



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH METOD PRO STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

THE COMPARISON OF TESTING METHODS USING FOR DETERMINING THE FROST
RESISTANCE OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DAVID KNĚBORT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIK Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. David Kněbort
Název	Porovnání zkušebních metod pro stanovení mrazuvzdornosti betonu
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Odborné knihy, jako jsou např.:

Neville, A. M.: Properties of concrete.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Processes.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Neville, A. M.; Brooks, J. J.: Concrete technology.

Bungey, J. H.; Millard, S. G.; Grantham, M. G.: Testing of Concrete in Structures.

Malhotra, V. M.; Carino, N. J.: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.

Tuzemské i zahraniční odborné články pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206+A1, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN 73 1322, ČSN 73 1380, ASTM C666 / C666M – 15, ČSN ISO 1920-10, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: Nejdříve bude provedena důkladná rešerše pramenů zadané problematiky. Na jejím základě bude velmi krátce popsán beton a jeho vlastnosti, s přihlédnutím ke složení betonu vzhledem k jeho mrazuvzdornosti. Dále budou podrobněji popsány možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu, konkrétně to, jak je popisují české i zahraniční normy. Jednotlivé metody, zejména pak ty, které budou použity v praktické části práce, budou vysvětleny detailněji.

Praktická část: Jako první bude zpracován plán experimentu – definování použitelnosti a také výhod i nevýhod různých zkušebních metod vzhledem k možnostem stanovení mrazuvzdornosti betonu, a to jak vyrobeného v laboratoři, tak již zabudovaného v konstrukci. Poté budou vyrobena zkušební tělesa, na nichž budou aplikovány destruktivní i nedestruktivní metody měření. Z betonových bloků budou následně odebrány jádrové vývrty, na kterých budou také provedeny nedestruktivní i destruktivní testy. Praktická část bude zakončena zpracováním výsledků zkoušek, jejich vyhodnocením a formulací vyplývajících závěrů. Práci se zkušebními lisami a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi hodnocení degradace mechanických vlastností neprovzdušněného betonu v konstrukci vlivem mrazových cyklů.

V první části se zaměřuje na beton, jeho vlastnosti a zkušební metody. Následuje definice mrazuvzdornosti, účinky mrazu na beton ve všech fázích jeho životnosti a možnosti stanovení mrazuvzdornosti dle platných norem. Detailněji popisuje vybrané zkušební metody ke stanovení mrazuvzdornosti.

V praktické části se zaměřuje na stanovení degradace vlastností zkušebních těles vyrobených ve formách a odebraných z konstrukce za použití referenčních i nereferenčních metod.

V závěru porovnává jednotlivé zkušební metody a jejich vhodnost ke stanovení mrazuvzdornosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Neprovzdušněný beton, mrazuvzdornost, modul pružnosti, nedestruktivní zkoušení, degradace, pevnost, chemické rozmrazovací látky

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the possibilities of evaluating the degradation of mechanical resistance of non-air-entrained concrete in the structure by frost cycles.

The first part is focused on concrete, its resistance and test methods. This is followed by the definition of frost resistance, the effects of freeze-thaw on concrete at all stages of its service life and the possibilities of determining freeze-thaw resistance according to current standards. It describes in more detail selected test methods for determining frost resistance.

In the practical part, it focuses on the determination of degradation resistance of test specimens made in molds and taken from the structure using reference and non-reference methods.

In conclusion, it compares the different test methods and their suitability for the determination of freeze-thaw resistance.

KEYWORDS

Non-air-entrained concrete, frost resistance, modulus of elasticity, non-destructive testing, degradation, strength, de-icing chemicals

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. David Kněbort *Porovnání zkušebních metod pro stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Brno, 2021. 76 s., 11 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Porovnání zkušebních metod pro stanovení mrazuvzdornosti betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. David Kněbort
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Porovnání zkušebních metod pro stanovení mrazuvzdornosti betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. David Kněbort
autor práce

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D., za příležitost zúčastnit se tohoto projektu, poskytnuté podklady, odborné rady a konzultace. Dále bych chtěl poděkovat všem zúčastněným, kteří se podíleli na procesech od výroby betonu až po odběr vzorků a jejich zkoušení. V neposlední řadě bych poděkoval své rodině a přátelům za podporu při celé délce mého studia.

Tato diplomová práce byla zpracována v rámci řešení projektu GAČR č. 19-22708S „*Nové přístupy k predikci trvanlivosti provzdušněného betonu prostřednictvím zjišťování obsahu a rozložení vzduchových pórů a mrazuvzdornosti vrstvy betonu*“

OBSAH

ÚVOD	10
CÍLE PRÁCE	11
A. TEORETICKÁ ČÁST	12
1. BETON	12
1.1 SLOŽENÍ BETONU	12
1.2 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU	14
1.2.1 PEVNOST BETONU V PROSTÉM TAHU	15
1.2.2 PEVNOST BETONU V PŘÍČNÉM TAHU	15
1.2.3 PEVNOST BETONU V TLAKU	16
1.2.4 PEVNOST V TAHU OHYBEM	17
1.2.5 STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	18
1.2.6 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	19
1.2.7 HLOUBKA PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU	24
2. MRAZUVZDORNOST BETONU	25
2.1 PROCESY PŮSOBENÍ MRAZU NA BETON	26
2.1.1 ÚČINKY MRAZU V PRŮBĚHU TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ	27
2.1.2 ÚČINKY MRAZU NA ZTVRDLÝ BETON	27
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MRAZUVZDORNOST	30
2.2.1 KAMENIVO	30
2.2.2 CEMENT	30
2.2.3 VODNÍ SOUČINITEL	31
2.2.4 PŘÍSAKY A PŘÍMĚSY	32
2.3 METODY ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI	34
2.3.1 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU	34
2.3.2 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ – PORUŠENÍ VNITŘNÍ STRUKTURY	35
2.3.3 ZRYCHLENÉ ZKOUŠKY MRAZUVZDORNOSTI	36
2.3.4 ODOLNOSTI PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ – ODLUPOVÁNÍ ...	36
2.3.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRHCU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHLORIDŮ	37
2.3.6 OBSAH VZDUCHU – TLAKOVÉ METODY	39
2.3.7 AIR-VOID ANALYSER	39
2.4 METODY ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI V ZAHRANÍČÍ	40
2.4.1 EVROPA	40

2.4.2	SEVERNÍ AMERIKA.....	41
B.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	42
3.	CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTU	42
3.1	POPIS EXPERIMENTU	42
3.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	42
3.2.1	Receptura čerstvého betonu a provedené zkoušky	43
3.2.2	Výroba zkušebních těles a bloků.....	45
3.2.3	Vlastnosti betonu po 28 dnech	49
4.	LABORATOTNÍ MĚŘENÍ A ZKOUŠENÍ TĚLES	52
4.1	PEVNOST BETONU V PROSTÉM TAHU	53
4.2	PEVNOST BETONU V PŘÍČNÉM TAHU	55
4.3	PEVNOST BETONU V TAHU OHYBEM.....	57
4.1	RELATIVNÍ DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	60
4.1.1	Ultrazvuková impulzová metoda	60
4.1.2	Rezonanční metoda.....	61
4.2	STATICÝ MODUL PRUŽNOSTI	62
5.	SHRnutí VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ METOD.....	66
	ZÁVĚR.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	73
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM PŘÍLOH	76

ÚVOD

Beton jako materiál dnes lze nalézt v mnoha podobách a své uplatnění má skrze celé odvětví stavitelství. Není to ale jen stavitelství jako takové. Má své uplatnění i například v uměleckých směrech. Při návrhu konstrukcí se klade největší důraz na pevnostní a přetvárné vlastnosti betonu. Je však nutné brát v úvahu také jeho trvanlivost. Většina konstrukcí je za dobu své životnosti vystavena mnoha vnějším činitelům, které nepříznivě ovlivňují životnost a provozuschopnost. Především se jedná o vlhkost, mechanické působení vody, změny teplot a chemicky agresivní prostředí [1].

Beton je materiál s částečně otevřenou strukturou, která umožňuje vodě prostupovat do nebo z vnitřní struktury. Pokud je takový materiál vystaven cyklické změně teplot pod bod mrazu, může docházet k mechanickému porušení vnitřní struktury vlivem objemových změn vody. V kombinaci s agresivními chemickými látkami, především s chloridy dochází k rychlejší degradaci povrchových vrstev. Všechny tyto jevy mohou značně snižovat trvanlivost konstrukce a narušit její provozuschopnost a bezpečnost [2].

Velký vliv na mrazuvzdornost betonu má samotná pórovitost. Nejde jen o obsah vzduchových pórů v betonu, ale jejich rovnoměrné rozdělení ve struktuře a také jejich tvar a velikost. Při užití provzdušněných betonů tak dochází ke zlepšení mrazuvzdornosti, kdy póry slouží jako prostor pro objemové změny vody. To vede k výrazně menšímu rozrušování cementového tmelu [1].

Mrazuvzdornost betonu lze v dnešní době posoudit více způsoby. Otázkou je však jejich přesnost, respektive shodnost s reálnými podmínkami, kterým je konstrukce vystavena. Přístroje vhodné k měření musí umět vyvolat podmínky podobné reálným, ale ve výrazně kratším časovém intervalu. Následně je možné využít metody destruktivní i nedestruktivní k určení změn vlastností betonu v čase a jejich porovnání s referenčními hodnotami [1] [3].

V případě zjišťování mrazuvzdornosti v konstrukci je situace ještě složitější. Předchozí předpoklady počítají s porovnáním vlastností materiálu před a po vystavení mrazovým prostředím. Dále je to potřeba relativně velkého počtu těles, které nemusí být reálné pro odběry ze stávající konstrukce. Vůči této překážce by přispělo větší využití nedestruktivních metod. Pro jejich využití chybí norma, která by jejich prostřednictvím jasně definovala posouzení mrazuvzdornosti [4].

CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je stanovení degradace neprovzdušněného betonu pomocí těles vystaveným cyklickému zmrazování a rozmrazování a jejich interpretace.

Součástí teoretické části je úvod do problematiky betonu, jeho složení, vlastností a metod zkoušení. Následně je na těchto základech představen úvod do problematiky mrazuvzdornosti, tedy mrazových procesů na čerstvý i ztvrdlý beton, vliv složení na mrazuvzdornost a její samotné stanovení. Obě tyto kapitoly popisují možné postupy stanovení jednotlivých parametrů nutných k posouzení mrazuvzdornosti v rámci experimentální části s odkazy na příslušné platné normy. Dále jsou ve stručnosti popsány vybrané zkušební metody.

Praktická část se zabývá měřením vlastností těles z neprovzdušněného betonu. Pro zkoušení byla část těles vyrobena pomocí forem a část jádrovým vrtáním z betonového bloku. Na tělesech byly v průběhu mrazových cyklů měřeny materiálové vlastnosti pomocí destruktivních i nedestruktivních metod. Na základě těchto hodnot je stanovován stupeň degradace betonu vůči hodnotám těles referenčních.

Jako výstupem práce je poté porovnání výsledků měření degradace materiálových vlastností pro různé tvary těles při určitých zkušebních metodách. Na základě těchto výsledku dochází ke srovnání vhodnosti jednotlivých nedestruktivních i destruktivních metod pro stanovení mrazuvzdornosti a jejich citlivosti.

A. TEORETICKÁ ČÁST

1. BETON

Beton jako stavební materiál dnes patří mezi nejpoužívanější a nejdůležitější. Je využíván skrze většinu stavebních oborů a do velké míry nahrazuje dříve používané materiály jako např. kámen nebo cihelné prvky. V určitých ohledech je využíván i více než dřevo či ocel. Popřípadě s těmito materiály tvoří vhodnou kombinaci tak, aby byly co nejvíce využity výhody obou či více materiálů [5].

Beton patří do kategorie umělých kompozitních materiálů. Mezi hlavní složky patří pojiva, především hydraulická v podobě cementu. Následně plniva jakožto písky, šterky a případně uměle vyrobené kamenivo. Dále je to voda, kterou lze rozdělit na záměsovou a ošetřovací. Voda záměsová plní v betonu tři základní funkce. Upravuje zpracovatelnost čerstvého betonu, spojení vody a cementu tvoří cementovou matici, která obalí a spojí zrna plniva a podílí se na hydratační reakci s pojivem. Hydratace cementu je chemický proces, při kterém beton přechází z plastické fáze do tuhého prvku podobnému přírodním horninám, a tak získává svou pevnost a odolnost. Voda ošetřovací částečně nahrazuje vodu vyschlou vlivem počasí, především přímého oslunění, vyšších teplot a větru, a to zejména na povrchu betonu. V neposlední řadě mohou být součástí přísady a příměsi, které ovlivňují vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu [1].

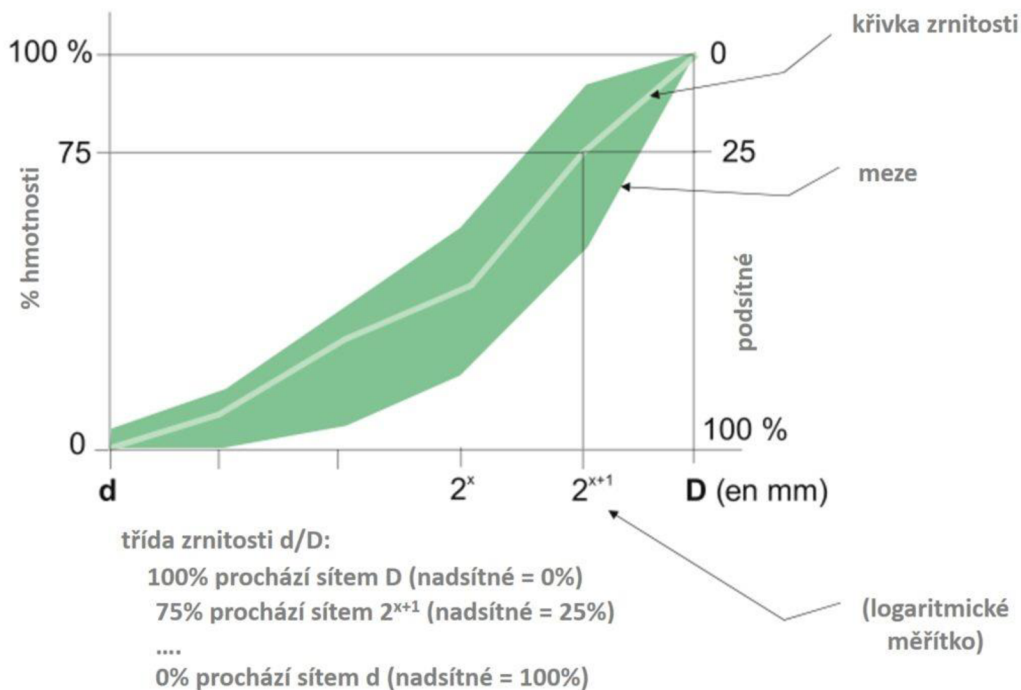
1.1 SLOŽENÍ BETONU

Cement v betonu plní funkci pojiva jednotlivých složek. Ve spojení s vodou vzniká cementový tmel, který v čase tuhne a tvrdne. Těmito procesy se postupně cementový tmel mění v cementový kámen. Proces přeměny může probíhat na vzduchu nebo ve vodním prostředí. Po přeměně cementový kámen nabývá pevnosti a stálosti ve většině prostředí, tzn. i při dlouhodobém vystavení vodě [6].

Vysokých hodnot fyzikálně mechanických vlastností betonu lze dosáhnout jen při vhodném vodním součiniteli, tedy při vhodném poměru vody vůči cementu. Zároveň cement jako surovina se liší svojí kvalitou a složením. Při návrhu je tedy nutné brát v potaz pevnostní třídu cementu a jeho dodatečné vlastnosti vzhledem ke složení, viz norma pro klasifikaci ČSN EN 197-1 [1] [7].

Kamenivo v betonu zaujímá až 80 % jeho objemu a tvoří pevnou kostru. Frakční rozložení kameniva je navrhováno tak, aby se co nejvíce přiblížilo ideální křivce,

viz Obr. 1. Tím se docílí správného zaklínění zrn kameniva mezi sebou, nejvyšší možné objemové hmotnosti, a tedy i pevnosti betonu. Samotné vlastnosti kameniva jako suroviny mají značný vliv na trvanlivost a ostatní fyzikálně mechanické vlastnosti betonu [6].

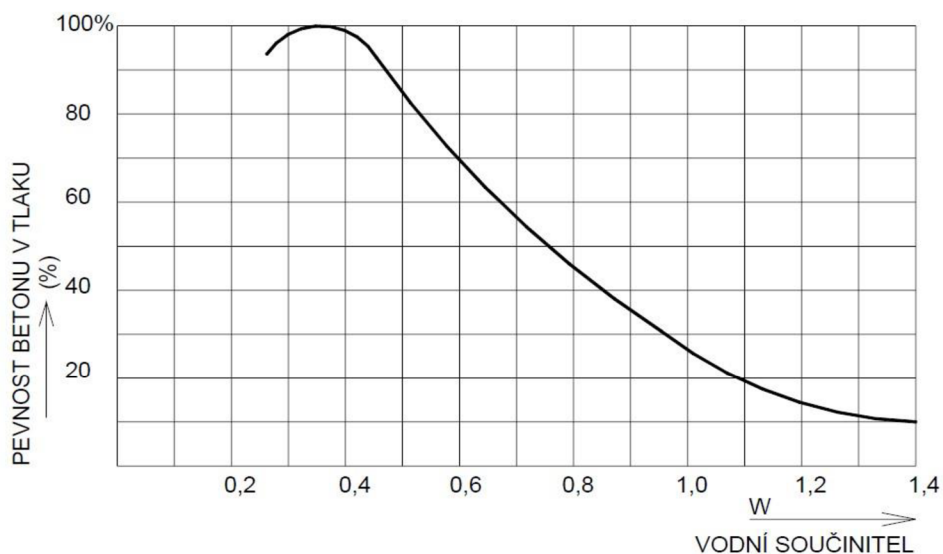


Obr. 1: Ideální křivka zrnitosti [8].

Kamenivo pro použití do čerstvého betonu musí být pevné a odolné proti povětrnostním vlivům. Musí být stále při změnách teploty a vlhkosti. Nesmí obsahovat jílové částice, organické a chemické látky, které mohou nepříznivě ovlivňovat chemické procesy při tvrdnutí betonu, a tak redukovat výslednou pevnost. Zároveň mohou narušit vložené prvky v podobě výztuže. Zrna kameniva musí splňovat vhodný tvarový index. Vhodnost kameniva pro výrobu čerstvého betonu specifikuje norma ČSN EN 12620+A1 [5] [9].

Voda se podílí na hydratačním procesu cementu, kdy pro samotnou reakci je potřeba přibližně 20-25 % hmotnosti vůči cementu. Dalších zhruba 15 % vody je ve ztvrdlém betonu fyzikálně vázáno. Přebytek vody, respektive vysoký vodní součinitel snižuje kvalitu betonu s ohledem na trvanlivost a pevnost, viz Obr. 2 [1].

Voda musí splňovat požadavky dle ČSN EN 1008 [10] na vlastnosti a čistotu, tedy nesmí obsahovat organické a chemické látky, které mohou narušit hydratační proces [11].



Obr. 2: Závislost pevnosti betonu vzhledem k vodnímu součiniteli [11].

1.2 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO BETONU

Beton použit jako konstrukční materiál pro výrobu konstrukčních prvků je za svou životnost vystaven mnoha vlivům, které mohou negativně ovlivňovat jeho vlastnosti nebo zapříčinit jeho porušení či destrukci. Především se jedná o okolní procesy, kam spadají povětrnostní vlivy ať na konstrukci či její okolí a údržbu s nimi spojenou. Dále mechanická napětí statická či dynamická od vlastní konstrukce a jejího provozu [1].

Mezi nejdůležitější vlastnosti konstrukčních betonů patří jejich přetvárné a mechanické vlastnosti a trvanlivost pro navrhované prostředí. Trvanlivost lze definovat jako provozuschopnost konstrukce v určitém prostředí za dobu její životnosti. Z této definice je možné odvodit, že se nejedná o materiálovou charakteristiku, a tak je jí určení relativně obtížné. Jde tedy spíše o chování konstrukce v určitém prostředí, které je definováno normou [12]. Tato norma tak předepisuje dle prostředí požadavky na beton.

Obecně lze tyto vlastnosti rozdělit na objemovou hmotnost, pevnost, přetvoření, tepelnou vodivost, nasákavost, vzlínavost, objemové změny, a to především dotvarování a smršťování, trvanlivost a odolnost proti vnějším vlivům jako např. chemické látky, žár, mráz, koroze [11].

Následující podkapitoly se zabývají jen vybranými metodami a podrobněji se věnují zkušební metodám, které souvisí s praktickou částí této diplomové práce. Kromě zmíněných metod existuje mnoho jiných, které mohou být využity pro stanovení dalších, případně následně zmíněných vlastností.

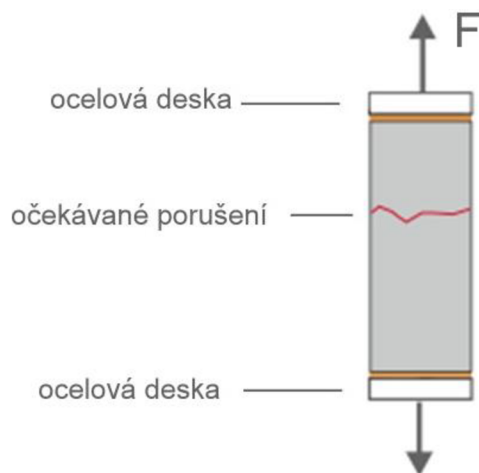
1.2.1 PEVNOST BETONU V PROSTÉM TAHU

Pevnost betonu v prostém tahu R_t je možné považovat za zkoušku jakosti betonu. Při srovnání s pevností v tlaku dosahuje beton přibližně 10x menších hodnot. Jde většinou o zkoušku prováděnou výjimečně v rámci specifických požadavků. Tělesa vhodná pro zkoušku jsou trámce s příčnými rozměry 100 x 100 mm. Je možné použít i tělesa válcová nebo tělesa z jádrového vrtání. Délka tělesa by měla odpovídat minimálně dvojnásobku příčného rozměru. Vždy je třeba provést zkoušení alespoň na třech tělesech. Při nestandardním porušení se výsledek tělesa vyřadí. Zkoušení se řídí již neplatnou normou ČSN EN 73 1318 [13].

Před zahájením zkoušky se na koncové plochy tělesa nalepí ocelové desky s úpravou pro kloubové upevnění do trhačích lisu. Přilepení desek na těleso musí být precizní s ohledem na geometrii. Spoj i deska musí odpovídat vyšší pevnosti než zkoušené těleso, tzn. dojde k porušení tělesa viz, Obr. 3. Výsledná pevnost v tahu se vyjádří dle vztahu [13]:

$$R_t = \frac{F}{A}$$

- R_t pevnost v prostém tahu [MPa],
- F maximální dosažená síla při porušení tělesa [N],
- A průřezová plocha zatěžovaného tělesa [mm²].



Obr. 3: Těleso pro zkoušku v prostém tahu [14].

1.2.2 PEVNOST BETONU V PŘÍČNÉM TAHU

Pevnost betonu v příčném tahu f_{ct} probíhá na válcových tělesech dle normy ČSN EN 12390-6 [15]. Tělesa jsou zatížena po délce tlakovým namáháním na velmi malé ploše. Taková namáhání vyvozují kolmou tahovou sílu. Základní válcové těleso odpovídá průměru

150 mm a délce 300 mm. Lze použít i tělesa získána jádrovým vrtáním, které mají minimální štíhlost 1. Je možné zkoušet i tělesa hranolová a krychlená. Avšak pevnost těchto těles vychází přibližně o 10 % vyšší, než je tomu u těles válcových [15].

Před zahájením zkoušky se provede očištění styčných ploch zkušebního tělesa a lisu. Těleso se centricky usadí do zkušebního zařízení a konstantní rychlostí dochází k zatěžování do porušení. Porušená tělesa se zkontrolují, zda jsou porušena předpokládaným způsobem. Výsledná pevnost v příčném tahu se vyjádří dle vztahu [15]:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

- f_{ct} pevnost v příčném tahu [MPa],
- F maximální dosažená síla při porušení tělesa [N],
- l délka zkušební dotykové plochy [mm],
- d příčný rozměr tělesa [mm].

