



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

METODY POSOUZENÍ TRVANLIVOSTI BETONŮ VŮČI PŮSOBENÍ MRAZU A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK V ČESKÉ REPUBLICĚ A V EVROPĚ

METHODS FOR TESTING THE DURABILITY OF CONCRETES AGAINST FREEZE THAW AND
DEICING SALTS IN THE CZECH REPUBLIC AND EUROPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FRANTIŠEK ŽÍLA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2023



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	František Žíla
Název	Metody posouzení trvanlivosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek v České republice a v Evropě
Vedoucí práce	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
Datum zadání	26. 10. 2022
Datum odevzdání	26. 05. 2023

V Brně dne 26. 10. 2022

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA, dr. h. c.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Časopis Beton TKS.

ČSN EN 206 + A2 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

ČSN P 73 2404 - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace.

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí.

České a zahraniční normy zabývající se trvanlivostí betonu v oblasti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek.

Internetové zdroje, např. databáze SCOPUS

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Metody posouzení trvanlivosti jsou v České republice zavedené už od 80. let 20. století. V současnosti se však některé z těchto postupů nebo jejich části jeví jako nezohledňující současný stav posouzení trvanlivosti v oblasti betonů vystavených působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Hlavním nosným tématem bakalářské práce bude studium metod posouzení trvanlivosti betonu u nás a v Evropě. Sledovány budou zejména parametry betonu jako je mrazuvzdornost a odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Cílem práce bude posouzení a navržení možnostmi zlepšení a zpřesnění těchto zkušebních postupů, včetně přípravy zkušebních těles pro zkoušky, nebo také případného průběhu samotné zkoušky. Budou také srovnány jednotlivé metody používané v České republice a v dalších evropských zemích, zejména sousedních, jako je Německo, Rakousko, Polsko a další. Předpokládaný rozsah bakalářské práce cca 40 – 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá metodami posouzení trvanlivosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek používaných v České republice a v Evropě. V teoretické části práce jsou popsány základní vlastnosti betonu, třídy vlivu prostředí, dále zde jsou shrnuty teorie porušení betonu cyklickým zmrazováním a rozmrazováním, metody posouzení trvanlivosti betonu proti působení mrazu a proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek a také vlastnosti ovlivňující opakovatelnost a reprodukovatelnost zkoušek. Praktická část je zaměřena na zkoušení odolnosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek pomocí metod podle norem ČSN 73 1322 a ČSN 73 1326 a dále se zabývá vlivem ošetřování povrchu betonu na průběh a výsledek těchto zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, trvanlivost, mrazuvzdornost, chemické rozmrazovací látky, cyklické zmrazování a rozmrazování, zkušební metody

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the methods of assessing the durability of concretes against frost and chemical deicing salts used in the Czech Republic and Europe. The theoretical part of the thesis describes the basic properties of concrete, the classes of environmental influence, the theory of concrete failure by cyclic freezing and thawing, methods for assessing the durability of concrete against freezing and methods for assessing the durability against water and chemical deicing salts, as well as properties affecting the repeatability and reproducibility of tests. The practical part focuses on testing the resistance of concrete to the action of freezing and chemical thawing agents using the methods according to the standards ČSN 73 1322 and ČSN 73 1326 and also on the influence of concrete surface treatment on the process and result of these tests.

KEYWORDS

Concrete, durability, frost resistance, chemical deicing salts, cyclic freezing and thawing, test methods

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÍLA, František. *Metody posouzení trvanlivosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek v České republice a v Evropě*. Brno, 2023. 77s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. 05. 2023

František Žíla
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Metody posouzení trvanlivosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek v České republice a v Evropě* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 05. 2023

František Žíla
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za pomoc, odborné rady, připomínky a konzultace při psaní této bakalářské práce. Dále bych také chtěl poděkovat pracovníkům ústavu THD, za ochotu a pomoc při přípravě a zkoušení vzorků. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině za jejich podporu.

OBSAH

ÚVOD	13
CÍL PRÁCE	14
TEORETICKÁ ČÁST	15
1 BETON	16
2 DRUHY PROSTŘEDÍ	16
3 STUPEŇ Vlivu PROSTŘEDÍ XC	17
4 STUPEŇ Vlivu PROSTŘEDÍ XF	18
5 MRAZOVÉ PORUŠENÍ BETONU	18
5.1 TEORIE HYDRAULICKÉHO TLAKU	20
5.2 ROZPÍNÁNÍ LEDU PŘI TÁNÍ	21
5.3 TLAK ROSTOUCÍHO LEDU	21
5.4 KRITICKÝ STUPEŇ NASYCENÍ	21
5.5 ODLUPOVÁNÍ	22
6 OPATŘENÍ PRO ZLEPŠENÍ MRAZUVZDORNOST BETONU	22
7 ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI A ODOLNOSTI BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHRL	25
7.1 ČESKÁ REPUBLIKA	25
7.1.1 ČSN 73 1322 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU	25
7.1.2 ČSN 73 1380 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ	26
7.1.3 STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU CEMENTOVÉHO BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK	27
7.1.4 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU ZKRÁCENÝMI ZKOUŠKAMI	32
7.1.5 ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ ODLUPOVÁNÍ 32	
7.2 SLOVENSKO	38

7.3	NĚMECKO	39
7.3.1	RILEM TC 117 FDC: CDF TEST	39
7.3.2	RILEM TC 176 IDC	41
7.4	POLSKO.....	43
7.5	ŠVÉDSKO.....	44
7.6	FINSKO	44
7.7	RAKOUSKO	45
8	OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST	45
	PRAKTICKÁ ČÁST	47
9	METODIKA PRÁCE	48
9.1	VSTUPNÍ SUROVINY.....	49
10	RECEPTURY	51
11	ZKOUŠKY ČERSTVÉHO BETONU	52
11.1	STANOVENÍ KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU.....	52
11.2	STANOVENÍ OBSAHU VZDUCHU.....	52
11.3	OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU.....	53
12	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	54
13	ZKOUŠKY ZTVRDLÉHO BETONU.....	55
13.1	PEVNOST V TLAKU	55
13.2	OBJEMOVÁ HMOTNOST ZTVRDLÉHO BETONU	55
13.3	STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU	56
13.4	STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL.....	58
14	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ČERSTVÉHO BETONU	59
14.1	ZKOUŠKA SEDNUTÍM	59
14.2	ZKOUŠKA OBSAHU VZDUCHU – TLAKOVÁ METODA	61
14.3	OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU.....	61
15	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ZTVRDLÉHO BETONU	62
15.1	OBJEMOVÁ HMOTNOST ZTVRDLÉHO BETONU	62
15.2	PEVNOST V TLAKU	63
15.3	STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU	64

15.4	STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHRL.....	66
15.4.1	FOTKY PORUŠENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES PO ZKOUŠCE ODOLNOSTI BETONU PROTI VODĚ A CHRL.....	69
	ZÁVĚR	70
16	ZDROJE	73
17	POUŽITÉ OBRÁZKY.....	76

ÚVOD

Beton patří mezi jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů, ve vyspělých zemích světa představuje přes 75 % objemu ze všech použitých stavebních materiálů. Lidstvo beton používá už od dob starověku. Velký rozmach využití betonu nastal ale až na začátku 20. století. Tomuto rozvoji napomohl zejména vynález portlandského cementu v roce 1824 J. Aspdinem a také vynález železobetonu a předpjatého betonu v 2. polovině 18. století.

Na betonové konstrukce jsou během jejich životnosti kladeny mnohé požadavky. Mezi nejdůležitější z nich patří například trvanlivost a životnost. Na trvanlivost betonových konstrukcí má na jedné straně vliv zejména kvalita a vlastnosti betonu, ze kterého jsou postaveny. Mezi tyto vlastnosti spadá například pevnost betonu v tlaku, hutnost cementové matrice, vodní součinitel, nasákavost, obsah vzduchu a jeho rozložení, způsob ošetřování a mnohé další. Na druhé straně trvanlivost a životnost betonu a betonových konstrukcí ovlivňují vlastnosti okolního prostředí, ve kterém se betonové konstrukce nacházejí. Mezi ně patří například vlhkost, teplota, přítomnost CO_2 , nebo přítomnost chemických rozmrazovacích látek.

Jedním z hlavních negativních vlastností prostředí, kterým musí beton během své životnosti odolávat, je působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. V dnešní době existuje mnoho postupů pro posouzení odolnosti betonu proti těmto negativním vlivům. Tyto zkoušky jsou buď destruktivní, zaměřující se na pokles pevností, nebo na množství odpadu, nebo se jedná o zkoušky nedestruktivní, které se pokoušejí vlastnosti betonu zjišťovat bez porušení zkoumaného materiálu, například pomocí rychlosti šíření ultrazvukových vln.

CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části této práce bylo popsat a shrnout poznatky o betonech, které jsou exploatované v podmínkách mrazu, rozmrazování a chemických rozmrazovacích látek (CHRL). Dále také byla tato část práce zaměřena na shrnutí a popis metod, které se používají pro posouzení trvanlivosti betonů vystavených podmínkám mrazu a chemických rozmrazovacích látek v České republice a v zahraničí, včetně jejich rozdílů a parametrů reprodukovatelnosti a opakovatelnosti. Praktická část práce byla zaměřena na testování odolnosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Byly sledovány parametry betonu jako jsou zpracovatelnost čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu, objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku, mrazuvzdornost a odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek. Dále byl také sledován vliv způsobu ošetřování a úpravy povrchu zkušebních těles na výsledky těchto zkoušek.

TEORETICKÁ ČÁST

1 BETON

Beton je tzv. kompozitní materiál složený z různě velikých zrn kameniva, zrn nezhydratovaného cementu, cementového gelu a vzduchových pórů. Složky betonu se dají rozdělit na pojivovou část, která je nejčastěji tvořena cementem a na část plniva, která zahrnuje různě velká zrna kameniva jako je štěrk, písek, nebo například cihelný nebo betonový recyklát [2].

Tento materiál je charakteristický zejména svou velmi dobrou pevností v tlaku. Nicméně například v případě pevnosti v prostém tahu nebo pevnosti v tahu za ohybu vykazuje pouze zlomek hodnoty svých tlakových pevností. Z tohoto důvodu je nutné beton kombinovat s ostatními materiály, které mu pomohou tento nedostatek překonat. Nejčastěji se používá betonářská nebo předpjatá ocelová výztuž, ale existují i příklady použití různých druhů vláken [1].

Z toho důvodu, aby byla zabezpečena dostatečná kvalita, odolnost, bezpečnost a také životnost betonových stavebních konstrukcí, a aby beton splňoval všechny na něj kladené nároky, byla vytvořena řada normativních a doporučujících požadavků a norem [1].

V České republice je základní normou pro navrhování betonu evropská norma ČSN EN 206+A2, která specifikuje například požadavky pro složení betonu, vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu, postupy řízení výroby a hodnocení shody [3].

2 DRUHY PROSTŘEDÍ

Norma [3] charakterizuje různá prostředí, která působí na betonové konstrukce, které se v nich nachází. Všechna tato prostředí mají společné to, že působí negativně na beton a betonové konstrukce a v čase způsobují zhoršování vlastností tohoto materiálu [3].

Existuje celkem 6 různých druhů prostředí:

- X0 – prostředí bez rizika poškození;
- XC – prostředí způsobující korozi karbonatací;
- XD – prostředí způsobující korozi chloridy, ne však z mořské vody;
- XS – prostředí způsobující korozi chloridy z mořské vody;
- XF – prostředí způsobující poškození betonu střídavým působením mrazu a rozmrzání;
- XA – prostředí způsobující poškození betonu chemickým napadením. [3]

Norma ČSN P 73 2404 uvádí kromě již zmíněných prostředí navíc i prostředí:

- XM – prostředí způsobující poškození betonu pohyblivým mechanickým zatížením (obrusem).

3 STUPEŇ VLIVU PROSTŘEDÍ XC

V tomto prostředí je beton vystaven působení vlhkosti a CO_2 z okolního vzduchu. Podle množství obsažené vlhkosti se rozděluje prostředí XC na 4 třídy (XC1-XC4). Množství CO_2 ve vzduchu je asi 0,03 %, ale v místech s koncentrovaným průmyslem může tento podíl násobně vzrůst. Beton je tímto CO_2 ze vzduchu za přítomnosti vlhkosti napadán a dochází k tzv. karbonataci betonu. Hlavním negativním vlivem karbonatace je snižování pH betonu. Pokud dojde k poklesu pH až po určité mezní hodnotu, tak může začít korodovat betonářská ocel, která byla do té chvíle před touto korozí chráněna právě dostatečně vysokou alkalitou okolního cementového kamene. Pokračující koroze výztuže může poté vést až ke kolapsu betonové konstrukce [2].

4 STUPEŇ VLIVU PROSTŘEDÍ XF

Prostředí XF je charakterizováno jako prostředí, ve kterém je beton po dobu své životnosti vystaven působení vlhkosti, mrazu a cyklickému střídání kladných a záporných teplot. V některých případech se ještě navíc uvažuje přítomnost tzv. chemických rozmrazovacích látek [3].

Norma [3] rozděluje prostředí XF celkem na 4 třídy (XF1 – XF4) podle míry nasycení betonu vodou a přítomnosti chemických rozmrazovacích látek. Sudé číslice označují prostředí s přítomností chemických rozmrazovacích látek [3].

5 MRAZOVÉ PORUŠENÍ BETONU

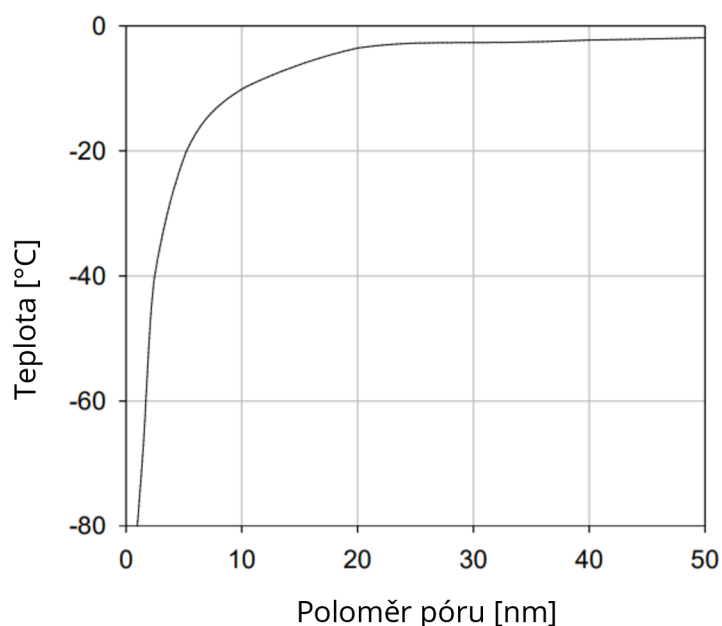
Používání betonu jako hlavního konstrukčního materiálu pro stavební konstrukce hraje důležitou roli v rozvoji světové ekonomiky, hospodářství, obchodu, přepravy a mnoha dalších činností člověka. I z tohoto důvodu je tedy na tyto konstrukce, a tím i na materiály, ze kterých jsou postaveny, kladeny vysoké nároky na kvalitu, spolehlivost, odolnost a také životnost.

Betonové konstrukce a samotný beton, stejně jako i některé jiné materiály, postupně zhoršují své vlastnosti vlivem okolního prostředí, ve kterém se vyskytují a které na něj negativně působí. V případě betonu je to zejména působení mrazu, chemických rozmrazovacích látek nebo karbonatace vlivem oxidu uhličitého [4].

U všech těchto faktorů zhoršování stavu hraje klíčovou roli vlhkost, která ovlivňuje prakticky všechny fyzikální a mechanické procesy uvnitř materiálu. Problém působení vlhkosti na beton je významný hlavně v chladných a vlhkých oblastech, kde se může na povrchu betonu vyskytovat kapalná voda a v materiálu se v důsledku změny okolní teploty vytváří teplotní gradient, který urychluje transport vody do materiálu [4].

Existují dva hlavní negativní účinky mrazového poškození na beton. Tím prvním je povrchové poškození, které vzniká v povrchové vrstvě betonu nejčastěji za působení roztoků soli, například u cementobetonových krytů pozemních komunikací. Jeho vlivem může docházet k nechtěným estetickým změnám, zhoršením kvality povrchu, snížení životnosti nebo rychlejší korozi výztuže uvnitř betonových konstrukcí. Vyjadřuje se jako hmotnost odloučeného betonové materiálu z jeho povrchu, tzv. odpad neboli scaling [5].

Dalším účinkem působení mrazu na beton je porušení vnitřní struktury betonu. Vnitřní struktura cementového kamene je tvořena soustavou pórů, které mohou být částečně, nebo zcela nasyceny vodou. Póry, které v cementovém kameni vznikají po odpaření přebytečné vody, se nazývají kapilární póry. Dále se zde nachází gelové póry, které jsou tak malé, že voda uvnitř těchto pórů nemůže při běžných teplotách zmrznout a přeměnit se v led. Teplota bodu tuhnutí kapaliny je ovlivněna velikostí pórů, ve kterých se nachází. Platí, že s klesající velikostí pórů klesá také teplota tohoto bodu, viz obrázek 1. Voda v kapilárních pórech při zmrznutí zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %. Ke zmrznutí vody v kapilárách dochází nejdříve při teplotách okolo $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v závislosti na jejich velikosti. Voda vyskytující se v gelových pórech přechází v led až při mnohem nižších teplotách okolo $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$. V důsledku nárůstu objemu při vzniku ledu dochází k vnitřním tlakům, které způsobují v některých částech betonu s vysokým stupněm nasycení zhoršení fyzikálně mechanických vlastností betonu, projevující se zejména poklesem pevnosti v tahu za ohybu nebo poklesem hodnoty modulu pružnosti [5] [21].



