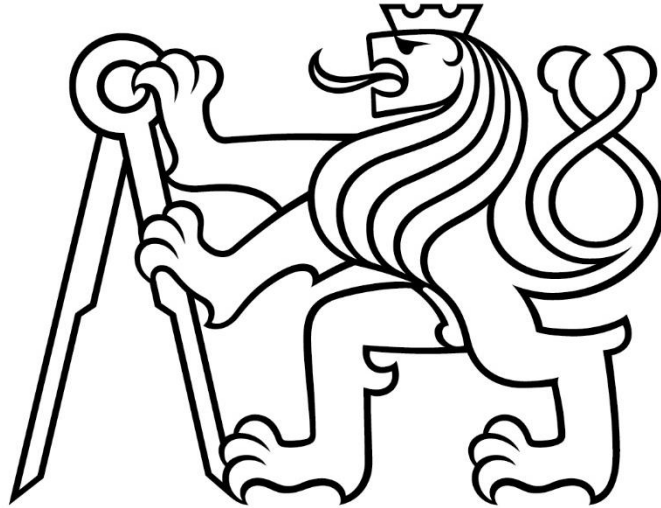


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Diplomová práce

Odolnost betonu vůči mrazu a CHRL:
možnosti, problémy, zkušenosti

(Resistance of concrete against frost and defrosting
chemicals: possibilities, issues, experiences)

Vypracoval: **Bc. Patrik Šnobl**
Studijní program - Stavební inženýrství
Studijní obor - Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.
Ing. Michal Števula, Ph.D.

Rok: 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šnobl	Jméno: Patrik	Osobní číslo: 468219
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Odolnost betonu vůči mrazu a CHRL: možnosti, problémy, zkušenosti	
Název diplomové práce anglicky: Resistance of concrete against frost and defrosting chemicals: possibilities, issues, experiences	
Pokyny pro vypracování: Seznámení se s problematikou odolnosti betonu vůči mrazu a CHRL. Rozdíl mezi mrazuvzdorností betonu a odolností povrchu betonu vůči mrazu a CHRL. Metody používané ke zjištění mrazuvzdornosti a odolnosti povrchu vůči mrazu a CHRL v ČR a v okolních státech. Provedení zkoušek odolnosti povrchu betonu v laboratoři a vyhodnocení. Porovnání výsledků různých metod. Závěr.	
Seznam doporučené literatury: M. Collepari – Moderní beton P.C. Aitcin – Vysokohodnotný beton Časopis Beton TKS	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.	
Datum zadání diplomové práce: 21.9.2021	Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022 <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“.

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně za pomoci všech uvedených informačních zdrojů, dosud získaných znalostí a na základě konzultací s vedoucími mé bakalářské práce.

V Praze dne:

.....

Bc. Patrik Šnobl

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá problematikou odolnosti povrchu betonu vůči působení mrazu a CHRL. V práci jsou popsány rozdíly mezi mrazuvzdorností betonu a odolností povrchu betonu vůči mrazu a CHRL. Práce zpracovává přehled zkušebních metod používaných ke zjištění mrazuvzdornosti a odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL pro betonové konstrukce v České republice a ve světě. Jelikož požadavky na beton jsou závislé na působícím prostředí, ve kterém se nachází, jsou součástí práce popsány požadavky pro návrh betonu v prostředí XF.

Experimentální část je věnována zkoušení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL v laboratoři s jejich vyhodnocením. Součástí je porovnání výsledků dosažených různými zkušebními metodami.

Klíčová slova:

Beton, Trvanlivost, Prostedí XF, Mrazuvzdornost, CHRL, Celkový obsah vzduchu, Rozložení vzduchových pórů, Mikroskopický vzduch A_{300} , Měrný povrch, Metody zkoušení

Abstract:

The thesis deals with issues of concrete resistance against frost and defrosting chemicals. In this thesis are described differences between frost resistance and surface resistance against defrosting chemicals. The thesis contains overview of testing methods used for determination of frost resistance and surface resistance against defrosting chemicals. Methods used in the Czech Republic and in the world are described. Requirements for concrete design in exposure category XF are part of this thesis as well, due to their dependence on acting environment.

Experimental part of the thesis is dedicated to analyzation of concrete surface resistance against frost and defrosting chemicals. Testing is performed in the laboratory and includes results evaluation. Another section of experimental part is focused on comparison of results acquired from different methods.

Keywords:

Concrete, Durability, Exposure Category XF, Frost resistance, Defrosting chemicals, Total air content, Air void distribution, Micro air content A_{300} , Specific surface, Test methods

Poděkování:

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucím své diplomové práce doc. Ing. Jitce Vaškové, CSc. a Ing. Michalu Številovi, Ph.D. za cenné a užitečné rady a připomínky při psaní práce. Dále bych rád poděkoval celému kolektivu laboratoře firmy BETOTECH v Berouně a Mostě, který mi umožnil provádět jednotlivé zkoušky v jejich laboratořích. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům, za jejich podporu a důvěru po celou dobu studia.



Obsah

Seznam použitých zkratk	8
1 Úvod	9
1.1 Téma.....	9
1.2 Cíle práce	10
1.3 Členění práce.....	10
2 Navrhování betonu v prostředí XF	12
2.1 Česká republika	12
2.2 Slovenská republika.....	15
2.3 Evropská unie.....	16
2.5 USA	17
3 Obsah vzduchu v betonu	19
3.1 Tlakoměrná metoda.....	19
3.2 Metoda AVA.....	20
3.3 Stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu	23
4 Působení mrazu a mrazuvzdornost betonu	26
4.1 Povrchové poškození.....	26
4.2 Porušení vnitřní struktury	27
4.3 Stanovení mrazuvzdornosti	29
4.4 Odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování	31
5 Stanovení odolnosti betonu vůči působení vody a CHRL	33
5.1 Česká republika	33
5.1.1 Metoda A - metoda automatického cyklování I	33
5.1.2 Metoda B - ruční manipulace se vzorky	35
5.1.3 Metoda C – metoda automatického cyklování II	36
5.1.4 Zkouška na desce (referenční metoda)	39
5.2 Slovensko	40
5.3 Německo.....	41
5.4 USA	43
5.5 Problémy při stanovení odolnosti betonu	44
5.5.1 Komplikace zkoušení	44
5.5.2 Variabilita výsledků.....	46



6 Experimentální část.....	47
6.1 Provádění zkoušek v laboratoři.....	47
6.1.1 Používané zařízení.....	47
6.1.2 Výroba zkušebních těles.....	48
6.1.3 Stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL.....	51
6.1.4 Stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.....	54
6.2 Převzaté hodnoty – BETOTECH.....	58
6.2.1 Porovnání mikroskopického obsahu vzduchu s tlakoměrnou metodou ...	58
6.2.2 Porovnání pro metodu C po 75 cyklech s CEM I + CEM II	62
6.2.3 Porovnání vzhledem k druhu použitého cementu a metody stanovení CHRL.....	68
6.2.3.1 Množství odpadů a celkový obsah vzduchu.....	68
6.2.3.2 Množství odpadů a obsah mikroskopického vzduchu A_{300}	76
6.2.3.3 Množství odpadů a součinitel rozložení vzduchových pórů	84
6.2.3.4 Množství odpadů a měrný povrch.....	92
7 Diskuse výsledků	97
8 Závěr	99
Seznam použité literatury	101
Seznam obrázků a tabulek.....	105
Seznam obrázků	105
Seznam tabulek.....	108
Seznam příloh	109
[1] Výsledky pro CEM I a metodu C.....	109
[2] Výsledky pro CEM I a metodu A.....	109
[3] Výsledky pro CEM II a metodu C	109
Přílohy jsou uloženy v digitální podobě na přiloženém CD	109



Seznam použitých zkratk

ASTM	Americká společnost pro testování a materiály
AVA	Analyzátor vzduchových mezer
CDF	Kapilární vedení rozmrazovacích látek a zkouška zmrazování a rozmrazování
CEN	Evropský výbor pro normalizaci
ČBS	Česká betonářská společnost
ČSSI	Český svaz stavebních inženýrů
CHRL	Chemické rozmrazovací látky
MPZ	Mezilaboratorní porovnávací zkoušky
NaCl	Chlorid sodný
PP	Polypropylen
PUR	Polyuretan
PZ	Průkazní zkouška
ŘSD ČR	Ředitelství silnic a dálnic ČR
SPF	Rozložení vzduchových pórů (Spacing factor)
SVB ČR	Svaz výrobců betonu ČR



1 Úvod

1.1 Téma

V současné době se beton vzhledem k množství realizovaných betonových konstrukcí a celkovému množství produkovaného betonu řadí mezi nejvíce používané stavební materiály. Dokonce je druhým nejpoužívanějším materiálem na Zemi, hned za vodou.

Rostoucí výstavba konstrukcí s sebou přináší přísnější požadavky na udržitelnou výstavbu a také provozní náklady. Za rozšířením betonových konstrukcí stojí především jeho využitelnost, vlastnosti, cena a v neposlední řadě trvanlivost, která je velmi sledovaným parametrem. V mnoha zemích s rozdílnými klimatickými podmínkami se stala trvanlivost betonu významným tématem, neboť mnoho betonových staveb vykazuje značné známky pokročilého porušení. Stěžejním důvodem častého porušení betonových konstrukcí je kladení největší důležitosti při návrhu betonu na jeho tlakové pevnosti, nikoli na vlivy prostředí, které působí na konstrukci v průběhu celé životnosti. [15, 22]

Trvanlivost betonové konstrukce ovlivňuje celý proces výstavby a je výsledkem vzájemného spolupůsobení vnitřních (cement, voda, kamenivo, přísady, příměsi) a vnějších faktorů (agresivita prostředí, mechanické namáhání, zatížení). Trvanlivostí betonové konstrukce rozumíme celou její dobu použitelnosti při zachování předepsaných vlastností. K zajištění potřebné trvanlivosti předepisují normy ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404 různé stupně vlivu prostředí, které charakterizují prostředí, v němž se stavby po dobu své životnosti vyskytují. Po zařídění do příslušného stupně vlivu prostředí udávají normy jednotlivé charakteristiky pro beton: minimální pevnostní třídu, maximální vodní součinitel, minimální obsah cementu, minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu, maximální průsak tlakovou vodou, kvalitu kameniva a maximální hmotnost odpadu při zkoušce odolnosti betonu vůči chemicky rozmrazovacím látkám. V případě agresivních prostředí (například XF) se stává, vzhledem k dosažení dostatečné trvanlivosti, že rozhodující minimální pevnostní třídou betonu je podle stupně prostředí z normy ČSN EN 206+A2 oproti vypočítané minimální pevnosti ve statickém výpočtu.



Pro ověření dostatečné trvanlivosti se beton podrobuje základním zkouškám: mrazuvzdornosti, odolnosti povrchu betonu vůči CHRL, obsahu vzduchu a maximálnímu průsaku vody. [15, 23, 28]

1.2 Cíle práce

Cílem diplomové práce *Odolnost betonu vůči mrazu a CHRL: možnosti, problémy, zkušenosti* je zabývání se problematikou odolností povrchu betonu vůči mrazu a proti působení chemických rozmrazovacích látek. Odolnost povrchu betonu je velmi důležitá, neboť výrazně ovlivňuje trvanlivost navrhovaných konstrukcí, zejména v místech s agresivním okolním prostředím.

V práci je popsán rozdíl mezi mrazuvzdorností a odolností povrchu betonu vůči mrazu a chemicky rozmrazovacím látkám současně s používanými zkušebními metodami. Nedílnou součástí odolnosti betonu je také obsah vzduchu, proto jsou součástí práce i jednotlivé metody pro jeho stanovení v čerstvém i ztvrdlém stavu.

V praktické části diplomové práce bylo cílem vytvořit a zdokumentovat vlastní zkušební tělesa, následně provedené zkoušky v praxi používané pro stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení chemicky rozmrazovacích látek. Hlavním bodem je porovnání převzatých výsledků získaných různými metodami s jejich vyhodnocení.

1.3 Členění práce

V následující druhé kapitole je popsán vliv prostředí XF, jeho rozdělení do jednotlivých skupin jak v ČR, tak ve světě. Pro ČR jsou zobrazeny mezní hodnoty pro návrh betonových konstrukcí pro předpokládanou životnost na 50 a 100 let.

Třetí kapitola je věnována obsahu vzduchu v betonu, důležité charakteristice výsledných vlastností ztvrdlého betonu. Jsou popsány zkoušky používané pro zjištění obsahu vzduchu jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém betonu. U jednotlivých zkoušek jsou popsány výhody a nevýhody.

Čtvrtá kapitola se zabývá problematikou zhoršování vlastností betonu vzhledem k působení mrazu. V rámci kapitoly je rozlišeno a charakterizováno vnější poškození a porušení vnitřní struktury betonu. Současně jsou popsány zkušební metody pro stanovení mrazuvzdornosti betonu.



V páté kapitole jsou popsány jednotlivé zkušební metody pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu CHRL v České republice a ve světě. Současně je věnována pozornost problematikám a komplikacím při zkoušení.

Šestá kapitola jakožto experimentální část diplomové práce je rozdělena na dvě části. První částí je popisování mnou prováděných zkoušek se získanými výsledky. Druhá část je zaměřena na porovnávání a vyhodnocení převzatých hodnot. Jsou porovnány výsledky získané zkušebními metodami A a C pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL s jednotlivými charakteristikami získanými jako výsledky mikroskopické zkoušky.

Sedmá kapitola shrnuje poznatky z vyhodnocených výsledků v experimentální části diplomové práce. Především závislost mezi různými druhy zkoušek pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL.

V poslední osmé kapitole jsou uvedeny závislosti pro jednotlivé charakteristiky mikroskopické zkoušky vzhledem k celkové hmotnosti odpadů. Dále jsou srovnány předpoklady zkušebních metod s výsledky z praxe.



2 Navrhování betonu v prostředí XF

Prostředí XF je takové, kde na beton střídavě působí vnější vlivy v podobě mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky či bez nich. Jedná se o negativní vlivy zvyšující namáhání betonu a zároveň snižující jeho trvanlivost. Proto je proti působení mrazových cyklů nutné navrhovat odpovídající opatření k dosažení zachování trvanlivosti betonu (viz kapitola 1). [9,11]

2.1 Česká republika

Beton v prostředí XF se v České republice navrhuje podle norem ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404. Tyto normy rozdělují namáhané prostředí, v závislosti na nasycení vodou a přítomnosti rozmrazovacích látek, do čtyř stupňů vlivů prostředí XF1 – XF4 (viz tab. 2.1).

Tab. 2.1: Stupeň vlivu prostředí XF dle ČSN EN 206+A2 (převzato z [9])

Označení	Charakteristika	Použití
XF1	Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky.	Svislé betonové povrchy silničních konstrukcí vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu.
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.	Vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům. Betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu. Omývaná část staveb v moři vystavená mrazu.

Po zařazení dané konstrukce do příslušné skupiny, jsou výše uvedenými normami stanovené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu. Jsou uvedeny mezní hodnoty pro konstrukce s předpokládanou životností 50 let (tab. 2.2) a 100 let (tab. 2.3). Dodržením mezních hodnot je z hlediska složení a vlastností betonu se předpokládá zajištění požadované trvanlivosti navrhované konstrukce.



Tab. 2.2: Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu 50 let (převzato z [11])

Předpokládaná životnost 50 let	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel w/c	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 při zkoušce dle ČSN EN 12350-7 [%]	-	4,0 a)	4,0 a)	4,0 a)
Maximální průsak vody při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 [mm] b)	50	50	35	35
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování při zkoušce dle ČSN 73 1326 [g/m ²]		Metoda A 75 cyklů 1250 Metoda C 50 cyklů 1500		Metoda A 100 cyklů 1000 Metoda C 75 cyklů 1000
Použité kamenivo		Kamenivo dle ČSN EN 12620+A1 s dostatečnou mrazuvzdorností		

- 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 bez provzdušnění nesplní při PZ kritéria odolnosti a vodonepropustnosti, je nutno beton provzdušnit (částečně provzdušnit)
- b) Platí pro konstrukce objektů v přímém styku s vodou. Hodnoty platí, nepožaduje-li specifikátor jiné. Zkouší se podle ČSN EN 12390-8 při KZ i PZ podle přílohy A normy, nezkouší se u provzdušněného betonu, při PZ podle přílohy A normy musí být hodnoty průsaku o 20 % nižší.



Tab. 2.3: Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu 100 let (převzato z [11])

Předpokládaná životnost 100 let		XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel w/c		0,55 d)	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 b)	320 b)	340 b)
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu při zkoušce dle ČSN EN 12350-7 se zrnitostí do [%]	8 mm	-	4,5 c)	5,0 a)	5,5 a)
	16 mm	-	3,5 c)	4,0 a)	4,5 a)
	22-32 mm	-	3,0 c)	3,5 a)	4,0 a)
Minimální obsah mikropórů A_{300} ve ztvrdlém betonu při zkoušce dle ČSN EN 480-11 [%] n)		-	1,0 e)	1,0 e)	1,8 e),f)
Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů L při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 [mm]		-	0,24 e)	0,24 e)	0,20 e),f)
Maximální průsak vody při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 [mm] b)		50	35	20	20
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování při zkoušce dle ČSN 73 1326 [g/m ²]			Metoda A 100 cyklů 1250 Metoda C 75 cyklů 1250		Metoda A 100 cyklů 1000 Metoda C 75 cyklů 1000
Stupeň mrazuvzdornosti při zkoušce dle ČSN 7322		T100	-	T150	-

a) Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, a/nebo vůbec), pokud jsou provedena příslušná opatření a vyhoví přitom požadavkům na odolnost podle tabulky 2.3.

b) Použití popílku je možné do maximální dávky 11 % z hmotnosti cementu, a to pouze v případě, že beton splní další požadavky stanovené tabulkou 2.3.



- c) Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, nebo vůbec), pokud je betonová konstrukce převážně v prostředí s přirozenou atmosférickou vlhkostí bez kapalných srážek a/nebo s přirozenou atmosférickou vlhkostí v dosahu slané mlhy (chloridů rozptýlených pouze ve vzduchu, části hydroizolací chráněných mostních konstrukcí) a vyhoví přitom požadavkům na odolnost podle tabulky 2.3.
- d) Pro nosné konstrukce mostů se připouští vodní součinitel maximálně 0,5.
- e) Při PZ musí být uvedené hodnoty součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů dosaženy o 20% nižší a A_{300} o 20 % vyšší, než je uvedeno v tab. 2.3.
- f) L a A_{300} se u vlivu prostředí XF4 při průkazních zkouškách provzdušněných betonů ověřuje vždy.

Z tabulek 2.2 a 2.3 vyplývá, že návrh receptury betonu v prostředí XF je kombinací preskriptivního a výkonového návrhu. Preskriptivní specifikace definují přesné metody postupu výroby betonové směsi a případně určují nebo omezují množství vstupních složek. Není nijak ověřována konečná odolnost receptury pro dané prostředí, pouze předpoklad na základě historických zkušeností. Mezi preskriptivní charakteristiky patří maximální vodní součinitel a minimální obsah cementu. Výkonové charakteristiky udávají konečný stav čerstvého, nebo ztvrdlého betonu. Dále určují trvanlivost betonu s daným vlivem okolního prostředí. Patří mezi ně: minimální pevnostní třída, minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu, minimální obsah mikropórů A_{300} (což je vypočtený parametr obsahu vzduchových pórů o průměru 0,3 mm a menším), maximální součinitel rozložení vzduchových pórů, maximální průsak vody, odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování a stupeň mrazuvzdornosti. [10, 23]

2.2 Slovenská republika

Návrh betonu v prostředí XF se ve Slovenské republice provádí pomocí normy STN EN 206+A1. Dle této normy se rozděluje stejně jako v České republice do čtyř stupňů vlivu prostředí XF1-XF4. Po zařazení následně norma stanovuje mezní hodnoty pro složení a vlastnosti obdobně jako v České republice. Například požadavek je pouze na obsah vzduchu v čerstvém betonu nikoli na součinitele rozložení vzduchových pórů či obsah mikroskopického vzduchu A_{300} . Nicméně tyto chybějící požadavky jsou důležitou výkonovou specifikací pro zaručení trvanlivosti betonu. [14]



2.3 Evropská unie

V celé Evropské unii platí stejná základní norma EN 206:2013+A2:2021 s následujícími požadavky uvedenými v tabulce 2.4.[9]

Tab. 2.4: Doporučené hodnoty mezního složení a vlastností betonu (převzato z [9])

Stupeň vlivu prostředí	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel w/c	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 v čerstvém betonu při zkoušce dle ČSN EN 12350-7 [%]	-	4,0 a)	4,0 a)	4,0 a)
Jiné požadavky	Kamenivo dle EN 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností			

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

Jak je patrné z názvu tabulky 2.4 mezní hodnoty dané normou EN 206:2013+A2:2021 jsou pouze doporučením a slouží jako případný podklad pro národní doplňky norem.

V normě se nenachází bližší specifikace k obsahu vzduchu v betonu jako minimální obsah mikropórů A_{300} , maximální součinitel rozložení vzduchových pórů. Hodnoty těchto charakteristik ovlivňují kvalitu provzdušněných betonů. Dále norma úplně postrádá jakékoli požadavky týkající se zkoušení povrchu betonu – množství odpadu při zkoušení odolnosti proti CHRL. Tato skutečnost může být způsobena chybějící jednou doporučenou normovanou metodou, ale používání rozdílných metod zkoušení odolnosti povrchu proti CHRL napříč evropskými státy (viz kapitola 5). Jak je uvedeno dříve v této kapitole, v ČR jsou chybějící parametry doplněny normou ČSN 73 2404.



2.5 USA

Ve Spojených státech se navrhuje podle normy ACI 318-14. Norma rozděluje namáhané prostředí do jednotlivých kategorií a následně kategorie na jednotlivé třídy dle namáhání. Pro beton, jenž je vystaven zmrazování a rozmrazování jsou určeny čtyři třídy F0-F3 (viz tab. 2.4). [1]

Tab. 2.5: Rozdělení do jednotlivých tříd dle ACI 318-14 (převzato z [1])

Třída	Charakteristika	Použití
F0	Beton nevystavený zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům.	Části konstrukce nevystavené mrazu.
F1	Beton vystavený zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům s omezeným působením vody.	Části konstrukce, kde nedochází ke hromadění sněhu a ledu a nejsou v kontaktu se zemínou – vnější stěny, trámy, nosníky a desky.
F2	Beton vystavený zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům s častým působením vody.	Části konstrukce, kde dochází ke hromadění sněhu a ledu – vnější desky. Horizontální a vertikální části v kontaktu se zemínou.
F3	Beton vystavený zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům s častým působením vody a působením rozmrazovacích látek.	Části konstrukce, kde dochází ke hromadění sněhu a ledu a vystavené rozmrazovacím látkám – vodorovné plochy pro parkování, základy nad úroveň terénu.

Po zařazení požadované konstrukce do příslušné třídy jsou v normě obdobně jako v České republice uvedeny požadavky pro každou třídu namáhání (viz. tab. 2.5).

Tab. 2.6: Požadavky na beton dle třídy namáhání dle ACI 318-14 (převzato z [1])

Třída		F0	F1	F2	F3
Max. vodní součinitel		-	0,55	0,45	0,40
Min. pevnost [psi (MPa)]		2500 (17,23)	3500 (24,13)	4500 (31,03)	5000 (34,47)
Min. obsah vzduchu pro D _{max} [%]	3/8 in (9,5 mm)	-	6	7,5	7,5
	3/4 in (19 mm)	-	5	6	6
	1 in (25,4 mm)	-	4,5	6	6
	2 in (50,8 mm)	-	4	5	5



Třída		F0	F1	F2	F3
Max. obsah složek cementu k celkové hmotnosti cementu [%]	Popílek nebo jiné pucolány dle ASTM C618	-	-	-	25
	Struskový cement dle ASTM C989	-	-	-	50
	Křemičité úlety dle ASTM C1240	-	-	-	10
	Celkem popílku nebo jiných pucolánů a křemičitých úletů	-	-	-	35
	Celkem popílku nebo jiných pucolánů, struskového cementu a křemičitých úletů	-	-	-	50

Jak je vidět v tabulce 2.5 požadavky na navrhování betonu v USA se zaměřují především na omezení vodního součinitele, minimální tlakovou pevnost, minimální obsah vzduchu v závislosti na velikosti použitého kameniva, kdy s rostoucí frakcí kameniva klesá požadavek na množství vzduchu. Nicméně nejsou uvedeny žádné požadavky na rozložení vzduchových pórů, či minimální obsah mikropórů. Norma dále omezuje jednotlivé složky cementu. Ovšem pro klasifikaci prostředí F norma ACI 318-14 neudává žádné mezní hodnoty pro stanovení odolnosti povrchových vrstev proti chemicky rozmrazovacím látkám, jako je tomu u české normy.



3 Obsah vzduchu v betonu

Obsah vzduchu v betonu je důležitá výkonová charakteristika, ovlivňuje konečné vlastnosti betonu zejména: pevnost v tlaku, modul pružnosti betonu, mrazuvzdornost. S rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu klesá jeho konečná pevnost i modul pružnosti, statický i dynamický. Naopak se zvýšeným obsahem vzduchu dochází ke zvýšení mrazuvzdornosti, podmínkou je správná velikost a rozložení pórů. Jak bylo popsáno v kapitole 2, v ČR norma ČSN P 73 2404 předepisuje sledování nejen obsahu vzduchu v čerstvém betonu jako tomu je například v USA, nebo v základní evropské normě, ale sleduje i minimální obsah mikropórů A_{300} ve ztvrdlém betonu a maximální součinitel rozložení vzduchových pórů L . [36]

3.1 Tlakoměrná metoda

Tato metoda je v praxi nejpoužívanější metodou pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Zkouška se provádí ve shodě s normou ČSN EN 12350-7. Ke zkoušce je zapotřebí měřicí zařízení – tlakový hrnc (obr. 3.1), vibrační stůl, palička a lopatka. Zařízení funguje na principu: jedinou stlačitelnou složkou čerstvého betonu je vzduch. V uzavřené nádobě je známý objem vzduchu o známém tlaku propojený s neznámým obsahem vzduchu ve vzorku betonu. [7, 40]

Měřicí přístroj se skládá z těchto částí (obr. 3.1):

- nádoba s minimálním obsahem 5 l,
- víko pro uzavření nádoby,
- tlakoměr,
- vzduchová hustilka,
- ventily – hlavní vzduchový, odvzdušňovací.

Průběh zkoušky je následovný: nejdříve se navlhčí všechny používané pomůcky, především pak nádobu zevnitř a poté se začne plnit betonem ve třech vrstvách. Po naplnění každé třetiny se vrstva betonu zhutní pomocí vibračního stolu. Po naplnění a zhutnění celé nádoby s betonem se provede zarovnání betonu s horní hranou a očištění dosedací plochy pro víko, které se připevní pomocí svorek k nádobě. Dále je vyplněn pomocí ventilů 1 a 2 prostor nad betonem vodou s následným poklepáním nádoby paličkou, aby se dostal pryč vzduch od vnitřní stěny nádoby. [7]



Obr. 3.1: Tlakový hrnec

Po vyplnění prostoru vodou se uzavřou ventily 1 a 2 a pomocí hustilky se vytvoří tlak v horní komoře tak, aby ručička na tlakoměru byla na výchozí pozici, v případě přetlakování je možné odpustit vzduch odvzdušňovacím ventilem. Po ustálení ručičky tlakoměru na výchozí pozici se zmáčkne hlavní vzduchový ventil a drží, dokud se ručička neustálí, následně se odečte procentuální hodnota vzduchu v betonu, která se zaokrouhlí s přesností na 0,1 %. [7]

Hlavními výhodami této zkoušky je menší finanční náročnost, rychlost zkoušení – zkouška trvá přibližně 5 až 10 minut a také rozsah obsahu vzduchu, který je přístroj schopen naměřit. Pro standardní 8-mi litrovou nádobu platí rozsah vzduchu od 0 do 10 %. Metoda je ovšem náchylná na zhutnění v nádobě, stav zhutnění by měl odpovídat zhutnění uloženého betonu v konstrukci. Nedokonalé zhutnění betonu v nádobě může zkreslit výslednou hodnotu naměřeného vzduchu. Reprodukovatelnost tlakoměrné metody se pohybuje kolem 18 %. [41]

3.2 Metoda AVA

Metoda AVA (Air Void Analyzer) se používá k měření obsahu vzduchových pórů, včetně pórů mikroskopických, v čerstvém betonu. Současně ze zkoušky zjistíme rozložení vzduchových pórů stejně jako podle ASTM C457 nebo EN 480-11.

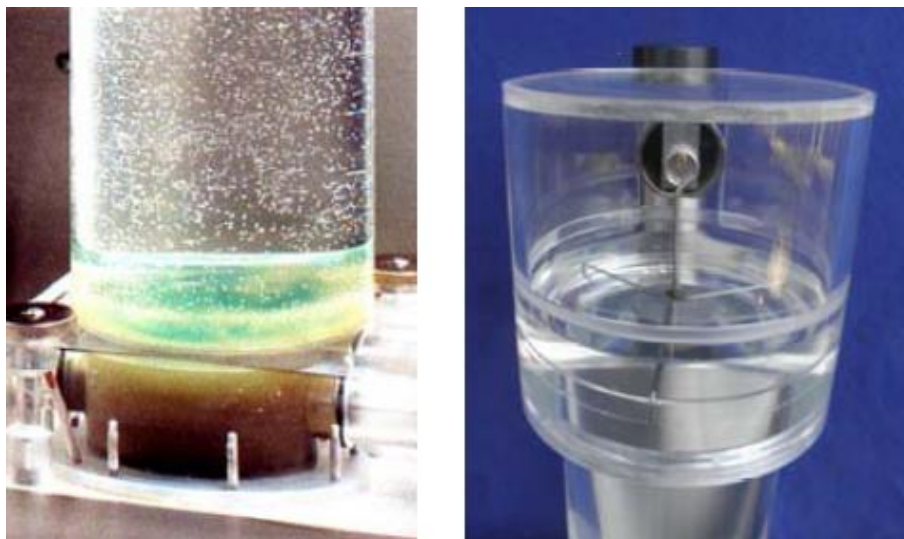


Vzorek potřebný pro provedení zkoušky se získá odebráním části cementového tmele ze zkoušeného betonu pomocí drátěné klece (obr. 3.2). Vibrováním drátěné klece se dostává vzorek cementového tmelu o maximálním zrně 6 mm dovnitř klece. Pro použití přístrojem se z drátěné klece odebere 20 ml vzorku pomocí injekční stříkačky.



Obr. 3.2: Drátěná klec + vstřík vzorku [21]

Vzorek nabraný v injekční stříkačce se vstříkne do stoupacího sloupce (obr. 3.2). Na dně stoupacího sloupce je modrá kapalina pro uvolnění vzduchu ze vzorku. Za předpokladu, že uvolňovací kapalina má správnou viskozitu a hydrofilní charakter, vzduchové bubliny uvolněné z odebraného vzorku si zachovají původní velikost a nesplynou ani se nerozpadnou na bubliny menší. Nad uvolňovací kapalinou je vodní sloupec. [2, 21]



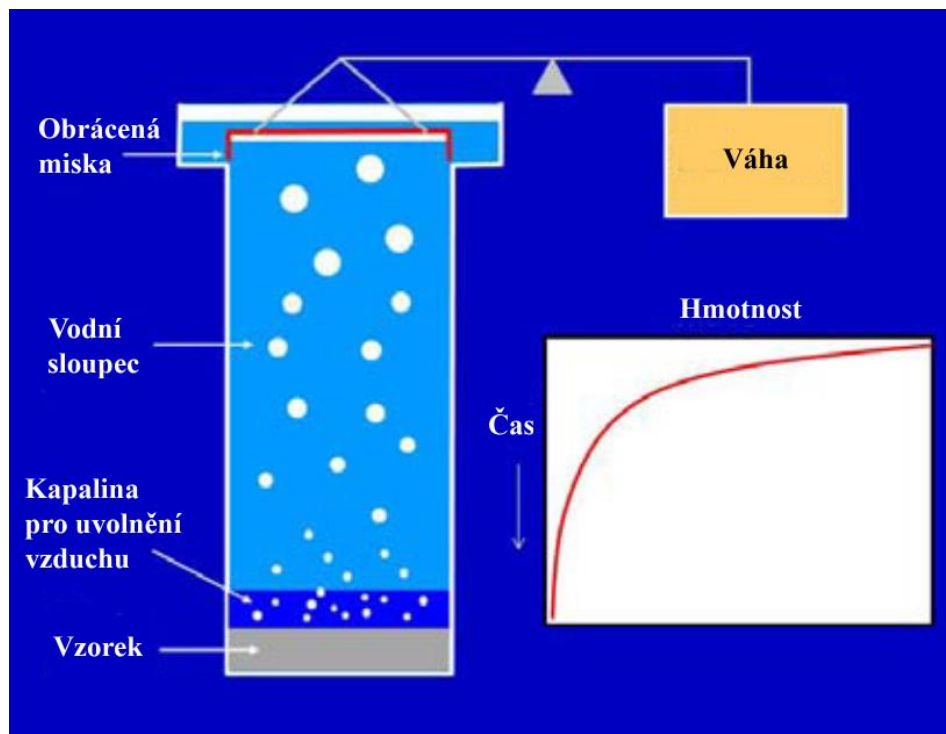
Obr. 3.3: Uvolnění + zachytávání vzduchových bublin [21]



Vzorek cementového tmelu a modrá kapalina pro uvolnění vzduchu se jemně míchají pomocí magnetického míchadla přibližně 30 sekund, poté se začnou vzduchové bubliny uvolňovat a stoupat vodním sloupcem různou rychlostí (obr. 3.3). Podle Stokeova zákona budou větší vzduchové bubliny stoupat rychleji než bubliny menší.

V horní části vodního sloupce se nachází otočená skleněná miska připevněná k citlivé váze, pod kterou se shromažďují vzduchové bubliny různých velikostí (obr. 3.3). Následně počítač připojený k váze zaznamenává změnu hmotnosti otočené misky jako funkci času (obr. 3.4).

Ze začátku měření se pod miskou shromažďují především rychleji stoupající velké vzduchové bubliny. Postupem času přibývají stále menší a menší vzduchové bubliny. Měření probíhá 25 minut, následně se pozoruje, zda se mění hmotnost na váze. Pokud se hmotnost nemění po dobu 2 minut, měření se zastaví. [2, 21]



Obr. 3.4 Princip metody AVA [21]

Výhodou této zkoušky jsou parametry, které dokáže stanovit: obsah mikroskopických pórů, především pak jejich rozložení v betonu tzv. Spacing factor. Znalost rozložení vzduchových pórů v čerstvém betonu dává možnost korigovat složení betonu před uložením do konstrukce a předejít špatné konečné kvalitě betonu. Pomocí Spacing factoru v čerstvém betonu lze předpovědět Spacing factor ve ztvrdlém betonu a tím odhadnout budoucí odolnost ztvrdlého betonu vůči působení CHRL. Jako

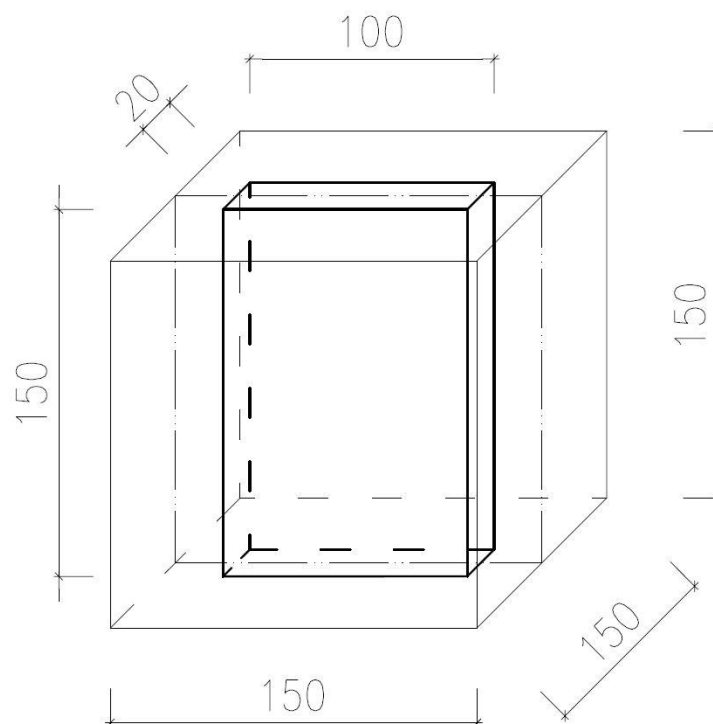


nevýhoda, kromě finanční náročnosti, se dá považovat použití pouze na betony s obsahem vzduchu v rozmezí 3,5 až 10 %. V případě, že je obsah vzduchu menší než 3,5 %, vztlak vzduchových pórů, nahromaděných pod obrácenou miskou, působících na váhu se nemění oproti hodnotám na začátku měření, kdy se uvolňují první vzduchové bubliny, což je dáno minimálním rozdílem ve hmotnosti. Pokud je obsah vzduchu naopak vyšší než 10 %, mohou se v kapalině při rozmíchávání tvořit turbulence, tím by se měření zkreslilo. [2, 21]

3.3 Stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Při měření obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu se postupuje v souladu s normou ČSN EN 480-11. Jelikož se jedná o ztvrdlý beton, je potřeba vytvořit zkušební vzorky, či odebrat vzorek z konstrukce. Zkouška se může provádět až po dosažení určité pevnosti zkoumaného betonu, dle normy se mohou zkoušet vzorky ošetřovaného betonu nejdříve po sedmi dnech.

Ze zkoumaného betonu se vyrobí dvě tělesa o minimálním rozměru 150 mm, vhodným tvarem je krychle o straně délky 150 mm nebo válec o průměru 150 mm. Následně se přibližně ze středu obou těles vyříznou zkušební vzorky o šířce 100 mm, výšce 150 mm a tloušťce 20 mm kolmo k hornímu povrchu vzorku (obr. 3.5). [10]

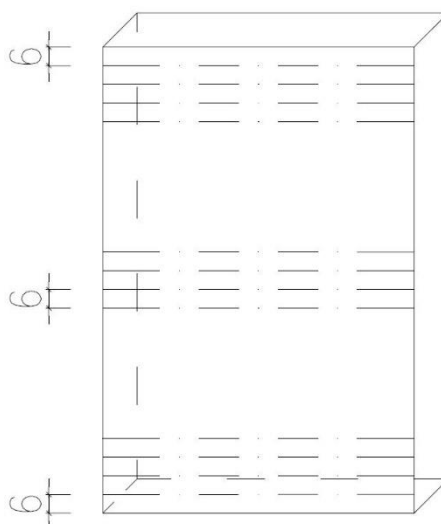


Obr. 3.5: Příprava zkušební vzorky – rozměry (převzato z [10])



Takto vyříznutý vzorek je potřeba brousit za mokra, dokud není zkušební povrch plně vyhlazený. Po dokončeném broušení je nutné vzorek očistit od všech nečistot po broušení. V případě provádění automatické mikroskopické zkoušky je zapotřebí vytvořit na zkoušeném povrchu lepší kontrast mezi vzduchovými póry a cementovým tmelem. Kontrast lze vytvořit například použitím barviva z razítkové podložky, či fixem. Přitom je nutné zabránit, aby se barvivo vsáklo do vzduchových pórů, potom by počítač nemohl rozeznat vzduchové póry.

