

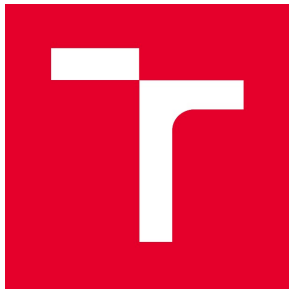
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Barbora Jindrová



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**MOŽNOSTI STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI
BETONU V KONSTRUKCI**

OPTIONS OF DETERMINING THE FROST RESISTANCE OF CONCRETE IN
A STRUCTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Barbora Jindrová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Barbora Jindrová
Název	Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

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 EN 13791, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN 73 1322, ČSN 73 1380, ASTM C666 / C666M – 15, 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 k provzdušněnému betonu. Dále budou podrobněji popsány možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu, a 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 zabudovaného v konstrukci. Poté budou vyrobeny zkušební tělesa, na nichž budou aplikovány nedestruktivní metody měření. Z betonových bloků budou následně odebrány jádrové vývrty, na kterých budou provedeny nedestruktivní i destruktivní testy. Praktická část bude zakončena zpracováním výsledků zkoušek, jejich vyhodnocením a formulací vyplývajících závěrů.

Práci se zkušebními lisy 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 různými způsoby posuzování stupně degradace betonu vlivem zmrazování, s přihlédnutím k možnostem určování mrazuvzdornosti betonu v konstrukci.

Nejprve popisuje vlastnosti betonu a možné způsoby jeho degradace – zejména působení mrazu na vnitřní strukturu betonu a kombinace mrazu a chemických látek na jeho povrch. Zmíněn je i princip a vlastnosti provzdušněného betonu. Dále je uveden přehled přístupů, jakými současně platné normy stanovují mrazuvzdornost betonu. Podrobněji jsou popsány také zkoušky, které jsou následně v experimentální části použity na tělesech z provzdušněného betonu. Část zkušebních těles je vyrobená pomocí forem a část získaná z konstrukce (betonového bloku). Použité nedestruktivní zkoušky jsou vyhodnoceny několika způsoby a následně porovnány s výsledky zkoušek destruktivních. Závěrem je pak zhodnocení jednotlivých postupů a úvaha o jejich celkové použitelnosti při měření mrazuvzdornosti betonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Provzdušněný beton, mrazuvzdornost, chemické rozmrazovací látky, pevnostní charakteristiky, modul pružnosti, ultrazvuková impulsová metoda, rezonanční metoda

ABSTRACT

The diploma thesis deals with different methods of determining levels of degradation of concrete due to freezing, also considering the options of freeze thaw resistance determination in structure.

At first the properties of concrete and possible mechanisms of concrete degradation are described – mainly the effects of freezing water in the inner structure and of the combination of freezing water and de-icing chemicals on the surface. Principle and properties of air-entrained concrete are also mentioned. An overview of the approaches that current standards use to determine the freeze-thaw resistance of concrete is listed, followed by description of the tests that are used on air-entrained concrete specimens in the main part of the thesis. A portion of the test specimens was made in moulds while the rest was obtained from structure (concrete block). The non-destructive tests used are evaluated in several different ways and their results are compared with the destructive tests. Comparison and evaluation of different approaches used to determine the freeze-thaw resistance of concrete are the main outcome of this thesis.

KEYWORDS

Air-entrained concrete, freeze-thaw resistance, de-icing chemicals, strength properties, modulus of elasticity, ultrasonic pulse velocity test, resonance method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Barbora Jindrová *Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci*. Brno, 2020. 82 s., 25 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 *Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Barbora Jindrová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu v konstrukci* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Barbora Jindrová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mojí diplomové práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za příležitost věnovat se tomuto tématu a za poskytnuté podklady, rady a konzultace. Dále děkuji Ing. Petru Hanušovi za pomoc s měřením, Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za provedení lomových zkoušek a Ing. Haně Šimonové, Ph.D. za pomoc při jejich vyhodnocení a poskytnuté rady.

Díky patří také firmě BETOTECH, s.r.o. a panu Ing. Oldřichu Žaludovi za návrh a výrobu betonu, kolektivu pod vedením Ing. Petra Daňka, Ph.D. za stavbu bednění a betonáž, a pracovníkům pod vedením Ing. Petra Žítta za odběr vývrtů.

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“ a standardního projektu specifického vysokoškolského výzkumu na VUT č. FAST-S-19-6002 „Experimentální ověření nových způsobů hodnocení mrazuvzdornosti betonu v konstrukcích“.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická část	12
1.1 Beton a jeho vlastnosti	12
1.1.1 Vlastnosti čerstvého betonu	12
1.1.2 Vlastnosti ztvrdlého betonu	13
1.1.3 Trvanlivost a způsoby degradace betonu	14
1.1.4 Pórovitost a propustnost	15
1.2 Účinky mrazu na beton	16
1.2.1 Poškození povrchových vrstev	16
1.2.2 Porušení vnitřní struktury	18
1.3 Provzdušněný beton	19
1.4 Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu	20
1.4.1 Mrazuvzdornost betonu v platných normách	20
1.4.2 Zkoušky prováděné v experimentální části práce	23
2 Experimentální část	39
2.1 Cíle experimentu	39
2.2 Výroba zkušebních bloků a těles	39
2.2.1 Receptura čerstvého betonu	39
2.2.2 Betonové bloky v centru AdMaS	40
2.2.3 Zkušební tělesa	43
2.3 Základní zkoušky betonu po 28 dnech	45
2.4 Odběr vývrtů ze zkušebních bloků	51
2.5 Laboratorní měření zkušebních těles a jejich vyhodnocení	53
2.5.1 Tělesa z forem	53
2.5.2 Tělesa z vývrtů	54
2.5.3 UZ impulsová metoda	55
2.5.4 Rezonanční metoda	57
2.5.5 Statický modul pružnosti	61
2.5.6 Pevnosti v tahu ohybem a v příčném tahu	63
2.5.7 Výsledky lomových zkoušek	64
2.5.8 Shrnutí výsledků	67
Závěr	70
Literatura	71

Seznam symbolů, veličin a zkratk	80
Seznam příloh	83
A Dokumentace výroby betonových bloků a zkušebních těles	84
A.1 Betonové bloky v centru AdMaS	84
A.2 Výroba zkušebních těles	91
A.3 Odběr vývrtů a příprava těles	93
B Výsledky a dokumentace zkoušek	95
B.1 UZ impulsová metoda	95
B.2 Rezonanční metoda	98
B.3 Statický modul pružnosti	99
B.4 Zkoušky pevnosti v tahu ohybem	103
B.5 Zkoušky pevnosti v příčném tahu	104
B.6 Lomové zkoušky	105

Úvod

Úvod

Beton jako jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů současnosti nachází uplatnění v nejrůznějších podobách. Kromě pevnostních a přetvárnostních charakteristik je nutné brát v úvahu také jeho trvanlivost, která je dána provozuschopností betonového prvku v konkrétních podmínkách po dobu jeho předpokládané životnosti. Během svého fungování je konstrukce kromě zatížení vystavena také vnějším podmínkám, které zahrnují například vlhkost, mechanické působení vody, chemicky agresivní prostředí nebo změny teplot [1].

Pokud je beton opakovaně vystavován střídání teplot kolem bodu mrazu za přítomnosti vody, může docházet k jeho mechanickému poškození důsledkem zvětšování objemu vody při tvorbě ledu. Účinky mrazu zároveň usnadňují narušování povrchu betonu při současném působení chemických látek – nejčastěji rozmrazovacích solí na vodorovných částech dopravních staveb. Povaha degradace je potom kombinací mechanických a chemických procesů [3].

Rozrušování vnitřní struktury betonu mrznoucí vodou lze zmírnit provzdušněním betonu, kdy se vlivem speciálních přísad v betonu tvoří pravidelně rozmístěné kulovité bubliny, relativně velké oproti běžným pórům v betonu a vzájemně oddělené. Ty pak poskytují prostor pro rozpínání vody bez rizika poškození cementového tmelu [1].

Mrazuvzdornost betonu lze posoudit pomocí opakovaného zmrazování a rozmrazování zkušebních těles, stanovení vybrané vlastnosti po určitém počtu takových cyklů a její porovnání s hodnotou zjištěnou na tělesech z téhož betonu, která zmrazována nebyla. K posouzení mohou být použity zkoušky nedestruktivní (dále NDT) i destruktivní. NDT metody mají tu výhodu, že každé těleso může být měřeno opakovaně a porovnáváno samo se sebou, ale výsledky nemusí být tak jednoznačné jako u zkoušek destruktivních. U těch je nutné porovnávat mezi sebou tělesa vystavená mrazovým cyklům s jinými, nezmrazovanými tělesy [1, 20].

Zjišťování mrazuvzdornosti betonu v konstrukci je tedy problematické vzhledem k nutnosti porovnání měřené vlastnosti před a po porušení. K minimalizaci nutného počtu odebraných vývrtů by přispělo použití nedestruktivních metod, avšak na našem území v současnosti chybí norma, která by udávala jednoznačný způsob posouzení mrazuvzdornosti jejich prostřednictvím [23].

Cíle práce

Mezi hlavní cíle této práce patří použití různých metod ke stanovení míry degradace betonu v důsledku opakovaného zmrazování a rozmrazování na zkušebních tělesech z provzdušněného betonu a jejich následné porovnání.

Součástí je teoretický úvod do problematiky betonu a jeho vlastností, zvláštní pozornost je věnována jeho trvanlivosti, způsobům degradace a působení mrznoucí vody samotné nebo v kombinaci s chemickými látkami. Zmíněno je také provzdušnění betonu a jeho vliv na odolnost proti účinkům mrazu.

Dále je zde uveden přehled v současnosti platných norem, které se zabývají zjišťováním mrazuvzdornosti betonu, a v nich uvedené postupy. Popsány jsou také konkrétní zkoušky, které budou použity v rámci experimentální části práce.

Ta se zabývá měřením mrazuvzdornosti těles z provzdušněného betonu, ze kterých byla část vyrobena ve formách a část odebrána z betonového bloku jako vývrty. Na tělesech vystavovaných zmrazovacím cyklům jsou použity zkoušky destruktivní i nedestruktivní a z jejich výsledků je následně zjišťován stupeň poškození betonu. Ten vyplývá z porovnání hodnot naměřených na tělesech poškozených mrazem s hodnotami zjištěnými na tělesech referenčních.

Výstupem práce je pak především porovnání výsledků získaných jednotlivými zkouškami a zhodnocení jejich citlivosti. Předmětem srovnávání jsou především možné rozdíly destruktivních a nedestruktivních zkoušek, rozdílné vlastnosti těles z forem a z vývrtů a také různé způsoby vyhodnocení nedestruktivních metod – ultrazvukové impulsové a rezonanční.

1 Teoretická část

1.1 Beton a jeho vlastnosti

Vlastnosti betonu zabudovaného v konstrukci jsou dány mnoha různými vlivy. Jelikož se jedná o kompozitní materiál, tak prvním významným faktorem jsou jednotlivé suroviny:

- **kamenivo** sestávající z jemnozrnné a hrubozrnné složky (obvykle písek a šterk nebo drť), jejichž správným poměrem se docílí optimální struktury betonu;
- **cement**, který po hydrataci působí jako pojivo a tvoří cementovou matici;
- **voda**, jíž se cement hydratuje - použité množství se pohybuje kolem 30 % hmotnosti cementu;
- často se při výrobě přidávají chemické **přísady** nebo minerální **příměsi**, jejichž prostřednictvím lze ovlivnit vlastnosti betonu v čerstvém nebo ztvrdlém stavu;
- beton může obsahovat i kovová, polymerní nebo skleněná **vlákna** - ta mohou plnit například funkci výztužnou nebo zajišťovat lepší požární odolnost konstrukce.

U vstupních složek hraje zásadní roli jak kvalita, tak jejich množství a vzájemný poměr, přičemž dávkování vždy probíhá s jistou tolerancí. Dalšími vlivy jsou pak mimo jiné vnější podmínky při výrobě i betonáži, ošetřování během tvrdnutí, a v neposlední řadě změny samotného materiálu v závislosti na čase. Z toho vyplývá, že charakteristiky betonu nelze nijak jednoznačně kvantifikovat a že jsou povahy stochastické - platí jen s určitou pravděpodobností a v určitých mezích. Nejdůležitější vlastnosti sledujeme ve dvou fázích, a to u čerstvého betonu a ztvrdlého betonu [1, 2].

1.1.1 Vlastnosti čerstvého betonu

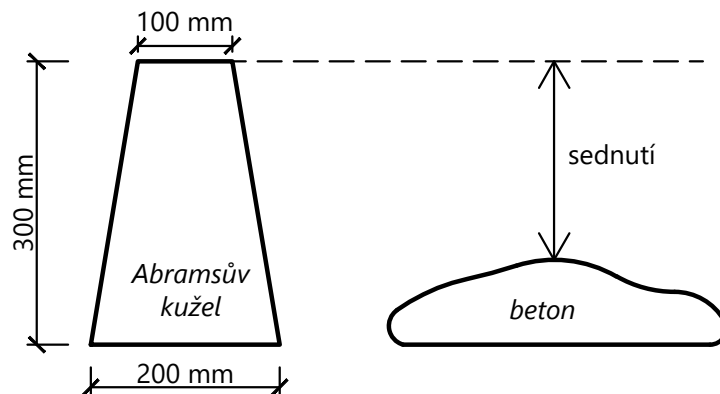
Po smíchání surovin vzniká plastický čerstvý beton, který vlivem hydratace cementu postupně tuhne a tvrdne v časovém horizontu hodin. Pokud není míchán přímo na stavbě, je na místo betonáže dopravován domíchávačem a je nutné zajistit zachování optimálních vlastností po dobu transportu.

Konzistence čerstvého betonu určuje, jak s ním bude možné pracovat, ukládat ho do forem a následně hutnit. Důležitá je také správná míra soudržnosti, aby se při betonování netvořily kaverny a jiné vady ve struktuře. Souhrnně se pro tyto vlastnosti používá také pojem zpracovatelnost. [1, 3]

Pro zkoušení konzistence čerstvého betonu se užívají následující postupy:

- zkouška sednutím kužele podle ČSN EN 12350-2 [4],
- zkouška Vebe podle ČSN EN 12350-3 [5],
- určení stupně zhutnitelnosti podle ČSN EN 12350-4 [6],

- zkouška rozlitím podle ČSN EN 12350-5 [7],
- pro samozhutnitelné betony pak zkouška sednutím-rozlitím podle ČSN EN 12350-8 [8], zkouška V-nálevkou (ČSN EN 12350-9 [9]), L-truhlíkem (ČSN EN 12350-10 [10]) nebo J-kroužkem (ČSN EN 12350-12 [11]).



Obr. 1.1: Schéma zkoušky sednutím kužele [1].

Dále se u čersvého betonu kontroluje objemová hmotnost podle ČSN EN 12350-6 [12] a případně i obsah vzduchu podle ČSN EN 12350-7 [13].

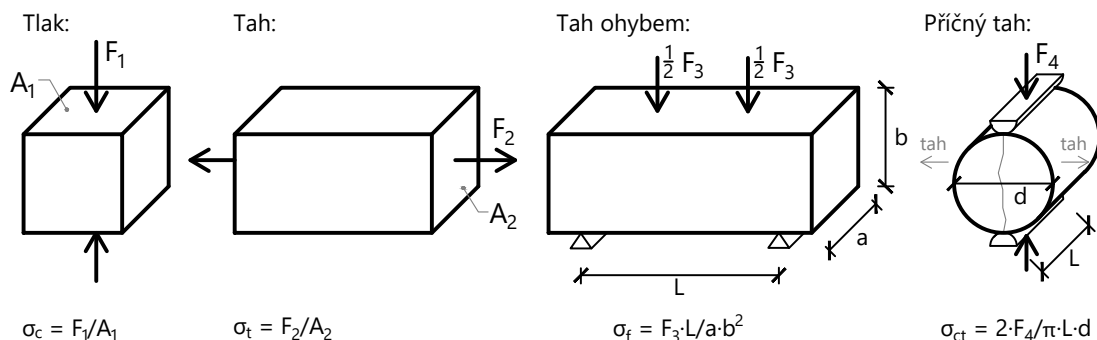
1.1.2 Vlastnosti ztvrdlého betonu

Od vlastností ztvrdlého betonu se odvíjí celkové chování konstrukčního prvku, který je během své životnosti vystaven jak statickému a dynamickému mechanickému namáhání, tak fyzikálnímu a chemickému působení okolního prostředí.