Obrázek 1: Závislost mezi velikostí pórů a teplotou zmrznutí vody [21]

V rámci výzkumu betonu bylo vypracováno mnoho teorií popisující způsoby porušení betonu mrazem. Mezi nejvýznamnější patří například teorie hydraulického tlaku, teorie porušení tlakem od rozpínání ledu při tání, teorie zabývající se tlakem rostoucího ledu nebo koncepce popisující kritický stupeň nasycení [5] [6].

5.1 TEORIE HYDRAULICKÉHO TLAKU

Tato teorie předpokládá, že když dojde ke zmrznutí vody v kapilárních pórech, dojde k nárůstu jejího objemu asi o 9 %. Následkem toho je přebytečná nezmrzlá voda z těchto pórů vytlačována do nejbližších prostor betonu vyplněných vzduchem. Rychlost tvorby ledu je obvykle poměrně nízká, ale v důsledku jeho tvorby je nízká i rychlost propustnosti cementové matrice. Při vysokém stupni nasycení betonu je jedinou možností pro vytlačovanou vodu unikat přes úzký systém gelových pórů, ve kterých voda při běžných teplotách nikdy nezamrzá. Tím, jak transport vody probíhá přes úzký a částečně ledem zaplněný pórový systém, je na stěny pórů vytvářen tlak, který když překročí pevnost v tahu cementového kamene, dojde k jeho porušení [6].

5.2 ROZPÍNÁNÍ LEDU PŘI TÁNÍ

Porušení vnitřní struktury betonu rozpínáním ledu při zvyšování teploty je způsobeno rozdílným součinitelem teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost cementové matrice je asi $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, zatímco teplotní roztažnost cementové matrice obsahující led dosahuje až hodnoty kolem $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. To znamená, že se led během tání rozpíná více než cementová matrice, a tím na ni vytváří tlak [6].

5.3 TLAK ROSTOUCÍHO LEDU

V určitém časovém okamžiku v pórovém systému betonu koexistuje voda v několika fázích. Vyskytuje se zde ve formě ledových krystalků zcela vyplňujících větší kapiláry, dále jako led ve vzduchových pórech a také jako nezmrzlá voda v gelových pórech. Během snižování teploty se mění volná energie vody. Tato volná energie je u ledu bez napětí nižší než u nezmrzlé vody, tím se systém dostává do nerovnovážného stavu. Aby se rovnováha obnovila, voda začne proudit z povrchu směrem ke kapilárám a k ledu ve vzduchových pórech. Voda se zde mění na led, který tím zvětšuje svůj objem a působí tlakem na stěny pórů. Přenos vody se zastaví až ve chvíli, kdy je tlak ledu natolik vysoký, že se opět obnoví rovnováha mezi volnou energií ledu a vody. Než tento stav nastane, může ovšem dojít k porušení pórové struktury betonu. K poškození může dojít zejména v případech, kdy beton může během procesu zamrzání přijímat další vodu do své pórové struktury [6].

5.4 KRITICKÝ STUPEŇ NASYCENÍ

Stupeň nasycení betonu vodou je poměr objemu vodou nasycených pórů k celkovému objemu pórů v betonu. Jako kritický stupeň nasycení se poté označuje hodnota stupně nasycení asi 86-87 %. Některé výzkumy prokázaly, že betony se stupněm nasycení vyšším, než je kritická hodnota, vykazovaly během cyklů zmrazování a rozmrazování výraznější poškození a pokles modulů pružnosti [20].

Naopak u betonů se stupněm nasycení pod touto kritickou hodnotou nedocházelo následkem cyklického zmrazování a rozmrazování k významnému zhoršení těchto vlastností [20].

5.5 ODLUPOVÁNÍ

Nejčastější poškození ztvrdlého betonu vlivem působení mrazu a cyklického zmrazování a rozmrazování je formou povrchového odlupování. Odlupování je úbytek vrstvy cementové malty z povrchu betonu, který se většinou pohybuje v tloušťkách pod 1 mm, nicméně opakované cykly zmrazování a rozmrazování často vedou k odlupování dalšího materiálu. Průběh tohoto procesu výrazně urychluje zejména přítomnost chemických rozmrazovacích látek. Chemické rozmrazovací látky jsou roztoky solí, které se nejčastěji používají k ošetřování povrchů betonových ploch, zejména cementobetonových krytů dopravních komunikací v zimním období. Tyto látky snižují teplotu, při které voda přechází z kapalného stavu do pevného a vytváří led, a tím zabraňují hromadění ledu na povrchu těchto konstrukcí [7] [8].

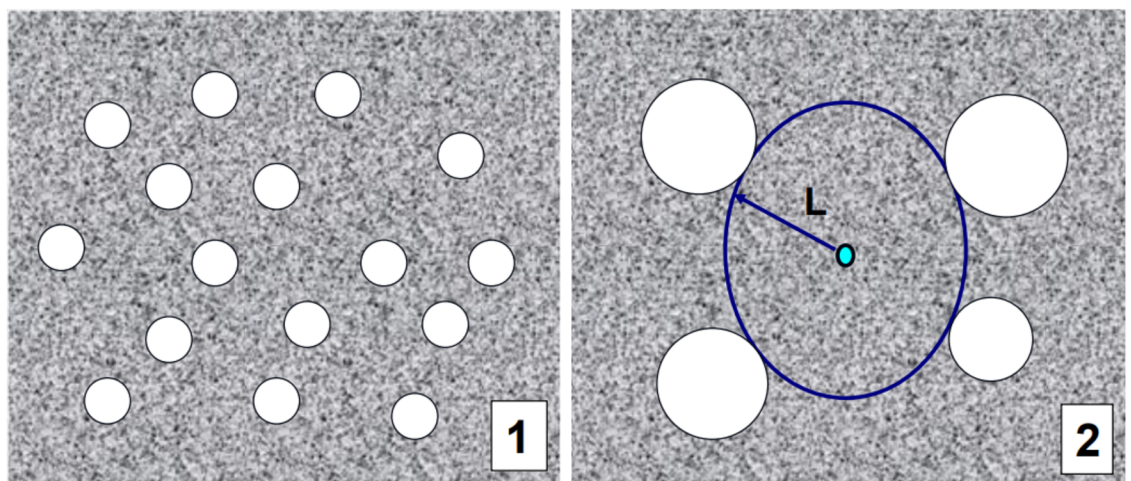
Rozpuštěné soli pronikají s vodou do pórového systému, kde mohou vytvářet osmotický tlak způsobený kolísáním jejich koncentrace a dále také krystalizační tlak vyvolaný krystalizací přesycených roztoků soli v pórech. Tento krystalizační tlak může dosáhnout velikosti až 16 MPa, což je násobně vyšší hodnota, než jaká je velikost pevnosti v tahu cementové matrice betonu, a tak způsobit její porušení [7] [27].

6 OPATŘENÍ PRO ZLEPŠENÍ MRAZUVZDORNOST BETONU

Odolnost betonu proti poškození v důsledku cyklického střídání zmrazování a rozmrazování lze zlepšit například pomocí provzdušňujících přísad, které v betonu záměrně vytváří póry menší než 300 μm . Během rozpínání ledu při mrznutí vody je zbývající kapalná voda vytlačována z pórů a nucena unikat do okolních volných prostor pórového systému. Díky provzdušnění se tato voda může přesunout do volných velmi jemných pórů a tím snížit tlak, kterým by působila na beton [7] [8].

Aby bylo dosaženo maximální účinnosti provzdušnění, musí být tyto vzduchové póry rovnoměrně distribuovány v celé cementové matici. Toto jejich rozložení je charakterizováno pomocí mezní vzdálenosti mezi jednotlivými póry, která se nazývá spacing factor. Spacing factor je definován jako maximální vzdálenost jakéhokoliv bodu v cementové matici od nejbližšího póru a představuje vzdálenost, kterou voda musí urazit při jejím vytlačení z pórů následkem rostoucího objemu ledu do okolního nejbližšího prostoru vyplněného vzduchem. Zvětšování této vzdálenosti vede ke zhoršení odolnosti betonu proti mrazu. Maximální hodnota této mezní vzdálenosti pro zajištění dobré odolnosti je přibližně 0,2 mm [7] [8].

Obecně lze říct, že menší blízko od sebe distribuované póry, viz obr. 2.1 jsou z pohledu zlepšení mrazuvzdornosti účinnější, než větší a více od sebe vzdálené póry, viz obr.2.2 [7] [8].



Obrázek 2: Vzduchové póry s rozdílnou velikostí spacing factoru L [21]

Velký vliv na mrazuvzdornost betonu má také velikost vodního součinitele W . Jedná se o poměr účinné hmotnosti vody vztahovaný k hmotnosti cementu nebo cementu a jemných částic. Obecně lze říct, že betony s nižším vodním součinitelem vykazují vyšší odolnost proti působení mrazového namáhání. Hodnota vodního součinitele by se měla pohybovat pod 0,5. [9].

Mezi další vlastnost betonu ovlivňující jeho mrazuvzdornost je jeho stáří. Beton získává svoji pevnost díky hydrataci cementu a následnému vzniku calciumhydrosilikátů. Se zvyšujícím se stářím betonu dochází ke zvětšování jeho pevnosti, díky které je mimo jiné schopen lépe odolávat vnitřním tlakům od rostoucího ledu a roztoků solí během cyklického zmrazování a rozmrazování [7].

Beton je tedy velmi náchylný na mrazové poškození, zejména v rané fázi své životnosti krátce po uložení a zatuhnutí. V tomto období beton obsahuje velké množství vody, která by mohla zmrznout a zvětšit svůj objem. Beton také v tomto období nevykazuje dostatečnou velikost pevnosti v tahu, kterou by těmto změnám objemu odolával. Pokud dojde ke zmrznutí vody v čerstvém betonu, vytvoří se ledové krystalky přibližně rovnoběžné s povrchem, který je vystavený mrazu. Další ledové krystalky se mohou vytvořit pod hrubým kamenivem. Když beton rozmrzne a hydratace pokračuje, v prostoru, který zaujímají ledové krystalky se vytvoří plochy, které jsou náchylné k odlupování. [7] [8].

Z těchto důvodů by měl být beton chráněn před předčasným zmrznutím a měly by být zajištěny vhodné podmínky pro probíhající hydrataci, jako je vhodná teplota a dostatečná vlhkost. Doporučená minimální pevnost betonu v tlaku, které by mělo být dosaženo, než teplota betonu klesne pod bod mrazu, je přibližně 3,5 MPa. Betony s pevností nad touto hodnotou už mají dostatečnou odolnost proti působení vnitřních tlaků od rozpínajícího se ledu, a tak u těchto betonů nedojde po zmrznutí vody uvnitř pórů ke zhoršení jejich mechanických vlastností [7] [8].

7 ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI A ODOLNOSTI BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHRL

7.1 ČESKÁ REPUBLIKA

7.1.1 ČSN 73 1322 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

V České republice probíhá zkoušení mrazuvzdornosti betonu především podle normy ČSN 73 1322, která vznikla v roce 1968. Jedná se o zkoušku, ve které jsou zkušební tělesa vystavena cyklickému střídání zmrazování a rozmrazování na požadovaný počet cyklů. Zkušebními vzorky jsou betonové hranoly o velikosti 100 x 100 x 400 mm [10].

Původně se vytvořené vzorky ukládaly do vlhkého prostředí a poté do vodního uložení. Doby uložení v jednotlivých prostředích závisely na druhu použitého cementu. V roce 2003 byla vydána změna normy, která předepsaný způsob uložení vzorků změnila. V současnosti se vzorky po odformování ukládají pouze do vodního uložení [10].

Počet vzorků pro zkoušku se stanovuje dle počtu prováděných zmrazovacích cyklů a podle počtu mezilehlých kontrol. Norma uvádí, že pro jeden cyklus zmrazování a rozmrazování je nutné vyrobit 1 sadu zkušebních těles zmrazovaných a jednu sadu, která se nezmrazuje, ale slouží pro porovnání. Jedna sada je tvořena nejméně 3 kusy vzorků. Počet zkušebních cyklů je 25, 50, 100 a 150 [10].

Během každého zkušebního cyklu dochází po dobu 4 hodin ke zmrazování vzorků na vzduchu při teplotě - 20 °C a poté po dobu 2 hodin k rozmrazování ve vodním prostředí o teplotě + 20 °C. Po ukončení každé etapy se vždy u jedné sady vzorků zmrazovaných a nezmrazovaných zjišťuje jejich hmotnost a zkouší se jejich pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na zlomcích trámů [10].

Výstupem této zkoušky je součinitel mrazuvzdornosti, který se určí jako poměr průměrné pevnosti v tahu za ohybu vzorků zmrazovaných ku průměrné pevnosti v tahu za ohybu vzorků nezmrazovaných, dále se také ještě uvádí zjištěné úbytky hmotnosti zmrazovaných trámců v % hmotnosti. V případě že tyto úbytky přesahují velikost 5 %, tak se zkouška mrazuvzdornosti ukončí.[10].

Norma uvádí, že beton je mrazuvzdorný na počet cyklů, během kterých nedojde ke snížení součinitele mrazuvzdornosti betonu pod 75 % [10].

Vedle součinitele mrazuvzdornosti se u této zkoušky také někdy sledují změny objemových hmotností vzorků nebo parametry zjištěné pomocí nedestruktivních metod [10].

7.1.2 ČSN 73 1380 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ

Další metodou používanou v České republice pro zjištění mrazuvzdornosti betonu je metoda dle normy ČSN 73 1380, která byla vydána dle evropského dokumentu CEN/TR 15177 v roce 2007. Norma popisuje celkem 3 možné postupy zkoušení: zkoušku na trámci, zkoušku na desce a zkoušku CIF. Všechny tyto typy zkoušek jsou založené na nedestruktivním zkoušení, při kterém je zjišťována změna relativního dynamického modulu pružnosti pomocí měření doby průchodu ultrazvukových impulsů, nebo měření vlastní příčné frekvence vzorků betonu, které byly vystaveny cyklickému zmrazování a rozmrazování [24] [25].

Nejvíce slibnou metodou se jeví zkouška na trámci, protože je na rozdíl od ostatních dvou metod snadněji proveditelná, a navíc se velmi podobá původnímu zkušebnímu postupu dle normy ČSN 73 1322. Jako zkušební tělesa se stejně jako u normy ČSN 73 1322 používají trámce o velikosti 100 x 100 x 400 mm, které se vystavují cyklickému zmrazování a rozmrazování. Jeden cyklus trvá celkem 12 hodin, což je možné brát jako nevýhodu ve srovnání s normou ČSN 73 1322, kde jeden cyklus zabere pouze 6 hodin, a tudíž celková doba zkoušení je o polovinu kratší [24] [25].

Samotné zkoušení se provádí po n provedených cyklech, kdy se pomocí nedestruktivního měření určí již zmíněný relativní dynamický modul pružnosti, dále také průměrná hodnota a výsledná směrodatná odchylka. Vedle těchto hodnot se také někdy udává hodnota tzv. absorpce vody, která se zjišťuje z rozdílů hmotností vzorků před a po provedení n zmrazovacích cyklů. Oproti normě ČSN 73 1322 tato metoda nemá kritérium pro hodnocení mrazuvzdornosti betonu a neprobíhá u ní žádné destruktivní zkoušení [24] [25].

7.1.3 STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU CEMENTOVÉHO BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK

Tato zkouška, která byla zamýšlena pro testování betonů pro kryty vozovek, je založena na vystavení zkušebních vzorků roztoku 3% NaCl při cyklickém střídání kladných a záporných teplot [11].

Zkušebními vzorky mohou být krychle o hraně 150 mm, válce o průměru 150 mm, nebo je možné použít i hranoly o velikosti 40 x 40 x 160 mm v případě zkoušení jemnozrnných betonů [12].

Norma uvádí, že v případě nově vyrobených těles se mají použít minimálně tři vzorky, v případě těles odebraných z konstrukce je to minimálně jeden neporušený vzorek. Vyrobená zkušební tělesa se po vyjmutí z forem ponechávají ve vodním prostředí do uplynutí 28 dnů od výroby vzorků [12][13].

Podle průběhu a způsobu zkoušení se tato metoda dělí na 2 druhy. První je tzv. metoda automatického cyklování, při které jsou vzorky vystaveny automatickému střídání kladných a záporných teplot a setrvání po určitou dobu na mezních hodnotách. Druhým způsobem zkoušení je tzv. metoda ruční manipulace. Na rozdíl od předcházející metody zde nedochází k automatickému opakování cyklů. Každý cyklus spočívá v nanášení chemické rozmrazovací látky na předepsanou vrstvu zmrzlé vody nutné k jejímu rozpuštění. Nakonec po daném časovém intervalu působení CHRL se povrch vzorku omyje vodou [12].