Po takto dokončené přípravě vzorků lze přistoupit k samotné mikroskopické zkoušce. Zkušební vzorek se umístí na manipulační podložku, aby sledované měřicí přímky byly rovnoběžné s původním horním povrchem vzorku (obr. 3.6).



Obr. 3.6: Rozložení měřících přímek na zkušebním vzorku (převzato z [10])

Pro každý zkušební vzorek je požadována minimální délka soustavy měřících přímek 1200 mm, což dává na zkoušku minimálně 2400 mm. Měřicí přímky jsou rozloženy dle obrázku 3.6 v horní části 6 mm od horního okraje, v dolní části 6 mm od dolního okraje a ve střední části. Vždy jsou vedeny přes šířku zkušebního vzorku se vzdáleností 6 mm mezi sousedními přímkami. V případě krajních přímek se musí dbát zvýšené pozornosti, aby neprocházely poškozenou plochou vzorku.

Povrch vzorku se musí pozorovat mikroskopem se zvětšením $(100 \pm 10) \times$. V průběhu měření musí být zvětšení neměnné. Označují se (začátek a konec) všechny vzduchové póry vyskytující se na všech jednotlivých měřících přímkách. Po označení všech vzduchových pórů je výsledkem: délka pevné části zkušebního vzorku, délka všech zachycených pórů. Součtem těchto dvou hodnot je celková měřená délka na jednotlivých



měřících přímkách. V případě potřeby stanovení obsahu mikropórů nebo velikosti pórů musí se zaznamenat: délka každé tětiny zaokrouhlená na nejbližších 5 μm a celkový počet tětin v každé třídě (v případě dvou vzorků se sčítají výsledky z obou tak, aby vždy byla délka měřících přímek minimálně 2400 mm). Celkově se tětiny dle normy rozdělují do 28 tříd podle délky. Pro další výpočty je nutné vypočítat objem cementové tmele značený parametrem P v procentech objemu betonu, což se vypočítá ze složení betonu. [10]

Následně se postupně stanovují charakteristiky dle normy ČSN 480-11:

- Celkový obsah vzduchových pórů (A) [%]
- Celkový počet měřených tětin (N)
- **Měrný povrch měřených pórů (α)** [mm^{-1}]
- Poměr tmel : vzduchovým pórům (R)
- **Součinitel rozložení vzduchových pórů (L)** [mm]
- **Obsah mikroskopického vzduchu A_{300}** [%]

Ze stanovených charakteristik uvedených výše jsou důležité především: měrný povrch měřených pórů, součinitel rozložení vzduchových pórů a obsah mikroskopického vzduchu. Mikroskopický vzduch A_{300} je právě ten, který v betonu chceme a potřebujeme pro zvýšení mrazuvzdornosti. Mikroskopickému vzduchu A_{300} odpovídají vzduchové póry do velikosti 300 μm . Součinitel rozložení vzduchových pórů L je po A_{300} dalším ukazatelem účinnosti provzdušnění betonů a udává maximální vzdálenost libovolného bodu v cementovém tmelu od kraje vzduchového póru.



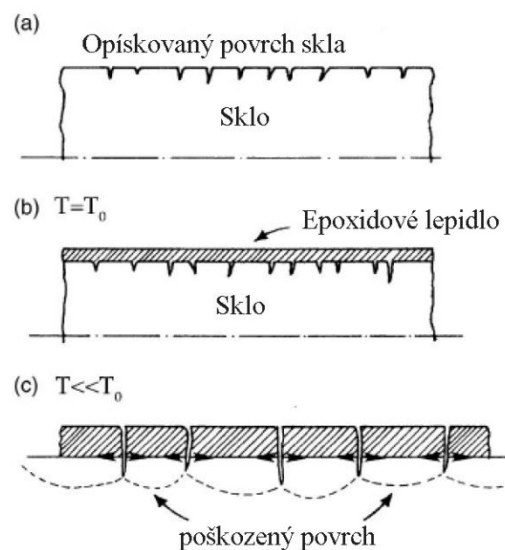
4 Působení mrazu a mrazuvzdornost betonu

Jak již bylo napsáno v úvodní kapitole, mrazuvzdornost, tedy schopnost betonu odolávat cyklickému zatěžování mrazem a rozmrazováním za přítomnosti vody je důležitým parametrem ovlivňující trvanlivost konstrukcí. Z obecného hlediska lze rozlišovat dva typy účinku mrazu na beton: vnější - povrchové poškozování a vnitřní - strukturální porušení.

4.1 Povrchové poškozování

Vzniká v povrchové vrstvě betonu, obvykle za přítomnosti chemicky rozmrazovacích látek při zmrazovacích cyklech, což nejlépe popisuje tzv. „glue spall“ mechanismus. Stupeň poškozování je vyjádřen velikostí odpadu z namáhaného vzorku. Současně s povrchovým poškozováním nemusí docházet k porušení vnitřní struktury betonu. K největšímu poškozování povrchu betonu dochází při působení 3 % nasyceného roztoku NaCl. [16, 20, 38]

Mechanismus „glue-spall“ je vysvětlen jako nanesení epoxidového lepidla na sklo upravené pískováním. Oba materiály mají rozdílný součinitel teplotní roztažnosti, což způsobí roztrhání epoxidu na malé části a současné poškozování povrchu skla (obr. 4.1).

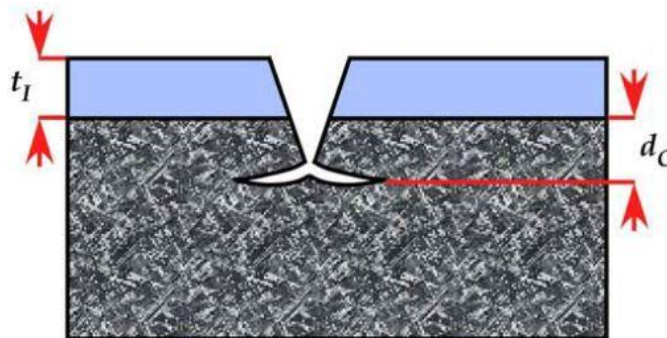


Obr. 4.1: Schématické vysvětlení „glue-spall“ mechanismu (převzato z [38])

Při aplikaci tohoto mechanismu na beton se vrstva epoxidového lepidla nahradí 3 % nasyceným roztokem NaCl a opískovaný povrch skla nahradí povrch betonu (obr. 4.2).



K poškození povrchu betonu dochází vznikem nerovnoměrného napětí od rozmrazování soli a vody z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti. Pokud tahové napětí překračuje tahovou pevnost betonu, dochází ke vzniku trhlin a jejich šíření do betonu. [38]



Obr. 4.2: Schématické vysvětlení „glue-spall“ mechanismu na betonu [38]
Kde t_I je vrstva 3 % nasyceného roztoku NaCl a d_C je oblast, kde vznikají trhliny.

4.2 Porušení vnitřní struktury

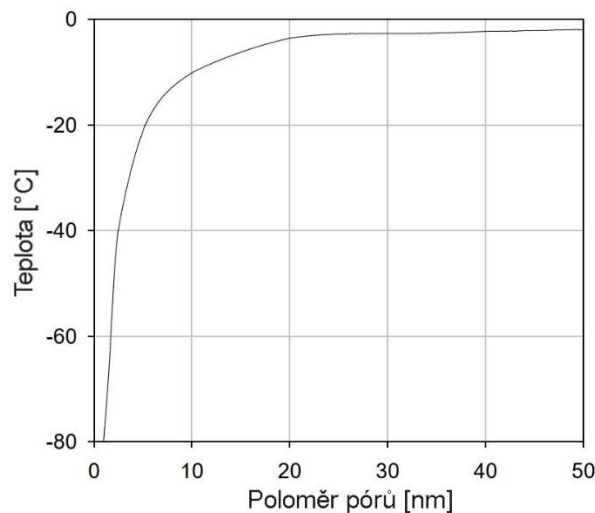
Porušení vnitřní struktury betonu v důsledku působení mrazu je způsobováno zamrznáním vody uvnitř betonu v částech, kde nasycení dosáhlo určitého stupně. Dochází k degradaci mechanických vlastností betonu, a tedy i snížení trvanlivosti. [30]

Voda v betonu je více či méně vázaná a rozlišujeme: vodu chemicky vázanou, vodu fyzikálně vázanou a vodu volnou. Chemicky vázaná voda je voda hydratovaná a tedy neodpařitelná, nemůže se nikdy proměnit v led. Fyzikálně vázaná - adsorbovaná voda je společně s volnou vodou odpařitelná a může se proměnit v led. Odpařitelná voda se dále rozděluje na vodu gelovou - nacházející se v nejmenších pórech a kapilární - ve větších pórech. Gelové póry mají velikost od 1 nm do 10 nm, oproti tomu kapilární póry od 0,1 μm do 10 μm . [26, 33]

Největší pravděpodobnost nasáknutí betonu vodou je u staveb na podzim, neboť při teplotách těsně nad nulou je voda nejtěžší. Voda v betonu začne nabývat, pokud klesne teplota pod $+4\text{ }^\circ\text{C}$ a jelikož voda nemůže kapiláry rychle opustit, tlačí na jejich stěny, čímž okolo vzniká nepříznivá tlaková a tahová napjatost. Přestože voda ještě nezamrzne, napětí v tahu mohou vzrůst společným působením a odlišnou roztažností kameniva a cementového tmelu až na mez pevnosti betonu. Bod tuhnutí kapaliny je funkcí teploty a tlaku, obecně se volná voda při nulovém tlaku a teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ přeměňuje na led. Voda pod tlakem, což je pro beton typické, mrazne při nižších teplotách než $0\text{ }^\circ\text{C}$ (obr. 4.3). [16, 26]



Ve struktuře betonu se vyskytuje široká škála pórů, což ovlivňuje zamrzání. Za normálního tlaku je teplota tuhnutí vody pro různě veliké póry odlišná a klesá s velikostí pórů (obr. 4.3). Póry s poloměrem 5 nm nebo méně nezamrzají dokonce ani při teplotách nižších než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, naopak voda ve velkých - kapilárních pórech, trhlinách a hnízdech zamrzá jako první. [38]



Obr. 4.3: Vztah mezi velikostí kapilárních pórů a teplotou tuhnutí (převzato z [38])

Jak bylo zmíněno, zmrznout může v betonu veškerá odpařitelná voda, tedy i voda v mikroskopických - gelových pórech, což vzhledem k velikým tlakům v betonu nastává výjimečně až při teplotě $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Přeměna vody na led znamená zvětšení objemu o 8,7 %, čímž vyvozuje krystalický tlak na stěny pórů a způsobuje tahovými napětími narušení vnitřní struktury betonu.

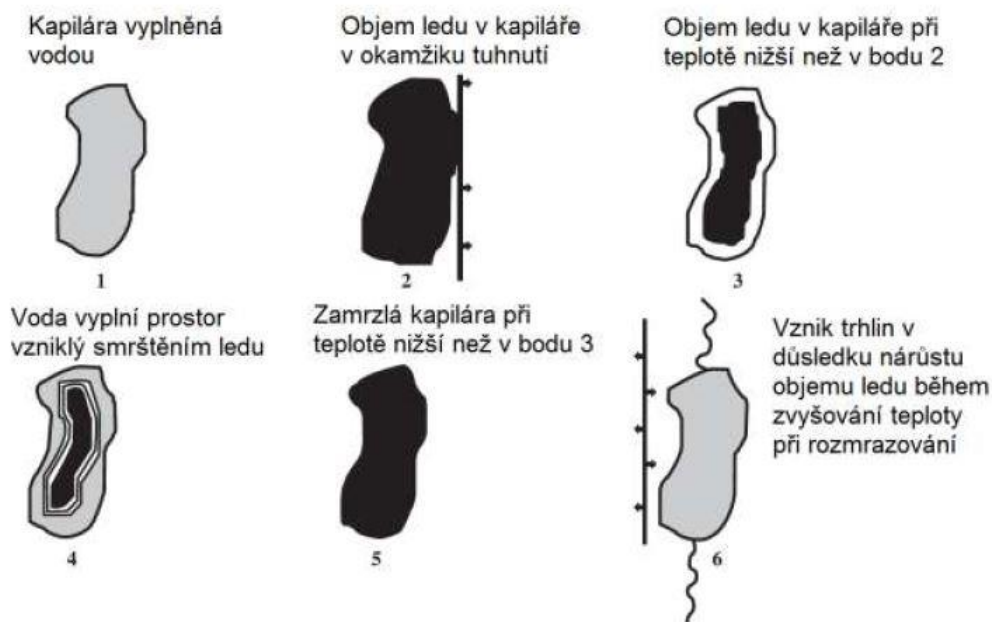
Přechod skupenství vody na led není jediná objemová změna zatěžující vnitřní strukturu betonu. Dalším charakteristickým parametrem ovlivňujícím objemové změny je teplotní roztažnost, pro beton platí hodnota $10 \cdot 10^{-6}\text{ K}$, ale led má hodnotu $51 \cdot 10^{-6}\text{ K}$. Při poklesu teploty ledu dochází ke zvyšování jeho hustoty, ale snižování objemu. Tato vlastnost je důležitá zejména při cyklickém namáhání betonu zmrazování a hlavně při rozmrazování. Volný prostor je vyplněn migrující kapalinou, která postupně mrzne a následně zcela vyplňuje kapilární póry. [16, 18, 29]

Velký vliv na porušení vnitřní struktury betonu má rychlost zmrazování a rozmrazování. Nejhorší výsledek se dostaví při rychlém ochlazení a následném pomalém roztávání, neboť kapalina není schopna rychle unikát a snižovat hydraulický tlak. Tomuto jevu jde částečně předejít provzdušněnými betony, kdy kapalina nedosahuje tak vysokých tlaků. [16, 29]



Ochlazování betonu probíhá od povrchu směrem do středu, přičemž dosud nezmrzlá voda ve středu se snaží vyrovnat teplotu již zmrzlé vody a tím dochází k pohybu tekutiny ze středu k povrchu - proti směru šíření chladu, jedná se o termoosmózu.

Popisovaný průběh namáhání vnitřní struktury zmrazovacím cyklem je zobrazen na obrázku 4.4.[16, 29]



Obr. 4.4: Chování vody v průběhu zmrazovacího cyklu [29]

4.3 Stanovení mrazuvzdornosti

Základní zkouškou používanou pro stanovení odolnosti betonu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování je stanovení mrazuvzdornosti betonu. Cílem zkoušky je co nejpřesněji simulovat dlouhodobé zatížení mrazem v co nejkratším čase. Mrazuvzdornost betonu se v České republice stanovuje dle normy ČSN EN 73 1322 platné od roku 1968.

Zkouška se provádí na nevyztužených, vodou nasycených trámcích o rozměrech 400 x 100 x 100 mm. Tělesa mohou být vyrobená ve formách, nebo přímo odebrána ze stávající konstrukce. Pro každý zmrazovací cyklus jsou potřeba 2 sady zkušebních trámců, každá musí obsahovat nejméně tři trámece. Jedna sada se použije k zatížení zmrazovacími cykly a druhá sada nezmrzovaných trámců poslouží pro porovnání vlastností. Přesný počet zkušebních trámců se však určí s ohledem na počet a způsob mezilehlých kontrol jakosti betonu. Podle normy je připuštěno provádět průběžné vyšetřování pomocí nedestruktivních metod: - ultrazvukové případně rezonanční. [4]



Pro provedení zkoušky je potřebné zkušební zařízení - mrazicí box (obr. 4.5) s regulovatelnou teplotou a dostatečným prostorem. Jeden zmrazovací cyklus v takovém boxu trvá 6 hodin a je složen z 4hodinového zmrazování a dvouhodinového rozmrazování. V průběhu zmrazování se teplota musí pohybovat v rozmezí -15 až -20 °C pro betony vystavené mrazu do -20 °C a v rozmezí -18 až -23 °C pro betony vystavované většímu mrazu než -20 °C. Stanovená nejnižší teplota musí být dosažena minimálně polovinu zmrazovací doby, což odpovídá dvou hodinám. Po dobu rozmrazování se teplota ve zkušebním zařízení musí pohybovat v rozmezí $+15$ až $+22$ °C. [4]



Obr. 4.5: Mrazicí box

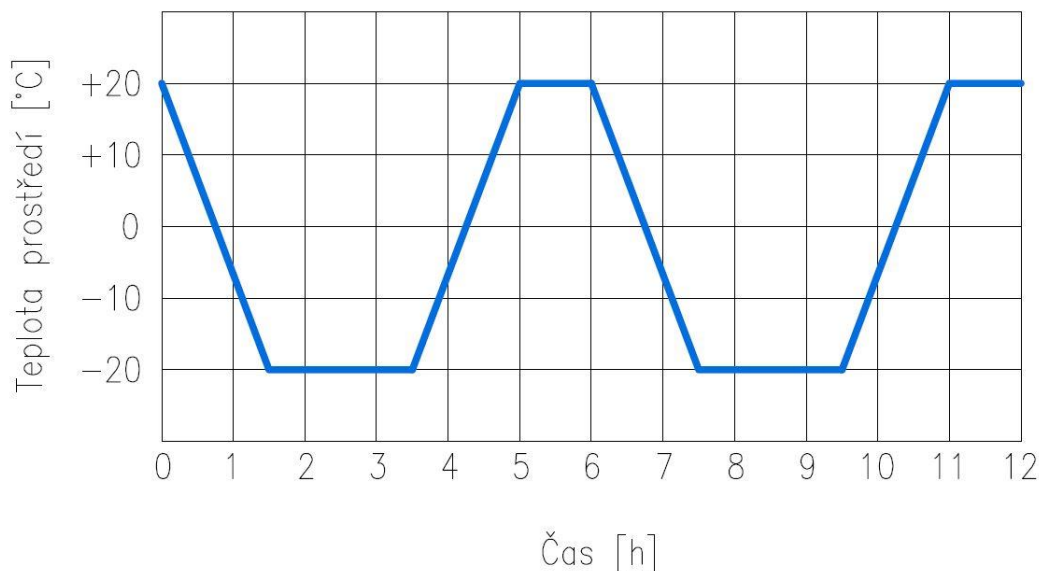
Před samotným zmrazováním zkušebních těles je nutné jejich osušení a stanovení přesných rozměrů a váhy. Z těchto zjištěných údajů se dopočítá objemová hmotnost podle normy ČSN EN 12390-7. Následně se tělesa vloží do mrazicího boxu, aby byla celá ponořená ve vodě a zabírala maximálně jednu třetinu objemu mrazicího boxu (obr. 4.6).



Obr. 4.6: Zkušební tělesa v mrazicím boxu



Poté se zkušební tělesa podrobí požadovanému počtu zmrazovacích cyklů (25, 50, 100, 150) po etapách, nejčastěji po 25 cyklech. Po dokončení každé etapy se vzorky osuší a stanovují se jejich rozměry, hmotnost a objemová hmotnost, případně na části vzorků pevnost v tahu za ohybu. [4,8]



Obr. 4.7: Průběh zmrazovacího cyklu dle ČSN 73 1322

Zkouška mrazuvzdornosti se ukončuje po dosažení předepsaného počtu zmrazovacích cyklů nebo úbytkem hmotnosti těles po dokončení jednotlivých etap o více než 5 %. Vyhodnocení zkoušky obsahuje zejména: zjištěné úbytky hmotnosti zkoušených zmrazovaných trámců v % hmotnosti a součinitel mrazuvzdornosti betonu. Součinitel mrazuvzdornosti je poměr aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámců v tahu za ohybu k aritmetickému průměru pevnosti porovnávacích trámců v tahu za ohybu.

Beton se považuje za mrazuvzdorný na počet cyklů, pro který je součinitel mrazuvzdornosti alespoň 75 %. Výsledkem je tedy T25, T50, T100, nebo T150, kdy číslo značí počet cyklů, po kterých byl součinitel mrazuvzdornosti alespoň 75 %. [4]

4.4 Odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování

Porušením vnitřní struktury betonu vlivem mrazu se zabývá norma ČSN 73 1380, která vešla v platnost v roce 2007 a vychází z evropského standardu. V normě jsou popsány tři zkušební metody pro stanovení porušení vnitřní struktury: zkouška na trámci, zkouška na desce a také zkouška CIF. Pro všechny metody je podstatou zkoušky vystavení zkušebních těles procesu zmrazování a rozmrazování za současného



ponoření do deionizované vody. Zkouška na desce a zkouška CIF jsou složité na přípravu a provádění a nejsou tolik citlivé jako zkouška dle ČSN 73 1322. [6,17]

Zkouška na trámci je velice podobná postupu dle ČSN 73 1322, provádí se na stejných zkušebních tělesech. Hlavní důraz je kladen na nedestruktivní zkoušení pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Vyhodnocuje se pomocí relativního dynamického modulu pružnosti, který se stanoví z doby průchodu ultrazvukových impulzů nebo pomocí vlastní příčné frekvence, tedy rezonanční metodou, a to po 56 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Toto je hlavní výhoda oproti ČSN 73 1322, neboť je získáván průběžný vývoj poškození vnitřní struktury betonu oproti pouhému součiniteli mrazuvzdornosti. Z toho důvodu jsou metody citlivější na změny probíhající ve struktuře betonu oproti ČSN 73 1322, u které je i větší rozptyl výsledků. Předpokladem je, že při poklesu hodnoty dynamického modulu pružnosti o 25 % nelze beton považovat za mrazuvzdorný. Velkou nevýhodou je doba zkoušení, zmrazovací fáze trvá 8 hodin a rozmrazovací 4 hodiny, což je dvojnásobná doba ve srovnání s ČSN 73 1322. [6,17]

Vhodnou metodou zkoušení by mohlo být spojení obou metod - použití ultrazvukové a rezonanční metody a zároveň zachování délky jednoho cyklu z ČSN 73 1322.



5 Stanovení odolnosti betonu vůči působení vody a CHRL

Podstatou všech dále popsaných metod pro stanovení odolnosti betonu vůči působení vody a CHRL je namáhání betonu vodou, ve které jsou rozpuštěné soli. Nejčastěji je to 3 % roztok NaCl, při kterém dochází k největšímu poškození betonu (viz kapitola 4). Je používáno mnoho metod v jednotlivých státech světa, i v rámci EU. Není tedy žádná standardizovaná metoda s daným postupem. V USA i EU není normami stanoven žádný požadavek na tuto zkoušku vzhledem k agresivitě prostředí (podrobněji popsáno v kapitole 2).

Pro stanovení porušení vnitřní struktury vlivem mrazu je v Evropě standardem technická zpráva CEN/TR 15177, která popisuje tři zkušební metody: Slab-test, metodu CIF a zkoušku na trámci. Technická zpráva je určena pro členy CEN, avšak převzetí do národních norem není pro jednotlivé členy povinné. Jednotlivé evropské státy mají nebo měly i vlastní národní normy.

5.1 Česká republika

V České republice je kladen požadavek na odolnost povrchu betonu vůči CHRL normou ČSN P 73 2404 podle stupně prostředí, ve kterém se konstrukce nachází (podrobněji v kapitole 2). Odolnost povrchu betonu se stanovuje v souladu s normou ČSN 73 1326 z roku 1984 zahrnující zkušební metody A a B. Norma byla rozšířena o změnu v roce 2003, která doplňuje zkušební metodu C. Poslední popisovaná je referenční metoda, zkouška na desce dle ČSN P CEN/TS 12390-9 z roku 2007.

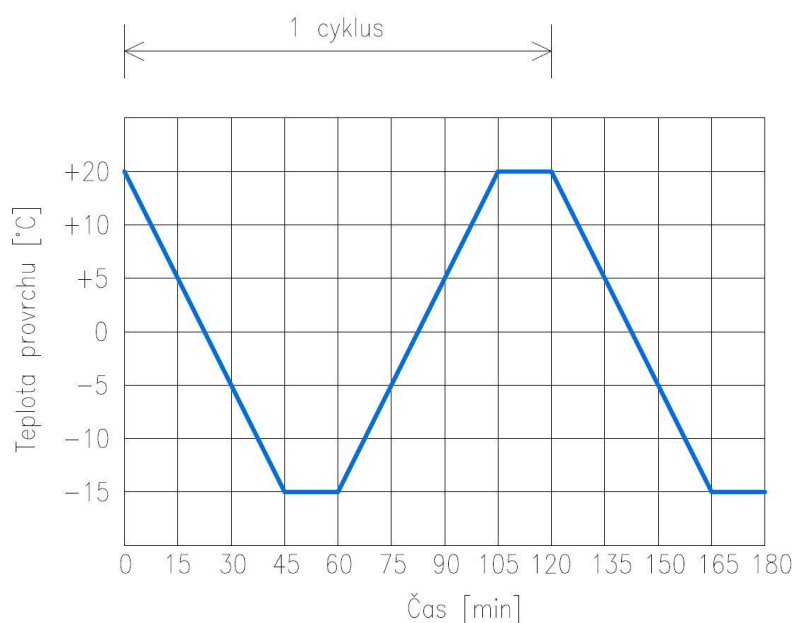
Nejvíce používanými metodami jsou: metoda A, která je převážně používána na Moravě a metoda C, která se používá především v Čechách. Rozdělení nejspíše vychází z požadavků ŘSD. [5, 24]

5.1.1 Metoda A - metoda automatického cyklování I

Zkouška probíhá v automatickém mrazicím boxu, který umožňuje kontrolovaně měnit teplotu. Stejně zařízení se používá pro zkoušku mrazuvzdornosti (obr. 4.5). Zkušebními vzorky jsou nejčastěji krychle o hraně 150 mm, ale mohou se zkoušet i jiné tvary těles, například jádrové vývrty ze stávající konstrukce. [5, 24]



Zkušební tělesa stará alespoň 28 dnů a nasáklá vodou se vloží do misky z korozivzdorného materiálu, do které se následně vlije 3 % roztok NaCl tak, aby zkušební těleso bylo ponořeno 5 ± 1 mm. Zkušební těleso je namáháno zároveň i z bočních stěn až do výšky ponoření. Misky se zkušebními tělesy se rozloží po dně zkušebního prostoru mrazicího boxu. Ve zkušebním zařízení se vzorky podrobují jednotlivým cyklům. Cyklus se skládá z fáze ochlazování a fáze ohřevu (obr. 5.1). Zmrazování zkušební plochy vzorku probíhá z teploty $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ za dobu 45 až 50 minut. Teplota $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ se udržuje po dobu 15 minut. Následuje ohřev zkušební plochy na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 45 až 50 minut. Teplota $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se udržuje po dobu 15 minut, čímž končí jeden a začíná druhý cyklus. Celkový čas jednoho cyklu je přibližně 120 minut. [5]



Obr. 5.1: Teplotní cyklus - metoda A dle ČSN 73 1326

Po každém 25. cyklu se zkouška přerušuje a uvolněné částice ze zkušební plochy tělesa se proudem vody ze stříčky splaví do misky. Po opatrném odlití přebytečné vody z misky se odpadlé částice vysuší do konstantní hmotnosti při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po vysušení se odpadlé částice zváží s přesností na 0,1 g. Tento postup se opakuje, dokud není zkouška ukončena, jednotlivé odpadlé částice se sčítají do celkového odpadu. Zkouška se ukončí, pokud bylo dosaženo předepsaného počtu cyklů nebo po dosažení maximální povolené velikosti odpadů. [5]

Stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL je dáno hmotností odpadu na jednotku plochy. Zkoušená plocha je známá, jedná se o část plochy povrchu smáčenou



3 % roztokem NaCl včetně bočních stěn a hmotnost odpadů je zjištěna ze zkoušky. Při zkoušce 3 vzorků je výsledkem jejich aritmetický průměr. Pokud se liší jeden výsledek o více než 50 % od průměru, pak je tento výsledek vyloučen. V případě, že se liší dva výsledky o více než 50 % od průměru, je nutné zkoušku opakovat. [5]

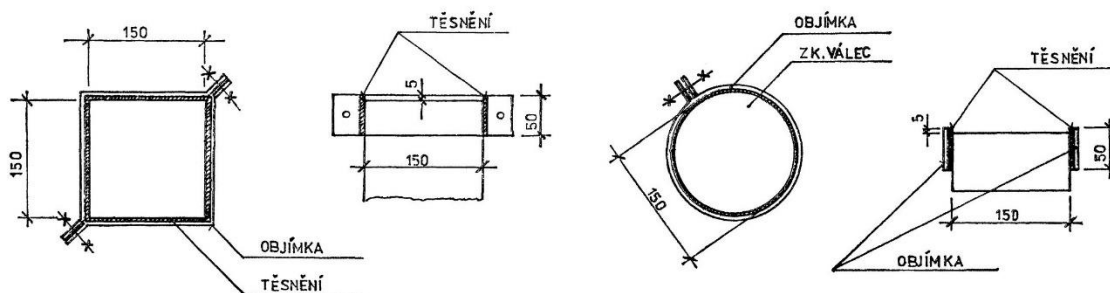
Tab. 5.1: Zatřídění povrchů zkušebních těles metoda A (převzato z [5])

Stupeň porušení	Odpad [g/m ²]	Charakter odpadu
1 - nenarušený	do 50	Velmi jemné prachovité částice do 1 mm.
2 - slabě narušený	do 500	Jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50 % hmotnosti odpadu.
3 - narušený	do 1000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm do 500 g/m ² .
4 - silně narušený	do 3000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm do 500 g/m ² .
5 - rozpadlý	přes 3000	Jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu.

Závěrem je povrch betonu zatříděn do stupně porušení (viz tab. 5.1). Konečný výsledek je vždy uveden jako číslo s pomlčkou, které vypadá například 650–100, což znamená odpad 650 g/m² po 100 cyklech. [5, 24]

5.1.2 Metoda B - ruční manipulace se vzorky

Při metodě ruční manipulace se na zkušební tělesa nasadí objímka, aby spojení objímky s tělesem bylo vodotěsné a nad zkoušenou plochou vznikl prostor alespoň 5 mm vysoký (obr. 5.2). Poté jsou zkušební tělesa umístěna vodorovně do mrazicího prostoru, kde se na jejich povrch opatřený zvýšeným okrajem nalije voda do výšky 2 mm.



Obr. 5.2: Objímka na zkušebních tělesech [5]

Při zkoušce rozmrazování chemickými látkami jsou tělesa v prvním cyklu zmrazována po dobu 16 hodin při teplotě -8 ± 1 °C. Následně se na vytvořený led



na deskách nasype nebo nalije potřebné množství rozmrazovací látky, což při použití NaCl odpovídá množství 270 g/m². Rozmrazování trvá jednu hodinu, poté se tělesa vyjmou z mrazicího prostoru a omývají se vodou teplou +20 ± 2 °C po dobu 30 minut, aby se dostatečně zbavila rozmrazovací látky. Od druhého cyklu se cykly opakují stejným způsobem, doba zmrazování musí trvat nejméně pět hodin, rozmrazování jednu hodinu a následné omývání 30 minut. [5]

V průběhu zkoušky se sleduje povrch zkoušených těles a jeho stupeň narušení, který se hodnotí jako:

- nenarušený
- malé povrchové odlupování
- vylupování zrn drobného kameniva
- poškozený povrch

Zkouška se ukončí v případě, že byl dosažen předepsaný počet zmrazovacích cyklů nebo došlo k porušení povrchu a byl hodnocen jako poškozený povrch. [5]

Výsledek zkoušky odolnost povrchu betonu se hodnotí na základě požadovaného stavu zkušebních těles pro daný počet zmrazovacích cyklů. Stav povrchu se označí slovně podle dosaženého stupně narušení a zároveň se uvede počet cyklů, při kterém byl popsán stav dosažen. [5]

5.1.3 Metoda C – metoda automatického cyklování II

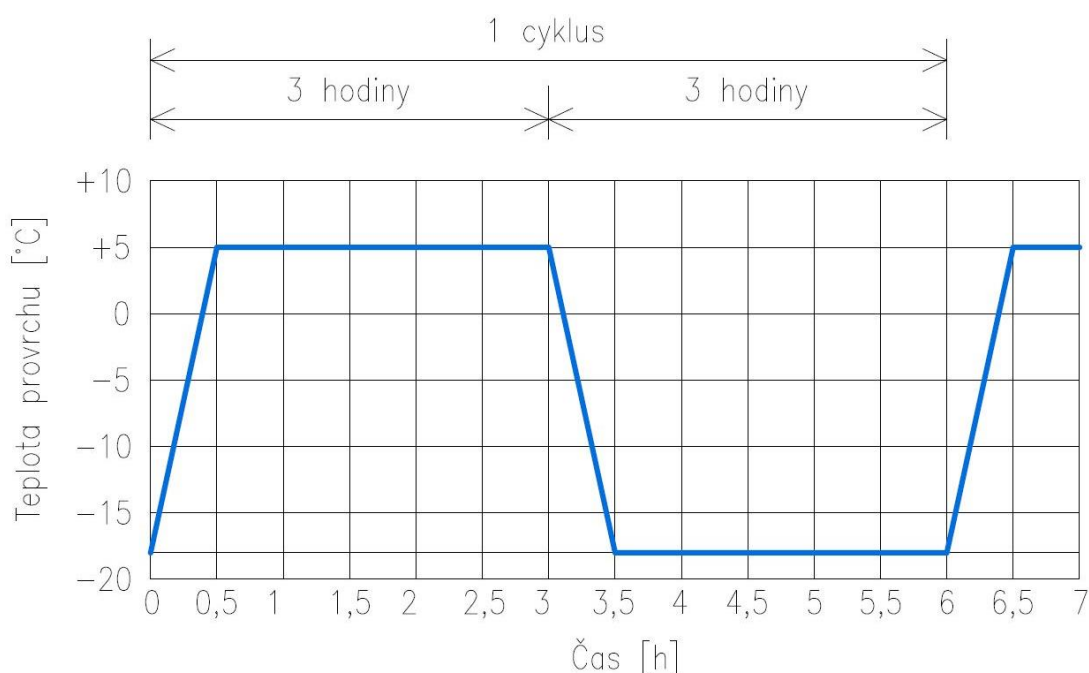
Metoda je založena na poznatku, že hlavním faktorem porušujícím povrch betonové konstrukce, na niž působí mrazové cykly a roztoky chemických rozmrazovacích látek, je gradient koncentrace chloridů v povrchové vrstvě betonu. [5]

Zkouška probíhá stejně jako u metody A v automatickém mrazicím boxu, ve kterém se automaticky střídají kladné a záporné teploty, působící rovnoměrně na celé zkušební těleso. Základním zkušebním tělesem je 50 mm vysoký odřez horního povrchu betonu z válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm nebo jádrového vývrtu o průměru 150 mm. Zkušební těleso se opatří vodotěsnou objímkou, která vymezuje zkoušenou plochu, následně se na vzorek nalije voda a ponechá se na něm minimálně dva dny, což slouží zároveň k prověření vodotěsnosti objímky. Poté se voda ze vzorku odstraní a těleso uloží do mrazicího boxu, kde se na něj nalije 3 % roztok NaCl v tloušťce vrstvy 5 mm. [5]



Teplota cirkulujícího vzduchu v mrazicím boxu se cyklicky mění, a to tři hodiny zmrazování -18 ± 1 °C a tři hodiny rozmrazování $+5 \pm 1$ °C, délka jednoho cyklu je šest hodin. Přejít mezi minimální a maximální teplotou vzduchu musí být do 30 minut.

Vždy po etapě, tj. 25 cyklech, se těleso vyjme z mrazicího boxu, slaný roztok se slije a uvolněné částice betonu se pomocí stříčky splaví do misky. Omytý povrch se okartáčuje a znovu omyje. Z misky se slije voda a částice betonu se plně vysuší při 105 °C. Umyté zkušební těleso se nechá uložené v běžném laboratorním prostředí při teplotě $+20 \pm 2$ °C a nalije se na něj voda až po okraj objímky. Po 24 hodinách se postup celé etapy opakuje. [5]

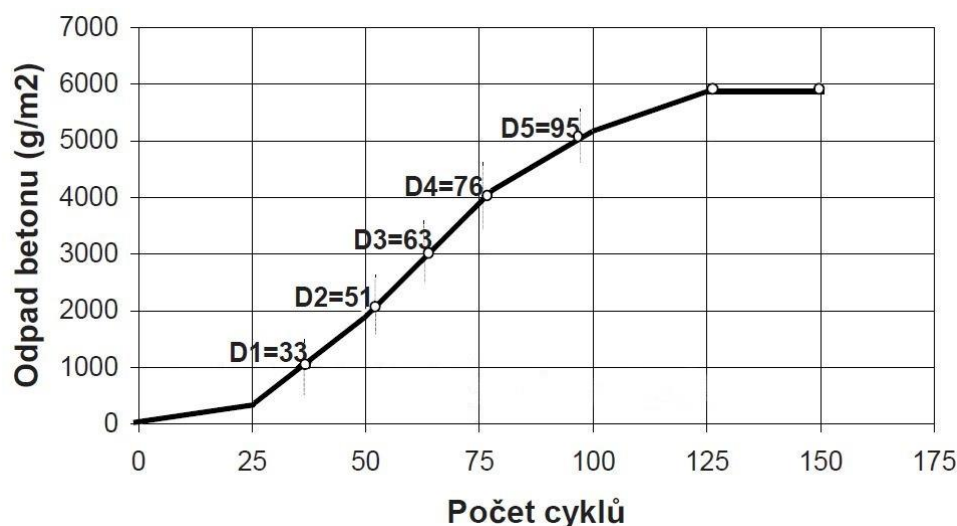


Obr. 5.3: Teplotní cyklus - metoda C dle ČSN 73 1326

Obvykle se zkouška provádí pro 75, 100 nebo 125 cyklů. Stanoví se hmotnost celkového odpadu jako součet hmotností s přesností 0,1 g všech vysušených odpadů betonu po jednotlivých etapách. Stanovená hmotnost se přepočte na plochu povrchu zkušební tělesa 1 m², kdy výsledkem je odpad betonu v g/m² s přesností na 10 g/m².

Ukončení zkoušky nastane v případě: dosažení předepsaného počtu cyklů, dosažení maximálního povoleného odpadu betonu, porušení betonu trhlinami - beton přestává být vodotěsný, po 150 cyklech. [5, 24]

Konečný výsledek zkoušky je stejně jako u metody A zapsán například ve tvaru 800-125, což znamená odpad 800 g/m² po 125 cyklech.