Schopnost odolávat mechanickému napětí popisuje především pevnost. Obecně rozlišujeme pevnosti materiálů při různých typech namáhání, přičemž beton se vyznačuje tím, že jeho pevnost v tlaku značně převyšuje jeho pevnost tahovou a smykovou (která se u betonu určuje jako pevnost v tahu ohybem). Tlaková pevnost dosahuje u běžných betonů desítky MPa a u speciálních i přes 200 MPa, zatímco pevnost v tahu se pohybuje kolem 1 – 4 MPa a pevnost v tahu ohybem 4 - 6 MPa, ve speciálních případech až přes 40 MPa [1].

Prostřednictvím pevnosti v tlaku jsou v normě ČSN EN 206+A1 [14] definovány pevnostní třídy, které jsou nejrozšířenějším způsobem klasifikace betonu.

Nemalý význam mají také deformační vlastnosti betonu. Ty lze vyjádřit pomocí Youngova modulu pružnosti E_c , který určuje závislost mezi napětím v materiálu a poměrným přetvořením při osovém namáhání.



Obr. 1.2: Vzorek betonu vystavený napětí v tlaku (σ_c), v tahu (σ_t), v tahu ohybem (σ_f) a v příčném tahu (σ_{ct}) [1].

Pro chování konstrukce hraje roli i modul pružnosti ve smyku G , který závisí na Youngově modulu E_c a Poissonovu číslu ν_{cu} , a ze kterého vychází velikosti průhybů vodorovných železobetonových prvků [1, 3]

1.1.3 Trvanlivost a způsoby degradace betonu

Bez ohledu na mechanické namáhání je pro dlouhodobé fungování konstrukce zásadní trvanlivost betonu, kterou lze definovat jako provozuschopnost betonového prvku po předpokládanou dobu životnosti v určitém prostředí. Nejedná se o materiálovou charakteristiku, kterou by bylo možné jednoduše změřit, ale spíše jde o chování konkrétní konstrukce za konkrétních podmínek. Trvanlivost je v normě ČSN EN 206+A1 [14] zahrnuta formou stupně vlivu prostředí, který určuje požadavky na beton podle předpokládaných účinků, jakým bude konstrukce vystavena.

Z mechanických způsobů degradace betonu lze uvést například abrazi, kdy je povrch obrušován nejčastěji dopravními prostředky nebo vodou. Voda může způsobovat také kavitaci, ke které dochází při proudění kapalin, a to z důvodu tvorby vzduchových bublinek u povrchu a jejich následnému hroucení, které vyvolává rázové vlny a povrch tak rozrušuje. Působení mrazu může být čistě mechanické, ale bývá běžně provázáno i s chemickým narušováním betonu, jak bude podrobněji rozbráno v následující kapitole.

K chemické degradaci dochází například reakcí s kyselinami, které rozpouští pojivo a snižují tak pevnost cementové matrice, nebo se síranovými ionty, kdy vzniká objemný ettringit a dochází tak ke vzniku trhlin a ztrátě soudržnosti. Probíhat může také alkalicko-křemičitá reakce kameniva za vzniku alkalicko-silikátových gelů, které při hydrataci zvětšují objem a rozrušují strukturu betonu, a v neposlední řadě hrozí i vynášení rozpustných složek pojiva vodou při průsaku, tzv. vyluhování pojiva, mající za následek snižování pevnosti.

Zvláštní pozornost si zaslouží ocelová výztuž, která při spolupůsobení s betonem zajišťuje tahovou a smykovou únosnost konstrukce. Pruty výztuže jsou samy o sobě náchylné na korozi při kontaktu s kyslíkem a vodou obsaženými ve vzduchu, avšak u nově zhotovené železobetonové konstrukce jsou před ní chráněny hned dvěma způsoby. Jedním je dostatečná krycí vrstva betonu, která brání přístupu vzduchu. Tím druhým je tenká nepropustná vrstva oxidů železa vzniklá na styku oceli s betonem – tzv. pasivační vrstva. Ta si při vysokém pH prostředí (u nového betonu 12-13) zachovává celistvost a zabraňuje reakcím oceli s okolím.

V průběhu životnosti prvku se stává problémem karbonatace. Vzdušný CO_2 reaguje s $Ca(OH)_2$ obsaženým v pojivu, čímž se směrem od povrchu dovnitř betonu snižuje pH. Pokud klesne pH v okolí výztuže pod 9,5, dochází k její depasivaci a korozi již není bráněno. Narušení pasivační vrstvy mohou způsobit i chloridové ionty, a to bez ohledu na okolní pH.

Koroze výztuže má za následek nejen zmenšování efektivního průřezu a snižování únosnosti konstrukce, ale také rozrušování a odprýskávání povrchových vrstev betonu z důvodu zvětšeného objemu korozních produktů [3, 15, 16].

1.1.4 Pórovitost a propustnost

Z příkladů uvedených v předchozí části vyplývá, že pro většinu způsobů degradace betonu hraje klíčovou roli voda, ať už sama svým mechanickým působením, nebo jako médium transportující chemické látky. Proto je třeba věnovat pozornost propustnosti betonu pro kapaliny a plyny, která vychází z jeho pórovité struktury.

Póry v betonu vznikají hned z několika důvodů a mají různé podoby:

- kaverny – nepravidelné makrodutiny tvořené vzduchem zachyceným během betonáže,
- póry v zrnech kameniva,
- póry vytvořené provzdušněním – kulovité bubliny o velikosti 100–300 μm ,
- kapilární póry nepravidelného tvaru o velikosti 0,1–10 μm , mezi zrny hydratujícího cementu,
- gelové póry uvnitř pevných částic cementové pasty, velikost 1–10 nm .

Přítomnost kaveren je vždy nežádoucí a jejich vzniku je třeba předcházet dostatečným zhutněním.

O pórech v kamenivu lze mluvit například při použití lehkého kameniva, které zlepšuje tepelně izolační vlastnosti výsledného materiálu a snižuje celkovou objemovou hmotnost, ale zato má obvykle horší mechanické vlastnosti.

Použití provzdušňovacích přísad vede k vytvoření pravidelných pórů, které nejsou vzájemně propojeny. Jejich přítomnost zlepšuje mrazuvzdornost cementového tmelu, jak bude blíže popsáno v následujících kapitolách.

Gelové póry se tvoří uvnitř zrn pevných hydrátů, tvoří přibližně 28 % objemu pevné složky cementové matrice a jejich množství ani velikost nelze nijak regulovat. Jediným zbývajícím způsobem, jak ovlivnit pórovitost betonu, je tedy regulace obsahu kapilárních pórů.

Ty vznikají při hydrataci cementu mezi pevnými částicemi a vzhledem k nepravidelnému tvaru mohou tvořit vzájemně propojené cesty pro prostup vody a nežádoucích látek. Spojitá pórovitost zhoršuje trvanlivost betonu, a proto je třeba zajistit, aby se kapilární pórovitost pohybovala v únosných mezích. Objem vznikajících kapilárních pórů lze redukovat snížením vodního součinitele nebo zvýšením stupně hydratace cementu [1].

1.2 Účinky mrazu na beton

Jedním z významných vlivů na beton v konstrukci může být mráz. Nízké teploty samy o sobě nepředstavují problém, jelikož se projeví pouze teplotní dilatací betonu. Pokud je však v pórech přítomna voda, může docházet k degradaci. Při zmrznutí voda zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %, od určitého stupně nasycení tedy dochází k mechanickému narušování struktury betonu a tak i ke snížení jeho pevnosti a zhoršení vlastností. Tyto účinky se zvyšují při cyklickém opakování mrazu a rozmrazování a zároveň stoupá riziko, že se projeví další mechanismy narušení betonu.

Působení mrazových cyklů se na projevuje dvěma základními způsoby. Za přítomnosti chemických látek na povrchu nastává rozrušování a odpadávání povrchových vrstev, zatímco při opakovaném zamrznání a tání vody uvnitř betonu je poškozována vnitřní struktura čistě mechanickým působením [2, 3, 17].

1.2.1 Poškození povrchových vrstev

K poškození povrchových vrstev betonu dochází především v případě, kdy je beton kromě střídajících se teplot vystaven současně působení chemických rozmrazovacích látek (dále jen CHRL) – nejčastěji roztoků $NaCl$, $CaCl_2$, případně s přídavkem $MgCl_2$. Náchylné jsou především venkovní vodorovné konstrukce jako mostní desky, vozovky nebo chodníky [1].

Odolnost betonu proti působení CHRL lze stanovit podle normy ČSN 73 1326 [24]. Degradace se projevuje odlupováním povrchu betonu (anglicky *scaling*) a stupeň poškození je kvantifikován prostřednictvím odpadu, což je hmotnost odloučeného betonu.

V kombinaci s mrazovými cykly se jako nejnejpříznivější jeví koncentrace solí mezi 2–4 %, u vysokých koncentrací je pak beton chemicky poškozován i bez působení mrazu [17].



Obr. 1.3: Povrch betonu porušený mrazem a rozmrazovacími prostředky [15].

Základem nepříznivých účinků CHRL je reakce chloridů s portlanditem ($Ca(OH)_2$) obsaženým v pojivu. V důsledku jeho úbytku dochází k poklesu pevnosti cementového tmelu a nakonec i ke ztrátě jeho pojivých vlastností a rozrušování povrchových vrstev. Tento mechanismus degradace je zcela nezávislý na případné přítomnosti výztuže [1].

Pokud se jedná o vyztužený beton, přidávají se další nežádoucí účinky. Když chloridové ionty proniknou až k výztuži, mohou lokálně narušit pasivační vrstvu na styku oceli a betonu a otevřít tak cestu korozi. K té přispívá i výše uvedená reakce s hydroxidem vápenatým - jejím důsledkem klesá pH pórovém roztoku, což může vést k plošné depasivaci výztuže. Koroze pak způsobuje další popraskání a odpadávání krycí vrstvy.

Vlivem zmrazovacích cyklů se projevují také synergické efekty – při mrznutí se postupně vyčleňuje čistý led a ve zbytku roztoku stoupá koncentrace rozpuštěných látek. Osmóza pak zapříčiňuje pronikání další vody do betonu, aby se mohla koncentrace solí opět snížit, a vlhkost betonu narůstá. Zároveň se při rozpínání mrznoucí vody otevírají mikrotrhliny, které zvyšují prostupnost jak pro vodu, tak pro chloridové ionty, které se tak dostávají čím dál hlouběji do betonu.

Lze tedy předpokládat, že vznik odpadu je přibližně přímo úměrný počtu zmrazovacích cyklů, pokud je možné při nich uvažovat stejné extrémní teploty a délky jejich trvání, stejnou koncentraci CHRL a stejnou rychlost teplotních změn [1, 3, 17].

Další faktory ovlivňující vznik odpadu jsou:

- velikost, tvar a uspořádání pórů,
- druh cementu,
- druh a množství příměsí,

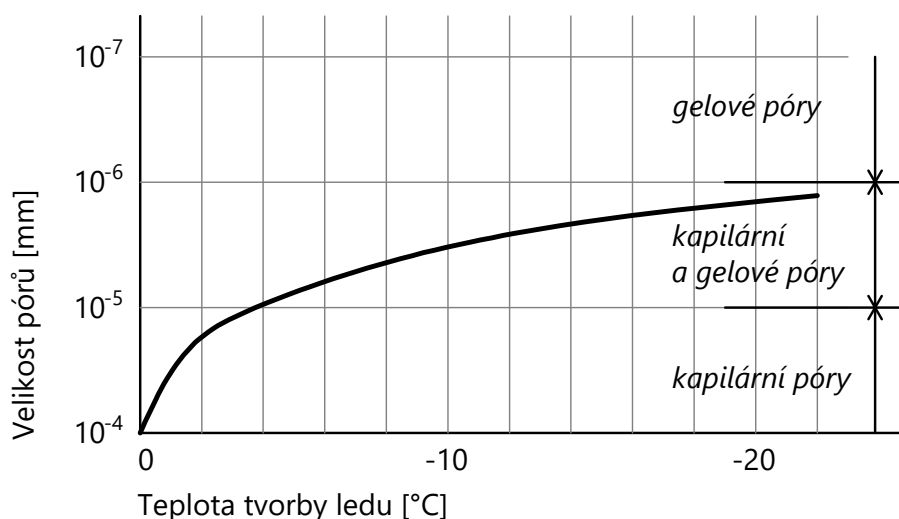
- vodní součinitel betonu,
- druh kameniva.

Následkem odlupování je kromě narušení estetiky povrchové vrstvy hlavně zkrácení životnosti konstrukčního prvku. Zmenšování efektivního průřezu vede k horší únosnosti, úbytek tloušťky a pokles kvality krycí vrstvy urychluje korozi výztuže. Celkový efekt je navíc umocněn ztrátou soudržnosti betonu s výztuží [3, 15, 17, 18].

1.2.2 Porušení vnitřní struktury

Nezávisle na přítomnosti chemických látek na povrchu může opakovaně mrznoucí a rozmrazující voda působit změny uvnitř betonu, a to jak v cementové matici, tak v kamenivu. Porušování kameniva mrazem se dá předejít použitím hutného mrazuvzdorného druhu. Zároveň tento aspekt nemá tak výrazný vliv na trvanlivost betonu jako mrazové poškození cementového tmelu, a proto se následující část bude věnovat hlavně tomu.

Pokud stupeň nasycení (poměr objemu vody k objemu pórů) nedosahuje určité kritické meze, je zde dostatečná prostorová rezerva pro objemovou změnu mezi kapalným a pevným skupenstvím a struktura zůstává neporušená. Kdyby se jednalo o prostou uzavřenou nádobu, byl by tento kritický obsah vody 91,7 % (led potom zabírá 100 % objemu). U porézní struktury betonu však do procesu vstupuje vliv rovnoměrnosti rozložení pórů a jejich velikosti a vzájemné propojení, a také vliv rychlosti zmrazování [1, 3].



Obr. 1.4: Závislost teploty tvorby ledu na velikosti pórů [2].

Chemicky vázané vody se mrznutí vůbec netýká. Voda v gelových pórech (rozměry v řádu nm) je silně ovlivňována Van der Waalsovými silami a v led přechází až při extrémně nízkých teplotách kolem $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za běžných podmínek tedy hraje zásadní roli voda obsažená v kapilárních pórech. Ta začíná z důvodu obsahu rozpustitelných látek tuhnout při teplotě $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo nižší, v závislosti na velikosti póru, jak je znázorněno na Obr. 1.4.

Mrznutí vody postupuje od povrchu dovnitř do betonu. V největších pórech se začíná tvořit ledová tříšť, zbývající voda je mezitím vytlačována do sousedních prostor. Pokud je v daném místě překročeno kritické nasycení, voda se již nemá kam posunout a vnitřní struktura betonu je poškozena krystalickým tlakem vznikajícího ledu, který může dosahovat hodnot až přes 200 MPa [2].

V cementové matici tak vznikají mikrotrhliny, které se po roztání naplní vodou a při opakovaném mrznutí se dále rozšiřují. Z toho vyplývá zhoršování fyzikálně-mechanických vlastností, které se projeví nejen na trvanlivosti, ale i v mezních stavech únosnosti a použitelnosti.

Porušení vnitřní struktury lze vyjádřit pomocí poklesu dynamického modulu pružnosti E v %, poklesem pevnosti v tahu ohybem, případně jiných vlastností zjišťovaných před a po vystavení betonu zmrazovacím cyklům. Takto zjištěný stupeň degradace vnitřní struktury je téměř přímo úměrný míře překročení kritického stupně nasycení vodou. S počtem zmrazovacích cyklů se mírně zvyšuje konstanta úměrnosti, ale výraznější poškození vzniká již při jejich malém počtu.

Zlepšení odolnosti cementového tmelu vůči opakovanému zmrazování lze dosáhnout regulací obsahu kapilárních pórů pomocí vodního součinitele a především provzdušněním betonu [1, 2, 3, 17].

1.3 Provzdušněný beton

Provzdušnění betonu se docílí použitím provzdušňovacích přísad, které fungují na principu snížení povrchového napětí vody. Jejich vlivem se pak v betonu tvoří uzavřené póry kulovitého tvaru, které zmírňují nepříznivé účinky mrznoucí vody.

Když se v kapilárních pórech začne tvořit led a vytlačovat zbývající vodu, vzduchové bubliny vytvořené provzdušněním poskytují prostor navíc, do kterého se může voda přesunout a expandovat, aniž by tím narušovala cementový tmel. Je tedy důležité, aby tyto bubliny měly správnou velikost (rozmezí $100\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$) a byly rovnoměrně rozloženy. Jejich vzájemná vzdálenost (*spacing*) by se měla pohybovat kolem $50\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$. Tím je zajištěno, aby dráha pro vytlačovanou vodu z kapilárního póru do nejbližšího volného prostoru nebyla příliš dlouhá. Voda tak nevyvolá příliš vysoký hydraulický tlak a riziko poškození je nižší. Dalším přínosem je, že při tání ledu je

voda vlivem kapilárního sání vytahována z větších provzdušňovacích pórů zpět do úzkých kapilárních, takže je zaručena funkčnost i při opakovaném zamrznutí [1, 19].