7.1.3.1 METODA AUTOMATICKÉHO CYKLOVÁNÍ A

Při této metodě jsou vzorky nasáklé vodou umísťovány do misek, do kterých se poté naleje takové množství 3% roztoku NaCl, aby se vytvořila hladina ve výšce (5 ± 1) mm od dna misky. Nádoby se vzorky se poté rozmístí na dno zkušební přístroje a vzniklý prostor se vyplní vodou, která zajišťuje tepelnou výměnu mezi prostředím a vzorky [12] [14].

Pro zkoušku je nutné používat zařízení umožňující automatické cyklování zmrazování a rozmrazování. To je zabezpečeno chladícím a ohřívacím zařízením umístěným pod prostorem, kde jsou umístěné vzorky [12].

Každý cyklus se skládá z ochlazení zkušební plochy vzorků na teplotu -15 °C, následné výdrže 15 minut na této teplotě, ohřevu zkušební plochy na $+20$ °C a opětovné výdrže 15 minut [12].

Po každých 25 cyklech se ze zkoušených ploch vzorků odstraňuje odloupený materiál a zjišťuje se jeho hmotnost. Zkouška se vyhodnocuje jako celkové množství odpadu vztažené na plochu zkoušeného povrchu ρ_a po daném počtu cyklů, nebo lze provést i vizuální hodnocení. Zkušební povrch vzorku je uvažován jako ta plocha tělesa, která je po dobu zkoušky pod hladinou 3% roztoku NaCl [12].

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A}$$

Kde je:

ρ_a hmotnost odpadu na jednotku plochy [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$];

$\sum m$ součet všech odpadů od prvního do posledního cyklu [g];

A plocha zkoušeného povrchu tělesa, s přesností na 1 % [m^2].

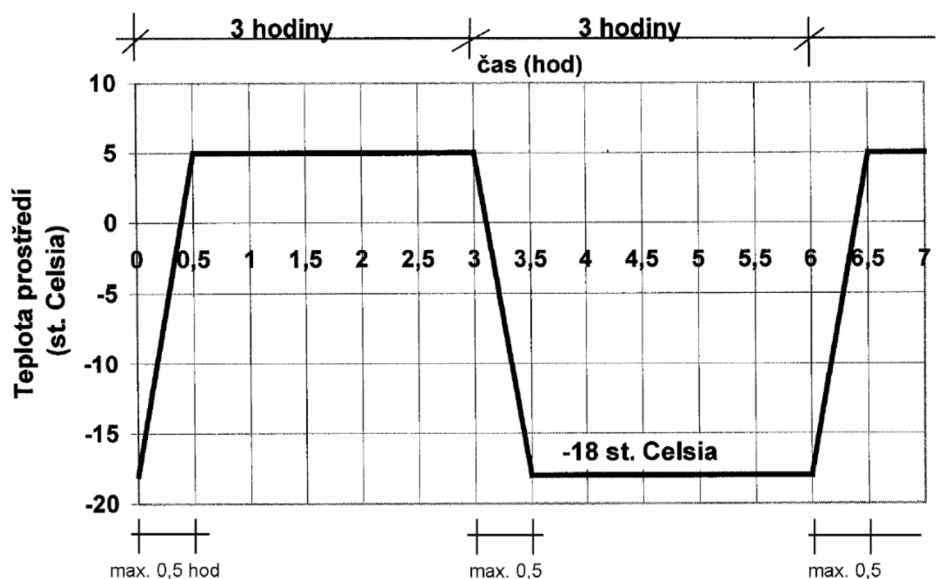
7.1.3.2 METODA AUTOMATICKÉHO CYKLOVÁNÍ C

V roce 2003 byla k původní normě ČSN 73 1326 publikována změna s názvem Z1, která zavedla novou zkoušku využívající obdobně jako metoda A automatické cyklování zmrazování a rozmrazování [13] [14].

Pro tento typ zkoušky norma doporučuje zkoušení 50 mm vysokých odřezů zkušební tělesa tvaru válce o průměru 150 mm připraveného z čerstvého betonu, nebo vývrtem z konstrukce [13].

Nejvíce zřetelným rozdílem mezi metodou C a metodou A je způsob přípravy tělesa a umístění zkušebního roztoku vzhledem ke vzorku. Zkušební roztok se u této metody umísťuje do vymezeného prostoru kolem horní plochy válce, který se vytvoří pomocí vodotěsné polymerní objímky a lepidla [13].

Následné cyklování probíhá velmi podobně jako u metody A. Jeden zkušební cyklus je dlouhý celkem 6 hodin. Jeho průběh je znázorněn na obrázku 3.



Obrázek 3: Teplotní cyklus metody C [13]

Obdobně jako u metody A se po ukončení každých 25 cyklů zjišťuje množství odloupeného materiálu ze zkušební plochy vzorku [13].

Obě metody ČSN 73 1326 A i C se vyznačují mnoha problémy. Jedním z nich je například nedostatečně přesná formulace zkušebních postupů způsobující drobné odchylky při provádění těchto zkoušek v různých laboratořích nebo různými pracovníky [11].

Jedním z největších úskalí metody A je kvalita a způsob úpravy povrchové vrstvy zkušebních těles. V článku [11] je zmíněn problém nestejně doby zhutňování, který se může projevovat segregací kameniva od cementového tmele, a tím ovlivňovat kvalitu povrchové vrstvy a výslednou velikost odpadů. Norma také blíže nespecifikuje, zda má být k přípravě roztoku použita voda pitná, nebo voda destilovaná [11].

Při vyhodnocování zkoušky se přepočítává celkového množství odpadu ze zkoušeného povrchu na 1 m², k tomu je nutné znát celkovou plochu, která je během cyklování ve styku s roztokem. Vypočítaná velikost této plochy se ale může velmi lišit oproti realitě. Tento rozdíl může být způsoben zejména kolísáním výšky roztoku podél hran vzorku (vypařováním nebo vzlínáním) [11].

Při porovnání výsledků u vzorků ze stejných betonů zkoušených podle obou metod často vychází u metody A vyšší hodnoty celkových odpadů. To je pravděpodobně způsobováno tzv. hranovým efektem. U metody A jsou totiž z důvodu umístění roztoku na dno zkušební nádoby kolem zkoušených krychlí namáhány nejenom plochy vzorku, ale i hrany mezi těmito plochami. Z těchto hran se poté uvolňuje větší množství odpadu, než je tomu v případě, že jsou namáhány pouze celé plochy vzorků, jak je tomu v případě metody C [11] [14].

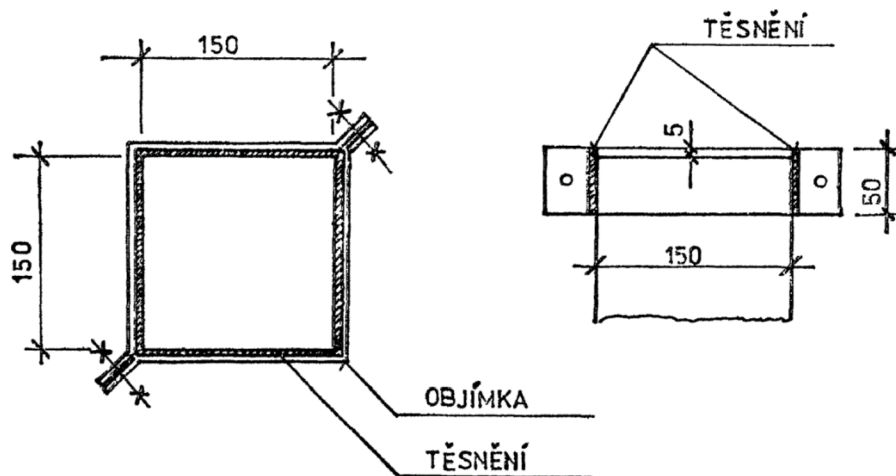
Pro zlepšení těchto metod by bylo vhodné přesněji formulovat některé zkušební postupy, například způsob uložení a ošetřování zkušebních vzorků. Dále by také bylo dobré přesně definovat, zda použít pro výrobu zkušebního roztoku vodu destilovanou nebo z vodovodního řadu [11] [14].

Nebo také blíže specifikovat parametry použité soli. Omezení vlivu hranového efektu u metody A by bylo možné aplikací nátěru kolem bočních ploch zkušebních vzorků, který by zamezil kontaktu zkušebního roztoku s těmito plochami. Roztok by poté působil pouze na 1 plochu vzorku podobně jako u metody C [11] [14].

7.1.3.3 METODA B RUČNÍ MANIPULACE SE VZORKY

V dnešní době se tato zkouška z důvodů své velké pracnosti už téměř nepoužívá. Kolem zkoušeného povrchu tělesa je nutné pomocí těsnění vytvořit prostor, kam se před prvním cyklem nalije voda do výšky 2 mm. Následně se tělesa v prvním cyklu zmrazují po dobu 16 hodin a poté rozmrazují pomocí rozmrazovacího prostředku NaCl po dobu 1 hodiny. Následující cykly mají být složené z 5 hodin zmrazování, 1 hodiny rozmrazování a 30 minut omývání vodou pro odstranění rozmrazovací látky [12].

Vyhodnocení zkoušky probíhá v podobě slovního hodnocení porušení povrchu zkoušených těles, popřípadě je možné zjistit i množství uvolněných částic [12].



Obrázek 4: Schéma těsnění vytvářející vodotěsný prostor nad horním povrchem zkušební krychle [12]

7.1.4 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU ZKRÁCENÝMI ZKOUŠKAMI

Norma ČSN 73 1325, která byla zrušena v roce 2003, umožňovala pomocí zkrácených zkoušek stanovit mrazuvzdornost vzorků pomocí zjištění nasákavosti betonu během 24 hodin nebo pomocí střídavého zmrazování a rozmrazování. V případě měření nasákavosti byly vzorky po vysušení na ustálenou hmotnost opakovaně ponořovány do vody na normou stanovenou dobu, po vyndání z vody osušeny a zváženy. Po každém opakování se doba ponoření zvyšovala [15].

Mrazuvzdornost byla poté stanovena na základě vypočtených hodnot nasákavosti N_i pro každou dobu ponoření [15].

Při vyhodnocení mrazuvzdornosti střídavým zmrazováním a rozmrazováním byl výsledkem zkoušky podobně jako u normy ČSN 73 1322 součinitel mrazuvzdornosti zjištěný pomocí porovnání průměrných pevností v tahu za ohybu u vzorků zmrazovaných a nezmrazovaných. Na rozdíl od jiných norem zde byla délka trvání jednoho cyklu stanovena jako doba nezbytně nutná pro to, aby jádro zkušebního tělesa dosáhlo při zmrazování teploty -5 °C a při rozmrazování $+4\text{ °C}$ [15].

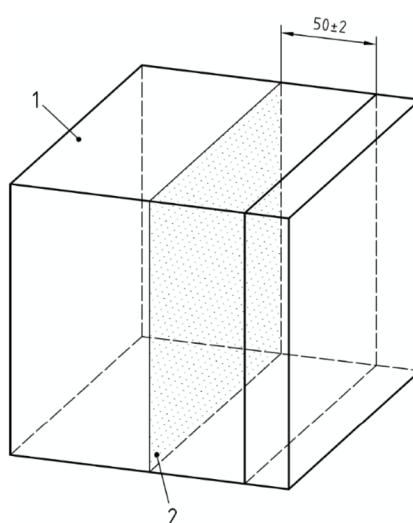
7.1.5 ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ ODLUPOVÁNÍ

ČSN P CEN/TS 12390-9 je předběžná norma evropské technické specifikace CEN/TS 12390-9 schválená v roce 2005 pro předběžné použití. Byl u ní předpoklad, že nahradí stávající českou normu ČSN 73 1326, nicméně se to z důvodů její časové a finanční náročnosti zatím nestalo [14].

V normě jsou uvedené celkem tři možnosti zkoušení. Referenčním zkušebním postupem je zkouška na desce, alternativní postupy jsou metoda krychlí a metoda CF/CDF [16].

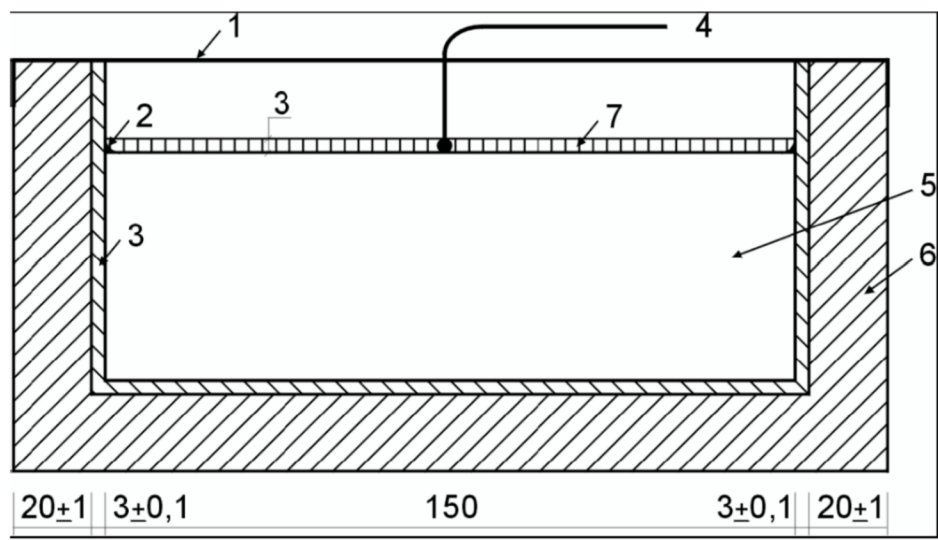
7.1.5.1 ZKOUŠKA NA DESCE (REFERENČNÍ METODA)

Pro tuto metodu, která se také někdy nazývá Slab test, se používají zkušební tělesa ve tvaru krychlí o hraně 150 mm. Na rozdíl od normy ČSN 73 1326 jsou krychle během uložení ve formách chráněny proti vysoušení pomocí polyethylenové fólie. Z krychlí se poté vytvoří zkušební desky dvěma řezy vedenými kolmo k hornímu povrchu krychle, viz obrázek 5. Vznikne tak těleso o tloušťce 50 mm a hranách 150 mm, z každé krychle jeden kus. Pro provedení zkoušky jsou potřeba minimálně 4 vzorky [16].



Obrázek 5: Vznik zkušebního tělesa z krychle [16]

28 dní po vytvoření vzorků probíhá po dobu 72 hodin nasycování zkoušeného povrchu pomocí demineralizované vody. Následně se aplikuje zkušební roztok, který se podobně jako u metody C podle normy ČSN 73 1326 nanáší do vymezeného prostoru vytvořeného kolem horního povrchu vzorku. V tomto případě norma přímo uvádí dané množství roztoku na 67 ml, aby byla výsledná výška hladiny roztoku 3 mm. Na rozdíl od předešlých metod se v tomto případě z důvodu zamezení odpařování roztoku během zkoušení nad vzorky umísťuje polyethylenová fólie. Před zahájením zkoušení se ještě zkušební tělesa tepelně zaizolují například pomocí polystyrenu [16].



Obrázek 6: Schéma sestavení při zkoušce zmrazování a rozmrazování [16]

Legenda:

- 1 - Polyethylenová fólie, 2 - Proužek lepidla, 3 - Gumové těsnění, 4 - Zařízení pro měření teploty, 5 - Zkušební těleso, 6 - Tepelná izolace, 7 - Zmrazovací roztok

Vzorky jsou namáhány cyklickým zmrazováním a rozmrazováním, teplota se pohybuje v rozmezí kolem +20 °C až -20 °C. Jeden cyklus je dlouhý celkem 24 hodin. Odloupený materiál se z povrchu oplachuje do mísy po 7, 14, 28, 42 a 56 cyklech pomocí vodního proudu a kartáče [16].

Výsledek zkoušky se vyjadřuje jako velikost hmotnosti odloupeného materiálu v gramech S_n vztaženého na plochu zkoušené desky po n cyklech zmrazování a rozmrazování [16].

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3$$

Kde je:

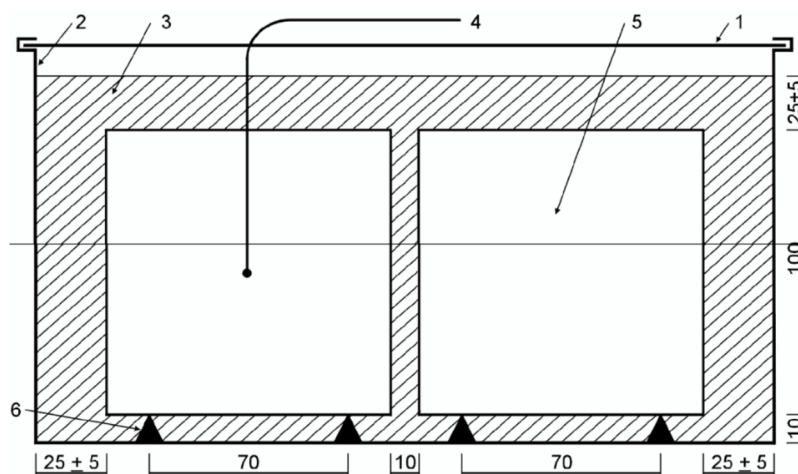
- S_n hmotnost odloupeného materiálu po provedení n cyklů [kg/m²];
- $m_{s,n}$ hmotnost odloupeného materiálu po vysušení po n cyklech s přesností na 0,1 g;
- A celková plocha zkoušeného povrchu vzorku s přesností na 100 mm² [16].