Obr. 5.4: Graf pro postup odlupování betonu s povrchu zkušební tělesa [5]

Pro vyhodnocení zkoušky se vynesou hodnoty odpadů po jednotlivých etapách přepočtené na g/m^2 do grafu (obr. 5.4), jejich spojnice vytváří vztah mezi počtem cyklů a velikostí odpadů betonu. Samotné vyhodnocení dle normy probíhá pomocí součinitelů odolnosti D1-D5 (viz tab. 5.2). [5, 24]

Tab. 5.2: Zatřídění povrchů zkušebních těles metoda C (převzato z [5])

Součinitel odolnosti	Charakteristika
D1	Počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1000 g/m^2 .
D2	Počet cyklů, po kterých je odpad betonu 2000 g/m^2 .
D3	Počet cyklů, po kterých je odpad betonu 3000 g/m^2 .
D4	Počet cyklů, po kterých je odpad betonu 4000 g/m^2 .
D5	Počet cyklů, po kterých je odpad betonu 5000 g/m^2 .

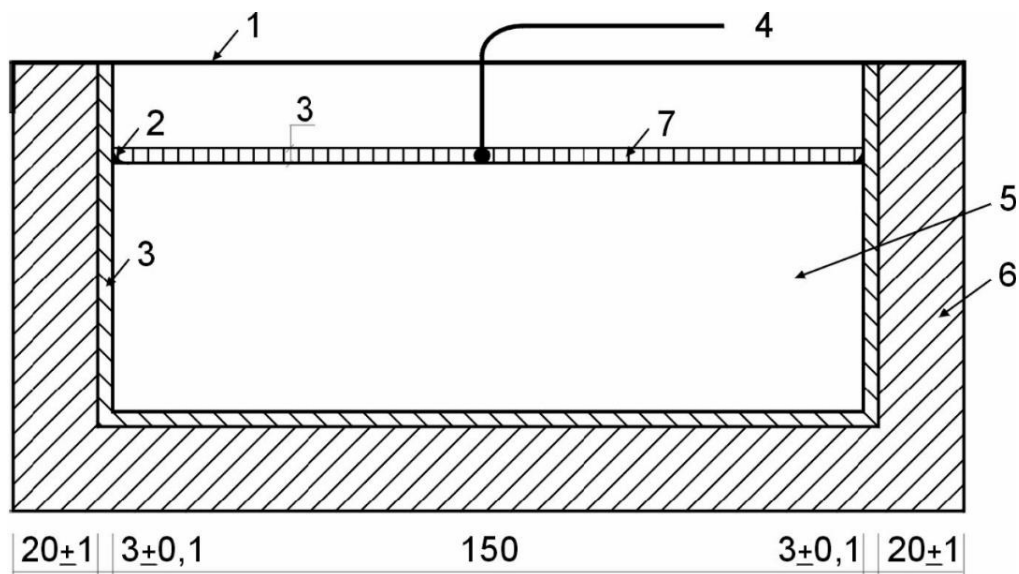
Jednotlivé součinitele získáme stanovením průsečíků čáry odpadů betonu s příslušnou souřadnicí odpadu betonu z grafu na obrázku 5.4. Kritériem odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL se většinou uvádí součinitel odolnosti D1. V případě stanovení průměrné hodnoty požadovaného součinitele odolnosti z více těles se jednotlivé hodnoty nesmí lišit o více jak 20 %. [5, 24]



5.1.4 Zkouška na desce (referenční metoda)

Při této zkoušce označované také jako slab-test se používají zkušební tělesa deskového tvaru tloušťky 50 mm, která jsou po 21 dnech vyříznuta z betonových krychlí o hraně 150 mm tak, že zkušební plocha prochází středem krychle kolmo k hornímu okraji. Ve stáří vzorku betonu 25 dnů se na povrch zkušební tělesa, mimo zkoušeného povrchu, přilepí gumové těsnění, rohy se utěsní pomocí lepidla nebo silikonové pryže. Okraj gumového těsnění přesahuje 20 mm nad zkoušený povrch. Ve stáří zkušební tělesa 28 dnů se na zkoušený povrch nalije asi 3 mm vrstva deionizované vody o teplotě 20 °C. Nasycování pokračuje následujících 72 hodin, kdy se deionizovaná voda postupně doplňuje tak, aby byla udržována vrstva přibližně 3 mm. Před samotným zkoušením betonu se všechny povrchy zkušebních těles, mimo zkoušeného povrchu, tepelně zaizolují pomocí polystyrenu o tloušťce 20 mm. [12, 19]

Zmrazovací zkouška začíná ve stáří zkušební tělesa 31 dnů. Deionizovaná voda se před umístěním zkušební tělesa do mrazicího boxu nahradí zmrazovacím roztokem v množství 67 ml, což odpovídá výšce roztoku 3 mm. Zmrazovací roztok je chráněn folií proti odpařování, kdy vzdálenost mezi folií a zmrazovacím povrchem musí být nejméně 15 mm (obr. 5.5). Teplota se sleduje průběžně ve zmrazovacím roztoku ve středu zkoušeného povrchu minimálně u jednoho zkoušeného tělesa. [12, 19]



Obr. 5.5: Sestavení při zkoušce zmrazování a rozmrazování [12]

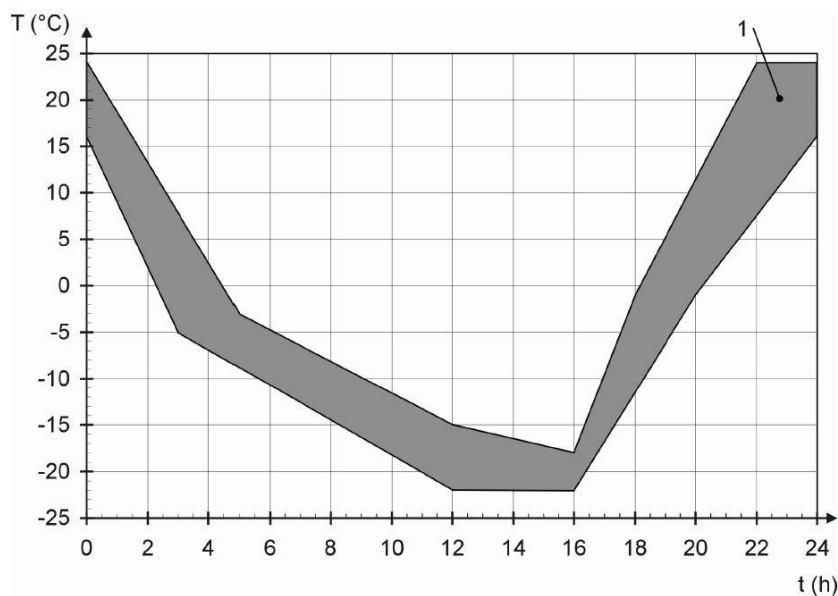
Legenda: 1) Polyethylenová folie, 2) Proužek lepidla, 3) Gumové těsnění, 4) Zařízení pro měření teploty, 5) Zkušební těleso, 6) Tepelná izolace, 7) Zmrazovací roztok



Teplota v mrazicím boxu se musí udržovat uvnitř vyznačené oblasti na obrázku 5.6. Pro každý cyklus platí, že teplota musí přesahovat 0 °C alespoň 7 hodin, ale maximálně 9 hodin a nikdy nesmí klesnout pod -27 °C. [12]

Jeden zmrazovací cyklus trvá 24 hodin a teplota se v průběhu mění přibližně z 20 °C na -20 °C a zpět (obr. 5.6). Kontrola povrchu zkušebních těles se provádí po 7, 14, 28, 42 a 56 zmrazovacích cyklech, kdy se zachytí odloupený materiál pomocí stříčky a povrch se okartáčuje. Na zkoušený povrch se znovu nalije čerstvý zmrazovací roztok a zkušební těleso se vrátí do mrazicího boxu. Odloupený materiál se shromažďuje do nádoby a vysuší se při teplotě 110 °C. Vysušený materiál se zváží s přesností 0,1 g.

Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnosti celkového množství odloupeného materiálu na jednotku plochy po předepsaných cyklech pro každý zkušební těleso vyjádřený v kg/m². [12]



Obr. 5.6: Zmrazovací cyklus – uprostřed na zkoušeném vzorku [12]

5.2 Slovensko

Zkoušení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL probíhá podle normy STN 73 1326. jedná se o metodu A velice podobnou zkoušce v ČR. Zásadním rozdílem mezi těmito metodami je nanesení ochranné vrstvy na boční strany zkušebního tělesa před započítáním zkoušky. Ochranná vrstva se aplikuje na boční strany minimálně 50 mm od zkoušeného povrchu. Hlavní význam ochranné vrstvy je zamezit nepříznivým vlivům na zkoušku, zejména hranovému efektu a vztlínání roztoku po stěnách. [13]



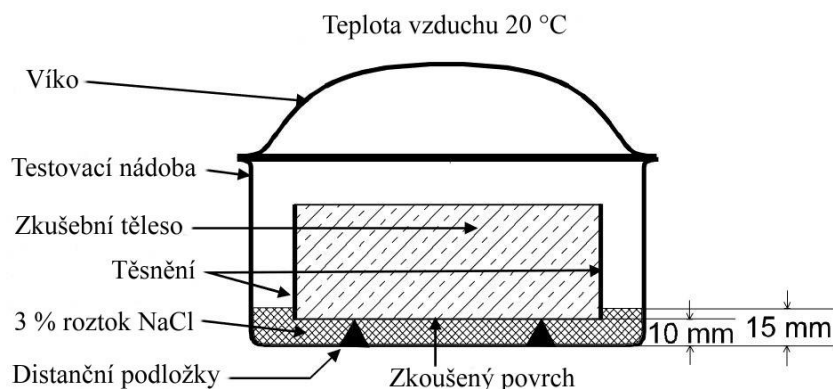
5.3 Německo

Metoda pro stanovení odolnosti betonu vůči CHRL používaná v Německu se nazývá RILEM TC 117-FDC/CDF (Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw test). Metoda se odlišuje od slab-testu, neboť zkoušený povrch zkušebního tělesa (krychle o hraně 150 mm) se orientuje směrem dolů a je ponořen do zmrazovacího roztoku, čímž se podobá české metodě A. Nicméně oproti české metodě A je u metody CDF přesněji definovaný postup zkoušení.

Zkušební postup se skládá ze třech částí: skladování zkušebních těles v suchém prostředí, nasycení kapilárním vztlínáním, zmrazovací cykly. Pro jednu zkoušku je doporučeno zhotovit minimálně pět zkušebních těles s celkovým zkušebním povrchem 0,08 m². Po 24 hodinách se krychle odbední a následně se umístí na 7 dnů do vody o teplotě 20 °C.

Následuje první fáze zkoušky – skladování v suchém prostředí, tělesa se uloží do prostředí s teplotou 20 °C a relativní vlhkostí 65 % a sleduje se úbytek jejich vlhkosti v závislosti na úbytku hmotnosti zkušebních těles. Na konci první fáze se musí utěsnit nezkoušené boční stěny například epoxidovou pryskyřicí. [27]

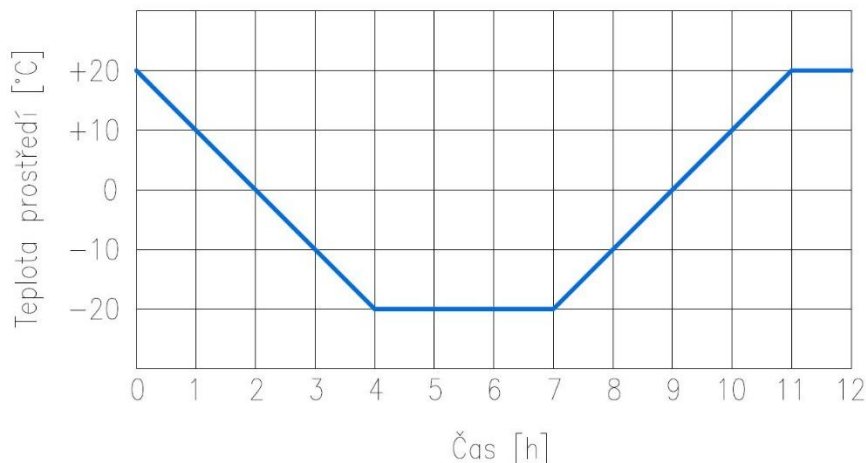
Druhou fází je nasycení kapilárním vztlínáním, zkušební tělesa jsou umístěna do testovacích nádob na distanční podložky 10 mm vysoké, zkoušeným povrchem směrem dolů. Po umístění tělesa se do výšky 15 mm v testovací nádobě nalije 3 % roztok NaCl a nádoba se přikryje víkem, které je za zakřivené, aby v případě kondenzace neodkapávala voda na zkušební tělesa. Perioda kapilárního vztlínání trvá 7 dnů při teplotě 20 °C. Během periody je nutné udržovat hladinu roztoku a měřit přírůstek hmotnosti zkušebního tělesa. [27]



Obr. 5.7: Umístění zkušební vzorku v testovací nádobě [27]

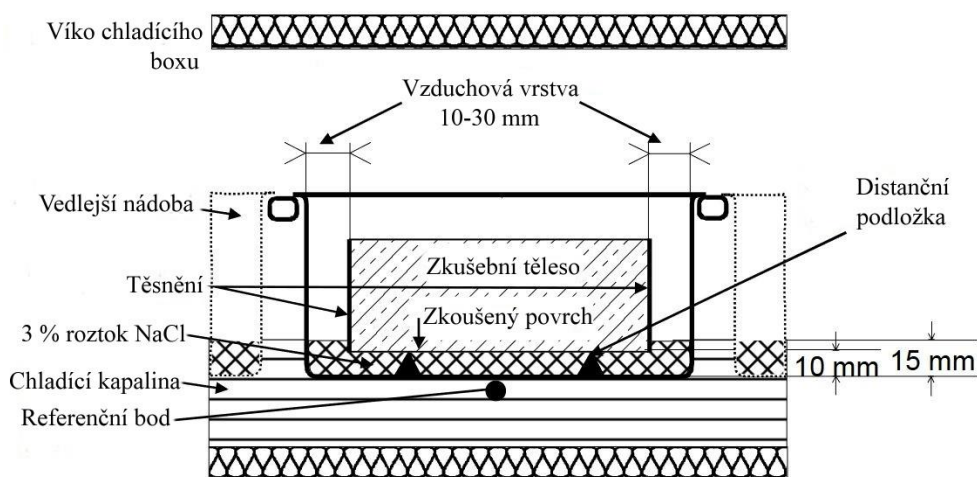


Poslední je zmrazovací fáze. Zkušební cyklus začíná rovnoměrným snižováním teploty z 20 °C na -20 °C během prvních čtyř hodin. Po dosažení teploty -20 °C je držena po dobu tří hodin a následně začíná rovnoměrné oteplování zpět na teplotu 20 °C.



Obr. 5.8: Teplotní cyklus – metoda CDF (převzato z [27])

Při teplotě nad 15 °C lze měřit odpadlé částice z povrchu zkušební vzorku ponořením testovací nádoby do ultrazvukové lázně. Ultrazvuk působí na vzorek tři minuty, poté je voda přefiltrována pomocí papírového filtru, který se vysuší při 110 °C po dobu 24 hodin a je zvážen s přesností 0,01 g. Stanovení hmotnosti odpadů je minimálně každých 14 cyklů, doporučeno je provádět měření po 4 nebo 6 cyklech. Celková hmotnost odpadů se stanoví po 28 cyklech.



Obr. 5.9: Zkušební nádoba v chladicí lázni [27]

Výsledkem CDF metody je zejména celková hmotnost odpadů na jednotku plochy v g/m² pro daný počet cyklů. Dále se sleduje hmotnost nasátého roztoku do zkušební tělesa během kapilárního vztlínání.



5.4 USA

Ve Spojených státech amerických se stanovuje odolnost betonu vůči CHRL pomocí metody ASTM C672. Principiálně je zkouška podobná Slab-test metodě, nicméně má drobné odlišnosti. Není použita folie přes hladinu zmrazovacího roztoku proti odpařování, které je kompenzované doplňováním vody pro udržení hladiny 6 mm nad zkoušeným povrchem. Na rozdíl od ostatních metod se namísto 3 % roztoku NaCl používá 4 % roztok CaCl₂. Nevýhodou této soli je horší rozpustnost, proto je zároveň vyšší koncentrace, navíc většina solí používaných na silnicích obsahuje NaCl. [31]

Pro zkoušku ASTM C672 jsou zapotřebí minimálně dva vzorky s minimálním povrchem 0,045 m² a tloušťkou nejméně 75 mm. Průběh teplot během cyklu je srovnatelný se Slab-testem, nejnižší teploty dosahují -18 °C a při rozmrazování +25 °C. Nicméně pro ASTM C672 není vyžadované měření teploty vzorků, což může znamenat větší rozptyl výsledků. Počet cyklů je oproti Slab-testu snížen a to na 50. Výsledky jsou zaznamenávány každých 5 cyklů až do celkového počtu 25 cyklů, následně už jen při ukončení zkoušky po 50 cyklech. Vyhodnocování probíhá vizuálním hodnocením zkoušeného povrchu a podle stupně poškození se zařadí do jedné ze šesti kategorií. [29, 31]

Vzhledem k velkému rozptylu při používání metody ASTM C672 se ASTM zabývá novou metodou s označením ASTM WK 9367, která vychází z kanadské zkušební metody BNQ NQ 2621 900. Spodek dna formy musí být vystlán geotextilií o tloušťce 7 mm a hmotnosti 900 g/m² jako prevence před krvácením betonu. Povrch zkušebních těles musí být upraven pilovitým pohybem tam a zpět pomocí dřevěného pravítka, dokud nebude povrch jednotný bez děr a kameniva. Po dokončení se vzorky přikryjí folií, aby se zabránilo odpařování. Po 22 hodinách se vzorky vyjmou z formy a uloží se do vody na dobu 14 dnů a poté se 14 dnů suší na vzduchu při teplotě 23 °C s relativní vlhkostí 50 %. Poté je na povrch nalit 3 % roztok NaCl a ponechán 7 dnů a následně se přistoupí ke zkoušení. Zkouška má 50 zmrazovacích cyklů a každý trvá 24 hodin s tím, že teplota během jednoho cyklu se pohybuje mezi -18 až +5 °C. [3, 31]

Poslední významnou metodou používanou ve Spojených státech je ASTM C666. Jedná se o zrychlenou zkoušku mrazuvzdornosti na trámčích, délka cyklu není přesně definovaná, ale pouze daná rozmezím dvou až pěti hodin. Teplota se během cyklu pohybuje v rozmezí -18 až +4 °C. V průběhu zkoušky je sledována změna dynamického



modulu pružnosti pomocí ultrazvuku. Zkouška končí po 300 cyklech, případně pokud klesne hodnota dynamického modulu pružnosti pod 60 % původní hodnoty. Nicméně metoda nebyla přijata asociací CEN jako oficiální zkušební postup, jelikož postup přesně nevystihuje reálné podmínky. [29, 31]

5.5 Problémy při stanovení odolnosti betonu

Stanovení odolnosti betonu vůči CHRL je záležitost doprovázená celou řadou otázek, problémů a nejistot. Nejasnosti a rozdíly ve zkušebních postupech i v samotném provádění zkoušek vedou k rozdílným výsledkům. Postupy jednotlivých zkušebních metod, což platí obecně pro všechny zkoušky, by měly být dostatečně podrobně stanovené a co možná nejméně komplikované. To by pozitivně ovlivnilo výsledky prováděných zkoušek. Velkou nevýhodou, jak již bylo zmíněno dříve v kapitole 5, je množství zkušebních metod používaných ke zjištění jednoho parametru betonu. Ideálním řešením by mohlo být sjednocení jednotlivých metod a vytvoření jedné standardizované metody s porovnatelnými výsledky dosaženými při stejných podmínkách.

V České republice se v současnosti běžně používají dvě metody pro zkoušení: metoda A a metoda C popsané v kapitole 5.1. Vzhledem k tomuto faktu se další část diplomové práce zaměřuje nejvíce na úskalí těchto metod. Ovšem popisované metody v kapitole 5 mají mnohé společné.

5.5.1 Komplikace zkoušení

Prvním úskalím je výroba zkušebních vzorků, jelikož je zkoušen jejich povrch. Důležitou roli hraje kvalita a délka zhutňování. Pokud dojde k drobné segregaci u horního povrchu zkušebního tělesa vlivem „přehutnění“, významně se tím ovlivní zkouška odolnosti betonu vůči CHRL. Kvalitu povrchové vrstvy a tím celé zkoušky dále ovlivňuje její uhlazení, neboť pojem pilovitý pohyb používaný v normách si každý může představit odlišně. Při výrobě zkušebních těles je důležitý použitý separační prostředek a materiál použitých forem, který nikde není předepsaný a může být různý. Nejčastěji jsou používány PUR, PP, ocel. Dalším důležitým vlivem je prostředí, ve kterém jsou zkušební tělesa uložena: laboratorní, vlhké a vodní. Pro odolnost povrchu vůči CHRL je nejvhodnější vlhké prostředí. [24, 35, 37]



V průběhu zkoušení je problémem různé zaplnění mrazicího boxu, kdy normy udávají pouze maximální zaplnění. Zaplněný mrazicí box se bude chovat v průběhu zmrazovacího cyklu odlišně oproti poloprázdnému boxu.

U většiny dříve popsaných zkušebních metod v kapitole 5 se při zkoušení používá 3 % roztok NaCl, normy však neuvádějí postup k namíchání roztoku. Pro namíchání roztoku lze použít technickou nebo kuchyňskou sůl a současně použít vodu pitnou či destilovanou. Různou kombinací vstupních surovin lze namíchat roztoky s různými vlastnostmi, a tedy následně i rozdílné výsledky získané na stejném zkušebním tělese.

Jen namíchání roztoku ovšem zkoušku neovlivňuje, například při použití metody A se může při nalití zkušebního roztoku do misky se zkušebním tělesem stát, že roztok nezateče pod celý zkoušený povrch v důsledku vzniku vzduchových bublin. Pokud jeden zkoušející vzduchové bubliny odstraní například nahnutím misky a jiný zkoušející je ponechá, pak každý zkouší jinou plochu, což se odrazí v odlišných výsledcích. Odlišnost ve výsledcích způsobuje také rozdílná výška roztoku kolem zkušebního tělesa, kterou stanovuje norma v rozmezí od 4 do 6 mm. Rozdíl 2 mm může ve výsledku znamenat rozdíl mezi vyhovujícím a nevyhovujícím betonem. Navíc kontrola výšky hladiny roztoku je obtížná v případě, že není miska výrazně větší než zkušební těleso. Pro českou metodu A je charakteristickým problémem tvar zkušebních těles, neboť u krychle jsou nevýhodou hrany. Ty přispívají k vyššímu rozptylu výsledků v důsledku tzv. hranového efektu, kdy není ponořen pouze zkušební povrch, ale i sousední stěny a může docházet k vyššímu odpadu materiálu z hrany, k čemuž by při namáhání pouze spodní plochy nedošlo. [24]

Velkým problémem u metody A je také vzlínání 3 % roztoku NaCl po bocích zkušebního tělesa. Otázkou je, zda omývat, případně neomývat povrch nad hranicí 5 mm. Při omývání dochází k omytí odloupeného materiálu mimo zkušební plochu, což vede k otázce, zda počítat jako zkušební plochu celou umytou část tělesa, případně jak přesně ji určit. Pokud se plocha navíc nemá omývat, je otázkou, jak dosáhnout pomocí stříčky omývání přesně po hranici 5 mm. Proti vzlínání se dají zkušební tělesa ohraničit bočním nátěrem přesně 5 mm nad spodní hranou (vodní sklo), nenatřená zůstane pouze definovaná plocha, na kterou má působit zkušební roztok. Odpovědi na žádnou z těchto otázek ovšem norma nenabízí. [24]



U metody C, která je mnohem přesněji definovaná než metoda A, je jedinou nepřesností kartáčování zkušebního povrchu tvrdším kartáčem po každých 25 cyklech. Každý zkoušející může na kartáč přitlačit odlišně a zároveň může používat i jinak tvrdý kartáč, což vede k naprosto jiným výsledkům. [24]

5.5.2 Variabilita výsledků

Uvedené nejasnosti v jednotlivých zkušebních metodách vedou k velmi rozdílným výsledkům zkoušek odolnosti betonu vůči CHRL. Sledovanými charakteristikami jsou zejména opakovatelnost a reprodukovatelnost, uvádějící, s jakou variabilitou lze očekávat výsledky zkoušek.

Opakovatelnost vyjadřuje, že rozdíl mezi dvěma získanými výsledky zkoušek z téhož vzorku, které provede jeden zkoušející na jednom zařízení v nejkratším možném čase, nepřekračuje hodnotu opakovatelnosti r průměrně ne více než jednou ve dvaceti případech při standardním a správném provádění metody. [25]

Reprodukovatelnost vyjadřuje, že výsledky na stejném vzorku, získané v nejkratším možném čase dvěma zkoušejícími s různými zařízeními, se nebudou lišit hodnotou reprodukovatelnosti R v průměru ne více než jednou ve dvaceti případech při standardním a správném provádění metody. [25]

V závislosti na provedení MPZ se hodnoty reprodukovatelnosti pohybují v rozmezí 132 až 286 %, což znamená, že pokud jedna laboratoř naměří hodnoty téměř třikrát vyšší než jiná laboratoř, výsledky se pohybují stále v intervalu daném reprodukovatelností a nelze je označit za významně odlišné. [24]



6 Experimentální část

Obsah experimentální části diplomové práce lze rozdělit do dvou částí. První částí je popis zkoušek mnou prováděných v laboratoři, vybranými metodami uvedenými v kapitole 3 a 5, používaných pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL. Druhou částí je porovnání a vyhodnocení výsledků převzatých od společnosti BETOTECH, s.r.o. Jedná se o výsledky zkoušek provedených různými metodami pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL.

6.1 Provádění zkoušek v laboratoři

Zkoušky byly prováděny v laboratořích společnosti BETOTECH, s.r.o. v Berouně a Mostě. Výroba zkušebních vzorků a zkoušení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL metodou C bylo prováděno v Berouně. Stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu bylo prováděno v Mostě.

6.1.1 Používané zařízení

V průběhu provádění jednotlivých zkušebních metod byla používána tato zkušební zařízení zapůjčená od laboratoří BETOTECH, s.r.o v Berouně a Mostě:

- tlakový hrnc pro měření obsahu vzduchu
- míchačka na beton
- pila - řezání válců pro metodu C
- bruska – pro mikroskopickou zkoušku
- mikroskop připojený k PC
- ultrazvuk
- Abramsův kužel - konzistence sednutím
- formy na zkušební tělesa (PUR)
- podkladní deska
- zednická lžice + zednická naběračka (fanka)
- váha
- vibrační stůl
- teploměr
- plastový kýbl



Výše uvedená zařízení odpovídají všem používaným zařízením v průběhu provádění jednotlivých zkoušek pro experimentální část diplomové práce.

6.1.2 Výroba zkušebních těles

Prvním bodem při výrobě zkušebních těles bylo stanovení složení tří záměsí (tab. 6.1), které jsem míchal v laboratoři. Složení záměsí odpovídá provzdušněným betonům s CEM II - portlandským směsným cementem. Označení jednotlivých záměsí je Z1 pro první záměs, Z2 pro druhou záměs a Z3 pro třetí záměs.

Tab. 6.1: Složení jednotlivých záměsí 1 m³ betonu

Materiál	Z1 [kg]	Z2 [kg]	Z3 [kg]
Kamenivo 0/4 Čavyně	863	844	826
Kamenivo 8/16 Čavyně	507	496	485
Kamenivo 11/22 Nihošovice	261	256	250
CEM II A-LL 42,5 R Radotín	380	420	460
Provzdušňovací přísada - MICROPORAN 2	0,38	0,42	0,46
Plastifikační přísada - STACHEMENT S35	1,71	1,89	2,07
Plastifikační přísada - STACHEMENT BV	1,14	1,26	1,38
Účinný obsah vody	175	175	175

Kamenivo, především frakce 0/4, bylo před mícháním ponecháno rozprostřené na podlaze v laboratoři, čímž bylo vysušené. Samotnému míchání předcházelo navážení jednotlivých složek záměsí (obr. 6.1). Následně byly navlhčeny všechny potřebné pomůcky pro míchání jednotlivých složek v míchačce.



Obr. 6.1: Navážení jednotlivých složek



Po navlhčení jsem jednotlivé složky nasypal do míchačky a nechal promíchat, dokud nedošlo k tzv. zhomogenizování směsi (obr 6.2).



Obr. 6.2: Míchání betonové směsi v míchačce

Po namíchání betonové směsi jsem provedl běžné zkoušky na čerstvém betonu:

- Stanovení konzistence betonu pomocí sednutí kužele



Obr. 6.3: Stanovení konzistence betonu

- Změření teploty betonu
- Stanovení objemové hmotnosti betonu



- Stanovení obsahu vzduchu tlakoměrnou metodou



Obr. 6.4: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Po dokončení zkoušek na čerstvém betonu jsem vytřel PUR formy olejem pro odbednění a následně plnil betonem. Horní povrch vzorků jsem uhladil pilovitým pohybem. Po vytvrdnutí betonu jsem zkušební tělesa odbednil a uložil na dobu 28 dnů ve vlhkém prostředí.

Tab. 6.2: Výsledky zkoušek prováděných na čerstvém betonu

Zkouška na čerstvém betonu	Z1	Z2	Z3
Vodní součinitel v (účinný obsah)/ c	0,46	0,42	0,38
Konzistence sednutím [mm] / stupeň	180 / S4	180 / S4	180 / S4
Obsah vzduchu - tlakoměrná metoda [%]	5,1	4,7	5,7
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2240	2250	2230
Teplota prostředí / betonu [°C]	20 / 22	20 / 22	20 / 22

Celkem bylo vytvořeno 9 zkušebních těles tvaru válce \varnothing 150 mm x 300 mm pro zkoušení odolnosti povrchu betonu a 11 krychlí o hraně 150 mm, dvě pro stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu a 9 pro stanovení pevnosti v tlaku.

Tab. 6.3: Pevnost v tlaku po 28 dnech

Pevnost v tlaku	Z1	Z2	Z3
Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	39,0	41,0	46,7



6.1.3 Stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL

Stanovení odolnosti jsem prováděl metodou C - běžně používanou v Čechách, která je podrobněji popsána v kapitole 5.1.

Po 28 dnech jsem z vytvořených zkušebních těles tvaru válců $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ provedl odřez horního povrchu betonu tloušťky 50 mm (obr. 6.5), který se pro tuto zkoušku používá. Na jednotlivé odřezy jsem následně osadil vodotěsné objímky a nalil na ně vodu, kterou jsem na nich ponechal dva dny. Po 28 dnech byly provedeny zkoušky krychelné pevnosti pro jednotlivé receptury.



Obr. 6.5: Řezání válce

Po dvou dnech jsem slil vodu ze zkušebních těles, očistil a vložil jednotlivá tělesa do mrazicího boxu (obr. 6.6). Dále jsem na tělesa nalil 3 % roztok NaCl a zahájil zmrazovací cykly.



Obr. 6.6: Uložení zkušebních těles do mrazicího boxu



Po každých 25 cyklech jsem měřil odpady na jednotlivých tělesech (tab. 6.2). Uvolněné částice jsem opatrně smyl do misky, potom okartáčoval a znovu smyl do misky (obr. 6.7).



Obr. 6.7: Omývání uvolněných částic betonu

Následně jsem misky s uvolněnými částicemi vložil do sušárny a nechal plně vysušit při 105 °C. (obr. 6.8)



Obr. 6.8: Sušení uvolněných částí při 105 °C



Po vysušení jsem uvolněné částice z každého vzorku zvážil a zaznamenal hmotnost uvolněných částic - odpady (obr. 6.9)



Obr. 6.9: Vážení uvolněných částic

Tento postup jsem opakoval až do dosažení 125 cyklů. Postupně získávané odpady jsou uvedeny v tabulce 6.4, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty ze třech zkušebních těles pro každou záměs.

Tab. 6.4: Získané laboratorní hodnoty CHRL C-125

Počet cyklů	Průměrný odpad - Z1		Průměrný odpad - Z2		Průměrný odpad - Z3	
	[g]	[g/m ²]	[g]	[g/m ²]	[g]	[g/m ²]
25	0,43	24,5	0,60	34,0	0,56	31,7
50	0,80	45,3	1,27	71,7	1,13	63,9
75	1,43	81,1	2,07	116,9	1,87	105,8
100	1,97	111,3	3,19	180,3	2,78	157,3
125	3,00	169,8	4,42	250,1	3,92	221,8



6.1.4 Stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Druhou zkouškou prováděnou v laboratoři bylo stanovení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu tzv. Spacing factor, která je podrobněji popsána v kapitole 3.3. Zkouška byla vzhledem k obsahu cementu provedena pouze na namíchané záměsi Z1, pro kterou byl obsah cementu nejnižší.

Ze všeho nejdříve jsem ze středu dvou krychlí o hraně 150 mm odřízl dvě zkušební tělesa o rozměrech 150 mm x 100 mm x 20 mm. Následně jsem tělesa leštil ve čtyřech krocích postupným nanášením past s rozdílnou hrubostí. Jako první jsem použil pastu s hrubostí P240 následně P320 a P600 a nakonec P1200 (obr. 6.10).



Obr. 6.10: Příprava vzorků SPF - leštění

Doba leštění se lišila podle hrubosti použité pasty, první krok při použití pasty s hrubostí P240 trval 24 minut, druhý až čtvrtý krok s pastami o hrubosti P320 až P1200 trval vždy po 12 minutách. Celkem tedy samotné leštění jedné sady těles bez času na čištění trvá jednu hodinu. Po dokončení leštění jsem tělesa očistil od nečistot pomocí ultrazvuku, čímž jsem dokončil přípravu zkušebních těles pro mikroskopickou zkoušku.

Pro samotnou mikroskopickou zkoušku jsem používal mikroskop s kamerou připojenou k počítači s ovládacím softwarem od společnosti UVB TECHNIK (obr. 6.9), což zjednodušilo samotné vyhledávání pórů na jednotlivých tětvách. Připravená tělesa jsem postupně umístil na manipulační stůl s automatickým posouváním tak, abych

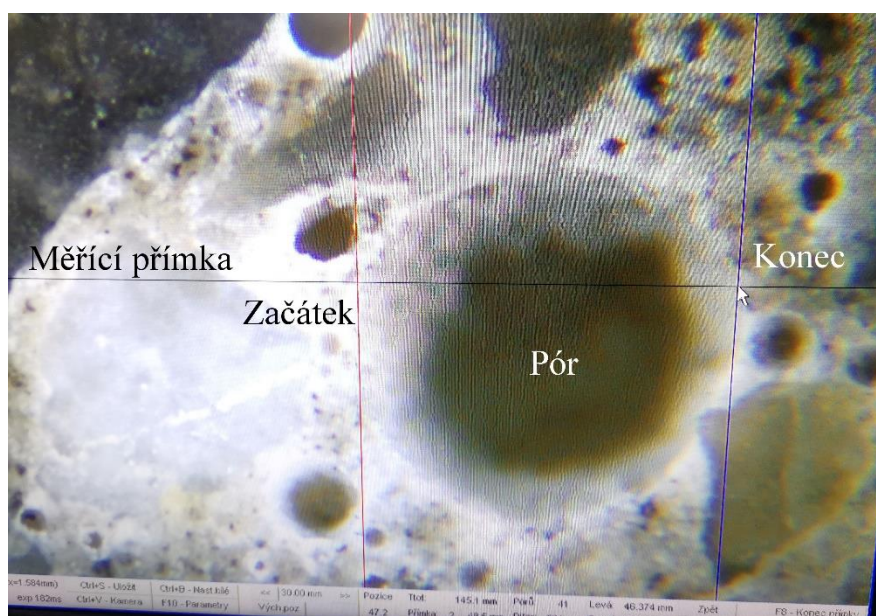


sledované měřicí přímky měl rovnoběžné s horním povrchem vzorku. Automatické posouvání odpovídalo posunu mezi jednotlivými měřicími přímkami, tj. po 6 milimetrech v horní, dolní a středové části vzorku (viz obr. 3.6).



Obr. 6.11: Mikroskop + PC pro vyhodnocení SPF

Po umístění tělesa na manipulační stolek jsem mohl přistoupit k hledání a označování jednotlivých pórů. Označování pórů probíhalo pomocí soustavy měřících přímek, po kterých jsem se díky počítači pohyboval jednoduše pomocí myši. Označil jsem vždy začátek a konec póru a posunul se dále po přímce (obr. 6.12).



Obr. 6.12: Označení vzduchového póru na měřicí přímce



Takto jsem postupoval pro celou soustavu měřicích přímek na obou tělesech. Výsledkem po označení všech vzduchových pórů bylo jejich rozdělení (tab. 6.5) ze kterého vycházejí následující charakteristiky:

- Celková délka soustavy měřicích přímek $T_{\text{tot}} = 2403,500 \text{ mm}$
- Celková délka tětiv přes všechny póry $T_a = 142,277 \text{ mm}$
- Celková délka přes pevnou fázi $T_s = 2261,223 \text{ mm}$
- Celkový počet měřených tětiv $N = 926$

Tab. 6.5: Stanovení rozdělení vzduchových pórů

Třída	Rozpětí třídy	Tětiv ve	Četnost	Část pórů možných	Možné	Póry ve	Objem pórů	Obsah	Souhrnný
		třídě	tětiv	k zaznamenání	maximum	třídě		vzduchu	obsah vzduchu
		[μm]	[mm^{-1}]	[mm^2]	[mm^{-3}]	[mm^{-3}]	[mm^3]	%	%
1	<0-10>	0	0,00000	0,0001178	0,00000	-28,756	5,24E-07	-1,51E-03	0,00
2	<15-20>	19	0,00791	0,0002749	28,75641	-117,635	4,19E-06	-4,93E-02	-0,05
3	<25-30>	152	0,06324	0,0004320	146,39145	84,936	1,41E-05	1,20E-01	0,07
4	<35-40>	87	0,03620	0,0005890	61,45537	15,171	3,35E-05	5,08E-02	0,12
5	<45-50>	83	0,03453	0,0007461	46,28464	17,724	6,54E-05	1,16E-01	0,24
6	<55-60>	62	0,02580	0,0009032	28,56036	13,584	1,13E-04	1,53E-01	0,39
7	<65-80>	82	0,03412	0,0022780	14,97670	6,816	2,68E-04	1,83E-01	0,57
8	<85-100>	57	0,02372	0,0029060	8,16084	1,215	5,24E-04	6,37E-02	0,64
9	<105-120>	59	0,02455	0,0035340	6,94610	1,149	9,05E-04	1,04E-01	0,74
10	<125-140>	58	0,02413	0,0041630	5,79666	4,147	1,44E-03	5,97E-01	1,34
11	<145-160>	19	0,00791	0,0047910	1,65000	0,345	2,14E-03	7,38E-02	1,41
12	<165-180>	17	0,00707	0,0054190	1,30523	-0,071	3,05E-03	-2,16E-02	1,39
13	<185-200>	20	0,00832	0,0060476	1,37595	0,628	4,19E-03	2,63E-01	1,65
14	<205-220>	12	0,00499	0,0066760	0,74786	-0,107	5,58E-03	-5,95E-02	1,59
15	<225-240>	15	0,00624	0,0073040	0,85445	0,173	7,24E-03	1,25E-01	1,72
16	<245-260>	13	0,00541	0,0079330	0,68181	-0,144	9,20E-03	-1,33E-01	1,58
17	<265-280>	17	0,00707	0,0085610	0,82619	-0,170	1,15E-02	-1,95E-01	1,39
18	<285-300>	22	0,00915	0,0091890	0,99612	0,511	1,41E-02	7,20E-01	2,11
19	<305-350>	30	0,01248	0,0257200	0,48530	0,120	2,24E-02	2,70E-01	2,38
20	<355-400>	26	0,01082	0,0296500	0,36484	0,092	3,35E-02	3,09E-01	2,69
21	<405-450>	22	0,00915	0,0335800	0,27258	0,006	4,77E-02	3,01E-02	2,72
22	<455-500>	24	0,00999	0,0375000	0,26628	0,254	6,54E-02	1,66E+00	4,38
23	<505-1000>	18	0,00749	0,5910000	0,01267	0,011	5,24E-01	5,53E-01	4,93
24	<1005-1500>	5	0,00208	0,9837000	0,00211	0,001	1,77E+00	2,14E-01	5,14
25	<1505-2000>	3	0,00125	1,3760000	0,00091	0,000	4,19E+00	8,44E-02	5,23
26	<2005-2500>	3	0,00125	1,7690000	0,00071	0,001	8,18E+00	4,20E-01	5,65
27	<2505-3000>	1	0,00042	2,1620000	0,00019	0,000	1,41E+01	2,71E-01	5,92
28	<3005-4000>	0	0,00000	5,5020000	0,00000	0,000	3,35E+01	0,00E+00	5,92



Pro další výpočty je nutné stanovit objem cementového tmele v betonu - parametr P , který se vypočítá následovně (dosazené hodnoty jsou z tab. 6.1):

$$P_c = \frac{\text{obsah cementu [kg]}}{\text{měrná hmotnost cementu [kg} \cdot \text{m}^{-3}]}} \cdot 100 = \frac{380}{3100} \cdot 100 = 12,26 \%$$

$$P_v = \frac{\text{obsah vody [kg]}}{\text{měrná hmotnost vody [kg} \cdot \text{m}^{-3}]}} \cdot 100 = \frac{175}{1000} \cdot 100 = 17,50 \%$$

$$P_{př} = \frac{\text{obsah přísad [kg]}}{\text{měrná hmotnost přísad [kg} \cdot \text{m}^{-3}]}} \cdot 100 = \frac{3,23}{1010} \cdot 100 = 0,32 \%$$

$$P = P_c + P_v + P_{př} = 12,26 + 17,50 + 0,32 = 30,08 \%$$

Kde: P_c je procentuální objem cementu, P_v procentuální objem vody a $P_{př}$ je procentuální objem přísad v cementovém tmelu.

