACE VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou tabulkově zrekapitulovány výsledky z provedeného experimentu. Tabulka 16 rekapituluje výsledky ze zkoušení provzdušněných betonů a tabulka 17 rekapituluje výsledky ze zkoušení betonů s nízkou porozitou.

5.1. Provzdušněné betony

Tab. 16- Rekapitulace naměřených hodnot pro provzdušněné betony

Etapa	1.	2.			
Receptura	PZ38C-O52	PZ34A-S45	PZ34A-S50	PZ39A-S45	PZ39A-S50
Typ superplastifikační přísady	O	S	S	S	S
Vodní součinitel	0,52	0,45	0,5	0,45	0,5
Množství vody v 1 m ³ [kg]	198	148	168	174	195
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	380	340	340	390	390
Sednutí kužele [mm]	160	190	190	170	200
Obsah vzduchu [%]	5,0	3,7	3,9	4,1	4,1
Obsah mikroskopického vzduchu-A ₃₀₀ [%]	1,43	0,56	0,87	0,90	0,58
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů-L [mm]	0,186	0,194	0,216	0,184	0,269
Krychelná pevnosti betonu v tlaku po 30 dnech [Mpa]	55,0	62,8	57,1	61,6	53,5
Odolnost proti CHRL, Metoda C, odpady po 75 cyklech [g/m ²]	119,0	39,8	4331,7	378,0	6523,3
Odolnost proti CHRL, Metoda A, odpady po 100 cyklech [g/m ²]	1915,1	1513,9	7566,8	4364,0	10993,0
Etapa	3.				
Receptura	PZ34B-S50	PZ34B-O50	PZ39B-S50	PZ39B-O50	
Typ superplastifikační přísady	S	O	S	O	
Vodní součinitel: předpokládaný	0,5	0,5	0,5	0,5	
Množství vody v 1 m ³ [kg]	167	166	190	194	
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	340	340	390	390	
Sednutí kužele [mm]	220	210	210	220	
Obsah vzduchu [%]	5,5	5,0	5,3	5,5	
Obsah mikroskopického vzduchu-A ₃₀₀ [%]	0,95	1,68	1,25	2,21	
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů-L [mm]	0,274	0,173	0,196	0,181	
Krychelná pevnosti betonu v tlaku po 30 dnech [Mpa]	49,2	47,8	48,4	42,6	
Odolnost proti CHRL, Metoda C, odpady po 75 cyklech [g/m ²]	Hlazený	4211,3	153,2	198,3	62,4
	Řez	4523	737,7	2316,9	11,3
	Dno	5735,9	1861,3	1138,6	90,7

Odolnost proti CHRL, Metoda A, odpady po 100 cyklech [g/m ²]	Hlazený	7966,8	755,6	3203,8	829,9
	Řez	5071,1	1572,9	1163,2	925,3
	Bok	9891,7	4835,2	4845,9	986,4

5.2. Betony s nízkou porozitou

Tab. 17-Rekapitulace naměřených hodnot pro betony s nízkou porozitou

Receptura	PZ75D-28	PZ75D-25	PZ75D-22
Množství cementu v 1 m ³ [kg]	750	750	750
Množství vody v 1 m ³ [kg]	210	187	165
Voda/cement	0,28	0,25	0,22
Rozliv kužele [mm]	800	790	770
T ₅₀₀ [s]	4,0	4,9	4,4
Pevnost v tlaku: krychle 100 mm [MPa]	159,1	154,2	155,7
Pevnost v tlaku: válec [MPa]	145,8	159,4	149,9
Metoda A, Odpady po 300 cyklech [g/m ²]	36	93	67
Metoda C, Odpady po 150 cyklech [g/m ²]	11	22	17

6. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá trvanlivostí betonů v prostředí XF2 a XF4, jedná se o beton vystavený působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Trvanlivost betonů je důležitým tématem z hlediska zajištění požadované životnosti konstrukcí a udržitelných provozních nákladů.

6.1. Splnění cílů práce

Na začátku teoretické části v kapitole 3.1 a 3.2 jsou shrnuty dva základní přístupy k návrhu betonové směsi. Přístupy byly rozděleny na výkonovou specifikaci betonové směsi, která se primárně soustředí na výkonové nebo výsledné parametry betonu a preskriptivní specifikaci, která se primárně soustředí na předpisové složení betonu.

Shrnutí požadavků na beton v prostředí XF je provedeno v kapitole 3.4. Různé metody zkoušení odolností betonu proti působení CHRL jsou shrnuty v kapitole 3.6 a problémy spojené se zkoušením betonů jsou uvedeny v kapitole 3.7. Problémy byly následně rozděleny do tří skupin na problémy při výrobě a ošetřování, problémy spojené se zkoušením a problémy s vyhodnocením výsledků.

Experimentální část se primárně zaměřuje na zkoušení trvanlivosti provzdušněných betonů a byla doplněna o část týkající se zkoušení trvanlivosti betonů s nízkou porozitou (ultra vysokohodnotných betonů), vždy pomocí stanovení odolností proti CHRL. V části zkoušení provzdušněných betonů byla vytvořena a zkoušena série receptur, která se odlišovala různým vodním součinitelem, různým množstvím cementu a různým provzdušněním. U všech receptur byly zkoušeny odolnosti betonu proti působení CHRL metodou A a C. Porovnání metod A a C je provedeno v kapitole 4.2.5 a porovnání různých zkoušených povrchů je provedeno v kapitole 4.2.7. Experimentální analýza vlivu vodního součinitele je provedena v kapitole 4.2.9. Kapitola 4.3.3 se zabývá porovnáním odolností betonu s nízkou porozitou proti CHRL, byly zde vytvořeny tři receptury, které se odlišovaly různým množstvím záměsové vody.