7.1.5.2 ZKOUŠKA NA KRYCHLI (ALTERNATIVNÍ METODA)

ČSN P CEN/TS 12390-9 umožňuje provádět vedle referenčního postupu i další dvě alternativní metody. První z nich je tzv. zkouška na krychli. Používají se krychle o hraně 100 mm, které jsou po vyrobení stejně jako u referenční metody chráněny ve formách po dobu 24 hodin pomocí polyethylenové fólie. 27 dní po namíchání se krychle umísťují do zkušebních nádob. Do jedné nádoby se umísťují vždy dva vzorky tak, že ta strana krychle, která nebyla ve styku s formou směřuje dolů směrem ke dnu nádoby [16].

Rozdílem mezi touto metodou a metodou A normy ČSN 73 1326 je, že se v tomto případě mezi zkoušeným povrchem a dnem nádoby vytvoří mezera pomocí podpěr o výšce 10 mm. Rozdílný je také způsob měření teploty. Například u metody A se teplota zkušební plochy registruje jako teplota roztoku na dně zkušební nádoby, v případě metody zkoušky na krychli se teplota měří uprostřed jedné z dvojice krychlí v nádobě. Norma požaduje, aby teplota uprostřed krychlí odpovídala předepsanému rozmezí závislosti teploty na čase. Zároveň se požaduje, aby teplota v zmrazovací komoře nebyla nižší než $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

Používá se roztok 3% NaCl s pitnou vodou nebo pouze deionizovaná voda. Nádoba se vzorky se tímto roztokem naplní do výšky asi 25 mm nad horní plochu vzorků [16].



Obrázek 7: Schéma nádoby se zkušebními tělesy [16]

Jeden cyklus je tvořen 16 hodinami zmrazování až na -17 °C a 8 hodinami rozmrazování na teplotu $+20\text{ °C}$. Podobně jako u referenční metody se u vzorků měří po 7, 14, 28, 42 a 56 cyklech množství odpadu [16].

Na rozdíl od metody referenční se v tomto případě neuvádí přímo množství odloupeného materiálu v kg/m^2 , ale počítá se procentuální úbytek z hmotnosti P u dvou krychlí z jedné nádoby s přesností na 0,1 % [16].

$$P = \frac{m_{s,n}}{m_0} \cdot 100$$

Kde je:

P úbytek hmotnosti [%];

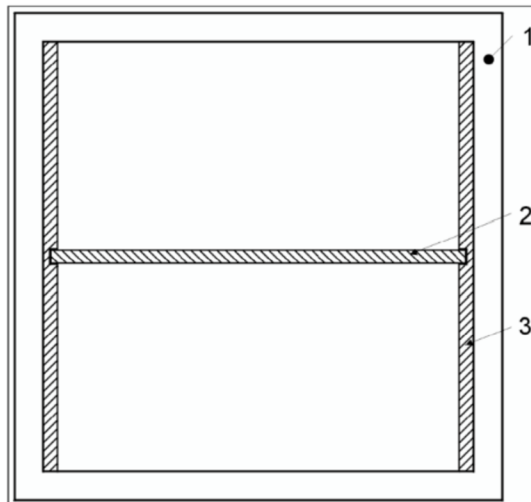
m_0 hmotnost dvou vysušených krychlí ve stáří 27 dnů [g];

$m_{s,n}$ hmotnost odloupeného materiálu po vysušení, s přesností na 0,1 g [16].

7.1.5.3 ZKOUŠKA CF/CDF (ALTERNATIVNÍ METODA)

Druhou alternativní metodou je zkouška CF/CDF. Označení CF značí, že vzorky jsou vystavovány zmrazování a rozmrazování v deionizované vodě, při označení CDF se naopak používá 3% roztok NaCl. Zkušební tělesa jsou vyráběna ve formách pro krychle o hraně 150 mm. Forma se pomocí jedné středové desky a dvou bočních desek z PTFE rozdělí na dvě poloviny, ve kterých po naplnění betonovou směsí vzniknou dva vzorky. Je požadováno, aby plochy desky z PTFE nebyly pokryty žádným odbedňovacím prostředkem. Zkoušená plocha vzorků je ta, která přiléhá k PTFE desce a má rozměry asi 140 mm x 150 mm [16].

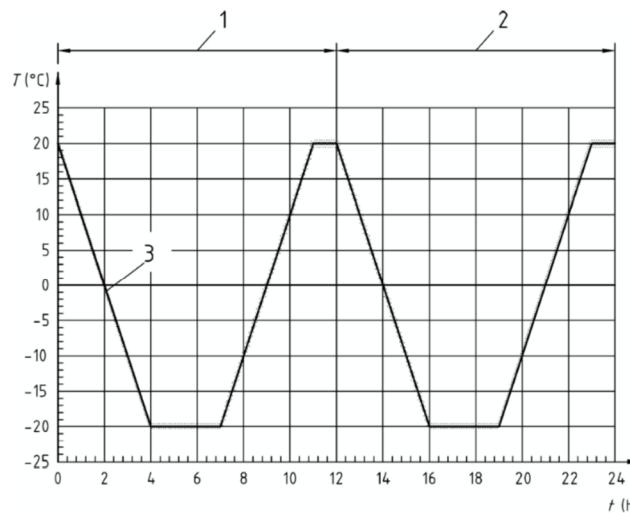
Podobně jako u minulé metody se po vyrobení zkušebního tělesa ve formách po dobu 24 hodin chrání proti vysušování polyethylenovou fólií. Poté se tělesa na 7 dní umísťují do vody a na 21 dní do klimatizované skříně. Na rozdíl od jiných metod se musí na plochy bočních stěn vzorků připevnit hliníková fólie pomocí butylové pryže nebo pomocí epoxidové pryskyřice [16].



Obrázek 8: Schéma uspořádání PTFE desek ve formě [16]

Legenda: 1 – Těleso formy, 2,3 – PTFE desky

Zkoušení začíná po uplynutí 28 dní od nasycení vzorků. Na rozdíl od Slab testu se zkušební tělesa umísťují do zkušebních nádob zkoušeným povrchem směrem dolů na 5 mm vysoké podložky a nádoba se zaplňuje zmrazovacím roztokem do výšky 10 mm. Tímto se tato zkouška podobá spíše metodě A podle normy ČSN 73 1326, u které prostor mezi vzorky a nádobami není zajištěn distančními podložkami, ale pomocí výstupků na dně nádob [16].



Legenda

- 1 Cyklus zmrazování a rozmrazování
- 2 Teplota měřená ve zvoleném bodě

Obrázek 9: Schéma teplotního cyklu zkoušky CF/CDF [16]

Hmotnosti odloupnutého materiálu se zjišťují po daném počtu cyklů dle typu zkoušky ponořením zkušební nádoby do ultrazvukové lázně, kde se 3 minuty čistí pomocí ultrazvuku. Odloupnutý materiál se následně od roztoku z ultrazvukové lázně odseparuje pomocí filtru, který se následně suší při teplotě 110 °C po dobu 24 hodin. Hmotnost odloupnutého materiálu se určí jako rozdíl hmotností vysušeného filtru se vzorkem a hmotností prázdného filtru s přesností na 0,1 g [16].

Konečným výsledkem zkoušky je stejně jako u referenční metody hmotnost odloupnutého materiálu S_n vztažený na zkoušenou plochu vzorku po n provedených cyklech v kg/m^2 . Dále se vypočítávají průměrné hodnoty a standartní odchylky naměřených výsledků po 28 cyklech v případě zkoušky CDF a 56 cyklech u zkoušky CF [16].

7.2 SLOVENSKO

Na území Slovenské republiky se mrazuvzdornost betonu posuzuje podle normy STN 73 1322 a odolnost betonu proti CHRL podle normy STN 73 1326 a podle předběžné technické normy STN P CEN/TS 12390-9.

Mezi českou normou ČSN 73 1322 a slovenskou normou STN 73 1322 je hlavní rozdíl v přísnosti posouzení mrazuvzdornosti zkoušených vzorků. U obou norem se na základě porovnání průměrných pevností v tahu za ohybu mezi zmrazovanými a nezmrazovanými vzorky vypočítá součinitel mrazuvzdornosti betonu. Podle slovenské normy je beton mrazuvzdorný na počet cyklů, během kterých neklesl součinitel mrazuvzdornosti betonu pod hodnotu 0,85, zatímco česká norma požaduje minimální hodnotu 0,75 [10] [22].

Tab. č.1: Počet zkušebních cyklů dle stupně vlivu prostředí [22]

Prostředí	Počet cyklů
XF1	25
XF2	50
XF3	100
XF4	150

Norma STN 73 1326 je velmi podobná české normě ČSN 73 1326. Hlavní rozdíl mezi nimi je, že slovenská norma požaduje, aby se na vzorky před začátkem zkoušení nanasla ochranná vrstva na všechny boční strany zkušebních vzorků do výšky alespoň 50 mm. Tato ochranná vrstva má za cíl omezit vztlínání zkušebního roztoku po stěnách vzorků a omezení vlivu tzv. hranového efektu. Při výpočtu velikosti zkušební plochy se poté započítává pouze plocha spodní strany krychle, která je v kontaktu se zkušebním roztokem [23].

7.3 NĚMECKO

V Německu se pro zjištění odolnosti betonů proti CHRL používá metoda RILEM TC 117 FDC/CDF, která je velmi podobná alternativní metodě CF/CDF předběžné technické normy CEN/TS 12390-9. Další používanou metodou je RILEM TC 176 IDC, která hodnotí vnitřní poškození betonu mrazem.

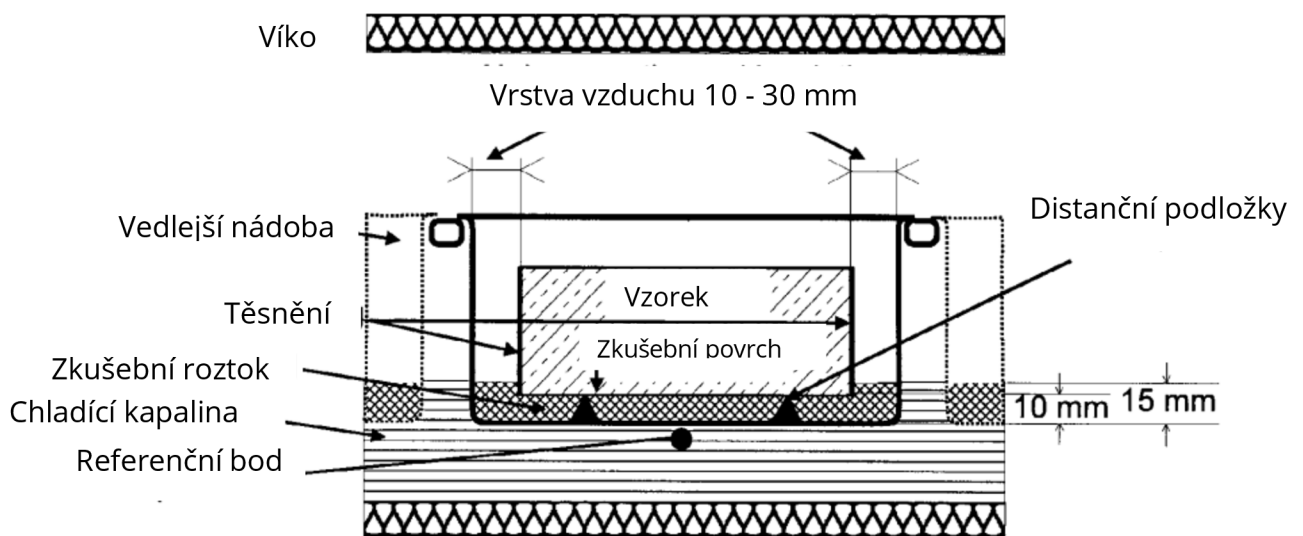
7.3.1 RILEM TC 117 FDC: CDF TEST

Podle této metody se měří množství betonového odpadu na jednotku plochy, který vzniká odloupením ze vzorků, které byly vystaveny danému počtu zmrazovacích cyklů za přítomnosti rozmrazovací soli, nejčastěji 3% roztoku chloridu sodného s demineralizovanou vodou. Zkušební vzorky se vyrábí v krychlových formách o hraně 150 mm, které se rozdělí na dvě poloviny pomocí teflonových desek. Z jedné krychle vzniknou 2 vzorky [17].

Zkušební povrchem je poté ta strana vzorku, která přiléhala k teflonové desce. Tato deska se také nesmí natírat odbedňovacím prostředkem. Norma pro jednu sérii vzorků doporučuje minimálně 5 vzorků s celkovou zkušební plochou větší než 0,08 m² [17].

Zkušební postup se skládá ze tří fází: skladování za sucha, saturace kapilárním sáním a cykly zmrazování a rozmrazování. V první fázi jsou vzorky uloženy v klimatické komoře o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %. Tato fáze trvá 21 dní. Boční plochy deskových vzorků se pokrývají hliníkovou fólií s butylovou pryží, nebo epoxidovou pryskyřicí tak, aby spodní a horní plocha vzorků zůstala volná [17].

Po uskladnění v suchu začíná fáze kapilárního sání. Vzorky se umísťují na 10 mm vysoké distanční podložky zkušební povrchem dolů do zkušebních nádob, které se naplní rozmrazovacím roztokem do výšky 15 ± 1 mm. Tímto se tato zkouška odlišuje od Slab testu, u kterého zkoušená strana vzorku směřuje směrem nahoru a podobá se tak spíše metodě A normy ČSN EN 73 1326-[17].



Obrázek 10: Schéma sestavení zkoušky RILEM TC 117 FDC [17]

Poslední fází je cyklické zmrazování a rozmrazování. Používá se 12hodinový cyklus, 4 hodiny zmrazování z + 20 °C na - 20 °C, 3 hodiny výdrže, 4 hodiny rozmrazování na teplotu + 20 °C a nakonec jedné hodiny výdrže na této teplotě [17].

Pro odstranění volných částic ze zkušební povrchu se zkušební nádoba ponoří do kapaliny v ultrazvukové lázni a podrobí se čištění po dobu 3 minut. Odstraněný materiál se zfiltruje filtračním papírem, který se po vysušení zváží s přesností na 0,01 g a zjistí se hmotnost odpadlých částic [17].

Odolnost betonu proti mrazu a rozmrazovací soli se při zkoušce CDF hodnotí po 14 a 28 provedených cyklech. Konečným výsledkem je hmotnost odpadlého materiálu ze zkušební povrchu, který se vypočítá podle následujícího vzorce [17].

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \cdot 10^6$$

Kde je:

m_n množství odloupeného materiálu ze zkušební povrchu po n cyklech [g/m²];

μ_s hmotnost odpadlého materiálu po n cyklech s přesností na 0,1 g;

A plocha zkušební vzorku s přesností na 0,5 mm [17].

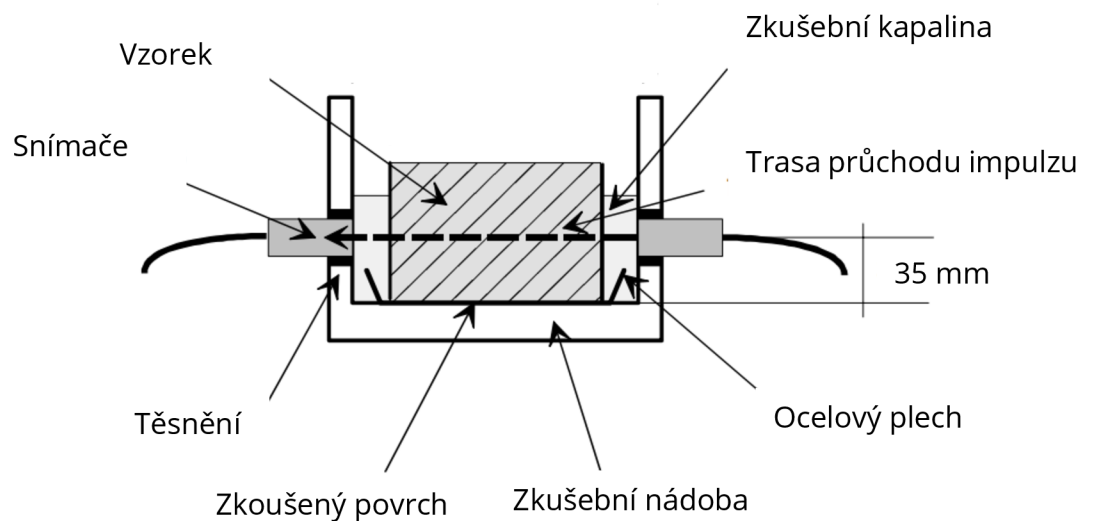
Norma také uvádí, že je nutné u získaných výsledků vyhodnotit střední hodnotu a směrodatnou odchylku odpadlého materiálu a zkontrolovat, zda nedochází k velkému rozptylu získaných hodnot [17].

7.3.2 RILEM TC 176 IDC

Dále se v Německu používá například metoda RILEM TC 176 IDC. Příprava vzorků, způsob ošetřování i průběh teplotních cyklů je u této metody prakticky totožný s předcházející metodou RILEM TC 117. Tato metoda ale na rozdíl od předchozí využívá navíc měření doby průchodu ultrazvukových impulsů, nebo měření velikosti příčné frekvence ke zjištění míry vnitřního poškození betonu mrazem [26].