Celkový obsah vzduchových pórů:

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} = \frac{142,277 \cdot 100}{2403,5} = 5,92 \%$$

Měrný povrch vzduchových pórů:

$$a = \frac{4 \cdot N}{T_a} = \frac{4 \cdot 926}{142,277} = 26 \text{ mm}^{-1}$$

Poměr tmel : vzduchových pórů:

$$R = \frac{P}{A} = \frac{30,08}{5,92} = 5,08$$

Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů:

$$L = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N} = \frac{30,08 \cdot 2403,5}{400 \cdot 926} = 0,195$$

Obsah mikroskopických vzduchových pórů A_{300} :

$$A_{300} = 2,11 \%$$

- Převezme se z tabulky 6.5 ze sloupce souhrnného obsahu vzduchu podle třídy odpovídající velikosti póru do 300 μm , čemuž odpovídá třída 18



6.2 Převzaté hodnoty – BETOTECH

V této části se práce zabývá souborem převzatých výsledků zkoušek prováděných společností BETOTECH, s.r.o. doplněných o zkoušky mnou popsanych v kapitole 6.1.

Společnost BETOTECH, s.r.o. mi poskytla informace o složení jednotlivých zkoušených vzorků a výsledky prováděných zkoušek, zejména:

- Stanovení odolnosti vůči CHRL - metoda A, C
- Obsah vzduchu na čerstvém betonu
- Celkový obsah vzduchu na ztvrdlém betonu (A)
- Měrný povrch měřených pórů (α)
- Součinitel rozložení vzduchových pórů (L)
- Obsah mikroskopického vzduchu A_{300}

Značení jednotlivých zkušebních vzorků je rozděleno podle používaného cementu, použité metody pro stanovení odolnosti vůči CHRL a dále podle místa výroby zkušební směsi následovně v tabulce 6.6. Veškeré převzaté údaje jsou uvedeny v přílohách.

Tab. 6.6: Způsob značení vzorků

Označení vzorku	Použitý cement	Stanovení CHRL	Místo odběru
101 - 137	CEM I 42,5 R Radotín	Metoda C	Betonárna
141 - 149	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda C	Betonárna
151 - 168	CEM I 42,5 R Radotín	Metoda C	Laboratoř
171 - 179	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda C	Laboratoř
201 - 226	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda A	Laboratoř
301 - 329	CEM II 42,5 R Radotín	Metoda C	Laboratoř

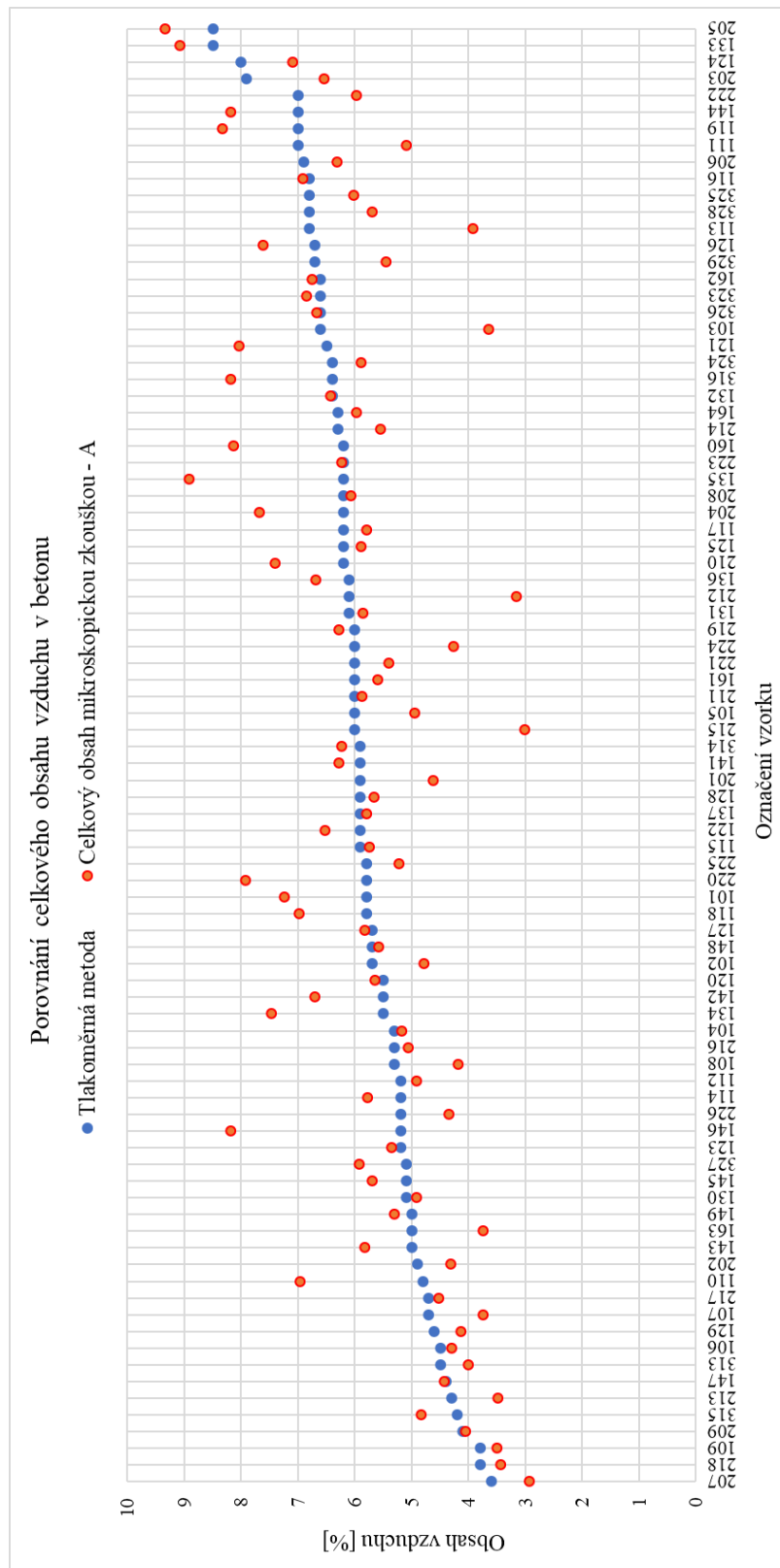
Nejdříve je porovnán naměřený obsah vzduchu v čerstvém betonu se vzduchem získaným ve ztvrdlém betonu. Následně je provedeno porovnání výsledků získaných na tělesech zhotovených zároveň z cementu CEM I a CEM II a stanovením odolnosti vůči CHRL pomocí metody C. Jako poslední je provedeno porovnání výsledků s roztříděním podle použitých cementů, metod a místa odběru jako značení vzorků dle tabulky 6.7.

6.2.1 Porovnání mikroskopického obsahu vzduchu s tlakoměrnou metodou

Pro porovnání na obrázcích 6.13 a 6.14 jsem používal hodnoty pro všechny vzorky, u kterých je uveden obsah vzduchu v čerstvém betonu, celkem se jednalo o 88 vzorků.



Jelikož obsah vzduchu, byl vždy stanoven stejnými metodami, porovnával jsem vzorky ze všech skupin uvedených v tabulce 6.5.



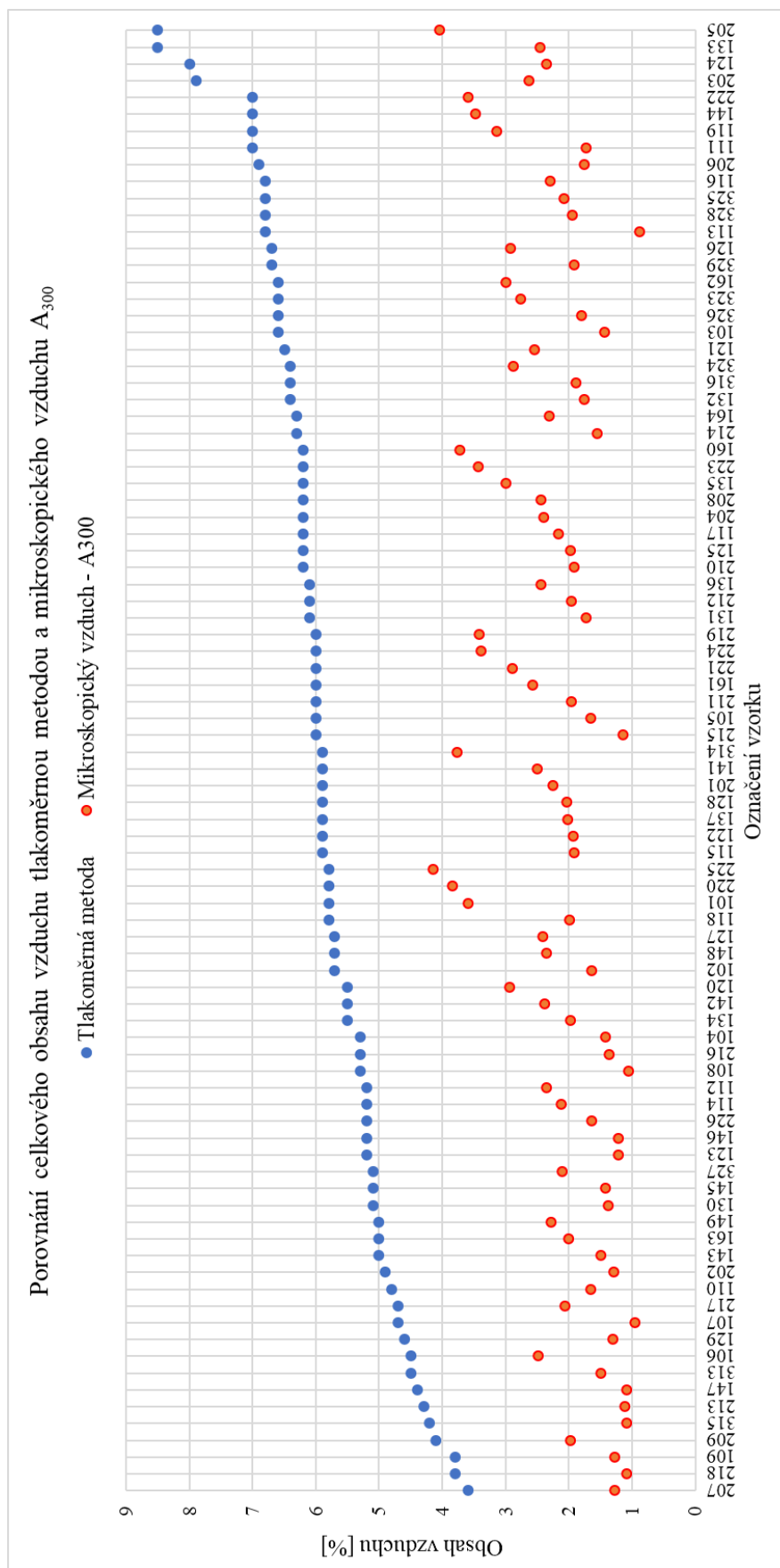
Obr. 6.13: Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu



Graf na obrázku 6.13 porovnává hodnoty obsahu vzduchu zjištěné na čerstvém betonu pomocí tlakoměrné metody (podrobněji popsána v kapitole 3.1) a obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu pomocí mikroskopické metody (popsána v kapitole 3.3). Výsledky jsou seřazeny podle tlakoměrné metody od nejmenší hodnoty po největší.

Jak je z grafu patrné, hodnoty obsahu vzduchu v čerstvém a ztvrdlém betonu se liší. To může být způsobeno například ukládáním a vibrováním betonu do formy pro vytvoření zkušebního tělesa používaného při mikroskopické zkoušce. U čerstvého betonu může být obsah vzduchu ovlivněn teplotou betonu. Tlakoměrná metoda může vykazovat nepřesnost vzhledem k reprodukovatelnosti této metody, která je přibližně 18 %.

Na obrázku 6.14 je vidět rozdíl mezi v praxi běžně používanou tlakoměrnou metodou pro zjištění obsahu vzduchu v čerstvém betonu a obsahem mikroskopického vzduchu A_{300} , což je tzv. účinný obsah vzduchu, jenž by měl přímo ovlivňovat odolnost povrchu betonu vůči CHRL. Výsledky jsou seřazeny podle tlakoměrné metody od nejmenší hodnoty po největší. V drtivé většině provádění kontroly vzduchu ať už na stavbách nebo v laboratořích se kontroluje minimální obsah vzduchu pomocí tlakoměrné metody, což jak je vidět na obrázku 6.14 není přesné, jelikož hodnoty jsou ve všech případech vyšší než účinný obsah vzduchu A_{300} . Reálný účinný obsah vzduchu, který zajišťuje povrchovou odolnost betonu, je tedy ve skutečnosti nižší, než jakou ukazuje tlakoměrná metoda a je nutné s tímto faktem počítat.



Obr. 6.14: Porovnání obsahu vzduchu tlakoměrnou metodou a mikroskopického A_{300}

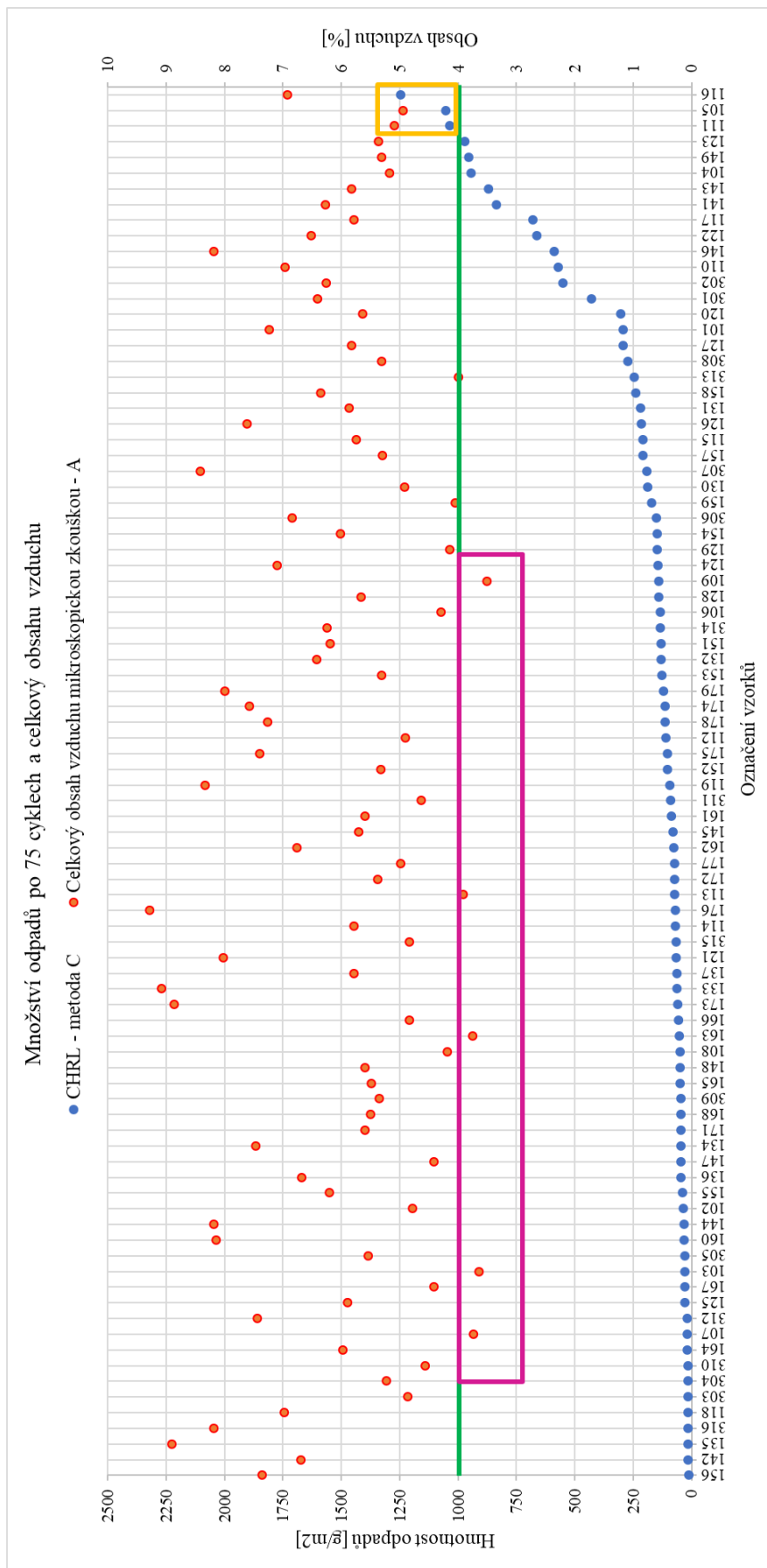


6.2.2 Porovnání pro metodu C po 75 cyklech s CEM I + CEM II

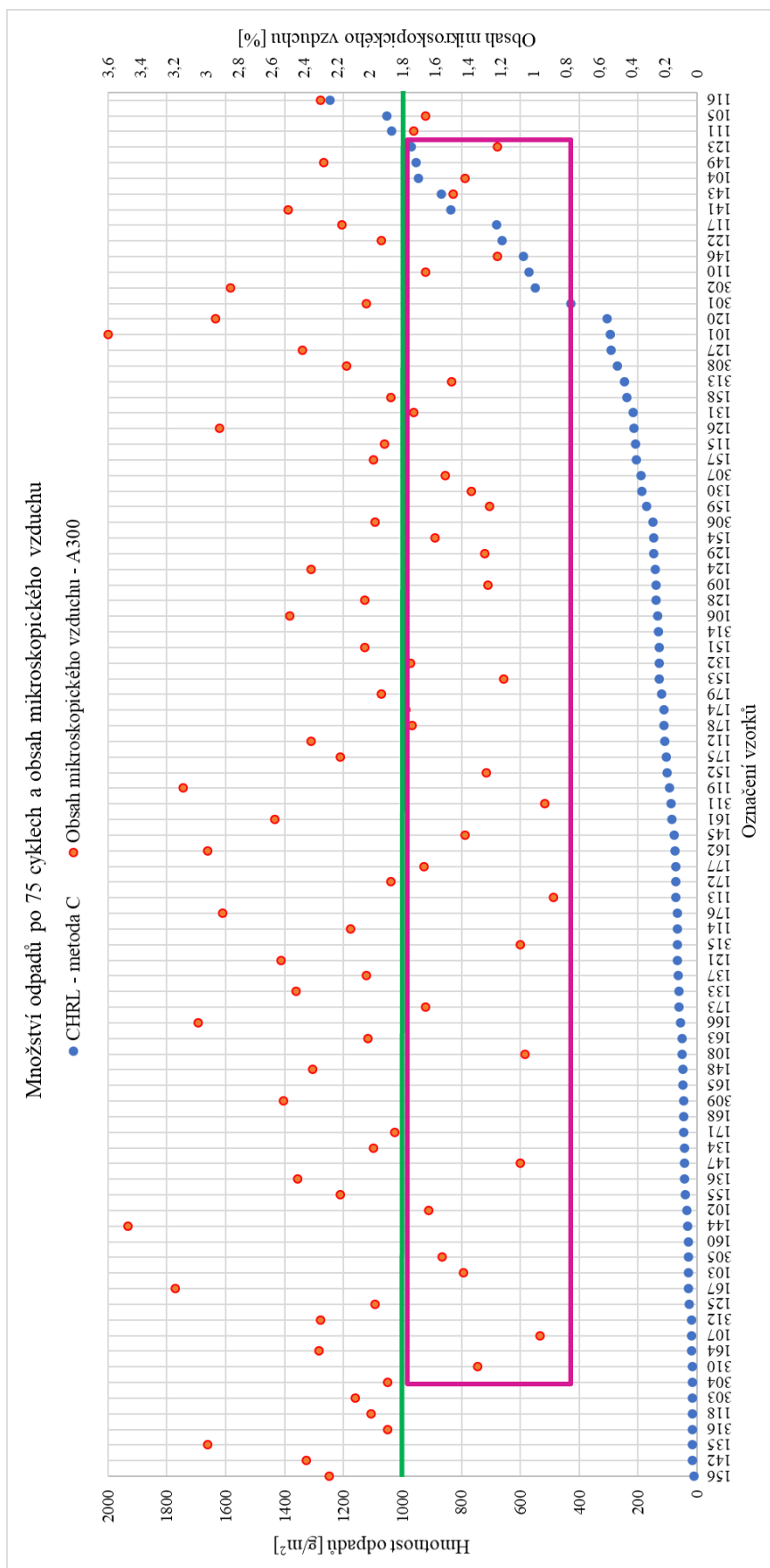
V této podkapitole jsem sledoval závislost mezi odolností povrchu betonu vůči CHRL vyjádřenou odpady po 75 cyklech pomocí metody C a mikroskopicky získanými charakteristikami ztvrdlého betonu.

Velikost souboru pro tuto část čítá 89 vzorků betonu vytvořených z cementů CEM I vyráběného v Radotíně a v Mokré a CEM II vyráběného v Radotíně. Zároveň se jedná o betony vyráběné jak v laboratoři, tak na betonárně.

Na obrázku 6.15 je uveden celkový obsah vzduchu stanovený mikroskopickou zkouškou a celkové odpady stanovené po 75 cyklech metodou C. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů, získané z metody C pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL, od nejmenší hodnoty po největší. Na grafu je zeleně vyznačena limitní hranice pro maximální celkové odpady po 75 cyklech, která zároveň označuje limitní hranici pro minimální obsah celkového vzduchu v betonu pro stupeň vlivu prostředí XF4. Pro 91 % ze všech vzorků platí, že pokud je celkový obsah vzduchu vyšší než 4 %, potom jsou odpady po 75 cyklech nižší než 1000 g/m^2 . Vzorky, které mají pod 4 %, by tak měly vykazovat menší odolnost povrchu betonu než vzorky s větším obsahem. To data na obrázku 6.15 nepotvrzují, neboť vzorky ohraničené fialově mají obsah vzduchu nižší než 4 %, ovšem celkový odpad po 75 cyklech se u těchto vzorků pohybuje do 250 g/m^2 . U třech vzorků ohraničených oranžově jsou odpady po 75 cyklech vyšší než 1000 g/m^2 , ale obsah vzduchu je nad hranicí 4 %.



Obr. 6.15: Množství odpadů a celkový obsah vzduchu – CHRL - C



Obr. 6.16: Množství odpadů a obsah vzduchu A₃₀₀ – CHRL - C

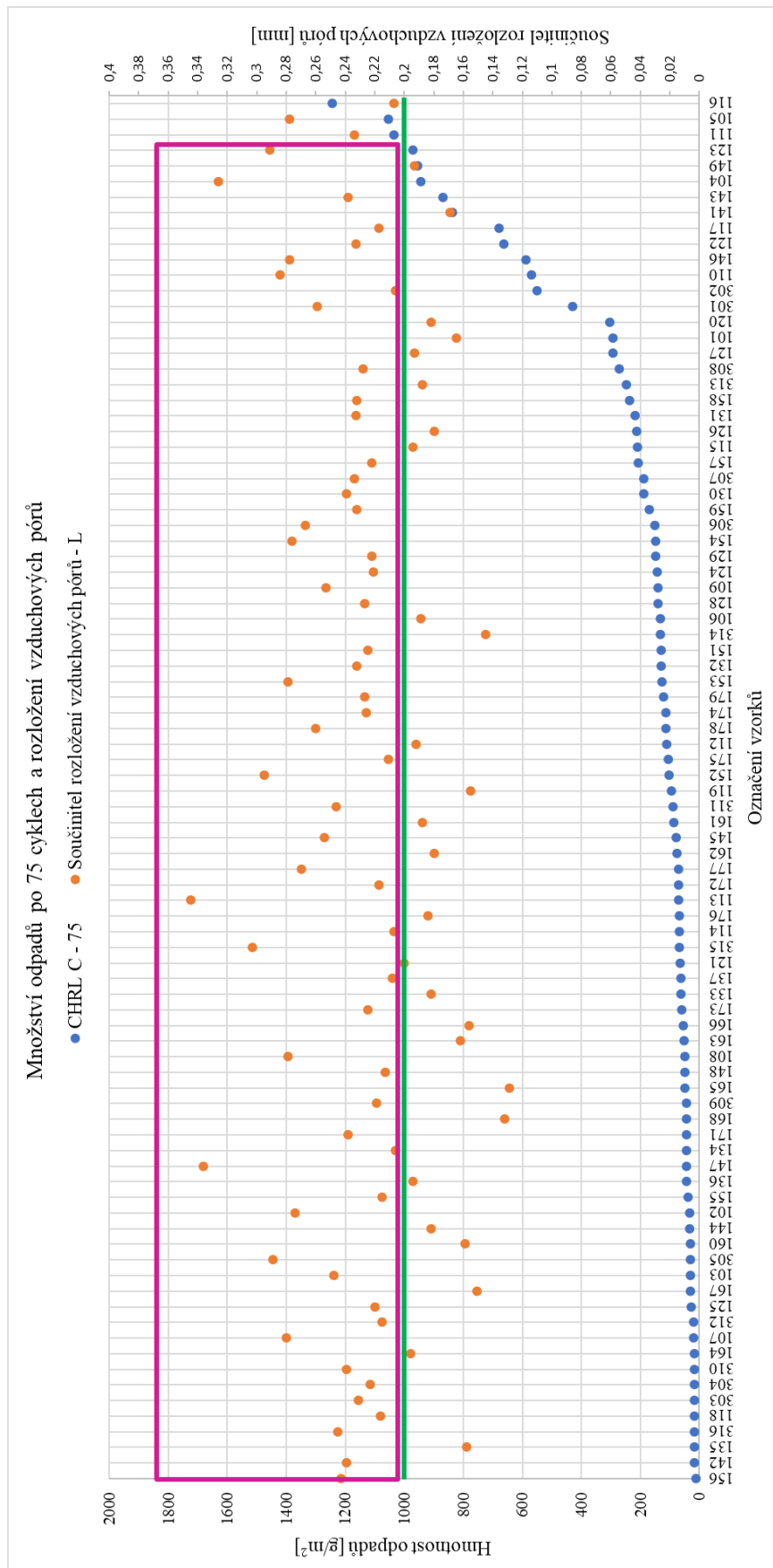


Graf na obrázku 6.16 ukazuje celkové množství odpadů po 75 cyklech spolu s obsahem účinného vzduchu A_{300} stanoveného mikroskopickou zkouškou. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů, získané z metody C pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL, od nejmenší hodnoty po největší. Zeleně je naznačena limitní hranici pro maximální odpad po 75 cyklech a zároveň limitní hranice pro minimální obsah vzduchu A_{300} .

Z grafu je patrné, že hodnoty s obsahem mikroskopického vzduchu A_{300} nižším než 1,8 % - fialově ohraničené - nesplňují předpoklad nižší odolnosti povrchu betonu vůči CHRL. Odpady pro tyto vzorky se pohybují pod limitní hranicí odpadů 1000 g/m^2 po 75 cyklech, u většiny dokonce výrazně. U vzorku 116 je naopak obsah mikroskopického vzduchu A_{300} vyšší než 2,2 %, nicméně odpad je nad limitem - přes 1200 g/m^2 . Ovšem pro 67 % vzorků odpovídá, že pokud je obsah vzduchu mikroskopického vzduchu A_{300} alespoň 1,8 %, potom jsou odpady po 75 cyklech menší než 1000 g/m^2 .

Na obrázku 6.17 je zobrazen graf s celkovými odpady po 75 cyklech a současně součinitel rozložení vzduchových pórů L . Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů, získané z metody C pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL, od nejmenší hodnoty po největší. Zeleně je vyznačena limitní hranice pro maximální odpad po 75 cyklech a zároveň maximální součinitel rozložení vzduchových pórů odpovídající hodnotě 0,2 mm.

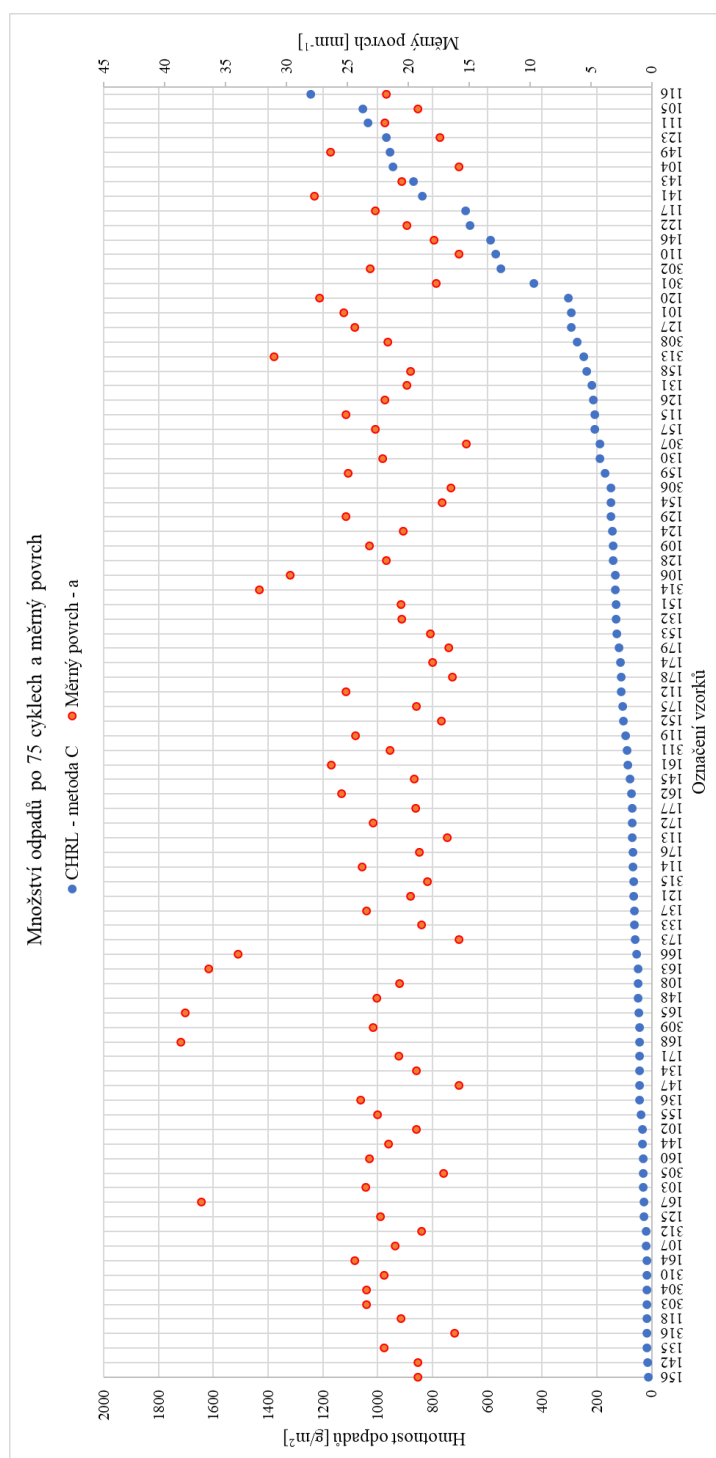
Podle předpokladu by betony s vyšším součinitelem rozložení vzduchových pórů než 0,2 mm měly vykazovat nízkou odolnost povrchu vůči CHRL, tedy celkové odpady po 75 cyklech nad 1000 g/m^2 . Fialově ohraničené hodnoty součinitelů daných vzorků na obrázku 6.17, odpovídající 67 % ze všech vzorků, mají součinitele rozložení vzduchových pórů vyšší než limitní hodnotu, avšak odpady jsou nižší, než je limitní hranice. Předpokladu tedy odpovídá pouze 33 % vzorků.



Obr. 6.17: Množství odpadů a součinitel rozložení vzduchových pórů L - CHRL - C



Pro úplnost je na obrázku 6.18 uveden graf s celkovými odpady po 75 cyklech a příslušnými měrnými povrchy. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů od nejmenší hodnoty po největší. Měrný povrch nemá normami definovanou žádnou limitní hodnotu. Předpokladem ovšem je, že čím vyšší měrný povrch je, tím vyšší je odolnost povrchu betonu vůči CHRL.



Obr. 6.18: Množství odpadů a měrný povrch – CHRL - C



6.2.3 Porovnání vzhledem k druhu použitého cementu a metody stanovení CHRL

V této podkapitole jsem sledoval závislost mezi odolností povrchu betonu vůči CHRL a mikroskopicky získanými charakteristikami ztvrdlého betonu. Pro získání podrobnějšího porovnání jsou jednotlivé vzorky rozděleny do skupin podle tabulky 6.7. Rozdělení je podle druhu použitých cementů, zkušební metody, počtu cyklů a místa odběru betonu. Další složky betonových směsí jako: kamenivo, přísady a obsah vody jsou pro jednotlivé vzorky ve skupinách odlišné.

Tab. 6.7: Rozdělení na skupiny dle cementu, metody a počtu cyklů

Skupina	Označení vzorku	Použitý cement	Stanovení CHRL	Počet cyklů	Místo odběru
1	101 - 137	CEM I 42,5 R Radotín	Metoda C	75	Betonárna
2	141 - 149	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda C	75	Betonárna
3	151 - 168	CEM I 42,5 R Radotín	Metoda C	125	Laboratoř
4	171 - 179	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda C	125	Laboratoř
5	201 - 216	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda A	100	Laboratoř
6	217 - 226	CEM I 42,5 R Mokrá	Metoda A	150	Laboratoř
7	301 - 316	CEM II 42,5 R Radotín	Metoda C	75	Laboratoř
8	317 - 329	CEM II 42,5 R Radotín	Metoda C	125	Laboratoř

V této části jsou zahrnuty veškeré převzaté hodnoty, velikost souboru tak čítá hodnoty z celkem 128 zkoušených vzorků.

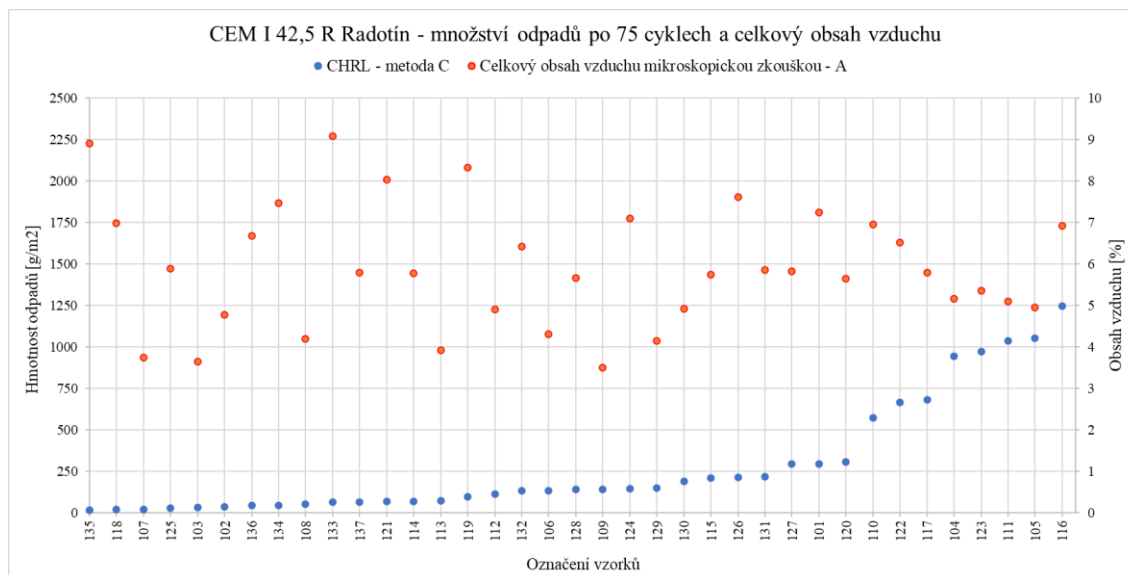
Pro celé následující porovnávání jsem vždy pro každou skupinu uvedl graf s výsledky mikroskopické zkoušky porovnané s hodnotami odpadů po předepsaném počtu cyklů danou metodou. Pro přehlednost jsem následně uvedl stejný graf ještě jednou s případnými vyznačenými limitními hodnotami, či jinými úpravami.