Na základě výše uvedeného lze považovat cíle diplomové práce za splněné.

6.2. Závěry vztahující se ke stanovení odolnosti betonu proti CHRL

- Odolnost proti působení CHRL u provzdušněných betonů nejvíce závisí na kvalitě provzdušnění, tedy ne tolik na množství vzduchu v čerstvém betonu, ale spíše na množství mikroskopického vzduchu a součiniteli rozložení vzduchových pórů. Dalším důležitým vlivem je absolutní množství vody v záměsi.
- Při zkoušení odolnosti betonu proti CHRL se metoda A jeví jako výrazně agresivnější než metoda C, i když norma ČSN P 73 2404 uvažuje obě metody jako stejně agresivní. Dle pozorování je tento jev způsoben hlavně hranovým efektem a vzlínáním roztoku po stranách tělesa, oběma problémům se dá jednoduše zabránit zaizolováním nezkoušených povrchů tělesa, jako je to běžně prováděno v zahraničí.
- Je nutné, aby při požadavcích na beton odolný proti působení CHRL, byla jasně specifikována metoda zkoušení.
- Výsledky ukázaly, že normový způsob úpravy povrchu zkušebního tělesa (zarovnání povrchu pilovitým pohybem ocelového pravítka) má kladný vliv na odolnosti betonu proti působení CHRL
- Odolnost povrchů simulující svislé povrchy z bednění byla výrazně nižší než odolnost hlazených povrchů. Znamená to tedy, že i když hlazený povrch splní požadavky na odolnost proti CHRL, není zaručeno, že tyto požadavky splní i svislé povrchy z bednění.
- Z výsledků vyplývá, že i když hlazený povrch splní přísnější kritéria prostředí XF4, není zaručeno, že svislý povrch z bednění splní kritéria prostředí XF2 stanovené ČSN P 73 2404. Pokud jsou definovány benevolentnější kritéria pro prostředí XF2, ale stále zkoušíme povrch zarovnaný pilovitým pohybem ocelového pravítka, znamená to, že reálný svislý povrch z konstrukce může mít velmi malou odolnost proti působení CHRL a trvanlivost takového betonu bude neakceptovatelná.
- V 2. etapě zkoušení bylo prokázáno, že snižující se vodní součinitel zvyšuje odolnosti betonu proti CHRL, zároveň ale bylo ukázáno, že při stejném vodním součiniteli klesá odolnost proti CHRL se zvyšujícím se množstvím cementu. To je způsobeno zvyšujícím se absolutním množstvím vody v záměsi.

- Bylo prokázáno, že betony obsahující superplastifikační přísadu O mají výrazně lepší odolnosti betonu proti působení CHRL než betony obsahující superplastifikační přísahu S, z důvodů lepšího odvodu makroskopického vzduchu a lepší tvorby mikroskopického vzduchu.
- Protože jen malá změna receptury může mít významný vliv na konečné odolnosti, nestačí pouze spoléhat na předpisové složení betonu, ale je nutné kontrolovat výkonové parametry, v tomto případě odolnost betonu proti CHRL, pomocí kontrolních zkoušek.
- Výkonová specifikace je lépe využitelná při použití místních zdrojů, protože se soustředí na výsledné požadavky, a ne na vstupní suroviny.

6.3. Závěry týkající se betonů s nízkou porozitou

- Z výsledků se dá předpokládat, že u ultra vysokohodnotných betonů nemusí platit obecně přijímané závislosti platné pro beton standartních pevnostních tříd.
- Válcová pevnost ultra vysokohodnotných betonů neodpovídá 80 % krychelné pevnosti, a je nutné vždy experimentálně ověřit převodní vztah mezi válcovou a krychelnou pevností, případně definovat na jakých tělesech se bude pevnost v tlaku zkoušet.
- Trvanlivost ultra vysokohodnotných betonů, zkoušená odolností betonu proti CHRL, je vynikající, naměřené odpady pro všechny tři receptury po trojnásobku cyklů požadovaných ČSN P 73 2404 pro beton vystavený prostředí XF4 (300 cyklů, metoda A) byly minimální (do 100 g/m²). Tímto byla potvrzena předpokládaná životnost udávaná v literatuře až 200 let.
- Bylo prokázáno, že využití ultra vysokohodnotného betonu je vhodné do velmi agresivního prostředí, nebo jako krycí a ochranná vrstva běžného betonu před agresivním prostředím.