Zkušební postup se skládá celkem ze tří fází: stanovení povrchového odpadu, měření absorpce vody a nakonec stanovení vnitřního poškození nedestruktivními metodami [26].

Množství odloupnutého materiálu se stanovuje obdobně jako u předcházející metody s využitím ultrazvukového čištění. Stejně je i vyhodnocení, které se udává jako množství odloupnutého materiálu vztaženého k velikosti plochy zkoušeného povrchu v g/m^2 . Dalším krokem je podobně jako u normy ČSN 73 1380 měření hodnoty absorpce vody udávané v % hmotnosti. Tato hodnota se zjišťuje jako rozdíl hmotností vzorků před a po provedení n cyklů zmrazování a rozmrazování. Poslední částí celé zkoušky je měření vnitřního poškození, nejčastěji se používá metoda měření doby průchodu ultrazvukových impulzů. Míra poškození vnitřní struktury betonu od působení mrazu se poté vyjadřuje podobně jako u normy ČSN 73 1380 změnou relativního dynamického modulu pružnosti. Součástí výsledků musí být vedle množství odpadu, počtu provedených zmrazovacích cyklů, změn relativního dynamického modulu pružnosti uvedená i směrodatná odchylka měření. Dále se také může uvést i vizuální posouzení vzorků [26].



Obrázek 11: Schéma zkoušení rychlosti průchodu ultrazvukových impulzů zkoušeným vzorkem [26]

7.4 POLSKO

V Polsku mezi nejčastěji používané metody pro testování odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám patří metoda podle polské normy PN 88/B 06250 nebo metoda dle normy PKN-CEN/TS 12390-9, která je totožná s českou předběžnou normou ČSN P CEN/TS 12390-9.

Zkouška dle normy PN 88/B 06250 používá vzorky ve tvaru krychle ve stáří 28 dnů. Zkouška začíná nasycením betonových vzorků. Následně se vzorky určené pro zmrazení umístí do zmrazovacího prostoru tak, aby mezi nimi zůstal prostor o velikosti 20 mm. Zde jsou krychle vystaveny cyklickému zmrazování, jedná se o zmrazování na teplotu -18 ± 2 °C po dobu 4 hodin a rozmrazování ponořením do vody o teplotě $+18 \pm 2$ °C opět po dobu 4 hodin [18].

Srovnávací vzorky se po celou dobu zkoušení mrazuvzdornosti ponechávají ve vodě o teplotě $+18 \pm 2$ °C. Po dokončení všech cyklů se na všech vzorcích, jak zmrazovaných, tak referenčních provede zkouška pevnosti v tlaku. Ze získaných hodnot se vypočítá průměrný úbytek pevnosti [18].

Předpokládá se, že počet zmrazovaných cyklů závisí na požadovaném stupni mrazuvzdornosti. Například pro stupeň F-150 je to 150 cyklů a pro F-200 je to 200 cyklů [18].

Pro posouzení stupně mrazuvzdornosti se používají 3 kritéria: na vzorcích nesmí být po provedených cyklech zmrazování a rozmrazování žádné trhliny a dále rozdíl hmotností vzorků namočených do vody před započítáním zkoušky a po provedení požadovaného počtu cyklů zmrazování a rozmrazování nesmí být větší než 5 %. Mezi další kritérium patří ještě požadavek, že rozdíl pevnosti v tlaku mezi vzorky nezmrazovanými a zmrazovanými nesmí být větší než 20 % [19].

7.5 ŠVÉDSKO

Ve Švédsku existuje norma SS 13 72 44 taktéž nazývaná „Borås“, která je prakticky totožná s metodou „Slab test“, popsané v evropské technické specifikaci CEN TS 12390-9 [30].

7.6 FINSKO

Zkoušení mrazuvzdornosti lze ve Finsku zkoušet podle finské normy SFS 5447 z roku 1988. Zkoušení probíhá na vzorcích trámců o velikosti 500x100x100 mm, kdy každý vzorek je podroben 150 cyklům zmrazování při teplotě - 20 °C a rozmrazování ve vodě o teplotě + 20 °C. Pro vyhodnocení mrazuvzdornosti se používá tzv. Hummel exponent (H), získaný podle následujícího vzorce [30].

$$F_{ctf} = (F_c)^H$$

Kde je:

H Hummel exponent;

F_{ctf} pevnost v tahu za ohybu [MN/m²];

F_c pevnost v tlaku [MN/m²] [30].

Tento exponent získaný na zmrazovaných vzorcích se porovnává s exponentem získaným na vzorcích nezmrazovaných. Beton je považován za mrazuvzdorný, jestliže Hummel exponent zmrazovaných vzorků dosahuje minimálně 90 % velikosti tohoto exponentu vzorků nezmrazovaných [30].

Zkoušení odolnosti betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek probíhalo ve Finsku podle již zrušené normy SFS 5449. Zkouška se prováděla na vzorcích krychlí o hraně 150 mm, které se podrobily zmrazování v prostředí roztoku NaCl při teplotě -15 °C a rozmrazování ve vodě o teplotě +20 °C. Po 10 a 25 provedených cyklech se měřila hodnota změny hmotnosti vzorků, která se dále použila při posouzení. Beton byl označen za mrazuvzdorný, jestliže pokles hmotnosti po 25 cyklech nebyl větší než 5 % [30].

7.7 RAKOUSKO

V Rakousku se pro zkoušení mrazuvzdornosti používá metoda podle normy ÖNORM B 3306, která je určena pro zkoušení odolnosti betonových prefabrikátů proti působení cyklického zmrazování a rozmrazování a vlivu rozmrazovacích solí. Pro zkoušení se používají vzorky ve tvaru desky o tloušťce 50 mm podobně jako u metody „Slab test“. Vzorky se před zkoušením ukládají na 14 dní do vody a poté se ponechávají 14 dní v laboratorním prostředí. Následně jsou vzorky vystavené celkem 25 cyklům zmrazování a rozmrazování za přítomnosti 3% roztoku NaCl. Každý cyklus je dlouhý celkem 24 hodin. Vyhodnocení spočívá ve vizuálním posouzení a měření hloubky degradace povrchu [30].

8 OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST

Zkoušení vlastností odolnosti betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek probíhá v laboratořích se získanou akreditací, která označuje, že zkoušky budou danou laboratoří prováděny dle předpisů a na základě toho budou mít výsledky těchto zkoušek dostatečnou vypovídající hodnotu, co nejvíce se blíží skutečným vlastnostem zkoušeného materiálu. Jedním z možností, jak mohou laboratoře prokázat svoji odbornost a způsobilost je v tzv. programech zkoušení způsobilosti, konkrétně zkouškách MPZ – mezilaboratorní porovnávací zkoušky (dnes také označovány jako PT). V rámci této zkoušky se posuzují výsledky zkušebních laboratoří. Mezi její výstupy patří mimo jiné také údaje o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Hodnoty těchto údajů jsou velmi důležité z hlediska hodnocení kvality provedených zkoušek, zejména s ohledem na variabilitu získaných výsledků [28].

Přesnost měření se hodnotí podle správnosti a shodnosti výsledků. Správností se rozumí, jak moc je aritmetický průměr výsledků blízko k požadované referenční hodnotě [28].

Shodnost je ukazatel, který hodnotí míru těsnosti shody jednotlivých výsledků zkoušek. To znamená, že se jednotlivé výsledky hodnotí pouze mezi sebou a nehodnotí se s nějakou požadovanou (referenční) hodnotou [28].

Opakovatelnost vyjadřuje, že dvě zkoušky na témže vzorku provedené jedním pracovníkem v co nejkratším čase, nevykážou hodnoty, které by překračovaly hodnotu opakovatelnosti r průměrně více než jedenkrát z dvaceti případů [28].

Hodnota opakovatelnosti se vypočítá dle vztahu:

$$r = 2,8 s_r$$

Kde je s_r směrodatná odchylka opakovatelnosti [28].

Reprodukovatelnost na rozdíl od opakovatelnosti porovnává výsledky na stejném vzorku získaných od dvou různých pracovníků a různých zkušebních zařízení. Tyto výsledky by se neměly lišit o hodnotu reprodukovatelnosti R více než jednou z dvaceti případů [28].

Hodnota reprodukovatelnosti se vypočítá dle vztahu:

$$R = 2,8 s_R$$

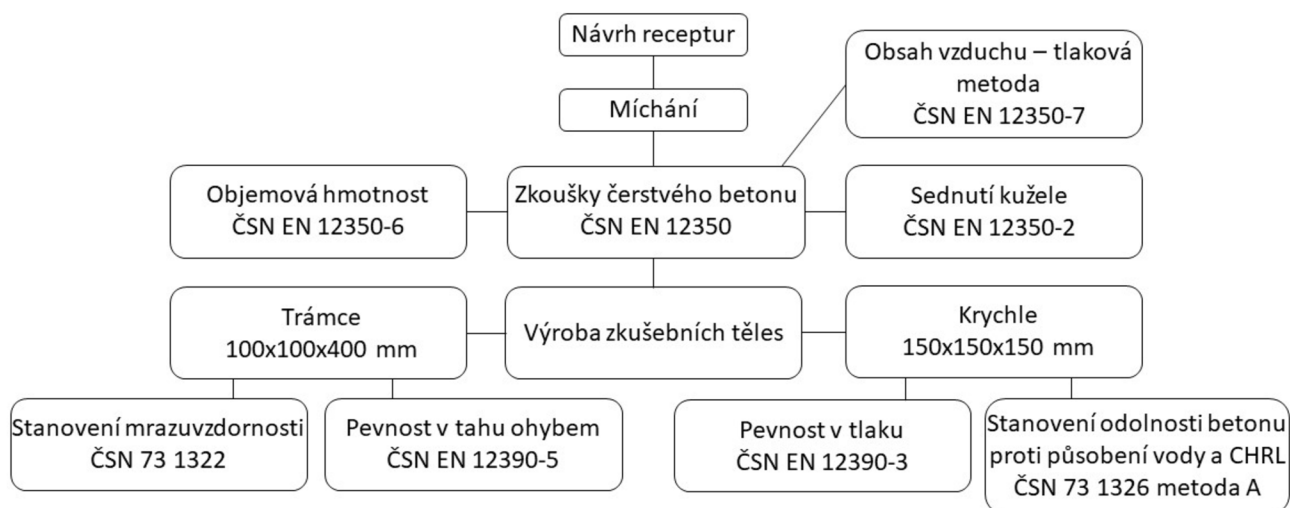
Kde je s_R směrodatná odchylka reprodukovatelnosti [28].

Při porovnávání výsledků získaných z různých laboratoří, například výsledků odpadů dle normy ČSN 73 1326 metody A na stejných vzorcích vychází, že získané výsledky vykazují velmi vysokou variabilitu. Tato nehomogenita výsledků může být způsobena řadou vnějších vlivů, mezi které patří například druh separačního prostředku, způsob a doba hutnění, druh ošetřování a další. Způsob ošetřování vzorků hraje důležitou roli zejména v kontextu kvality povrchu betonu. Kvalitnější povrch více brání pronikání agresivních látek do vnitřní struktury, a tím poskytuje vzorkům vyšší ochranu. Mezi hlavní způsoby ošetřování patří uložení vzorků do vodního, vlhkého nebo laboratorního prostředí. Ukazuje se, že zejména vodní prostředí působí negativně na kvalitu betonového povrchu, protože čerstvá voda vyluhuje z betonu alkálie [28] [29].

PRAKTICKÁ ČÁST

9 METODIKA PRÁCE

Tato část práce je zaměřena na praktické aplikace týkající se testování odolnosti betonů vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek. Byly sledovány parametry betonu jako jsou zpracovatelnost čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu, objemová hmotnost, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost a odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.



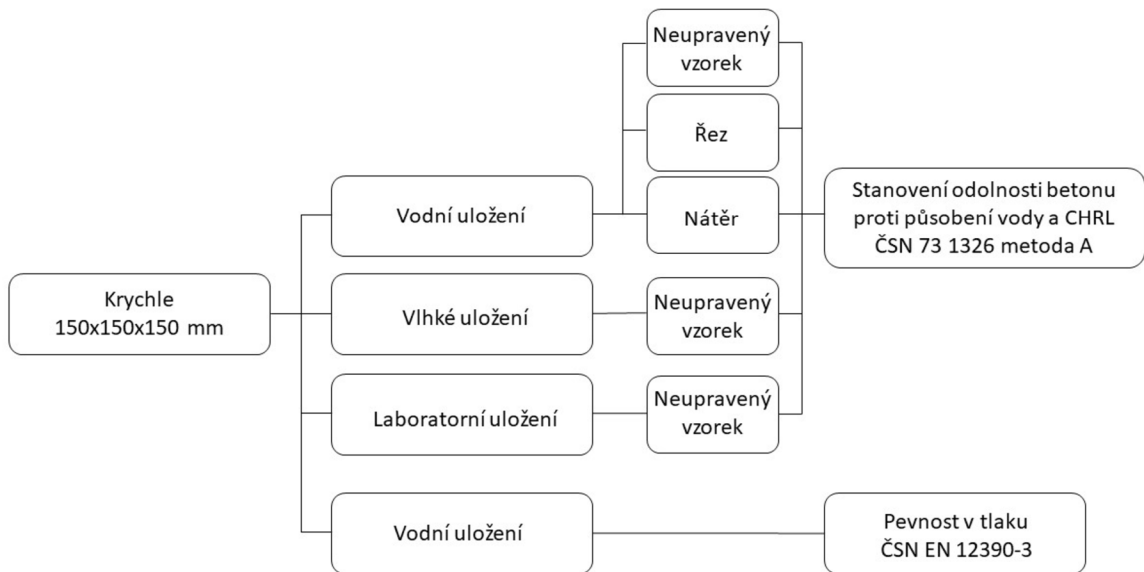
Obrázek 12: Pracovní diagram metodiky práce

Byly porovnávány vzorky vyrobené ze tří různých receptur betonu. První receptura byla navržena pro beton pevnostní třídy C 20/25 podle požadavků normy ČSN EN 206 + A2 pro stupeň vlivu prostředí XC2, druhá receptura byla navržena pro provzdušněný beton C 30/37 pro stupeň vlivu prostředí XF4 a třetí receptura pro beton C 50/60 XC4. Z každé receptury bylo vyrobeno celkem 12 krychlí o hraně 150 mm pro zkoušku odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a pevnosti v tlaku a také sada trámců pro zkoušku mrazuvzdornosti.

V rámci zkoušení odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám byly porovnávány různé druhy ošetřování a povrchové úpravy zkušebních ploch vzorků.

Celkem bylo zkoušeno 5 různých typů ošetřování a typů zkušebních ploch: plochy vzorků uložených ve vodě, plochy vzorků ve vlhkém uložení, plochy vzorků uložených v laboratorním prostředí, plochy vzorků vzniklé řezem a také vzorky jejichž boční plochy byly ošetřeny nátěrem. Pro každý typ ošetřování byly zhotoveny 2 krychle o hraně 150 mm, viz obrázek 13.

Pro zkoušku mrazuvzdornosti bylo vytvořeno z každé receptury celkem 5 trámců (3 trámce pro zkoušku mrazuvzdornosti a 2 trámce porovnávací).



Obrázek 13: Typy ošetřování a úpravy vzorků

9.1 VSTUPNÍ SUROVINY

Cement

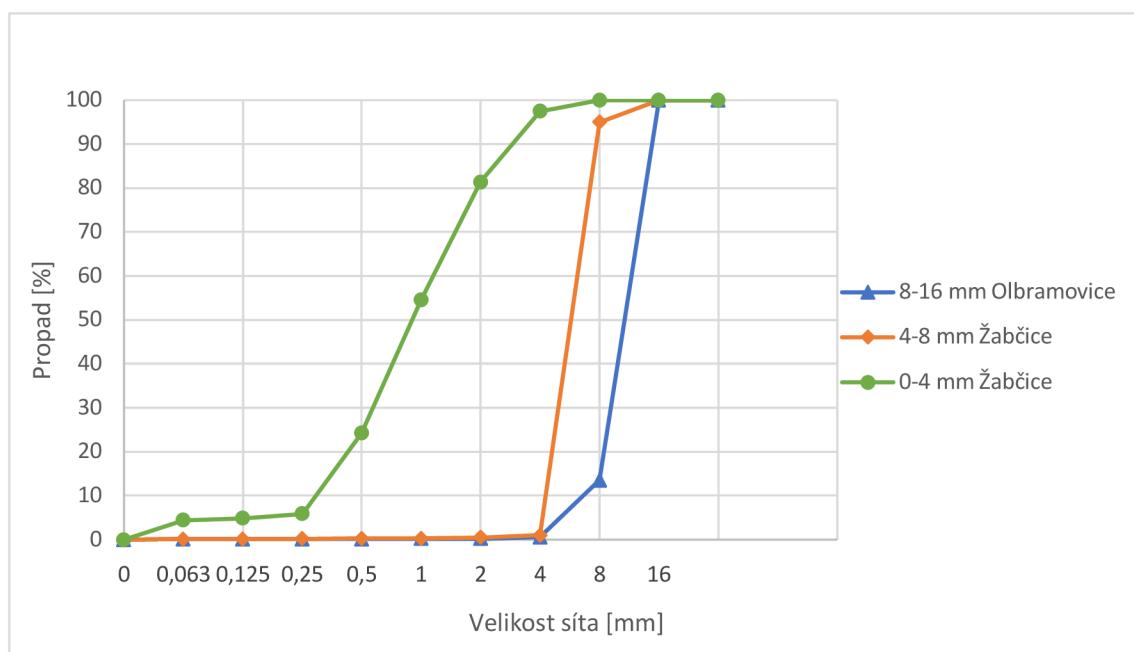
Pro všechny receptury byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R od výrobce Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrý. Cement splňuje normové požadavky podle ČSN EN 197-1. Základní vlastnosti tohoto cementu jsou uvedeny v tabulce č.2.