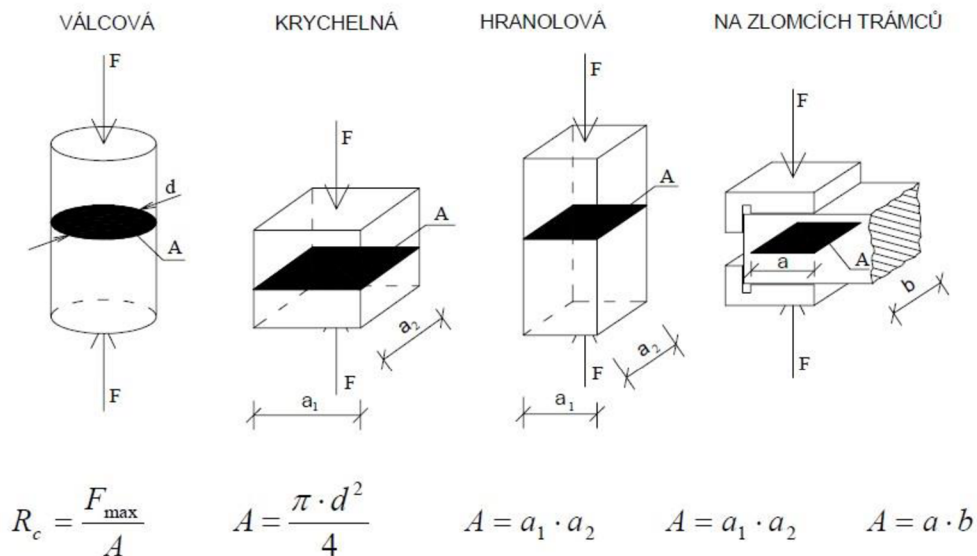
1.2.3 PEVNOST BETONU V TLAKU

Pevnost betonu v tlaku f_c je považována za jeho základní charakteristiku. Zkoušení se provádí na základě normy ČSN EN 12390-3 [16]. Pevnost v tlaku lze rozdělit dle tvaru a rozměrů tělesa na krychelnou, válcovou a hranolovou, viz Obr. 4. Poměr délky k šířce základny pro válcová tělesa bývá 1:1 nebo 2:1, pro hranolová tělesa 3:1 nebo 4:1. Krychelná pevnost není shodná s válcovou nebo hranolovou. Vlivem větší štíhlosti dochází k vyčerpání části pevnosti ztrátou stability prvku 2:1 až 4:1 a materiál nedosahuje takové pevnosti jako u těles 1:1. Pevnosti krychelné, válcové a hranolové jsou na základě vztahů mezi sebou konvertibilní [16].

Před zahájením zkoušky musí být styčné plochy tělesa řádné upraveny a plochy styčných desek lisu očištěny. Po vložení tělesa do lisu je nepřípustné vkládat jiné prvky mezi styčné plochy lisu a tělesa. Zatěžování probíhá konstantní rychlostí na plochu do porušení. Tělesa vyhovující zkoušce musí odpovídat nejen číselnému vyjádření, ale také požadovanému tvaru porušení. Nepravidelné porušení či odštípnutí je nevyhovující. Výsledná pevnost betonu v tlaku se vyjádří dle vztahu [16]:

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

- f_c pevnost v tlaku [MPa],
- F maximální dosažená síla při porušení [N],
- A_c průřezová plocha zatěžovaného tělesa [mm²].



Obr. 4: Zkouška pevnosti v tlaku [6].

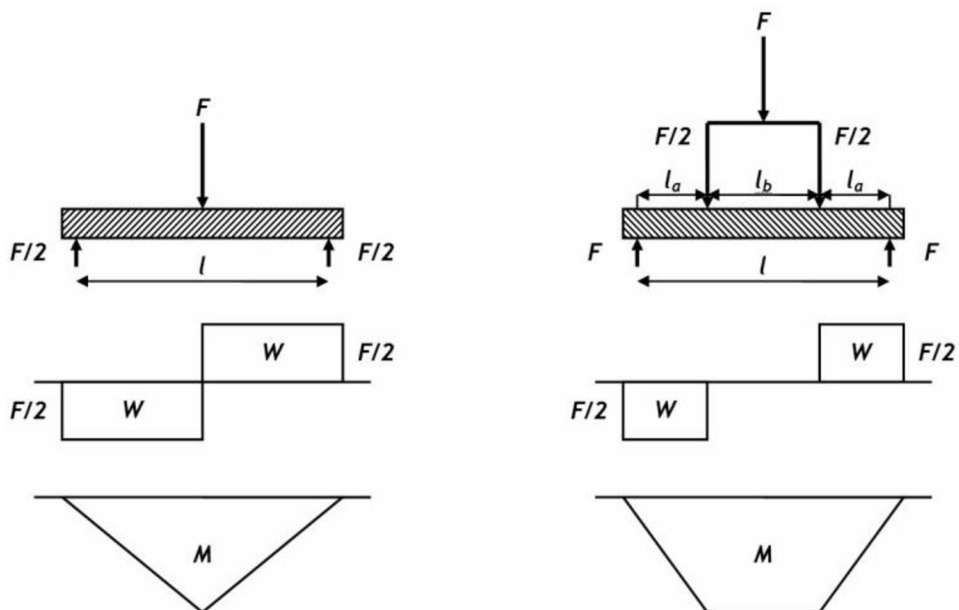
1.2.4 PEVNOST V TAHU OHYBEM

Pevnost v tahu ohybem f_{cf} probíhá na trémcových tělesech, která jsou zatížena ohybovým momentem dle normy ČSN EN 12390-5 [17]. Trámec je uložen na dvou podporách a je konstantně zatěžován jednou (tříbodově) nebo dvěma silami (čtyřbodově) na horním povrchu tělesa, respektive kolmo na směr ukládání betonu, viz Obr. 5. V krajních vláknech tělesa dochází ke koncentraci největších napětí. V uvedeném případě jsou dolní vlákna tažena a horní tlačena. Při dosažení meze pevnosti dochází k vyčerpání únosnosti a porušení vláken v místě největšího ohybového momentu [11] [17].

U čtyřbodového uspořádání je možné předpokládat vyšší vypovídací hodnotu. Těleso se poruší mezi silami, v části s nulovou posouvající silou. Při tomto uspořádání nejsou výsledky dle předchozích předpokladů ovlivněny smykem [11]. Výsledná pevnost ze zkoušky čtyřbodovým ohybem se stanoví dle vztahu [17]:

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

- f_{cf} pevnost v tahu ohybem [MPa],
- F maximální dosažená síla při porušení [N],
- l vzdálenost mezi body uložení [mm],
- d_1, d_2 příčné rozměry tělesa [mm].



Obr. 5: Vlevo třibodový ohyb, vpravo čtyřbodový ohyb [17].

1.2.5 STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Statický modul pružnosti v tlaku E_c charakterizuje přetvárné vlastnosti materiálu v tlaku. Odvození probíhá z poměrného přetvoření při známém zatížení dle Hookova zákona. Pro zkoušení dle ČSN ISO 1920-10 [18] je nutné mít k dispozici minimálně 5 těles válcových, případně také hranol nebo těleso získané jádrovým vrtáním, se štíhlostmi v mezích 2 až 4. Pro stanovení horního zatěžovacího napětí z pevnosti v tlaku (1/3 jeho hodnoty) se využijí 3 tělesa, zbylá tělesa použijeme pro samotnou zkoušku. Odhad horního zatěžovacího napětí pro tělesa odebraná z konstrukce je možné stanovit jiným postupem, který musí být uveden v protokolu [18].

Na základě rozměrů tělesa se určí vzdálenost zkušebních bodů, respektive délka základny. Na tyto místa se upevní rám opatřen snímacím zařízením deformací, které je aretováno. Poté se těleso vloží do zatěžovacího lisu a měřící zařízení se odjistí. Požadavky na styčné plochy tělesa a lisu odpovídají zkoušce pevnosti v tlaku, viz 1.2.3. Těleso se zatíží základním napětím po předepsanou dobu a odečte se hodnota přetvoření. Poté se plynule zvyšuje napětí až do určené horní hranice a znovu se provede odečet přetvoření. Pokud jsou zjištěné hodnoty deformací v normou daných mezích (neliší se od svého průměru o více než 20 %), je zkušební těleso vycentrováno a dále se pokračuje ve zkoušení. Celkem se provedou tři zatěžovací cykly. Prvotní dva cykly jsou předběžné a slouží k ustálení deformací. Hodnoty ze třetího cyklu vstupují do výpočtu statického modulu pružnosti. Výsledný statický modul pružnosti v tlaku E_c [MPa] se stanoví dle vztahu [18]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

- E_c statický modul pružnosti v tlaku [MPa],
- σ_a horní zatěžovací napětí [MPa],
- σ_b dolní zatěžovací napětí [MPa], vždy 0,5 MPa,
- ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-],
- ε_b průměrné poměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-].

Spolu s touto normou [18] platí zároveň norma ČSN EN 12390-13 [19], která obsahuje dvě metody, pomocí kterých lze modul pružnosti stanovit – metodu A a metodu B. Metoda B se od postupu normy [18] liší pouze v detailech, jako je délka čekání na dolní i horní hladině napětí. Větší rozdíl je v postupu dle metody A, který umožňuje stanovit také počáteční sečnový modul pružnosti z naměřených hodnot prvního cyklu [19]. Obě metody v normě [19] vykazují statisticky rozdílné výsledky.

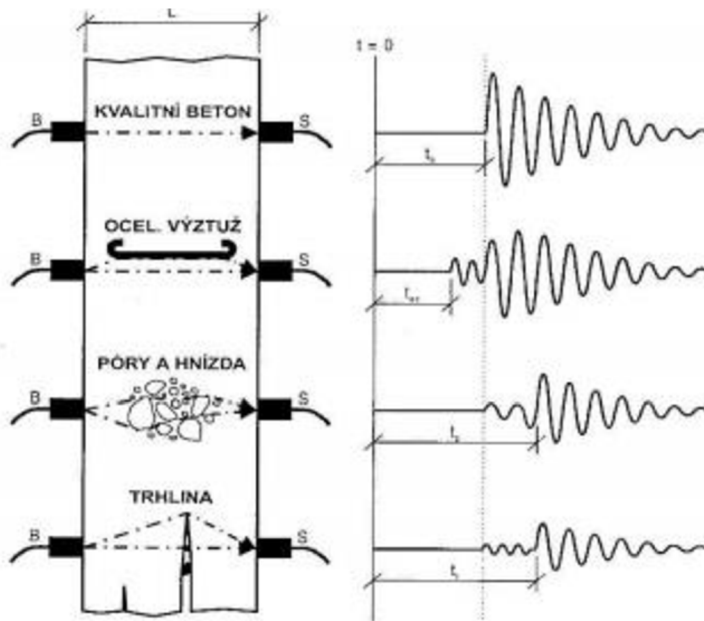
Další možnou metodou je stanovení statického modulu pružnosti ze zkoušky betonu v tahu ohybem dle ČSN 73 6174 [20]. Tato metoda je však v praxi využívána jen výjimečně. Při zkoušce je trámec zatěžován po stále se zvyšujících stupních čtyřbodovým ohybem a zároveň probíhá měření průhybů tělesa uprostřed jeho rozpětí [20].

1.2.6 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Obdobně jako statický modul pružnosti, je dynamický modul pružností základní přetvárnou charakteristikou. V porovnání se statickým modulem pružnosti je možné jej odvodit za pomocí nedestruktivních metod. Především se jedná o ultrazvukové a rezonanční metody [21].

Ultrazvuková impulzová metoda je prováděna na základě ČSN 73 1371 [22]. Principem této metody je měření doby průchodu ultrazvukového impulzu vlněním skrze materiál. Pro účely stavebnictví se nejčastěji užívají frekvence od 20 kHz do 150 (500) kHz.

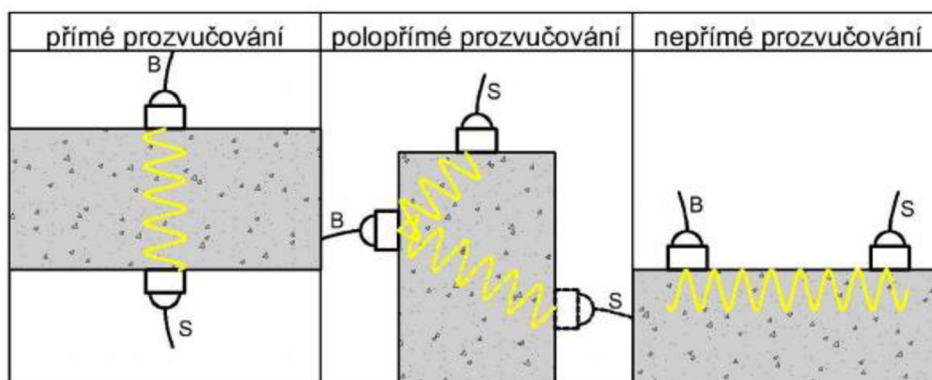
Výhodou této metody je měření relativně silných konstrukcí. Z naměřených hodnot lze odvodit rovnoměrnost betonu, jeho pevnost a dynamický modul pružnosti. Zároveň může být nápomocná pro detekci trhlin a dutin v betonu, viz Obr. 6. Velice výhodná je také pro sledování změn vlastností v čase vzhledem ke své rychlosti a jednoduchosti. Tento fakt lze aplikovat pro sledování změn při zkouškách mrazuvzdornosti i mezi jednotlivými cykly [23].



Obr. 6: Vliv kvality, případně vyztužení betonu na rychlosti šíření a tvar impulzu ultrazvukového vlnění [24].

Před zahájením zkoušení je nutné důkladně zdokumentovat zkoušené těleso vzhledem k jeho rozměrům, hmotnosti a objemové hmotnosti. Dále je nutná kalibrace přístroje na etalonu, tzn. měření mrtvého času [22].

Při testování je důležité na základě tvaru a velikosti konstrukce a místa na konstrukci určit frekvenci a polohu sond, a tedy způsob měření. Budič a snímač lze umístit ve třech různých polohách vzhledem k sobě, viz Obr. 7. Jedná se o přímé prozvučování, kdy jsou sondy umístěny naproti sobě. Dále o polopřímé, kde jsou sondy umístěny buď na protilehlých stranách, nikoliv však kolmo proti sobě, anebo na sousedních stranách. Poslední možností je prozvučování nepřímé, kdy jsou sondy na stejném povrchu konstrukce a probíhá tzv. trasovací měření [22]



Obr. 7: Možné polohy sond při prozvučování [24].

Základním výstupem při použití ultrazvukového impulzu je jeho rychlost průchodu konstrukcí. Tento parametr se stanoví dle vztahu [22]:

$$v_L = \frac{L}{T}$$

- v_L rychlost průchodu UZ impulzu [km/s],
 L délka měřicí základny [mm],
 T čas průchodu měřicí základnou [μ s], zároveň:

$$T = T_L \pm t_{kor}; \quad t_{kor} = t_e - E$$

- T_L čas od vyslání signálu budičem do jeho detekce snímačem [μ s],
 t_{kor} korekce doby průchodu zjištěna při kalibraci přístroje a měřením tzv. mrtvého času na etalonu [μ s],
 t_e doba průchodu UZ impulzu etalonem [μ s],
 E časová charakteristika etalonu [μ s].

Dalším parametrem, který je možné určit, je dynamický modul pružnosti dle vztahu [22]:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k_n^2}$$

- E_{cu} dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
 ρ objemová hmotnost betonu [kg/m^3],
 v_L rychlost průchodu UZ impulzu [km/s],
 k_n součinitel rozměrnosti prostředí [-].

Rozměrnost prostředí je parametr určený na základě rozměrů konstrukce, rychlosti průchodu UZ impulzu a jejich vzájemném poměru. Prutové konstrukce lze považovat za jednorozměrné, deskové konstrukce za dvojrozměrné a konstrukce, u kterých žádný rozměr výrazně nepřevažuje jiný, za trojrozměrné. Pro konstrukce jednorozměrné se uvažuje součinitel k_1 roven jedné. Pro ostatní prostředí je nutný přepočten s použitím Poissonova čísla ν_{cu} dle vztahů [22]:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_{cu}^2}}; \quad k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) \cdot (1 - 2\nu_{cu})}}$$

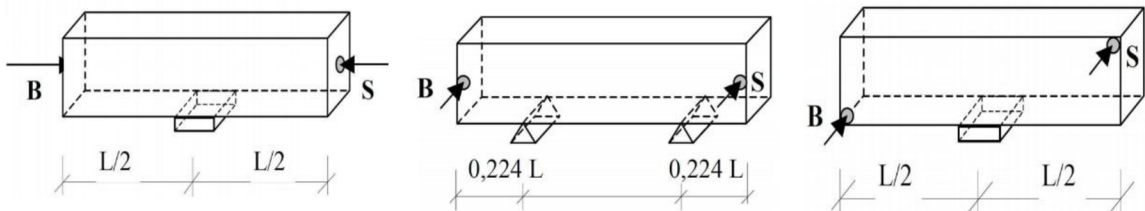
Na základě dynamického modulu pružnosti lze dne normy ČSN 73 2011 [25] určit statický modul pružnosti pomocí zmenšovacího součinitele. Při užití zmenšovacího součinitele

statické moduly vychází vyšší, než je tomu ve skutečnosti. S touto eventualitou je třeba při posouzení počítat a vždy je vhodné provést zkoušky na tělesech pro upřesnění hodnot získaných in-situ [21].

Za pomocí této metody jsme schopni odvodit i další vlastnosti betonu, např. pevnost. Tyto vlastnosti již ale nemají s průchodem UZ impulzu fyzikální souvislosti a jsou založeny na velkém souboru experimentálních výsledků a empirií.

Rezonanční metoda je prováděna na základě normy ČSN 73 1372 [26]. Principem je měření hodnot rezonančního kmitání na tělese, pro které lze odvodit vztah mezi pružnými charakteristikami materiálu a jeho vlastními frekvencemi. Vlastní frekvence označuje jev, kdy vzrůstá amplituda vynuceného kmitání tělesa k maximu. Maxima je dosaženo za předpokladu, že budící síla odpovídá vlastní frekvenci tělesa [23].

Pro měření se nejčastěji používají tělesa tvaru hranolu nebo válce. Za pomocí rázového kladívka můžeme zkušební těleso rozkmitat třemi způsoby v závislosti na podepření, poloze snímače a budiče. Poté probíhá měření vlastní frekvence podélného kmitání f_L , příčného kmitání f_T a kroutivého kmitání f_T , viz Obr. 8, které jsou závislé na tvaru, velikosti objemové hmotnosti a modulu pružnosti zkoušeného tělesa. Rezonanční metoda je vhodná též pro určení změn vlastností betonu v čase, rovnoměrnosti materiálu tělesa či prvku, dynamického Poissonova čísla a odhalení, zda v tělese nejsou trhliny a dutiny [23].



Obr. 8: Uložení a poloha snímačů. Zleva rezonanční frekvence podélná, příčná a kroutivá [26].

Dynamický modul pružnosti v tlaku je možné určit jak z frekvence podélné, tak i příčné. Při správném postupu měření by hodnoty modulu pružnosti měly vycházet přibližně stejné. Pokud je rozdíl větší než 10 %, je možné předpokládat chybu měření nebo vnitřní poškození struktury. Přednostně je doporučeno použít výpočet z podélné frekvence dle normy ČSN EN 73 1372, který je určen vztahem [26]:

$$E_{cr,L} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$$

- $E_{cr,L}$ dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
- L délka tělesa [m],
- f_L první vlastní frekvence podélného kmitání [kHz],
- ρ objemová hmotnost [kg/m³].

Výpočet z příčné frekvence dle normy ČSN EN 73 1372 je určen vztahem [26]:

$$E_{cr,f} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$$

- $E_{cr,f}$ dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
- c_1 korekční součinitel zohledňující vliv smyku a setrvačných momentů [-], jehož hodnoty jsou uvedeny v normě [26],
- L délka tělesa [m],
- f_f první vlastní frekvence příčného kmitání [kHz],
- ρ objemová hmotnost [kg/m³],
- i poloměr setrvačnosti příčného řezu k ose kolmé na rovinu kmitání [m].

Dynamický modul pružnosti ve smyku je možné z vlastní kroutivé frekvence určit dle vztahu [26]:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho$$

- G_{cr} dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa],
- k součinitel zohledňující tvar příčného řezu [-], jehož hodnoty jsou uvedeny v [26],
- L délka tělesa [m],
- f_t první vlastní frekvence kroutivého kmitání [kHz],
- ρ objemová hmotnost [kg/m³].

Dynamické Poissonovo číslo je možné určit na základě dynamického modulu v tlaku a tahu a dynamického modulu ve smyku dle vztahu [26]:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right)$$

- ν_{cr} dynamické Poissonovo číslo [-],
- E_{cr} dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
- G_{cr} dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa].

1.2.7 HLOUBKA PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU

Hloubka průsaku tlakovou vodou, respektive odolnost betonu proti tomuto průsaku je významná charakteristika pro stavby vodohospodářského typu. Neméně důležitá je i pro konstrukce betonové a železobetonové, které jsou dlouhodobě vystaveny povětrnostním vlivům a agresivním prostředím vzhledem k jejich trvanlivosti [11].

Zkoušení je prováděno na základě normy ČSN EN 12390-8 [27]. Pro zkoušení se využívají tělesa ve tvaru hranolu, krychle nebo válce o minimálním rozměru hrany 150 mm. Po odformování se plocha vystavená tlakové vodě zdrsní a těleso se uloží do vody. Minimální staří betonu pro zkoušku je 28 dní. Těleso se upne do zkušebního zařízení a je vystaveno vodnímu tlaku o hodnotě 500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodin. Následně se těleso rozlomí při zkoušce příčným tahem, lomová plocha se nechá krátce oschnout a změří se hodnota průsaku vody tělesem [27].

2. MRAZUVZDORNOST BETONU

Pojmu mrazuvzdornost betonu se rozumí jako odolnost betonu odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazání za přítomnosti vody. Tato odolnost betonu je stěžejní pro trvanlivost betonu vystavenému povětrnostním vlivům. Přídavné napětí v betonu vzniká vlivem změny teploty do záporných hodnot a s ní spojené změny skupenství kapilární vody z kapalného na pevné [2]. Voda obsažená v pórech při tomto procesu zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %. Při tomto jevu vznikají přídavná vnitřní napětí, která mohou dosahovat až desítek MPa a tím dochází k poškození vnitřní struktury betonu. V takovém případě se nevratně sníží materiálové vlastnosti [28].

Sledování procesů, jak mrazové cykly působí na beton, není v žádném případě novinka poslední doby. Již v 50. letech 20. století u nás probíhaly experimenty s působením mrazových cyklů na beton a vývoj betonů odolávajících těmto procesům.

Zlepšení mrazuvzdornosti pomocí provzdušňujících cementů a přísad popsal již roku 1954 Stanislav Bechyně ve své publikaci. Na velikost v rozmezí 60-200 μm a rovnoměrné rozptýlení vzduchových pórů byl již tehdy kladen vyšší důraz. Další podmínkou bylo užití mrazuvzdorného kameniva. Vodotěsnost betonu Bechyně považoval za podstatný parametr, který ovlivňuje nasákavost a s ní spojené následné objemové změny [29].

V té době bylo považováno za nejvhodnější způsob stanovení mrazuvzdornosti dle změny modulu pružnosti za pomoci měření rychlosti šíření zvuku nebo vlastní frekvence kmitání. Betony, u kterých nedošlo k poklesu pod hranici 15 %, se považovaly za mrazuvzdorné. Ověření mrazuvzdornosti za pomoci poklesu pevnosti v tlaku se považovalo za neprůkazné. Betony s vodním součinitelem nižším než 0,4 odolávají lépe mrazu kvůli jejich pórovité struktuře podobné provzdušněným betonům. Další možností bylo použití hydrofobních cementů [30].

Velkým pokrokem bylo v 70. letech zavedení hodnocení dle počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů značených písmenem T a počtu cyklů (T 50, T 100 atd.). Hodnocení bylo založeno na minimálním součiniteli mrazuvzdornosti z poměru pevnosti tahu ohybem před a po cyklování. Zároveň mohl být hmotnostní úbytek do 5 %. Jako rychlejší nepřímá metoda, která byla pouze informační, byla zkouška nasákavosti během 24 hodin. Obsah vázaného vzduchu mohl být maximálně 8 %, lépe však mezi 4 až 6 % s vodním součinitelem pod hodnotou 0,6 (lépe 0,56).