6.2.3.1 Množství odpadů a celkový obsah vzduchu

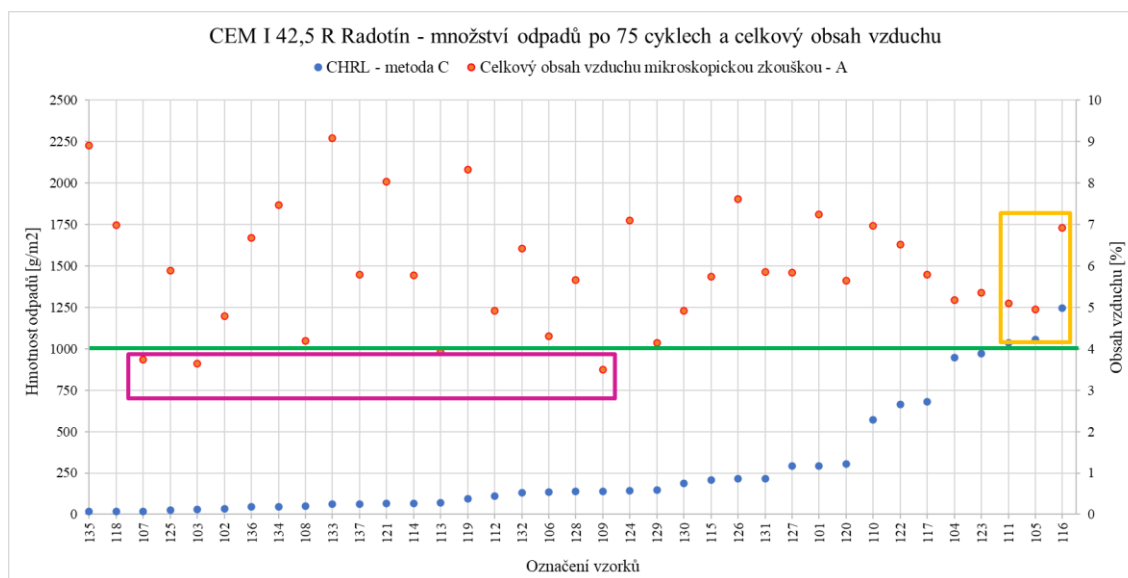
Na každém grafu je hmotnost odpadů pro jednotlivé vzorky vyznačena modrým bodem a celkový obsah vzduchu zjištěný mikroskopickou metodou červeným bodem. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů od nejmenší hodnoty po největší. Pro každou skupinu je na druhém - komentovaném grafu vyznačena zeleně limitní hranice pro maximální odpady pro metodu C po 75 cyklech a pro metodu A po 100 cyklech, který odpovídá dle ČSN P 73 2404 hodnotě 1000 g/m². Tato limitní hranice značí i minimální celkový obsah vzduchu 4 % dle ČSN P 73 2404.



Skupina 1



Obr. 6.19: Skupina 1 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky

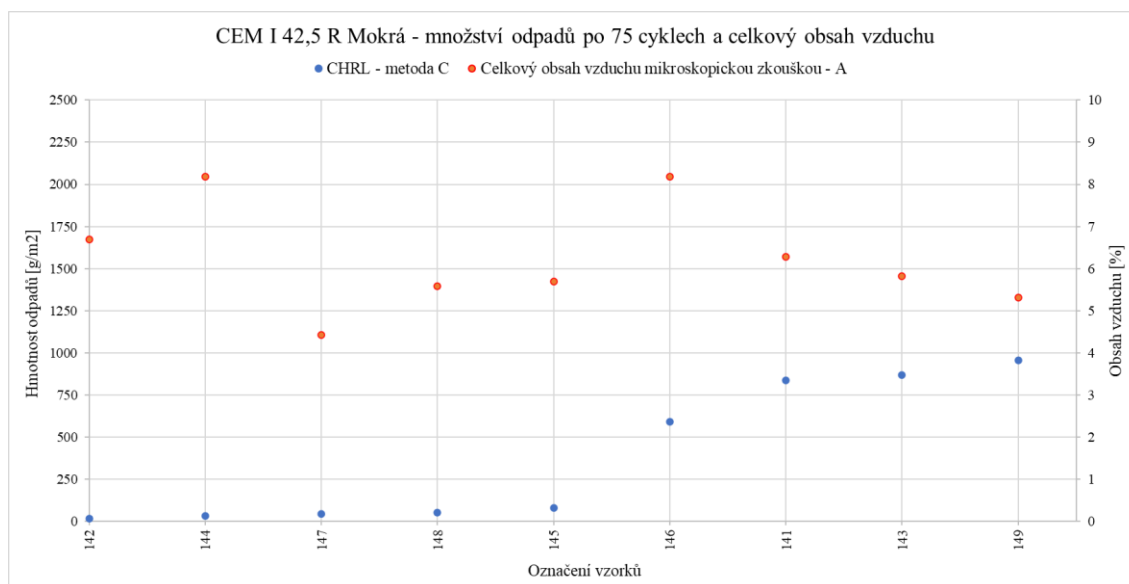


Obr. 6.20: Skupina 1 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

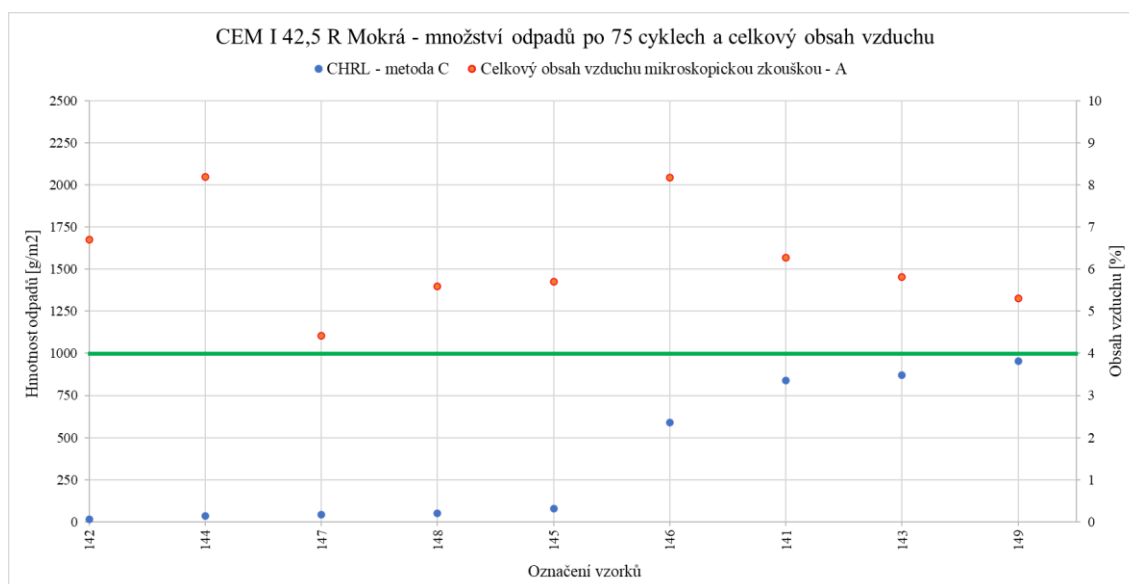
Z grafu na obrázku 6.20 je patrné, že pro 81 % zkoušených vzorků v této skupině platí, že pokud je celkový obsah vzduchu větší než 4 %, potom i celkové odpady po 75 cyklech jsou menší než 1000 g/m². Vzorky ohraničené fialově nesplňují minimální celkový obsah vzduchu, nicméně celkové odpady vycházejí výrazně pod limitní hranicí. Žlutě ohraničené vzorky naopak obsahují více vzduchu než 4 %, ale zároveň mají i odpady vyšší než 1000 g/m². Dále je možné pozorovat kolísání hmotnosti celkových odpadů od 34 do 1054 g/m² při obsahu vzduchu okolo 5 %.



Skupina 2



Obr. 6.21: Skupina 2 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky

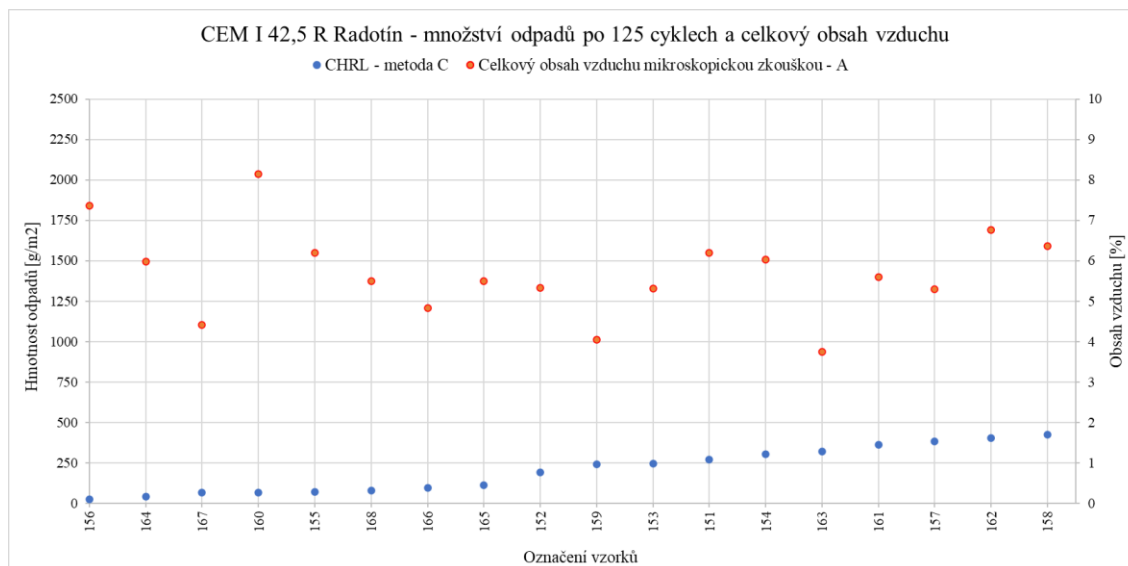


Obr. 6.22: Skupina 2 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

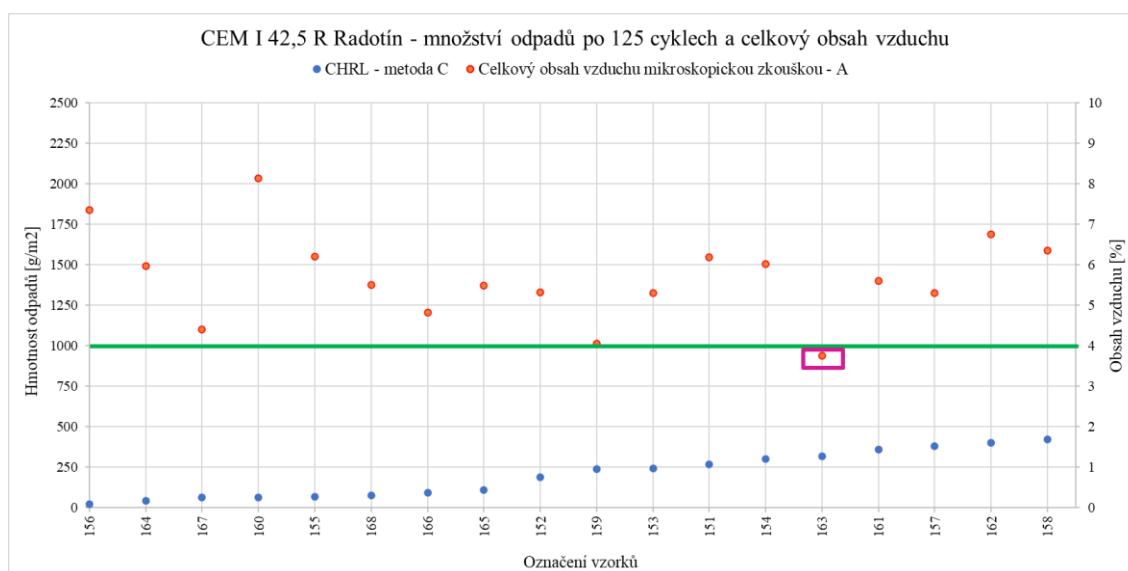
Z obrázku 6.22 je patrné, že pokud je celkový obsah vzduchu ve vzorku vyšší než 4 % platí pro všechny vzorky ve skupině, že vyhovuje i celkový odpad po 75 cyklech. Dále je možné pozorovat kolísání hmotnosti celkových odpadů od 44 do 954 g/m² při obsahu vzduchu okolo 5 %.



Skupina 3



Obr. 6.23: Skupina 3 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky

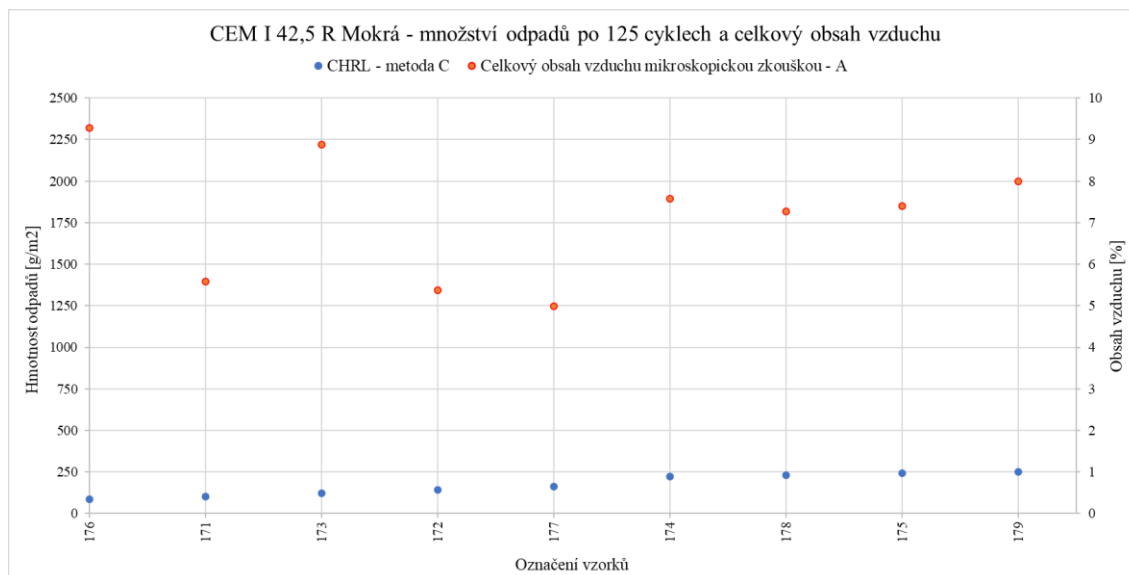


Obr. 6.24: Skupina 3 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

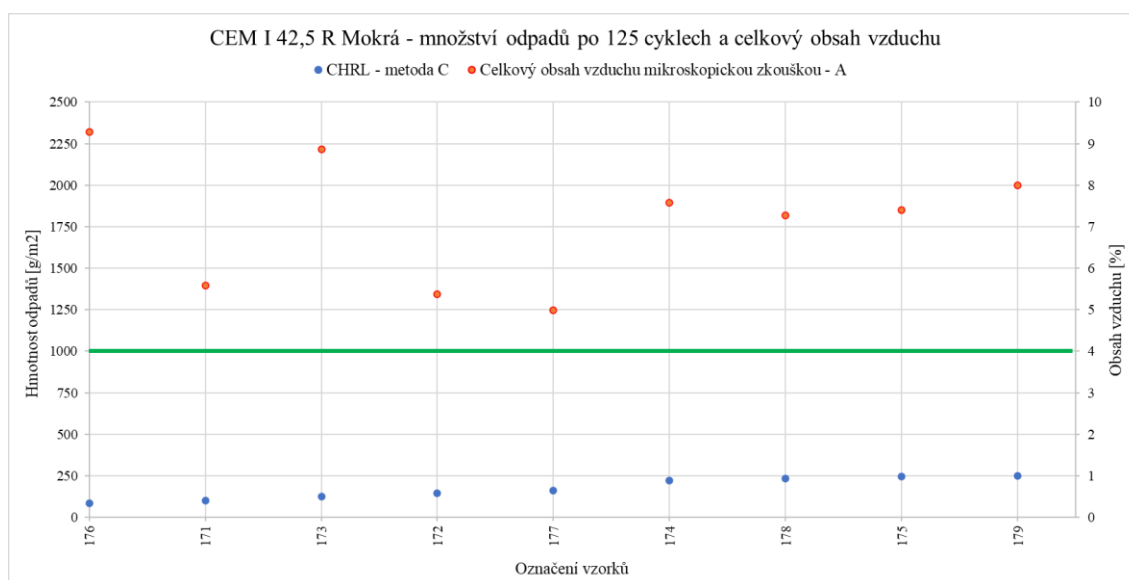
Jak je vidět na obrázku 6.24, pro skupinu 3 platí s výjimkou jednoho vzorku, že pokud je splněna 4 % hranice celkového obsahu vzduchu, potom i odpady, v tomto případě dokonce po 125 cyklech, jsou nižší než limitní odpady po 75 cyklech. Pro vzorek č. 163 i přes menší obsah vzduchu vychází odpad po 125 cyklech výrazně pod 500 g/m². Skupina 3 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 1. Nicméně vzorky ve skupině 3 vykazují menší rozptyl.



Skupina 4



Obr. 6.25: Skupina 4 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky

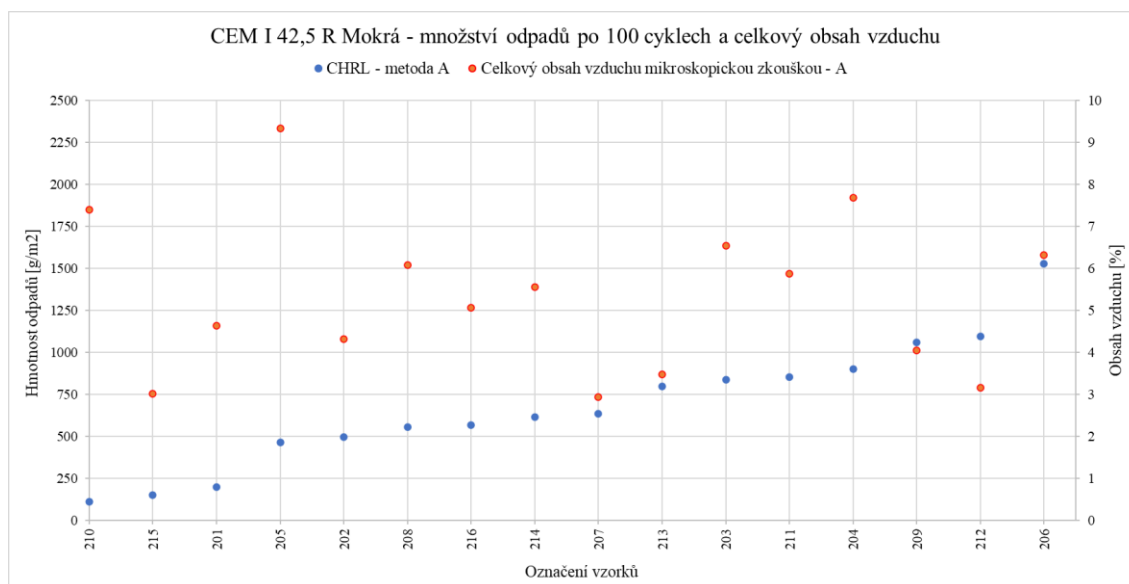


Obr. 6.26: Skupina 4 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

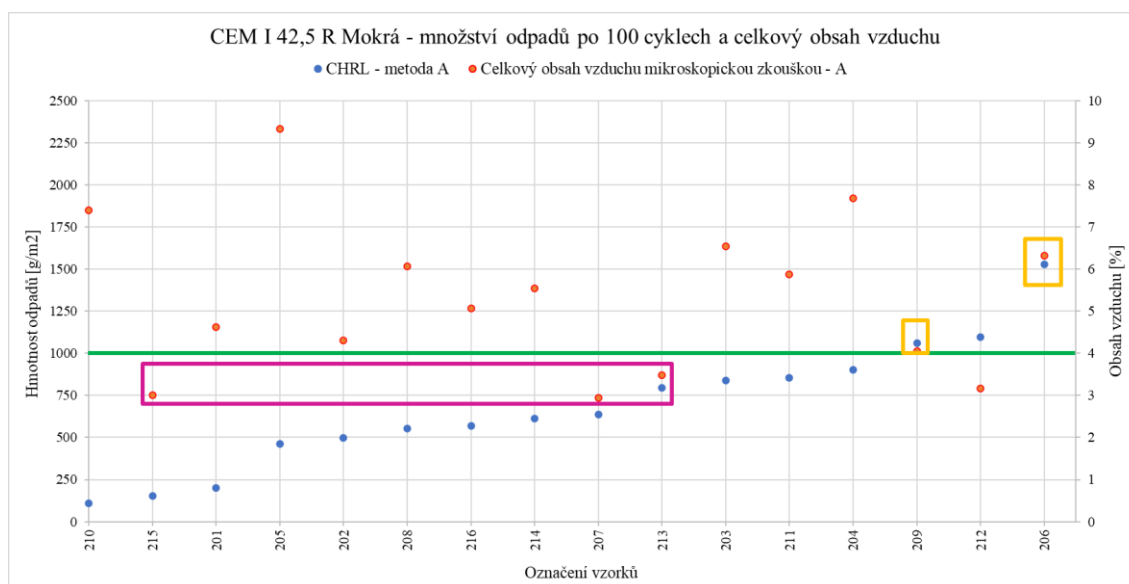
Z obrázku 6.26 je patrné, že pokud je celkový obsah vzduchu ve vzorku vyšší než 4 %, platí pro všechny vzorky ve skupině, že vyhovuje i celkový odpad po 125 cyklech limitní hodnotě určené pro 75 cyklů. Skupina 4 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 2. Nicméně vzorky ve skupině 4 vykazují menší rozptyl.



Skupina 5



Obr. 6.27: Skupina 5 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - výsledky

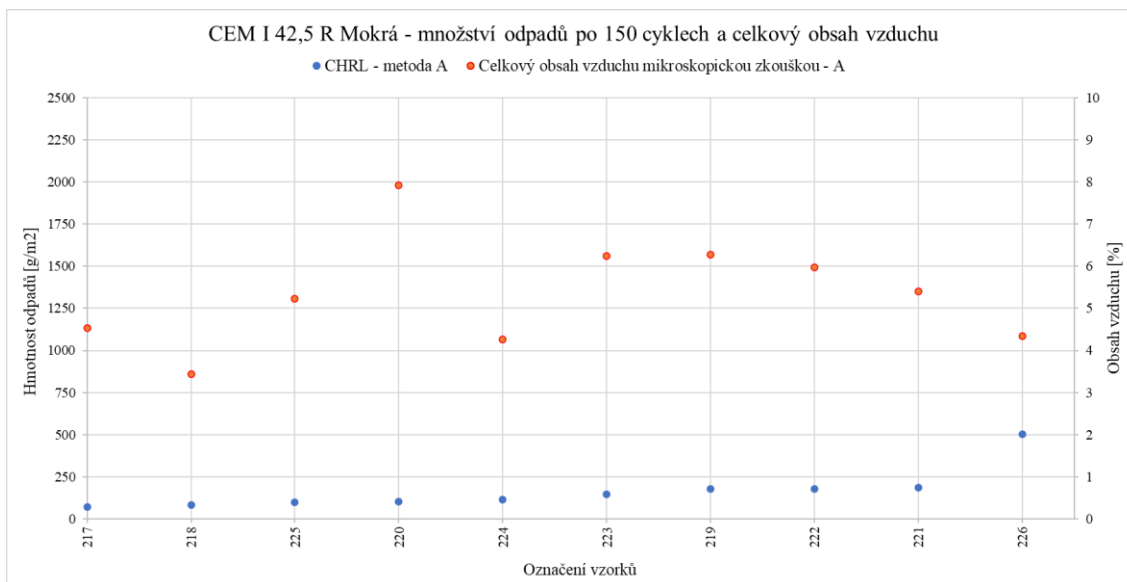


Obr. 6.28: Skupina 5 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

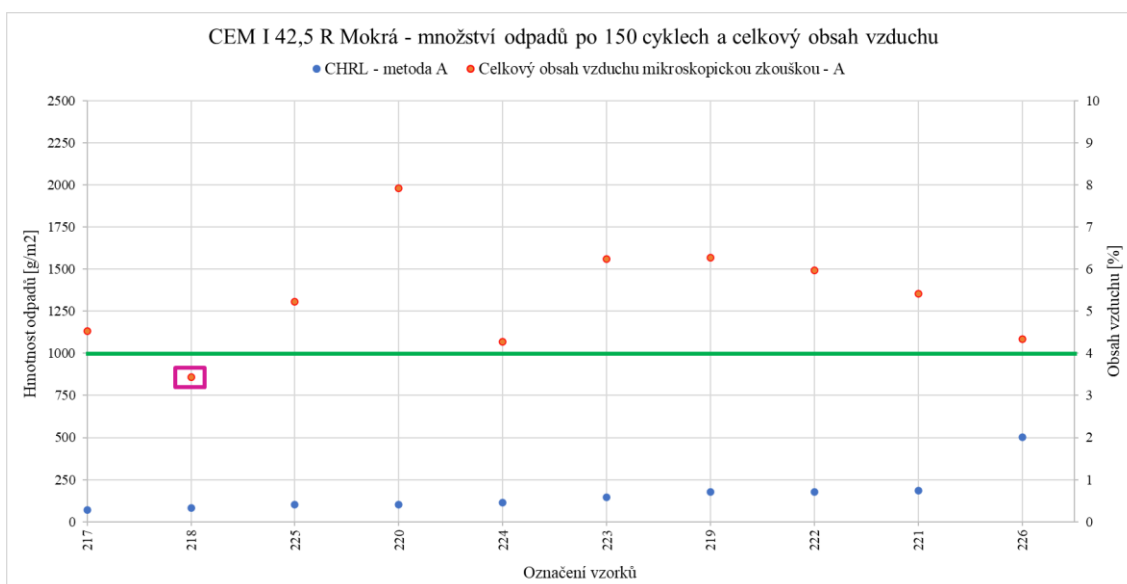
Pro 69 % vzorků ze skupiny 4 dle grafu na obrázku 6.28 platí, že pokud je obsah vzduchu alespoň 4 %, potom i odpad po 100 cyklech je pod 1000 g/m² a opačně pod 4 % vzduchu je odpad větší než limitní hranice. Vzorky s fialově ohraničeným obsahem vzduchu jsou odpady nižší než limitní, přestože celkový obsah vzduchu je menší než 4 %. Naopak pro žlutě označené vzorky jsou odpady větší než 1000 g/m², ale obsah celkového vzduchu je větší než 4 %. Vzorky ve skupině 5 obsahují stejný cement jako vzorky ve skupině 4, jediným rozdílem je použitá metoda pro zjištění odpadů. Pro skupinu 5 s metodou A vychází větší rozptyl celkových odpadů oproti skupině 4 a metodě C.



Skupina 6



Obr. 6.29: Skupina 6 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - výsledky

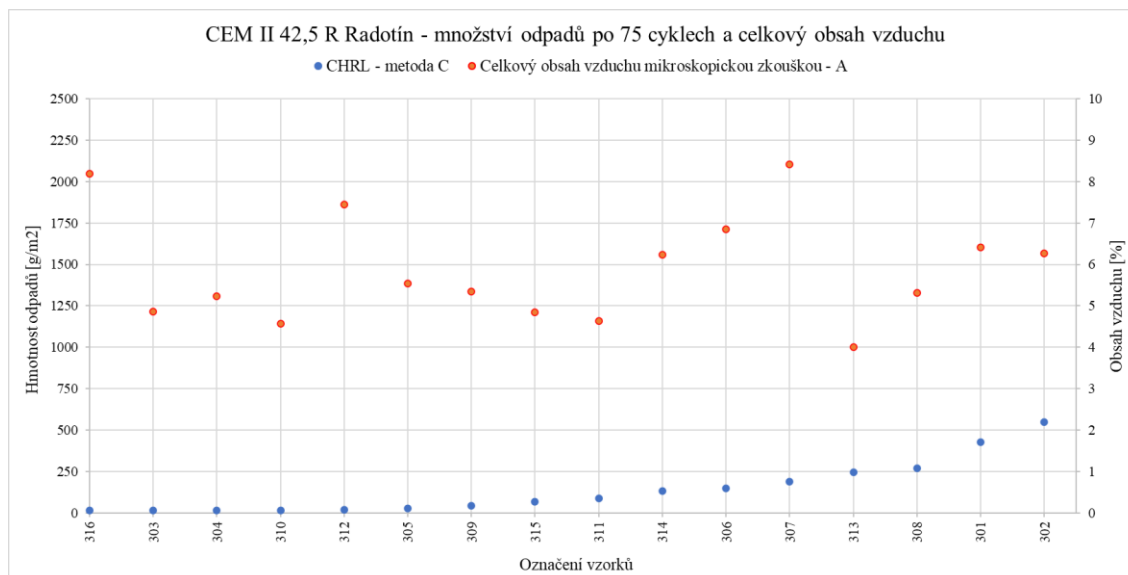


Obr. 6.30: Skupina 6 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

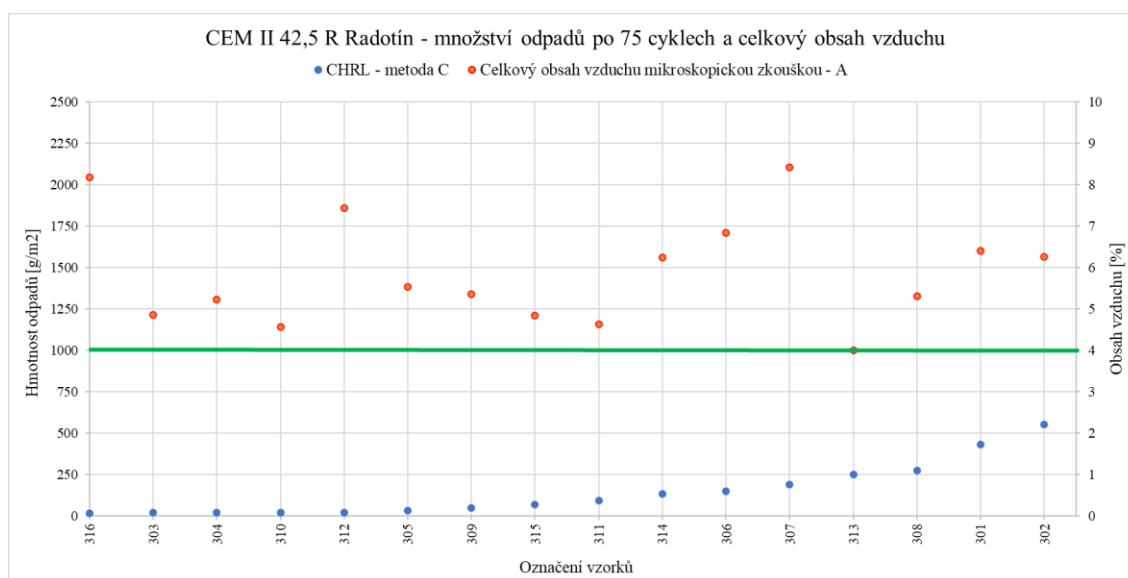
Ve skupině 6 dle grafu na obrázku 6.30 splnily všechny vzorky limitní hodnotu odpadů pro 100 cyklů, přestože byly zatíženy 150 cykly. Obsah vzduchu byl kromě fialově ohraničeného vzorku vždy nad limitní hranicí 4 % celkového obsahu vzduchu.



Skupina 7



Obr. 6.31: Skupina 7 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky

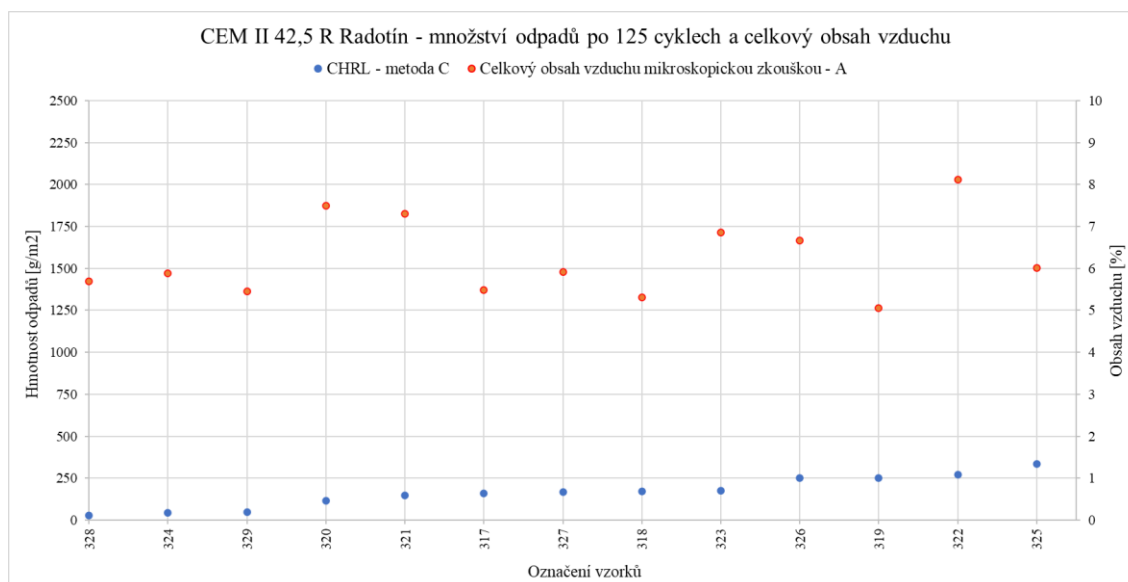


Obr. 6.32: Skupina 7 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

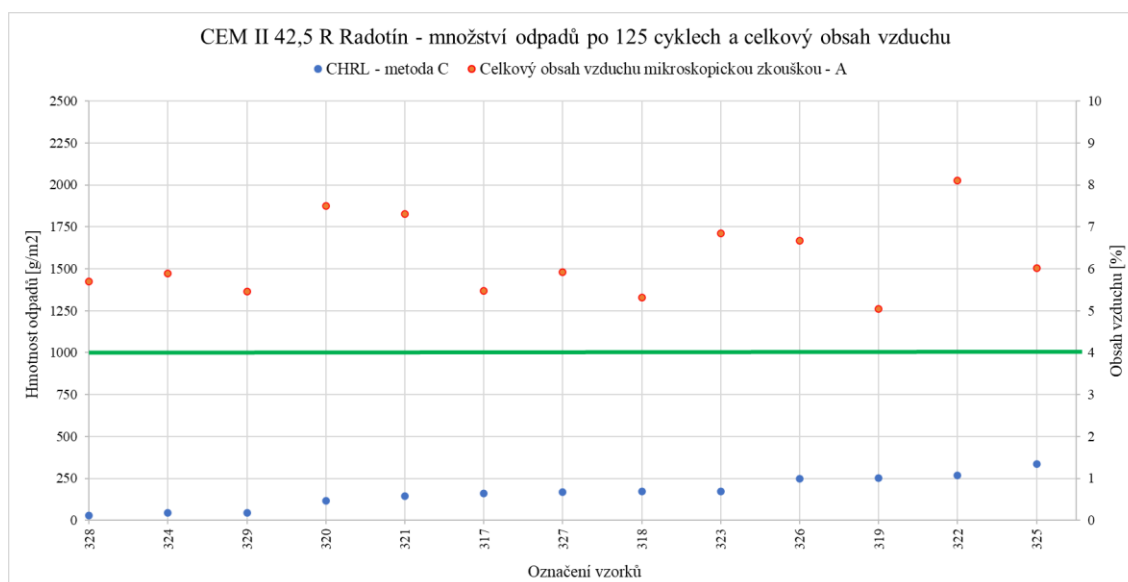
Obrázek 6.32 ukazuje, že každý vzorek má celkový obsah vzduchu alespoň 4 % a odpad po 75 cyklech je vždy pod limitní hranicí 1000 g/m².



Skupina 8



Obr. 6.33: Skupina 8 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky



Obr. 6.34: Skupina 8 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf

Graf na obrázku 6.34 ukazuje, že všechny vzorky mají celkový obsah vzduchu vyšší než 4 % a celkové odpady po 125 cyklech pod 500 g/m², čímž jsou nižší než stanovené limitní odpady pro 75 cyklů.

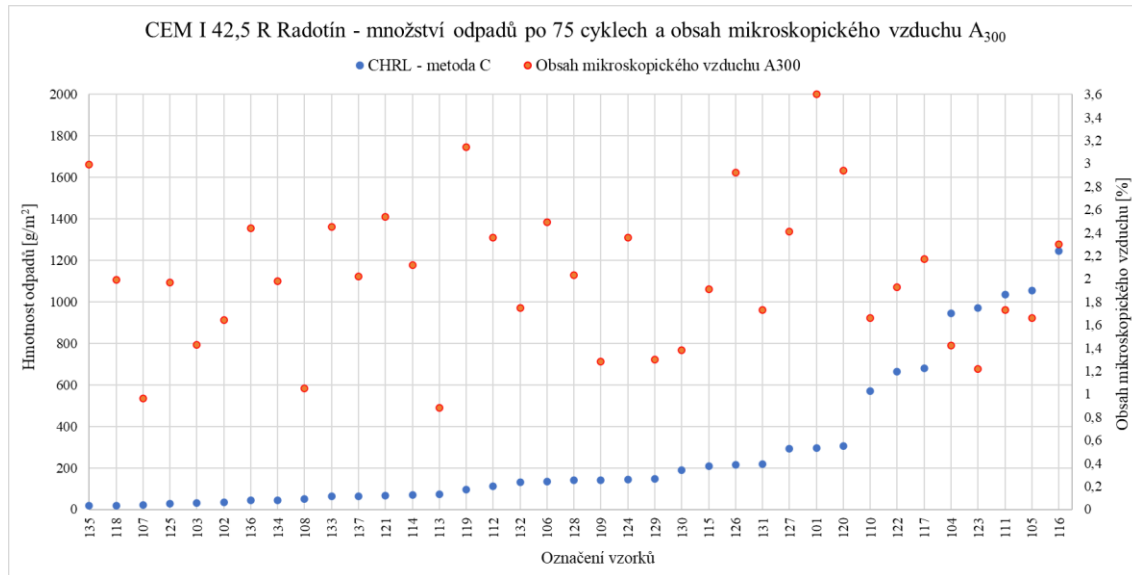
6.2.3.2 Množství odpadů a obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀

Na každém grafu je hmotnost odpadů pro jednotlivé vzorky vyznačena modrým bodem a obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀ červeným bodem. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů od nejmenší hodnoty po největší.