Tab. č.2: Základní vlastnosti použitého cementu

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Pevnost v tlaku po 28 dnech	61	[MPa]
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	9	[MPa]
Počátek tuhnutí	211	[min]
Konec tuhnutí	286	[min]
Měrný povrch [Blaine]	409	[m ² /kg]
Měrná hmotnost	3130	[kg/m ³]
Obsah portlandského slínku	95-100	[%]

Kamenivo

Pro každou recepturu byly použity celkem 3 frakce kameniva. Drobné kamenivo těžené frakce 0-4 z pískovny Žabčice, hrubé kamenivo těžené frakce 4-8 z pískovny Žabčice a hrubé drcené kamenivo frakce 8-16 z lomu Olbramovice. Poměry jednotlivých frakcí kameniva ve směsích receptur betonů C 20/25 a C 30/37 byly vypočteny pomocí křivky zrnitosti dle Fullera. Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva jsou znázorněny v následujícím grafu.



Obrázek 14: Graf křivek zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva

Tab. č.3: Vybrané vlastnosti použitého kameniva

Frakce	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Sypná hmotnost volně sypané [kg/m ³]	Sypná hmotnost setřesené [kg/m ³]
0-4 Žabčice	2550	1270	1630
4-8 Žabčice	2510	1370	1540
8-16 Olbramovice	2500	1420	1590

Voda

Použita byla pitná voda z vodovodního řádu.

Plastifikační přísada

Do každé receptury byla přidána superplastifikační přísada Chryso Optima 257 W.

Provzdušňující přísada

Byla použita provzdušňující přísada Chryso Air A.

10 RECEPTURY

Tab. č.4: Složení jednotlivých receptur, poznámka: m_c – hmotnost cementu

Složky		Jednotka	Receptura		
			C 20/25	C 30/37	C 50/60
Kamenivo	CEM I 42,5 R Mokrý		359	385	435
	DTK 0-4 mm Žabčice	[kg/m ³]	897	844	815
	HTK 4-8 mm Žabčice		359	337	200
	HDK 8-16 mm Olbramovice		538	506	713
Voda	[kg/m ³]		180	175	170
Plastifikační přísada		[% z m_c]	0,6	0,6	1
		[l/m ³]	2,2	2,3	4,4
Provzdušňující přísada		[% z m_c]	-	0,1	-
		[l/m ³]	-	0,4	-
Vodní součinitel		-	0,50	0,45	0,39

11 ZKOUŠKY ČERSTVÉHO BETONU

Na každé receptuře namíchaného čerstvého betonu byly provedeny následující zkoušky:

- sednutí kužele podle normy ČSN EN 12350-2 pro stanovení konzistence čerstvého betonu;
- obsah vzduchu pomocí tlakové metody podle normy ČSN EN 12350-7;
- objemová hmotnost čerstvého betonu podle normy ČSN EN 12350-6.

11.1 STANOVENÍ KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU

Konzistence čerstvého betonu byla stanovena pomocí metody sednutí kužele podle normy ČSN EN 12350-2. Pro provedení zkoušky byl použit Abramsův kužel, násypka, propichovací tyč pro zhutnění, podkladní deska a měřící pomůcka. Zkouška byla provedena do 5 minut po namíchání čerstvého betonu. Všechny pomůcky se navlhčili vodou a poté se Abramsův kužel s násypkou umístěný na podkladní desce naplnil čerstvým betonem ve 3 vrstvách. Každá vrstva byla zhutněna 25 vpichy zhutňovací tyče tak, aby vpichy pronikly do předchozí vrstvy a došlo ke spojení všech vrstev. Po naplnění se z kužele odstranila násypka a povrch se zarovnal pomocí zednické lžíce. Následně se kužel plynule zvednul svislým pohybem vzhůru v rozmezí 2 až 5 sekund a po ustálení sednutí se změřila velikost sednutí kužele jako vzdálenost nejvyššího bodu sednutí k horní hraně Abramsova kužele. Naměřená hodnota byla zaokrouhlena na nejbližších 10 mm a podle ní byl beton zatříděn do daného stupně konzistence čerstvého betonu.

11.2 STANOVENÍ OBSAHU VZDUCHU

Na namíchaném provzdušněném čerstvém betonem receptury C 30/37 byla pro stanovení konzistence provedena zkouška obsahu vzduchu pomocí tlakové metody dle normy ČSN EN 12350-7. Pro provedení zkoušky byl použit tlakoměrný přístroj.

Tlaková nádoba se naplnila betonem tak, aby se odstranilo co největší množství bublin ve 3 přibližně stejně velkých vrstvách, každá vrstva se hutnila samostatně 25 vpichy propichovací tyče stejně jako u zkoušky sednutí. Po ukončení zhutňování každé vrstvy se paličkou poklepala tlaková nádoba, aby se vypudily vzduchové bublinky. Následně se zhutněný beton zarovnal s horní hranou nádoby a uhladil, příruba nádoby se důkladně očistila a svorkami se připevnilo k nádobě víko. Poté se uzavřel hlavní ventil a otevřely se ventily A a B. Do jednoho ventilu se vstříkovala voda tak dlouho, až z druhého ventilu voda začala vytékat. Ventil na vypouštění vzduchu se uzavřel a do vzduchové komory se začal pumpovat vzduch až na výchozí hodnotu. Následně se ventily A a B uzavřely, otevřel se hlavní ventil vzduchu a odečetla se hodnota tlaku na tlakoměru odpovídající objemu obsaženého vzduchu zaokrouhleného na 0,1 %.

11.3 OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU

Zkouška pro zjištění objemové hmotnosti čerstvého betonu byla provedena podle normy ČSN EN 12350-6. Nejdříve se zvážila prázdná nádoba o známém objemu, která se následně naplnila čerstvým betonem ve dvou vrstvách a provedlo se zhutnění na vibračním stole. Po zarovnání horní vrstvy betonu s hranou nádoby se naplněná nádoba opět zvážila s přesností na 0,01 kg.

Objemová hmotnost čerstvého betonu se následně vypočítala dle vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Kde je:

- D objemová hmotnost [kg/m³];
- m_2 hmotnost plné nádoby [kg];
- m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg];
- V objem nádoby [m³].

Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhluje na nejbližších 10 kg/m³ [32].

12 PŘÍPRAVA VZORKŮ

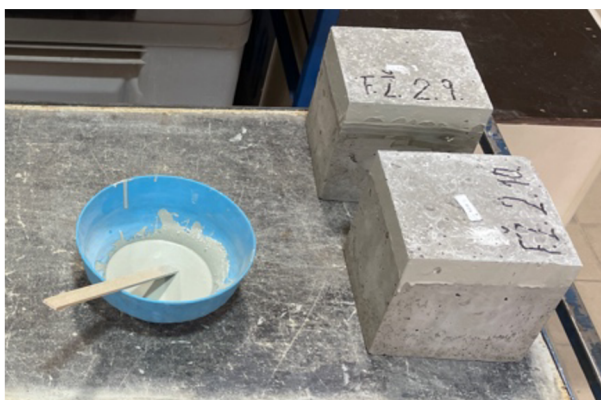
Zkušební trávce pro zkoušku mrazuvzdornosti byly po odformování uloženy do vodního prostředí. Vzorky krychlí pro zkoušku CHRL byly uloženy do třech různých prostředí: vodní uložení, prostředí s vysokou vlhkostí a laboratorní prostředí. Následně byly ze dvou krychlí ošetřovaných ve vodě od každé receptury odříznuty jejich horní poloviny a byla tak vytvořena řezná plocha pro zkoušení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Od každé receptury byly také vybrány 2 krychle z vodního uložení, u kterých byl poté nanesen ochranný nátěr Sikafloor 390 N podél celého obvodu bočních stěn přibližně do výšky 5 cm z důvodu zabránění vztlínání zkušebního roztoku.



Obrázek 15: Řezání vzorku krychle



Obrázek 16: Vzniklá zkušební plocha



Obrázek 17: Aplikace ochranného nátěru na vzorky krychlí



Obrázek 18: Ochranný nátěr kolem bočních ploch vzorku

13 ZKOUŠKY ZTVRDLÉHO BETONU

- Zkouška pevnosti v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3;
- objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle normy ČSN EN 12390-7;
- stanovení mrazuvzdornosti betonu dle normy ČSN 73 1322;
- zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek podle metody A normy ČSN 73 1326.

13.1 PEVNOST V TLAKU

Zkouška pevnosti v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 byla provedena vždy na dvou krychlích od každé receptury ve stáří 28 dní, které byly uloženy ve vodním prostředí. Zkušební tělesa byla po osušení umístěna do lisu a následně byla zatěžována kolmo na směr hutnění konstantní rychlostí až do jejich porušení.

Pevnost v tlaku se vypočítala podle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Kde je: f_c pevnost v tlaku [MPa];
 F maximální zatížení při porušení [N];
 A_c plocha zkušebního tělesa na kterou působení zatížení [mm²].

Pevnost v tlaku se zaokrouhluje na nejbližších 0,1 MPa [33].

13.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST ZTVRDLÉHO BETONU

Na všech vzorcích byla stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle normy ČSN EN 12390-7. Zkouška byla provedena tak, že se těleso po nasycení vodou osušilo a změřilo pomocí posuvného měřítka a poté se zvažilo na laboratorních vahách.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se vypočítala podle vzorce:

$$D = \frac{m}{V}$$

Kde je: D objemová hmotnost [kg/m³];
 m hmotnost zkušební tělesa [kg];
 V objem zkušební tělesa [m³].

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhuje na nejbližších 10 kg/m³ [34].

13.3 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

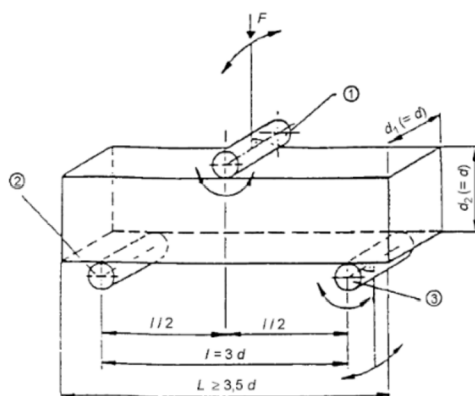
Stanovení mrazuvzdornosti betonu dle normy ČSN 73 1322 bylo u každé receptury provedeno na sadě trámců o rozměrech 100x100x400 mm, 3 trámce byly zmrazované a 2 trámce byly porovnávací. Nezmrazované vzorky trámců byly ve stáří 28 dnů zváženy a byla zjištěna jejich pevnost v tahu za ohybu pomocí zkoušky pevnosti v tahu ohybem jedním břemenem uprostřed podle přílohy A normy ČSN EN 12390-5 a pevnost v tlaku na zlomcích trámců podle normy ČSN EN 12390 - 5. Zmrazované vzorky byly ve stáří 28 dnů zváženy a byly uloženy do mrazícího zařízení, kde byly podrobeny celkem 100 cyklům zmrazování a rozmrazování podle normy ČSN 73 1322. Po provedení daného počtu cyklů byly zmrazované trámce zváženy pro stanovení změny jejich hmotnosti, dále byla zjištěna jejich pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na zlomcích trámců opět podle normy ČSN EN 12390-5.

Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla vypočítána podle vzorce:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Kde je: f_{cf} pevnost v tahu ohybem [MPa];
 F maximální zatížení [N];
 l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm];
 d_1 a d_2 rozměry příčného řezu [mm].

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhuje na nejbližší 0,1 MPa [35].



Legenda

- 1 zatěžovací váleček (otočný a výkyvný)
- 2 podpěrný váleček
- 3 podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

Obrázek 19: Schéma zatěžování zkušebního tělesa jedním břemenem uprostřed



Obrázek 20: Zkouška pevnosti v tahu ohybem jedním břemenem uprostřed



Obrázek 21: Zkouška pevnosti v tlaku na zlomku trámce

13.4 STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI CHRL

Zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla provedena podle metody A normy ČSN 73 1326. Od každé receptury bylo zkoušeno celkem 10 krychlí o hraně 150 mm ošetřované různými způsoby. Pro každý druh ošetřování byla zkoušena 2 zkušební tělesa. Bylo použito celkem 5 různých způsobů ošetřování a úprav zkušebních těles (vodní uložení, vlhké uložení, suché uložení, nátěr a řez). Od každé receptury bylo vybráno celkem 6 krychlí, které byly ihned po odformování uloženy do vodního prostředí podle normy ČSN EN 73 1326. Z těchto 6 krychlí byly po 14 dnech od odformování vybrány dvě dvojice těles. Krychle z první dvojice byly rozříznuty na dvě části, viz kapitola 12, poté se vybrala vždy jedna část od každé krychle, která se opět uložila do vodního prostředí až do počátku zkoušky (značeno: řez). Krychle ze druhé dvojice byly určeny pro aplikaci ochranného nátěru. Postupovalo se tak, že ve stáří 14 dní byly boční strany krychlí natřeny ochranným mrazuvzdorným nátěrem, viz kapitola 12. Po zaschnutí nátěru byly krychle vráceny zpět do vody a ve stáří 28 dnů se započalo se zkoušením (značeno: nátěr). U zbylých 2 krychlí ve vodním uložení se zkušební povrch nijak neupravoval, tělesa byla ve vodě uložena do stáří 28 dní a následně se započalo s jejich zkoušením (značeno: vodní uložení).

Dále byly od každé receptury vybrány 2 krychle, které byly po odformování uloženy do vlhkého prostředí s relativní vlhkostí 95 % (značeno: vlhké uložení) a dále 2 krychle, které byly uloženy v laboratorním prostředí na vzduchu po dobu 28 dní (značeno: suché uložení).



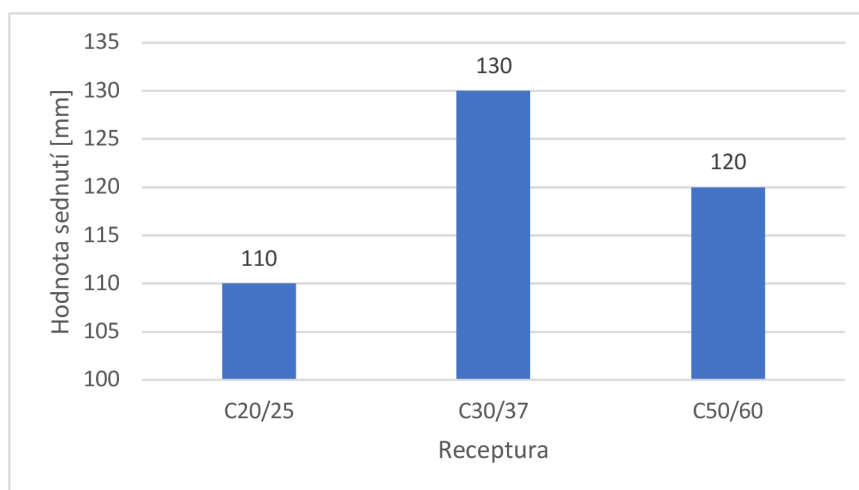
Obrázek 22: Zkušební tělesa uvnitř mrazícího boxu

14 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ČERSTVÉHO BETONU

14.1 ZKOUŠKA SEDNUTÍM

Tab. č.5: Velikost sednutí jednotlivých receptur a třída konzistence čerstvého betonu

Receptura	Sednutí [mm]	Stupeň konzistence
C20/25	110	S3
C30/37	130	S3
C50/60	120	S3



Obrázek 23: Graf porovnání hodnot sednutí čerstvého betonu jednotlivých receptur



Obrázek 24: Zkouška sednutí kužele

Vyhodnocení

Velikosti sednutí kužele čerstvého betonu byly u všech receptur naměřeny v rozmezí 110 – 130 mm. Všechny receptury tedy spadají do stupně konzistence S3. Tato konzistence byla naměřena přibližně do 5 minut od namíchání čerstvého betonu. U všech receptur byla použita superplastifikační přísada Chryso Optima 257 W. U receptur C 20/25 a C 30/37 bylo použito množství 0,6 % z hmotnosti cementu a u receptury C 50/60 dávka 1 % z hmotnosti cementu. Toto vyšší množství této přísady umožnilo při zachování stupně konzistence S3 namíchat beton s nižším vodním součinitelem, a tím dosáhnout vyšších hodnot pevnosti u ztvrdlého betonu a také vyšších odolností proti působení mrazu.

14.2 ZKOUŠKA OBSAHU VZDUCHU – TLAKOVÁ METODA

Obsah vzduchu u provzdušněné receptury C 30/37 byl naměřen na hodnotu asi 4,2 %.