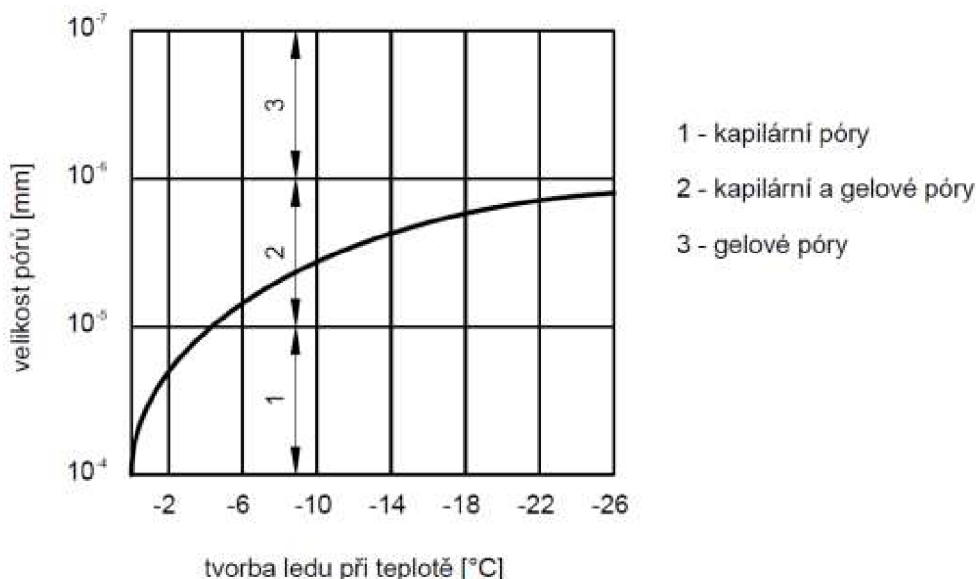
V 80. letech vznikla norma ČSN 73 1326 pro hodnocení odolnosti povrchu proti chemickým látkám. Norma vznikla na základně začátku uvažování vlivu rozmrazovacích látek na beton při cyklování z předchozích let. Hodnocení bylo slovní dle stavu povrchu zkušebního

tělesa při minimálně 50 cyklech. Jeden cyklus odpovídal 16 hodinám zmrazování a 1,5 hodině rozmrazování [31].

2.1 PROCESY PŮSOBNÍ MRAZU NA BETON

Na téma působení mrazu na beton vzniklo mnoho teorií. Jako jedním z prvních vysvětlení byla myšlenka, že porušení způsobuje hydraulický tlak vody tlačené částí již přešlou do pevného stavu, která zvětšila svůj objem. Pozdější teorii byl vznik osmotických tlaků v betonu jako následek snahy vyrovnat koncentraci roztoků při vzniku nerovnovážných podmínek a tím vznik poruch v mikrostruktuře. Tyto podmínky vznikají rozdílnou koncentrací roztoků, které zbývají v pevném skupenství a tím narůstá koncentrace látek ve zbylé kapalině [29].

Zásadním procesem pro pochopení mrazuvzdornosti betonu je tedy chování vody v něm obsažené. V betonu lze nalézt vodu ve třech různých podobách. Kapilární voda jako největší činitel s ohledem na mrazuvzdornost, tato voda přechází do pevného skupenství již od teploty okolo 0,5 °C. Dále voda gelová, která do pevného skupenství přechází za velice nízkých teplot. Při teplotách blízkým -73 °C zcela zamrzá. V poslední řadě voda chemicky vázaná, která se teoreticky v led nepřemění nikdy. Tyto procesy tedy záleží na velikosti pórů a teplotě, při které se tvoří led. Tuto závislost lze vidět na Obr. 9 [32].



Obr. 9: Vztah mezi velikostí pórů a teplotou, při které se tvoří led [33].

2.1.1 ÚČINKY MRAZU V PRŮBĚHU TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ

V době mezi míšením čerstvého betonu a začátkem tuhnutí je beton schopen reagovat na objemové změny v důsledků mrazu bez následků. V této době ještě nevznikají pevné vazby v důsledku hydratačních procesů vody a cementu. Po rozmrznutí vodní složky čerstvého betonu pokračují hydratační reakce bez porušení konstrukce [32].

Doba od počátku tuhnutí do nabytí pevnosti v tlaku 5–8 MPa se jeví jako nejkritičtější období. Pokud beton v tomto čase promrzne, v jeho struktuře nastanou výrazná narušení, která negativně ovlivní výslednou pevnost a může dojít ke znehodnocení prvku. Pokud beton dosáhne těchto pevností, mrazuvzdornost roste v korelaci s rostoucí pevností [32].

Katedra stavebního a environmentálního inženýrství se sídlem v Koreji provedla experiment působení mrazu na beton ve fázi tuhnutí a tvrdnutí. Čerstvý beton byl vystaven mrazu po dobu 6 nebo 12 hodin. Následně v cyklech po 6, 12, 24 a 72 hodinách. V tomto období chování betonu nejvíce ovlivňuje použitý cement a přísady. Tyto složky ovlivňují rychlost hydratace, a tedy dobu tuhnutí a tvrdnutí. Dalším faktorem, který značně ovlivňuje účinky mrazu, je vodní součinitel. Účinky mrazu jsou ve velké míře ovlivněny množstvím vody, a tedy s rostoucím vodním součinitelem účinky rostou. Z výzkumu dále vyplývá, že cementy s pomalejší hydratací (CEM III) po přemrznutí dosahují vyšších konečných pevností oproti cementu portlandskému (CEM I), obecně s rychlejším průběhem hydratační reakce [34].

Pokud při betonáži lze očekávat rizika spojená s mrazem, je nutné dodržet veškerá pravidla výroby, dopravy, ukládání a ošetřování čerstvého betonu dle platných norem [12].

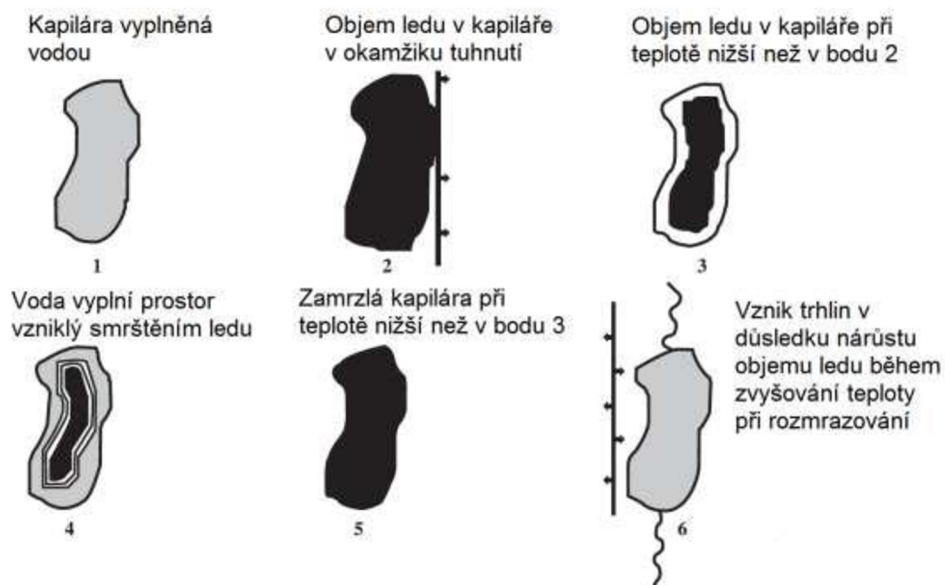
2.1.2 ÚČINKY MRAZU NA ZTVRDLÝ BETON

Při podmínkách, které dovolují vodě změnu skupenství, vzniká ledová tříšť na povrchu betonu. S klesající teplotou proniká hlouběji do konstrukce a zvětšuje svůj objem oproti stavu kapalnému. V této souvislosti vzniká napětí od krystalického tlaku, které může dosahovat desítek MPa směrem do středu konstrukce [28].

Další parametr, který je možné sledovat, je teplotní roztažnost ledu jakožto další objemové změny po přechodu skupenství. Pro beton uvažujeme hodnotu 10×10^{-6} [1/°K], kdežto teplotní roztažnost ledu odpovídá hodnotě 52×10^{-6} [1/°K] [35]. S klesající teplotou led zmenšuje svůj objem a zvyšuje svoji hustotu. Voda, ze které je led tvořen, v sobě obsahuje rozpuštěné látky, tedy zbylá kapalina zvyšuje svoji koncentraci a ovlivňuje tak teplotu tuhnutí ledu. Nejčastějším případem rozpuštěných látek ve vodě jsou různé druhy chloridů, které nepříznivě působí na cementový tmel.

Na základě těchto předpokladů můžeme popsat chování vody v betonu při účincích mrazu. V počátku jsou otevřené póry betonu zcela zaplněny. Během určité teploty dochází k tvorbě ledu v závislosti na velikosti kapilárních pórů a koncentraci rozpuštěných látek. Postupně tak vzniká led, který stlačuje zbytkovou kapalinu. Za předpokladu nízké propustnosti cementového tmelu v okolí pórů a rychlého promrzání není kapalina schopna uniknout z pórů. Takto vzniklá hydrostatická napětí vedou k porušení mikrostruktury betonu. Tyto poruchy je možné redukovat správným provzdušněním betonu [29].

Dále v betonu probíhá jev zvaný termoosmóza. Při tomto jevu se beton ochlazuje směrem od povrchu do středu, tedy izotermy, na kterých dochází k mrznutí vody, se přesouvají stejným směrem. Kapalná fáze blíže středu se snaží vyrovnat teplotu soustavy, a tak dochází k pohybu opačnému. Obdobný jev probíhá s růstem koncentrace zbytkové kapaliny, kdy se jí snaží méně koncentrovaný roztok ředit, a tak dosáhnout rovnováhy systému. V kapilárních pórech vlivem teplotní roztažnosti dochází s poklesem teploty ke smrštění ledu. Takto vytvořený prostor zaplní kapalina, která se kvůli osmotickým dějům přesouvá blíže povrchu a následně zamrzá. Při růstu okolní teploty nejdříve led svůj objem zvětšuje, a tak vznikají další přídatná napětí na cementový tmel v okolí póru viz Obr. 10. Tento jev není zásadní pro málo se opakující cykly, ale s častější změnou teploty získává na vlivu a narušení s každým cyklem narůstá [29].



Obr. 10: Vodní režim v kapilárním systému během mrazových cyklů [29].

Předchozí poznatky se vztahují k narušení mikrostruktury betonu uvnitř konstrukce. Mezi další účinky mrazu můžeme zahrnout i poškození povrchových vrstev. Nejčastěji se projevuje odlupováním povrchových vrstev betonu. Tato degradace vzniká většinou spojením mrazových cyklů společně s působením vody a chemických rozmrazovacích látek. Nejčastěji se jedná o chlorid vápenatý (CaCl_2), chlorid sodný (NaCl) nebo chlorid hořečnatý (MgCl_2). Těmto látkám jsou nejčastěji vystaveny konstrukce dopravní, tedy mostní nosné konstrukce, vozovky a chodníky v důsledku jejich údržby v mrazových obdobích. Dále jsou to konstrukce v blízkosti mořských oblastí nebo přímo vystavené mořské vodě [1].

Mezi chloridy a portlanditem obsaženým v pojivu vzniká chemická reakce. Tato reakce vede k jeho úbytku, a tím i postupnému snižování pevnosti cementového tmelu. Tento pokles pevnosti následně negativně ovlivňuje samotné pojivové vlastnosti až dochází k degradaci povrchových vrstev odpadem samotného materiálu [1].

V případě vyztuženého betonu ocelovými vložkami nastávají další účinky, které vedou ke snížení trvanlivosti konstrukce a případnému poškození či destrukci. Pasivační schopnost betonu na rozhraní beton ocel je závislá na pH. Výše uvedená reakce s hydroxidem sodným snižuje pH povrchových vrstev a může vést ke ztrátě plošných pasivačních schopností. Dále mohou samotné chloridové ionty pronikat k výztužné vložce a narušovat lokálně pasivační vrstvu. Oba tyto účinky chloridů mohou vést ke vzniku koroze výztuže. Při tomto procesu dochází k porušení povrchu vložky odpadem materiálu, který nabývá na objemu. Tento proces přispívá k popraskání krycí vrstvy a jejímu následnému odpadu. Všechny tyto procesy vedou ke snižování efektivního průřezu prvku rozrušováním krycí vrstvy a postupné ztrátě soudržnosti mezi betonem a výztužnou vložkou viz Obr. 11 [1] [36].



Obr. 11: Odlupování povrchových vrstev betonu [37] [38] [39].

2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MRAZUVZDORNOST

Beton je materiál heterogenní, a tak jeho vlastnosti ovlivňuje mnoho faktorů, které lze do jisté míry optimalizovat tak, aby beton vyhovoval aktuálním požadavkům. Vzhledem k mrazuvzdornosti se jedná především o jeho složení, výrobu, přepravu, ukládání a ošetřování.

2.2.1 KAMENIVO

Kamenivo pro mrazuvzdorný beton musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 1367-1 [40] na odolnost při zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Případně dle normy ČSN EN 1367-2 [41] pro prostředí, kde se vyskytuje mořská sůl nebo chemické rozmrazovací látky. Kamenivo tvoří podstatnou část objemu betonu, a tak je potřeba k němu při návrhu pro prostředí značená XF [12] takto přistupovat.

Hlavním parametrem pro hodnocení kameniva jako mrazuvzdorného je jeho nasákavost dle ČSN EN 1097-6 [42]. Pokud je hodnota nasákavosti pod 1 %, můžeme kamenivo považovat za dostatečně odolné proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům. Přesto však vyhovují kameniva, která mají nasákavost vyšší. Jedná se především o vysokopecní strusky, některé druhy pískovců a dolomitů, u kterých hodnota může přesahovat 2 %. Dále jsou to vápence s nasákavostí i přes 4 % a recyklované kamenivo, které může dosahovat i vyšších hodnot nasákavosti [32].

Obsah jemných prachovitých částic a jílovitých minerálů je též limitován. Větší obsah negativně ovlivňuje soudržnost kameniva a cementového tmelu, čímž snižuje mrazuvzdornost betonu. Hodnoty jsou stanoveny pro hrubé kamenivo na 1,5 % obsahu částic a pro drobné kamenivo 4 %. S ohledem na množství odplavitelných částic je vhodnější kamenivo prané a písky těžené [32].

Dalším důležitým parametrem je frakční složení kameniva, a tedy snaha přiblížení se ideální křivce kameniva, viz kapitola 1.1. Při vhodném návrhu snižujeme obsah póru a dutin, množství potřebného cementového tmelu a zajistíme lepší zaklínění kameniva mezi sebou [1].

Jako vhodné kamenivo do mrazuvzdorného betonu se tak jeví některé druhy vápenců, čediče a žuly [2].

2.2.2 CEMENT

Vlastnosti a množství cementu pro užití dle agresivity prostředí předepisuje norma [12]. Jednotlivé druhy cementů mezi sebou mohou mít velký rozptyl vlastností, které ovlivňují

výsledné charakteristiky betonu, a tak i jeho odolnosti a trvanlivost. Před návrhem je tedy důležité určení agresivity prostředí a pro něj vhodné množství a typ cementu [12].

Vývoj technologií výroby cementu též pozitivně přispívá k odolnosti vůči mrazovému působení, byť se při porovnání se staršími konstrukcemi může zdát mrazuvzdornost horší. Cementy pro moderní betony se vyznačují jemnějším mletím a rozdílným složením. Dochází tak k většímu objemu zhydratovaných zrn cementu, lepším vlastnostem a rychlejší době výstavby. Zároveň se dnes ve větší míře užívá plastifikačních přísad ke zlepšení (tzn. snížení) vodního součinitele. Všechny tyto předpoklady by měly pozitivně ovlivňovat vlastnosti betonu v případě mrazuvzdornosti [1].

Proč se tedy některé starší konstrukce jeví jako odolnější v prostředí mrazových cyklů? U starších konstrukcí bez využití plastifikačních přísad se vodní součinitel redukoval užitím většího množství cementu, a tak se konstrukce stávala v tomto ohledu předimenzovanou. Spolu s užitím cementů větších hrubostí nedocházelo k dostatečné hydrataci všech zrn, tzn. podíl nezhydratovaného cementu se navyšoval. Pokud je taková konstrukce vystavena vodě, nezhydratovaná zrna cementu můžou dodatečně procházet hydratačním procesem, a tak částečně zacelit narušenou mikrostrukturu betonu [1].

Při porovnání jednotlivých druhů cementů s vlivem na mrazuvzdornost hrají velkou roli příměsi dalších látek v cementu, jejich technologie výroby a poměr hrubosti mletí. Například struska ve vysokopecním cementu vykazuje větší tvrdosti oproti slínkovým minerálům. Pokud probíhá mletí a míchání těchto složek zároveň, nedochází k rovnoměrnému mletí obou složek. Proto se obecně doporučuje mletí samostatně a míchání až následně. Tím je ovlivněn měrný povrch strusky vůči slínku a v betonu tak probíhá rychlejší hydratační reakce. Rychlost hydratační reakce se jeví jako důležitý faktor pro odolnost mrazovým cyklům. Dle studie z roku 2013 vychází nejlépe cementy vysokopecní CEM III s nižší výslednou pevností a pomalejším vývojem hydratačních reakcí. Tyto cementy dle výsledků experimentů vykazují lepší vlastnosti oproti cementům portlandským CEM I. Za nejhorší lze považovat cementy směsné nebo s rychlým nárůstem počátečních pevností. Betony s použitím těchto cementů mohou mít odpad materiálů až 10x větší oproti cementům vysokopecním [43].

2.2.3 VODNÍ SOUČINITEL

S počátky sledování mrazuvzdornosti se začaly rozvíjet výzkumy, jakým způsobem zvýšit odolnost proti mrazovým cyklům bez provzdušnění betonu. V té době se začalo experimentovat s velice nízkými vodními součiniteli, obecně pod hodnotu 0,4. Takový beton by obsahoval množství potřebné vody k hydratačním procesům a vodě vázané. Volné kapilární vody

by tak bylo velice malé nebo žádné množství a teoreticky by beton neobsahoval vodu, která by mohla mrznout. S nižším vodním součinitelem se snižuje i membránová propustnost kapalin a tím i nasákavost betonu. Tyto základy položil a experimentálně zkoušel již Hubert Woods v 50. letech [44]. V pozdějších letech došlo k potvrzení těchto předpokladů a upřesnění hodnoty vodního součinitele na 0,36, kdy není potřeba beton provzdušňovat [45]. Na stejné téma vyšla řada odborných studií, které nadále tyto předpoklady potvrzovaly [1].

Současně je ale také možné narazit na množství studií, které při velice nízkém vodním součiniteli obdobných nebo nižších hodnot (až na hodnoty 0,25) vykazovaly výsledky zcela opačné a tedy nedostatečné [46] [47].

Z předchozích studií jsou tedy výsledky pro tuto možnost nejednoznačné a nízký vodní součinitel nemusí pozitivně ovlivnit odolnost proti mrazu. Vodní součinitel aktuálně stanovuje norma [12], která ale určuje především maximální hodnoty, kdy pro prostředí XF3 je stanovena hodnota 0,50 a pro prostředí XF4 hodnota 0,45. Při návrhu je navíc nutné brát v úvahu, jakým způsobem jsou tyto hodnoty v normě stanoveny. Norma zahrnuje výpočet dle koncepce k-hodnoty. Tato hodnota bere v potaz latentně hydraulické příměsi v betonu, přičemž příměsi obsažené již v cementu nejsou zahrnuty. Při výpočtu jsou příměsi přidávané do betonu dodatečně částečně znevýhodněny [12].

Obecně tedy nelze určit, jaká hodnota vodního součinitele zajistí nejlepší vlastnosti betonu v mrazových prostředích. Proto by měl být kladen nejvyšší důraz na faktory, jako je kvalita jednotlivých materiálů, způsob výroby a ošetření v kombinaci s předpisy o maximálním vodním součiniteli a obsahu vzduchu. Obecně ale lze považovat hodnoty v rozmezí 0,36 – 0,50 jako vhodné pro zajištění dostatečné odolnosti [12].

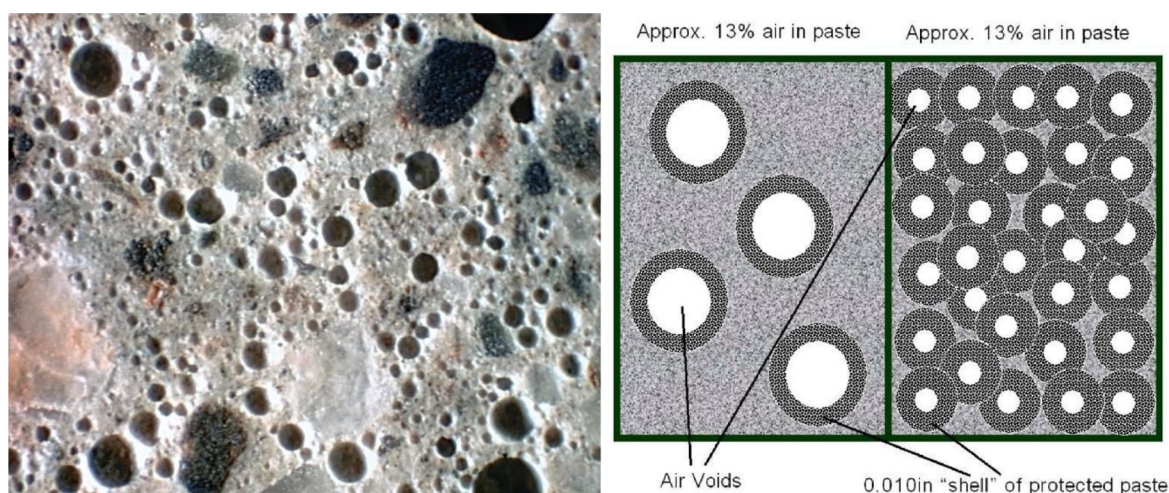
2.2.4 PŘÍSAKY A PŘÍMĚSY

Příspěvky a příměsi řadíme mezi doplňkové složky, které se přidávají do betonové směsi při její výrobě. Postupem času se stávají nedílnou složkou betonu a dnes se již v podstatě nevyrábí beton bez přísad či příměsí. Jejich účelem je zlepšení určitých vlastností betonu, případně dosažení zvláštních vlastností pro beton nevlastních. Jejich dělení probíhá dle jejich účinků v čerstvém, případně ztvrdlém betonu dle ČSN EN 934-2 +A1 [48].

Plastifikační přísady, respektive superplastifikační přísady mají za účel zlepšit konzistenci a zpracovatelnost čerstvého betonu za nižšího vodního součinitele. To vede k lepší odolnosti betonu, a tak jeho lepší trvanlivosti. Tyto přísady mohou negativně ovlivňovat chování provzdušňujících přísad. Proto je nutné používat ověřené kombinace těchto přísad, případně

provést experimentální ověření. Při nevhodném použití mohou navyšovat obsah a velikost vzduchových pórů nebo mírně napěňovat směs [1].

Provzdušňující přísady mají za úkol zvýšit obsah vzduchových pórů v betonu. Mezi další účinky patří mírná plastifikační schopnost a stabilizace čerstvého betonu. Nejde jen o samotné zvýšení obsahu vzduchu, ale především o rovnoměrnou distribuci póru v betonu, jejich vhodný tvar a velikost. Při jejich použití je důležitý návrh jejich množství a dodržení vhodného výrobního procesu. Je třeba myslet na fakt, že v rozmezí 4-7 % obsahu vzduchu v betonu vede rozdíl 1 % k poklesu pevnosti o přibližně 5 %. V ideálním případě je cílem těchto přísad rovnoměrná tvorba uzavřených kulových pórů s velikostí do 300 μm . Tyto póry slouží jako kompenzační prostor při tvorbě ledu ve struktuře betonu viz Obr. 12, a tak pozitivně ovlivňují jeho mrazuvzdornost [1] [32] [44].



Obr. 12: Tvar a rozložení vzduchových pórů ve struktuře betonu [49] [50].

Retardační přísady plní v čerstvém betonu funkci zpomalovačů tuhnutí a tvrdnutí. Tyto přísady mohou mít negativní dopad na trvanlivost betonu v prostředí s mrazovými cykly. V důsledku jejich užití dochází k několikanásobnému zvýšení odpadu materiálu a zároveň ke snížení rychlosti průchodu UZ impulzu materiálem [51].

Dále se jedná o přísady, které mohou pozitivně zlepšovat mrazuvzdornost nebo práci za nízkých teplot. Jedná se o přísady **těsnící**, které snižují obsah makropórů, zvyšují hutnost betonu a zároveň tvoří nerozpustné sloučeniny. Tyto sloučeniny v ideálním případě přerušují část kapilárních pórů, případně zmenší jejich průměr. Nebo **urychlovače tuhnutí**, které urychlí práci za nízkých teplot, a tak redukují negativní vlivy mrazu v počátcích tuhnutí a tvrdnutí. Zároveň ale negativně ovlivňují výslednou pevnost betonu [1].

Příměsí jsou práškovité anorganické látky, které mají za úkol zlepšit vlastnosti betonu doplněním k pojivu nebo jeho částečným nahrazením. Můžeme je rozdělit dle jejich podílení na hydratačních procesech. Příměsí inertní především v podobě kamenné moučky, které se neúčastní hydratačních reakcí anebo latentně hydraulické příměsí v podobě pucolánů a křemičitých úletů. Dále jen latentně hydraulické příměsí, které mají větší vliv na odolnost a trvanlivost betonu. Při hydratační reakci dochází ke vzniku CSH gelu, který má výrazný vliv na mechanické vlastnosti a odolnost. Dále vzniká portlandit, který tyto vlastnosti ovlivňuje jen velice málo. Přidáním **pucolánových příměsí** dochází k pucolánové reakci a přechodu portlanditu v CSH gel, který tak pozitivně ovlivňuje pevnosti a odolnost proti mrazu. Pucolánová reakce není tak zuřivá jako hydratační reakce a může probíhat řádově měsíce nebo roky. V takovém případě může CSH gel vzniklý s odstupem času částečně zacelit mikrostrukturu betonu porušenou mrazem. Dále je možné využít **křemičité úlety**, které dosahují výrazně většího měrného povrchu než cement a zároveň vykazují pucolánové reakce. V případě neprovzdušněných betonů se jeví jako velice výhodné. Zpevňují tranzitní zónu mezi zrny kameniva a cementovou maltou a zároveň utěsňují strukturu betonu. Tím dochází ke snížení permeability a nasákavosti což vede ke zlepšení vodotěsnosti a pevnosti [1] [52] [53].