6.4. Předmět dalšího výzkumu

- Pro zkoušení odolnosti betonu proti působení CHRL metodou A, je nutné ověřit vliv zaizolování nezkoušených povrchů zkušebních těles, tedy omezit vliv hranového efektu a vzlínání roztoku po stěnách vzorků a porovnat výsledky z nezaizolovaných a zaizolovaných vzorků.
- Porovnat odolnost proti CHRL hlazených povrchů zkušebních vzorků s odolností reálných svislých konstrukcí z bednění, pomocí provedení velkoformátového prvku a následně provedení vývrtů ze svislé stěny.
- U ultra vysokohodnotných betonů experimentálně ověřit závislost dalších parametrů na pevnosti v tlaku, například pevnost v tahu, pevnost v příčném tahu a jiné.
- Ověřit trvanlivost ultra vysokohodnotných betonů pomocí stanovení mrazuvzdornosti betonu.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura

- [1] BICKEY, John, R. Doug HOOTON, Kenneth C. HOVER. Preparation of a Performance-based Specification for Cast-In-Place Concrete. In: *NRMCA research and engineering* [online]. RMC Research Foundation, 2006. [cit. 14-5-2018]. Dostupné z: <http://www.nrmca.org/P2P/Phase%20I%20Report%20Final%20January%202006.pdf>
- [2] ACI Committee 329. *Report on Performance-Based Requirements for Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014. P. 46. ISBN 978-0-87031-974-7
- [3] LOBO, Colin, Lionel LEMAY, Karthik OBLA. Performance-Based Specifications for Concrete. In: *NRMCA research and engineering* [online]. NRMCA, 2012. [cit. 17-5-2018]. Dostupné z: <https://www.nrmca.org/research/Performance-based%20Specifications%20for%20Concrete%20Paper%20for%20AE%20Conference.pdf>
- [4] HOBZA, J. *Performance-based design složení betonové směsi: bakalářská práce*. Praha: ČVUT fakulta stavební, 2017
- [5] HOBZA, J., COUFAL, VÍTEK, J. Specifikace betonu pomocí jeho vlastností. *Beton TKS*, 2018, č. 2, s 54-58. ISSN 1213-3116
- [8] *P2P Initiative* [online]. NMRCA, 2013. [cit. 2-6-2018]. Dostupné z: https://www.nrmca.org/research_engineering/P2P/About5.htm
- [12] MISÁK, P., VYMAZAL, T., ŽALUD, O., KUCHARCZYKOVÁ, B. Stanovení odolnosti betonu proti CHRL podle ČSN 73 1326- opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků zkoušek. *Beton TKS*, 2013, č. 4, s 120-124. ISSN 1213-3116
- [13] BECHYNĚ, Stanislav, *Stavitelství betonové- I, vodotěsnost a jiné stavební a fyzikální vlastnosti betonu, svazek pátý*. Praha: STNL, 1961
- [14] BÍLEK, Vlastimil, Mrazuvzdornost betonu z druhého konce. In: *Sborník konference Betonářské dny 2005*. Praha: ČSSI (ČBS), 2005, s 109-114. ISBN 80-86765-39-9
- [15] ZHANG, Jiake, *Investigation of deterioration of joints in concrete pavement*. Iowa: Iowa State University, 2013
- [16] TEPLÝ, B., ROVNANÍK, P. Účinky mrazu na beton. *Beton TKS*, 2007, 4, pp. 42-45, ISSN 1213-3116

- [17] ŠAFRATA, Pavel. *Studium možnosti zlepšení mrazuvzdornosti betonu*: Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [21] VASSILIEV, Dimitre Georgiev. *Evaluation of Test Methods for De-Icer Scaling Resistance of concrete*. Toronto: 2012, University of Toronto
- [22] SETZER, M. J., FAGERLUND, G., JANSSEN, D. J., CDF test-Test method for the freeze-thaw resistance-test with sodium chloride solution. In: *Institute of materials science* [online.] Universität Duisburg-essen, 2014. [vid. 2018-11-18]. Dostupné z: https://www.uni-due.de/ibpm/Projekte/CDF_eng.pdf
- [23] VYMAZAL, T., ŽALUD, O., MISÁK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B. RUMEL, I., Vliv zkušebních forem a ošetřování těles na výsledky zkoušek fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu. *Beton TKS*, 2001, č. 4, s 76-79. ISSN 1213-3116
- [24] KOCÁB, D., MISÁK, P., VYMAZAL, T., KOMÁRKOVÁ, T., HALAMOVÁ, R., Stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek-Metody, praxe, problémy. *Beton TKS*, 2017, č. 2, s 42-47. ISSN 1213-3116
- [25] DOHNÁLEK, J., HELA, R., TŮMA, P., KOLÍSKO, J., HROMÁDKO, J. Zkoušení mrazuvzdornosti betonu. *Beton TKS*, 2008, č. 3, s 54-60. ISSN 1213-3116
- [26] MISÁK, P., VYMAZAL, T., ŽALUD, O., KUCHARCZYKOVÁ, B. Stanovení odolnosti betonu proti CHRL podle ČSN 73 1326- opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků zkoušek. *Beton TKS*, 2013, č. 4, s 120-124. ISSN 1213-3116
- [28] Sednutí kužele. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 1.11. 2018]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/sednuti-kuzele>
- [31] Pevnost v tlaku. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 1. 11. 2018]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>
- [33] PAVLÍKOVÁ, Milena, Zbyšek Pavlík, Jiří Hošek. *Materiálové inženýrství 1, druhé rozšířené vydání*. Praha, 2011.
- [34] AVA-Test description. In: *Germann Instruments* [online]. Germann Instruments, Inc. [vid. 11-18-2018]. Dostupné z: <http://germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava>
- [36] FEHLING, Ekkelhard, Michael Schmidt, Joost Walraven, Torsten „eutbecher, Susanne Frohlich. *BetonKalender: Ultra-High Performance concrete UHPC*. Wilhelm Ernst a Sohn. Berlín, 2014. ISBN: 978-3-433-03087-5.