Jako provzdušňovací přísady se používají látky na bázi mýdel přírodních pryskyřic nebo solí mastných kyselin a jim podobné. Molekuly těchto látek mají podobu dlouhého řetězce, který na jednom konci nese polární část. Ta je přitahována vodou, zatímco zbytek řetězce vodu odpuzuje. Následkem toho vznikají vzduchové bubliny lemované na povrchu vrstvou molekul, jejichž volné konce směřují dovnitř, vzájemně se odpuzují a udržují tak správnou velikost a stabilitu bubliny. Povrchová vrstva zase zabraňuje spojování bublin a zajišťuje jejich rovnoměrné rozmístění [3].

Přísady se při výrobě přidávají do betonu zpravidla ve formě roztoku, přičemž je nutné věnovat pozornost správnému promíchání. Vhodná délka míchání závisí mimo jiné na složení čerstvého betonu a vlivu okolních podmínek, u různých betonů se může dost lišit. Pokud trvá míchání příliš dlouho, může dojít ke ztrátě provzdušnění, proto je potřeba s tímto aspektem uvažovat při plánování dopravy betonu na stavbu.

Další možností je přidání přísad v suché, mleté podobě přímo do cementu, což však neumožňuje regulaci množství vzduchu v betonu [3].

Při použití provzdušňovacích přísad tvoří vzduch v betonu 4–6 % objemu. Kromě zlepšení odolnosti vůči mrazu se projeví vliv i na další vlastnosti betonu. Podle [1] má provzdušněný beton přibližně o 20 % nižší pevnost než odpovídající beton bez provzdušnění. Snižuje se také modul pružnosti a soudržnost mezi cementovým tmelem a kamenivem. Udržení pevnosti v tlaku na původní úrovni lze docílit snížením vodního součinitele přibližně o 10 % [1, 19].

Při výrobě provzdušněného betonu je důležité kromě běžných kontrol sledovat i objem vzduchu a případně ho regulovat. Optimální dávkování provzdušňovacích přísad je často určeno předchozími zkouškami na vzorcích betonu stejného složení s různými dávkami přísad. Z vyšší časové a technologické náročnosti výroby pak plyne i vyšší cena betonu [1].

1.4 Možnosti stanovení mrazuvzdornosti betonu

1.4.1 Mrazuvzdornost betonu v platných normách

V současnosti jsou na našem území platné dvě normy pojednávající o metodách zkoušení mrazuvzdornosti betonu z hlediska porušení vnitřní struktury. Tou první je ČSN 73 1322 [20], která určuje odolnost vůči mrazu na základě porovnání průměrné pevnosti v tahu ohybem zjištěné na betonových trámcích vystavených určitému počtu zmrazovacích cyklů a na trámcích referenčních (nezmrazovaných). Tato norma platí bez výraznějších změn již od roku 1969.

Zmrazovací cyklus se v tomto případě skládá ze čtyř hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Zkouška probíhá v etapách čítajících obvykle 25 nebo 50 cyklů a na konci každé etapy se provádí měření pevnosti. Z toho vyplývá, že pro každou etapu musí být zhotovena jedna sada (minimálně tři) těles. Norma [20] hovoří o použití zkušebních těles vyrobených do forem i odebraných z konstrukce, avšak odebrání počtu vzorků, který by byl dostatečný pro tuto podobu zkoušky, není příliš reálné.

Kromě pevnosti v tahu ohybem se připouští i možnost nedestruktivního (NDT) zjišťování vlastností, konkrétně pod pojmem *nedestruktivní dynamické zkoušky*. Předpokládá se tedy užití metody zjišťování rychlosti průchodu ultrazvuku (dále UZ) nebo měření vlastních frekvencí.

Norma [20] předepisuje nedestruktivní měření před zmrazováním a na konci každé etapy. Do protokolu o zkoušce se pak má uvést změna sledovaného parametru nedestruktivní metody, přičemž není upřesněno, zda se má jednat přímo o rychlost průchodu UZ impulsu, případně zjišťované vlastní frekvence, nebo zda se má posuzovat dynamický modul pružnosti, který závisí na těchto a dalších veličinách a výsledky by se tedy mohly lišit. Ohledně interpretace výsledků nedestruktivních zkoušek se ČSN 73 1322 [20] odkazuje na příslušné normy nebo předpisy, které však nejsou konkrétně uvedeny.

Podle [20] je tedy teoreticky možné posuzovat míru poškození mrazem za použití nedestruktivního měření, ke kterému by stačilo 6 zkušebních těles při jakémkoliv počtu cyklů (3 zmrazovaná a 3 referenční), avšak k vyhodnocení by bylo potřeba určit mezní pokles vlastností a specifikovat, která veličina má být posuzována.

Větší význam nedestruktivním zkouškám při zjišťování mrazuvzdornosti betonu připisuje norma ČSN 73 1380 [21], u nás platná od roku 2007. Popisuje tři zkušební postupy, které byly vyvíjené nezávisle na sobě v různých částech Evropy a je jimi dosahováno srovnatelných výsledků, žádná z těchto metod tedy není označena za referenční – jsou považovány za rovnocenné.

Prvním z uvedených zkušebních postupů je **zkouška na trámci**, při které se zkouší hranoly o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm vystavené zmrazovacím cyklem v prostředí deionizované vody. Cyklus se skládá z osmihodinové zmrazovací fáze a čtyřhodinového rozmrazování v proudící vodě. Délka jednoho cyklu je tedy 12 hodin, což je hlavní rozdíl a zároveň nevýhoda oproti průběhu zkoušky podle ČSN 73 1322 [20].

Další odlišností je, že stupeň poškození mrazem se podle ČSN 73 1380 [21] sleduje prostřednictvím relativního dynamického modulu (RDM), který se spočítá z vlastní příčné frekvence zjištěné rezonanční metodou (*Fundamental Frequency* – index FF), nebo z doby průchodu ultrazvukového impulsu tělesem (*Ultrasonic Pulse Transit Time* – index UPTT).

Vztahy pro výpočet RDM jsou následující [21]:

$$RDM_{FF} = \left(\frac{f_n}{f_0}\right)^2 \cdot 100; \quad RDM_{UPTT} = \left(\frac{t_{S,0}}{t_{S,n}}\right)^2 \cdot 100$$

RDM	relativní dynamický modul pružnosti [%]
f	vlastní frekvence příčného kmitání [kHz]
t_S	doba průchodu UZ impulsu [s]
index 0	značí hodnotu zjištěnou před prvním zmrazováním
index n	značí hodnotu naměřenou po n cyklech.

Dalšími metodami v normě [21] jsou **zkouška na desce**, která pracuje s tělesy vyřezanými z krychlí o hraně 150 mm a **zkouška CIF**, pro kterou se vyrábí tělesa v krychlových formách rozdělených v polovině deskou. V obou případech jsou pak tělesa upravena tak, že je zkoušena jen jedna stěna, která je během zmrazovacích cyklů pokrytá deionizovanou vodou nebo roztokem $NaCl$, zatímco zbytek povrchu je izolován.

Obě tyto zkoušky používají k vyhodnocení relativní dynamický modul zjištěný rezonanční metodou nebo ultrazvukem, případně změny délky měřené čidly umístěnými na tělesech a jako doplňkovou informaci lze též zaznamenat absorpci vody, která se zjistí jako změna hmotnosti plně nasyceného vzorku před a po zmrazovacích cyklech. Cykly probíhají stejně jako u zkoušky na trámciích a mezilehlé kontroly se provádí po 7, 14, 28, 42 a 56 cyklech.

Podle článku [23] je však náročnost provedení těchto zkoušek v nepoměru s nízkou citlivostí, jejich použití tedy není výhodné. Nepraktická je i délka cyklů, která je výrazně vyšší než s jakou se obvykle pracuje. Především však ČSN 73 1380 [21] pro žádnou ze zkoušek neudává konkrétní hodnotící kritérium, které by rozhodovalo, zda je zkoušený beton mrazuvzdorný a do jaké míry. Proto se příliš nepoužívá ani zkouška na trámciích, která by jinak nabízela více nedestruktivně orientovanou alternativu k ČSN 73 1322 [20].

V neposlední řadě se hodí zmínit také normu ASTM C666/C666M-15 [22] platnou v USA od roku 2015. Ta se věnuje zjišťování odolnosti vůči mrazu na hranolech nebo válcích a nabízí dva možné zkušební postupy:

- A. zmrazování těles postavených ve vodě,
- B. zmrazování těles čistě na vzduchu,

rozmrazování těles probíhá v obou případech při plném ponoření do vody. Cyklování probíhá na teplotách $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlost přechodu mezi nimi se může zvolit v rozmezí 2–5 hodin. Měří se v etapách po 36 nebo méně cyklech.

Norma [22] umožňuje měření na tělesech vyráběných ve formách i odebraných z konstrukce. Stupeň porušení sleduje prostřednictvím vlastní příčné frekvence, ze které se počítá relativní dynamický modul obdobně jako v [21]. Je zde zmíněno, že dynamický modul pružnosti záleží kromě vlastní frekvence také na rozměrech a objemové hmotnosti tělesa, takže pouhé porovnání druhých mocnin frekvencí je platné pouze za předpokladu, že se hmotnost a rozměry nemění. To sice nemusí být pravda, z důvodu odlupování betonu v důsledku zmrazování, ale pro porovnání relativních modulů různých těles nebo různých betonů mezi sebou lze podle [22] tyto změny zanedbat.

Zjišťování míry porušení betonu mrazem pomocí vlastností zjištěných nedestruktivním měřením tedy v praxi není problém. U nás však chybí norma, která by sdružovala jednoznačně dané vyhodnocení podle těchto vlastností s jednoduchým a praktickým způsobem zkoušení. To s sebou nese i značné omezení při použití na beton v konstrukci, vzhledem k velkému počtu těles potřebnému pro destruktivní zkoušky mrazuvzdornosti.

Pro zjištění odolnosti betonu vůči působení chemických rozmrazovacích látek se v praxi používá téměř výhradně postup podle normy ČSN 73 1326 [24]. Nabízí se zde tři možné metody, které jsou podrobněji popsány v následující kapitole.

Jako technická specifikace platí také dokument ČSN P CEN/TS 12390-9 [25] popisující tři metody, z nichž jedna je uvedena jako referenční a ostatní dvě jako alternativní. Referenční **metoda desek** využívá stejně zhotovená tělesa a téměř stejný zkušební postup jako zkouška na desce v normě [21], jako výsledek pak vyhodnocuje hmotnost odloučeného betonu (odpadu). Tato zkouška je oproti ČSN 73 1326 [24] výrazně složitější a zdlouhavější, a proto se moc často neprovádí [26].

1.4.2 Zkoušky prováděné v experimentální části práce

Stanovení odolnosti betonu proti působení vody a CHRL

Norma ČSN 73 1326 [24] uvádí zkoušku pro určení odolnosti povrchu betonu proti účinkům vody a chemických rozmrazovacích látek při opakovaném mrznutí a rozmrzání. Jejím prostřednictvím lze zároveň porovnávat různé betony z hlediska odolnosti nebo účinnosti různých impregnačních prostředků.

Pro zkoušku jsou vhodná zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 150 mm, odřezy válce o průměru 150 mm a výšce minimálně 50 mm, nebo hranoly o hraně podstavy 40 mm a délce 160 mm pro betony z jemnozrnného kameniva. U těles vyráběných ve formách se vždy zkouší horní povrch, který je zarovnan kovovým pravítkem pilovitým pohybem.

U vývrtů odebraných z konstrukce se má použít průměr 150 mm, u vyztužených konstrukcí 100 mm. Zkušební plochou je strana odpovídající vnějšímu povrchu konstrukce.

Norma [24] původně obsahovala dva možné postupy zkoušení - těmi jsou *A. Metoda automatického cyklování* a *B. Metoda ruční manipulace se vzorky*. Ve změně Z1 z roku 2003 pak přidává *C. Metodu automatického cyklování II* se současným doplněním názvu metody A o číslo I.

A. Metoda automatického cyklování I využívá programovatelného mrazicího zařízení, které automaticky střídá teploty. Jako CHRL se obvykle používá tříprocentní roztok *NaCl*.

Zkušební tělesa jsou uložena zkušební plochou dolů do misek z korozivzdorného materiálu, kde jsou ponořena do roztoku do výšky 5 mm. Misky jsou pak umístěny na dno zkušebního zařízení. Jeden zmrazovací cyklus se skládá z 15 minut při teplotě -15 °C a 15 minut při teplotě 20 °C, přechody mezi těmito dvěma teplotami nemají trvat déle než 45–50 minut.

Po skončení etapy 25 cyklů se těleso vyjme z misky, do které se proudem vody ze stříčky smyjí uvolněné částice ze zkušební plochy tělesa. Po slití přebytečné vody a přemístění odpadu do vysoušecí misky se vysuší při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti a zváží se.

Odpady z jednotlivých etap se zachovávají, aby bylo možné určit celkové množství odpadu. Tím je dána odolnost povrchu betonu, která se určí ze vztahu [24]:

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

ρ_a	hmotnost odpadu na plochu $\left[\frac{g}{m^2}\right]$
$\sum m$	hmotnosti odpadu po jednotlivých etapách [g]
A	velikost té části povrchu tělesa, která je smáčená roztokem NaCl (včetně plochy po obvodu tělesa) $[m^2]$

Zkouška je ukončena po předepsaném počtu cyklů, nebo po dosažení maximální povolené hmotnosti odpadu. Celkový výsledek se zapisuje ve formátu $(\rho_a \text{ v } \frac{g}{m^2})$ - (počet cyklů, při jakém byla tato hodnota dosažena), tedy například 450–100.

B. Metoda ruční manipulace se vzorky se od předchozí liší kromě absence automatického zařízení především tím, že zkušební povrch tělesa není ponořen do misky s roztokem, ale je opatřen vodotěsnou objímkou a zůstává otočen vzhůru.

Na povrchu se nejprve nechá zmrznout vrstva ledu při teplotě -8 °C, následně se nadávkuje množství solného roztoku potřebné k jeho rozmrazení. To trvá 1 hodinu a potom je povrch 30 minut omýván vodou o teplotě 20 °C, aby došlo k odplavení soli. Tento postup se cyklicky opakuje.

Při metodě ruční manipulace není odpad shromažďován a vážen, a stupeň narušení se obvykle hodnotí pouze vizuálně ve čtyřech kategoriích:

- nenarušený povrch,
- lehké odlupování povrchu,
- vypadávání zrn drobného kameniva,
- poškozený povrch [24].

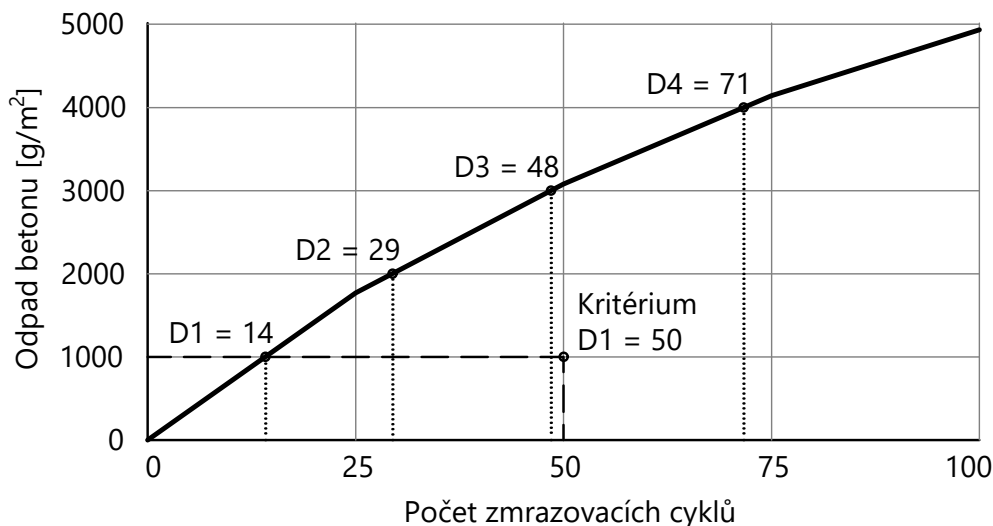
C. Metoda automatického cyklování II kombinuje použití vodotěsné objímky na horním povrchu vzorku se shromažďováním a vážením odpadu, a teplota ve zmrazovacím zařízení při ní působí na celé těleso rovnoměrně. K zavedení této metody vedly poznatky o zásadním vlivu, jaký má na porušování povrchu betonu gradient koncentrace soli [24].

Zkouška se provádí na tělese z formy nebo odebraném z konstrukce, které je 50 mm vysokým odřezem horního (resp. vnějšího) povrchu válce o průměru 150 mm. Objímku norma [24] doporučuje zhotovit z gumy za použití kaučukového lepidla. Před zkouškou se objímka naplní vodou a nechá se stát po dobu 2 dnů, což kromě nasycení povrchu betonu vodou slouží také jako test vodotěsnosti upevnění.