2.3 METODY ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI

Při stanovení materiálových vlastností betonu je postup prostý. Většinou se jedná o zatěžovací zkoušky při známých geometrických a materiálových parametrech zkušební tělesa. V případě mrazuvzdornosti betonu jako dlouhodobé odolnosti v agresivním prostředí je proces výrazně složitější. Základním předpokladem je spolehlivě simulovat takový vliv v krátkém časovém intervalu. Pro zkoušení je třeba zařízení nebo jejich soustava, které takové prostředí dokáže simulovat za uživatelsky definovaných podmínek blízkých realitě. Za dobu sledování mrazuvzdornosti bylo ve světě definováno více zkušebních postupů. Každý nabízí určité klady a zápory postupu v porovnání s ostatními a jejich menší či větší odlišnosti.

Na našem území jsou aktuálně platné dvě normy pro zkoušení mrazuvzdornosti betonu vzhledem k porušení vnitřní struktury, které definují zkušební postupy a interpretaci jejich výsledků.

2.3.1 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

První je norma ČSN 73 1322 [3], která platí již od roku 1969 a je platná i v současnosti bez větších úprav. Zkouška je založena na porovnání pevnosti v tahu ohybem nasycených

trámců vystavených cyklickému zmrazování a rozmrazování a referenčních těles. Tělesa mohou být vyrobena z čerstvého betonu ve formách nebo odebrána pomocí jádrového vrtání. Pro zkoušku je potřeba dvou sad těles o minimálním počtu 3 kusů. Průběh zkoušky je rozdělen na etapy o běžném počtu 25 nebo 50 cyklů. Na konci každé etapy probíhá zkoušení pevnosti. Počet těles v závislosti na počtu etap může vzrůstat. Takový počet je pro odběry přímo z konstrukce těžko proveditelný. Norma připouští i nedestruktivní sledování změn struktury pro průběžnou kontrolu dynamickými zkouškami. Předpokládá se využití ultrazvukových nebo rezonančních metod. Norma již ale neupřesňuje, o jaký parametr se jedná. Zda rychlost šíření impulzu, vlastní frekvence nebo již odvozené dynamické moduly pružnosti [3].

Doba jednoho cyklu trvá 6 hodin, kdy probíhá 4 hodiny zmrazování za teplot v rozmezí $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (betony vystavené teplotám do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pro betony přesahující tuto hranici je rozmezí posunuto o hodnotu $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zmrazování probíhá na vzduchu. Následují 2 hodiny rozmrazování ve vodní lázni při teplotě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkušební teplota těles musí být dosažena aspoň po dobu poloviny zmrazovacího cyklu. Následně se tělesa osuší, do protokolu se uvedou rozměry a hmotnosti. Poté se provede zkoušení pevnosti dle normy [17] pro všechna tělesa. Zkouška je ukončena při dosažení určeného počtu zkušebních cyklů nebo hmotnostním odpadu větším jak 5 %. Dle poměru výsledků mezi tělesy vystavenými mrazu a referenčními se stanoví součinitel mrazuvzdornosti. Mrazuvzdorný beton dosahuje poměru 0,75 a více [3].

2.3.2 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ – PORUŠENÍ VNITŘNÍ STRUKTURY

Druhou možností je zkoušení dle normy ČSN 73 1380 [54], která předepisuje tři zkušební postupy a přidává na významu zkoušení nedestruktivnímu. Mezi zkušební postupy patří zkouška CIF, zkouška na desce (Slab-test) a zkouška na trámci. Tyto postupy byly vyvíjeny v různých částech Evropy nezávisle na sobě. Zkoušky jsou brány jako rovnocenné, jelikož podávají srovnatelné výsledky. První dvě uvedené zkoušky jsou složité na postup a jeho délku. Zároveň jejich citlivost není dostatečná, a tak se jeví jako nevýhodné k běžnému použití.

Dále se bude diplomová práce věnovat jen poslední uvedené metodě, která má mnoho společného s postupem dle normy [3]. Rozdílem je dvojnásobná délka jednoho cyklu a rozmrazování probíhá v proudící vodě. I tato metoda patří k časově velmi náročným. Pro zkoušení odolnosti betonu na 100 cyklů je nutné vyčlenit dobu 7 týdnů. Pro železniční pražce je předepsána hodnota 200 cyklů a takové zkoušení již přesahuje dobu 3 měsíců. Další odlišností je hodnocení porušení struktury betonu relativním dynamickým modulem pružnosti dle ultrazvukové nebo rezonanční metody. Sledování probíhá u každého trámce samostatně

a nedochází tak k porovnání rozdílných trámů mezi sebou. Pro výpočet relativního dynamického modulu se použijí vztahy dle [54]:

$$RDM_{FF} = \left(\frac{f_n}{f_0}\right)^2 \cdot 100 \qquad RDM_{UPTT} = \left(\frac{t_{s0}}{t_{s,n}}\right)^2 \cdot 100$$

RDM _{FF}	relativní dynamický modul pružnost rezonanční metodou [%],
RDM _{UPTT}	relativní dynamický modul pružnost ultrazvukovou metodou [%],
f	vlastní frekvence příčného kmitání [kHz],
t _s	doba průchodu UZ impulsu [s],
index 0	hodnoty před prvním cyklem,
index n	hodnoty po měření n cyklů.

2.3.3 ZRYCHLENÉ ZKOUŠKY MRAZUVZDORNOSTI

Roku 2003 byla zrušena norma ČSN 73 1325 [55], která využívala hodnocení na základě nasákavosti po 24 hodinách a pevnosti v tlaku. Jednalo se o poměrně rychlou a levnou zkoušku. Měla být určena pro hodnocení betonů, které nejsou v mrazových obdobích v trvale mokřím stavu. Pro zkoušku byl stanoven i relativně nízký počet cyklů, při kterých byla ukončena (50 cyklů). Součinitel mrazuvzdornosti byl stanoven z poměrů pevnosti v tlaku a poté porovnán s mezní hodnotou při zkoušení dle normy [3].

Touto normou se zabýval experiment [56] z roku 2015. Z výsledků je patrné, že tento postup se dá využít pro odhad rychlé prvotní mrazuvzdornosti betonu. Výsledky jsou však relevantní jen pro hutné betony s použitím neporézního kameniva. Pro betony s použitím pórovitého kameniva se tato zkouška ukázala jako nevhodná [56].

2.3.4 ODOLNOSTI PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ – ODLUPOVÁNÍ

Metody popsané v předchozích kapitolách jsou zaměřeny na hodnocení vnitřní struktury betonu po cyklickém vystavení mrazu. Dle poznatků z kapitoly 2.1.2 je patrné, že dochází také k porušení čistě povrchových vrstev nasáklých vodou, případně v kombinaci s chemickými rozmrazovacími látkami.

Stanovení degradace povrchových vrstev odlupováním definuje norma ČSN P CEN/TS 12390-9 [57]. Pro zkoušení se využívají desková tělesa tloušťky 50 mm, která byla vyřezána z krychle hrany o hraně 150 mm. Při stáří betonu 25±1 den se všechny povrchy mimo zkoušeného opatří gumovým těsněním přesahující hranu o 20 mm. Při stáří betonu 28 dní se na testovaný povrch nalije deionizovaná voda do výšky hladiny 3 mm. Tato hladina se udržuje

po dobu 72 hodin. Po uplynutí této doby se voda nahradí rozmrazovacím 3% roztokem NaCl a překryje se polyethylenovou fólií. Jeden cyklus trvá 24 hodin, při kterých musí být teplota vyšší než 0 °C v rozmezí 7–9 hodin. Teplota se během jednoho cyklu mění přibližně z +20 °C na -20 °C a zpět. Po 7, 14, 28, 42 a 56 cyklech se stanoví množství odloupeného materiálu. Po každé kontrole dochází k výměně rozmrazovacího roztoku [57].

Tato zkouška je obecně považována za náročnou jak časově, tak i postupem. Zkoušku je nutné provádět v klimatizační komoře s kontrolovaným průběhem teploty. Při zkoušení předepsaných 56 cyklů a počátku ve stáří betonu 31 dní jsou výsledky k dispozici přibližně ve třech měsících stáří betonu. Z těchto důvodů nebyl zatím vyzkoušen větší soubor experimentů na tuto tematiku. Vlivem náročnosti přípravy těles a samotného průběhu zkoušení byla zjištěna velká variabilita výsledků mezi laboratořemi, a tedy vysoká reprodukovatelnost [58].

2.3.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRHCU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHLORIDŮ

Aktuálně nejpoužívanější metody zkoušení odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám jsou dle normy ČSN 73 1326 [59]. Jedná se o stanovení povrchových odolností betonu a výsledky tedy nejsou reprezentující pro celkovou odolnost konstrukce. Nicméně odolnost povrchu je velice důležitá pro životnost konstrukce. Povrch je nejvíce namáhán vodou a chemickými rozmrazovacími látkami. Degradace povrchových vrstev má zásadní vliv na kvalitu ochrany výztužných vložek [36].

Původně norma předepisovala dva zkušební postupy. Jedním je **metoda automatického cyklování (A)** a druhým **metoda ruční manipulace se vzorky (B)**. Druhý postup se v dnešní době vzhledem ke své pracnosti nevyužívá. V roce 2003 byla norma doplněna o třetí postup, a to o **metodu automatického cyklování II (C)**. Při zkoušení se používají postupy A i C, avšak porovnatelnost těchto dvou metod je poměrně diskutabilní.

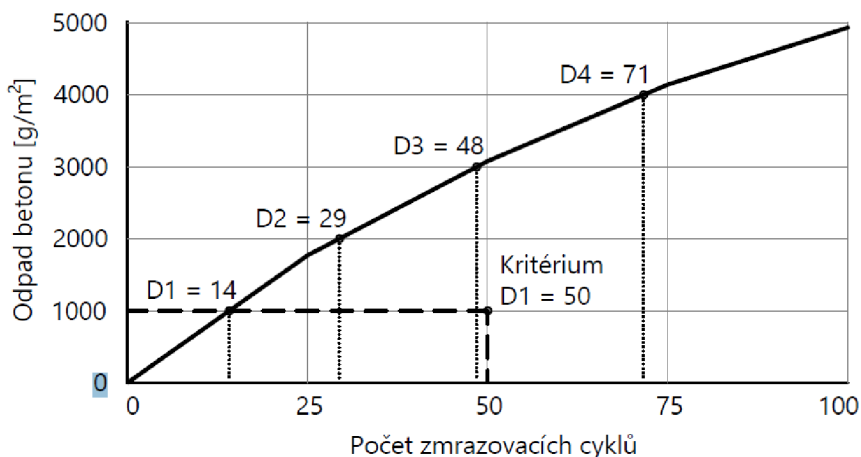
Pro zkušební postupy jsou vhodné krychelná tělesa o hraně 150 mm, válce o průměru 150 mm a výšce minimálně 50 mm nebo hranoly o příčném rozměru podstavy 40 mm a délce 160 mm. U těles vyráběných ve formě se testuje horní povrch. Tělesa odebraná jádrovým vrtáním mají mít průměr 150 mm, případně 100 mm pro vyztužené konstrukce. Zkušební plocha odpovídá vnějšímu povrchu konstrukce [59].

Metoda automatického cyklování I (A) využívá nejčastěji tělesa tvaru krychle. Ty se ponoří do misek s roztokem většinou 3% NaCl a výškou hladiny 5 mm. Tělesa jsou tedy vystavena chemickým látkám i na bočních stěnách. Pro cyklování se většinou využívají

programovatelná zařízení s automatickým střídáním teploty. Teplota osciluje v rozmezí $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy maximální a minimální hodnoty jsou udržovány aspoň po dobu 15 minut. Přejechod mezi horní a dolní hranicí teploty by neměl trvat déle jak 45-50 minut. Doba trvání jednoho cyklu tedy trvá v rozmezí 2-2,5 hodiny. Každých 25 cyklů se těleso vyjme z roztoku, řádně se očistí proudem vody a odpad se nechá sušit při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ do ustálení hmotnosti. Poté se odpad zváží a určí se odpad z jednotlivých etap vůči zkoušené ploše tělesa v jednotkách g/m^2 . Zkouška končí při dosažení předepsaného počtu cyklů nebo při překročení mezní hodnoty odpadu [59].

Metoda ruční manipulace se vzorky (B) se hodnotí především vizuálně a výsledkem je zatřídění do kategorie dle rozrušení povrchu. Na povrchu tělesa se nechá vytvořit vrstva ledu při teplotě $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Těleso je opatřeno vodotěsnou objímkou, kam se dává potřebné množství roztoku k rozmrazení. Poté se těleso ohřívá oplachem vodou při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takto se postup opakuje do dosažení předepsaného počtu cyklů [59].

Metoda automatického cyklování II (C) kombinuje určitě zkušební postupy obou metod a doplňuje kroky dle poznatků o vlivu gradientu koncentrace solí na degradaci povrchu. Při této zkušební metodě tedy dochází k měření hmotnostního odpadu materiálu při mrazovém prostředí působícího na celý povrch. Vhodná tělesa jsou válcová o průměru 150 mm vyrobená ve formě anebo odebraná z konstrukce. Zároveň je těleso opatřeno vodotěsnou objímkou, která vymezuje zkušební plochu. Před samotným zahájením zkoušky se objímka naplní vodou po dobu dvou dní. Tím se dosáhne nasycení zkušební povrchu a dostatečné vodotěsnosti objímky. Poté se voda slijí a nahradí se roztokem 3% NaCl. Délka cyklu je 6 hodin, kdy jednotlivé cykly střídají každé 3 hodiny se změnou teplot trvajících maximálně 30 minut. Horní hranice je rovna $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dolní $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každých maximálně 25 cyklů se zváží hmotností opad a provede se výměna roztoku. Vyhodnocení probíhá dle součinitele odolnosti jako minimální počet cyklů pro dosažení určitého odpadu v jednotkách g/m^2 , viz Obr. 13 [59].



Obr. 13: Kritérium pro odvození součinitele odolnosti [59].

Zkušební postupy jsou hojně diskutované z hlediska porovnatelnosti a reprodukovatelnosti výsledků. I při použití jen jedné z metod lze sledovat velkou variabilitu výsledku z různých laboratoří. Norma jasně nedefinuje, jakou vodu a čistotu soli používat. Zkoušení probíhá bez zakrytí, a tak se koncentrace roztoku může měnit vlivem odpařování. U metody A se vlivem odpařování může měnit i výška hladiny roztoku, ve které je těleso částečně ponořeno. Dalším vlivem, který vnáší určitou nejistotu, je způsob vážení odpadu. Zda dochází k vážení množství odpadu po každých 25 cyklech, anebo se měří celková hmotnost na konci zkoušky. Musíme vědět, zda průběžným vážením se sčítají chyby měření jednotlivých pokusů. Neposlední řadě je nutné brát v potaz lidský faktor při výrobě a ošetřování zkušebních těles. Dále je také velice diskutovaný vliv různých způsobů úpravy horní plochy těles při jejich výrobě a další aspekty [58] [59] [60].

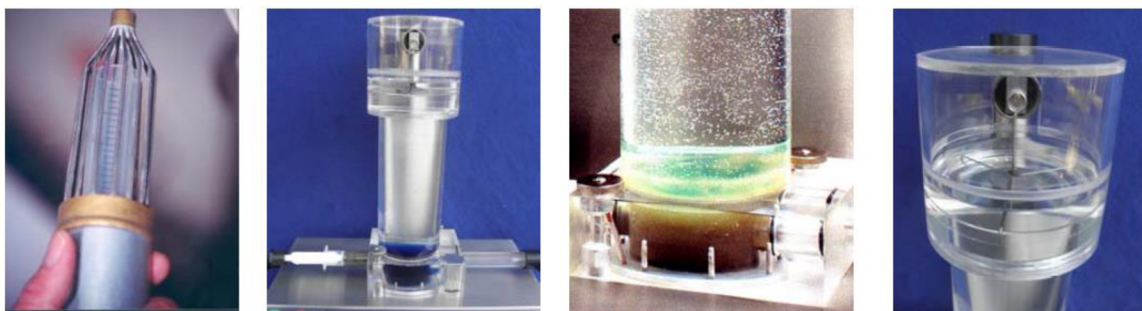
2.3.6 OBSAH VZDUCHU – TLAKOVÉ METODY

Pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu je využívána norma ČSN EN 12350-7 [61]. Tato metoda je založena na Boyle-Mariottově zákoně o konstantním součinu tlaků a objemu plynu ideálního plynu. Výsledkem je celkové procento plynu v čerstvém betonu. U provzdušněných betonů se pohybuje v mezích 4–6 %. U betonu neprovzdušněných do 2 % [61].

2.3.7 AIR-VOID ANALYSER

Měření velikosti pórů pomocí přístroje označovaného jako Air-Void Analyzer. Tato zkušební metoda se používá i v Severní Americe či Japonsku. Přesto pro ni neexistuje norma a je využívána jen jako doplňková. Je založena na měření hmotnosti vzduchových bublinek,

keré se uvolňují při rozmíchání cementového tmelu v glycerolu. Přes něj stoupají do vrstvy vody, pod kterou je umístěna Petriho miska viz Obr. 14.



Obr. 14: AIR-VOID ANALYSER: Odběr vzorků a průběh zkoušení ve zkušební aparatuře [62].

2.4 METODY ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI V ZAHRANÍČÍ

Stejně jako u nás, i ve světě existuje mnoho zkušebních metod pro určení odolnosti betonu v mrazových cyklech. Je možné narazit na metody, které využívají podobné principy.

Detaily průběhu a vyhodnocení jsou přizpůsobeny lokálním požadavkům dle klimatických podmínek, běžným složením betonů a možnostem zkoušení pro tato území. Obecně lze považovat metodu za dobrou, pokud dokáže za jistých podmínek reprodukovat reálnou degradaci.

2.4.1 EVROPA

Pro státy Evropy je standardem norma CEN/TR 15177 [63]. Pro členské státy CEN/CENELEC není převzetí této normy povinné. V našem případě byla převzata do normy [54]. Proto i dnes jednotlivé státy mají či měly vlastní standardy.

Rakousko do roku 2010 využívalo zkoušení metodou ÖNORM [64] podobné Slab-testu. Při této zkušební metodě byl povrch ohraničen membránou a ta byla vyplněna roztokem. Metoda ale vykazovala značné rozptyly výsledků.

V Německu byla odvozena metoda RILEM TC 117-FDC/CDF [65]. Tato metoda se odlišuje od Slab-testu orientací zkušební plochy směrem dolů a jejím ponořením do roztoku. V takovém případě se využívá difuze a vztlávanosti roztoků do zkušebního tělesa. Během zahřívání se zkušební nádoba ukládá do ultrazvukové lázně pro určení množství odpadu [65].

Obecně lze říct, že mnoho metod v různých evropských zemích je odvozeno od Slab-testu nebo ho postupy připomínají.

2.4.2 SEVERNÍ AMERIKA

Důležitou normou ve světovém měřítku je ASTM C666/C 666M [66], která se běžně užívá v Severní Americe. Metoda patří do zrychlených metod stanovení odolnosti v mrazových cyklech na trámci. Délka jednotlivých cyklů není v normě přesně definována. Běžně se ale pohybují v rozmezí 2-5 hodin a teplota osciluje v mezích +4 °C až -18 °C. Průběžně se stanovuje změna vlastností ultrazvukem vzhledem k dynamickému modulu pružnosti. Ukončení zkoušky se realizuje při 300 cyklech anebo poklesu relativního dynamického modulu pružnosti pod 60 % [66].

Tento postup nemusí zcela vystihovat reálné podmínky, kvůli čemuž byl kritizován. Asociace CEN tento zkušební postup navíc oficiálně nepřijala.

Napříč Amerikou jsou využívány další postupy, které se obdobně jako u nás podobají Slab-testu a jsou upraveny/odvozeny pro tamní podmínky a možnosti zkoušení.

B. PRAKTICKÁ ČÁST

3. CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTU

Praktická část práce je součástí projektu GAČR č. 19-22708S „Nové přístupy k predikci trvanlivosti provzdušněného betonu prostřednictvím zjišťování obsahu a rozložení vzduchových pórů a mrazuvzdornosti vrstvy betonu“. V rámci tohoto projektu bylo vyrobeno mnoho sad těles různých tvarů a rozměrů. Dále byly vyrobeny betonové bloky pro odběr vzorků jádrovým vrtáním k imitaci odběrů z konstrukce. Pro výrobu byly navrženy dvě receptury betonu, a to provzdušněný a neprovzdušněný beton. Tyto receptury se liší jen použitím rozdílného množství přísad, a tedy i rozdílného vodního součinitele. Tato tělesa budou vystavována mrazovým cyklům za průběžného měření materiálových vlastností k určení degradace.

3.1 POPIS EXPERIMENTU

V rámci praktické části byl experiment zaměřen na aplikaci vybraných zkušebních metod pro stanovení mrazuvzdornosti neprovzdušněného betonu. Tělesa pro zkoušení byla dvojího druhu, a to vytvořených za pomoci formy a jádrovým vrtáním z betonového bloku. Některá tělesa vznikla vyřezáním z těles větších rozměrů. Následně byla tělesa zdokumentována, referenční tělesa byla podrobena nedestruktivnímu i destruktivnímu zkoušení pro stanovení mechanických vlastností před vystavením mrazových cyklů. Postupně se zbylá tělesa vystavovala v 6 různých běžích cyklům zmrazování a rozmrazování. Zkušební tělesa byla vystavena 100 cyklům.

V průběhu mrazových cyklů se průběžně nedestruktivními metodami (ultrazvukovou a rezonanční) stanovovali změny mechanických vlastností v čase. Po každých 50 cyklech byla sada třech zkušebních těles vystavena destruktivnímu zkoušení v podobě prostého tahu, příčného tahu, tahu ohybem a statického modulu pružnosti.

Výsledky zkoušení byly porovnány jak mezi tělesy z forem a jádrového vrtání, tak mezi jednotlivými zkouškami pro odpovídající si tělesa. Výstupem experimentu je tedy jednak samotné ověření mrazuvzdornosti těles, tak porovnání vhodnosti jednotlivých zkušebních metod a jejich citlivosti k určení tohoto parametru.

3.2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro experiment byla vyrobena tělesa z neprovzdušněného betonu. Pro každou sadu těles byl vyroben takový počet, aby odpovídal počtu cyklů, a tedy požadavkům pro jednotlivé zkoušky.

Pro základní počet 100 cyklů odpovídal počet těles v sadě 9 kusům (3 ks jako referenční + 2x3 kusy pro zkoušení po 50 a 100 cyklech). Mezi základní tělesa z forem patřily hranoly 100x100x400 mm a krychle 100x100x100 mm. Pro jádrové vrtání to byla tělesa o příčném rozměru 100 mm a štíhlostnímu poměru blízkému 4. Dále byly pro obě tyto varianty připraveny tělesa větších rozměrů pro jejich následnou úpravu na tělesa menších rozměrů.

3.2.1 Receptura čerstvého betonu a provedené zkoušky

Pro účely experimentu byl čerstvý neprovzdušněný beton zhotoven v provozu betonárny TBG BETONMIX a.s. se sídlem Brno-Bosonohy k datu 14.7.2020. Teoretický návrh receptury viz Tab. 1 pro odpovídající pevnostní třídu C 30/37.

Předpokládaný vodní součinitel odpovídá hodnotě 0,51. Skutečný vodní součinitel činí 0,47 při korekci o nasákavost kameniva a odečtu přísad v množství nad 3 litry. V případě této receptury bylo sníženo množství plastifikátoru. To vede k většímu množství použité vody jako náhrady obsahu vzduchu vůči druhé receptuře při zachování konzistence. Tím dochází ke zvýšení vodního součinitele a objemu kapilárních pórů. Tento fakt má vliv na snížení mrazuvzdornosti a výsledných pevností. Množství provzdušňovací přísady bylo též sníženo, ale byla použita pro zachování „chemismu“ betonu. To vede ke snížení objemu vzduchu v betonu, a tak k poklesu mrazuvzdornosti.

O receptuře provzdušněného betonu v rámci projektu GAČR č. 19-22708S pojednává článek: Analysis of Acoustic Emission Signals Recorded during Freeze-Thaw Cycling of Concrete [67].

Tab. 1: Teoretická receptura (10022) neprovzdušněného betonu.