Normy

- [6] ČSN P 73 2404, *Beton-Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda-doplňující informace*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016
- [7] ČSN EN 206+ A1, *Beton-Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018
- [9] STN EN 206+ A1, *Betón- špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda*. ICS 91.100.30. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo SR, 2017.
- [10] STN 73 1326, *Stanovenie odolnosti povrchu cementového betónu proti pôsobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok*. ICS 91.100.30. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo SR, 2016.
- [11] ACI 318-14, *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014. ISBN: 978-0-87031-930-3
- [18] ČSN 73 1326 -Z1, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látkách*. ICS 91.100.30. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [19] ČSN 73 1326, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látkách*. MDT 666.972.017. Praha: Český normalizační institut, 1984
- [20] ČSN P CEN/TS 12390-9, *Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování-Odlupování*. ICS 91.100.30. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [27] ČSN EN 12350-2, *Zkoušení čerstvého betonu-Část 2: Zkouška sednutím*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [29] ČSN EN 12350-7, *Zkoušení čerstvého betonu-Část 7: Obsah vzduchu-Tlakové metody*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [30] ČSN EN 12390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [32] ČSN EN 480-11, *část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. ICS 91.100.30. Praha: Český normalizační institut, 2006

[35] ČSN EN 12350-8, *Zkoušení čerstvého betonu-Část 8: Samozhutitelný beton-Zkouška sednutí-rozlitím*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010

[37] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2; *Navrhování betonových konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*; Praha: ÚNMZ, 2011

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1- Zamrznutí vody v pórech v závislosti na teplotě a velikosti pórů [15]	20
Obr. 2- Chování ledu a vody v kapilárním póru během zmrazovacího cyklu [14].....	21
Obr. 3- Schématické znázornění glue-spall efektu [15].....	22
Obr. 4- Schématické znázornění glue-spall efektu na povrchu betonu [15]	22
Obr. 5- Schéma průběhu teploty při metodě C [18].....	24
Obr. 6- Schéma připevnění objímky na vzorek [19].....	25
Obr. 7- Mezní křivky pro průběh teploty v mrazícím boxu [20]	26
Obr. 8- Schematický řez zkoušeným vzorkem [20].....	26
Obr. 9- Schéma umístění vzorku při fázi kapilární vztlínání [22].....	29
Obr. 10- Schéma umístění vzorku při fázi zmrazovacích cyklů [22].....	30
Obr. 11- Zkouška sednutí kužele [28].....	33
Obr. 12- Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu	34
Obr. 13- Zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu-detail	34
Obr. 14- Zkouška pevnosti v tlaku [31]	35
Obr. 15- Schéma vyříznutí zkušební vzorku ze zkušební tělesa [32]	36
Obr. 16- Betonárna TBG Metrostav v Radlicích	39
Obr. 17- Tvrdnutí vyrobených vzorků	39
Obr. 18- Odebírání betonu pro výrobu vzorků.....	40
Obr. 19- Schéma zkoušených povrchů ve 3. Etapě.....	40
Obr. 20- Křivka zrnitosti jednotlivých frakcí.....	41
Obr. 21- Křivka zrnitosti výsledných receptur.....	41
Obr. 22- Graf znázorňující výsledné pevnosti betonu v tlaku v závislosti na vodním součiniteli, množství cementu a typu přísady	46
Obr. 23- Graf znázorňující výsledné hodnoty obsahu mikroskopického vzduchu a součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů	48
Obr. 24- Graf znázorňující obsah vzduchu v čerstvém betonu a obsah mikroskopického vzduchu	49
Obr. 25- AVA: Odebrání vzorku, aparatura, měření [34].....	50
Obr. 26- Odpady hlazených povrchů zkoušených metodou C.....	52
Obr. 27- Odpady hlazených povrchů zkoušených metodou A	52
Obr. 28- Receptura: PZ38C-O52, povrch: Hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků.....	55
Obr. 29- Receptura: PZ34A-S45, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	55
Obr. 30- Receptura: PZ34A-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	56

Obr. 31- Receptura: PZ39A-S45, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	56
Obr. 32- Receptura: PZ39A-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	57
Obr. 33- Receptura: PZ34B-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	57
Obr. 34- Receptura: PZ34B-O50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	58
Obr. 35- Receptura: PZ39B-S50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	58
Obr. 36- Receptura: PZ39B-O50, povrch: hlazený, porovnání metod A a C-povrchy zkoušených vzorků	59
Obr. 37- Porovnání zkoušených řezů metodou A a C pro receptury PZ34B-S50, PZ34B-O50, PZ39B-S50 a PZ39B-O50	61
Obr. 38- Receptura: PZ34B-S50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	63
Obr. 39- Receptura: PZ34B-S50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech.....	63
Obr. 40- Receptura: PZ34B-O50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	64
Obr. 41- Receptura: PZ34B-O50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech.....	64
Obr. 42- Receptura: PZ39B-S50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	64
Obr. 43- Receptura: PZ39B-S50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech.....	65
Obr. 44- Receptura: PZ39B-O50, Metoda C, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	65
Obr. 45- Receptura: PZ39B-O50, metoda C, ukázky povrchů po 75 cyklech.....	65
Obr. 46- Receptura: PZ34B-S50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	66
Obr. 47- Receptura: PZ34B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech	67
Obr. 48- Receptura: PZ34B-O50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	67
Obr. 49- Receptura: PZ34B-O50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech.....	67
Obr. 50- Receptura: PZ39B-S50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	68
Obr. 51- Receptura: PZ39B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech	68
Obr. 52- Receptura: PZ39B-O50, Metoda A, hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti betonu proti CHRL	68
Obr. 53- Receptura: PZ39B-S50, metoda A, ukázky povrchů po 100 cyklech	69
Obr. 54- Graf znázorňující množství čerstvého a mikroskopického vzduchu a hodnoty odpadů pro metodu A a C	71
Obr. 55- Odebírání betonu s nízkou porozitou z autodomíchávače	74
Obr. 56- Měření konzistence rozlitím kužele a času T_{500}	76