Po slití vody a povrchovém osušení se na horní povrch nalije 3% roztok $NaCl$ do výšky 5 mm a následuje cyklování po 3 hodinách při $-18\text{ }^{\circ}C$ a 3 hodinách při $+5\text{ }^{\circ}C$, přičemž udržování teplot zajišťuje cirkulující vzduch v cyklovacím zařízení. Po nejvýše 28 cyklech se slíje roztok do misky, povrch vzorku se vykartáčuje hrubým kartáčem a uvolněné částice se splaví ke zbytku. Takto získaný odpad se pak suší při $105\text{ }^{\circ}C$ a váží. Na horní povrch tělesa je nalita voda a po 24 hodinách nasákání se opět pokračuje s mrazíci cykly.

Odpad po jednotlivých etapách se shromažďuje stále ve stejné misce, takže lze sledovat jeho kumulativní průběh. Hodnoty odpadu po etapách se zakreslí do grafu, jehož vzor je uveden v [24], a který zobrazuje vztah mezi množstvím odpadu a počtem cyklů. Výsledek zkoušky se pak vyhodnotí pomocí součinitele odolnosti D1–D5 a počtu cyklů, při jakém byla dosažena hodnota betonu daná použitým součinitelem – například výsledek $D2 = 53$ značí, že odpadu $2000\frac{g}{m^2}$ bylo dosaženo po 53 cyklech. Jako kritérium odolnosti betonu proti CHRL se nejčastěji udává minimální počet cyklů, při kterém má být dosaženo odpadu $1000\frac{g}{m^2}$, tedy součinitel D1. Ukázka grafu používaného k vyhodnocení zkoušky metodou C je na Obr. 1.5.

V rámci této diplomové práce byly aplikovány metody A a C.



Obr. 1.5: Ukázka grafu pro vyhodnocení zkoušky odolnosti proti CHRL metodou automatického cyklování II [24].

Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Výchozím postupem pro zkoušení mrazuvzdornosti byla zkouška podle ČSN 73 1322 [20]. Jejím základem je opakované zmrazování a rozmrazování vodou nasycených zkušebních těles a následné posouzení míry jejich poškození. Počet zmrazovacích cyklů pro konkrétní zkoušku je dán příslušnými předpisy nebo projektem podle požadavku na stupeň mrazuvzdornosti betonu.

Mají se použít nevyztužené hranoly čtvercového příčného průřezu vhodné pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [27], pomocí které se určuje míra degradace vlivem zmrazování. Tělesa musí být neporušená – žádná průřezová plocha nesmí být oslabena o více než 1 %.

Zmrazování probíhá po etapách zahrnujících předem určený počet zmrazovacích cyklů – obvykle 25 nebo 50. Mezi jednotlivými etapami se provádí kontroly jakosti. Počet zkušebních těles se odvíjí od požadovaného počtu cyklů, a také počtu a způsobu provádění mezilehlých kontrol.

Pokud budou kontroly prováděny destruktivně, je pro každou etapu zhotovena jedna sada sestávající minimálně ze tří trámců plus jedna sada trámců referenčních, které nebudou zmrazovány. Norma [20] také předepisuje zhotovení jedné sady trámců navíc pro případ poruchy zmrazovacího zařízení, pokud není zajištěna náhradní možnost zmrazování. Při použití nedestruktivních metod se provádí kontroly průběžně po jednotlivých etapách a tělesa se pak mohou dále zmrazovat, jejich potřebný počet je tedy nižší.

Na zkušebních trámcích jsou nejprve zjištěny jejich rozměry a hmotnost, z čehož se vypočte jejich objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7 [28]. Potom jsou na tři dny uloženy do vody, aby se zajistilo jejich nasycení. Před prvním zmrazováním jsou z vody vyjmuty, povrchově osušeny a zváženy.

Ve zmrazovacím zařízení se tělesa během jednoho cyklu čtyři hodiny zmrazují, přičemž teplota prostředí musí dosahovat $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro betony vystavené teplotám do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro betony vystavené teplotám nižším než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Následně se dvě hodiny rozmrazují při teplotě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Po dokončení počtu cyklů odpovídajícímu jedné etapě se vždy jedna sada těles zkouší následovně:

- povrchové osušení,
- zjištění rozměrů a zvážení, určení objemové hmotnosti podle [28],
- případné nedestruktivní měření vlastností,
- nebo zkouška pevnosti v tahu ohybem podle [27],
- obvykle i zkouška pevnosti v tlaku na koncích trámů.

Na referenčních tělesech se provádí tytéž zkoušky, a to ve stáří odpovídajícím době před započítáním zmrazování ostatních vzorků.

Zkouška mrazuvzdornosti je ukončena, pokud již proběhl předepsaný počet zmrazovacích cyklů, nebo pokud byl na konci etapy zjištěn úbytek hmotnosti tělesa větší než 5 %, případně i pokud byly nedestruktivní metodou získány dostačující výsledky (vyhovující průběh sledované vlastnosti u zkrácených zkoušek nebo nevyhovující průběh po určitém počtu cyklů).

Do vyhodnocení se má pro každou etapu a pro celou zkoušku podle [20] uvést následující:

- zjištěné úbytky hmotnosti zmrazovaných těles v %,
- pevnosti v tahu ohybem a obvykle i pevnosti v tlaku zjišťované na koncích trámů pro tělesa zmrazovaná i referenční,
- součinitele mrazuvzdornosti v jednotlivých etapách a na konci zkoušky,
- případně změna kontrolovaného parametru použité nedestruktivní metody.

Součinitel mrazuvzdornosti se získá jako poměr průměrné pevnosti v tahu ohybem zjištěné na zmrazovaných tělesech k průměrné pevnosti v tahu ohybem těles referenčních.

Výsledkem zkoušky je určení počtu zmrazovacích cyklů, při jakém zůstal beton mrazuvzdorný, tedy součinitel mrazuvzdornosti nepoklesl pod 75 %. V případě posuzování mrazuvzdornosti na základě výsledků nedestruktivních zkoušek se ČSN 73 1322 [20] odkazuje na příslušné normy a předpisy.

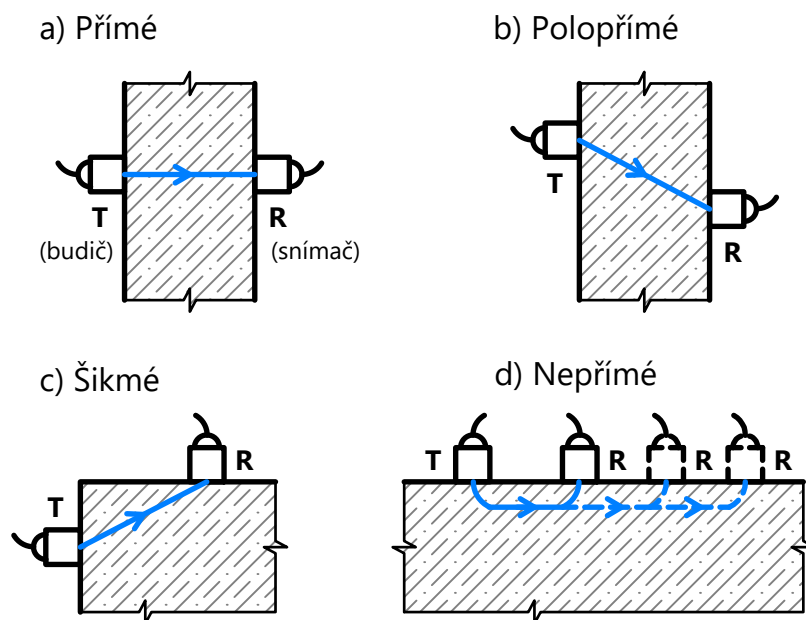
Ultrazuková impulsová metoda

Ultrazuková impulsová metoda je jedním z nedestruktivních postupů zkoušení betonu a je hojně využívána jak na vzorcích v laboratoři, tak přímo na konstrukci.

Hlavním principem je vysílání UZ vlnění do zkoumaného prvku, současné snímání průchozího signálu a měření doby průchodu impulsu prvkem. Při známé délce měřicí základny je následně dopočítána rychlost průchodu UZ vlnění, která závisí na fyzikálně-mechanických vlastnostech materiálu a je ovlivňována i případnými nepravidelnostmi a defekty ve vnitřní struktuře. Tímto měřením lze sledovat zejména:

- dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku,
- rovnoměrnost betonu,
- přítomnost větších dutin a jiných nepravidelností ve struktuře,
- změny vlastností v čase (například vlivem zrání nebo degradace) [29, 30].

Pro zkoušení stavebních konstrukcí se nejčastěji používají frekvence budiče v rozmezí 20–150 kHz, případně lze využít i frekvence vyšší. Se stoupajícím kmitočtem se zvyšuje rozlišovací schopnost přístroje, ale zároveň dochází k výraznějšímu tlumení impulsů při průchodu materiálem, takže výhody přesnějšího měření lze využít pouze v případě krátké měřicí základny. Vhodnou frekvenci je potřeba volit s ohledem nejen na délku základny, ale také na boční rozměr tělesa a předpokládanou pevnost betonu [29, 31].



Obr. 1.6: Způsoby prozvučení konstrukce [29, 31]

Podle vzájemné polohy sond rozlišujeme následující způsoby měření (uvedené také na obrázku 1.6):

- přímé prozvučení - sondy umístěné na protilehlých stranách prvku přímo naproti sobě,
- polopřímé prozvučení - sondy jsou na protilehlých stranách, ale ne přímo naproti sobě,
- šikmé prozvučení - sondy jsou vůči sobě orientovány kolmo,
- nepřímé (povrchové) prozvučení - sondy jsou umístěné rovnoběžně na stejné straně konstrukce, měření se několikrát opakuje s posouváním snímače po pravidelných intervalech a sledují se rozdíly mezi hodnotami naměřenými při různých vzdálenostech [29, 32].

Součástí příslušenství měřicího přístroje je etalon, u kterého známe čas, za který UZ impuls projde skrz a lze ho tedy použít ke kalibraci přístroje.

Základním výstupem při použití UZ impulsové metody je **rychlost průchodu UZ impulsu**, která se podle ČSN 73 1371 [29] určí při přímém, polopřímém a šikmém prozvučení z následujícího vztahu:

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

v_L	rychlost průchodu impulsu $\left[\frac{km}{s}\right]$
L	délka měřicí základny $[mm]$
T	čas, za který impuls projde měřicí základnou $[\mu s]$, přičemž

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

T_L	čas od vyslání signálu budičem do jeho detekce na snímači $[\mu s]$
t_{kor}	je korekce složená z tzv. mrtvého času přístroje a případného rozdílu času šíření impulsů zjištěného při kalibraci přístroje $[\mu s]$
t_e	je doba průchodu ultrazvuku etalonem $[\mu s]$
E	je časová charakteristika etalonu $[\mu s]$

Již samotnou rychlost šíření UZ impulsu lze použít k porovnání různých míst na konstrukci mezi sebou, sledování změn vlastností stejného měřeného místa v průběhu času nebo k detekci dutin a jiných defektů. V rámci stejného betonu lze s klesající rychlostí usoudit na nižší kvalitu. V případě dutin signál nemůže projít skrz ně, což prodlužuje dráhu, jakou musí urazit, a tedy i čas mezi vysláním vlnění a jeho detekcí na snímači.

Dalším výstupem může být **dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu**, který má s rychlostí průchodu UZ přímou souvislost. Podle ČSN 73 1371 [29] platí vztah:

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

E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]
ρ	objemová hmotnost betonu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
v_L	impulsová rychlost podélného ultrazvukového vlnění $\left[\frac{km}{s}\right]$
k_n	součinitel rozměrnosti prostředí [-]

Rozměrnost prostředí je dána vzájemným poměrem rozměrů zkoumaného prvku a použité vlnové délky ultrazvuku, obecně lze však za jednorozměrné prostředí považovat pruty, za dvojrozměrné desky a za trojrozměrné hranoly, kvádry, válce a jiné prvky, u kterých žádný rozměr výrazně nepřevyšuje ostatní. Pro jednorozměrné prostředí je $k_1 = 1$, pro dvoj- a trojrozměrné prostředí je nutný přepočítání s použitím Poissonova čísla ν_{cu} podle následujících vzorců [29]:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_{cu}^2}}$$

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

Z dynamického modulu pružnosti lze dále určit i statický modul pružnosti E_c za použití zmenšovacího součinitele κ_u , jehož hodnoty jsou pro jednotlivé třídy betonu uvedeny v ČSN 73 2011 [34].

Při použití UZ impulsové metody lze odvodit také například pevnost betonu v tlaku, jiné druhy pevnosti a další vlastnosti. Ty však nemají s průchodem UZ vlnění žádnou fyzikální souvislost, proto vyžadují použití tzv. *kalibračních* empirických vztahů, případně srovnání s výsledky destruktivních zkoušek na velkém počtu vzorků.

Hlavním přínosem ultrazvuku je však možnost zaznamenat změny struktury a stupeň porušení betonu. Předpokladem jsou známé hodnoty rychlosti průchodu UZ v neporušeném betonu, které se porovnávají s hodnotami naměřenými na betonu porušeném. Podle ČSN 73 1371 [29] lze posuzovat změny rychlosti průchodu nebo veličin z ní odvozených.

Při posuzování mrazuvzdornosti betonu tedy nejsme omezeni na porovnávání tří referenčních těles s jinými třemi, vystavenými určitému počtu zmrazovacích cyklů, ale je možné zjišťovat vlastnosti opakovaně, v každé fázi experimentu a následně sledovat změny na každém konkrétním tělese a získat tak lepší představu o působení opakovaného mrznutí a rozmrazování.

Rezonanční metoda

Další možností nedestruktivního zkoušení betonu je rezonanční metoda, jejímž principem je měření některé z vlastních frekvencí kmitání zkušebního tělesa. Přiložením sond v místech předpokládaného maximálního rozkmitu v daném směru můžeme naměřit vlastní frekvenci podélného (longitudálního) kmitání – f_L , příčného (transversního) – f_f a kmitání kroutivého (torzního) – f_t . Vlastní frekvence pak spolu s dalšími veličinami slouží k určení fyzikálně-mechanických vlastností materiálu a sledování jejich změn v čase.

Norma [35] předepisuje použití rezonančního přístroje, který vyvolává v tělese spojitě mechanické kmitání a zároveň snímá vyvolanou odezvu. Vlastní frekvence se pak hledá pomocí ladění frekvence zdroje a sledování, kdy dojde k rezonanci (amplituda kmitání vzorku bude maximální). Pro měření vlastních frekvencí v různých směrech je pak nutné různé umístění zdroje a snímače.

Běžně se však používá impulsní vyvolání kmitání, kdy je těleso rozkmitáno úderem kladívka a snímač zrychlení upevněný na povrchu tělesa zaznamenává odezvu. Tento postup je zmíněný například v [22] a [23].

Vlastní kmitočty tělesa závisí na jeho tvaru, velikosti, objemové hmotnosti a modulu pružnosti. Rezonanční metoda se používá laboratorně na zkušebních vzorcích pravidelného geometrického tvaru, pro které lze odvodit vztahy vyjadřující souvislost mezi vlastními frekvencemi a hledanými pružnostními charakteristikami betonu [35, 36]. Lze zjistit především:

- dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku,
- dynamický modul pružnosti ve smyku,
- dynamické Poissonovo číslo.

Z dynamických modulů lze také dopočítat statický modul pružnosti E_c podobně jako v případě UZ impulsové metody. V normě ČSN 73 2011 [34] jsou pro jednotlivé třídy betonu uvedeny hodnoty redukčního součinitele κ_r .

Rezonanční metoda umožňuje rovněž sledování degradace a dalších změn betonu v čase, posuzování rovnoměrnosti výroby nebo detekci trhlin a jiných nepravidelností ve struktuře tělesa [35].

Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku lze u této metody zjistit dvěma způsoby, a to výpočtem z podélné vlastní frekvence f_L nebo z příčné vlastní frekvence f_f . Pro výpočet z podélné frekvence uvádí ČSN 73 1372 [35] následující vztah:

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

$E_{cr,L}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]
L	délka tělesa [m]
f_L	první vlastní frekvence podélného kmitání [kHz]
ρ	objemová hmotnost $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Pro výpočet z příčné frekvence pak platí [35]:

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

$E_{cr,f}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]
c_1	korekční součinitel zohledňující vliv smyku a setrvačných momentů [–]
L	délka tělesa [m]
f_f	první vlastní frekvence příčného kmitání [kHz]
ρ	objemová hmotnost $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
i	poloměr setrvačnosti příčného řezu k ose kolmé na rovinu kmitání [m]

Korekční součinitel c_1 závisí na poměru i/L a jeho hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 2 v ČSN 73 1372 [35].