Složka	Množství [kg/m ³]
CEM I 42,5 R	390,00
0-4 Tovačov	810,00
4-8 Luleč	160,00
8-16 Olbramovice	760,00
Sika ViscoCrete-4035	0,40
LPS A 94	0,20
Sika Viscoflow 25 CZ	0,64
Voda čistá	198,00
Teoretická objemová hmotnost	2319,24

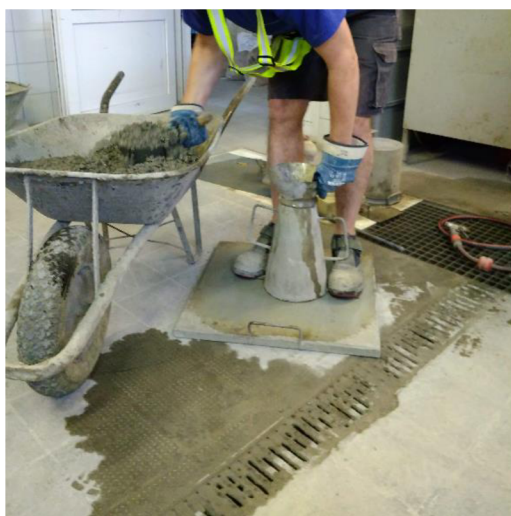
Po dopravě čerstvého betonu pro výrobu těles z formy a betonového bloku byly odebrány vzorky k provedení zkoušek čerstvého betonu. Výsledné parametry odpovídají průměrným hodnotám z obou měření. Teplota čerstvého betonu v té době odpovídala 22,6 °C. Dále byli dle příslušných norem stanoveny parametry:

Sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [68] odpovídá hodnotě 140 mm viz Obr. 15,

Rozlití dle ČSN EN 12350-5 [69] odpovídá hodnotě 410/420 mm viz Obr. 16,

Objemová hmotnost dle ČSN EN 12350-6 [70] byla stanovena na hodnotu 2335 kg/m³,

Obsah vzduchu dle ČSN EN 12350-7 [61] odpovídá hodnotě 2,1-2,5 % viz Obr. 17.



Obr. 15: Zkouška sednutí kužele [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 16: Zkouška rozlití [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 17: Zkouška obsahu vzduchu tlakovým hrncem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708SJ].

3.2.2 Výroba zkušebních těles a bloků

Zkušební tělesa byla vyrobena pro účely stanovení mrazuvzdornosti v laboratorních podmínkách a pro imitaci těles odebraných z konstrukce. Za tímto účelem byla vyrobena tělesa z forem a betonové bloky pro odběr těles jádrovým vrtáním viz Obr. 18 a Obr. 19. V případě betonových bloků byly na výztuž osazeny různé druhy tenzometrů pro kontrolu procesů ve fázi tuhnutí a tvrdnutí. Vyhodnocení těchto měření není součástí diplomové práce.

Hutnění betonových bloků probíhalo pomocí ponorného vibrátoru. Následně byly bloky překryty polyetylenovou fólií a uzavřeny víkem proti úniku vlhkosti. V případě těles z formy standardních rozměrů probíhalo hutnění na vibračním stole, hranoly větších rozměrů ponorným vibrátorem.



Obr. 18: Výroba betonových bloků z čerstvého betonu [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 19: Výroba těles z čerstvého betonu [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].

Při dosažení požadovaných vlastností byly z betonových bloků pomocí jádrového vrtání odebrány tělesa různých rozměrů pro zkoušky mrazuvzdornosti. Jmenovitě se jednalo o průměry 150 mm, 100 mm a 75 mm viz Obr. 20 a Obr. 21. Část těles z jádrového vrtání byla použita pro vyřezání hranolů menších příčných rozměrů.



Obr. 20: Odběr těles větších průměrů z bloků jádrovým vrtáním [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 21: Vlevo odběr těles menších průměrů z bloků jádrovým vrtáním, vpravo přehled těles [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].

U hranolů nadstandardní velikosti došlo k podobnému procesu. Z hranolů příčného rozměru 150 mm došlo k výřezu hranolu o příčném rozměru 100 mm viz Obr. 22.



Obr. 22: Výřez menšího hranolu z tělesa většího rozměru.

Po předepsané době zrání v laboratorních podmínkách byla tělesa odformována a uložena do vodní lázně o teplotě 20 °C viz Obr. 23. V průběhu skladování byla tělesa průběžně kontrolována.



Obr. 23: Skladování zkušebních těles [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].

Zkušební tělesa byla následně roztříděna dle tvaru, velikosti a způsobu výroby k jednotlivým zkušebním metodám a řádně označena. Pro standartní počet 100 cyklů obsahovala sada 3x3 těles. Přehled těles pro vybrané zkušební metody:

- **Prostý tah** - Hranol (Tah-1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm,
- Jádrový vývrt (Tah-1-9) o příčném rozměru 100 mm a štíhlosti cca 4,
- **Příčný tah** - Jádrový vývrt (PT150-1-9) o příčném rozměru 150 mm a štíhlosti cca 1,
- Jádrový vývrt (PT100-1-9) o příčném rozměru 100 mm a štíhlosti cca 1,
- Jádrový vývrt (PT75-1-9) o příčném rozměru 75 mm a štíhlosti cca 1,
- Krychle (PT100-1-9) o rozměrech 100 mm a štíhlosti cca 1,
- **Tah ohybem** - Hranol (1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm,

- Hranol (Řez-1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm výřezem z hranolu o příčném rozměru 150 mm,
- Hranol (Řez95-1-9) o příčném rozměr 100 mm a štíhlosti cca 4 výřezem z jádrového vývrtu o příčném rozměru 150 mm,
- Hranol (Řez65-1-9) o příčném rozměr 65 mm a štíhlosti cca 3 výřezem z jádrového vývrtu o příčném rozměru 100 mm,
- Jádrový vývrt (Ohyb-1-9) o příčném rozměru 100 mm a štíhlosti cca 4,
- Jádrový vývrt (Ohyb75-1-9) o příčném rozměru 75 mm a štíhlosti cca 3,
- **Ec**
 - Hranol (Ec-1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm,
 - Jádrový vývrt (Ec-100-1-9) o příčném rozměru 100 mm a štíhlosti cca 2,
 - Jádrový vývrt (Ec-75-1-9) o příčném rozměru 75 mm a štíhlosti cca 2,
- **RDM**
 - Hranol (1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm,
 - Hranol (Řez-1-9) o příčném rozměr 100 mm a délce 400 mm výřezem z hranolu o příčném rozměru 150 mm,
 - Jádrový vývrt (Ohyb-1-9) o příčném rozměru 100 mm a štíhlosti cca 4.

3.2.3 Vlastnosti betonu po 28 dnech

Vybraná tělesa vyrobená pomocí forem byla ve stáří betonu 28 dní podrobena zkouškám viz Obr. 24 a Obr. 25 pro stanovení následujících parametrů:

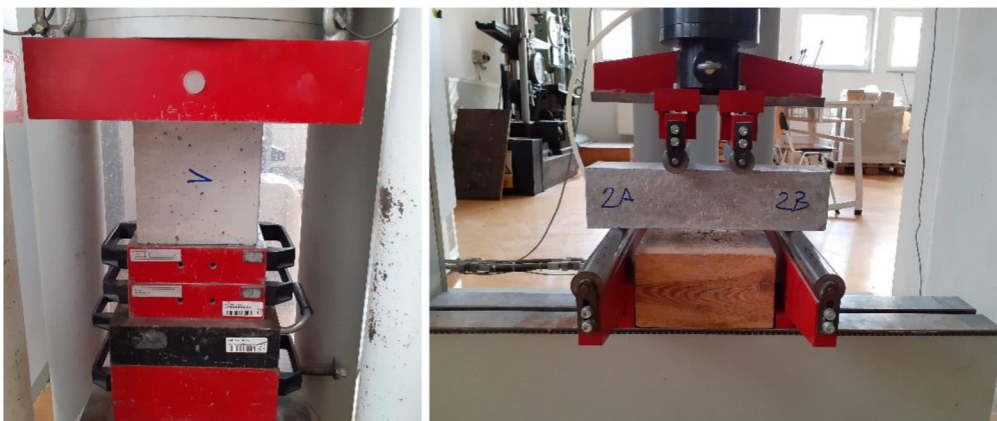
Objemová hmotnost dle ČSN EN 12390-7 [71] v případě všech těles,

Krychlená pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [16] v případě všech těles,

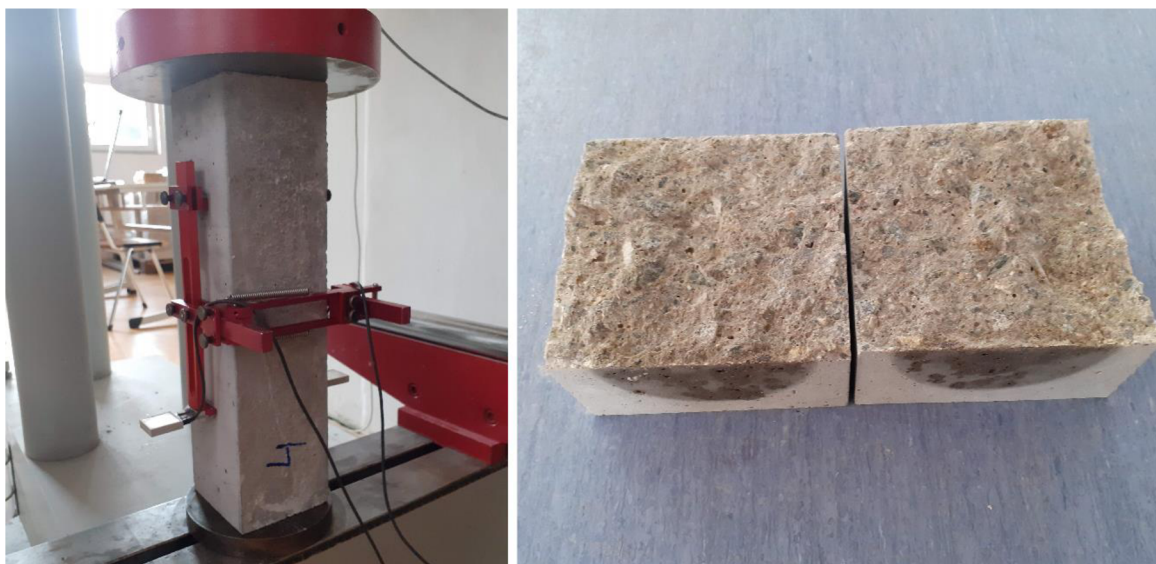
Pevnost v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5 [17] v případě hranolů,

Pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6 [15] v případě hranolů,

Statický modul pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [18] v případě hranolů.



Obr. 24: Vlevo pevnost v tlaku, vpravo pevnost v tahu ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 25: Vlevo zkoušení statického modulu pružnosti, vpravo průsak tlakovou vodou [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].

Z jednotlivých naměřených hodnot byl spočten aritmetický průměr. Pro stanovení rozptylu jednotlivých parametrů byla stanovena výběrová směrodatná odchylka a variační koeficient. Pomocí ultrazvukové a rezonanční metody probíhá kontrola materiálových vlastností kontinuálně pro všechna tělesa, a tak není součástí výsledků zkoušení ve stáří 28 dní.

V případě krychlí rozměru 150 x 150 x 150 mm byla stanovena objemová hmotnost a krychlená pevnost na třech tělesech viz Tab. 2.

Tab. 2: Stanovení parametrů pro krychlená tělesa.

krychle č.	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F_c [kN]	D [kg/m ³]	f_c [N/mm ²]
1	150,6	149,5	150,7	7864,2	1107,8	2319	49,2
2	150,6	149,8	150,7	7819,8	1088,0	2300	48,2
3	150,1	150,2	150,1	7821,4	1092,7	2311	48,5
průměrná hodnota:						2310	48,6
výběrová směrodatná odchylka:						10	0,52
Variační koeficient						0,43	1,07

Pro hranolová tělesa rozměrů 100 x 100 x 400 byla stanovena objemová hmotnost, následně byla na sadě tří tělesech stanovena pevnost v příčném tahu a pevnost v tahu ohybem viz Tab. 3. Na zbylých třech tělesech byl stanoven statický modul pružnosti a krychlená pevnost v tlaku viz Tab. 4.

Tab. 3: Stanovení parametrů pro první sadu hranolových těles.

hrano l. č.	b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	F _{cf} [kN]	F _{ct-A} [kN]	F _{ct-B} [kN]	D [kg/m ³]	f _{cf} [N/mm ²]	f _{ct} [N/mm ²]	
1	100,2	100,0	400,3	9335,5	16,8	67,8	65,9	2326	5,0	4,4	4,1
2	101,7	100,4	399,9	9448,5	18,0	62,2	60,0	2316	5,3	3,8	3,8
3	101,3	100,1	399,2	9400,5	17,6	72,8	64,8	2323	5,2	4,5	4,1
průměrná hodnota:								2322	5,2	4,1	
výběrová směrodatná odchylka:								5	0,14	0,29	
Variační koeficient								0,22	2,64	7,09	

Tab. 4: Stanovení parametrů pro druhou sadu hranolových těles.

hranol č.	b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	F _c [kN]	D [kg/m ³]	E _c [N/mm ²]	f _c [N/mm ²]
4	101,3	100,1	400,3	9393,5	378,8	2314	27670	37,4
5	100,0	100,3	400,6	9373,0	376,1	2334	29540	37,5
6	100,8	100,4	400,6	9492,5	384,8	2344	31310	38,1
průměrná hodnota:						2331	29507	38
výběrová směrodatná odchylka:						15	1820	0,37
Variační koeficient						0,65	6,17	0,98

4. LABORATORNÍ MĚŘENÍ A ZKOUŠENÍ TĚLES

Experiment pro stanovení mrazuvzdornosti probíhal ve dvou zkušebních skupinách. Každá skupina měření probíhala ve třech běžích dle kapacitních možností laboratorního vybavení.

První skupina zkoušení byla zaměřena na hranolová tělesa vyrobená pomocí forem a jejich výřezem. Druhá skupina měření stanovala parametry na tělesech získaných jádrovým vrtáním a jejich výřezem, dále na tělesech tvaru krychle a hranolových tělesech pro stanovení pevnosti v prostém tahu.

Zkušební tělesa byla vystavena mrazovým a rozmrazovacím cyklům dle předpisu ČSN 73 1322 [3]. Jeden cyklus dle zkušebního postupu trval šest hodin, přičemž je složen ze čtyř hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování ve vodní lázni. Po každých 25 cyklech bylo provedeno nedestruktivní měření všech těles pro kontrolu změn vlastností v čase. Tento počet cyklů odpovídá době šesti dní a šesti hodin. Pro experiment bylo využito programovatelné automatické zařízení KD 20 od firmy EKOFROST s.r.o. viz Obr. 26. Zkušební tělesa byla vystavena 100 cyklům po kterých byl experiment ukončen. V případě standardních hranolů byl počet cyklů informativně navýšen na hodnotu 200.

Tělesa byla v mrazícím zařízení uložena nejvýše ve dvou výškových úrovních. Po každých 25 cyklech byla tělesa přemísťována, otáčena a měněna jejich poloha tak, aby změna polohy a rozmístění v mrazícím zařízení byla v průběhu všech cyklů co nejvíce rovnoměrná.

Každá zkušební skupina byla rozdělena na tři sady těles. V každé sadě byly zastoupeny tělesa pro vybrané zkušební metody po 9 kusech, tzn. 3 tělesa referenční a 3 tělesa pro destruktivní zkoušení po 50 a 100 cyklech.



Obr. 26: Zkušební zařízení KD 20 firmy EKOFROST s.r.o.

Celý experiment má za úkol stanovit součinitel mrazuvzdornosti „K“ v případě vybraných zkušebních metod a jednotlivých zkušebních těles. V předpisu normy [3] je tento součinitel charakterizován jako poměr mezi průměrnými výsledky pevnosti v tahu ohybem těles vystavených mrazovým cyklům a těles referenčních. Pro účely experimentu, potažmo diplomové práce je takto stanoven součinitel pro všechny zkušební metody.

V případě destruktivního zkoušení probíhá odvození mezi 3 tělesy referenčními a 2x3 tělesy vystaveny mrazovým cyklům. V některých případech dochází k většímu rozptylu výsledku při takto nízkém počtu těles. Z těchto důvodů bylo pro odvození součinitele mrazuvzdornosti a zvýšení počtu výsledků ve statistickém souboru využito porovnání každé sady tří těles vystavené mrazovým cyklům vůči jednotlivým referenčním tělesům. Za tohoto předpokladu dostáváme 9 výsledných hodnot z každých 50 cyklů, které vstupují do průměrné hodnoty stanovené veličiny vůči hodnotám referenčním.

Při nedestruktivním zkoušení je při využití ultrazvukové metody stanovena doba průchodu tělesem v počtu tří hodnot pro těleso. U rezonanční metody jsou měřeny všechny tři základní frekvence vzhledem k uložení tělesa a poloze snímačů. každé těleso je porovnáváno samo se sebou a zároveň dochází ke stanovení průměrné hodnoty součinitele mrazuvzdornosti z velkého počtu hodnot statistického souboru.

4.1 PEVNOST BETONU V PROSTÉM TAHU

Pevnost betonu v prostém tahu byla stanovena již dle zrušené normy ČSN 73 1318 [13]. Měření probíhalo ve druhé zkušební skupině jako poslední běh. Pro zkoušku byla určena zkušební tělesa tvaru hranolu o rozměrech 100 x 100 x 400 mm a tělesa z jádrového vrtání o průměru 100 mm a štíhlosti blízké hodnotě 4.

V průběhu zkoušení byla využita i metoda měření akustických emisí ke sledování vzniku trhlin ve struktuře a odhadu míst porušení viz Obr. 27. Vyhodnocení této metody není součástí práce.



Obr. 27: Měření metodou akustických emisí za účelem sledování porušení betonu během zkoušky.

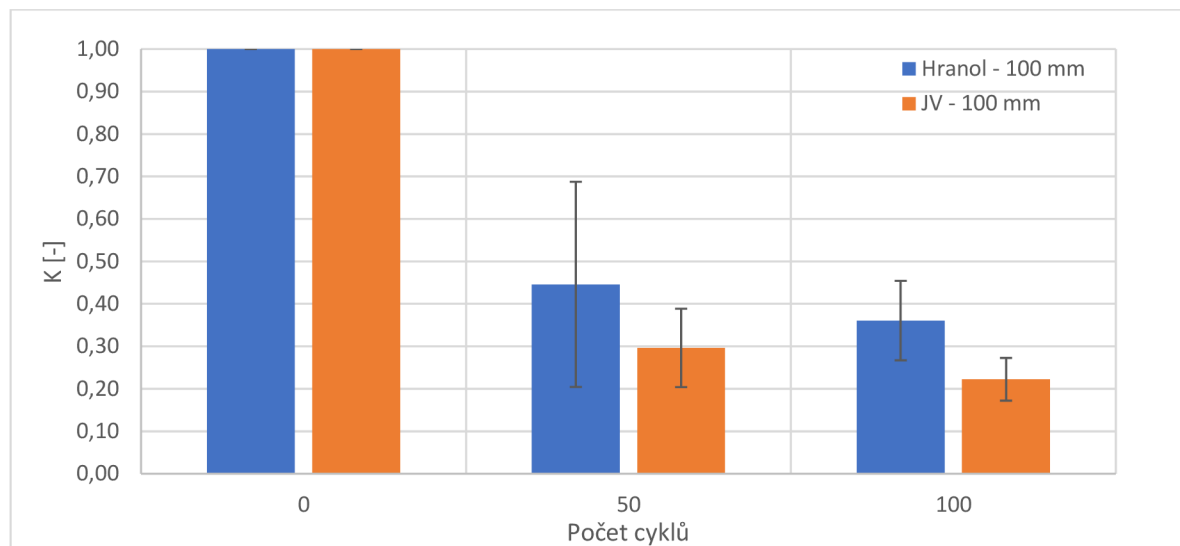
Z naměřených hodnot byla stanovena pevnost v prostém tahu a vyjádřen součinitel mrazuvzdornosti viz Tab. 5. Tělesa vyrobená za pomoci forem vykazují již v počátcích značný rozptyl naměřených hodnot. U těles odebraných z konstrukce jádrovým vrtáním můžeme pozorovat v počátcích méně než poloviční pevnost v tahu oproti tělesům z forem. Tyto tělesa však vykazují menší počáteční rozptyl naměřených hodnot.

Tab. 5: Výsledné pevnosti v prostém tahu a příslušný součinitel mrazuvzdornosti.

Těleso	Označení	Počet cyklů	R_t [MPa]	R_t [MPa]	σ [MPa]	CoV [%]	K [-]
Hranol - 100 mm	Tah-1	0	3,7	3,7	0,9	24,7	1,00
	Tah-2	0	4,6				
	Tah-3	0	2,8				
	Tah-4	50	1,0	1,6	0,9	56,0	0,45
	Tah-6	50	2,6				
	Tah-7	50	1,1				
	Tah-5	100	1,1	1,3	0,2	15,4	0,36
	Tah-8	100	1,5				
	Tah-9	100	1,2				
JV - 100 mm	Tah-1	0	2,1	1,8	0,3	15,5	1,00
	Tah-2	0	1,7				
	Tah-3	0	1,6				
	Tah-4	50	0,7	0,5	0,2	32,7	0,30
	Tah-5	50	0,5				
	Tah-6	50	0,4				
	Tah-7	100	0,3	0,4	0,1	21,6	0,22
	Tah-8	100	0,5				
	Tah-9	100	0,3				

Z výsledků mezi referenčními tělesy a tělesy vystaveným mrazovým cyklům můžeme vidět klesající trend v tahové pevnosti. Tento trend je obdobný pro oba druhy těles viz Obr. 28. V případě těles z jádrového vrtání jsou výsledky celkově nižší s podobným klesajícím trendem.

První pokles pevnosti mezi počátkem a 50 cykly je výrazný. Dostáváme se na méně než poloviční hodnoty v případě hranolů a na třetinové hodnoty v případě jádrového vrtání imitující odběr z konstrukce. Následný pokles v dalších 50 cyklech již nedosahuje takových hodnot vlivem již zásadněji porušené vnitřní struktury. Pokles pevnosti tak dosahuje přibližně dalších 10 % v obou případech. Taková tělesa dle výsledku nemůžeme považovat za mrazuvzdorná.



Obr. 28: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při prostém tahu.

4.2 PEVNOST BETONU V PŘÍČNÉM TAHU

Pevnost betonu v příčném tahu byla stanovena dle normy ČSN EN 12390-6 [15]. Zkoušení probíhalo ve druhé zkušební skupině v rámci běhu 4 a 5. Pro zkoušení byla použita tělesa tvaru krychle o příčných rozměrech 100 x 100 x 100 mm a těles odebraných jádrovým vrtáním o průměrech 150 mm, 100 mm a 75 mm se štíhlostí blízkou hodnotě 1.

Z naměřených hodnot byla stanovena pevnost v příčném tahu a vyjádřen součinitel mrazuvzdornosti viz Tab. 6. Oproti zkoušce prostým tahem vykazují všechna tělesa obdobné prvotní rozptyly parametru pevnosti a pevnost samotnou.

Tab. 6: Výsledné pevnosti v příčném tahu a příslušný součinitel mrazuvzdornosti.