Obrázek 25: Zkouška obsahu vzduchu – tlaková metoda

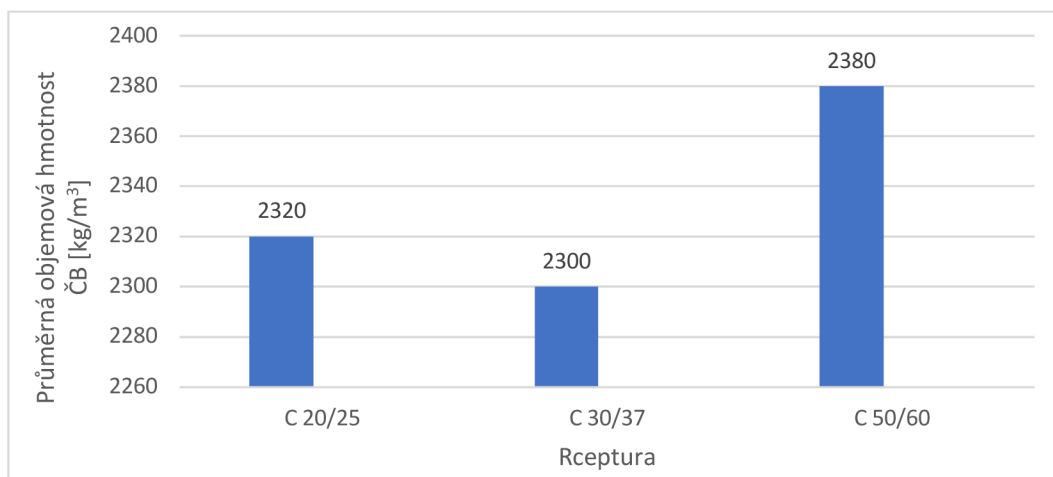
14.3 OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU

Tab. č.6: Průměrné objemové hmotnosti čerstvého betonu

Receptura	Průměrná objemová hmotnost ČB [kg/m ³]
C 20/25	2320
C 30/37	2300
C 50/60	2380

Vyhodnocení

Výsledné objemové hmotnosti čerstvého betonu jsou ovlivněné složením jednotlivých receptur. Nejvyšší hodnoty objemových hmotností měla receptura C 50/60, která poměrově obsahovala nejvyšší množství cementu a nejnižší množství vody. Naopak nejnižších hodnot objemových hmotností dosáhla receptura C 30/37 z důvodu jejího provzdušnění.



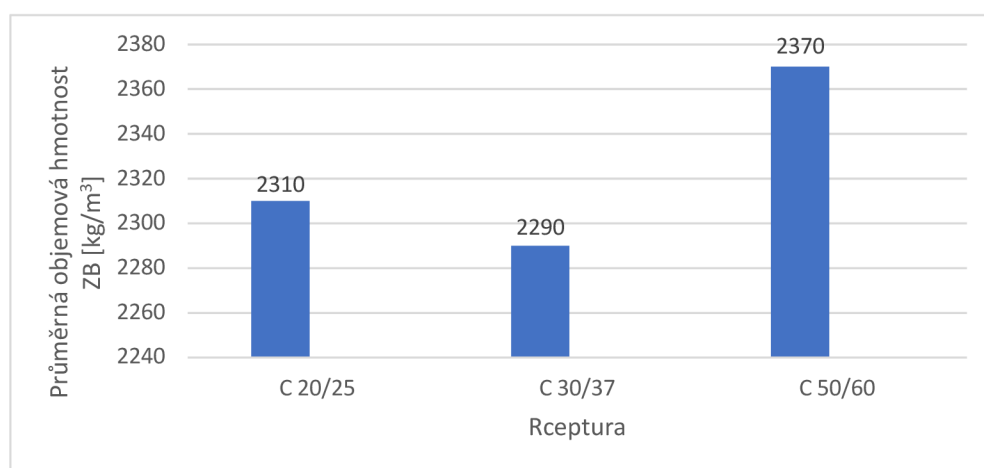
Obrázek 26: Graf porovnání objemových hmotností čerstvého betonu

15 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ZTVRDLÉHO BETONU

15.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST ZTVRDLÉHO BETONU

Tab. č.7: Průměrné objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Receptura	Průměrná objemová hmotnost ZB [kg/m³]
C 20/25	2310
C 30/37	2290
C 50/60	2370



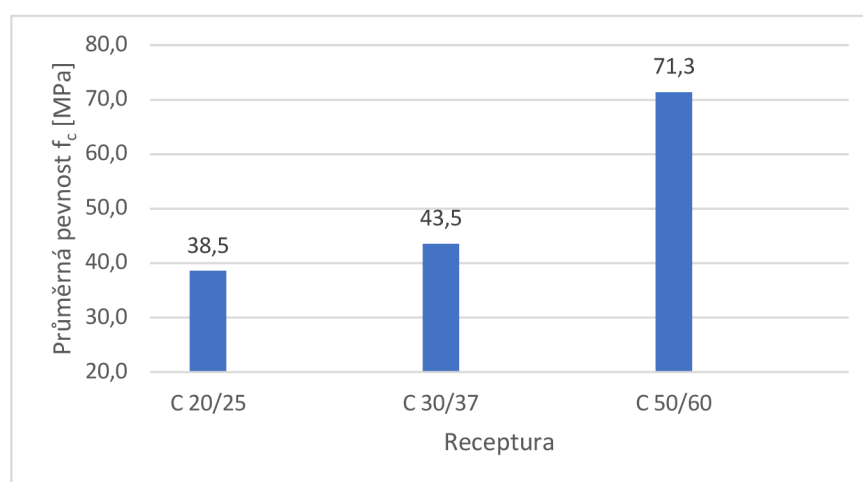
Obrázek 27: Graf porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

15.2 PEVNOST V TLAKU

Tab. č.8: Výsledné pevnosti v tlaku tří různých receptur betonu

Receptura	Průměrná pevnost f_c [MPa]
C 20/25	38,5
C 30/37	43,5
C 50/60	71,3

poznámka: f_c = pevnost v tlaku



Obrázek 28: Graf porovnání pevností v tlaku

Vyhodnocení

Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu byla naměřena u zkušebních krychlí ve stáří 28 dnů. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku vyšla u receptury C 20/25 38,5 MPa, u druhé receptury C 30/37 vyšla 43,5 MPa a u receptury C 50/60 vyšla průměrná hodnota pevnosti v tlaku 71,3 MPa. U všech sledovaných betonů vyšly pevnosti v tlaku dle předpokladu. Vyšších hodnot pevností v tlaku bylo dosaženo vyšším množstvím použitého cementu ve směsi a také nižší hodnotou vodního součinitele. Množství použitého cementu v případě receptury C 20/25 bylo 359 kg/m³, u receptury C 30/37 bylo použito vyšší množství 385 kg/m³ a u receptury C 50/60 nejvyšší množství 435 kg/m³.

Hodnota vodního součinitele byla u receptury C 20/25 s nejnižšími pevnostmi 0,50 a naopak u receptury betonu C 50/60 s nejvyššími pevnostmi byla hodnota vodního součinitele pouze 0,39. Receptura C 50/60 dosáhla nejvyšších pevností také díky vyššímu poměrnému zastoupení hrubé frakce 8-16 ve směsi.

15.3 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

Tab. č.9: Výsledné pevnosti zjištěné na zmrazovaných a nezmrazovaných trámcích

Receptura	Průměrná pevnost f_{ct} [MPa]		Průměrná pevnost f_c zlomků [MPa]	
	vzorků nezmrazovaných [MPa]	vzorků zmrazovaných [MPa]	trámců nezmrazovaných [MPa]	trámců zmrazovaných [MPa]
C 20/25	4,2	3,4	38,4	35,1
C 30/37	5,1	4,5	39,8	39,0
C 50/60	8,5	8,4	65,1	65,5

poznámka: f_{ct} = pevnost v tahu za ohybu, f_c = pevnost v tlaku

Tab. č.10: Výsledný součinitel mrazuvzdornosti a zjištěné úbytky hmotnosti po 100 cyklech

Receptura	Součinitel mrazuvzdornosti betonu po 100 cyklech	Úbytek hmotnosti [%]
C 20/25	0,80	- 1,1
C 30/37	0,88	- 0,4
C 50/60	0,99	- 0,1

Vyhodnocení

Zkušební tělesa byla během zkoušky stanovení mrazuvzdornosti vystavena celkem 100 cyklům zmrazování a rozmrazování. Porovnáním průměrných pevností v tahu za ohybu zmrazovaných a nezmrazovaných zkušebních těles u všech receptur jsem získal součinitel mrazuvzdornosti betonu.

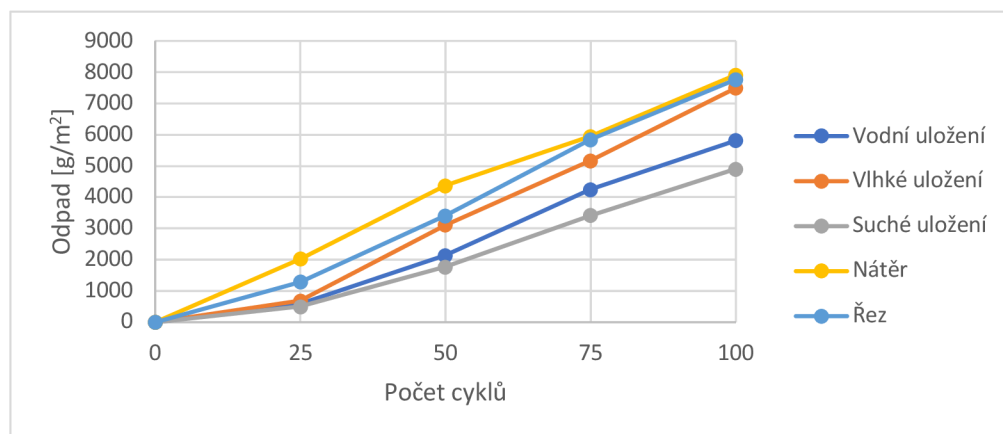
Z výsledků zkoušky vyplývá, že všechna zkušební tělesa od všech 3 receptur mají výsledný součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech vyšší, než 0,75 a jsou tedy na tento počet zkušebních cyklů mrazuvzdorná podle normy ČSN 73 1322. Podle normy STN 73 1322 by zkoušce vyhověla pouze tělesa receptur C 30/37 a C 50/60, která mají součinitel mrazuvzdornosti vyšší než 0,85. U žádného ze zkušebních těles nebyl zjištěn úbytek hmotnosti vyšší než 5 % a zkouška tak nemusela být ukončena dříve, než bylo dosaženo požadovaných 100 cyklů zmrazování.

Z výsledků zkoušky vyplývá, že nejméně odolný beton proti působení cyklického zmrazování a rozmrazování je beton receptury C 20/25, který sice nebyl navržen jako mrazuvzdorný, ale i tak zkoušce vyhověl. Naopak jako nejvíce odolný vychází beton receptury C 50/60. Tento výsledek odpovídá předpokladu, že betony vyšších pevnostních tříd, například receptura C 50/60 s nižší hodnotou vodního součinitele, vykazují vyšší odolnost proti působení cyklickému zmrazování a rozmrazování, než je tomu v případě betonů s nižšími pevnostmi. Dalším faktorem zlepšení mrazuvzdornosti může být i případné provzdušnění betonu. Beton receptury C 30/37 má dle zkoušky vyšší odolnost proti působení mrazu než beton receptury C 20/25. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben provzdušněním betonu receptury C 30/37 a také vyššími hodnotami pevností než u receptury C 20/25.

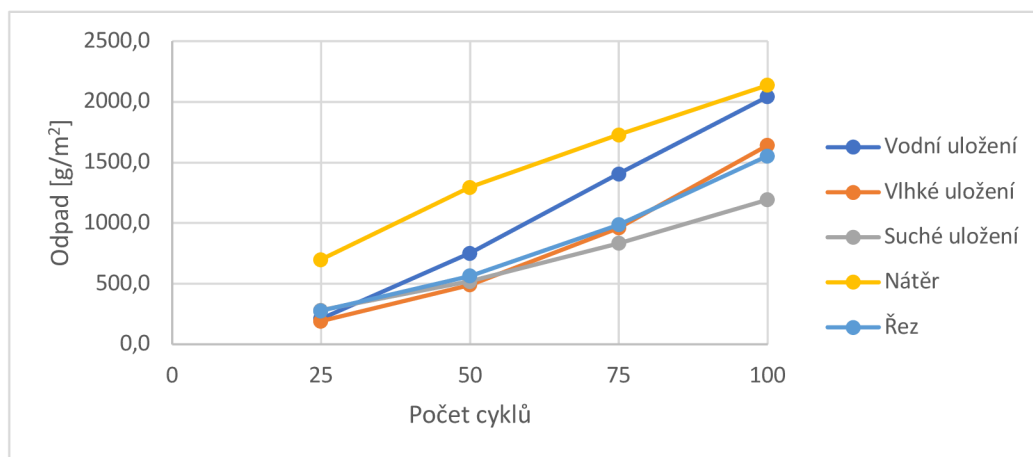
15.4 STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHRL

Tab. č. 11: Průměrné hodnoty velikostí odpadu

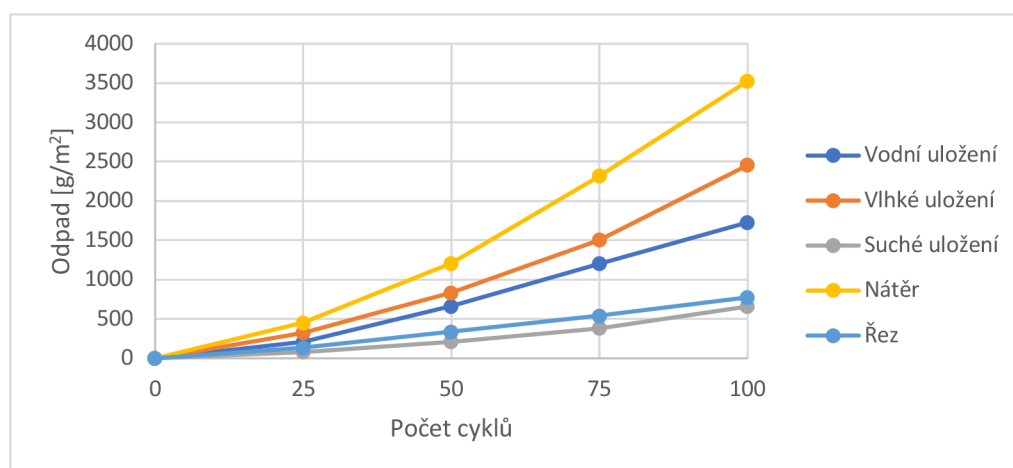
Receptura	Druh ošetřování	Průměrná hodnota odpadu po n cyklech [g/m ²]			
		25	50	75	100
C 20/25	Vodní uložení	596,9	2137,7	4254,0	5814,4
	Vlhké uložení	690,9	3111,5	5174,7	7494,7
	Suché uložení	500,2	1772,8	3416,3	4908,0
	Nátěr	2024,9	4372,8	5954,3	7917,3
	Řez	1289,0	3415,0	5842,6	7768,5
C 30/37	Vodní uložení	210,8	752,9	1405,7	2042,4
	Vlhké uložení	191,6	489,6	960,8	1641,5
	Suché uložení	282,2	520,4	834,3	1192,7
	Nátěr	699,5	1295,2	1727,1	2137,0
	Řez	276,8	564,1	985,6	1554,2
C 50/60	Vodní uložení	207,0	662,6	1202,4	1728,1
	Vlhké uložení	326,7	833,6	1506,0	2455,5
	Suché uložení	81,6	213,2	381,4	659,1
	Nátěr	453,3	1207,0	2319,1	3525,1
	Řez	134,3	338,8	540,2	775,4



Obrázek 29: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 20/25



Obrázek 30: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 30/37



Obrázek 31: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 50/60

Vyhodnocení

Zkouška odolnosti povrchu betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám byla provedena na krychlích o hraně 150 mm. Zkušební vzorky se lišily způsobem ošetřování a úpravou jejich povrchu. Každé zkušební těleso bylo vystaveno celkem 100 cyklům zmrazování a rozmrazování v přítomnosti roztoku 3% NaCl. Podle výsledků vychází ze zkoušky nejhůře zkušební tělesa vyrobená z betonu receptury C 20/25. U všech těchto zkušebních těles byly naměřeny velmi vysoké hodnoty odpadu přesahující hodnotu 4000 g/m² po 100 provedených cyklech, což odpovídá hodnotám rozpadlého stupně porušení povrchu. V případě zkušebních těles vyrobených z provzdušněného betonu receptury C 30/37 jsou výsledné odpady v porovnání s předchozí recepturou třikrát až čtyřikrát menší. Tyto tělesa spadají do kategorie silně narušené. Výsledné odpady u zkušebních těles receptury C 50/60 vyšly v případě suchého uložení a řezu menší než u předchozích dvou receptur, pravděpodobně hlavně díky vyšší pevnosti tohoto betonu. Zkušební plochy vzorků této receptury spadají do stupně narušený až silně narušený a tělesa s nátěrem do stupně rozpadlý. V případě vzorků uložených v laboratorním prostředí a vzorků řezů byly hodnoty odpadu po 100 cyklech menší než 1000 g/m². Z výsledků těles provzdušněného betonu receptury C 30/37 vyplývá, že hodnota provzdušnění o hodnotě 4,2 % nebyla dostatečně vysoká a pro dosažení nižších hodnot odpadů by bylo třeba hodnotu provzdušnění zvýšit. Z naměřených hodnot odpadů a při porovnání jednotlivých způsobů ošetřování lze vyčíst následující. Nejmenší hodnoty odpadu byly u všech receptur naměřeny v případě laboratorního (suchého) uložení vzorků. Vyšší hodnoty odpadů byly zjištěny u těles, které byly uloženy ve vodním prostředí (vodní uložení a nátěr). Větší hodnoty odpadů u těchto vzorků mohly být způsobeny vyluhováním alkálií z povrchu betonových těles vodou, ve které byly vzorky uloženy. Nižších hodnot odpadů dosáhly u receptur C 30/37 a C 50/60 vzorky řezů. Tato tělesa byla sice také uložena ve vodním prostředí, ale na rozdíl od jiných těles byla u těchto vzorků zkoušena řezná plocha, která nebyla po celou dobu uložení vystavena okolnímu vodnímu prostředí.