Při správně provedeném měření by měly být hodnoty dynamického modulu pružnosti vypočtené z podélného a příčného kmitání přibližně stejné. Z rozdílu většího než 10 % lze usoudit, že je materiál výrazně poškozený, nebo nastala chyba v měření. Podle ČSN 73 1372 [35] má v případě betonu přednost hodnota vypočtená z podélné vlastní frekvence.

Dynamický modul pružnosti ve smyku se určí z krouživé vlastní frekvence f_t podle vztahu [35]:

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

G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa]
L	délka tělesa [m]
f_t	první vlastní frekvence krouživého kmitání [kHz]
ρ	objemová hmotnost $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
k	součinitel zohledňující tvar příčného řezu [–]

Součinitel k vyjadřuje poměr polárního momentu setrvačnosti k modulu tuhosti průřezu v kroucení a nabývá hodnot:

- $k = 1$ pro válce,
- $k = 1,183$ pro hranoly s čtvercovou základnou,
- pro hranoly s obdélníkovým průřezem je v normě [35] uveden vztah zohledňující rozdílnou šířku a výšku průřezu.

Dynamické Poissonovo číslo lze určit z hodnot dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku a modulu pružnosti ve smyku podle vztahu [35]:

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

ν_{cr}	dynamické Poissonovo číslo [–]
$E_{cr,L}$	dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku určený z podélné vlastní frekvence [MPa]
G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa]

Výsledky rezonanční metody nachází využití především při posuzování změn kvality materiálu v závislosti na čase, přičemž lze sledovat jak změny samotných vlastních frekvencí, tak lze využít i vztahů mezi dynamickými a statickými moduly pružnosti, případně mezi dynamickými moduly a pevností betonu [35].

Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Postup pro určení statického modulu pružnosti betonu v tlaku uvádí norma ČSN ISO 1920-10 [37]. Je založen na vystavení zkušebnímu tělesu známým hodnotám napětí za současného měření délkových deformací, modul pružnosti se následně vypočítá podle Hookeova zákona.

Zkoušku je možné provádět na tělesech z forem i na vývrtech odebraných z konstrukce. Tělesa mohou mít tvar válce nebo hranolu s nejmenším jmenovitým rozměrem alespoň 100 mm a poměrem stran splňujícím podmínku $2 \leq L/d \leq 4$, kde L je délka a d je průměr válce nebo hrana čtvercové podstavy hranolu.

Na zkoušené těleso jsou nejméně na dvou protilehlých stranách osazeny přístroje pro měření délkových změn - používají se například zrcátkové nebo hodinkové defrometry, nebo také odporové, indukční nebo strunové tenzometry. Měřené body musí mít od obou konců tělesa stejnou vzdálenost rovnou nejméně $L/4$.

Ve zkušebním lisu je pak těleso namáháno tlakem. Nejprve se vyvodí základní napětí $\sigma_b = 0,5$ MPa, to je udržováno 60 s a následně se napětí zvyšuje rychlostí 0,2–0,6 MPa až do dosažení horního zatěžovacího napětí σ_a , které odpovídá jedné třetině pevnosti betonu v tlaku. Po 60 s se napětí stejnou rychlostí zase sníží na σ_b a takto se cyklus opakuje ještě alespoň dvakrát.

Statický modul pružnosti se pak určí ze vztahu [37]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b}$$

E_c	statický modul pružnosti v tlaku [MPa]
σ_a	horní zatěžovací napětí [MPa]
σ_b	základní zatěžovací napětí [MPa]
ϵ_a	průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [–]
ϵ_b	průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí [–]

Pro určení hodnoty horního napětí σ_a u vyrobených těles norma [37] předepisuje použití tří válcových těles s poměrem stran $L/d = 2$, která byla vyrobena ze stejného betonu a stejně ošetřována. Na těchto třech tělesech má být provedena zkouška pevnosti v tlaku a zprůměrováním výsledků se získá střední hodnota pevnosti v tlaku F_c . Jako horní napětí σ_a se pak použije $\frac{F_c}{3}$. Pro vzorky odebrané z konstrukce se tento postup nevyžaduje, pevnost v tlaku může být odhadnuta způsobem, který je třeba následně uvést v protokolu o zkoušce. Výjimečně je možné pevnost odhadnout i u těles z forem.

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu se stanovuje podle normy ČSN EN 12390-3 [38] zatěžováním tělesa tlakem ve zkušebním lisu až do porušení. Z maximálního přeneseného zatížení a zatěžované plochy se pak vypočte pevnost.

Ke zkoušce se používají krychle nebo válce vyhovující ČSN EN 12390-1 [39] a ČSN EN 12390-2 [40], případně tělesa z vývrtů vyhovující podle ČSN EN 12504-1 [41]. V případě, že tělesa nesplňují povolené odchylky od jmenovitých rozměrů, musí se upravit podle přílohy A normy [38], nebo je lze zkoušet podle přílohy B téže normy. V informativní národní příloze se hovoří také o zkoušení konců trámů po zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

Po otření dotykových ploch je těleso centricky osazeno do lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Zatěžuje se plynule, bez nárazu konstantní rychlostí zatěžování $0,6 \pm 0,2 \frac{MPa}{s}$.

Při porušení betonu je zaznamenána hodnota maximálního zatížení a současně se hodnotí způsob porušení tělesa. Norma [38] uvádí příklady vyhovujících a nevyhovujících způsobů porušení pro krychli a válec. Nevyhovující porušení může být nejčastěji způsobeno chybou lisu nebo nesprávným osazením tělesa.

Pevnost betonu v tlaku je pak dána následujícím vztahem [38]:

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

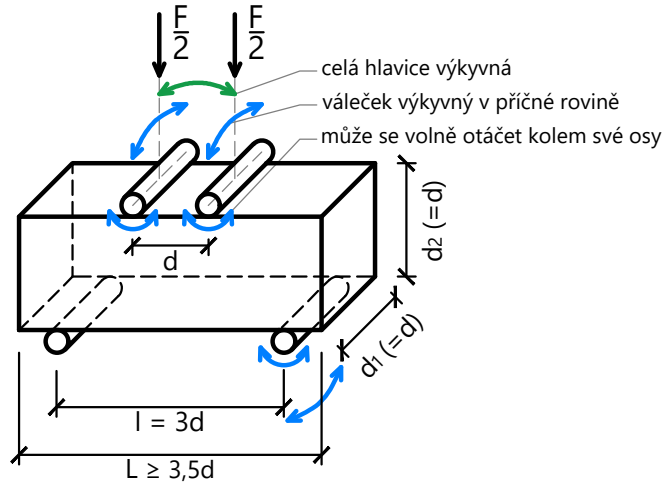
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
F	maximální zatížení při porušení [N]
A_c	průřezová plocha tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm ²]

Pevnost v tahu ohybem

Základním způsobem pro určení míry degradace betonu vystaveného zmrazovacím cyklům je podle [20] porovnání pevnosti v tahu ohybem zjištěné na zmrazovaných a nezmrazovaných tělesech. Zkouška podle ČSN EN 12390-5 [27] spočívá v namáhání tělesa tvaru hranolu ohybovým momentem od zatížení přenášeného jedním nebo dvěma zatěžovacími a dvěma podpěrnými válečky. Pevnost v tahu ohybem se pak vypočte z maximálního dosaženého zatížení.

Zkušebními tělesy jsou hranoly splňující podmínky ČSN EN 12390-1 [39] a pokud se jedná o tělesa vyrobená ve formách, musí rovněž splňovat nároky ČSN EN 12390-2 [40] a musí na nich být vyznačen směr ukládání betonu.

Referenčním postupem pro zkoušení betonu je čtyřbodový ohyb (schéma zkoušky je na Obr. 1.7). Zkušební lis vyhovující podmínkám stanovených v ČSN EN 12390-4 [42] je osazen dvěma spodními podpěrnými válečky a dvěma horními zatěžovacími, přičemž oba horní a jeden ze spodních válečků se volně otáčí kolem své osy a jsou



Obr. 1.7: Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem (čtyřbodový ohyb) [27].

výkyvné v rovině kolmé k podélné ose zkušebního tělesa. Vzájemné vzdálenosti válečků jsou patrné z uvedeného schématu. Při zkoušení se nejdříve otřou válečky lisu a povrch tělesa, pak se těleso umístí do lisu centricky a tak, aby byl směr působení zatížení kolmý na směr ukládání betonu. Při zatěžování se vyvolané napětí zvyšuje konstantní rychlostí v rozsahu 0,04–0,06 $\frac{MPa}{s}$.

Pevnost v tahu ohybem při čtyřbodovém namáhání je podle ČSN EN 12390-5 [27] dána vztahem:

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

f_{cf}	pevnost v tahu ohybem [MPa]
F	maximální zatížení [N]
l	vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]
d_1, d_2	rozměry příčného řezu hranolu [mm]

Podle přílohy A normy [27] je možné použít také třibodový ohyb, který však dává vyšší výsledné pevnosti než ohyb čtyřbodový.

Trámec je zatěžován v polovině rozpětí jedním zatěžovacím válečkem, který má možnost se volně otáčet kolem své osy. Výsledná pevnost se pak určí podle vztahu [27]:

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

f_{cf}	pevnost v tahu ohybem [MPa]
F	maximální zatížení [N]
l	vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]
d_1, d_2	rozměry příčného řezu hranolu [mm].

Pevnost v příčném tahu

Základní podobou zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu podle ČSN EN 12390-6 [43] je namáhání zkušebního válce tlakem v úzkém pruhu po délce tělesa. Při tomto způsobu zatížení je těleso porušeno kolmou tahovou silou.

Ke zkoušení se používá zkušební lis vyhovující ČSN EN 12390-4 [42], roznášecí proužky z dřevovláknité desky o objemové hmotnosti $\geq 900 \frac{kg}{m^3}$, které zprostředkovávají přenos zatížení do dotykové přímky s tělesem, a nepovinně lze použít vodící přípravky sloužící k zajištění správné polohy roznášecích proužků a tělesa.

Jako zkušební tělesa se mají použít válce splňující podmínky ČSN EN 12390-1 [39] a v případě válců vyrobených ve formách také ČSN EN 12390-2 [40]. Jako referenční jsou pro tuto zkoušku brány válce průměru 150 mm a délky 300 mm, lze však použít i jiné rozměry. U těles získaných jádrovými vývrty nesmí být poměr délky ku průměru menší než 1. Norma [43] uvádí také postup pro zkoušení těles tvaru krychle nebo hranolu, ale je zde zmíněno, že zkoušky prováděné na těchto tělesech dávají přibližně o 10 % vyšší výsledné pevnosti než na válcích zhotovených ze stejného betonu.

Po otření stykových ploch od vody a nečistot a centrickém osazení do lisu je těleso namáháno tlakem s konstantní rychlostí zatěžování v rozmezí 0,04–0,06 $\frac{MPa}{s}$. Při porušení tělesa se zaznamená nejvyšší dosažené zatížení, zkontroluje se vzhled lomové plochy a zaznamená se, pokud je nějakým způsobem neobvyklý.

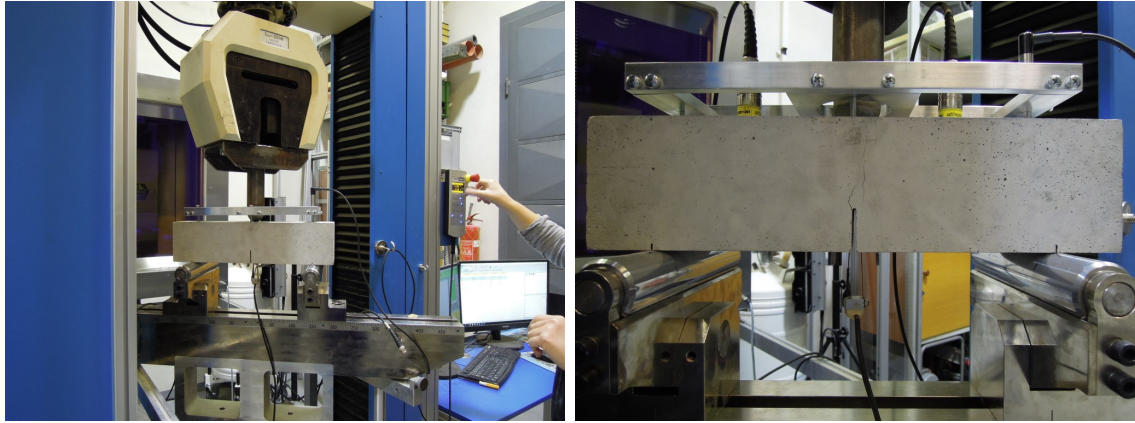
Pevnost v příčném tahu se určí podle následujícího vztahu [43]:

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

f_{ct}	pevnost v příčném tahu [MPa]
F	maximální zatížení [N]
l	délka dotykové přímky tělesa [mm]
d	zjištěný příčný rozměr tělesa [mm].

Lomová zkouška v třibodovém ohybu

Jedním ze způsobů, jak sledovat strukturální změny betonu v důsledku vystavení zmrazovacím cyklům je lomová zkouška. Projeví se zde přítomnost mikrotrhlin způsobených mrazovými cykly, které usnadňují šíření větších trhlin vedoucích k porušení betonu při namáhání ohybem. Na hranolu nominálních rozměrů 100 × 100 × 400 mm je v polovině délky proveden zářez do hloubky jedné třetiny výšky tělesa a následně probíhá zkouška v třibodovém ohybu s rozpětím podpor 300 mm.



Obr. 1.8: Zkušební zařízení a osazení vzorku pro lomovou zkoušku.

Během pomalého zatěžování konstantním přírůstkem posunu příčnicku je snímán posun indukčností senzorem umístěným nad podporou a otevření ústí zářezu prostřednictvím extenzometru umístěného mezi břity nalepenými po stranách zářezu [44, 45].

Výstupem měření jsou grafy závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí $F-d$ a na otevření ústí zářezu $F-CMOD$ (*crack mouth opening displacement*), přičemž je významná nejen počáteční stoupající část, ale také sestupná větev po dosažení maximální síly.

Ze stoupající větve grafu $F-d$, kde je závislost téměř lineární, lze získat **modul pružnosti betonu** E_c podle následujícího vztahu [46]:

$$E_c = \frac{F_i}{4Bd_i} \left(\frac{S}{D}\right)^3 \cdot \left\{ 1 + \frac{5qS}{8F_i} + \left(\frac{D}{S}\right)^2 \cdot \left[2,70 + 1,35 \cdot \frac{qS}{F_i} \right] - 0,84 \cdot \left(\frac{D}{S}\right)^3 \right\} + \frac{9}{2} \frac{F_i}{Bd_i} \cdot \left(1 + \frac{qS}{2F_i}\right) \cdot \left(\frac{S}{D}\right)^2 \cdot F_1(\alpha_0)$$

E_c	statický modul pružnosti [GPa]
F_i	zatížení v lineárně pružné oblasti diagramu [kN]
d_i	průhyb v polovině rozpětí odpovídající hodnotě F_i [mm]
B	šířka tělesa [mm]
D	výška tělesa [mm]
S	vzdálenost podpor [mm]
q	vlastní tíha tělesa vztažená na jednotku délky $\left[\frac{kN}{m}\right]$

$$F_1(\alpha_0) = \int_0^{\alpha_0} xY^2(x)dx; \quad \alpha_0 = \frac{a_0}{D}$$

$Y(x)$	funkce geometrie pro tříbodový ohyb
a_0	počáteční hloubka zářezu [mm]

Další vyhodnocovanou veličinou je **efektivní lomová houževnatost** K_{Ice} vycházející z modelu efektivní trhliny [46]. Ten kombinuje principy lineární lomové mechaniky a délky trhliny. Vypočte se z následujícího vztahu [45]:

$$K_{Ice} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot S}{2 \cdot B \cdot D^2} \cdot Y(\alpha_e) \cdot \sqrt{a_e}$$

K_{Ice} efektivní lomová houževnatost [$MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$]

F_{max} maximální síla [kN]

a_e efektivní délka trhliny [mm]

$Y(\alpha_e)$ funkce geometrie, přičemž

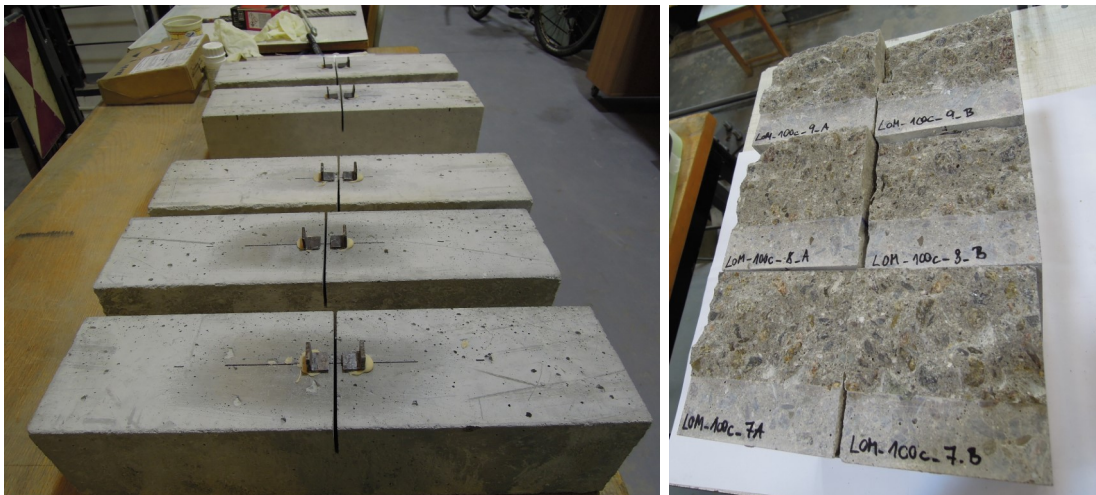
$$\alpha_e = \frac{a_e}{D}$$

Z kompletního $F-d$ diagramu včetně sestupné větve lze pak podle RILEM [47] určit **lomovou energii**:

$$G_F = \frac{W_F}{B \cdot (D - a_0)}$$

G_F lomová energie [J/m^2]

W_F lomová práce – plocha pod křivkou $F-d$ [$N \cdot m$]



Obr. 1.9: Tělesa opatřená břity a lomové plochy těles.