Obr. 57- Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech pro receptury s nízkou porozitou....	77
Obr. 58- Graf znázorňující odpady receptur s malou porozitou při zkouškách odolností proti CHRL.....	79
Obr. 59- Ukázky povrchů jednotlivých receptur po provedení 300 cyklů metodou A	80
Obr. 60- Ukázky povrchů jednotlivých receptur po provedení 150 cyklů metodou C	80
Obr. 61- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ38C-O52	98
Obr. 62- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34A-S45	98
Obr. 63- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34A-S50	98
Obr. 64- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39A-S45	99
Obr. 65- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39A-S50	99
Obr. 66- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34B-S50.....	99
Obr. 67- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34B-O50.....	100
Obr. 68- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39B-S50.....	100
Obr. 69- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39B-O50.....	100
Obr. 71- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ38C-O50.....	102
Obr. 72- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34A-S45	102
Obr. 73- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34A-S50	102
Obr. 74- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39A-S45	103
Obr. 75- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39A-S50	103
Obr. 76- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34B-S50	103
Obr. 77- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ34B-S50.....	103
Obr. 78- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ34B-S50.....	104
Obr. 79- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34B-O50.....	104
Obr. 80- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ34B-O50	104
Obr. 81- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ34B-O50	104
Obr. 82- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39B-S50	105
Obr. 83- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ39B-S50.....	105
Obr. 84- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ39B-S50.....	105
Obr. 85- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39B-O50.....	105
Obr. 86- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ39B-O50	106
Obr. 87- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ39B-O50	106
Obr. 88- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ38C-O52	106
Obr. 89- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34A-S45	106
Obr. 90- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34A-S50.....	107
Obr. 91- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39A-S45.....	107
Obr. 92- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39A-S50.....	107
Obr. 93- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34B-S50	107

Obr. 94- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ34B-S50.....	108
Obr. 95- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ34B-S50.....	108
Obr. 96- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34B-O50	108
Obr. 97- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ34B-O50	108
Obr. 98- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ34B-O50.....	109
Obr. 99- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39B-S50	109
Obr. 100- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ39B-S50.....	109
Obr. 101- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ39B-S50	109
Obr. 102- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39B-O50	110
Obr. 103- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ39B-O50.....	110
Obr. 104- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ39B-O50.....	110

9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1-	Tabulka F.1.1. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu [6], životnost 50 let	13
Tab. 2-	Tabulka F.1.2. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu [6], životnost 100 let	14
Tab. 3-	Tabulka F.1, Odporované medzné hodnoty zloženia a vlastnosti betónu [9]	15
Tab. 4-	Požadavky na beton pro stupně vlivu prostředí F0-F3 dle ACI 318-14 [11]	17
Tab. 5-	Doporučené hodnoty pro mezní složení a vlastnosti betonu [7].....	18
Tab. 6-	Schéma vytvořených receptur	Chyba! Záložka není definována.
Tab. 7-	Porovnání konzistence receptur pomocí sednutí kužele a odporového konzistoměru	43
Tab. 8-	Výsledky měření obsahu vzduchu na čerstvém betonu	44
Tab. 9-	Výsledky krychelných pevností v tlaku pro jednotlivé receptury	45
Tab. 10-	Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu pro jednotlivé receptury	47
Tab. 11-	Výsledky naměřených odpadů pro různé metody, receptury a povrchy	51
Tab. 12-	Stáří vzorků při začátku zkoušky odolnosti betonu proti CHRL	54
Tab. 13-	Konzistence receptur s nízkou porozitou.....	76
Tab. 14-	Naměřené hodnoty pevností v tlaku	77
Tab. 15-	Naměřené průběžné hodnoty odpadů při zkoušce odolnosti proti CHRL	79
Tab. 16-	Rekapitulace naměřených hodnot pro provzdušněné betony	82
Tab. 17-	Rekapitulace naměřených hodnot pro betony s nízkou porozitou.....	83
Tab. 18-	Kompletní výsledky krychelných pevností v tlaku	101
Tab. 19-	Výsledky pevností v tlaku pro betony s nízkou porozitou	111

10. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1- Obrázky sednutí kužele jednotlivých receptur	98
Příloha č. 2- Krychelná pevnost v tlaku u provzdušněných betonů.....	101
Příloha č. 3- Obrázky zkoušených povrchů jednotlivých receptur	102
Příloha č. 4- Kompletní výsledky pevností v tlaku pro betony s nízkou porozitou	111