Nejmenší rozdíly odpadů mezi dvojicemi těles vychází u vzorků řezů. Tento výsledek by mohl naznačovat, že zkoušení řezné plochy namísto klasického povrchu by mohl pomoci eliminovat vlivy nestejnorodosti úprav horního povrchu vzorku při vytváření zkušebních těles.

15.4.1 FOTKY PORUŠENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES PO ZKOUŠCE ODOLNOSTI BETONU PROTI VODĚ A CHRL

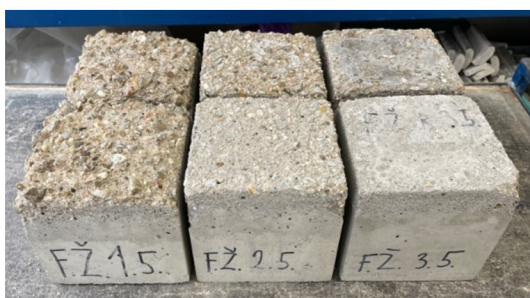
Vlevo: receptura C 20/25, uprostřed: receptura C 30/37, vpravo: receptura C50/60



Obrázek 33: Tělesa uložená ve vodním prostředí



Obrázek 32: Tělesa uložená ve vlhkém prostředí



Obrázek 36: Tělesa uložená v laboratorním prostředí



Obrázek 35: Tělesa uložená ve vodním prostředí s ochranným nátěrem



Obrázek 34: Řezy krychlí ošetřované ve vodním prostředí

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala studiem metod, které se používají pro hodnocení trvanlivosti betonu vůči působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek v České republice a v sousedních evropských zemích. Na betonové konstrukce jsou kladeny vysoké nároky z pohledu jejich životnosti, spolehlivosti a odolnosti proti negativním účinkům okolního prostředí. Cílem této práce bylo shrnout a popsat dosavadní znalosti o betonech, které jsou vystaveny negativnímu působení prostředí s cyklickým střídáním kladných a záporných teplot, prostředí s chemickými rozmrazovacími látkami a dále také shrnout a porovnat metody, používané v České republice a v Evropě pro zkoušení odolnosti vůči těmto prostředím.

V této části práce byly shrnuty a popsány teorie, které popisují způsoby porušení betonu mrazem. Mezi nejvýznamnější z nich patří například teorie hydraulického tlaku nebo teorie kritického stupně nasycení. Dále byly popsány vlastnosti betonu, které zlepšují jeho odolnost proti působení zmrazování a chemických rozmrazovacích látek. Mezi tyto vlastnosti patří zejména velikost pevnosti betonu, hodnota vodního součinitele a v neposlední řadě také míra provzdušnění betonu a obsah pórů menších než 300 μm . Velmi důležitou roli v otázce mrazuvzdornosti hraje také rozložení těchto velmi jemných pórů v cementové matici, tzv. spacing factor.

Dále byly v teoretické části popsány různé metody používané pro posouzení mrazuvzdornosti betonu a odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, včetně jejich rozdílů. V České republice se jedná zejména o zkoušky dle norem ČSN 73 1322 a ČSN 73 1326. Další významnou metodou, která se začíná používat v evropských zemích je také zkouška dle evropského předpisu CEN/TS 12390-9.

V závěru teoretické části byly definovány termíny opakovatelnosti a reprodukovatelnosti a také zde byly popsány některé vlivy, které negativně ovlivňují výsledné přesnosti zkoušek.

Praktická část této práce byla převážně zaměřena na zkoušení odolnosti betonu vůči působení mrazu pomocí zkoušky podle normy ČSN 73 1322 a dále vůči působení chemických rozmrazovacích látek pomocí zkušební metody A podle normy ČSN 73 1326. Byla vytvořena zkušební tělesa ze tří různých receptur lišících se zejména hodnotami pevností, vodního součinitele a množstvím obsaženého vzduchu. Hlavním cílem praktické části bylo porovnat vliv ošetřování a úpravy povrchu těchto zkušebních těles při zkoušce odolnosti povrchu betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám a získané poznatky využít pro návrh metodiky pro posouzení trvanlivosti betonů. Byly porovnávány výsledky získané ze vzorků, které byly ošetřovány ve třech různých prostředích (vodní prostředí, prostředí s vysokou vlhkostí a laboratorní prostředí) a také výsledky získané ze vzorků, jejichž zkušební plocha vznikla rozříznutím původního zkušebního tělesa a vzorků jejichž boční plochy byly pro omezení negativního vlivu hranového efektu a vzlínání roztoku opatřeny nátěrem na bázi epoxidové pryskyřice. Dále byla v rámci praktické části také provedena zkouška stanovení mrazuvzdornosti betonu. Tato zkouška se prováděla na sadě zkušebních trámců, které byly vystaveny celkem 100 cyklům zmrazování a rozmrazování.

Na základě zjištěných odpadů ze zkušebních ploch těles, které byly ošetřovány a upraveny různými způsoby vyplývá, že nejméně agresivní prostředí pro ošetřování je laboratorní prostředí, kde uložený vzorek není v kontaktu s vodou nebo s vysokou vlhkostí. Z tohoto důvodu měly vzorky uložené v tomto prostředí nejnižší zjištěné hodnoty odpadů. Naopak ošetřování vzorků ve vodním prostředí, popřípadě v prostředí s vysokou vlhkostí vedlo ke zhoršení odolnosti povrchu betonu a tím k větším odpadům. Z vizuálního posouzení vzorků, u kterých byl aplikovaný ochranný nátěr lze vyvodit, že tento nátěr v některých případech zamezuje zvyšování odloupeného materiálu vlivem tzv. hranového efektu. Z tohoto důvodu by bylo vhodné tento nátěr aplikovat kolem bočních ploch krychle zkoušených metodou A podle normy ČSN 73 1326, vždy když jsou jejich odpady porovnávány s odpady zjištěnými na tělesech zkoušených podle metody C.

Zkoušení řezných ploch namísto klasického zkoušení horních ploch těles vytvořených při jejich výrobě se jeví jako dobrá varianta. Tato změna zkušební plochy by mohla pomoci omezit nejistoty v podobě úpravy horního zkušebního povrchu při výrobě těles a také částečně způsobu ošetřování, a tím omezit vlivy úprav a ošetřování povrchu, které negativně ovlivňují přesnost zkoušky.

Z vyhodnocení výsledků také vyplívá, že laboratorní uložení a uložení ve vlhkém prostředí je pro odolnost povrchu betonu lepší než vodní uložení, ve kterém na beton může působit hladová voda, která vyluhováním alkálií z betonového povrchu negativně ovlivňuje jeho odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.

Při pohledu na výsledky porovnání odpadů je zřejmé, že způsob ošetřování a způsob úpravy zkušebních ploch těles hraje zásadní roli z pohledu ovlivnění odolnosti těchto ploch vůči působení chemických rozmrazovacích látek a tedy i výsledných odpadů. Z tohoto důvodu by bylo vhodné, aby byly způsoby ošetřování a úprav zkušebních těles ve zkušebních postupech vždy popsány tak, aby jejich provedení nezpůsobovalo značné rozptyly získaných hodnot a zamezilo se tak zkreslování výsledků.

16 ZDROJE

- [1] SVOBODA, Luboš, Zdenka BAŽANTOVÁ a Milan MYŠKA. *Stavební hmoty*. 3. vydání. Praha, 2013 [cit. 2023-04-22]. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [2] HELA, Rudolf. *Technologie betonu*. Brno, 2005.
- [3] ČSN EN 206 +A2 (732403) *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha, 2021.
- [4] GONG, Fuyuan a Stefan JACOBSEN. Modeling of water transport in highly saturated concrete with wet surface during freeze/thaw. *Cement and Concrete Research* [online]. 2019, (115), str. 294-307 [cit. 2023-03-05]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618301558>
- [5] TEPLÝ, Břetislav a Pavel ROVNANÍK. Účinky mrazu na beton. *Beton TKS* [online]. 2007, 2007, (40), 42-45 [cit. 2023-03-12]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2007-4-42-ucinky-mrazu-na-beton/>
- [6] FAGERLUND, Göran. Frost Destruction of Concrete – A Study of the Validity of Different Mechanisms. *Nordic Concrete Research* [online]. 2018, 2018, 35-54 [cit. 2023-03-18]. ISSN 2545-2819. Dostupné z: <https://sciendo.com/article/10.2478/ncr-2018-0003>
- [7] *Guide to Durable Concrete* [online]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008 [cit. 2023-03-22]. ISBN 978-0-87031-284-7. Dostupné z: http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20201.2R-08%20Guide%20to%20Durable%20Concrete_MyCivil.ir.pdf
- [8] AL-JABARI, Maher. *Integral Waterproofing of Concrete Structures: Advanced Protection Technologies of Concrete by Pore Blocking and Lining* [online]. 2022 [cit. 2023-03-22]. ISBN 9780128243558. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128243541/integral-waterproofing-of-concrete-structures>
- [9] COUFAL, Robert. Odolnost betonu v prostředí s mrazovými cykly. *Materiály pro stavbu* [online]. Praha, 2013, 2013, 32-37 [cit. 2023-03-23]. ISSN 1213-0311. Dostupné z: <https://www.imaterialy.cz/rubriky/casopis-materialy-pro-stavbu/>
- [10] ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha, 1969., změna Z1 z roku 2003

- [11] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK a Tomáš VYMAZAL. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metody, praxe, problémy. *Časopis Beton* [online]. 2017, (98), 42-47 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2017-2-42-stanoveni-odolnosti-povrchu-betonu-proti-pusobeni-vody-a-chemickych-rozmrazovacich-latek-metody-praxe-problemy/>
- [12] ČSN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha, 1985.
- [13] ČSN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, Změna Z1*. Praha, 2003.
- [14] DOHNÁLEK Jiří, Rudolf HELA a Petr TŮMA. Zkoušení mrazuvzdornosti betonu. *Časopis Beton* [online]. 2008, 45, 54-60 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2008-3-54-zkouseni-mrazuvzdornosti-betonu/>
- [15] ČSN 73 1325 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu zkrácenými zkouškami*. Praha, 1972.
- [16] ČSN P CEN/TS 12390-9 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – Odlupování*. 2007.
- [17] CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF). *Materials and Structures* [online]. 1996, (29), 523-528 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.rilem.net/images/publis/119303.pdf>
- [18] KALISTY, Marta a Dorota MALASZKIEWICZ. METODY BADANIA MROZOODPORNOŚCI BETONÓW. OCENA MROZOODPORNOŚCI BETONU Z CEMENTEM HUTNICZYM. *Civil and environmental engineering* [online]. 2010, 293-300 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPB9-0011-0018>
- [19] SZAJ, Pawel a Pawel WIELGOSZ. *FREEZ-THAW RESISTANCE FOR CONCRETE PAVEMENTS – REQUIREMENTS AND TEST METHODS* [online]. 2018, 145-160 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2018/szaj_wielgosz.pdf
- [20] SMITH, Scott, Chunyu QIAO a Prannoy SURANENI. Service-life of concrete in freeze-thaw environments: Critical degree of saturation and calcium oxychloride formation. *Cement and Concrete Research* [online]. 2019, (122), 93-106 [cit. 2023-05-07]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.014>

- [21] ZHANG, Jiake. *Investigation of deterioration of joints in concrete pavements* [online]. 2013 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275823649_Investigation_of_deterioration_of_joints_in_concrete_pavements
- [22] STN 73 1322 *Stanovenie mrazuvzdornosti betónu*. 2016.
- [23] STN 73 1326 *Stanovenie odolnosti povrchu cementového betónu proti posobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok*. 2016.
- [24] CIKRLÉ, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. *Časopis Beton* [online]. 2011, (63), 56-61 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2011-3-56-novy-zpusob-stanoveni-mrazuvzdornosti-betonu-s-vyuzitim-metod-pro-sledovani-poruch-struktury/>
- [25] ČSN 73 1380 *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*. 2007.
- [26] SETZER, M. J. Rilem tc 176-idx internal damage of concrete due to frost action. *Materials and Structures* [online]. 2001, (34), 515-525 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.rilem.net/images/publis/1123.pdf>
- [27] THAULOW, Niels a Sadananda SAHU. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization. *Materials Characterization* [online]. 2004, 123-127 [cit. 2023-05-10]. ISSN 1044-5803. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/222375111_Mechanism_of_concrete_deterioration_due_to_salt_crystallization
- [28] MISÁK, Petr, Tomáš VYMAZAL a Oldřich ŽALUD. Stanovení odolnosti betonu proti působení chl podle ČSN 73 1326 – opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků zkoušek. *Časopis Beton: Mosty a dopravní stavby* [online]. 2013, (76), 120-124 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2013-4-120-stanoveni-odolnosti-betonu-proti-pusobeni-chl-podle-csn-73-1326-opakovatelnost-a-reprodukovatelnost-vysledku-zkousek/>
- [29] VYMAZAL, Tomáš, Oldřich ŽALUD a Petr MISÁK. Vliv zkušebních forem a ošetřování těles na výsledky zkoušek fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik ztvrdlého betonu. *Časopis Beton: Mosty a dopravní stavby* [online]. 2011, (64), 76-79 [cit. 2023-05-13].
- [30] KUOSA, Hannele, Miguel FERREIRA a Markku LEIVO. *Freeze-thaw testing* [online]. 2013 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268146963_Freeze-thaw_testing_-_Literature_review

- [31] IPATTI, Ari. *Peat fly ash as a supplementary cementing material in concrete* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.danskbetonforening.dk/media/ncr/publication-no-07-11.pdf>
- [32] ČSN EN 12350-6 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. 2020.
- [33] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [34] ČSN EN 12390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2020.
- [35] ČSN EN 12390-5 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2020.

17 POUŽITÉ OBRÁZKY

Obrázek 1: Závislost mezi velikostí pórů a teplotou zmrznutí vody [21]	20
Obrázek 2: Vzduchové póry s rozdílnou velikostí spacing factoru L [21]	23
Obrázek 3: Teplotní cyklus metody C	29
Obrázek 4: Schéma těsnění vytvářející vodotěsný prostor nad horním povrchem zkušební krychle [12]	31
Obrázek 5: Vznik zkušebního tělesa z krychle	33
Obrázek 6: Schéma sestavení při zkoušce zmrazování a rozmrazování [16].	34
Obrázek 7: Schéma nádoby se zkušebními tělesy [16]	35
Obrázek 8: Schéma uspořádání PTFE desek ve formě [16]	37
Obrázek 9: Schéma teplotního cyklu zkoušky CF/CDF [16].....	37
Obrázek 10: Schéma sestavení zkoušky RILEM TC 117 FDC [17]	40
Obrázek 11: Schéma zkoušení rychlosti průchodu ultrazvukových impulzů zkoušeným vzorkem.....	42
Obrázek 12: Pracovní diagram metodiky práce	48
Obrázek 13: Typy ošetřování a úpravy vzorků	49
Obrázek 14: Graf křivek zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva	50
Obrázek 15: Řezání vzorku krychle	54

Obrázek 16: Vzniklá zkušební plocha	54
Obrázek 17: Aplikace ochranného nátěru na vzorky krychlí	54
Obrázek 18: Ochranný nátěr kolem bočních ploch vzorku	54
Obrázek 19: Schéma zatěžování zkušebního tělesa jedním břemenem uprostřed	57
Obrázek 20: Zkouška pevnosti v tahu ohybem jedním břemenem uprostřed	57
Obrázek 21: Zkouška pevnosti v tlaku na zlomku trámce	57
Obrázek 22: Zkušební tělesa uvnitř mrazícího boxu	59
Obrázek 23: Graf porovnání hodnot sednutí čerstvého betonu jednotlivých receptur.....	59
Obrázek 24: Zkouška sednutí kužele.....	60
Obrázek 25: Zkouška obsahu vzduchu – tlaková metoda	61
Obrázek 26: Graf porovnání objemových hmotností čerstvého betonu	62
Obrázek 27: Graf porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	62
Obrázek 28: Graf porovnání pevností v tlaku.....	63
Obrázek 29: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 20/25	67
Obrázek 30: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 30/37	67
Obrázek 31: Graf průměrné velikosti odpadu v závislosti na počtu provedených cyklů u receptury C 50/60	67
Obrázek 32: Tělesa uložená ve vlhkém prostředí.....	69
Obrázek 33: Tělesa uložená ve vodním prostředí.....	69
Obrázek 34: Řezy krychlí ošetřované ve vodním prostředí	69
Obrázek 35: Tělesa uložená ve vodním prostředí s ochranným nátěrem.....	69
Obrázek 36: Tělesa uložená v laboratorním prostředí.....	69