Těleso	Počet cyklů	Označení	Pevnost f_{ct} [MPa]	Pevnost f_{ct} [MPa]	σ [MPa]	CoV [%]	K [%]
JV - 75 mm	0	PT75-1	3,81	3,53	0,2	7,0	1,00
	0	PT75-2	3,35				
	0	PT75-3	3,45				
	50	PT75-4	0,61	0,86	0,3	29,0	0,25
		PT75-5	0,87				
		PT75-6	1,11				
	100	PT75-7	0,42	0,42	0,1	14,6	0,12
		PT75-8	0,49				
		PT75-9	0,36				
JV - 100 mm	0	PT100-1	3,23	3,20	0,1	2,2	1,00
	0	PT100-2	3,12				
	0	PT100-3	3,25				
	50	PT100-4	1,00	1,05	0,1	5,4	0,33
		PT100-8	1,11				
		PT100-9	1,05				
	100	PT100-5	1,19	1,09	0,2	16,5	0,34
		PT100-6	0,89				
		PT100-7	1,20				
JV - 150 mm	0	PT150-1	3,96	3,82	0,1	3,6	1,00
	0	PT150-2	3,69				
	0	PT150-3	3,81				
	50	PT150-4	1,43	1,34	0,1	10,8	0,35
		PT150-5	1,42				
		PT150-6	1,18				
	100	PT150-7	1,58	1,34	0,3	22,8	0,35
		PT150-8	1,43				
		PT150-9	1,00				
Krychle - 100 mm	0	PT100-1	4,45	4,55	0,1	2,0	1,00
	0	PT100-2	4,59				
	0	PT100-3	4,62				
	50	PT100-4	4,37	3,91	0,5	11,7	0,86
		PT100-5	3,90				
		PT100-6	3,46				
	100	PT100-7	2,51	2,56	0,2	8,6	0,56
		PT100-8	2,80				
		PT100-9	2,37				

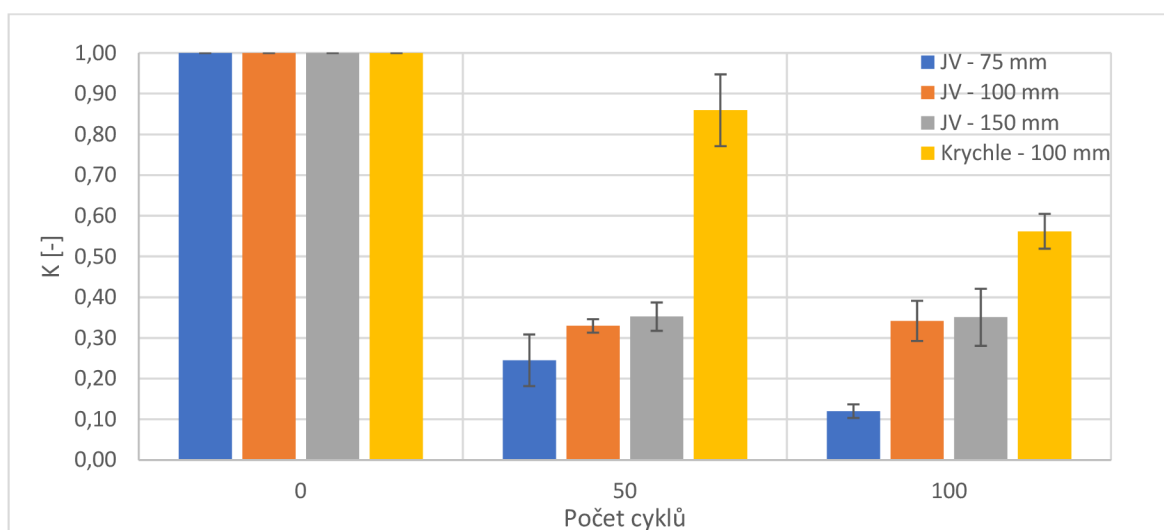
Z výsledků je patrná podobnost v klesajícím trendu pevnosti mezi tělesy z jádrového vrtání. Tělesa tvaru krychle vyrobených ve formě dosahují lepších výsledků a klesající trend je značně rozdílný viz Obr. 29.

V případě průměru tělesa 75 mm dochází k většímu poklesu pevnosti. K tomuto poklesu nejspíše přispívá větší poměr velikosti zrn kameniva vůči samotnému průměru tělesa. Dochází tak poměrově k větší poruše vnitřní struktury cementového tmelu a porušení soudržnosti na rozhraní cementový tmel a kamenivo. Mezi cyklem 0 a 50 se dostáváme na pokles

pevnosti o 75 %. Po vystavení dalším mrazovým cyklům již v důsledku velkého porušení vnitřní struktury dochází ke snížení pevnosti o přibližně 10 %.

U tělese průměrů 150 mm a 100 mm můžeme sledovat pokles mezi cyklem 0 a 50 na přibližně třetinové hodnoty pevnosti. V obou těchto případech při dalších 50 cyklech nedochází k poklesu výsledných pevností, které jsou na hodnotě chyby měření. K tomuto faktu přispívá již zásadní narušení vnitřní struktury a nízký počet těles pro stanovení statisticky věrohodných výsledků. Vliv velikosti tělesa může též hrát roli při oddrolování ve srovnání s tělesem menších rozměrů až v dalších cyklech.

Krychle dosahují výrazně menší degradace vlastností mezi mrazovými cykly. Po 50 cyklech je součinitel mrazuvzdornosti roven hodnotě 0,86. Během dalších 50 cyklů zaznamenává pokles o 30 % na hodnotu 0,56. Můžeme tedy sledovat po celou dobu klesající trend, který klesá mnohem menším spádem. Obdobně jako v případech jiných zkušebních metod nemůžeme považovat zkušební tělesa jako mrazuvzdorná.



Obr. 29: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při příčném tahu.

4.3 PEVNOST BETONU V TAHU OHYBEM

Pevnost betonu v tahu ohybem byla stanovena dle ČSN EN 12390-5 [17]. Zkoušení probíhalo napříč oběma zkušebními skupinami v rámci běhů 1, 3, 4 a 5. Jelikož se jedná o referenční zkoušku mrazuvzdornosti, zkoušení probíhalo oběma možnostmi průběhu zkoušky. Tedy tříbodovým ohybem viz Obr. 30 i čtyřbodovým ohybem viz Obr. 31.

Zároveň byla použita široká škála těles. Jako základní tělesa byli použity hranoly 100 x 100 x 400 mm a tělesa z jádrového vrtání o průměru 100 mm a štíhlosti blízké hodnotě 4. Tyto tělesa byla doplněna o hranoly příčného rozměru 100 mm vzniklých výřezem z hranolu

příčného rozměru 150 mm a jádrového vývrtu průměru 150 mm. Délce hranoly příčného rozměru 65 mm vzniklé výřezem z hranolu o příčném rozměru 100 mm. Jako poslední byla použita tělesa z jádrového vrtání o průměru 75 mm.



Obr. 30: Zkouška tříbodovým ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 31: Zkouška čtyřbodovým ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].

Podrobnější číselné vyhodnocení je v důsledku velkého souboru hodnot součástí přílohové části.

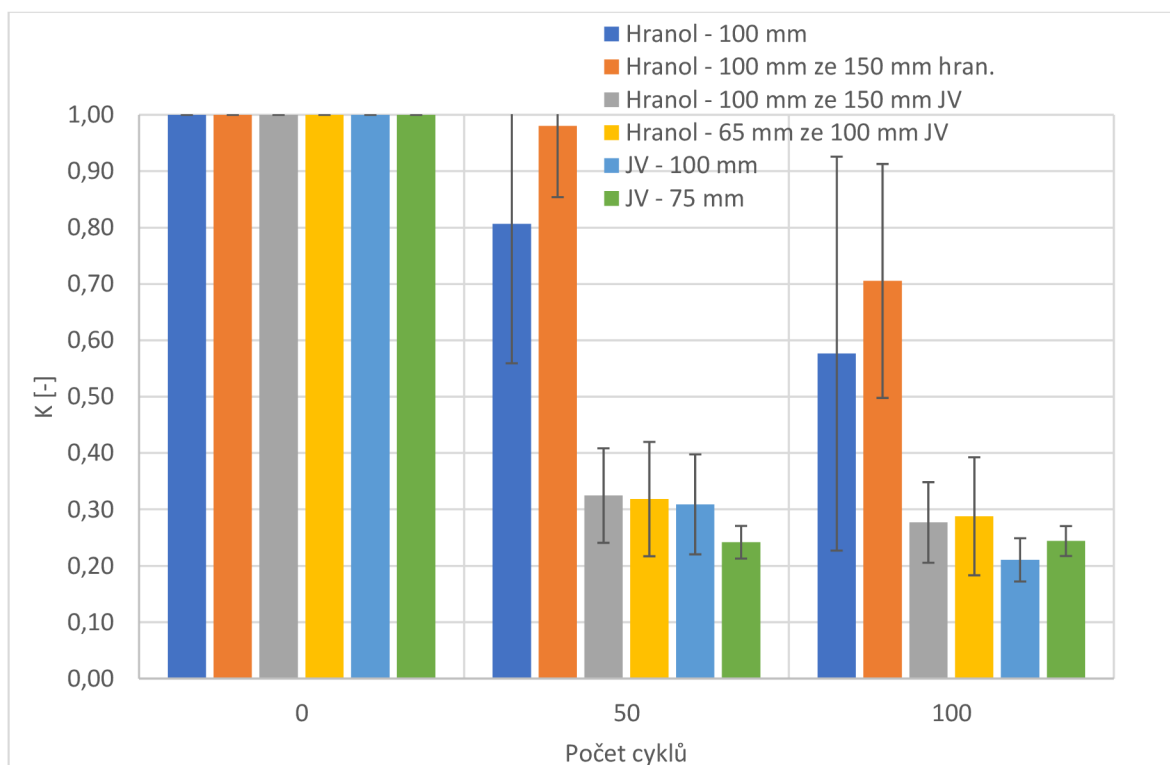
Po stanovení pevnosti v tahu za ohybu byl stanoven součinitel mrazuvzdornosti pro jednotlivá tělesa. Ze vzájemného porovnání součinitele mrazuvzdornosti viz Obr. 32 je patrné, že tělesa vyrobená jádrovým vrtáním anebo vzniklá jejich výřezem dosahují strmějších poklesů pevnosti a nižších výsledných pevností. Tyto tělesa mezi cyklem 0 a 50 ztrácí až 75 % své pevnosti v tahu ohybem. Při následném vystavení dalším 50 mrazovým cyklům již dochází jen k velmi malému poklesu pevnosti v řádech procent. Za tento fakt může nejspíše již velmi

porušená vnitřní struktura cementového tmelu a ztráta soudržnosti na rozhraní cementový tmel a kamenivo.

V případě těles hranolových jsou výsledky mnohem pozitivnější. U standardního hranolu dochází po 50 cyklech k poklesu pevností o 19 %. Tento trend je téměř lineární, a tak po následujících 50 mrazových cyklech dosahuje pokles pevností o dalších 23 % a součinitel mrazuvzdornosti tak nabývá hodnot 0,58. V konečné fázi je již celkem zásadní rozptyl naměřených hodnot, kdy variační koeficient nabývá hodnot blízkým 70 % . V případě většího souboru hodnot bychom pravděpodobně dostali nižší výsledky.

U hranolu příčného rozměru 100 mm, který byl vyřezán z hranolu většího rozměru jsou výsledky zajímavější a můžeme je v první polovině počtu cyklů považovat za anomálii. Po prvních 50 cyklech je zaznamenáno snížení pevnosti jen o 2 %. V takovém případě můžeme těleso považovat za téměř nepoškozené mrazovými cykly, případně se pohybujeme na chybě měření.

Takto naměřené výsledky mohou vznikat vlivem geometrických nedokonalostí, především co se týče jejich rovinnosti a kolmosti vlivem výřezu. V následujících 50 mrazových cyklech již zaznamenáváme snížení vlastností o 26 % a tedy součiniteli mrazuvzdornosti 0,71. To přibližně odpovídá klesajícímu trendu standardního hranolu. I při této zkušební metodě můžeme považovat všechna tělesa jako nemrazuvzdorná.



Obr. 32: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při tahu ohybem.

4.1 RELATIVNÍ DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Relativní dynamický modul byl stanoven dle ČSN 73 1380 [54]. Pro všechna tělesa byla průběžně po každých 25 cyklech stanovena rychlost průchodu ultrazvukového impulzu tělesem a první vlastní frekvence při podélném, příčném i kroutivém kmitání. Výsledky jednotlivých těles byli poté vůči sobě zprůměrovány.

Starší norma ČSN 73 1322 [3] pro stanovení mrazuvzdornosti sice o vyhodnocení pomocí nedestruktivního zkoušení pojednává, samotné vstupní parametry či způsob vyhodnocení není uveden a odkazuje se na platné normy pro samotné zkušební postupy. Stejný rozpor najdeme i v samotných normách kdy ČSN 73 1371 [22] a ČSN 73 1372 [26] neudávají žádný zkušební postup pro stanovení mrazuvzdornosti. Normy sice připouští zkušební postup pro stanovení porušení vnitřní struktury porovnáním dynamických modulů pružnosti, případně dynamického Poissonova čísla. Do těchto výpočtů však vstupuje více neznámých, které mohou narušit výpovědní hodnotu těchto výsledků, respektive snížit význam samotné vlastní frekvence nebo rychlosti průchodu.

Z těchto důvodu je vyhodnocen jen relativní dynamický modul pružnosti, který je odvozen porovnáním základních měřených veličin v druhých mocninách. Tento postup nám sice nedává žádné přesné fyzikální hodnoty, pro stanovení změn mechanických vlastností betonu v čase se však jeví jako velice výhodný.

4.1.1 Ultrazvuková impulzová metoda

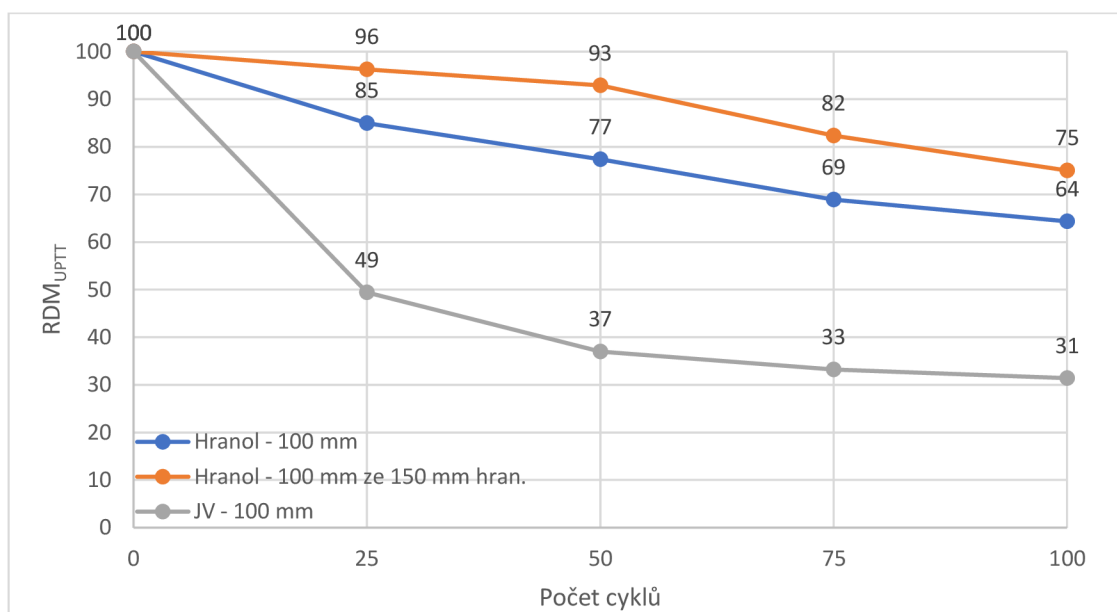
Pomocí ultrazvukové impulzové metody dle normy [22] byli pro každé zkušební těleso změřeny tři rychlosti průchodu impulzu tělesem. V rámci diplomové práce byli vybrány tři zkušební tělesa, pro která byl stanoven relativní dynamický modul pružnosti.

Jedná se o hranol o příčném rozměru 100 mm a délce 400 mm. Dále těleso vzniklé jádrovým vrtáním o průměru 100 mm a štíhlostí blízké hodnotě 4. tato tělesa byla zvolena pro svoji porovnatelnost změn vlastností jako zkušebních těles referenčních pro destruktivní zkoušení. jako poslední se jedná o hranol příčného rozměru 100 mm vzniklý výřezem z hranolu většího rozměru. Tento druh tělesa v referenční zkoušce v tahu ohybem dává podstatně lepší výsledky. Podrobnější číselné vyhodnocení je v důsledku velkého souboru hodnot součástí přílohové části.

Po vyhodnocení průměrných rychlostí průchodu impulzu tělesem mezi sebou samým byl stanoven aritmetický průměr hodnot v jednotlivých počtech cyklů. Dle průměrných hodnot byl stanoven relativní dynamický modul a ten byl porovnán mezi tělesy viz Obr. 33.

Z naměřených hodnot je patrné, že tělesa vzniklá jádrovým vrtáním jsou nejméně odolná mrazovým cyklům. Relativní modul pružnosti se tak dostává ke třetinovým hodnotám. Po dalším počtu 50 cyklů je již snížení vlastností v řádu procent vlivem zásadního porušení vnitřní struktury.

U těles hranolových je degradace vlastností v čase výrazně mírnější a dosahujeme tak vyšších relativních dynamických modulů. Standardní hranol dosahuje po 50 cyklech hodnoty 77 % a v konečném počtu cyklů 64 %. Hranol vzniklý výřezem jako v případě jiných zkušebních metod dosahuje po 50 cyklech výrazně vyšších hodnot. Poté je již klesající trend obdobný se standardním hranolem. Konečný relativní dynamický modul byl stanoven na hodnotu 75 %. Tato hodnota by byla diskutabilní, zda je beton ještě mrazuvzdorný či nikoliv. V případě ostatních těles jsou již hodnoty nevyhovující.



Obr. 33: Závislost relativního dynamického modulu pružnosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při využití UZ.

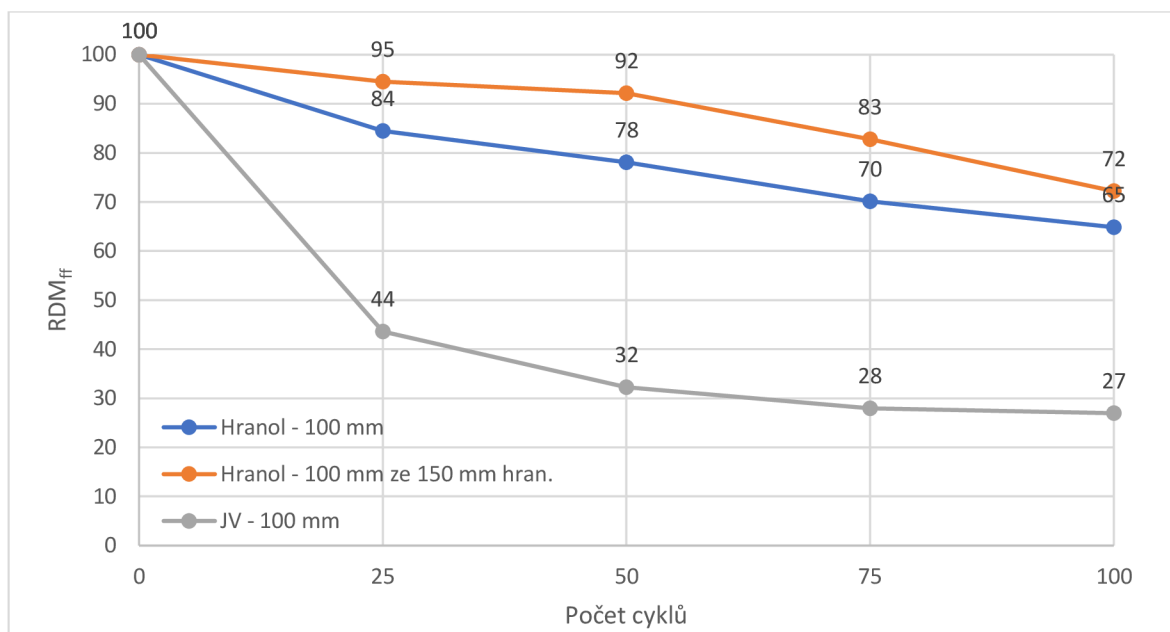
4.1.2 Rezonanční metoda

Pomocí rezonanční metody dle normy [26] byla na každém tělese stanovena první vlastní frekvence při podélném, příčném i krouživém kmitání. Zvolená tělesa odpovídají ultrazvukové metodě, postup výpočtu je v tomto případě také obdobný. Podrobnější číselné vyhodnocení je v důsledku velkého souboru hodnot součástí přílohy části.

Při porovnání výsledků viz Obr. 34 je patrné, že hranolová tělesa lépe odolávají mrazovým cyklům a klesající trend je tedy méně strmý. Naměřené hodnoty až na drobné odchylky odpovídají výsledkům měřených pomocí ultrazvukového impulsu. Pro standardní

na konci zkušebního období dostáváme relativní dynamický modul roven hodnotě 65 %. V případě hranolu vzniklého výřezem jsou výsledky po celou dobu v řádech procent nižší, než je tomu u metody UZ. Více se blíží tak standardnímu hranolu v konečném počtu cyklů, kdy dosahují hodnoty 72 % relativního modulu pružnosti.

V případě jádrového vývrtu je trend stejný jako v případě metody UZ. Tělesa odolávají mrazovým cyklům velice špatně a v konečném počtu cyklů se dostáváme na hodnoty relativního modulu pružnosti odpovídajícího 27 %. Můžeme pozorovat, že výsledky odpovídají hodnotám měřeným UZ metodou s odchylkou 5 % směrem dolů.



Obr. 34: Závislost relativního dynamického modulu pružnosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při využití rezonanční metody.

4.2 STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

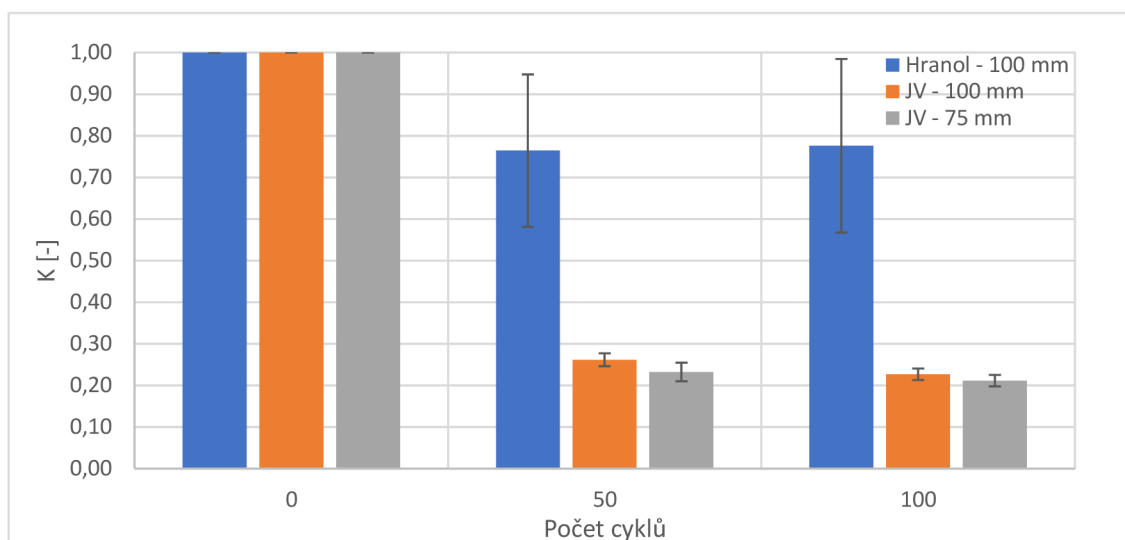
Statický modul pružnosti byl stanoven dle ČSN ISO 1920-10 [18]. Pro zkoušení byla použita tělesa tvaru hranolu o příčném rozměru 100 mm a délce 400 mm viz Obr. 35. Dále tělesa odebrána jádrovým vrtáním o průměru 100 mm a 75 mm a štíhlosti blízké hodnotě 2. Podrobnější číselné vyhodnocení je v důsledku velkého souboru hodnot součástí přílohové části.



Obr. 35: Zkouška pro stanovení statického modulu pružnosti.

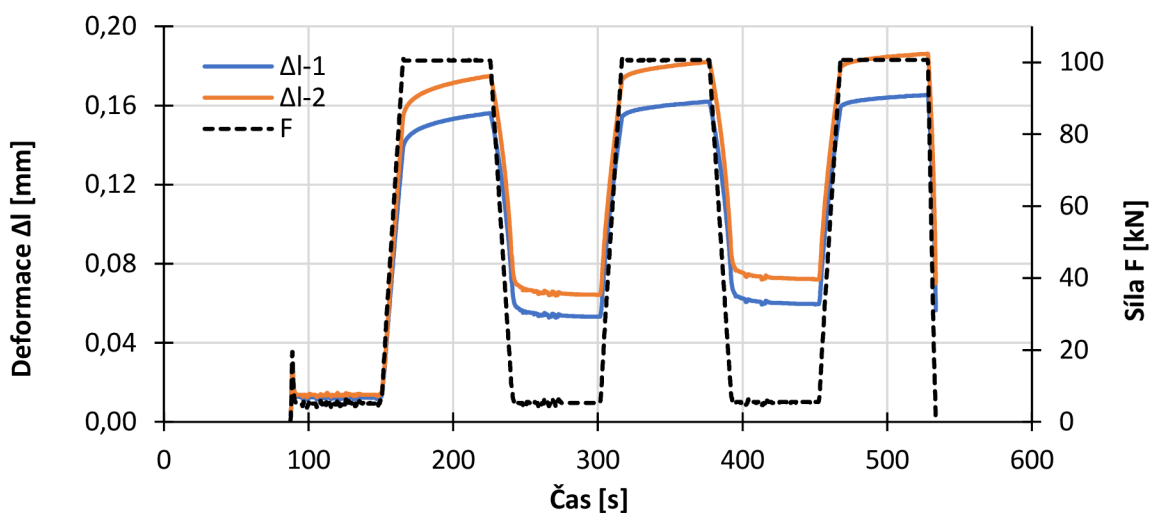
Z porovnání výsledků viz Obr. 36 je patrné, že obdobně jako u většiny zkušebních metod tělesa odebraná z konstrukce odolávají hůře mrazovým cyklům. Již po polovině plánovaných cyklů dochází ke snížení statického modulu pružnosti k 25 %. V následujících cyklech již dochází k mírnému poklesu v řádu procent v důsledku porušení vnitřní struktury.