Příloha č. 1- Obrázky sednutí kužele jednotlivých receptur



Obr. 61- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ38C-O52



Obr. 62- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34A-S45



Obr. 63- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34A-S50



Obr. 64- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39A-S45



Obr. 65- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39A-S50



Obr. 66- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34B-S50



Obr. 67- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ34B-O50



Obr. 68- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39B-S50



Obr. 69- Zkouška sednutí kužele, receptura: PZ39B-O50

Příloha č. 2- Krychelná pevnost v tlaku u provzdušněných betonů

Tab. 18-Kompletní výsledky krychelných pevností v tlaku

1. Etapa				
Receptura	Vzorek	Stáří vzorku	Pevnost	Průměrná pevnost
		[den]	[MPa]	
PZ38C-O52	8368/1	31	52,4	55,0
	8368/2	31	55,5	
	8368/3	31	57	
2. Etapa				
Receptura	Vzorek	Stáří vzorku	Pevnost	Průměrná pevnost
		[den]	[MPa]	
PZ34A-S45	8369/1	30	62,3	62,8
	8369/2	30	63,0	
	8369/3	30	63,2	
PZ34A-S50	8370/1	30	56,8	57,1
	8370/2	30	57,0	
	8370/3	30	57,5	
PZ39A-S45	8371/1	30	60,6	61,6
	8371/2	30	62,3	
	8371/3	30	61,9	
PZ39A-S50	8372/1	30	54,4	53,5
	8372/2	30	52,4	
	8372/3	30	53,5	
3. Etapa				
Receptura	Vzorek	Stáří vzorku	Pevnost	Průměrná pevnost
		[den]	[MPa]	
PZ34B-S50	9392/2	30	49,0	49,2
	9392/3	30	50,2	
	9392/4	30	48,5	
PZ34B-O50	9393/2	30	47,1	47,8
	9393/3	30	48,8	
	9393/4	30	47,5	
PZ39B-S50	9394/2	30	47,6	48,4
	9394/3	30	49,0	
	9394/4	30	48,6	
PZ39B-O50	9395/2	30	42,6	42,6
	9395/3	30	42,3	
	9395/4	30	42,8	

Příloha č. 3- Obrázky zkoušených povrchů jednotlivých receptur



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 71- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ38C-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 72- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34A-S45



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 73- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34A-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 74- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39A-S45



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 75- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39A-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 76- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34B-S50

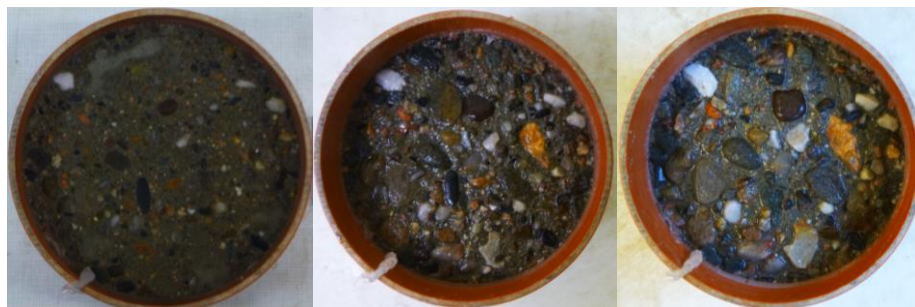


25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 77- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ34B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 78- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ34B-S50

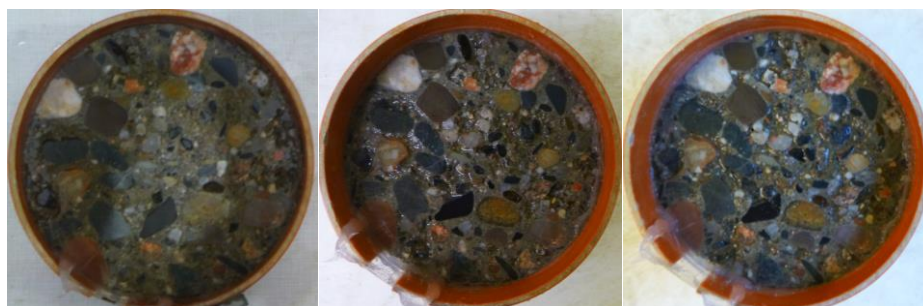


25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 79- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ34B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 80- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ34B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 81- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ34B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 82- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 83- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ39B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 84- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ39B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 85- Ukázky povrchů (hlazený), metoda C, receptura: PZ39B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 86- Ukázky povrchů (řez), metoda C, receptura: PZ39B-O50

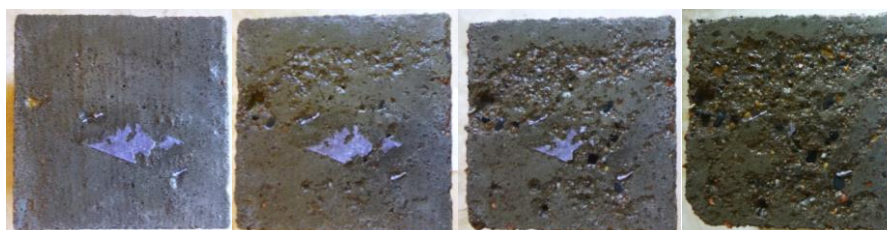


25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

Obr. 87- Ukázky povrchů (dno), metoda C, receptura: PZ39B-O50



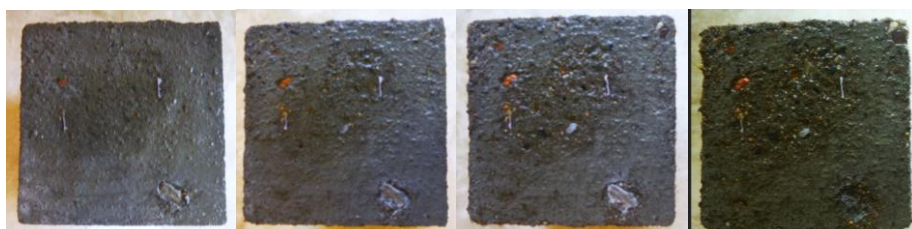
25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 88- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ38C-O52