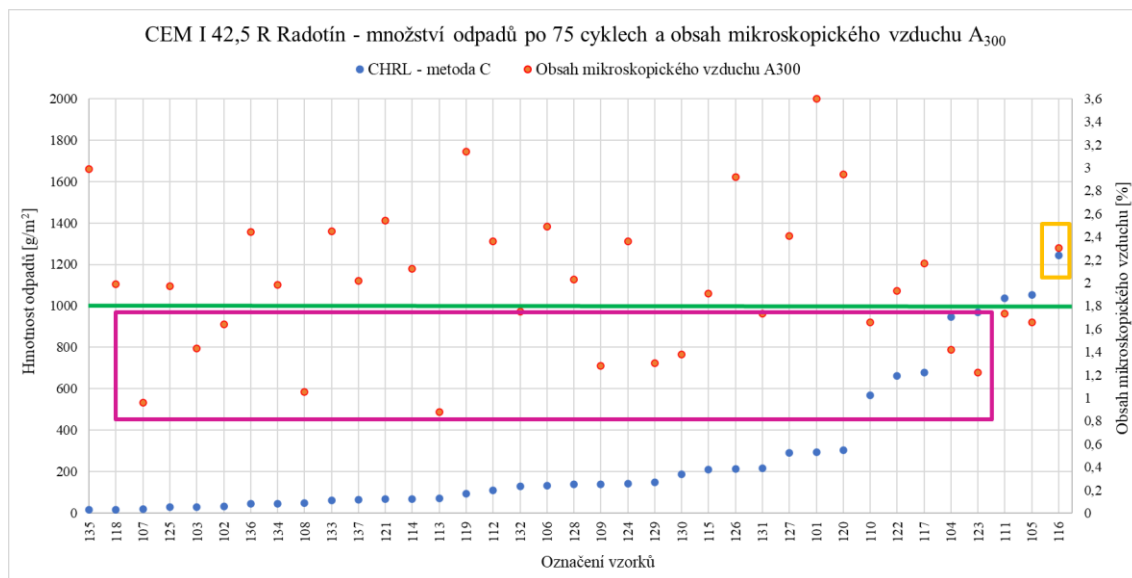


Pro každou skupinu je na druhém - komentovaném grafu vyznačena zeleně limitní hranice pro maximální odpady pro metodu C po 75 cyklech a pro metodu A po 100 cyklech, který odpovídá dle ČSN P 73 2404 hodnotě 1000 g/m^2 . Tato limitní hranice značí i minimální obsah mikroskopického vzduchu $1,8 \%$ dle ČSN P 73 2404.

Skupina 1



Obr. 6.35: Skupina 1 - CHRL C + obsah vzduchu A_{300} - výsledky



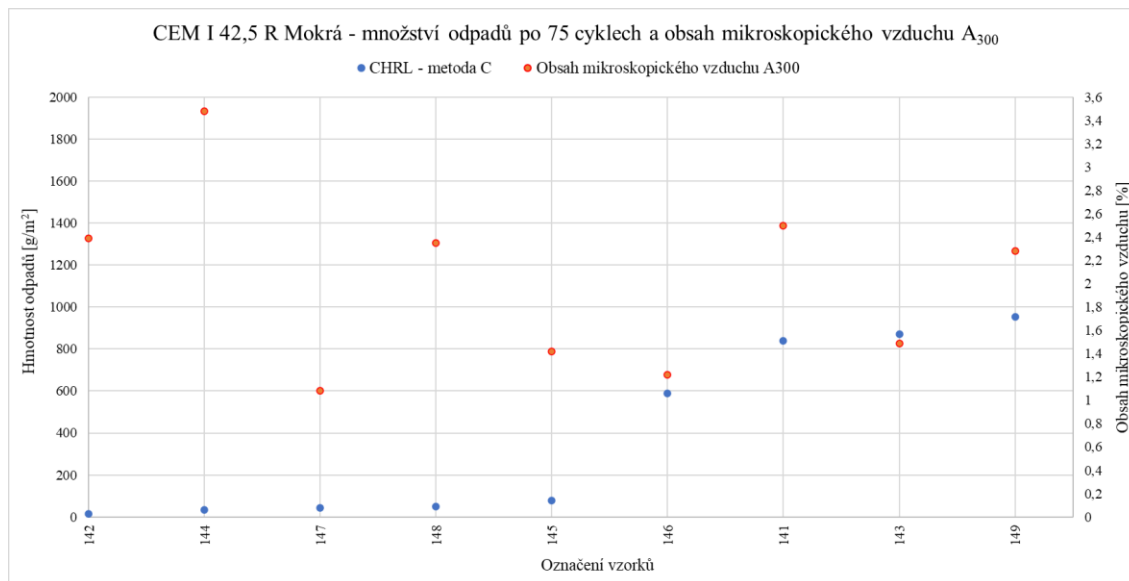
Obr. 6.36: Skupina 1 - CHRL C + obsah vzduchu A_{300} - komentovaný graf

Z grafu na obrázku 6.36 je patrné, že pro 63 % zkoušených vzorků platí, že pokud je obsah mikroskopického vzduchu A_{300} větší než $1,8 \%$, potom i celkové odpady po 75 cyklech jsou menší než 1000 g/m^2 . Vzorky s fialově ohraničeným obsahem mikroskopického vzduchu A_{300} nesplňují limitní hranici $1,8 \%$, ale celkové odpady

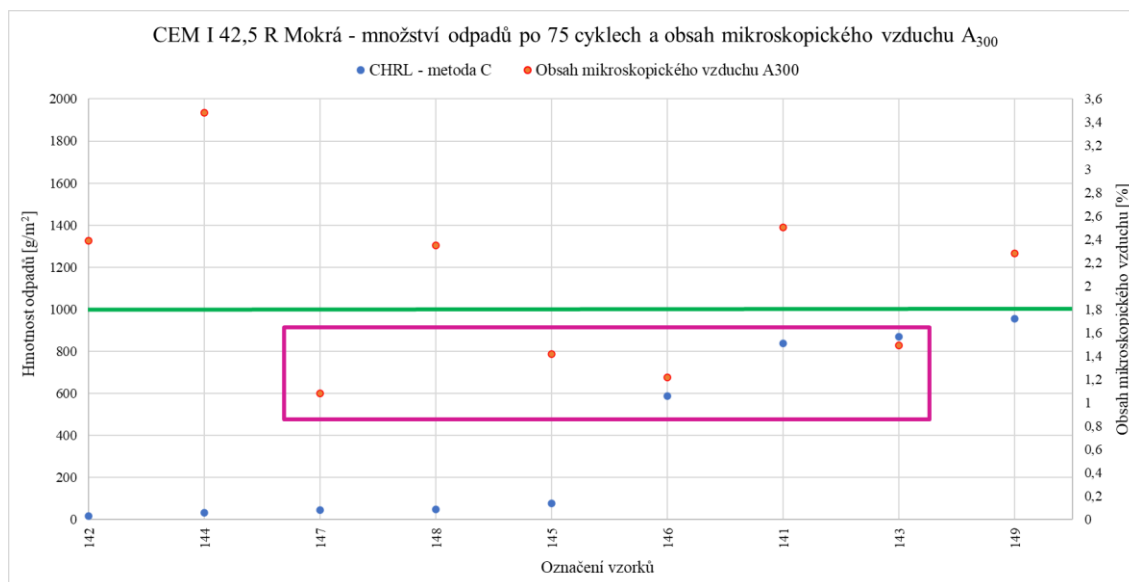


vycházejí výrazně pod limitní hranicí 1000 g/m². Žlutě ohraničený vzorek č. 116 naopak obsahuje více vzduchu než 1,8 %, ale zároveň má i odpad vyšší než 1000 g/m².

Skupina 2



Obr. 6.37: Skupina 2 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledky

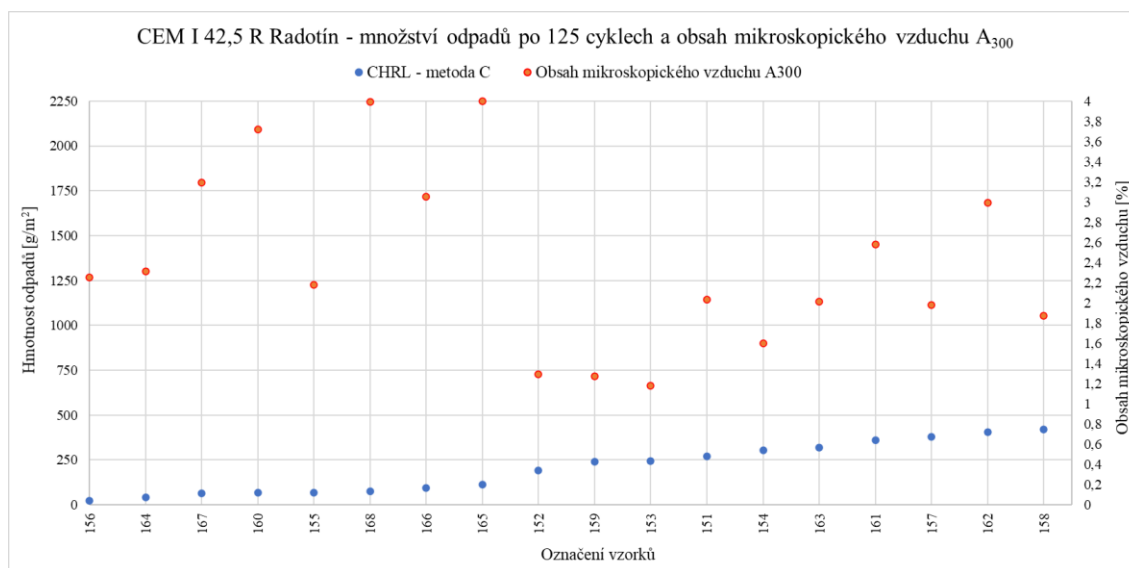
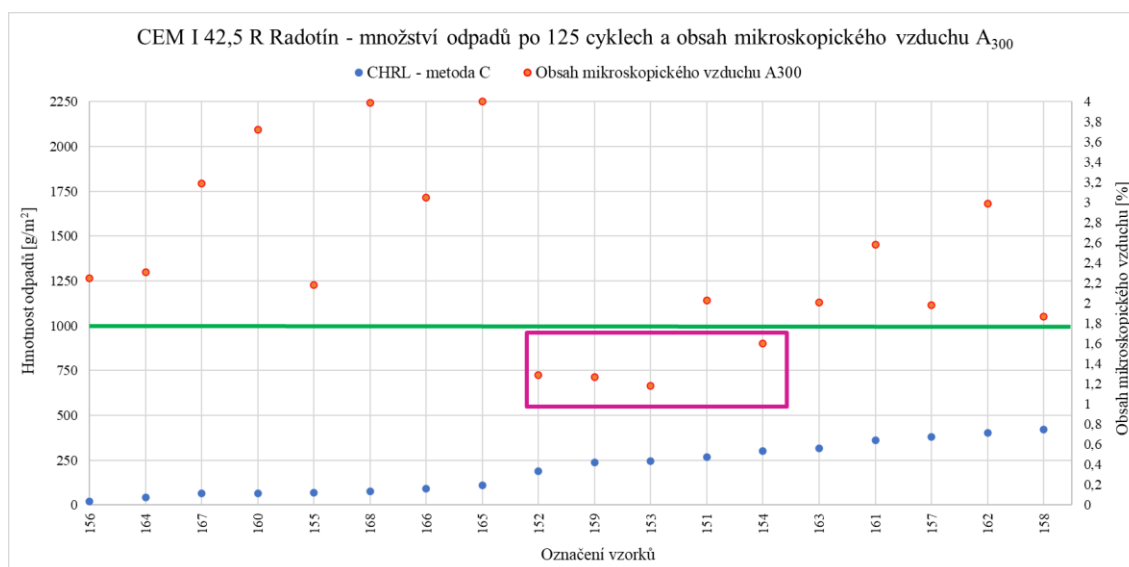


Obr. 6.38: Skupina 2 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Na obrázku 6.38 splňují všechny zkušební vzorky celkové limitní odpady po 75 cyklech, avšak vzorky s fialově ohraničenými obsahy mikroskopického vzduchu A₃₀₀ jsou pod limitní hranicí 1,8 %.



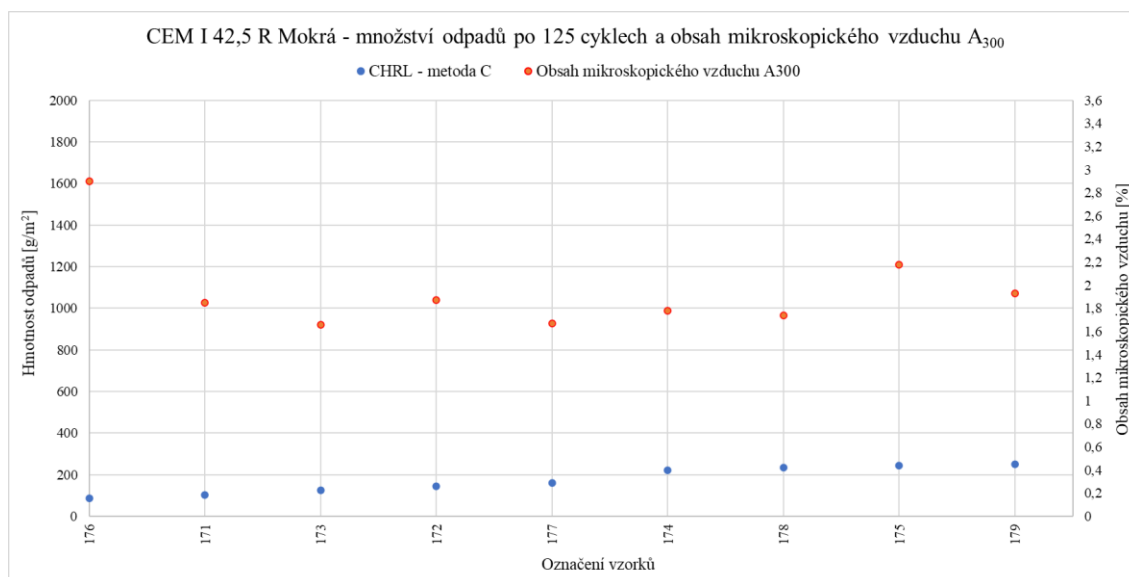
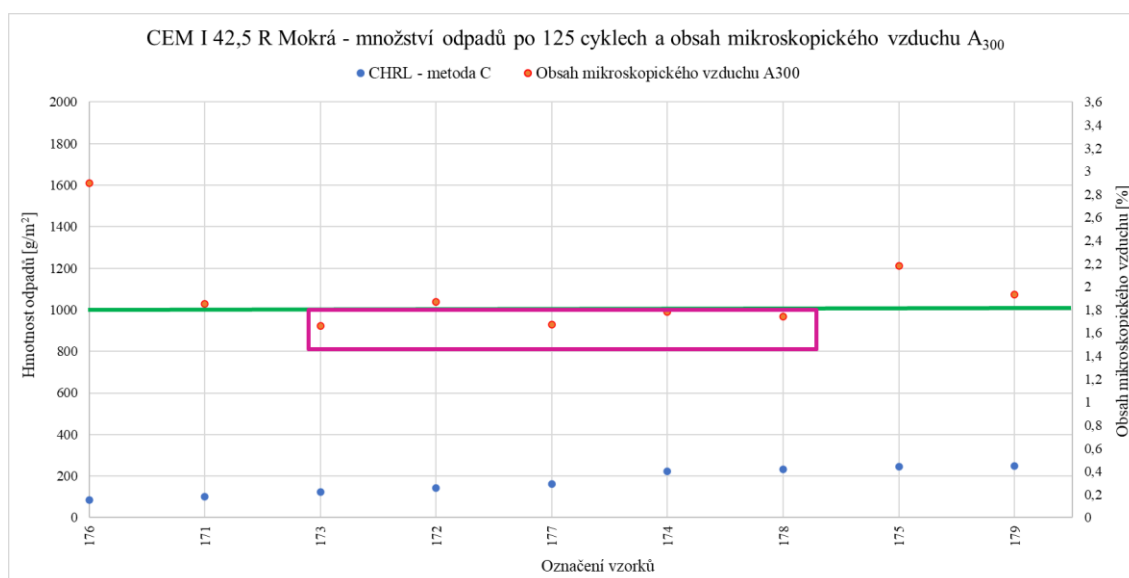
Skupina 3

Obr. 6.39: Skupina 3 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.40: Skupina 3 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Z grafu na obrázku 6.40 je patrné, že všechny vzorky splňují limitní hmotnost odpadů pro 75 cyklů, přestože vzorky byly zatíženy 125 cykly. Nicméně vzorky jejichž hodnoty mikroskopického obsahu vzduchu A₃₀₀ jsou ohraničeny fialově, nesplňují minimální hranici 1,8 %. Skupina 3 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 1. Ovšem vzorky ve skupině 3 vykazují menší rozptyl.



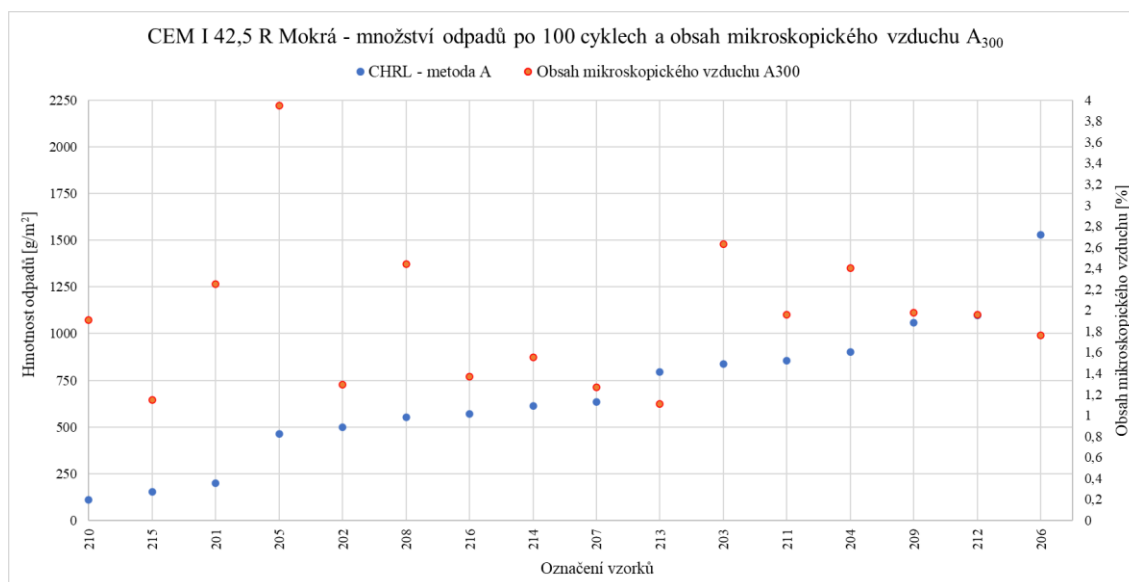
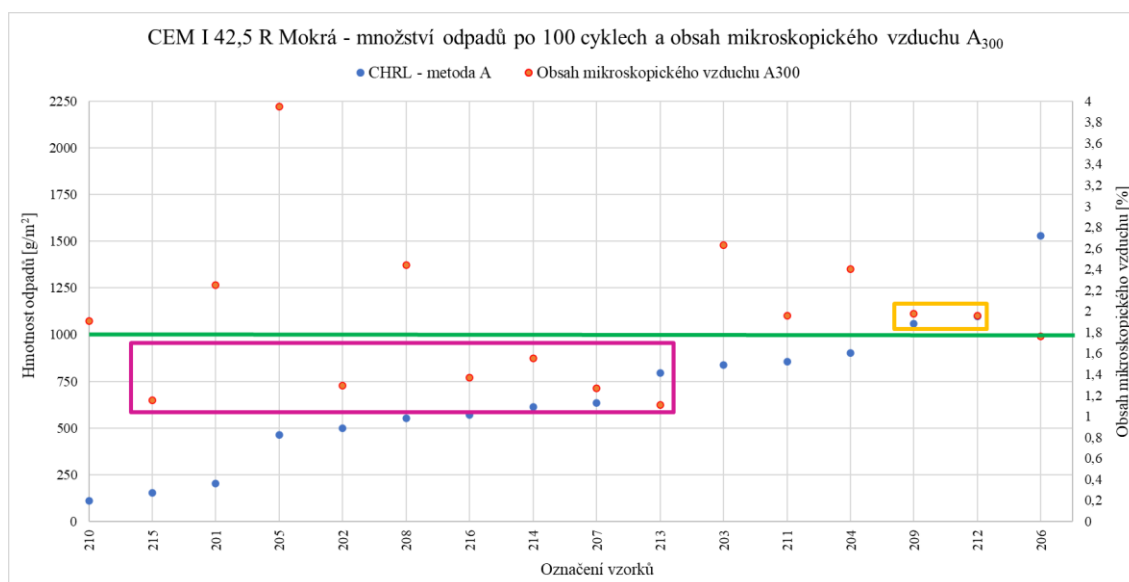
Skupina 4

Obr. 6.41: Skupina 4 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.42: Skupina 4 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Z grafu na obrázku 6.42 je vidět, že všechny vzorky vyhovují množství celkových odpadů pro 75 cyklů i po 125 cyklech, přestože fialově ohraničené vzorky nesplňují minimální obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀. Skupina 4 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 2. Nicméně vzorky ve skupině 4 vykazují menší rozptyl.



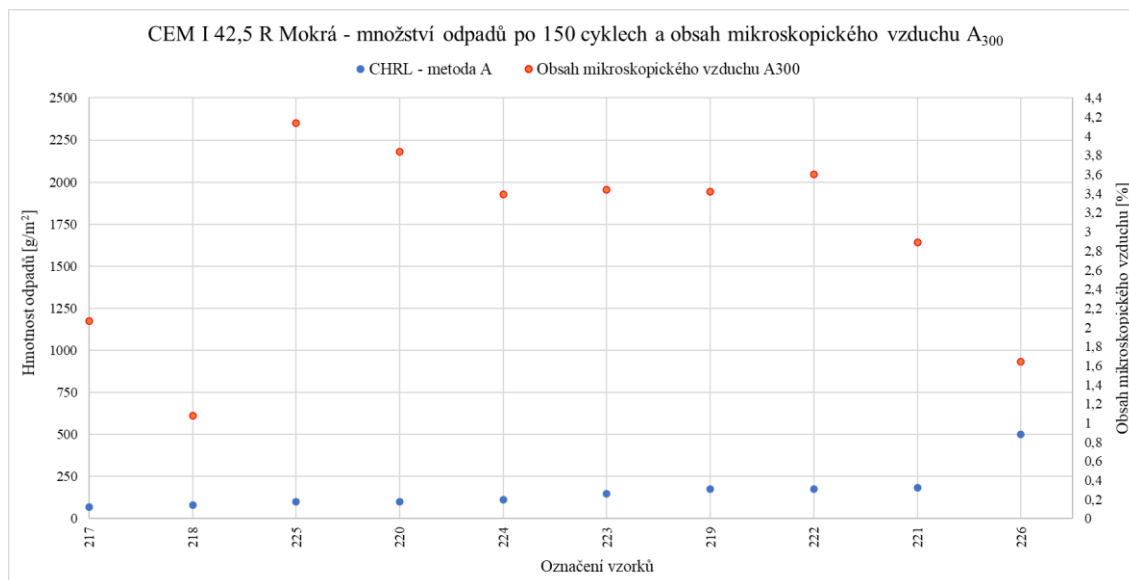
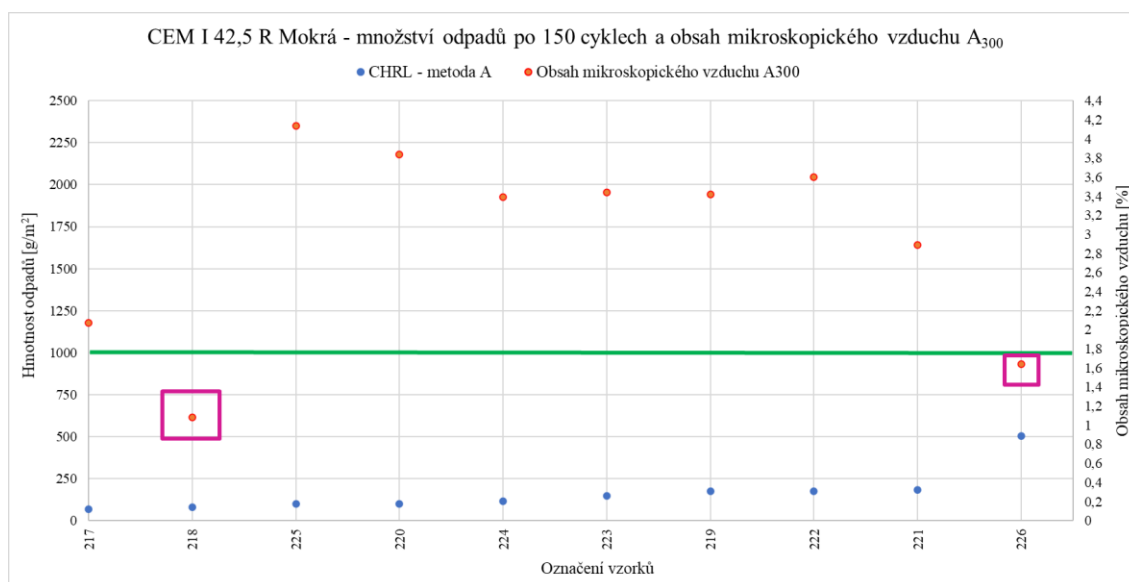
Skupina 5

Obr. 6.43: Skupina 5 - CHRL A + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.44: Skupina 5 - CHRL A + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Jak z grafu na obrázku 6.44 vyplývá, pro 50 % vzorků platí, pokud je obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀ větší jak 1,8 % potom jsou i celkové odpady po 100 cyklech nižší než 1000 g/m². Pro vzorky s fialově ohraničeným obsahem mikroskopického vzduchu A₃₀₀ platí nižší obsah než 1,8 %, nicméně s vyhovujícími odpady. Naopak oranžově ohraničené vzorky mají obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀ vyšší než 1,8 %, ovšem odpady jsou pro tyto vzorky také vyšší než maximální odpady.



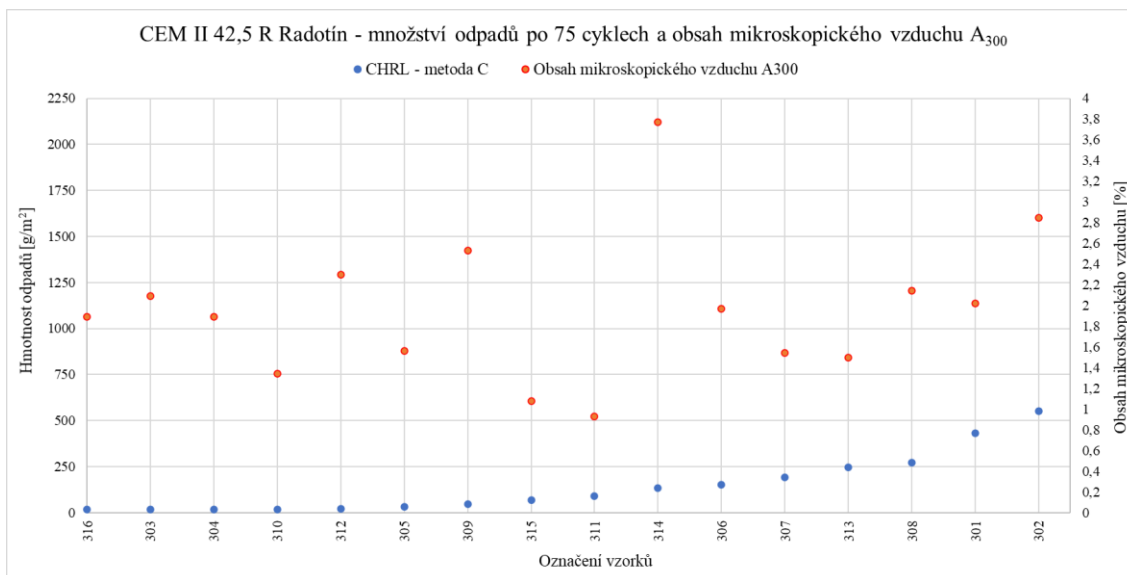
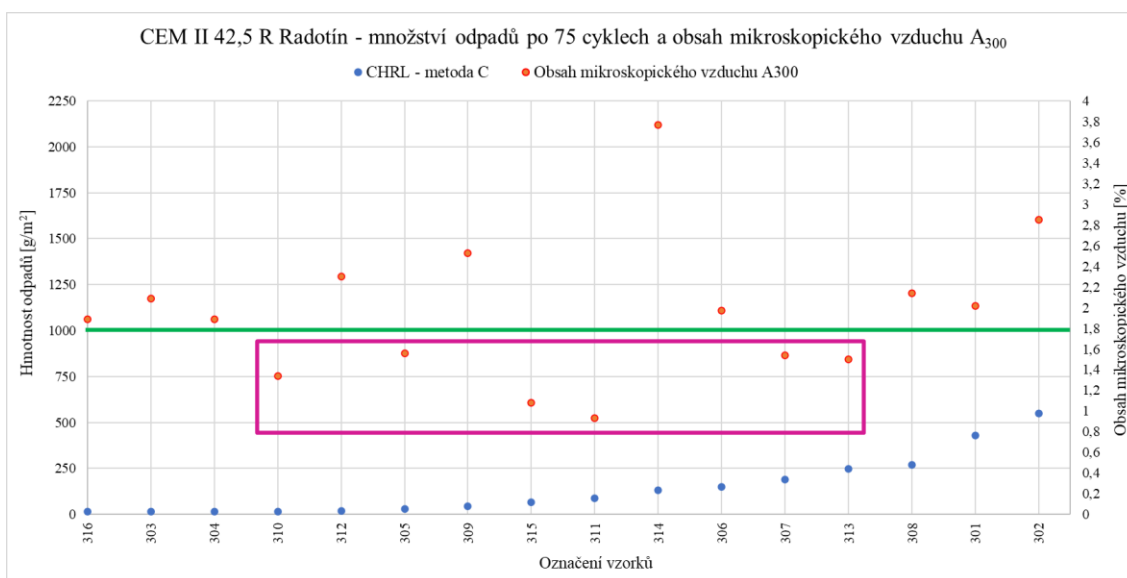
Skupina 6

Obr. 6.45: Skupina 6 - CHRL A + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.46: Skupina 6 - CHRL A + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Z obrázku 6.46 je patrné, že množství celkových odpadů je pro všechny vzorky nižší než limitní hodnota 1000 g/m² po 100 cyklů, přestože vzorky byly zatíženy 150 cykly. Vzorky, u kterých jsou fialově ohraničeny obsahy mikroskopického vzduchu A₃₀₀ nesplňují limitní hodnotu 1,8 %.



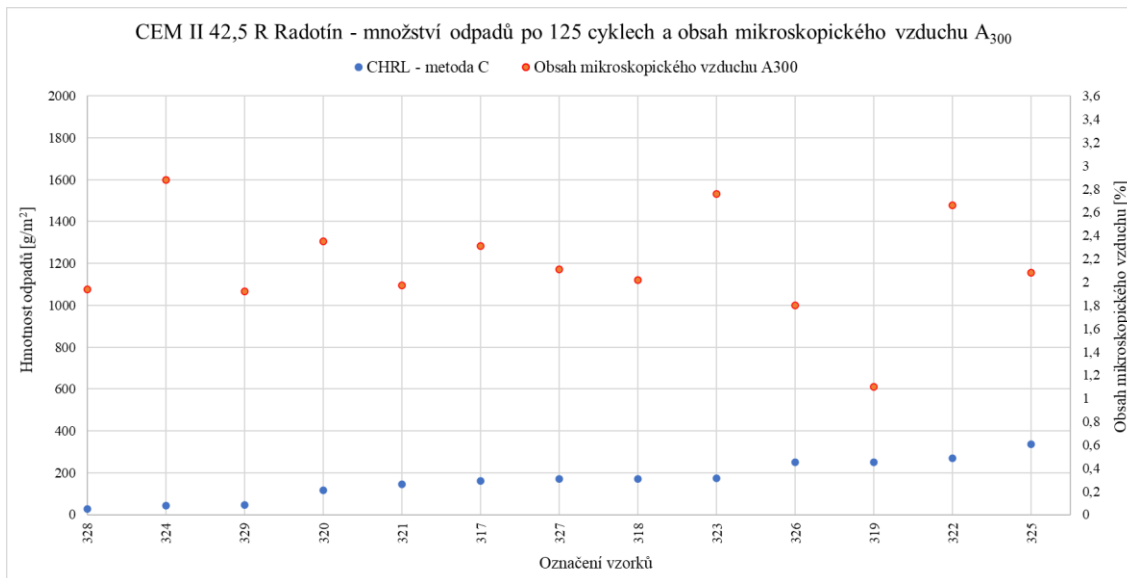
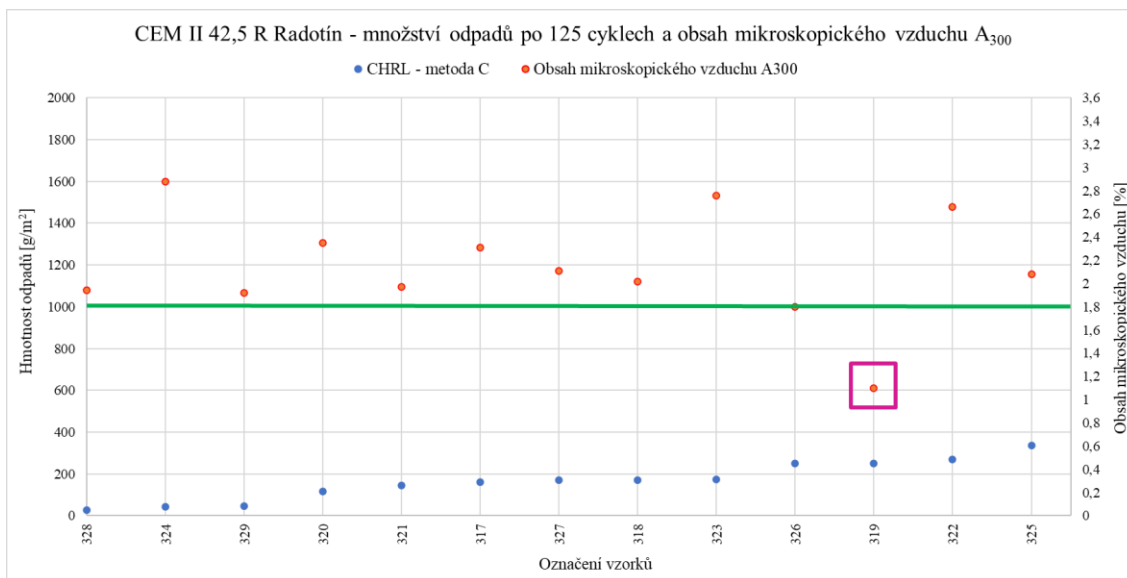
Skupina 7

Obr. 6.47: Skupina 7 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.48: Skupina 7 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Z grafu na obrázku 6.48 je patrné, že všechny vzorky vyhovují z hlediska hmotnosti celkového odpadu pro 75 cyklů. Přestože vzorky s fialově ohraničenými hodnotami obsahu mikroskopického vzduchu A₃₀₀ nesplňují limitní hranici 1,8 %.



Skupina 8

Obr. 6.49: Skupina 8 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - výsledkyObr. 6.50: Skupina 8 - CHRL C + obsah vzduchu A₃₀₀ - komentovaný graf

Z obrázku 6.50 je patrné, že všechny vzorky splňují limitní hodnotu pro celkové odpady pro 75 cyklů, přestože byly zatíženy 125 cykly. Pouze u jednoho - fialově ohraničeného vzorku je přes vyhovující celkovou hmotnost odpadů nižší obsah mikroskopického vzduchu A₃₀₀ než 1,8 %.

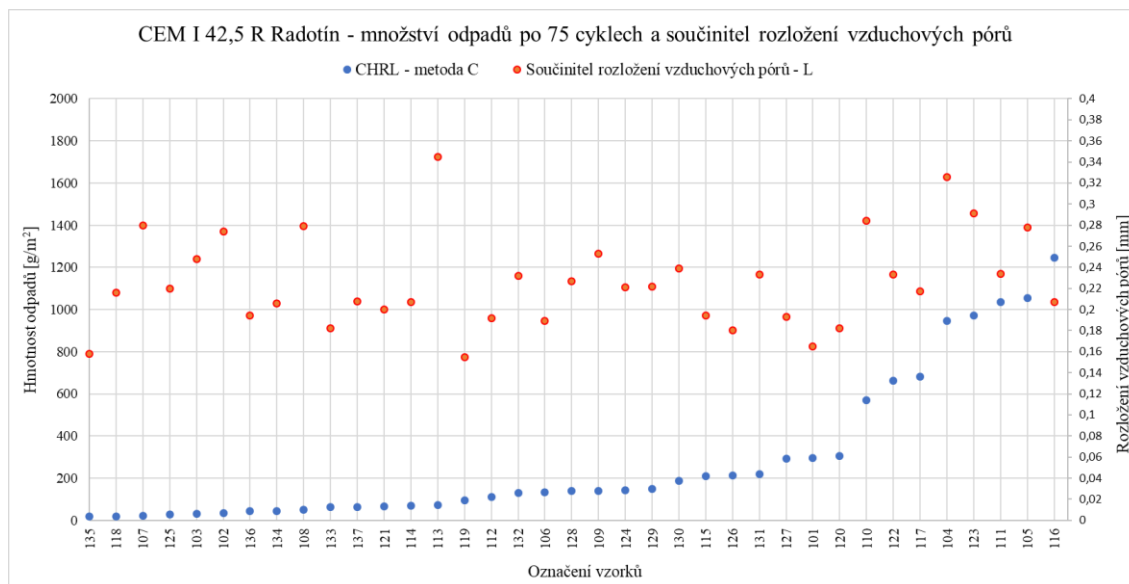
6.2.3.3 Množství odpadů a součinitel rozložení vzduchových pórů

Na každém grafu je hmotnost odpadů pro jednotlivé vzorky vyznačena modrým bodem a součinitel rozložení vzduchových pórů červeným bodem. Výsledky jsou seřazeny podle celkové hmotnosti odpadů od nejmenší hodnoty po největší.

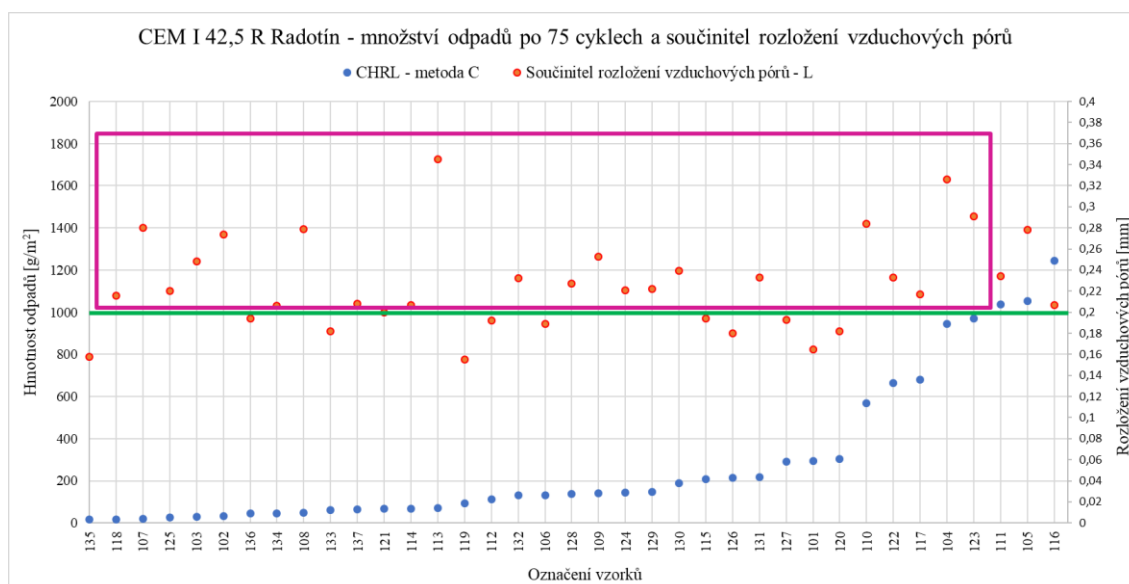


Pro každou skupinu je na druhém - komentovaném grafu vyznačena zeleně limitní hranice pro maximální odpady pro metodu C po 75 cyklech a pro metodu A po 100 cyklech, který odpovídá dle ČSN P 73 2404 hodnotě 1000 g/m^2 . Tato limitní hranice značí i maximální součinitel rozložení vzduchových pórů $0,2 \text{ mm}$ dle ČSN P 73 2404.