V případě hranolu se dostáváme po 50 cyklech na hodnoty součinitele mrazuvzdornosti rovny 0,76. V následujících cyklech dochází k mírnému zlepšení. Ke zlepšení může docházet vlivem zrání betonu v čase a nízkému počtu těles pro stanovení statisticky věrohodných výsledků. V případě hranolu by byla mrazuvzdornost znovu diskutabilní vůči výsledkům. V ostatních případech je nedostatečná.



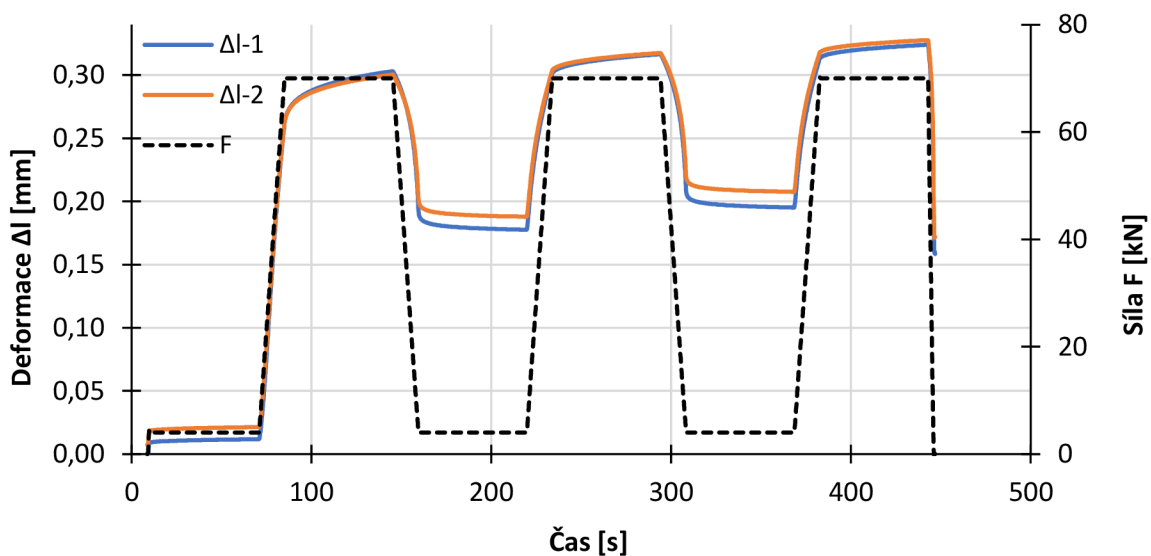
Obr. 36: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů během stanovení statického modulu pružnosti.

Mnohem zajímavější je však pohled na průběh deformací během zkoušky. V případě zdravých těles dochází k návratu pružných deformací do téměř výchozích hodnot, jak popisuje Hookův zákon. U hranolových těles z forem již v některých případech zůstávají trvalé deformace, a tedy již neplatí Hookův zákon. Po 100 cyklech můžeme zaznamenat návrat pružných deformací i jen v přibližně dvou třetinách své hodnoty viz Obr. 37.



Obr. 37: Průběh pružných a trvalých deformací hranolu po 100 cyklech.

Obdobný efekt můžeme sledovat i pro tělesa odebraná z konstrukce. Zde jsou však trvalé deformace již výrazně vyšší viz Obr. 38. Tomuto výsledku odpovídají i již prezentované poklesy modulu pružnosti.



Obr. 38: Průběh pružných a trvalých deformací jádrového vývrtu po 100 cyklech.

Pokud bychom pro vyhodnocení použili normu ČSN EN 12390-13 [19], která umožňuje stanovit počáteční modul pružnosti z prvního cyklu. Z pravidla bychom dostali mírně vyšší hodnoty oproti ustálené hodnotě z posledního cyklu u zdravých těles. U těles vystavených mrazovým cyklům dochází ke snížení stanovené hodnoty.

V případě hranolů vyrobených ve formě se nejedná o zásadnější vzdálení od ustálené hodnoty. U těles odebraných z konstrukce však můžeme zaznamenat jiné chování. Již v prvním cyklu můžeme zaznamenat pokles hodnot. V následujících cyklech můžeme zaznamenat snížení hodnoty až pod polovinu. Pokud by tedy hodnocení probíhalo jen na základě počátečního modulu pružnosti, výsledný součinitel mrazuvzdornosti by vycházel pro tato tělesa ještě menší.

5. SHRNUÍ VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ METOD

Tab. 7: Přehled relativních změn naměřených veličin při různých počtech cyklů.

Těleso	Veličina	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
Hranol - 100 mm	R_t		0,446		0,361
	f_{cf}		0,807		0,576
	f_{ct}		0,859		0,562
	E_c		0,764		0,776
	RDM_{UPPT}	0,850	0,774	0,689	0,643
	RDM_{ff}	0,845	0,781	0,701	0,648
Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	f_{cf}		0,980		0,705
	RDM_{UPPT}	0,963	0,929	0,824	0,750
	RDM_{ff}	0,945	0,921	0,828	0,722
JV - 100 mm	R_t		0,296		0,222
	f_{ct}		0,329		0,342
	f_{cf}		0,309		0,211
	E_c		0,262		0,227
	RDM_{UPPT}	0,494	0,370	0,332	0,314
	RDM_{ff}	0,436	0,322	0,279	0,270
JV - 75 mm	f_{ct}		0,245		0,120
	f_{cf}		0,242		0,244
	E_c		0,232		0,211

O dílčích výsledcích a závěrech pojednávají kapitoly zaměřené na jednotlivé zkušební metody. V Tab. 7 nalezneme přehled vybraných těles, která byla zkoušena dle více zkušebních metod.

Obecně z výsledků vyplývá, že jednotlivá tělesa zaznamenávají největší pokles vlastností v prvních 50 cyklech v případě všech zkušebních metod. V případě standardního hranolu se zkouška pevnosti v prostém tahu značně rozchází. Tento výsledek je nejspíše zapříčiněn vysokým rozptylem naměřených hodnot u těles vyrobených ve formě pro tuto zkoušku. Zároveň tato metoda pravděpodobně vykazuje vyšší citlivosti pro porušení vnitřní struktury. V případě těles odebraných z konstrukce i tato zkouška dává obdobné hodnoty jako ostatní zkušební metody. S tímto je třeba při výrobě počítat. Beton jako heterogenní materiál může i při dodržení většiny předepsaných výrobních postupů vykazovat značné rozptyly vlastností. Vlivem tohoto faktu může jedno těleso odolávat většímu zatížení a druhé menšímu bez zjevných příčin.

V následujících 50 cyklech docházelo ve většině zkušebních metod k poklesu vlastností, kdy pro tělesa získaná jádrovým vrtáním byl pokles menší. Tato tělesa již byla do značné míry poškozena z předchozích cyklů.

Za pomoci nedestruktivního zkoušení ultrazvukovou a rezonanční metodou byly každých 25 cyklů stanoveny jim příslušné veličiny. Z měřených veličin ve druhé mocnině jako poměr hodnot před a po mrazových cyklech byl stanoven relativní dynamický modul. Při porovnání s metodami destruktivními můžeme vidět značnou shodu výsledků. V případě těles odebraných z konstrukce je shoda ještě výraznější. Pro ověření těchto předpokladů by bylo potřeba další zkoumání s větším souborem hodnot destruktivního zkoušení. Přesto však může být průběžné měření a stanovení relativního modulu pružnosti pro stejná tělesa značně výhodné. Jedná se o rychlé nedestruktivní měření, které dle prozatímních výsledků dává relativně důvěryhodné hodnoty změny vlastností v čase. Přesto však neposkytne žádné reálné fyzikální hodnoty.

Z celkového porovnání všech metod vyplývá, že tělesa odebraná z konstrukce vykazují značně horší vlastnosti v případě hodnocení mrazuvzdornosti. Přibližně se jedná o poloviční hodnoty oproti tělesům vyrobených ve formách. Pro další zkoušení by bylo zajímavé důkladně analyzovat místo odebrání (poloha a směr) a jeho vliv na stanovené hodnoty.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo stanovení degradace neprovzdušněného betonu pomocí těles vyrobených ve formách a odebraných z konstrukce. Oba tyto typy těles byly vyrobeny z jedné záměsi a následně byly vystaveny zmrazovacím cyklům.

Teoretická část se zabývala úvodem do problematiky betonu, jeho vlastnostmi a vybranými zkušebními metodami pro stanovení materiálových veličin. Následující kapitola se zabývala úvodem do problematiky mrazuvzdornosti, představením účinků mrazu na čerstvý i ztvrdlý beton a možnostem stanovení mrazuvzdornosti dle platných norem. Ve stručnosti byly představeny i zkušební postupy užívané v zahraničí.

Praktická část se zabývala stanovením součinitele mrazuvzdornosti betonu u těles vyrobených pomocí forem a těles odebraných jádrovým vrtáním z vybetonovaných bloků pro imitaci odběrů z reálné konstrukce. Tato zkušební tělesa byla vystavena zmrazovacím cyklům a následně průběžně testována nedestruktivními i destruktivními metodami.

Na základě těchto výsledků byl stanoven součinitel mrazuvzdornosti pro jednotlivá tělesa a zkušební metody. Zkušební metody poté byly porovnány mezi sebou, především nedestruktivní metody vůči destruktivním a zhodnocena jejich citlivost. V případě použitého neprovzdušněného betonu byla jeho degradace značná, a tak bylo možné zhodnotit citlivost jednotlivých metod na porušení vnitřní struktury betonu.

Výsledky vedou k závěru, že většina zvolených destruktivních metod dávala obdobné výsledky součinitele mrazuvzdornosti pro jednotlivá tělesa vzhledem k jejich zjišťované materiálové pevnosti. Obdobné předpoklady, a tedy shoda s výsledky destruktivních zkoušek se prokázala i v případě nedestruktivního zkoušení stanovením relativního dynamického modulu z naměřených hodnot ultrazvukové a rezonanční metody. Tento parametr nám sice nedává žádné reálné fyzikální hodnoty, ale pro určení degradace vlastností se jevil jako velice výhodný vzhledem ke své rychlosti a jednoduchosti stanovení. V případě potřeby je možné ze stanovených veličin odvodit i dynamické moduly pružnosti nebo dynamické Poissonovo číslo.

Nejdůležitějším zjištěním bylo, že při zkoušení těles odebraných z konstrukce vykazuje beton výrazně nižší mrazuvzdornost než při zkoušení těles z forem téhož betonu. Na tento fakt je třeba myslet, pokud je reálně nutné stanovit mrazuvzdornost betonu zabudovaného v konstrukci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] AiTCIN, Pierre-Claude. Modern concrete technology 5: High-performance concrete. New York: E&FN Spon, 1998.
- [3] ČSN 73 1322 (731322): Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1968, 8 s. EAN 8590963055466.
- [4] CIKRLÉ, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. Věda a výzkum [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2011-3-56_0.pdf
- [5] DĚDEK, Miloň a František VOŠICKÝ. Stavební materiály: pro 1. ročník SPŠ stavebních. 6., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2008. ISBN 978-80-86817-26-2.
- [6] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 3. vydání. Praha, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [7] PEŘKA, Lukáš. Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1: TP 2.4 : technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011. Metodické a technické pomůcky k činnosti autorizovaných osob. ISBN 978-80-87438-13-8.
- [8] Krivka-zrnosti2-1024x693. In: EBeton [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/krivka-zrnosti2-1024x693.jpg>
- [9] ČSN EN 12620 +A1 (721502): Kamenivo do betonu. Praha: ČNI, 2008, 52 s. EAN 8590963823171.
- [10] ČSN EN 1008 (732028): Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. 1. vydání. Praha: ČNI, 2003, 20 s. EAN 8590963663432, Katalogové číslo 66343.
- [11] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. Stavební materiály. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [12] ČSN EN 206 +A2 (732403): Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Změna A2. Praha: ÚNMZ, 2021, 88 s. EAN 8596135132317, Katalogové číslo 513231.
- [13] ČSN 73 1318 (731318): Stanovení pevnosti betonu v tahu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986, 12 s. EAN 8590963310855.
- [14] Pevnost-betonu-prosty-tah. In: EBeton [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/pevnost-betonu-prosty-tah.jpg>
- [15] ČSN EN 12390-6 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2010, 12 s. EAN 8590963858937.
- [16] ČSN EN 12390-3 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2020, 20 s. EAN 8596135098682, Katalogové číslo 509868.
- [17] ČSN EN 12390-5 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2020, 12 s. EAN 8596135104512. Katalogové číslo 510451.
- [18] ČSN ISO 1920-10: Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Praha: ÚNMZ, 2016, 12 s. Třídící znak 731319.
- [19] ČSN EN 12390-13 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku. Praha: ÚNMZ, 2021, 20 s. EAN 8596135132171. Katalogové číslo 513217.

- [20] ČSN 73 6174 (736174): Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem. Praha: ČNI, 1994, 8 s. EAN 8590963166575. Katalogové číslo 16657.
- [21] CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB. *Dynamické a statické moduly pružnosti betonu*. In: TZB-info [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>
- [22] ČSN 73 1371 (731371): Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2011, 12 s. Třídící znak 731371.
- [23] CIKRLE, Petr a kolektiv. *NDT zkoušení ve stavebnictví: Příručka kurzu ČŽV*. Brno: Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební, VUT, 2010, 133 s. ISBN 978-80-214-4198-9.
- [24] STANISLAV, Štěpán. *Využití ultrazvukové metody při diagnostice betonových konstrukcí*. 2012, 47 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58262. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.
- [25] ČSN 73 2011 (732011): Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Praha: ÚNMZ, 2012, 24 s. EAN 8590963904030.
- [26] ČSN 73 1372 (731372): Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2012, 16 s. EAN 8590963904023. Katalogové číslo 90402.
- [27] ČSN EN 12390-8 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: ÚNMZ, 2020, 8 s. EAN 8596135104536. Katalogové číslo 510453.
- [28] SHANG, Huai-Shuai a Ting-Hua Yi. *Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete* [online]. In: . The Scientific World Journal, 2013 [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/650791/>
- [29] BECHYNĚ, Stanislav. *Stavatelství betonové I - Svazek první: technologie betonu, složky betonu*. Praha: SNTL, 1954.
- [30] BECHYNĚ, Stanislav. *Stavatelství betonové I - Svazek pátý: vodotěsnost a jiné stavební a fyzikální vlastnosti betonu*. Praha: SNTL, 1961.
- [31] PAVLÍK, Adolf, Jaroslav DOLEŽAL a Karel FIEDLER. *Technologie betonu*. Praha: SNTL, 1973.
- [32] ŠLACHTA, Emil. *Příručka pro silniční laboratoře*. Praha: SNTL, 1958.
- [33] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 8021407794.
- [34] YI, Seong-Tae, Sue-Won PAE a Jin-Keun KIM. *Construction and Building Materials: Minimum curing time prediction of early-age concrete to prevent frost damage*. Republic of Korea: Department of Civil and Environmental Engineering, 2011.
- [35] MARCHENKO, Aleksey. *Thermal Expansion Measurements in Fresh and Saline Ice Using Fiber Optic Strain Gauges and Multipoint Temperature Sensors Based on Bragg Gratings* [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/5678193/>
- [36] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Tomáš VYMAZAL, Tereza KOMÁRKOVÁ a Romana HALAMOVÁ. *STANOVENÍ ODOLNOSTI POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK: METODY, PRAXE, PROBLÉMY* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2017-2-42-stanoveni-odolnosti-povrchu-betonu-proti-pusobeni-vody-a-chemickyh-rozmrazovacich-latek-metody-praxe-problemy/>
- [37] *Spalling-damage-reinforced-concrete-seaside-humid-salty-air-conditions-caribbean-florida-problem-rusty-rebar-226332003.jpg* [online]. In: . [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://thumbs.dreamstime.com/z/spalling-damage-reinforced-concrete-seaside-humid-salty-air-conditions-caribbean-florida-problem-rusty-rebar-226332003.jpg>

- [38] Spalling-concrete-2.jpg [online]. In: . [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://www.alphastructural.com/project-gallery/spalling-concrete/spalling-concrete-2.jpg>
- [39] 12046_2019_1172_Fig1_HTML.jpg [online]. In: . [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs12046-019-1172-3/MediaObjects/12046_2019_1172_Fig1_HTML.jpg
- [40] ČSN EN 1367-1 (721195): Zkoušení *odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování*. Praha: ČNI, 2007, 12 s. EAN 8590963798875.
- [41] ČSN EN 1367-2 (721195): Zkoušení *odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 2: Zkouška síranem hořčnatým*. Praha: ÚPTN, 2010, 20 s. EAN 8590963860619.
- [42] ČSN EN 1097-6 (721194): Zkoušení *mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: ÚPTN, 2014, 40 s. EAN 8590963948324.
- [43] SKRIPKIŪNAS, Gintautas a Džigita NAGROCKIENĚ. *Procedia Engineering: The Cement Type Effect on Freeze – Thaw and Deicing Salt Resistance of Concrete* [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813008655>
- [44] WOODS, Hubert. *Observations on the resistance of concrete to freezing and thawing. s.l.: Research and development laboratories of the Portland Cement association, 1956.*
- [45] MINDESS, Sidney a J. YOUNG. *Concrete. New Jersey: Englewood Cliffs (NJ) : Prentice-Hall, 1981.*
- [46] COHEN, M., Y. ZHOU a W. DOLCH. *On-Air-Entrained High-Strength Concrete--Is it Frost Resistant?. ACI Materials Journal, 1992.*
- [47] KRIESEL, R. a W. FRENCH. *Durability of high performance concrete: Structural faults and repairs. 1995.*
- [48] ČSN EN 934-2 +A1 (722326): *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: ÚNMZ, 2012, 24 s. EAN 8590963920184.
- [49] Simulated-air-void-profile-in-81-air-concrete-with-gradual-void-saturation.png [online]. In: . [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Zhichao-Liu-13/publication/324655695/figure/fig1/AS:872435574403072@1585016258155/Simulated-air-void-profile-in-81-air-concrete-with-gradual-void-saturation.png>
- [50] Controlling-air-1-tcm45-556437.JPG [online]. In: . [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://cdnassets.hw.net/e5/73/c2a07d5141b98310bc0ed0961a97/controlling-air-1-tcm45-556437.JPG>
- [51] PIEKARCZYK, Adam a Beata ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK. *Impact of Self-Compacting Concrete Admixtures on Frost Resistance and Compressive Strength: Commensurability of Frost Resistance Criteria* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/11/2922>
- [52] PENG, Gai-Fei a Qiang MA. *The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60MPa grade concrete. Construction and building materials* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://fddocuments.in/document/the-effects-of-air-entrainment-and-pozzolans-on-frost-resistance-of-5060mpa.html>
- [53] BEHFARNIA, Kiachehr. *Construction and Building Materials: The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007022>

- [54] ČSN 73 1380 (731380): Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury. Praha: Český normalizační institut, 2007, 32 s. EAN 8590963777405.
- [55] ČSN 73 1325 (731325): Stanovení mrazuvzdornosti betonu zkrácenými zkouškami. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1971, 8 s. EAN 8590963055480.
- [56] CHROMKOVÁ, Ivana. Zrychlená zkouška mrazuvzdornosti a možnosti jejího využití. *TZB-info [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/12350-zrychlena-zkouska-mrazuvzdornosti-a-moznosti-jejeho-vyuziti>*
- [57] ČSN P CEN/TS 12390-9 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - Odlupování. Praha: Český normalizační institut, 2007, 28 s. EAN 8590963777412.
- [58] Sborník příspěvků k workshopu Trvanlivost silikátových materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4784-4.
- [59] ČSN 73 1326 (731326): Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984, 12 s. EAN 8590963310893.
- [60] DOHNÁLEK, Jiří. ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU. *Věda a výzkum [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2008-3-54-zkouseni-mrazuvzdornosti-betonu/>*
- [61] ČSN EN 12350-7 (731301): Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody. Praha: ÚNMZ, 2020, 24 s. EAN 8596135098668.
- [62] 5.png. In: Test Smart – Build Right Test Smart - Build Right: AVA [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://germann.org/wp-content/uploads/2015/12/5.png>
- [63] PD CEN/TR 15177: Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage. Brusel: European committee for standardization, 2006.
- [64] ÖNORM B 3303: Betonprüfung. Wien: Österreichisches Normeninstitut, 2002.
- [65] RILEM. TC 117-FDC: CDF test - test method for the freeze thaw and deicing resistance of concrete - Tests with sodium chloride. RILEM Publications SARL, 1996.
- [66] ASTM C 666/C 666M: Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International, 2008.
- [67] TOPOLÁŘ, Libor, Dalibor KOCÁB, Luboš PAZDERA a Tomáš VYMAZAL. Analysis of Acoustic Emission Signals Recorded during Freeze-Thaw Cycling of Concrete. *MDPI journals [online]. [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1230>*
- [68] ČSN EN 12350-2 (731301): Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2020, 12 s. EAN 8596135098569.
- [69] ČSN EN 12350-5 (731301): Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím. Praha: ÚNMZ, 2020, 12 s. EAN 8596135098583.
- [70] ČSN EN 12350-6 (731301): Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2020, 12 s. EAN 8596135104505.
- [71] ČSN EN 12390-7 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: ÚNMZ, 2020, 12 s. EAN 8596135104499.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

MPa	Megapascal,
N	Newton,
KHz	kilohertz,
kPa	kilopascal,
K	součinitel mrazuvzdornosti[-],
R_t	pevnost v prostém tahu [MPa],
F	maximální dosažená síla při porušení tělesa [N],
f_{ct}	pevnost v příčném tahu [MPa],
F	maximální dosažená síla při porušení tělesa [N],
l	délka zkušební dotykové plochy [mm],
f_c	pevnost v tlaku [MPa],
A_c	průřezová plocha zatěžovaného tělesa [mm ²],
f_{ct}	pevnost v tahu ohybem [MPa],
l	vzdálenost mezi body uložení [mm],
d_1, d_2	příčné rozměry tělesa [mm],
E_c	statický modul pružnosti v tlaku [MPa],
σ_a	horní zatěžovací napětí [MPa],
σ_b	dolní zatěžovací napětí [MPa],
ε_a	průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-],
ε_b	průměrné poměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-],
v_L	rychlost průchodu UZ impulsu [km/s],
L	délka měřicí základny [mm],
T	čas průchodu měřicí základnou [μ s],
T_L	čas od vyslání signálu budičem do jeho detekce snímačem [μ s],
t_{kor}	korekce doby průchodu zjištěna při kalibraci přístroje a měřením tzv. mrtvého času na etalonu [μ s],
t_e	doba průchodu UZ impulsu etalonem [μ s],
E	časová charakteristika etalonu [μ s],
E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
ρ	objemová hmotnost betonu [kg/m ³],
v_L	rychlost průchodu UZ impulsu [km/s],
k_n	součinitel rozměrnosti prostředí [-],
ν_{cu}	Poissonovo číslo,

$E_{cr,L}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
f_L	první vlastní frekvence podélného kmitání [kHz],
$E_{cr,f}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
c_1	korekční součinitel zohledňující vliv smyku a setrvačných momentů [-],
f_f	první vlastní frekvence příčného kmitání [kHz],
i	poloměr setrvačnosti příčného řezu k ose kolmé na rovinu kmitání [m],
G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa],
k	součinitel zohledňující tvar příčného řezu [-],
f_f	první vlastní frekvence kroutivého kmitání [kHz],
ν_{cr}	dynamické Poissonovo číslo [-],
E_{cr}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa],
G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa],
RDM_{FF}	relativní dynamický modul pružnost rezonanční metodou [%],
RDM_{UPTT}	relativní dynamický modul pružnost ultrazvukovou metodou [%],
pH	potential of hydrogen – exponent vodíku [-],
$NaCl$	chlorid sodný
$CaCl_2$	chlorid vápenatý
$MgCl_2$	chlorid hořečnatý
k_1	součinitel pro jednorozměrné prostředí [-],
k_2	součinitel pro dvojrozměrné prostředí [-],
k_3	součinitel pro trojrozměrné prostředí [-],
σ	výběrová směrodatná odchylka
CoV	variační koeficient [%]