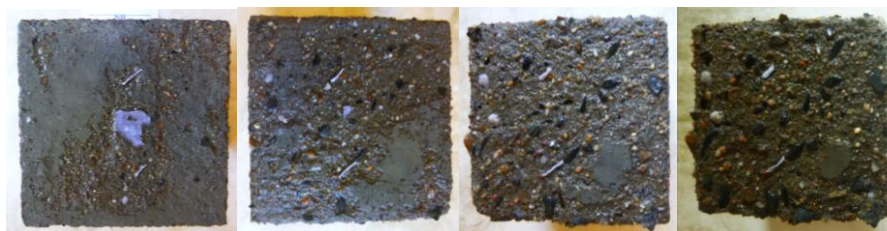
25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 89- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34A-S45



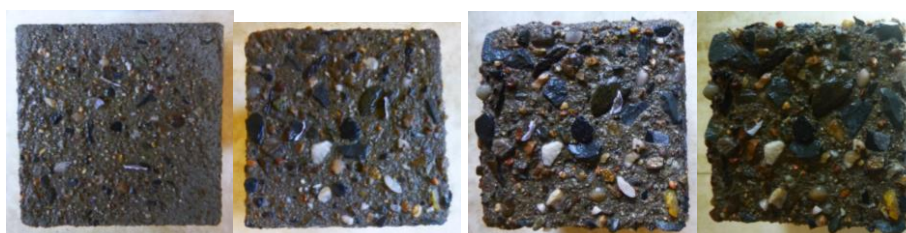
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 90- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34A-S50



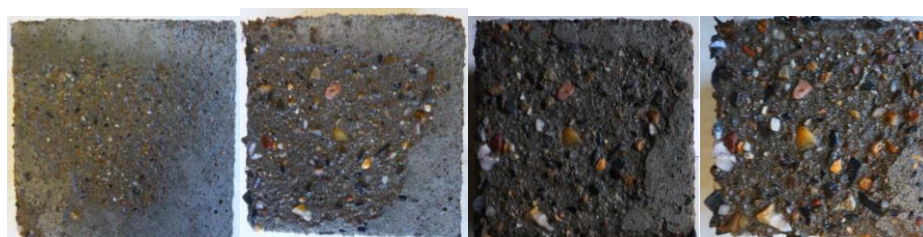
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 91- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39A-S45



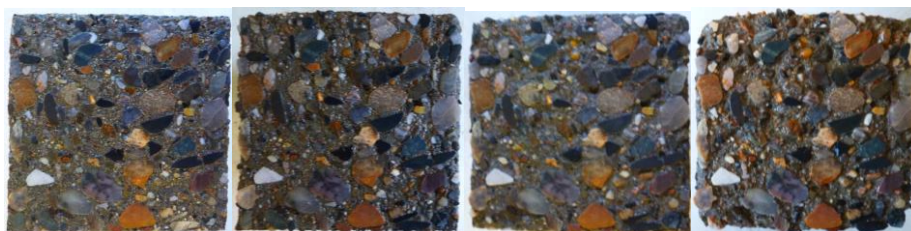
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 92- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39A-S50



25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 93- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 94- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ34B-S50



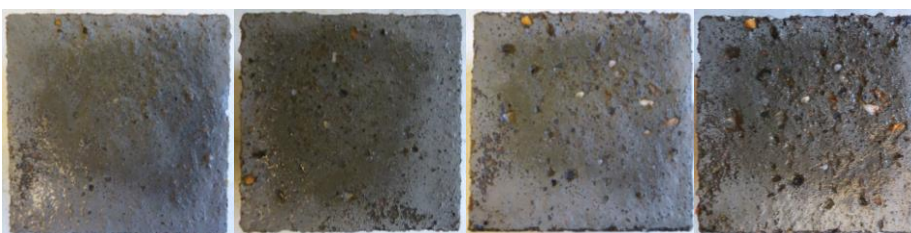
25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 95- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ34B-S50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 96- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ34B-O50



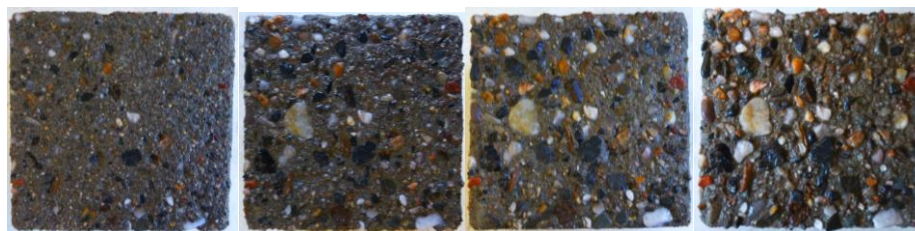
25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