2 Experimentální část

2.1 Cíle experimentu

V experimentální části se práce věnuje aplikaci různých zkušebních metod ke stanovení míry poškození betonu vlivem zmrazovacích cyklů.

Měření probíhalo na tělesech z provzdušněného betonu, přičemž v první sérii měření byla použita tělesa zhotovená ve formách a ve druhé sérii vývrty odebrané z bloku, který byl vybetonován v centru AdMaS.

Zvláštní pozornost je věnována nedestruktivním metodám – UZ impulsové a rezonanční – a nejednoznačnosti jejich vyhodnocení podle platných norem. Pro odvození výsledných parametrů bylo použito několik postupů za účelem posouzení, jak moc jednotlivé faktory ovlivňují výsledné hodnoty.

Výsledky nedestruktivních zkoušek pak byly porovnávány s charakteristikami zjištěnými destruktivně. Výstupem je tedy jednak ověření mrazuvzdornosti provzdušněného betonu, ale především rozbor různých přístupů ke zjišťování míry degradace betonu s přihlédnutím k možným rozdílům mezi vlastnostmi stanovenými na tělesech z forem a na vývrtech.

2.2 Výroba zkušebních bloků a těles

2.2.1 Receptura čerstvého betonu

Provzdušněný beton pro betonové bloky a zkušební tělesa byl zhotoven v provozu firmy BETOTECH, s.r.o v Brně-Bosonohách. Předepsané složení čerstvého betonu je uvedeno v tabulce 2.1. Předepsaný vodní součinitel byl 0,46.

Tab. 2.1: Složení čerstvého betonu.

Materiál	Množství [kg/m ³]
CEM I 42,5 R	390,0
Písek 0–4 mm	810,0
Kamenivo 4–8 mm	160,0
Kamenivo 8–16 mm	760,0
Plastifikační přísada	1,0
Provzdušňovací přísada	0,6
Stabilizační přísada	1,6
Voda čistá	185,0
Celková hmotnost	2308,2

2.2.2 Betonové bloky v centru AdMaS

Jako první probíhala betonáž betonových bloků v centru AdMaS. Po dopravení betonu na místo byly odebrány vzorky a provedeny zkoušky čerstvého betonu. Byly zjištěny následující vlastnosti:

- objemová hmotnost podle ČSN EN 12350-6 [12] $2288 \frac{kg}{m^3}$,
- rozlití podle ČSN EN 12350-5 [7] 460/450 mm,
- sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2 [4] 180 mm,
- teplota čerstvého betonu 28 °C,
- obsah vzduchu 5 %.

Byly vybetonovány dva bloky – svislý s půdorysnými rozměry 1800 × 450 mm a vodorovný půdorysných rozměrů 1200 × 2400 mm a výšky 450 mm. Na výztuži v obou blocích byly osazeny tenzometry různého typu za účelem podrobného monitorování dějů v betonu po dobu tuhnutí a tvrdnutí. Vyhodnocení těchto měření není předmětem této práce.

Beton byl hutněn ponorným vibrátorem a po dokončení betonáže byly oba bloky přikryty vlhkou jutou a polyetylenovou fólií proti unikání vlhkosti.



Obr. 2.1: Zkouška obsahu vzduchu tlakovým hrcem.



Obr. 2.2: Zkouška konzistence čerstvého betonu rozlitím.



Obr. 2.3: Zkoušky objemové hmotnosti čerstvého betonu a sednutí kužele.



Obr. 2.4: Betonáž svislého bloku.



Obr. 2.5: Betonáž vodorovného bloku.

2.2.3 Zkušební tělesa

Po převezení betonu k areálu Fakulty stavební VUT byly před výrobou zkušebních těles znovu provedeny zkoušky čerstvého betonu. Zjištěné hodnoty byly následující:

- rozlití podle ČSN EN 12350-5 [7] 380/370 mm,
- sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2 [4] 90 mm,
- teplota čerstvého betonu 31 °C,
- obsah vzduchu 4,3 %.

Byla zhotovena zkušební tělesa pro základní zkoušky po 28 dnech, pro zkoušky odolnosti proti působení vody a CHRL a pro zkoušení mrazuvzdornosti, které je hlavním předmětem této práce.

Tělesa běžné velikosti byla hutněna na vibračním stole, hranoly větších rozměrů ponorným vibrátorem.



Obr. 2.6: Vykládka betonu na FAST a zkouška tlakovým hrncem.



Obr. 2.7: Výroba zkušebních trámců.



Obr. 2.8: Výroba těles na zkoušky CHRL.



Obr. 2.9: Hutnění betonu ve velkých formách.

2.3 Základní zkoušky betonu po 28 dnech

Ve stáří 28 dní byly na zkušebních tělesech zjišťovány následující veličiny:

- objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7 [28],
- krychelná pevnost v tlaku podle ČSN EN 12390-3 [38],
- pevnost v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [27],
- statický modul pružnosti v tlaku podle ČSN ISO 1920-10 [37],
- dynamický modul pružnosti UZ impulsovou metodou podle ČSN 73 1371 [29] a rezonanční metodou podle ČSN 73 1372 [35],
- odolnost proti působení vody a CHRL podle ČSN 73 1326 [24].

U všech zjišťovaných vlastností byl spočítán aritmetický průměr z jednotlivých výsledků, určena výběrová směrodatná odchylka σ a variační koeficient CoV pro získání představy o rozptylu výsledků.

Pevnost betonu v tlaku byla měřena na třech krychlích nominálních rozměrů $150 \times 150 \times 150$ mm, u kterých byla zároveň zjištěna i objemová hmotnost. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 2.2 a 2.3.

Dále bylo zkoušeno šest hranolů nominálních rozměrů $100 \times 100 \times 400$ mm. U všech byla určena objemová hmotnost, první tři (H1–3) byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu ohybem a na druhých třech (H4–6) byl stanoven dynamický a statický modul pružnosti. Výsledky jsou zapsány v tabulkách 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 a 2.8.

Tab. 2.2: Objemová hmotnost zjištěná na krychlích ve stáří 28 dní.

Objemová hmotnost ve stáří 28 dní - krychle				
Krychle	ρ [kg/m ³]	$\bar{\rho}$ [kg/m ³]	σ [kg/m ³]	CoV [%]
K1	2322	2330	9	0,4
K2	2337			
K3	2320			

Tab. 2.3: Pevnost v tlaku zjištěná na krychlích ve stáří 28 dní.

Krychelná pevnost ve stáří 28 dní				
Krychle	f_c [Mpa]	\bar{f}_c [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]
K1	53,90	55,5	1,38	2,5
K2	56,10			
K3	56,43			

Tab. 2.4: Objemová hmotnost zjištěná na hranolech ve stáří 28 dní.

Objemová hmotnost ve stáří 28 dní - hranoly				
Hranol	ρ [kg/m ³]	$\bar{\rho}$ [kg/m ³]	σ [kg/m ³]	CoV [%]
H1	2312	2310	11	0,5
H2	2312			
H3	2314			
H4	2317			
H5	2292			
H6	2327			

Tab. 2.5: Pevnost v tahu ohybem zjištěná na hranolech ve stáří 28 dní.

Pevnost v tahu ohybem ve stáří 28 dní				
Hranol	f_{cf} [Mpa]	\bar{f}_{cf} [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]
H1	5,47	5,7	0,38	6,7
H2	6,13			
H3	5,47			

Tab. 2.6: Dynamický modul pružnosti zjištěný ultrazvukovou metodou na hranolech ve stáří 28 dní.

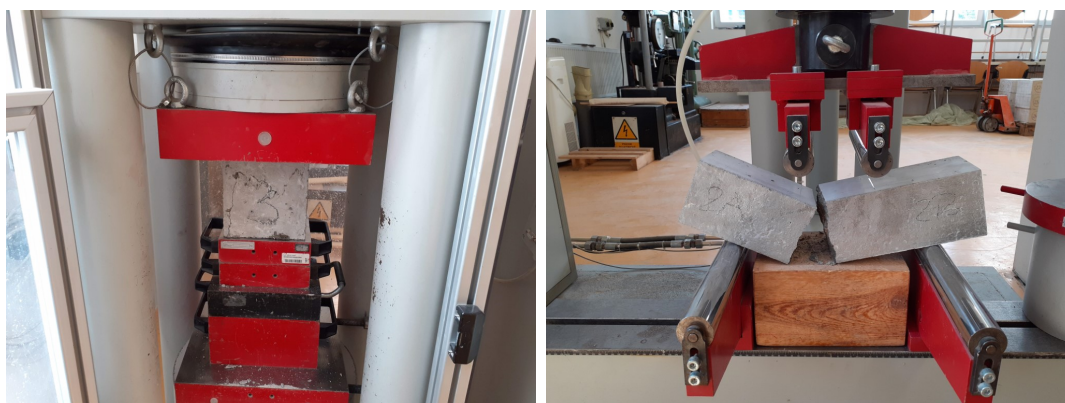
Dynamický modul pružnosti UZ metodou				
Krychle	E_{cu} [GPa]	$\varnothing E_{cu}$ [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]
H4	43,50	43,1	0,87	2,0
H5	42,09			
H6	43,68			

Tab. 2.7: Dynamický modul pružnosti zjištěný z podélných vlastních frekvencí hranolů ve stáří 28 dní.

Dynamický modul pružnosti z f_l				
Krychle	$E_{cr,fl}$ [GPa]	$\varnothing E_{cr,fl}$ [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]
H4	40,76	40,5	0,79	2,0
H5	39,63			
H6	41,15			

Tab. 2.8: Statický modul pružnosti zjištěný na hranolech ve stáří 28 dní.

Statický modul pružnosti ve stáří 28 dní				
Hranol	E_c [GPa]	$\varnothing E_c$ [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]
H4	31,38	31,1	0,56	1,8
H5	30,41			
H6	31,38			



Obr. 2.10: Zkouška v tlaku a v tahu ohybem ve stáří 28 dní.

Ačkoliv provedení zkoušek odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je časově náročnější, jsou zde zařazeny mezi zkoušky po 28 dnech. Z důvodu omezené kapacity laboratoře (jedno zmrazovací zařízení) bylo nutné provést celý proces zkoušení nejdříve na jedné sadě těles a potom na druhé.

Odolnost proti CHRL byla zjišťována podle [24] metodou A na třech krychlích o hraně 150 mm a metodou C na pěti tělesech tvaru válce o průměru 150 mm. V obou případech byla tělesa vystavena celkem 100 cyklům zmrazování a rozmrazování, shromažďování a měření odpadu probíhalo po každých 25 cyklech.

Z odpadů naměřených na krychlích metodou A byla spočítána průměrná hodnota odpadu na plochu. Výsledek zapsaný podle [24] je 4706–100, podrobné výsledky jsou uvedeny v Tab. 2.9. Hodnota odpadu $1000 \frac{g}{m^2}$ byla překročena po 31 cyklech.

Z pěti těles zkoušených metodou C vykazovalo jedno výrazně nižší hodnoty odloučeného betonu. Z důvodu hodnoty odpadu na plochu lišící se od průměru o více než 20 % bylo toto těleso z vyhodnocení vyřazeno, jak udává norma [24]. Výsledky zbývajících čtyř těles zobrazuje Tab. 2.10 a Obr. 2.11. Celková hodnota odpadu po 100 cyklech byla $4933 \frac{g}{m^2}$ a součinitel D1 je roven 14 cyklům.

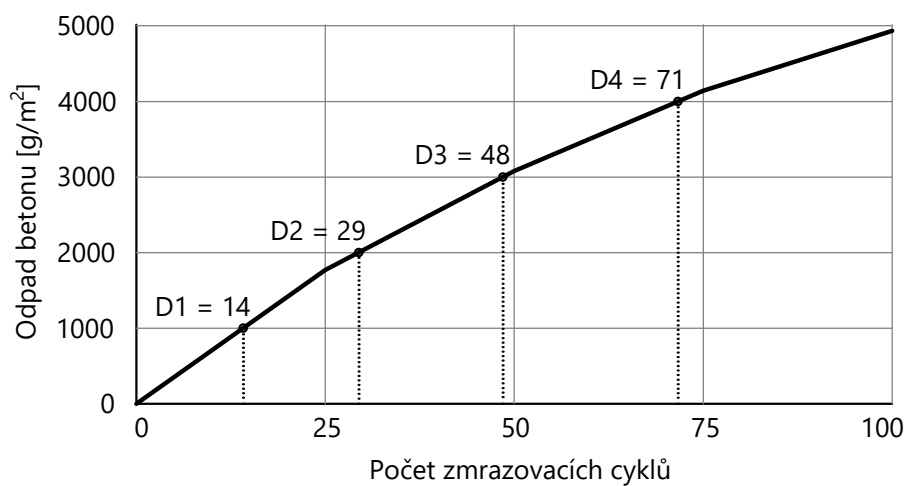
Při obou metodách byla zároveň použita i další tělesa, na kterých byly testovány různé způsoby ošetření nezkoušených částí povrchu tělesa a jejich účinnost při izolaci proti CHRL. Vyhodnocení těchto měření nebylo předmětem této práce.

Tab. 2.9: Odolnost proti působení vody a CHRL stanovená metodou A.

CHRL A				
Krychle	ρ_a [g/m ²]	$\bar{\rho}_a$ [g/m ²]	σ [g/m ²]	CoV [%]
1	4543	4706	162	3,4
2	4708			
3	4867			

Tab. 2.10: Odolnost proti působení vody a CHRL stanovená metodou C

CHRL C				
Válec	ρ_a [g/m ²]	$\bar{\rho}_a$ [g/m ²]	σ [g/m ²]	CoV [%]
1	4643	4933	205	4,2
2	5001			
3	4964			
4	5125			



Obr. 2.11: Vývoj množství odpadu při zkoušce odolnosti proti CHRL metodou C.



Obr. 2.12: Tělesa zkoušená na odolnost proti CHRL metodou A.



Obr. 2.13: Tělesa zkoušená na odolnost proti CHRL metodou C.



Obr. 2.14: Povrch tělesa poškozený CHRL při metodě A.