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ideální křivka zrnitosti [8].	13
Obr. 2: Závislost pevnosti betonu vzhledem k vodnímu součiniteli [11].	14
Obr. 3: Těleso pro zkoušku v prostém tahu [14].	15
Obr. 4: Zkouška pevnosti v tlaku [6].	17
Obr. 5: Vlevo tříbodový ohyb, vpravo čtyřbodový ohyb [17].	18
Obr. 6: Vliv kvality, případně vyztužení betonu na rychlosti šíření a tvar impulzu ultrazvukového vlnění [24].	20
Obr. 7: Možné polohy sond při prozvučování [24].	20
Obr. 8: Uložení a poloha snímačů. Zleva rezonanční frekvence podélná, příčná a kroutivá [26].	22
Obr. 9: Vztah mezi velikostí pórů a teplotou, při které se tvoří led [33].	26
Obr. 10: Vodní režim v kapilárním systému během mrazových cyklů [29].	28
Obr. 11: Odškrabávání povrchových vrstev betonu [37] [38] [39].	29
Obr. 12: Tvar a rozložení vzduchových pórů ve struktuře betonu [49] [50].	33
Obr. 13: Kritérium pro odvození součinitele odolnosti [59].	39
Obr. 14: AIR-VOID ANALYSER: Odběr vzorků a průběh zkoušení ve zkušební aparatuře [62].	40
Obr. 15: Zkouška sednutí kužele [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	44
Obr. 16: Zkouška rozlití [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	44
Obr. 17: Zkouška obsahu vzduchu tlakovým hrncem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	45
Obr. 18: Výroba betonových bloků z čerstvého betonu [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	46
Obr. 19: Výroba těles z čerstvého betonu [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	46
Obr. 20: Odběr těles větších průměrů z bloků jádrovým vrtáním [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	47
Obr. 21: Vlevo odběr těles menších průměrů z bloků jádrovým vrtáním, vpravo přehled těles [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	47
Obr. 22: Výřez menšího hranolu z tělesa většího rozměru.	48
Obr. 23: Skladování zkušebních těles [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	48
Obr. 24: Vlevo pevnost v tlaku, vpravo pevnost v tahu ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	49
Obr. 25: Vlevo zkoušení statického modulu pružnosti, vpravo průsak tlakovou vodou [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	50
Obr. 26: Zkušební zařízení KD 20 firmy EKOFROST s.r.o.	52
Obr. 27: Měření metodou akustických emisí za účelem sledování porušení betonu během zkoušky.	54
Obr. 28: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při prostém tahu.	55
Obr. 29: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při příčném tahu.	57
Obr. 30: Zkouška tříbodovým ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	58
Obr. 31: Zkouška čtyřbodovým ohybem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	58
Obr. 32: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při tahu ohybem.	59
Obr. 33: Závislost relativního dynamického modulu pružnosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při využití UZ.	61
Obr. 34: Závislost relativního dynamického modulu pružnosti na tvaru tělesa a počtu cyklů při využití rezonanční metody.	62
Obr. 35: Zkouška pro stanovení statického modulu pružnosti.	63
Obr. 36: Závislost součinitele mrazuvzdornosti na tvaru tělesa a počtu cyklů během stanovení statického modulu pružnosti.	63
Obr. 37: Průběh pružných a trvalých deformací hranolu po 100 cyklech.	64
Obr. 38: Průběh pružných a trvalých deformací jádrového vývrtu po 100 cyklech.	64
Obr. 39: Forma pro výrobu betonového bloku [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	77
Obr. 40: Zkoušení prostým tahem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	77
Obr. 41: Zkoušení prostým tahem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	78
Obr. 42: Příprava těles pro zkoušení prostým tahem.	78

Obr. 43: Záznam těles a čištění přípravku po zkoušce prostým tahem.....	79
Obr. 44: Porušení těles po zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku	79
Obr. 45: Lepidlo a přípravky pro zkoušení prostým tahem.....	80
Obr. 46: Zkoušení průsaku tlakovou vodou [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].	80
Obr. 47: Příprava těles pro lomové zkoušky	81

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1: Teoretická receptura (10022) neprovzdušněného betonu.	43
Tab. 2: Stanovení parametrů pro krychlená tělesa.	50
Tab. 3: Stanovení parametrů pro první sadu hranolových těles.	51
Tab. 4: Stanovení parametrů pro druhou sadu hranolových těles.	51
Tab. 5: Výsledné pevnosti v prostém tahu a příslušný součinitel mrazuvzdornosti.	54
Tab. 6: Výsledné pevnosti v příčném tahu a příslušný součinitel mrazuvzdornosti.....	56
Tab. 7: Přehled relativních změn naměřených veličin při různých počtech cyklů.	66
Tab. 8: Vyhodnocení zkoušky v tahu ohybem.....	81
Tab. 9: Přehled výsledku měření ultrazvukovým impulzem.....	83
Tab. 10: Vyhodnocení měření ultrazvukovým impulzem	84
Tab. 11: Přehled výsledků měření rezonanční metodou	85
Tab. 12: vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou metodou.....	86
Tab. 13: Vyhodnocení výsledků zkoušky statického modulu	87

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: FOTODOKUMENTACE.....	77
PŘÍLOHA 2: FOTODOKUMENTACE NAD RÁMEC PRÁCE	80
PŘÍLOHA 3: ZÁZNAM A VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH ZKOUŠEK	81

PŘÍLOHA 1: FOTODOKUMENTACE



Obr. 39: Forma pro výrobu betonového bloku [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 40: Zkoušení prostým tahem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 41: Zkoušení prostým tahem [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 42: Příprava těles pro zkoušení prostým tahem.



Obr. 43: Záznam těles a čištění přípravku po zkoušce prostým tahem



Obr. 44: Porušení těles po zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku



Obr. 45: Lepidlo a přípravky pro zkoušení prostým tahem

PŘÍLOHA 2: FOTODOKUMENTACE NAD RÁMEC PRÁCE



Obr. 46: Zkoušení průsaku tlakovou vodou [fotoarchiv řešitelského kolektivu projektu GAČR č. 19-22708S].



Obr. 47: Příprava těles pro lomové zkoušky

PŘÍLOHA 3: ZÁZNAM A VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH ZKOUŠEK

Tab. 8: Vyhodnocení zkoušky v tahu ohybem.

Těleso	Počet cyklů	Označení	b [mm]	h [mm]	d [mm]	L [mm]	l [mm]	Pevnost f_{cf} [MPa]	Pevnost f_{cf} [MPa]	σ [MPa]	CoV [%]	K [%]	
Hranol - 100 mm	0	1	99,78	100,14		400,37	300,00	6,13	5,60	0,5	8,3	1,00	
	0	2	101,17	100,55		399,79	300,00	5,29					
	0	3	101,65	100,30		400,67	300,00	5,37					
	Hranol - 100 mm	50	4	101,01	99,99		400,36	300,00	4,80	4,49	1,5	34,5	0,81
		50	5	101,15	100,41		400,42	300,00	2,81				
		50	6	100,70	100,24		400,23	300,00	5,86				
		100	7	100,84	100,35		400,78	300,00	1,81				
	Hranol - 100 mm	100	8	101,19	100,61		400,25	300,00	5,78	3,21	2,2	69,4	0,58
		100	13	100,95	100,48		400,88	300,00	2,05				
Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	0	Řez-1	100,74	98,92		401,96	300,00	5,72	5,46	0,6	10,5	1,00	
	0	Řez-2	100,61	99,43		402,72	300,00	5,85					
	0	Řez-3	100,57	97,23		401,25	300,00	4,80					
	Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	50	Řez-4	100,49	99,73		401,49	300,00	5,82	5,31	0,5	9,8	0,98
		50	Řez-5	100,73	99,27		399,57	300,00	5,31				
		50	Řez-6	100,25	99,44		401,65	300,00	4,79				
	Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	100	Řez-7	100,48	99,64		400,35	300,00	5,21	3,82	1,2	32,0	0,71
		100	Řez-8	99,48	97,50		401,69	300,00	3,33				
		100	Řez-9	100,05	99,91		400,46	300,00	2,92				

JV - 75 mm	100	Ohyb75-9			74,31	239,4	180,0	0	1,02	0,99	0,0	2,7	0,2	4
	100	Ohyb75-8			74,37	251,0	180,0	0	0,96					
	100	Ohyb75-7			74,31	241,4	180,0	0	1,00					
	50	Ohyb75-6			74,31	247,5	180,0	0	1,05					
	50	Ohyb75-5			74,31	246,9	180,0	0	0,99					
	50	Ohyb75-4			74,36	248,7	180,0	0	0,92					
	0	Ohyb75-3			74,33	244,7	180,0	0	3,75					
	0	Ohyb75-2			74,36	247,1	180,0	0	4,73					
	0	Ohyb75-1			74,37	249,3	180,0	0	3,86					
	100	Ohyb-9			98,88	380,4	300,0	0	0,57					
	100	Ohyb-7			98,86	384,1	300,0	0	0,75					
	100	Ohyb-6			98,89	379,3	300,0	0	0,80					
JV - 100 mm	50	Ohyb-8			98,96	379,3	300,0	0	0,79					
	50	Ohyb-5			98,77	387,6	300,0	0	0,94					
	50	Ohyb-4			98,87	381,2	300,0	0	1,40					
	0	Ohyb-3			98,88	378,0	300,0	0	3,25					
	0	Ohyb-2			98,88	383,2	300,0	0	3,91					
	0	Ohyb-1			99,02	376,4	300,0	0	3,06					
	100	Rez5-7	67,18	67,23		207,2	180,0	0	2,07					
	100	Rez5-6	67,20	67,44		209,0	180,0	0	1,46					
	100	Rez5-4	67,04	67,29		207,9	180,0	0	0,86					
	50	Rez5-9	67,59	67,11		212,5	180,0	0	0,98					
	50	Rez5-8	66,88	66,65		202,2	180,0	0	2,11					
	50	Rez5-5	67,39	67,02		207,3	180,0	0	1,77					
Hranol - 65 mm ze 100 mm JV	0	Rez5-3	67,67	67,03		211,5	180,0	0	4,71					
	0	Rez5-2	67,29	67,20		211,4	180,0	0	5,39					
	0	Rez5-1	67,28	67,47		204,9	180,0	0	5,22					
	100	Rez9-9	99,89	98,43		375,0	300,0	0	1,39					
	100	Rez9-7	100,3	101,0		380,6	300,0	0	0,86					
	100	Rez9-5	99,33	100,3		377,7	300,0	0	1,20					
	50	Rez9-8	97,77	97,64		378,8	300,0	0	1,12					
	50	Rez9-6	99,69	99,26		378,6	300,0	0	1,23					
	50	Rez9-4	100,1	100,8		378,0	300,0	0	1,71					
	0	Rez9-3	99,88	99,40		381,3	300,0	0	3,61					
	0	Rez9-2	99,88	100,8		375,5	300,0	0	5,22					
	0	Rez9-1	99,28	100,8		379,2	300,0	0	3,97					
Hranol - 100 mm ze 150 mm JV	0	Rez9-1	99,28	100,8		379,2	300,0	0	3,97					
	0	Rez9-2	99,88	100,8		375,5	300,0	0	5,22					
	0	Rez9-3	99,88	99,40		381,3	300,0	0	3,61					
	50	Rez9-4	100,1	100,8		378,0	300,0	0	1,71					
	50	Rez9-6	99,69	99,26		378,6	300,0	0	1,23					
	50	Rez9-8	97,77	97,64		378,8	300,0	0	1,12					
	100	Rez9-5	99,33	100,3		377,7	300,0	0	1,20					
	100	Rez9-7	100,3	101,0		380,6	300,0	0	0,86					
	100	Rez9-9	99,89	98,43		375,0	300,0	0	1,39					
	1,35	0,3	23,3	0,3	2	0	0	0	0					
	4,26	0,8	19,9	0	0	0	0	0	0					
	1,15	0,3	23,2	0,2	8	0	0	0	0					
5,10	0,4	6,9	1,0	0	0	0	0	0						
1,62	0,6	36,0	0,3	2	0	0	0	0						
1,46	0,6	41,3	0,2	9	0	0	0	0						
3,40	0,4	13,1	1,0	0	0	0	0	0						
1,04	0,3	30,6	0,3	1	0	0	0	0						
0,71	0,1	16,9	0,2	1	0	0	0	0						
4,11	0,5	13,1	1,0	0	0	0	0	0						
0,98	0,1	6,5	0,2	4	0	0	0	0						
0,99	0,0	2,7	0,2	4	0	0	0	0						

Tab. 9: Přehled výsledku měření ultrazvukovým impulzem

Těleso		0	25	50	75	100
	Označení	UZ - t	UZ - t	UZ - t	UZ - t	UZ - t
Hranol - 100 mm	1	83,77				
	2	84,30				
	3	84,83				
	4	84,60	88,53	97,53		
	5	84,80	104,87	122,80		
	6	84,10	86,70	88,30		
	7	84,67	88,17	90,67	94,87	116,03
	8	83,97	86,90	88,00	89,27	89,47
	9	84,50	87,20	88,97	90,87	93,53
	10	84,00	88,63	90,83	94,17	98,10
	11	83,87	86,37	87,03	87,70	88,73
	12	84,03	90,13	92,07	99,90	102,70
	13	85,30	99,73	112,40	148,03	135,90
	14	84,53	96,43	106,10	134,83	133,77
	15	84,17	101,73	105,50	117,73	122,53
Hranol - 100 mm ze 150 mm Hran	Řez-1	85,73				
	Řez-2	85,17				
	Řez-3	85,77				
	Řez-4	85,50	87,33	88,37		
	Řez-5	84,97	86,50	87,20		
	Řez-6	85,00	86,20	86,67		
	Řez-7	86,20	87,30	87,37	88,03	90,43
	Řez-8	84,77	86,70	88,43	97,10	99,53
	Řez-9	85,83	88,03	94,03	99,07	109,27
JV - 100 mm	Ohyb-1	83,37				
	Ohyb-2	83,73				
	Ohyb-3	84,17				
	Ohyb-4	85,03	116,70	121,90		
	Ohyb-5	85,53	144,33	146,30		
	Ohyb-6	84,10	109,90	120,93	140,30	140,03
	Ohyb-7	85,50	114,20	114,33	129,97	139,77
	Ohyb-8	84,07	113,50	233,37		
	Ohyb-9	83,10	133,57	177,53	183,57	182,53

Tab. 10: Vyhodnocení měření ultrazvukovým impulzem

Těleso	Označení	RDM _{UPTT,25} [%]		RDM _{UPTT,50} [%]		RDM _{UPTT,75} [%]		RDM _{UPTT,100} [%]		
Hranol - 100 mm	1		85		77		69		64	
	2									
	3									
	4	91		75						
	5	65		48						
	6	94		91						
	7	92		87		80		53		
	8	93		91		88		88		
	9	94		90		86		82		
	10	90		86		80		73		
	11	94		93		91		89		
	12	87		83		71		67		
	13	73		58		33		39		
	14	77		63		39		40		
	15	68		64		51		47		
Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	Řez-1		96		93		82		75	
	Řez-2									
	Řez-3									
	Řez-4	96		94						
	Řez-5	96		95						
	Řez-6	97		96						
	Řez-7	97		97		96		91		
	Řez-8	96		92		76		73		
	Řez-9	95		83		75		62		
JV - 100 mm	Ohyb-1		49		37		33		31	
	Ohyb-2									
	Ohyb-3									
	Ohyb-4	53		49						
	Ohyb-5	35		34						
	Ohyb-6	59		48		36		36		
	Ohyb-7	56		56		43		37		
	Ohyb-8	55		13						
	Ohyb-9	39		22		20		21		

Tab. 11: Přehled výsledků měření rezonanční metodou

Těleso	Označení	0			25			50			75			100		
		REZ - f _L	REZ - f _r	REZ - f _t	REZ - f _L	REZ - f _r	REZ - f _t	REZ - f _L	REZ - f _r	REZ - f _t	REZ - f _L	REZ - f _r	REZ - f _t	REZ - f _L	REZ - f _r	REZ - f _t
Hranol - 100 mm	1	5392	2357	3145												
	2	5357	2337	3135												
	3	5303	2298	3096												
	4	5377	2328	3135	5155	2205	3000	4811	2015	2761						
	5	5328	2308	3121	4186	1745	2410	3911	1591	2272						
	6	5406	2342	3160	5236	2261	3050	5210	2234	3031						
	7	5337	2318	3101	5149	2211	2988	5036	2157	2909	4730	2005	2714	3650	1559	2118
	8	5377	2308	3150	5230	2261	3056	5190	2221	3031	5149	2239	3004	5069	2190	2965
	9	5337	2328	3121	5174	2236	3006	5145	2208	2999	5081	2184	2948	4948	2136	2887
	10	5337	2308	3106	5106	2193	2950	5049	2163	2934	4878	2091	2813	4768	2028	2743
	11	5401	2333	3150	5242	2248	3056	5235	2234	3063	5192	2221	3022	5177	2226	3019
	12	5367	2328	3135	5050	2168	2919	4978	2138	2870	4600	1949	2634	4462	1907	2569
	13	5293	2313	3091	4528	1913	2596	3911	1598	2215	3318	1388	1894	3356	1373	1841
	14	5337	2333	3111	4801	2031	2752	4342	1803	2446	3645	1506	2054	3542	1475	2022
	15	5372	2318	3126	4522	1907	2565	4342	1790	2472	3707	1543	2097	3716	1553	2118
Hranol - 100 mm ze 150 mm Hran	Řez-1	5227	2250	3066												
	Řez-2	5246	2248	3053												
	Řez-3	5202	2204	3028												
	Řez-4	5221	2242	3041	5068	2171	2940	5053	2161	2945						
	Řez-5	5240	2255	3066	5093	2190	2990	5094	2191	2986						
	Řez-6	5271	2274	3072	5137	2196	2977	5145	2202	2986						
	Řez-7	5170	2223	3028	5055	2171	2958	5043	2171	2955	5025	2158	2931	4965	2132	2896
	Řez-8	5284	2236	3072	5131	2171	2990	5012	2110	2904	4611	1934	2617	4347	1792	2424
	Řez-9	5189	2236	3028	5062	2171	2946	4849	2069	2772	4667	2001	2673	4104	1729	2299
JV - 100 mm	Ohyb-1	5373	2166	3452												
	Ohyb-2	5347	2141	3421												
	Ohyb-3	5297	2128	3402												
	Ohyb-4	5252	2109	3376	3670	1510	2436	3434	1346	2125						
	Ohyb-5	5284	2090	3395	2870	1069	1932	2640	1004	1723						
	Ohyb-6	5316	2141	3421	3739	1491	2474	3390	1363	2326	2874	1105	1994	2924	1132	1910
	Ohyb-7	5246	2090	3364	3620	1353	2278	3536	1307	2135	3065	1127	2023	2889	1132	1889
	Ohyb-8	5335	2153	3408	3708	1611	2423	2337	1015	1777						
	Ohyb-9	5379	2147	3427	3298	1233	1970	2326	914	1732	2382	903	1710	2424	944	1625

Tab. 12: vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou metodou

Těleso	Označení	RDM _{FF,25} [%]				RDM _{FF,50} [%]				RDM _{FF,75} [%]				RDM _{FF,100} [%]				
		f _L	f _f	f _t	f	f _L	f _f	f _t	f	f _L	f _f	f _t	f	f _L	f _f	f _t	f	
Hranol - 100 mm	1																	
	2																	
	3																	
	4	9 2	9 0	9 2		8 0	7 5	7 8										
	5	6 2	5 7	6 0		5 4	4 8	5 3										
	6	9 4	9 3	9 3		9 3	9 1	9 2										
	7	9 3	9 1	9 3		8 9	8 7	8 8		7 9	7 5	7 7		4 7	4 5	4 7		
	8	9 5	8 6	8 3	8 4	8 4	9 3	8 0	7 6	7 8	7 8	9 2	7 2	9 4	6 9	9 1	7 0	7 0
	9	9 4	9 2	9 3		9 3	9 0	9 2						8 1	8 8	8 9		
	10	9 2	9 0	9 0		8 9	8 8	8 9		8 4	8 2	8 2		8 0	7 7	7 8		
	11	9 4	9 3	9 4		9 4	9 2	9 5		9 2	9 1	9 2		9 2	9 1	9 2		
	12	8 9	8 7	8 7		8 6	8 4	8 4		7 3	7 0	7 1		6 9	6 7	6 7		
	13	7 3	6 8	7 1		5 5	4 8	5 1		3 9	3 6	3 8		4 0	3 5	3 5		
	14	8 1	7 6	7 8		6 6	6 0	6 2		4 7	4 2	4 4		4 4	4 0	4 2		
	15	7 1	6 8	6 7		6 5	6 0	6 3		4 8	4 4	4 5		4 8	4 5	4 6		
Hranol - 100 mm ze 150 mm hran.	Řez-1																	
	Řez-2																	
	Řez-3																	
	Řez-4	9 4	9 4	9 3		9 4	9 3	9 4										
	Řez-5	9 4	9 5	9 4	9 4	9 5	9 5	9 3	9 2	9 2	9 2	8 4	8 3	8 1	8 3	7 4	7 2	7 0
	Řez-6	9 5	9 3	9 4		9 5	9 4	9 4										
	Řez-7	9 6	9 5	9 5		9 5	9 5	9 5		9 4	9 4	9 4		9 2	9 2	9 1		
	Řez-8	9 4	9 4	9 5		9 0	8 9	8 9		7 6	7 5	7 3		6 8	6 4	6 2		
	Řez-9	9 5	9 4	9 5		8 7	8 6	8 4		8 1	8 0	7 8		6 3	6 0	5 8		
JV - 100 mm	Ohyb-1																	
	Ohyb-2																	
	Ohyb-3																	
	Ohyb-4	4 9	5 1	5 2		4 3	4 1	4 0										
	Ohyb-5	3 0	4 4	2 6	4 3	4 2	2 2	3 1	2 6	3 4	3 2	2 8	2 4	3 2	2 8	2 7	2 6	2 8
	Ohyb-6	4 9	4 8	5 2		4 1	4 1	4 6		2 9	2 7	3 4		3 0	2 8	3 1		
	Ohyb-7	4 8	4 2	4 6		4 5	3 9	4 0		3 4	2 9	3 6		3 0	2 9	3 2		
	Ohyb-8	4 8	5 6	5 1		1 9	2 2	2 7										
	Ohyb-9	3 8	3 3	3 3		1 9	1 8	2 6		2 0	1 8	2 5		2 0	1 9	2 2		

Tab. 13: Vyhodnocení výsledků zkoušky statického modulu

Těleso	Označení	Počet cyklů	b [mm]	h [mm]	d [mm]	L0 [mm]	σ_b [MPa]	σ_a [MPa]	ϵ_b [mm]	ϵ_a [mm]	E_c [GPa]	E_c [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]	K [-]
Hranol - 100 mm	Ec-1	0	100,13	99,68		200	0,51	14,06	0,00003	0,00044	33,5	33,9	0,4	1,3	1,00
	Ec-2	0	99,94	100,09		200	0,52	14,05	0,00003	0,00043	34,3				
	Ec-3	0	101,54	100,16		200	0,50	13,80	0,00003	0,00042	33,9				
	Ec-8	50	100,43	99,75		200	0,50	13,01	0,00008	0,00051	28,5	25,9	7,2	27,6	0,76
	Ec-9	50	100,85	99,96		200	0,47	11,41	0,00026	0,00088	17,8				
	Lom-CH-6	50	100,37	100,10		200	0,49	13,97	0,00004	0,00047	31,3				
	Ec-6	100	101,31	99,88		200	0,89	14,25	0,00005	0,00046	32,8	26,3	8,2	31,0	0,78
	Ec-7	100	100,79	100,26		200	0,55	9,97	0,00033	0,00088	17,1				
	Lom-CH-7	100	101,60	100,14		200	0,50	12,33	0,00007	0,00048	28,9				
JV - 100 mm	Ec-100-1	0			98,95	100	0,52	17,55	0,00002	0,00058	30,3	30,8	1,1	3,6	1,00
	Ec-100-2	0			99,82	100	0,51	15,33	0,00027	0,00074	32,1				
	Ec-100-3	0			99,00	100	0,52	15,59	0,00040	0,00090	30,0				
	Ec-100-4	50			99,88	100	0,50	8,93	0,00200	0,00311	7,5	8,1	0,5	5,8	0,26
	Ec-100-5	50			99,01	100	0,52	9,09	0,00157	0,00262	8,2				
	Ec-100-6	50			98,95	100	0,52	9,10	0,00147	0,00249	8,4				
	Ec-100-7	100			98,87	100	0,52	9,11	0,00240	0,00370	6,6	7,0	0,4	6,1	0,23
	Ec-100-8	100			98,92	100	0,52	9,10	0,00202	0,00326	6,9				
	Ec-100-9	100			98,48	100	0,52	9,19	0,00183	0,00299	7,4				
JV - 75 mm	Ec-75-1	0			74,32	100	0,51	13,83	0,00003	0,00048	29,6	29,2	0,3	1,0	1,00
	Ec-75-2	0			74,43	100	0,51	13,79	0,00003	0,00049	29,0				
	Ec-75-3	0			74,44	100	0,51	13,79	0,00004	0,00049	29,1				
	Ec-75-4	50			74,32	100	0,50	8,06	0,00183	0,00294	6,8	6,8	0,8	11,1	0,23
	Ec-75-5	50			74,40	100	0,50	8,05	0,00192	0,00292	7,5				
	Ec-75-6	50			74,29	100	0,50	6,91	0,00192	0,00298	6,0				
	Ec-75-7	100			74,44	100	0,50	6,89	0,00141	0,00241	6,4	6,2	0,5	7,5	0,21
	Ec-75-8	100			74,45	100	0,51	6,89	0,00131	0,00230	6,5				
	Ec-75-9	100			74,33	100	0,51	6,92	0,00186	0,00299	5,6				