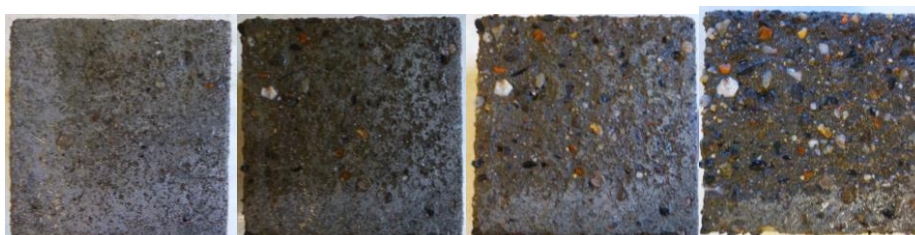
100 cyklů

Obr. 97- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ34B-O50



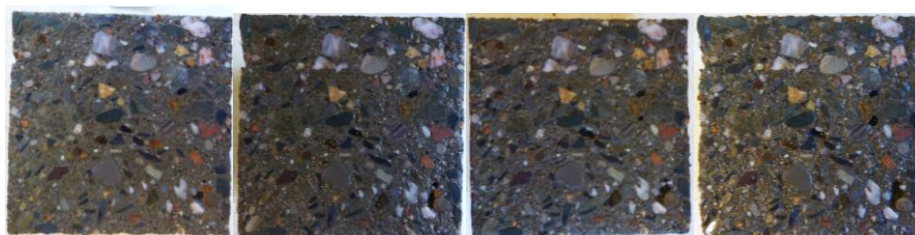
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 98- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ34B-O50



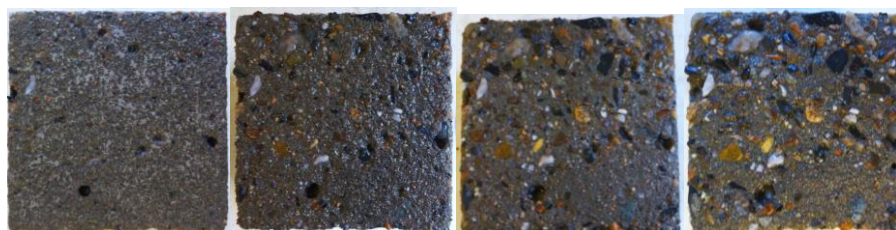
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 99- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39B-S50



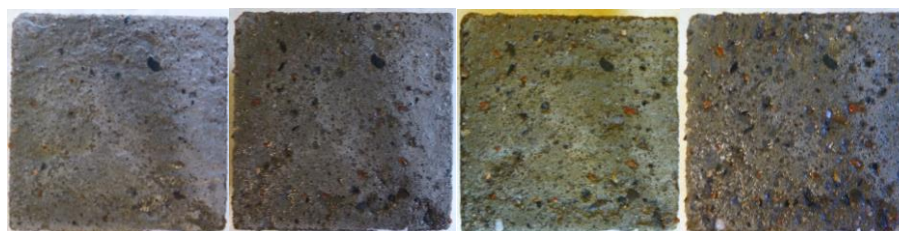
25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 100- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ39B-S50



25 cyklů 50 cyklů 75 cyklů 100 cyklů

Obr. 101- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ39B-S50



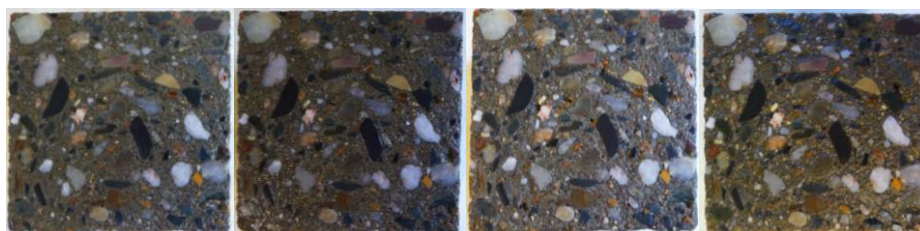
25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 102- Ukázky povrchů (hlazený), metoda A, receptura: PZ39B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 103- Ukázky povrchů (řez), metoda A, receptura: PZ39B-O50



25 cyklů

50 cyklů

75 cyklů

100 cyklů

Obr. 104- Ukázky povrchů (bok), metoda A, receptura: PZ39B-O50

Příloha č. 4- Kompletní výsledky pevností v tlaku pro betony s nízkou porozitou

Tab. 19- Výsledky pevností v tlaku pro betony s nízkou porozitou

Krychelná pevnost v tlaku				
Receptura	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Stáří vzorku	Pevnost	Průměrná pevnost
		[den]	[MPa]	[MPa]
PZ75D-22	2320	28	159,1	159,1
	2320	28	158,9	
	2320	28	159,3	
PZ75D-25	2310	28	154,8	154,2
	2310	28	157,6	
	2310	28	150,2	
PZ75D-28	2300	28	156,2	155,7
	2300	28	155,3	
	2300	28	155,6	
Válcová pevnost v tlaku				
Receptura	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Stáří vzorku	Pevnost	Průměrná pevnost
		[den]	[MPa]	[MPa]
PZ75D-22	2300	28	147,7	145,8
	2310	28	143,8	
PZ75D-25	2340	28	158,8	159,4
	2350	28	160,0	
PZ75D-28	2330	28	147,4	149,9
	2330	28	152,4	