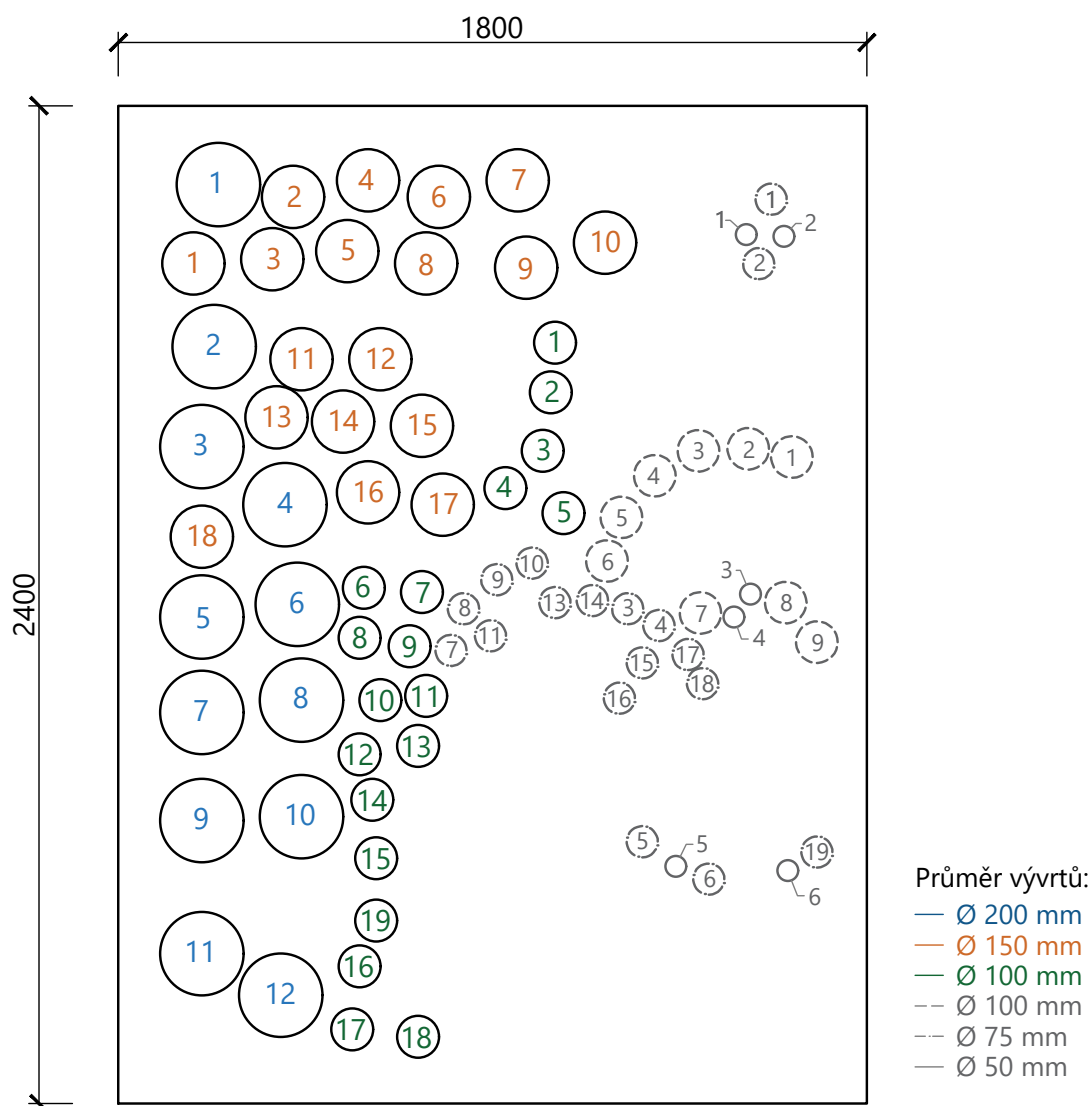


Obr. 2.15: Povrch tělesa poškozený CHRL při metodě C.

2.4 Odběr vývrtů ze zkušebních bloků

Pro zkoušky mrazuvzdornosti byly odebrány jádrové vývrtů různých průměrů ze svislého betonového bloku. Celkem bylo odebráno 12 vývrtů průměru 200 mm, 18 vývrtů průměru 150 mm a 19 vývrtů průměru 100 mm. Schéma rozmístění vývrtů v bloku je na Obr. 2.16. Vývrtů označené šedě byly odebrány dodatečně k jiným účelům.

Při rozdělení vývrtů na skupiny pro jednotlivé zkoušky bylo přihlédnuto k jejich umístění na bloku a byly vybírány tak, aby pro každou zkoušku v rámci stejného cílového počtu zmrazovacích cyklů byly zastoupeny různé výškové úrovně.



Obr. 2.16: Schéma rozmístění vývrtů na bloku a jejich označení.

Zkušební tělesa pak byla z vývrtů zhotovena následovně:

- pro lomové zkoušky – průměr 100 mm, délka 400 mm
 - vývrty 1, 18, 11 tělesa 1, 2, 3 referenční,
 - vývrty 2, 17, 9 tělesa 4, 5, 6 50 cyklů,
 - vývrty 3, 16, 10 tělesa 7, 8, 9 100 cyklů,
- pro pevnost v tahu ohybem – vyřezané trávce 100 × 100 × 400 mm z vývrtů průměru 150 mm
 - vývrty 16, 2, 10 tělesa 1, 2, 3 referenční,
 - vývrty 17, 4, 14 tělesa 4, 5, 6 50 cyklů,
 - vývrty 18, 6, 15 tělesa 7, 8, 9 100 cyklů,
- pro stanovení modulu pružnosti – průměr 100 mm, délka 200 mm
 - vývrty 6, 14, 8 tělesa 1, 2, 3 referenční,
 - vývrty 4, 19, 7 tělesa 4, 5, 6 50 cyklů,
 - vývrty 5, 12, 15 tělesa 7, 8, 9 100 cyklů,
- pro pevnost v příčném tahu – průměr 100 mm, délka 150 mm (ze stejných vývrtů jako pro E_c kromě jednoho)
 - vývrty 6, 14, 8 tělesa 1, 2, 3 referenční,
 - vývrty 4, 13, 7 tělesa 4, 5, 6 50 cyklů,
 - vývrty 5, 12, 15 tělesa 7, 8, 9 100 cyklů,
- pro pevnost v příčném tahu – průměr 150 mm, délka 150 mm
 - vývrty 10, 5, 9 tělesa 1, 2, 3 referenční,
 - vývrty 11, 3, 7 tělesa 4, 5, 6 50 cyklů,
 - vývrty 12, 1, 8 tělesa 7, 8, 9 100 cyklů.



Obr. 2.17: Vývrty v bloku.

2.5 Laboratorní měření zkušebních těles a jejich vyhodnocení

Měření mrazuvzdornosti probíhalo ve dvou sériích. V první sérii od konce září do konce října se pracovalo s tělesy z forem a ve druhé sérii od začátku listopadu do začátku prosince s tělesy z vývrtů.

Pro systém zmrazovacích cyklů byl zvolen postup podle ČSN 73 1322 [20], tedy cykly po čtyřech hodinách zmrazování a dvou hodinách rozmrazování. Jedna etapa 25 cyklů tedy trvala šest dní a šest hodin a mezilehlé kontroly těles byly prováděny po týdnu. Cyklování probíhalo v programovatelném mrazicím zařízení KD-20. V obou sériích byla tělesa vystavena celkem 100 cyklům.

Do mrazicího zařízení byla tělesa při nejvyšším počtu ukládána ve dvou výškových úrovních a v každé etapě byla zaznamenávána jejich poloha. Tělesa pak byla na základě předchozího plánu mezi etapami vyměňována, přemísťována a otáčena, aby jejich poloha v zařízení během zmrazování ovlivňovala všechny pokud možno stejnou měrou.

V každé sérii měření bylo použito několik sad po devíti tělesech, ze kterých byly tři referenční, tři určená pro destruktivní zkoušku po 50 cyklech a tři po 100 cyklech. Před zahájením zmrazování a mezi etapami 25 cyklů byla na všech tělesech (s výjimkou dvou sad válců pro zkoušku v příčném tahu) měřena doba průchodu ultrazvukového impulsu a vlastní frekvence.

U některých těles byla aplikována metoda akustické emise, a to jak v průběhu samotných zmrazovacích cyklů, tak při zkouškách statického modulu pružnosti nebo při lomových zkouškách. Vyhodnocení těchto měření probíhá mimo rámec této práce.

Norma [20] uvádí jako hlavní a v podstatě jediný parametr hodnocení součinitel mrazuvzdornosti, který se zjistí jako podíl pevností v tahu ohybem těles zmrazovaných a nezmrzovaných. Pro účely této práce je tento termín používán i pro výsledky ostatních zkoušek ve stejném smyslu – výsledek po určitém počtu cyklů děleno výsledkem před zmrazováním, s tím, že u destruktivních zkoušek jsou porovnávány průměrné výsledky trojic těles, zatímco u nedestruktivních je každé těleso porovnáváno samo se sebou a případně se průměrují až výsledné součinitele mrazuvzdornosti.

2.5.1 Tělesa z forem

Pro první sérii laboratorních měření byly zhotoveny tři skupiny po devíti trámčích z forem a jedna skupina devíti trámčů vyřezaných z větších těles. Všechny odpovídaly nominálním rozměrům $100 \times 100 \times 400$ mm.

Značení těles a jejich určení pro zkoušky bylo následující:

- Řez 1–9 pevnost v tahu ohybem (vyřezané hranoly),
- Ohyb 1–9 pevnost v tahu ohybem,
- Lom 1–9 lomová zkouška v tříbodovém ohybu,
- Ec 1–9 statický modul pružnosti v tlaku.

2.5.2 Tělesa z vývrtů

Ve druhé sérii měření se pracovalo se čtyřmi skupinami po devíti válcových tělesech různých rozměrů a s jednou skupinou devíti hranolů $100 \times 100 \times 400$ mm. Skupiny těles byly značeny následovně:

- Řez 1–9 hranoly vyřezané z velkých vývrtů – pevnost v tahu ohybem,
- Lom 1–9 válce 100×400 mm – lomová zkouška v tříbodovém ohybu,
- Ec 1–9 válce 100×200 mm – statický modul pružnosti v tlaku,
- PT-100 1–9 válce 100×150 mm – pevnost v příčném tahu,
- PT-150 1–9 válce 150×150 mm – pevnost v příčném tahu.

Nedestruktivní měření byla v tomto případě prováděna jen na tělesech skupin Řez, Lom a Ec.



Obr. 2.18: Tělesa pro první a druhou sérii měření.

2.5.3 UZ impulsová metoda

UZ metodou byla zjišťována doba průchodu impulsu tělesem v podélném směru ve třech výškových úrovních a hodnoty pak byly pro každé těleso zprůměrovány.

Norma ČSN 73 1322 [20] hovoří při hodnocení mrazuvzdornosti betonu pomocí NDT zkoušek o porovnání hodnot zjišťovaného parametru před a po zmrazovacích cyklech, přičemž jak specifikaci tohoto parametru, tak určení mezní míry poškození nechává na (neuvedených) příslušných předpisech pro danou zkoušku.

Norma ČSN 73 1371 [29] věnovaná UZ impulsové metodě však žádný konkrétní postup pro vyhodnocení odolnosti vůči mrazu nebo jinému narušení neudává, zmiňuje pouze porovnání rychlosti průchodu impulsu nebo z ní odvozené veličiny zjištěné před a po narušení vnitřní struktury.

Jedinou veličinou, kterou lze z průchodu UZ impulsu přímo odvodit, je dynamický modul pružnosti. Zároveň se pro sledování změn v důsledku zmrazovacích cyklů nabízí relativní dynamický modul, jak ho používá ČSN 73 1380 [21]. V této práci byly zvoleny čtyři postupy vyhodnocení:

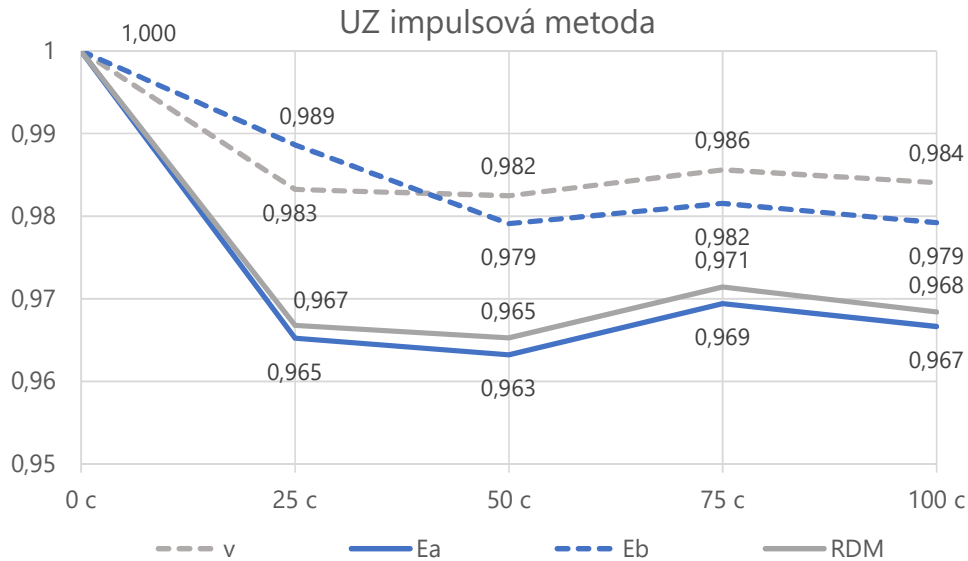
- porovnání rychlosti průchodu UZ impulsu,
- porovnání dynamického modulu pružnosti s použitím konstantní hodnoty ν_{cu} ,
- porovnání dynamického modulu pružnosti s použitím měnící se hodnoty ν_{cu} ,
- relativní dynamický modul (RDM).

Tyto čtyři parametry byly vyhodnoceny zvláště pro každou sadu těles a převedeny na relativní hodnoty, aby bylo možné porovnat jejich změny jak mezi sebou, tak s výsledky destruktivních zkoušek provedených na stejné sadě těles.

Porovnání rychlosti průchodu UZ před a po vystavení těles zmrazovacím cyklům je uvedeno spíše pro názornost. Jelikož ve vzorci pro dynamický modul pružnosti rychlost figuruje ve druhé mocnině, rozdíl v modulech bude výraznější než při porovnání samotných rychlostí.

Zásadnější význam bude mít porovnání RDM, který uvažuje pouze doby průchodu impulsu ve druhé mocnině, a vyhodnocení podle vypočtených hodnot dynamického modulu pružnosti, kde se započítává i objemová hmotnost tělesa a součinitel k , který závisí na Poissonovu číslu ν_{cu} . Oba tyto parametry se mohou vlivem zmrazování měnit a jedním z výstupů této práce bude posouzení, jak moc se jejich změny projeví na výsledcích a zda je vhodné je zanedbávat při použití RDM.

Při výpočtu součinitele rozměrnosti prostředí k norma [29] odkazuje na použití materiálových tabulek ke zjištění hodnoty ν_{cu} . Předpokládá se tedy, že tato hodnota bude stále stejná i v případě sledování změn dynamického modulu v průběhu času nebo například vlivem zmrazování. Při souběžném měření vlastních frekvencí rezonanční metodou lze však zjistit Poissonovo číslo konkrétně v jednotlivých etapách a jeho změny zahrnout do výpočtu dynamických modulů.



Obr. 2.19: Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu vypočteného dvěma způsoby a relativní dynamický modul podle UZ.

Graf na Obr. 2.19 zobrazuje příklad průběhu parametrů sledovaných UZ zkouškou (konkrétně na tělesech sady E_c ze série I). Největší pokles byl u všech sad těles zaznamenán v hodnotách dynamického modulu pružnosti s použitím konstantního ν_{cu} (značen E_a). Téměř stejný průběh s mírně menším poklesem mají hodnoty RDM.

Při výpočtu dynamického Poissonova čísla ν_{cu} pro každé těleso na základě rezonanční metody se ukázalo, že jeho hodnota mezi etapami mírně klesá (což je možná zapříčiněno zráním betonu, spíše než působením mrazu). S nižším ν_{cu} je nižší i hodnota součinitele k , který je ve vzorci pro výpočet dynamického modulu E ve jmenovateli. Výsledné moduly se započítáním změn ν_{cu} (značeny E_b) byly tedy vyšší než hodnoty E_a .

Výchylka průběhu E_b oproti ostatním výsledkům na první pohled působí výrazně, avšak všechny změny vlastností zjištěné ultrazvukem jsou velmi malé (do 5 %), takže v tomto měřítku se nejedná o velký rozdíl. Nelze posoudit, jaký vývoj by měly hodnoty Poissonova čísla při vyšší míře poškození betonu a jak významný vliv by měly při zahrnutí do výpočtu. V rozsahu malých poškození však může ν_{cu} ovlivňovat výslednou hodnotu E_{cu} více než samotná naměřená rychlost průchodu UZ.

Z porovnání výsledků je možné konstatovat, že vliv objemové hmotnosti na zjištěný pokles vlastností je při nízkém stupni narušení betonu nepatrný a vedl by k mírně přísnějšímu posouzení mrazuvzdornosti než použití relativního dynamického modulu. Při započítání změn ν_{cu} by naopak bylo posouzení méně přísné než v ostatních dvou případech. Tento postup je teoreticky nejpřesnější, což však nekorresponduje s průběhem výsledků natolik odlišným od ostatních postupů.

Ultrazvuková metoda má nesporné výhody, co se týče měření relativních – tedy porovnávání výsledků mezi sebou, avšak pokud jde o výpočet konkrétních hodnot, začíná se nepříznivě projevovat množství podmínek, které mohou výsledky ovlivňovat. Například právě Poissonovo číslo, které výraznou měrou vstupuje do výpočtu a i jeho drobná změna upozaduje vliv rychlosti průchodu UZ, ale i okolnosti samotného měření. Například už volba použité frekvence může statisticky významně ovlivnit naměřené hodnoty rychlosti, jak bylo blíže rozebráno ve článku [48].