Skupina 1



Obr. 6.51: Skupina 1 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky

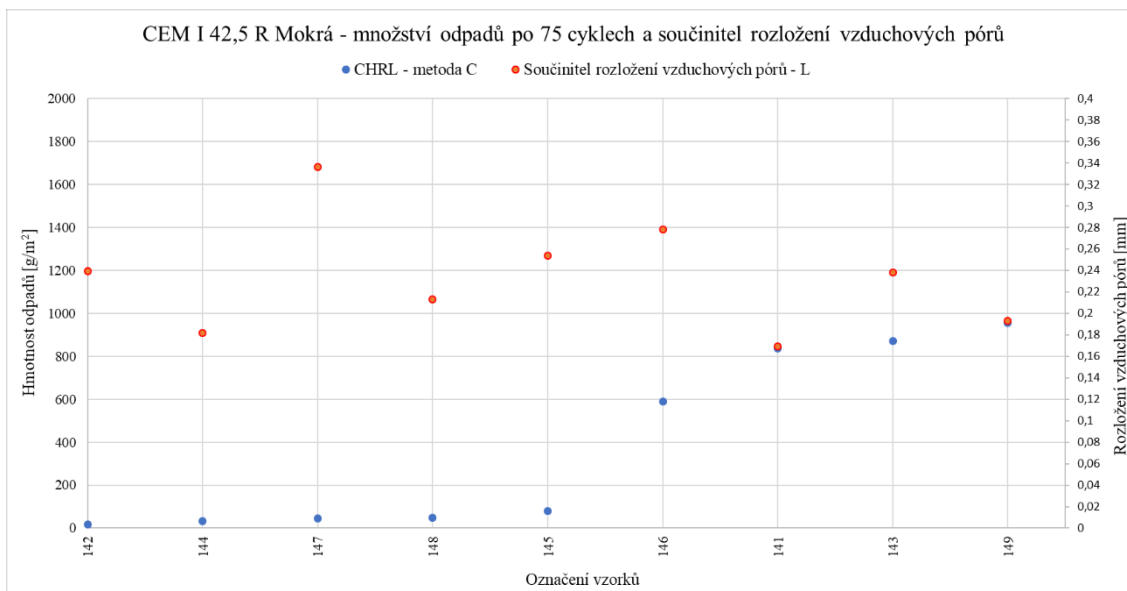


Obr. 6.52: Skupina 1 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

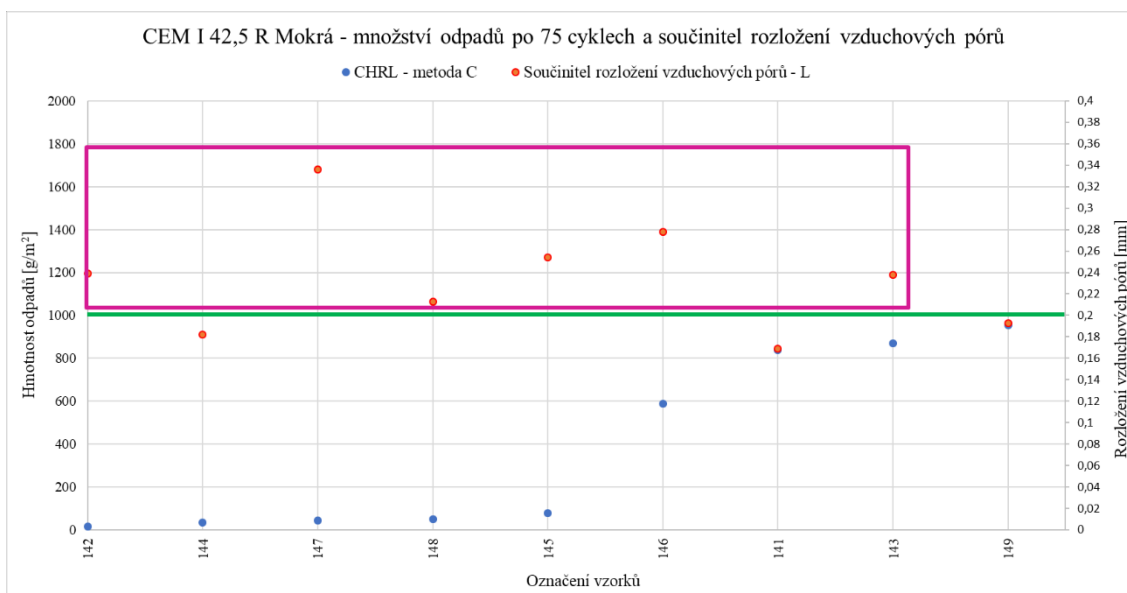
Z grafu na obrázku 6.52 je patrné, že pro 41 % vzorků platí předpoklad, pokud je maximální součinitel nižší než $0,2 \text{ mm}$, potom jsou i maximální celkové odpady nižší než 1000 g/m^2 . Pro 59 % fialově ohraničených vzorků platí vyhovující celková hmotnost odpadů, přestože součinitel rozložení vzduchových pórů je vyšší než $0,2 \text{ mm}$.



Skupina 2



Obr. 6.53: Skupina 2 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky

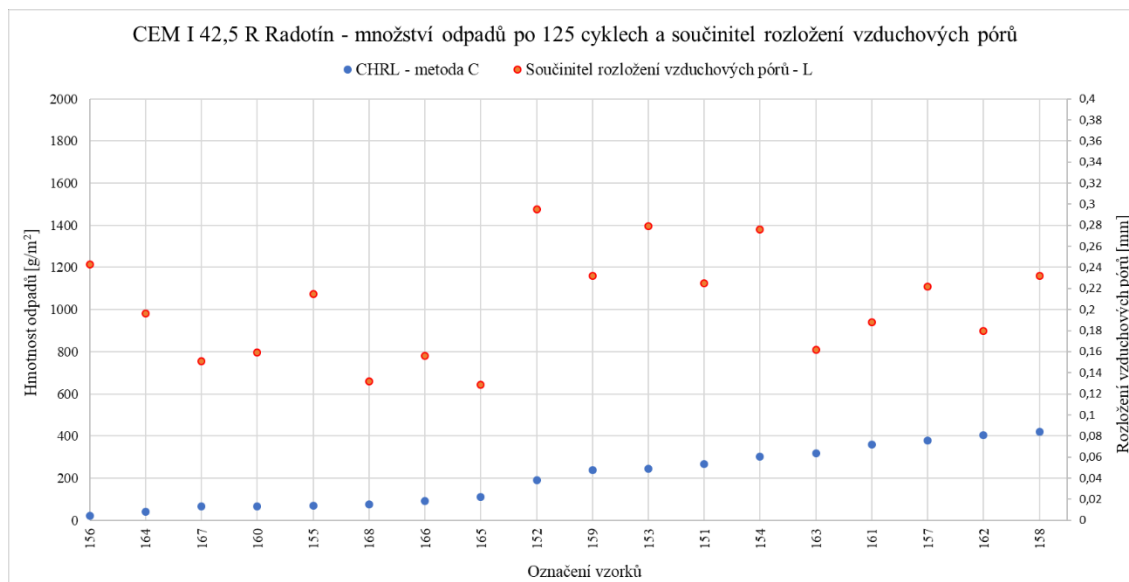


Obr. 6.54: Skupina 2 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

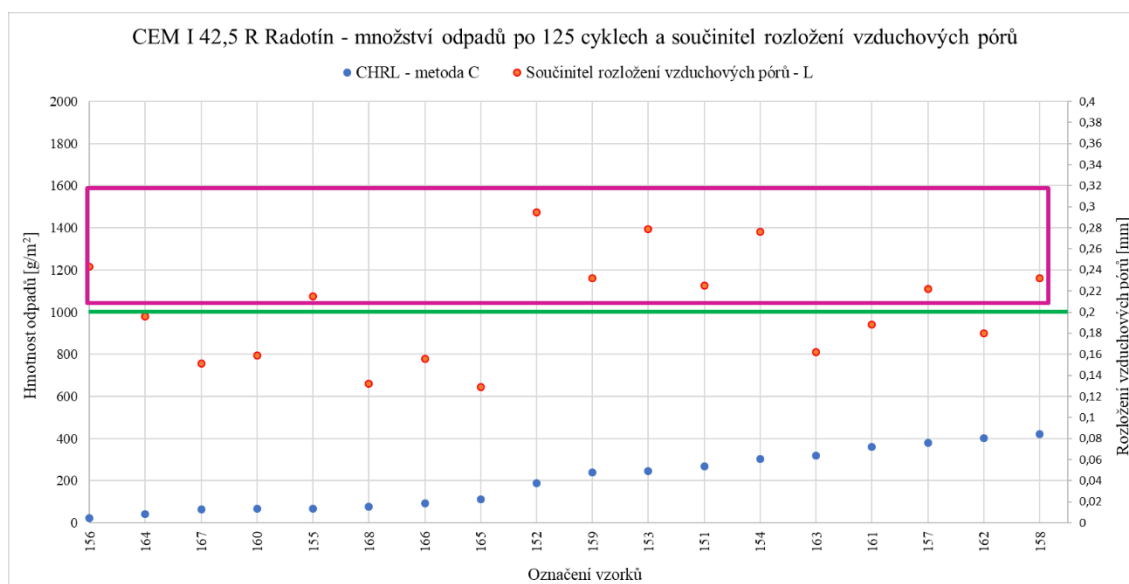
Ve skupině 2, jak je patrné z obrázku 6.54, vyhovují všechny vzorky množství celkových odpadů po 75 cyklech, nicméně pro 66 % vzorků - fialově ohraničených není splněn limitní součinitel rozložení vzduchových pórů, neboť je vyšší než 0,2 mm.



Skupina 3



Obr. 6.55: Skupina 3 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky

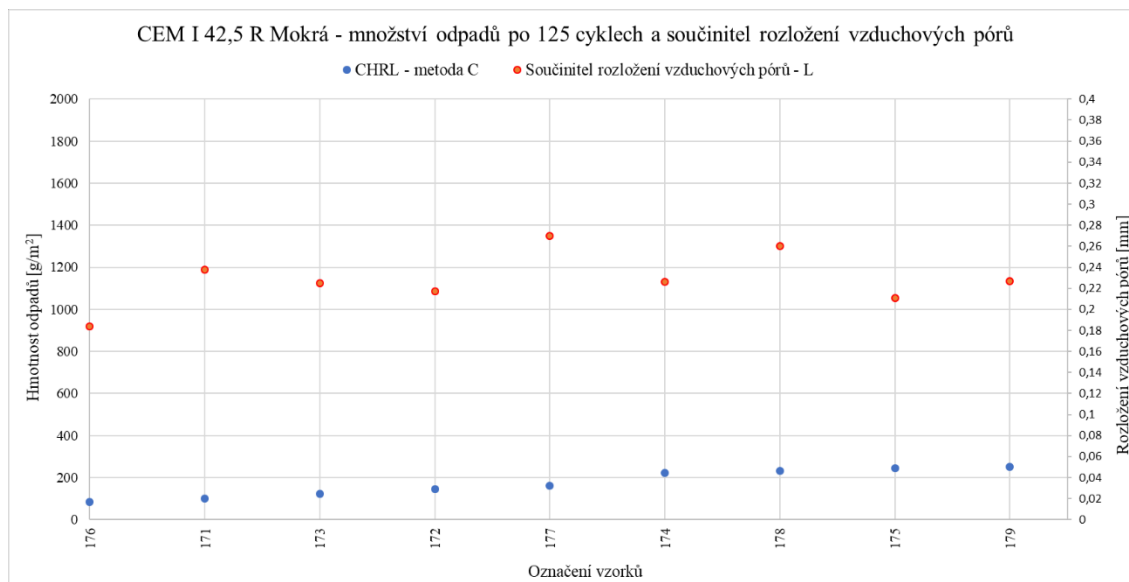


Obr. 6.56: Skupina 3 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

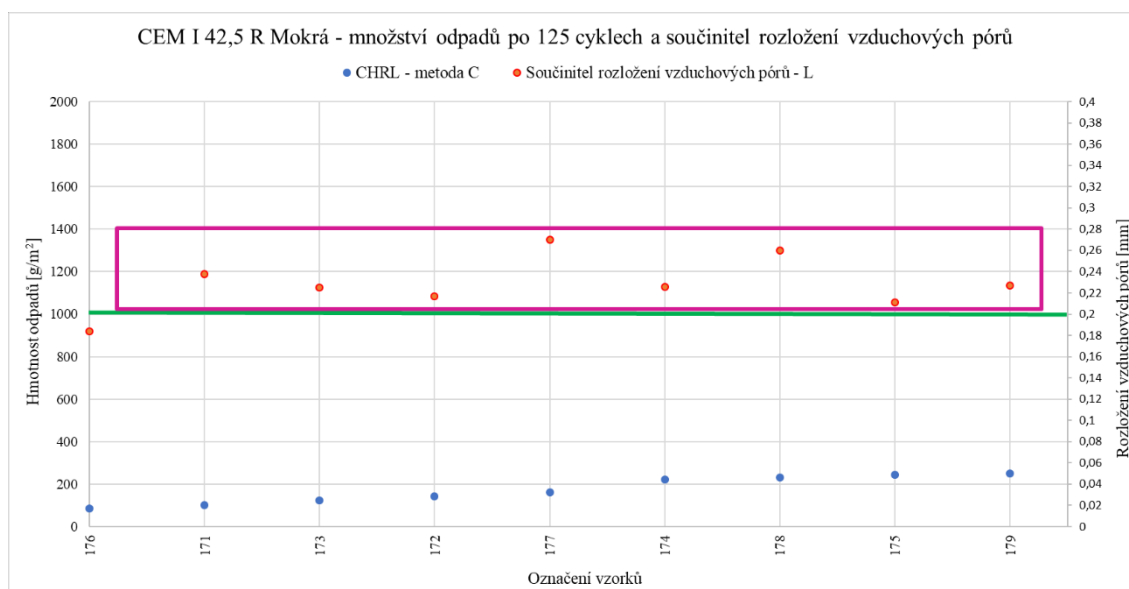
Z obrázku 6.56 je patrné, že pro 50 % vzorků je součinitel rozložení vzduchových pórů vyšší než limitní hodnota 0,2 mm. Nicméně množství celkový odpadů po 125 cyklech splňuje limitní hodnotu 1000 g/m² pro 75 cyklů. Skupina 3 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 1. Nicméně vzorky ve skupině 3 vykazují menší rozptýl.



Skupina 4



Obr. 6.57: Skupina 4 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky

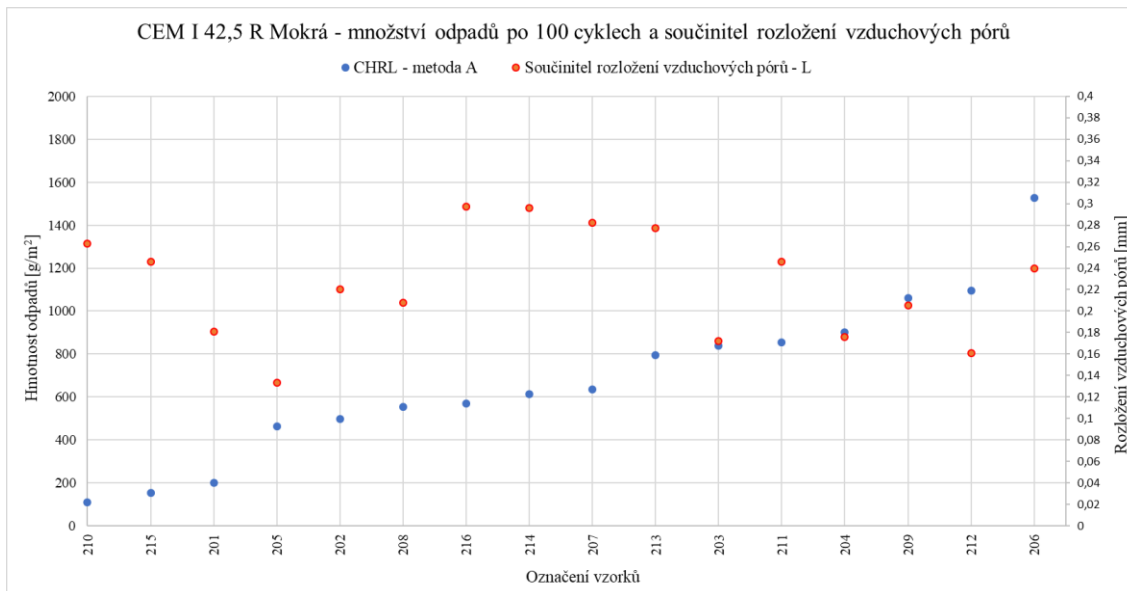


Obr. 6.58: Skupina 4 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

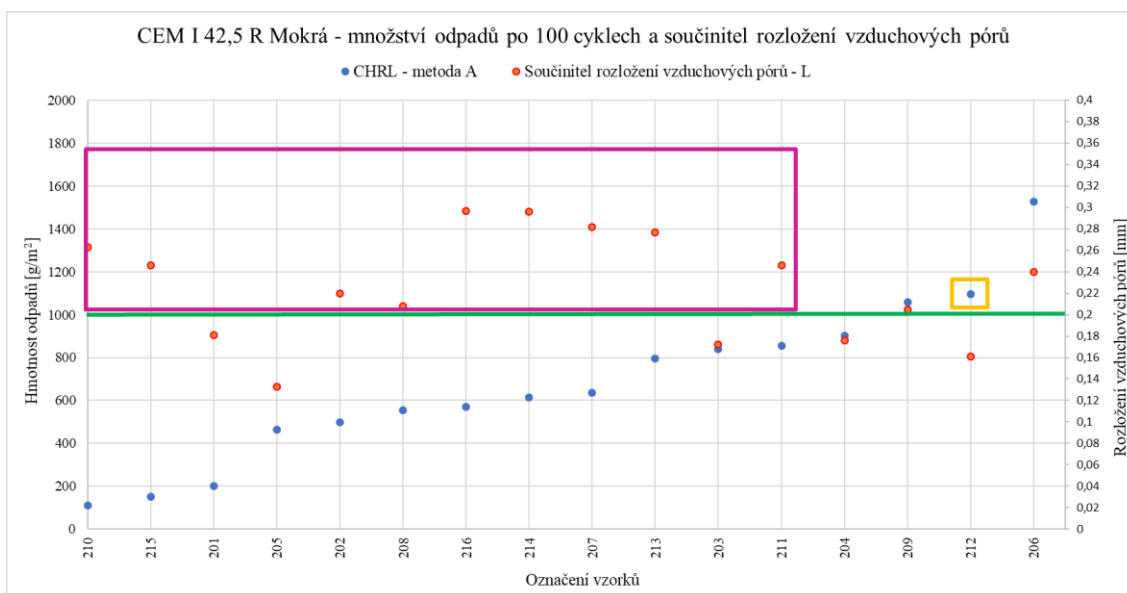
Z obrázku 6.58 vyplývá, že celkové odpady pro všechny vzorky po 125 cyklech splňují limitní hodnotu 1000 g/m² pro 75 cyklů. Odpady splňují jednotlivé vzorky navzdory fialově ohraničeným nevyhovujícím součinitelům rozložení vzduchových pórů. Skupina 4 obsahuje vzorky odebrané v laboratoři, obsahující stejný cement jako vzorky ve skupině 2. Nicméně vzorky ve skupině 4 vykazují menší rozptyl.



Skupina 5



Obr. 6.59: Skupina 5 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - výsledky

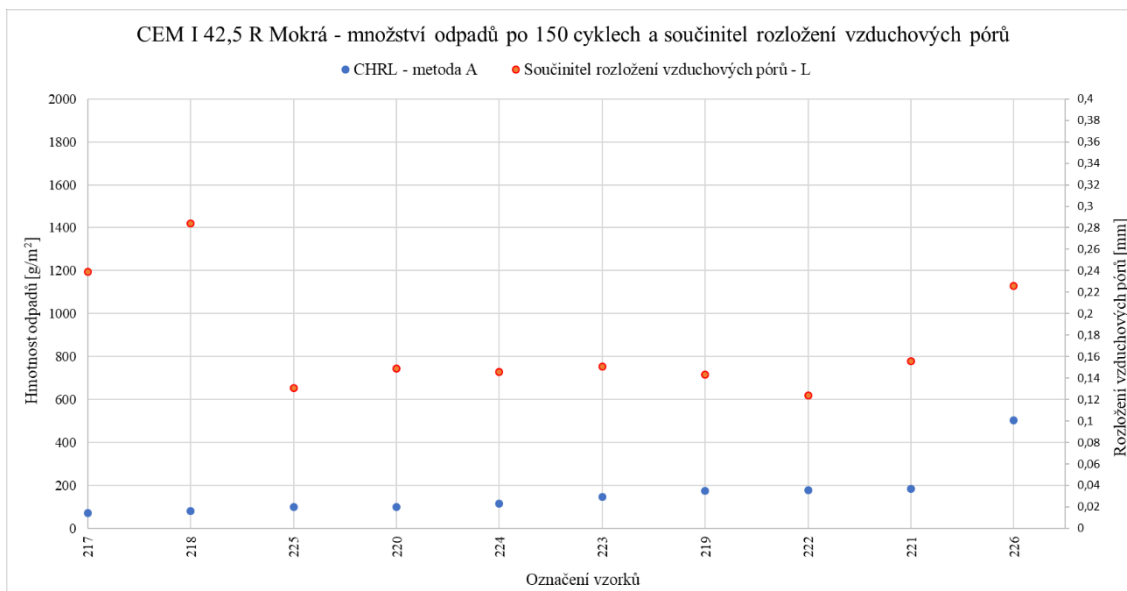


Obr. 6.60: Skupina 5 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

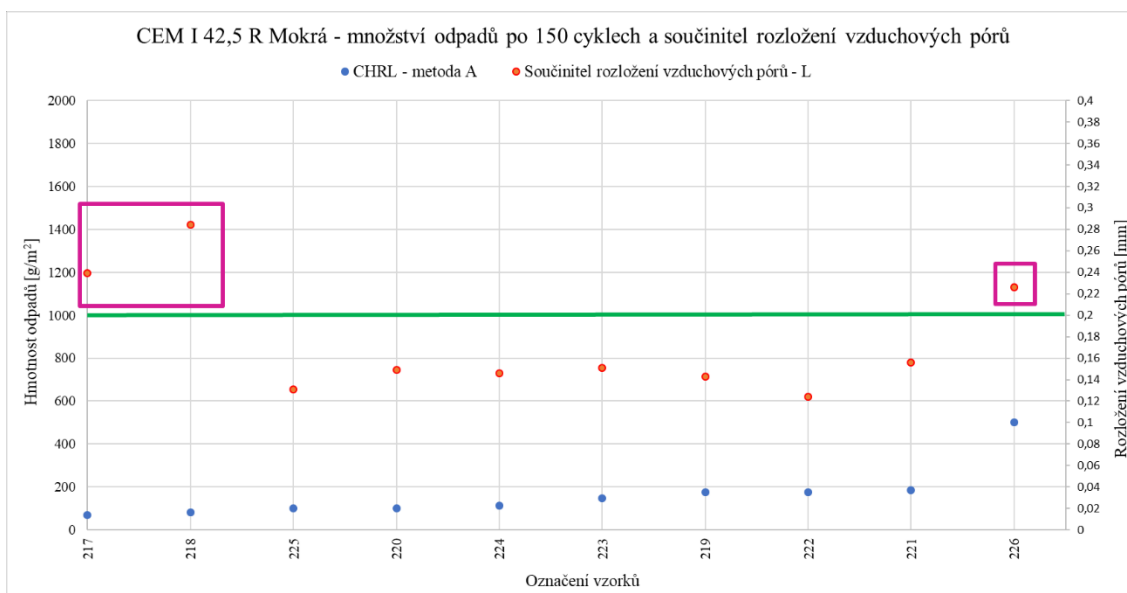
Z grafu na obrázku 6.60 lze pozorovat, že pro 38 % vzorků platí, pokud je hodnota součinitele rozložení vzduchových pórů nižší než 0,2 mm potom i celkové množství odpadů splňuje limitní hodnotu 1000 g/m². V případě fialově ohraničených hodnot součinitelů rozložení vzduchových pórů není splněna maximální hodnota 0,2 mm, avšak množství odpadů je splněno. U vzorku s oranžově ohraničeným odpadem je splněn limitní součinitel rozložení vzduchových pórů, ale odpady jsou vyšší než 1000 g/m².



Skupina 6



Obr. 6.61: Skupina 6 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - výsledky

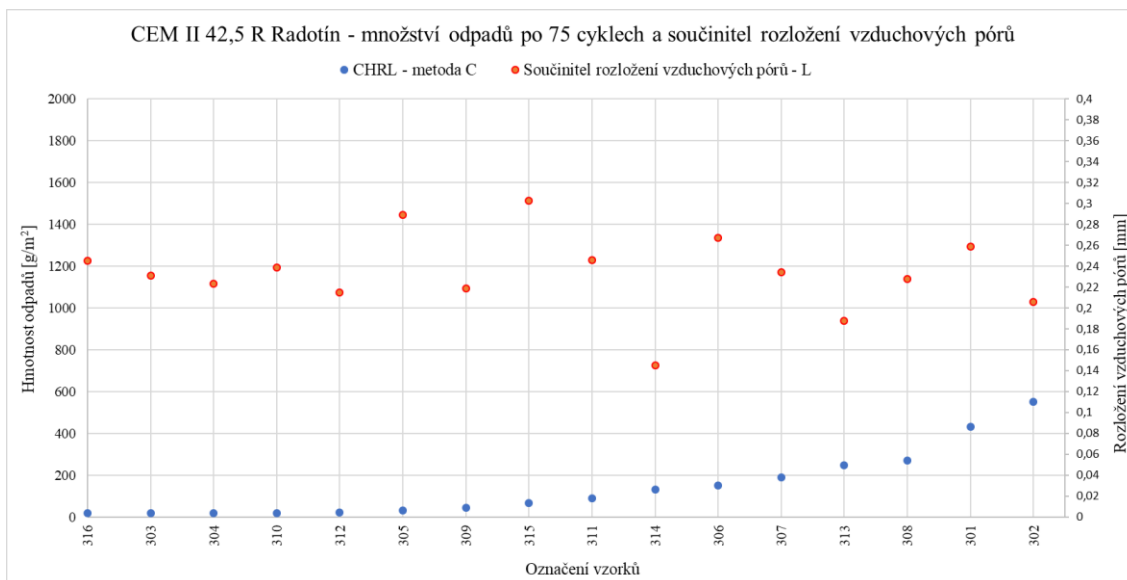


Obr. 6.62: Skupina 6 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

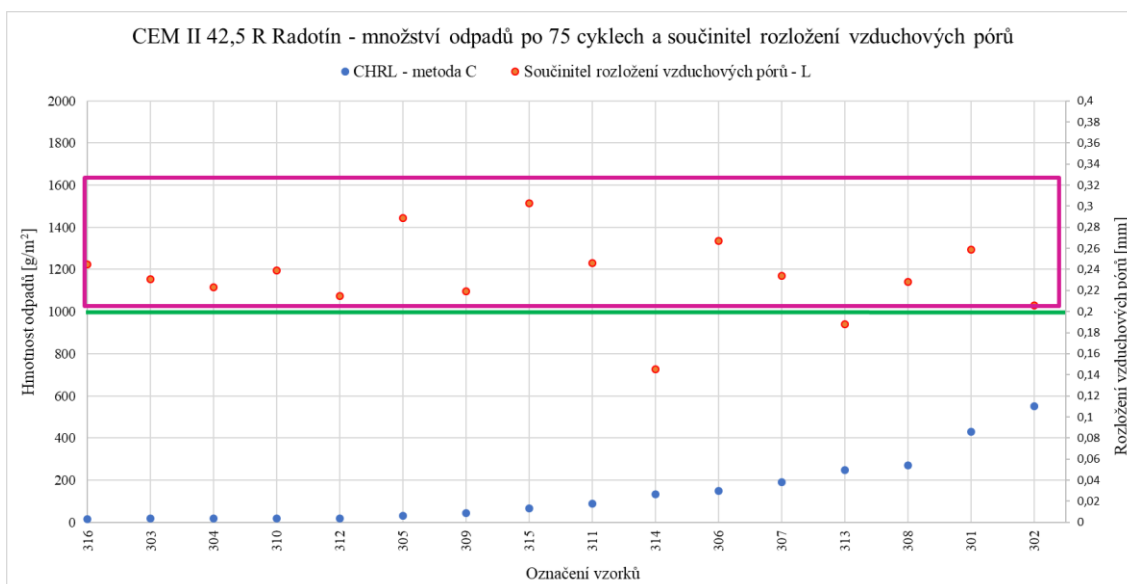
Z obrázku 6.62 lze vidět, že všechny vzorky ze skupiny 6 splňují limitní množství celkových odpadů pro 100 cyklů, přestože byly zatíženy 150 cykly. Ve třech případech ohraničených fialově nebyl splněn maximální součinitel rozložení pórů, což nemělo vliv na celkové množství odpadů.



Skupina 7



Obr. 6.63: Skupina 7 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky

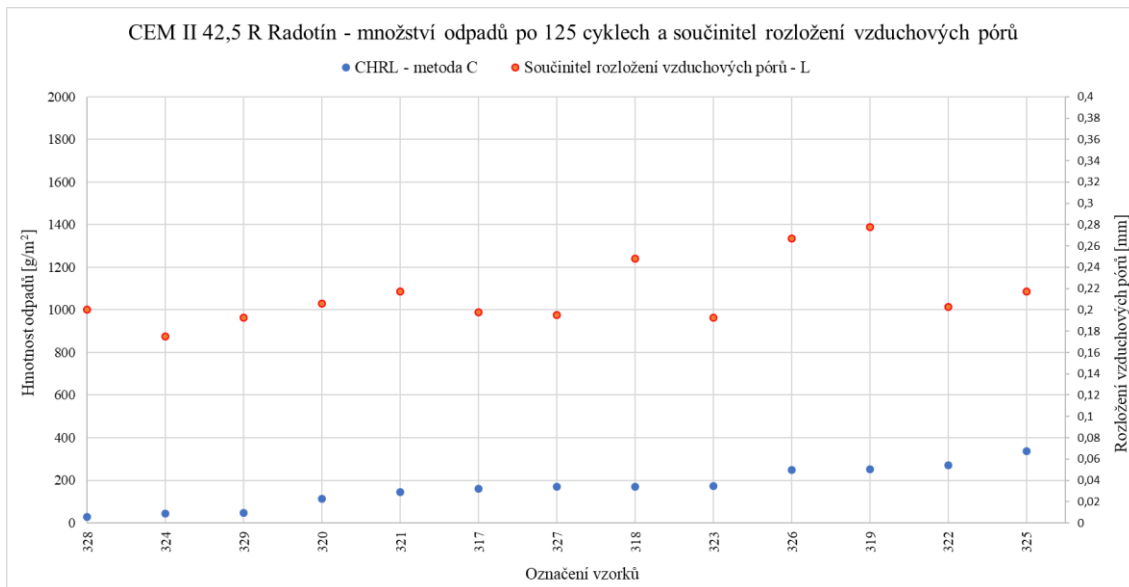


Obr. 6.64: Skupina 7 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

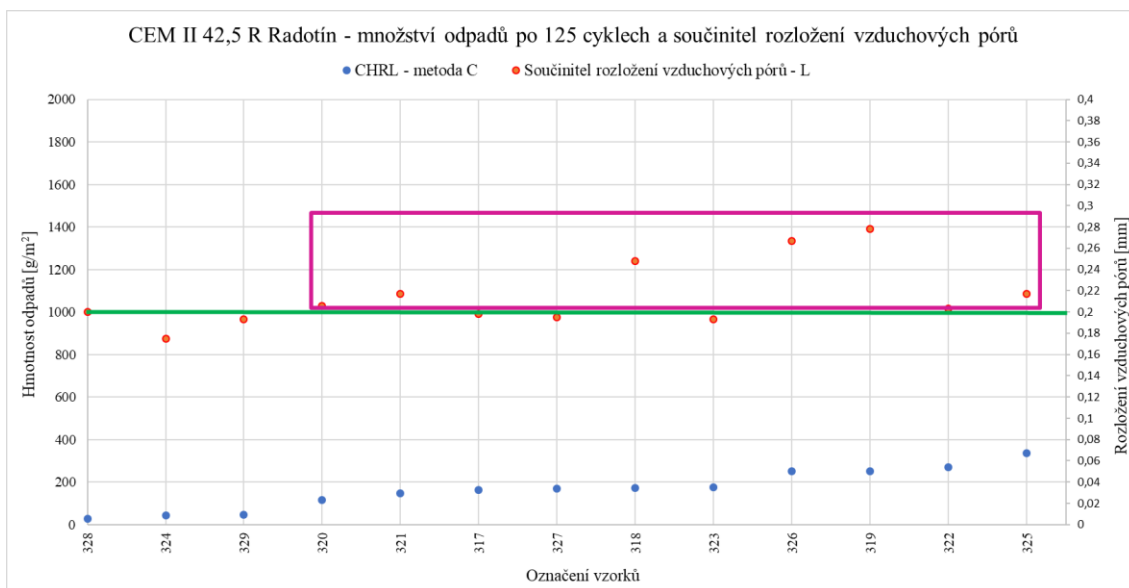
Z grafu na obrázku 6.64 je patrné, že ačkoli všechny vzorky vyhovují množstvím celkového odpadu po 75 cyklech, tak součinitele rozložení vzduchových pórů vyhovují jen pro dva vzorky. Ostatní vzorky, které jsou fialově ohraničené, mají součinitel rozložení vzduchových pórů vyšší než 0,2 mm.



Skupina 8



Obr. 6.65: Skupina 8 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky



Obr. 6.66: Skupina 8 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf

Všechny vzorky ze skupiny 8, jak je patrné z obrázku 6.66, mají nižší hmotnost celkových odpadů po 125 cyklech, než je limitní hodnota pro 75 cyklů. Přesto vzorky s fialově ohraničenými součiniteli rozložení vzduchových pórů nesplňují limitní hodnotu 0,2 mm.

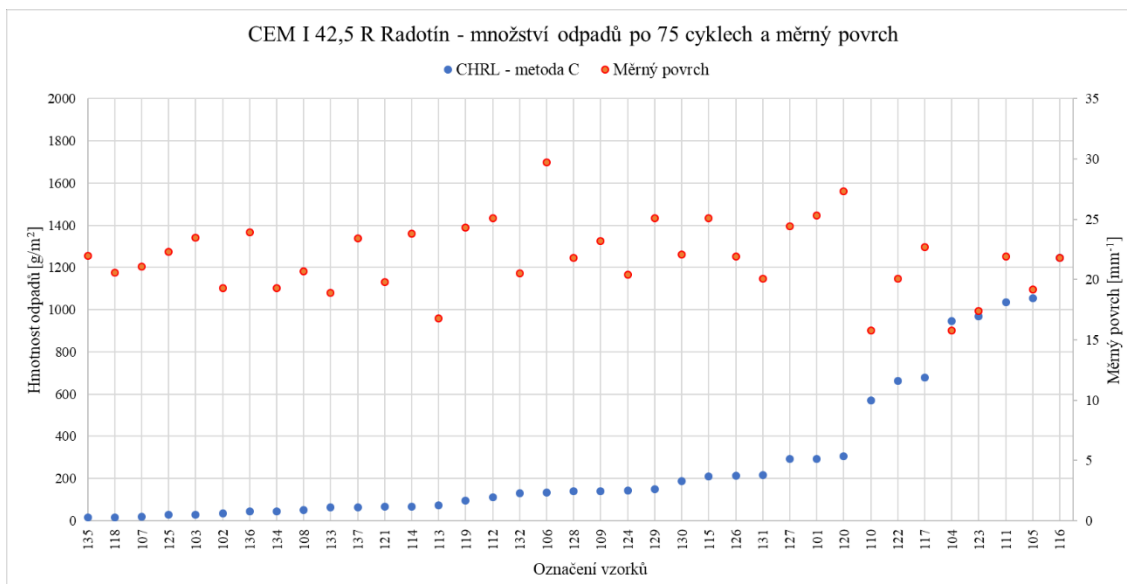
6.2.3.4 Množství odpadů a měrný povrch

Pro úplnost uvádím i hodnoty měrného povrchu pro jednotlivé vzorky, jakožto údaj získaný při provádění mikroskopické zkoušky. Na každém grafu je hmotnost odpadů pro jednotlivé vzorky vyznačena modrým bodem a měrný povrch červeným bodem.



Jelikož nejsou stanoveny normou žádné limitní hodnoty, uvádím pro tuto charakteristiku pouze výsledky. Předpokladem pro závislost mezi měrným povrchem a odolností povrchu betonu vůči CHRL, čím vyšší je měrný povrch, tím nižší by měly být celkové odpady. Výsledky jsou seřazeny vzestupně dle celkové hmotnosti odpadů.

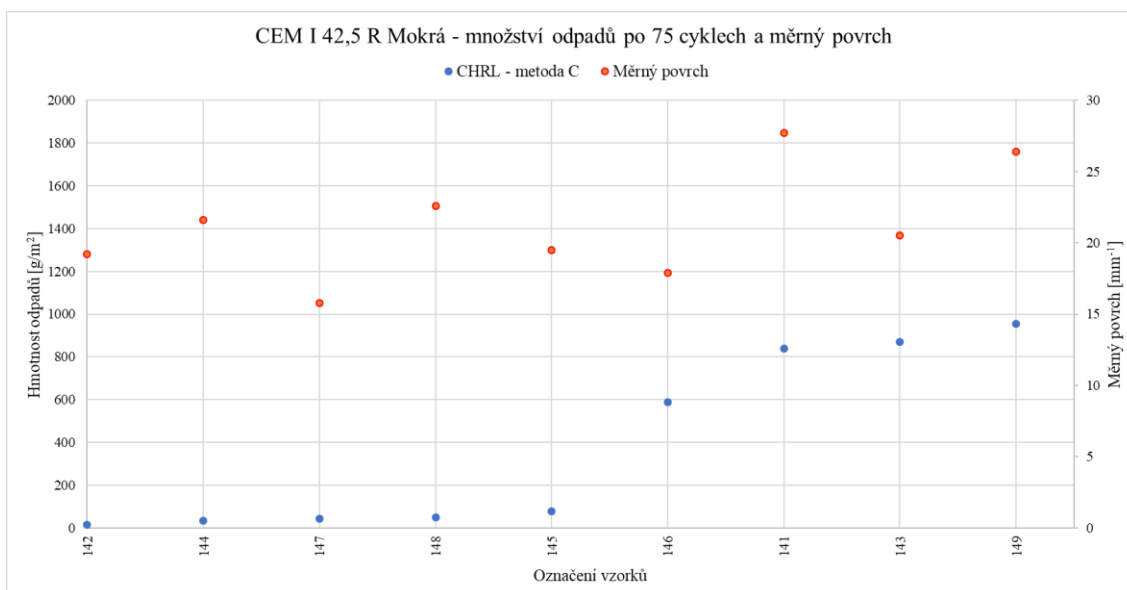
Skupina 1



Obr. 6.67: Skupina 1 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Pro vzorky ze skupiny 1 na obrázku 6.67 nelze potvrdit předpoklad, že s rostoucím měrným povrchem klesá hmotnost odpadů.

Skupina 2

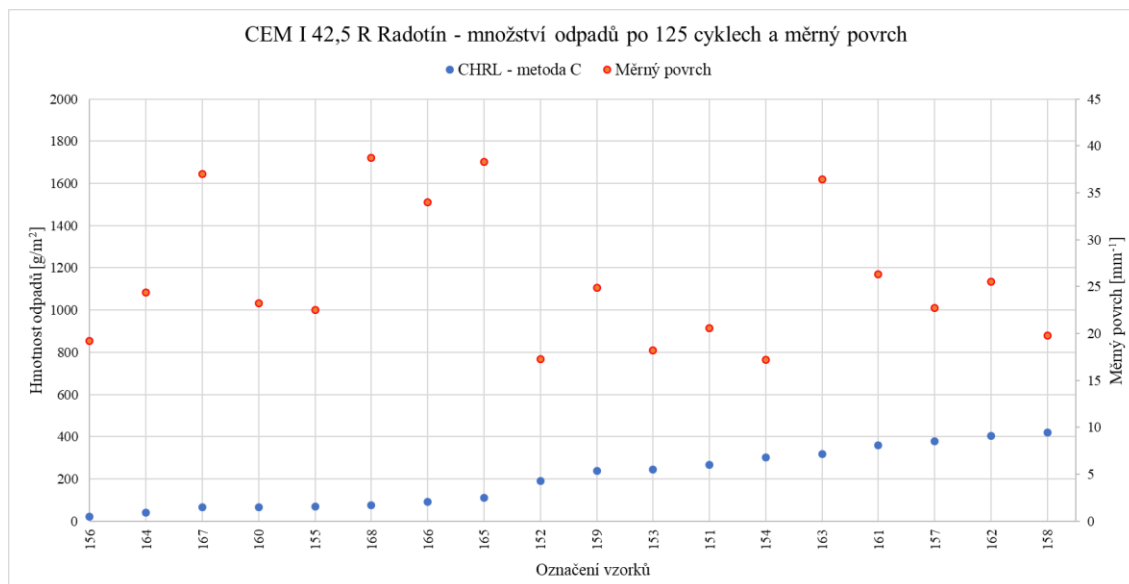


Obr. 6.68: Skupina 2 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Z hodnot na obrázku 6.68 též nelze potvrdit dříve uvedený předpoklad.



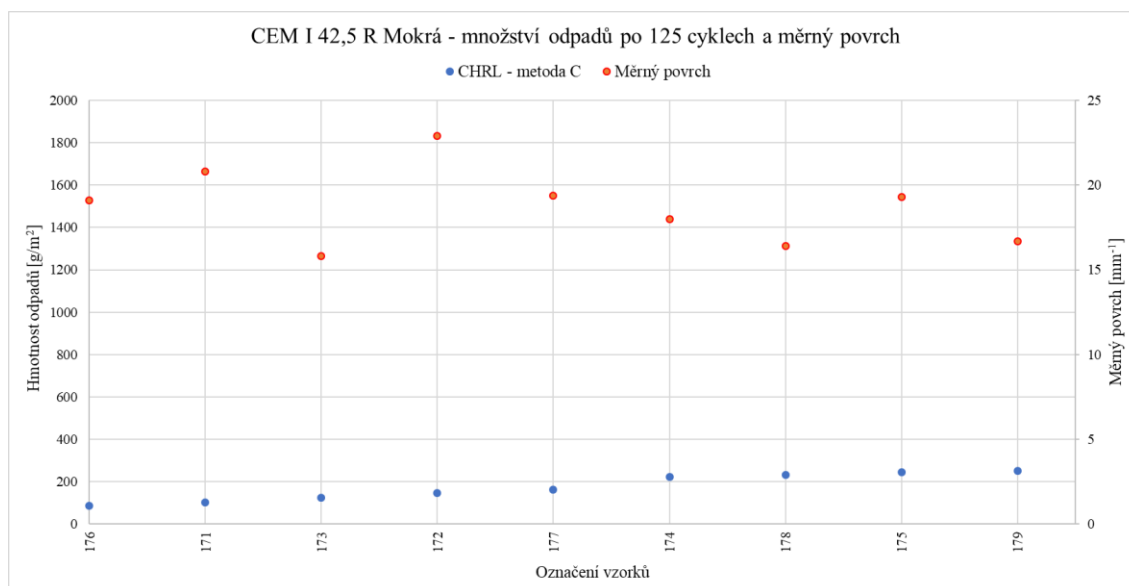
Skupina 3



Obr. 6.69: Skupina 3 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Pro skupinu 3 také nelze z grafu na obrázku 6.69 potvrdit klesající měrný povrch s rostoucí hmotností odpadů pro jednotlivé vzorky.

Skupina 4

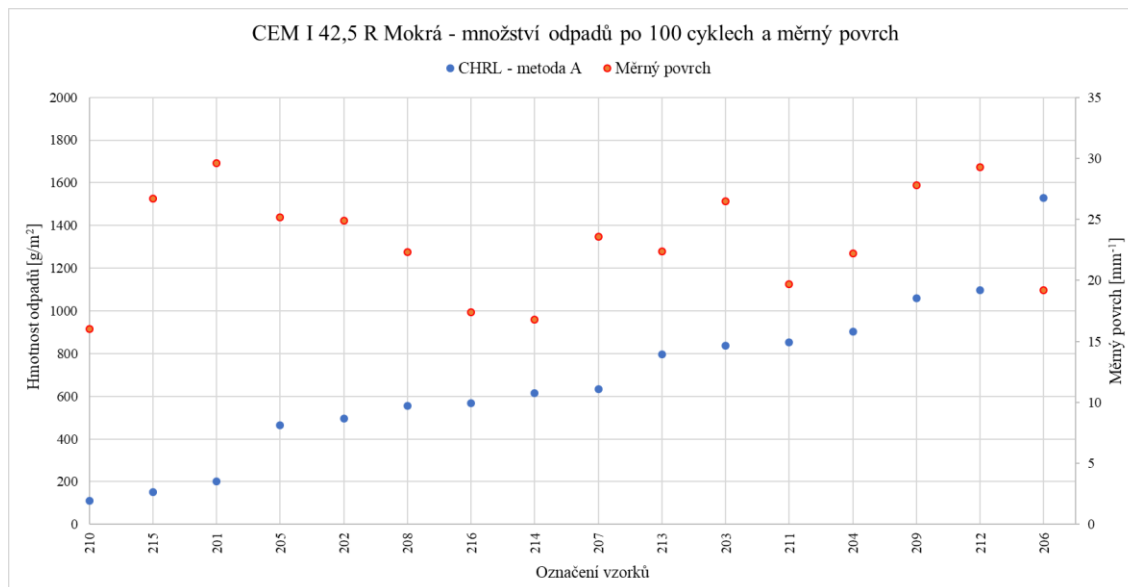


Obr. 6.70: Skupina 4 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Pro vzorky ze skupiny 4 na obrázku 6.70 nelze potvrdit předpoklad, že s rostoucím měrným povrchem klesá hmotnost odpadů, pouze je vidět jakýsi náznak ve střední části grafu.



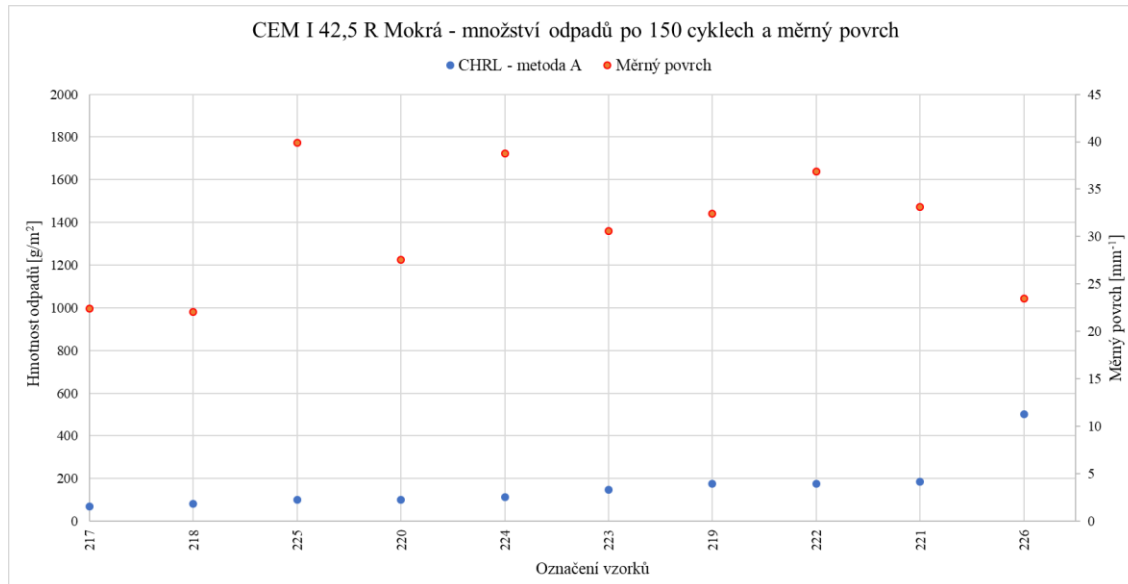
Skupina 5



Obr. 6.71: Skupina 5 - CHRL A + měrný povrch - výsledky

Z grafu na obrázku 6.71 nelze potvrdit závislost klesajícího měrného povrchu s rostoucí hmotností odpadů pro jednotlivé vzorky.

Skupina 6

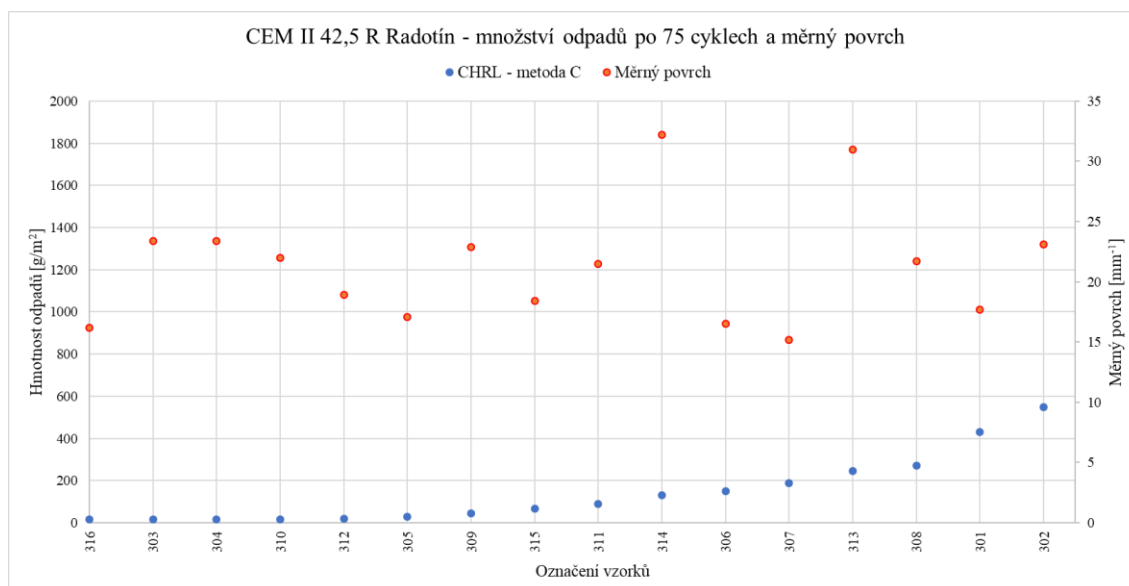


Obr. 6.72: Skupina 6 - CHRL A + měrný povrch - výsledky

Pro vzorky ze skupiny 6 na obrázku 6.72 nelze potvrdit předpoklad, že s rostoucím měrným povrchem klesá hmotnost odpadů.



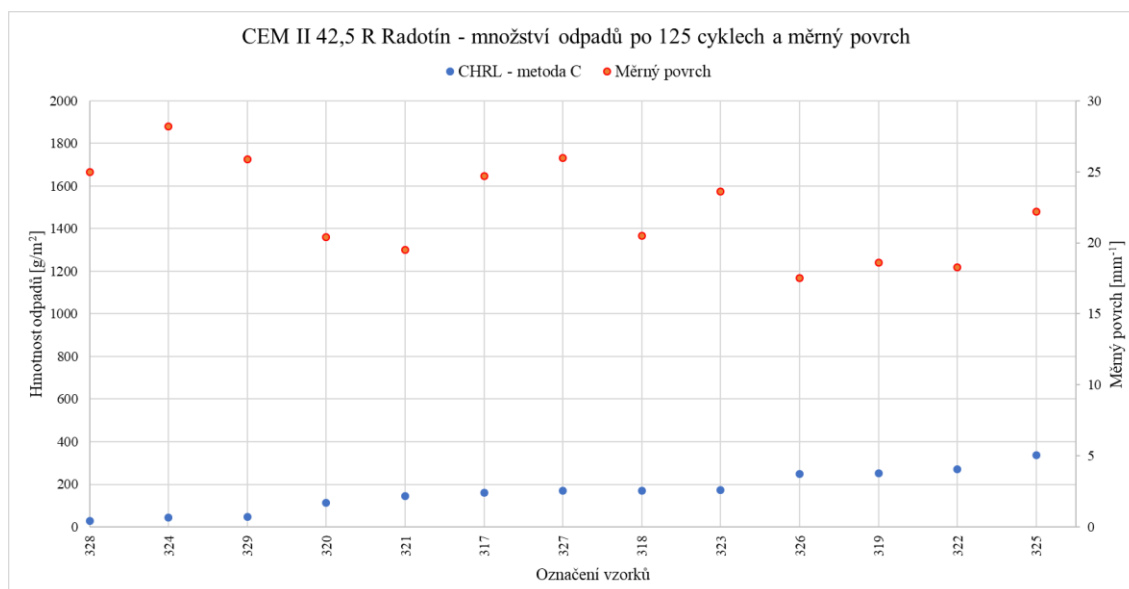
Skupina 7



Obr. 6.73: Skupina 7 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Pro skupinu 7 nelze z grafu na obrázku 6.73 potvrdit klesající měrný povrch s rostoucí hmotností odpadů pro jednotlivé vzorky, přestože na začátku mírný náznak klesajícího trendu je vidět.

Skupina 8



Obr. 6.74: Skupina 7 - CHRL C + měrný povrch - výsledky

Z grafu na obrázku 6.74 nelze potvrdit závislost klesajícího měrného povrchu s rostoucí hmotností odpadů pro jednotlivé vzorky.



7 Diskuse výsledků

V práci jsou uvedeny výsledky získané na betonových vzorcích vyrobených v laboratorních podmínkách i odebraných z betonáren. Na základě porovnávaných výsledků v kapitole 6.2 lze poznamenat, že pro vzorky odebrané v laboratoři je menší rozptyl výsledků v celkových hmotnostech odpadů. V závislosti mezi metodami stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL a mikroskopickou zkouškou však větší rozdíly pozorovat nelze.

První základní charakteristikou získanou při mikroskopické zkoušce je celkový obsah vzduchu v betonu. Tato charakteristika by dle předpokladů měla být velice podobná s hodnotou získanou na čerstvém betonu pomocí tlakoměrné metody. Při porovnávání výsledků v diplomové práci vychází přibližně pro 30 % zkoušených vzorků odchylka hodnoty obsahu vzduchu větší než 20 %. Odchylka může být dána ukládáním a vibrováním betonové směsi do formy pro vytvoření zkušebního tělesa pro mikroskopickou zkoušku či použitou přísadou do betonu. U čerstvého betonu může být obsah vzduchu ovlivněn teplotou vzduchu, kdy s vyšší teplotou betonové směsi klesá stupeň provzdušnění. Při rozdělení vzorků do jednotlivých skupin dle použitého cementu a metody stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL vycházelo pro většinu - 90 % vzorků, že pokud je celkový obsah vzduchu alespoň 4 %, potom jsou celkové odpady nižší než 1000 g/m².

Druhou charakteristikou, jež je výsledkem mikroskopické zkoušky, je obsah mikroskopických vzduchových pórů A_{300} tzv. účinný obsah. Jedním z bodů diplomové práce bylo porovnání této hodnoty s hodnotou obsahu vzduchu v čerstvém betonu stanoveného pomocí dnes běžně používané tlakoměrné metody. Hodnoty obsahu mikroskopického vzduchu jsou podle očekávání výrazně nižší oproti hodnotám získaným tlakoměrnou metodou. Z toho vzniká předpoklad, že více vypovídající pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL by měl být tento účinný obsah, který je v betonu žádoucí. Pro mnou porovnávané výsledky zkoušek platí u 70 % zkoušených vzorků, že pokud je obsah mikroskopického vzduchu A_{300} větší než 1,8 %, potom jsou celkové odpady pod hranicí 1000 g/m². Pro 29 % zkoušených vzorků vychází celkový odpad nižší než 1000 g/m² pro hodnoty obsahu mikroskopického vzduchu pod 1,8 %. Pro zbylé jedno procento vzorků vycházejí i přes obsah mikroskopického vzduchu nad 1,8 % odpady nad 1000 g/m².



Třetí důležitou charakteristikou mikroskopické zkoušky je součinitel rozložení vzduchových pórů. Tento součinitel jsem porovnával výhradně s hmotností celkových odpadů po předepsaném počtu cyklů. Předpokladem je, že čím vyšší tento součinitel je, tím horší by měla být odolnost povrchu betonu vůči CHRL, tj. vyšší hmotnost celkových odpadů. Pro 40 % zkoušených vzorků platí, pokud byl součinitel rozložení vzduchových pórů alespoň 0,2 mm nebo menší, potom je hmotnost celkových odpadů nižší než 1000 g/m². Ovšem pro většinu - 60 % vzorků byl součinitel rozložení vzduchových pórů vyšší než 0,2 mm, nicméně odpady byly nižší než 1000 g/m². Pro jeden vzorek byl součinitel rozložení vzduchových pórů menší než 0,2 mm, ale odpady vyšší než požadovaných 1000 g/m².

Poslední charakteristika získaná při mikroskopické zkoušce je měrný povrch. Předpokladem pro závislost mezi odolností povrchu vůči CHRL a touto charakteristikou, čím větší je měrný povrch, tím větší by měla být odolnost povrchu vůči CHRL, tj. nižší odpady. Z uvedených výsledků jednotlivých vzorků v této diplomové práci nelze tento předpoklad potvrdit, neboť mezi naměřenými hodnotami měrného povrchu a hmotností celkových odpadů nelze stanovit žádný vztah.



8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání zkušebních metod používaných pro stanovení odolnosti betonu vůči CHRL. Dále seznámení se s postupy a metodami používanými pro stanovení ať už přímé odolnosti povrchu betonu vůči CHRL nejčastěji pomocí metod A a C, nebo nepřímé metody pomocí charakteristik získaných mikroskopickou zkouškou.

Jednou z částí bylo vytvoření vlastních zkušebních těles s následným provedením stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL. Na stejném vzorku byla provedena mikroskopická zkouška. Získané výsledky zkoušek byly zařazeny mezi ostatní - převzané hodnoty.

Hlavní částí diplomové práce bylo vyhodnocení převzatých výsledků, stanovených pro různé metody, od společnosti BETOTECH s.r.o. Sledoval jsem zejména závislost mezi běžně používanými metodami A a C pro stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL a jednotlivými charakteristikami získanými mikroskopickou zkouškou prováděnou na ztvrdlém betonu.

Pro zkoumaný soubor dat byla úspěšně ověřena závislost mezi celkovým obsahem vzduchu A a metodami využívající cyklické zmrazování pro stanovení odolnosti betonu vůči CHRL. Pro 90 % zkoušených vzorků platí, že pokud je celkový obsah vzduchu A vyšší než 4 %, potom je hmotnost celkových odpadů nižší než 1000 g/m².

Mikroskopický obsah vzduchu A_{300} již nevykazuje tak vysokou závislost vůči hmotnosti celkových odpadů stanovených metodami A a C. Pro 70 % zkoušených vzorků platí, že pokud je mikroskopický obsah vzduchu A_{300} vyšší než 1,8 %, potom je hmotnost celkových odpadů nižší než 1000 g/m².

Další sledovanou charakteristikou získanou mikroskopickou zkouškou je součinitel rozložení vzduchových pórů L . Tato charakteristika vykazuje nejnižší závislost z charakteristik stanovených normou. Pro 40 % zkoušených vzorků platí, že pokud je součinitel rozložení vzduchových pórů L nižší než 0,2 mm, potom je hmotnost celkových odpadů nižší než 1000 g/m².

Rozdělením jednotlivých vzorků do skupin podle použitého cementu, zkušební metody a místa odebírání se nedosáhlo příznivější vyhodnocení výsledků. Pouze lze pozorovat, že výsledky vzorků vyrobených v laboratoři vykazují menší rozptyly.



Nižší závislost mezi charakteristikami obsahu mikroskopického vzduchu A_{300} a součinitele rozložení vzduchových pórů L vůči množstvím celkových odpadů může být ovlivněno mnoha faktory. Jedním z faktorů mohou být limitní hodnoty těchto charakteristik stanovené v normě ČSN P 73 2404. Dalším faktorem může být provádění zkoušek stanovení odolnosti povrchu betonu vůči CHRL. Nejpoužívanější metody v ČR, tedy metoda A a C, jsou náchylné na postup při provádění zkoušky. Zejména vzhledem k neúplně definovanému postupu při provádění. Vzhledem k tomuto faktu vykazují zkoušky dle této normy vysokou mírou reprodukovatelnosti a opakovatelnosti.

Obecně uznávané předpoklady o vzájemných závislostech jednotlivých výsledků zkoušek jsou nadhodnocené, neboť nikdy nefungují na sto procent. Velkou roli jistě hraje i reprodukovatelnost jednotlivých zkušebních metod, kdy zejména při stanovení odolnosti povrchu betonu vůči mrazu a CHRL metodami A a C dosahuje až k 300 %.

Při pohledu na soubory výsledků zkoušek, kde zjevně vždy nějaká část nesplňuje předpoklady a následně výsledné limity, se zdá být praxe, kdy jsou závěry o kvalitě materiálů členěny na základě jedné kontrolní zkoušky, velmi málo související s realitou.

V současnosti se odborná skupina (ŘSD ČR, ČBS ČSSI, SVB ČR, vysoké školy, zkušební ústavy a laboratoře), vědoma si výše uvedených poznatků, snaží hledat zkušební postupy, které by vyřešily alespoň některá slabá místa popsaných zkušebních metod.



Seznam použité literatury

Normy:

- [1] ACI 318-14, *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2014.
- [2] ASTM C457 / C457M-16. *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [3] ASTM C672 / C672M-12. *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [4] ČSN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha, 1968.
- [5] ČSN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha, 1984.
- [6] ČSN 73 1380: *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*. Praha, 2007.
- [7] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha, 2009.
- [8] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, Praha, 2020.
- [9] ČSN EN 206+A2 *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha, 2021.
- [10] ČSN EN 480-11: *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha, 2006.
- [11] ČSN P 73 2404. *Beton-Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda-doplňující informace*. Praha, 2016.
- [12] ČSN P CEN/TS 12390-9: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - Odlupování*. Praha, 2007.



-
- [13] STN 73 1326, *Stanovenie odolnosti povrchu cementového betónu proti pôsobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok*. Bratislava, 2016.
- [14] STN EN 206 + A1: *Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda*. Bratislava, 2017.

Knihy, skripta a odborné časopisy:

- [15] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha, 2005, Informační centrum ČKAIT. 80-86769-39-9.
- [16] BECHYNĚ, Stanislav. *Staviteľství betonové- 1, vodotěsnost a jiné stavební a fyzikální vlastnosti betonu, svazek pátý*. Praha: SNTL, 1961
- [17] CIKRLÉ, Petr a POSPÍCHAL Ondřej. *Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury*. BETON TKS. 2011(3). ISSN 1213-3116.
- [18] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha, 2009, Informační centrum ČKAIT, s.r.o., ISBN 978-80-87093-75-7.
- [19] DOHNÁLEK, Jiří, TŮMA Petr, KOLÍSKO Jiří, HELA Rudolf, HROMÁDKO Jan. *Zkoušení mrazuvzdornosti betonu*. BETON TKS. 2008(3), 54-60.
ISSN: 1213-3116
- [20] DOHNÁLEK, Jiří. *Vliv mrazuvzdornosti betonu na jeho povrchové úpravy*. BETON TKS. 2012(3), 44-47. ISSN: 1213-3116
- [21] GERMANN INSTRUMENTS, INC. *AVA* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava>
- [22] HÁJEK, Petr. *Udržitelná výstavba betonových staveb – Od principů k normám*. BETON TKS. 2012(2), 3-8. ISSN: 1213-3116
- [23] HOBZA, Jakub, COUFAL Robert, VÍTEK Jan L. *Specifikace betonu pomocí jeho vlastností*. BETON TKS. 2018(2), 54 ISSN 1213-3116.
- [24] KOCÁB, Dalibor, MISÁK Petr, VYMAZAL Tomáš, KOMÁRKOVÁ Tereza, HALAMOVÁ Romana. *Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metody, praxe, problémy*. BETON TKS. 2017(2), 42-47. ISSN: 1213-3116



-
- [25] MISÁK, Petr, VYMAZAL Tomáš, KUCHARCZYKOVÁ Barbara, ŽALUD Oldřich. *Stanovení odolnosti betonu proti působení chl podle čsn 73 1326 – opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků zkoušek*. BETON TKS. 2013(4), 120-124. ISSN:1213-3116
- [26] PENG, Gai-Fei a kolektiv. *The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50-60 MPa grade concrete*. *Construction and building materials* [online]. 2006 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061806000158>
- [27] 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. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: https://www.uni-due.de/ibpm/Projekte/CDF_eng.pdf
- [28] STEHLÍK, Michal, JURÁNKOVÁ, Vlasta, ADÁMEK, Jiří. *Studium náchylnosti cementových malt a betonů ke karbonatům*. TZB-info, 2020(8), 1-8. ISSN: 1801-4399.
- [29] ŠAFRATA, Pavel. *Studium možnosti zlepšení mrazuvzdornosti betonu*: Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [30] TEPLÝ, Břetislav, ROVNANÍK Pavel. *Účinky mrazu na beton*. BETON TKS. 2007(4), 42-45. ISSN: 1213-3116
- [31] VASSILIEV, Dimitre Georgiev. *Evaluation of Test Methods for De-Icer Scaling Resistance of concrete*. University of Toronto, Toronto, 2012.
- [32] VESELÝ, Vladimír. *Transportbeton v české republice*. BETON TKS [online]. 2019(2), 26-29 [cit. 2021-03-19]. ISSN: 1213-3116
- [33] VINKLER, Marek. *Voda v betonu*. Beton TKS. 2018(2), 49-53. ISSN 1213-3116
- [34] VYMAZAL, Tomáš, MISÁK Petr. *Program zkoušení způsobilosti Pevnost a trvanlivost ztvrdlého betonu ZZB2021/1* [online]. 07-2021 [cit. 2021-10-4]. Dostupné z: <http://ptprovider.cz/page/7dc4022ac008eb11a09b00155d6570f2>
-



-
- [35] VYMAZAL, Tomáš, ŽALUD Oldřich, KUCHARCZYKOVÁ Barbara, MISÁK Petr. *Vliv zkušebních forem a ošetřování těles na výsledky zkoušek fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu*. BETON TKS. 2011, (4), 76-79. ISSN: 1213-3116
- [36] VYMAZAL, Tomáš, ŽALUD Oldřich, MISÁK Petr, KUCHARCZYKOVÁ Barbara a JANOUŠEK Petr. *Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovené NDT metodami*: BETON TKS. 2011(4), 73-75. ISSN 1213-3116.
- [37] VYMAZAL, Tomáš, ŽALUD Oldřich, MISÁK Petr, KUCHARCZYKOVÁ Barbara a RUMEL Ivo. *Vliv zkušebních forem a ošetřování těles na výsledky zkoušek fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu*: BETON TKS. 2011(4), 76-79. ISSN 1213-3116.
- [38] ZHANG, Jiake. Investigation of deterioration of joints in concrete pavements. Iowa: Iowa State University, 2013

Webové stránky:

- [39] *Informace o překladech zkušebních norem řady ČSN EN 12350 a 12390: Svaz výrobců betonu ČR* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z:
www.svb.cz/assets/pdf/SVB_InformaceOPrekladechZkusebnichNorem.pdf
- [40] *Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z:
http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/cviceni/27_stanoveni_obsahu_vzduchu_v_cerstvem_betonu.pdf
- [41] *Vlastnosti betonu zkoušené v laboratoři nebo na konstrukci – systemizace* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z:
https://www.transportbeton.cz/uploads/sources/beton-university-prezentace/b0c62617ccde609c05875447052082ae_05-bu-vlastnosti-betonu-zkousene-v-laboratori-na-konstrukci-systemizace-kocab-pdf.pdf



Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 3.1: Tlakový hrnec	20
Obr. 3.2: Drátěná klec + vstřík vzorku [21].....	21
Obr. 3.3: Uvolnění + zachytávání vzduchových bublin [21].....	21
Obr. 3.4 Princip metody AVA [21]	22
Obr. 3.5: Příprava zkušební vzorku – rozměry (převzato z [10])	23
Obr. 3.6: Rozložení měřících přímek na zkušební vzorku (převzato z [10]).....	24
Obr. 4.1: Schématické vysvětlení „glue-spall“ mechanismu (převzato z [38]).....	26
Obr. 4.2: Schématické vysvětlení „glue-spall“ mechanismu na betonu [38]	27
Obr. 4.3: Vztah mezi velikostí kapilárních pórů a teplotou tuhnutí (převzato z [38])....	28
Obr. 4.4: Chování vody v průběhu zmrazovacího cyklu [29].....	29
Obr. 4.5: Mrazicí box.....	30
Obr. 4.6: Zkušební tělesa v mrazicím boxu	30
Obr. 4.7: Průběh zmrazovacího cyklu dle ČSN 73 1322	31
Obr. 5.1: Teplotní cyklus - metoda A dle ČSN 73 1326	34
Obr. 5.2: Objímka na zkušebních tělesech [5].....	35
Obr. 5.3: Teplotní cyklus - metoda C dle ČSN 73 1326.....	37
Obr. 5.4: Graf pro postup odlupování betonu s povrchu zkušební tělesa [5]	38
Obr. 5.5: Sestavení při zkoušce zmrazování a rozmrazování [12]	39
Obr. 5.6: Zmrazovací cyklus – uprostřed na zkoušeném vzorku [12].....	40
Obr. 5.7: Umístění zkušební vzorku v testovací nádobě [27].....	41
Obr. 5.8: Teplotní cyklus – metoda CDF (převzato z [27]).....	42
Obr. 5.9: Zkušební nádoba v chladicí lázni [27].....	42
Obr. 6.1: Navážení jednotlivých složek.....	48
Obr. 6.2: Míchání betonové směsi v míchačce	49
Obr. 6.3: Stanovení konzistence betonu	49
Obr. 6.4: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu	50
Obr. 6.5: Řezání válce.....	51
Obr. 6.6: Uložení zkušebních těles do mrazicího boxu	51
Obr. 6.7: Omývání uvolněných částic betonu.....	52
Obr. 6.8: Sušení uvolněných částí při 105 °C.....	52
Obr. 6.9: Vážení uvolněných částic	53
Obr. 6.10: Příprava vzorků SPF - leštění	54
Obr. 6.11: Mikroskop + PC pro vyhodnocení SPF	55
Obr. 6.12: Označení vzduchového póru na měřící přímce	55
Obr. 6.13: Porovnání celkového obsahu vzduchu v betonu	59
Obr. 6.14: Porovnání obsahu vzduchu tlakoměrnou metodou a mikroskopického A ₃₀₀ 61	
Obr. 6.15: Množství odpadů a celkový obsah vzduchu – CHRL - C	63
Obr. 6.16: Množství odpadů a obsah vzduchu A ₃₀₀ – CHRL - C	64
Obr. 6.17: Množství odpadů a součinitel rozložení vzduchových pórů L - CHRL - C. 66	
Obr. 6.18: Množství odpadů a měrný povrch – CHRL - C	67



Obr. 6.19: Skupina 1 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	69
Obr. 6.20: Skupina 1 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	69
Obr. 6.21: Skupina 2 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	70
Obr. 6.22: Skupina 2 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	70
Obr. 6.23: Skupina 3 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	71
Obr. 6.24: Skupina 3 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	71
Obr. 6.25: Skupina 4 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	72
Obr. 6.26: Skupina 4 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	72
Obr. 6.27: Skupina 5 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	73
Obr. 6.28: Skupina 5 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	73
Obr. 6.29: Skupina 6 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	74
Obr. 6.30: Skupina 6 - CHRL A + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	74
Obr. 6.31: Skupina 7 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	75
Obr. 6.32: Skupina 7 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	75
Obr. 6.33: Skupina 8 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - výsledky.....	76
Obr. 6.34: Skupina 8 - CHRL C + celkový obsah vzduchu - komentovaný graf.....	76
Obr. 6.35: Skupina 1 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	77
Obr. 6.36: Skupina 1 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	77
Obr. 6.37: Skupina 2 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	78
Obr. 6.38: Skupina 2 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	78
Obr. 6.39: Skupina 3 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	79
Obr. 6.40: Skupina 3 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	79
Obr. 6.41: Skupina 4 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	80
Obr. 6.42: Skupina 4 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	80
Obr. 6.43: Skupina 5 - CHRL A + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky	81
Obr. 6.44: Skupina 5 - CHRL A + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	81
Obr. 6.45: Skupina 6 - CHRL A + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky	82
Obr. 6.46: Skupina 6 - CHRL A + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	82
Obr. 6.47: Skupina 7 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	83
Obr. 6.48: Skupina 7 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	83
Obr. 6.49: Skupina 8 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - výsledky.....	84
Obr. 6.50: Skupina 8 - CHRL C + obsah vzduchu A ₃₀₀ - komentovaný graf.....	84
Obr. 6.51: Skupina 1 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	85
Obr. 6.52: Skupina 1 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 85	85
Obr. 6.53: Skupina 2 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	86
Obr. 6.54: Skupina 2 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 86	86
Obr. 6.55: Skupina 3 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	87
Obr. 6.56: Skupina 3 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 87	87
Obr. 6.57: Skupina 4 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	88
Obr. 6.58: Skupina 4 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 88	88
Obr. 6.59: Skupina 5 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	89
Obr. 6.60: Skupina 5 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 89	89
Obr. 6.61: Skupina 6 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	90
Obr. 6.62: Skupina 6 - CHRL A + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf... 90	90
Obr. 6.63: Skupina 7 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	91



Obr. 6.64: Skupina 7 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf...	91
Obr. 6.65: Skupina 8 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - výsledky.....	92
Obr. 6.66: Skupina 8 - CHRL C + rozložení vzduchových pórů - komentovaný graf...	92
Obr. 6.67: Skupina 1 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	93
Obr. 6.68: Skupina 2 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	93
Obr. 6.69: Skupina 3 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	94
Obr. 6.70: Skupina 4 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	94
Obr. 6.71: Skupina 5 - CHRL A + měrný povrch - výsledky.....	95
Obr. 6.72: Skupina 6 - CHRL A + měrný povrch - výsledky.....	95
Obr. 6.73: Skupina 7 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	96
Obr. 6.74: Skupina 7 - CHRL C + měrný povrch - výsledky	96



Seznam tabulek

Tab. 2.1: Stupeň vlivu prostředí XF dle ČSN EN 206+A2 (převzato z [9])	12
Tab. 2.2: Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu 50 let (převzato z [11])	13
Tab. 2.3: Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu 100 let (převzato z [11])	14
Tab. 2.4: Doporučené hodnoty mezního složení a vlastností betonu (převzato z [9])....	16
Tab. 2.5: Rozdělení do jednotlivých tříd dle ACI 318-14 (převzato z [1])	17
Tab. 2.6: Požadavky na beton dle třídy namáhání dle ACI 318-14 (převzato z [1])	17
Tab. 5.1: Zatřídění povrchů zkušebních těles metoda A (převzato z [5]).....	35
Tab. 5.2: Zatřídění povrchů zkušebních těles metoda C (převzato z [5]).....	38
Tab. 6.1: Složení jednotlivých záměsí 1 m ³ betonu.....	48
Tab. 6.2: Výsledky zkoušek prováděných na čerstvém betonu	50
Tab. 6.3: Pevnost v tlaku po 28 dnech.....	50
Tab. 6.4: Získané laboratorní hodnoty CHRL C-125	53
Tab. 6.5: Stanovení rozdělení vzduchových pórů.....	56
Tab. 6.6: Způsob značení vzorků.....	58
Tab. 6.7: Rozdělení na skupiny dle cementu, metody a počtu cyklů	68



Seznam příloh

[1] Výsledky pro CEM I a metodu C

V příloze jsou uvedeny všechny převzaté hodnoty včetně grafů vyskytujících se v diplomové práci pro vzorky s označením:

- 101 - 137 - vzorky vyrobené z CEM I 42,5 R Radotín na betonárně
- 141 - 149 - vzorky vyrobené z CEM I 42,5 R Mokrá na betonárně
- 151 - 168 - vzorky vyrobené z CEM I 42,5 R Radotín v laboratoři
- 171 - 179 - vzorky vyrobené z CEM I 42,5 R Mokrá v laboratoři

[2] Výsledky pro CEM I a metodu A

V příloze jsou uvedeny všechny převzaté hodnoty včetně grafů vyskytujících se v diplomové práci pro vzorky s označením:

- 201 - 226 - vzorky vyrobené z CEM I 42,5 R Mokrá v laboratoři

[3] Výsledky pro CEM II a metodu C

V příloze jsou uvedeny všechny převzaté hodnoty včetně grafů vyskytujících se v diplomové práci pro vzorky s označením:

- 301 - 329 - vzorky vyrobené z CEM II A-LL 42,5 R Radotín v laboratoři

Přílohy jsou uloženy v digitální podobě na přiloženém CD