Lze tedy usoudit, že míru poškození betonu je možné sledovat na základě měnící se rychlosti průchodu UZ, pokud se ostatní vstupní parametry považují za konstantní. Pro účely porovnání s výsledky ostatních zkoušek byla tedy jako vypovídající zvolena hodnota RDM.

2.5.4 Rezonanční metoda

Rezonanční metodou s použitím impulsního vyvolání kmitání byly měřeny vlastní frekvence tělesa v podélném, příčném a krouživém kmitání.

Stejně jako u ultrazvukové metody norma ČSN 73 1322 [20] nespecifikuje postup pro posouzení mrazuvzdornosti při použití rezonanční metody a odkazuje se na příslušné normy a předpisy, které nejsou konkrétně uvedeny. Norma pro rezonanční metodu [35] nabízí výpočet dynamického modulu pružnosti v tlaku z podélné i z příčné vlastní frekvence a dynamického modulu ve smyku z krouživé vlastní frekvence. Za použití modulu v tlaku určeného z podélné frekvence a modulu ve smyku se dále dopočítá dynamické Poissonovo číslo.

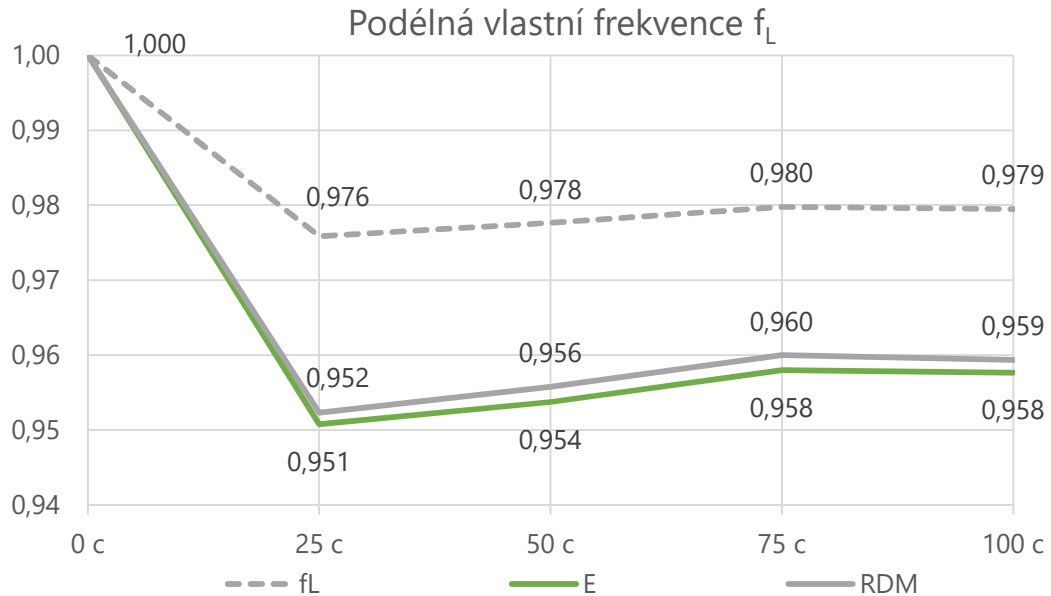
Hlavním údajem pro určení míry poškození mrazem podle ČSN 73 1380 [21] a americké C666/C666M-15 [22] je relativní dynamický modul počítaný jako poměr druhých mocnin příčné vlastní frekvence tělesa. Tento postup bude stejně jako u UZ metody porovnáván s použitím dynamického modulu včetně započítání objemové hmotnosti a Poissonova čísla.

Zatímco tyto dvě normy vyhodnocují mrazuvzdornost na základě modulu zjištěného z příčné vlastní frekvence, norma [35] zmiňuje, že u betonu má přednost modul vypočtený z podélné frekvence. Porovnání dynamických modulů a RDM bude tedy provedeno i pro podélnou frekvenci, přičemž lze očekávat jinou (menší) míru odlišnosti než u frekvence příčné, jelikož do výpočtu dynamického modulu zde kromě vlastní frekvence a rozměru tělesa vstupuje pouze objemová hmotnost a nikoliv Poissonovo číslo.

Pro představu bude uvedeno i porovnání samotných vlastních frekvencí. Pro podélný a příčný směr kmitání tedy budou vyhodnoceny tyto parametry:

- porovnání vlastní frekvence,
- porovnání dynamického modulu pružnosti,
- relativní dynamický modul.

Naměřené kroutivé vlastní frekvence budou využity k výpočtu modulu pružnosti ve smyku a následně dynamického Poissonova čísla, který bude použit ve výpočtu dynamického modulu pružnosti z příčné frekvence a také dynamického modulu z výsledků UZ impulsové metody.



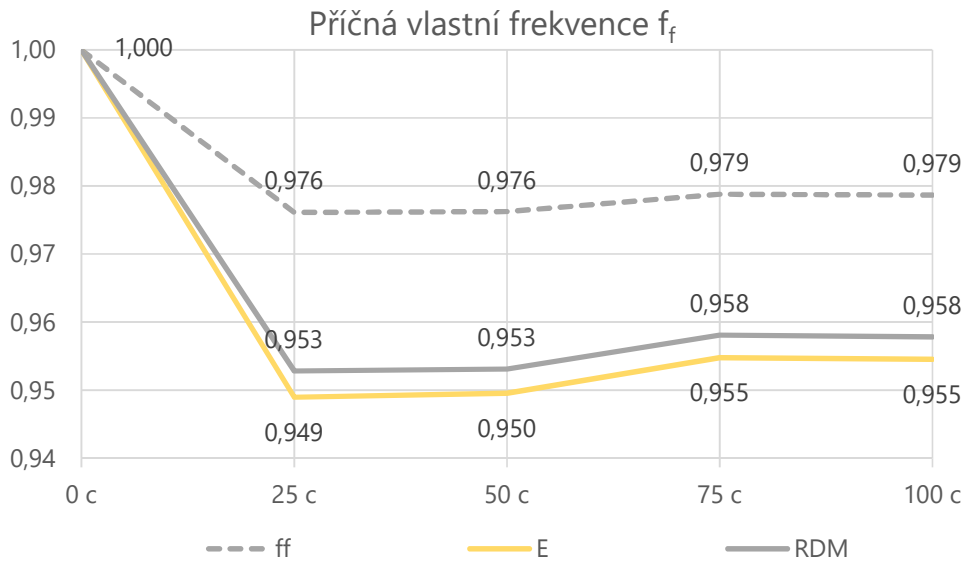
Obr. 2.20: Relativní změny vlastní frekvence, dynamického modulu pružnosti a RDM (podélná frekvence).

Pro každou sadu těles byly vyhodnoceny parametry vycházející z podélné a příčné frekvence a převedeny na relativní hodnoty pro účely porovnání.

Jak je patrné z Obr. 2.20 a 2.21, největší pokles v průběhu zmrazovacích cyklů byl ve všech skupinách zjištěn u hodnot dynamického modulu pružnosti E . Relativní dynamický modul měl velmi podobný průběh s o něco málo menším poklesem. Dle předpokladů se u příčné frekvence RDM od E lišil víc z důvodu započítání Poissonova čísla ν_{cu} .

Do výpočtu E z příčné vlastní frekvence vstupuje vliv ν_{cu} prostřednictvím korekčního součinitele c_1 , který má především vyjadřovat vliv geometrie zkoušeného tělesa. Tabulka 2 v ČSN 73 1372 [35] uvádí hodnoty c_1 podle poměru poloměru setrvačnosti průřezu k délce tělesa pro různé hodnoty ν_{cu} . Nabízí se tedy použití součinitele c_1 odpovídajícího dynamické hodnotě ν_{cu} zjištěné na tělese v dané etapě zkoušky (ačkoliv tento postup není v normě [35] nijak zmíněn).

Zde se hodí zmínit, že nižšímu ν_{cu} v tabulce odpovídají nižší hodnoty c_1 , kterým se ve vzorci pro výpočet E násobí. Narozdíl od dynamického modulu počítaného z rychlosti UZ tedy výsledná hodnota s nižším ν_{cu} klesá.



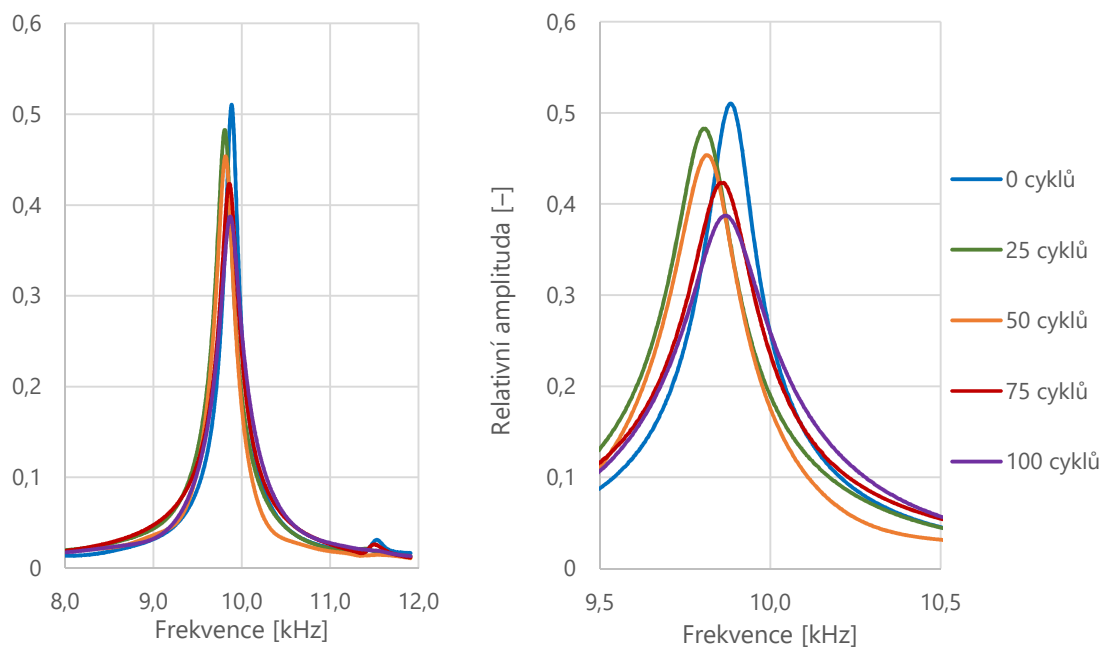
Obr. 2.21: Relativní změny vlastní frekvence, dynamického modulu pružnosti a RDM pro (příčná frekvence).

Dynamický modul E vypočtený z příčné vlastní frekvence tedy vykazuje větší pokles vlivem zmrazování než E z frekvence podélné. Zároveň stojí za úvahu, jestli RDM počítaný podle [21] i [22] právě z příčné frekvence je dostatečně přesný, když vliv měnícího se ν_{cu} zanedbává a zjištěný stupeň narušení betonu je pak nižší.

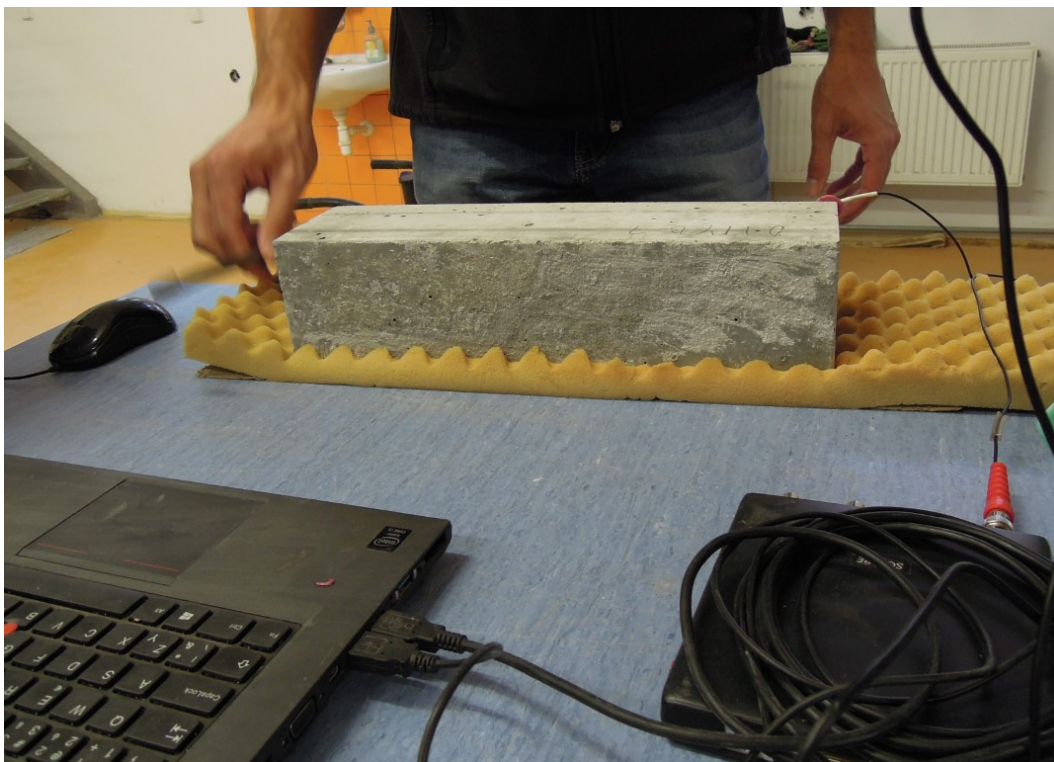
Vzhledem k poznámce v normě [35] o tom, že pro beton má větší vypovídací hodnotu modul zjištěný z podélné frekvence, byly pro další porovnání s ostatními zkouškami zvoleny hodnoty RDM vypočtené právě z podélné frekvence.

Na Obr. 2.22 jsou znázorněny podélné vlastní frekvence tělesa E_c 9 ze druhé série, naměřené po 0, 25, 50, 75 a 100 cyklech. V širším měřítku se frekvence zdánlivě téměř nemění, jelikož zjištěné rozdíly byly velmi malé (do 5 %). Při větším přiblížení je vidět, jak byla frekvence naměřená po 25 cyklech nižší a v dalším průběhu experimentu se hodnoty zase mírně zvyšovaly.

Výška amplitudy při měření impulsním způsobem záleží na síle úderu, ale na výslednou frekvenci nemá žádný vliv. Při tomto zobrazení tedy křivky původně sahaly do různých výšek podle reálných amplitud, s jakými byly frekvence naměřeny. Pro lepší přehlednost proto byla každá křivka vynásobena vhodně zvolenou konstantou, která upravila její průběh ve svislé ose, což však nemělo žádný vliv na pozici vrcholu na vodorovné ose, která nás pro zjištění vlastní frekvence zajímá.



Obr. 2.22: Graf podélných vlastních frekvencí tělesa Ec 9 ze série II a jejich změn v průběhu cyklů.

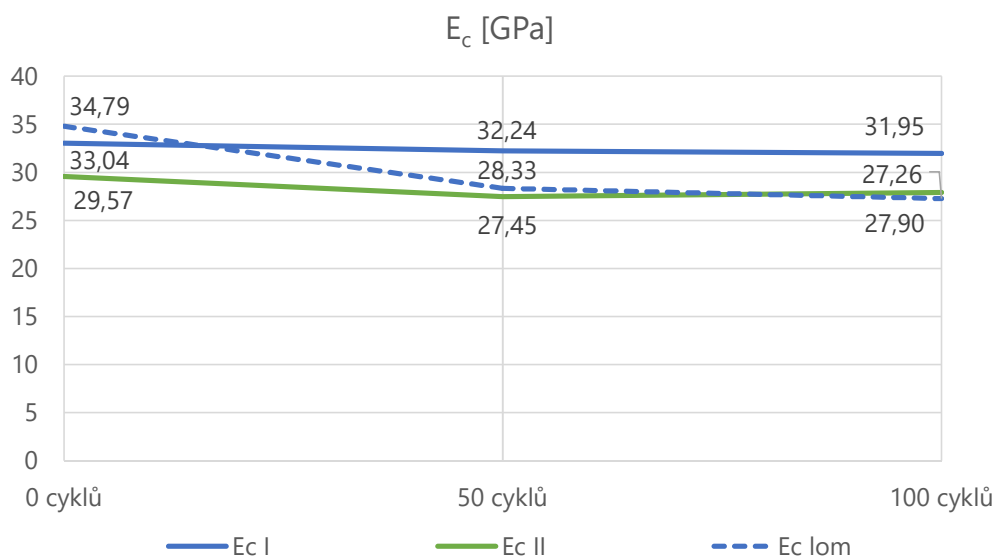


Obr. 2.23: Měření podélné vlastní frekvence rezonanční metodou.

2.5.5 Statický modul pružnosti

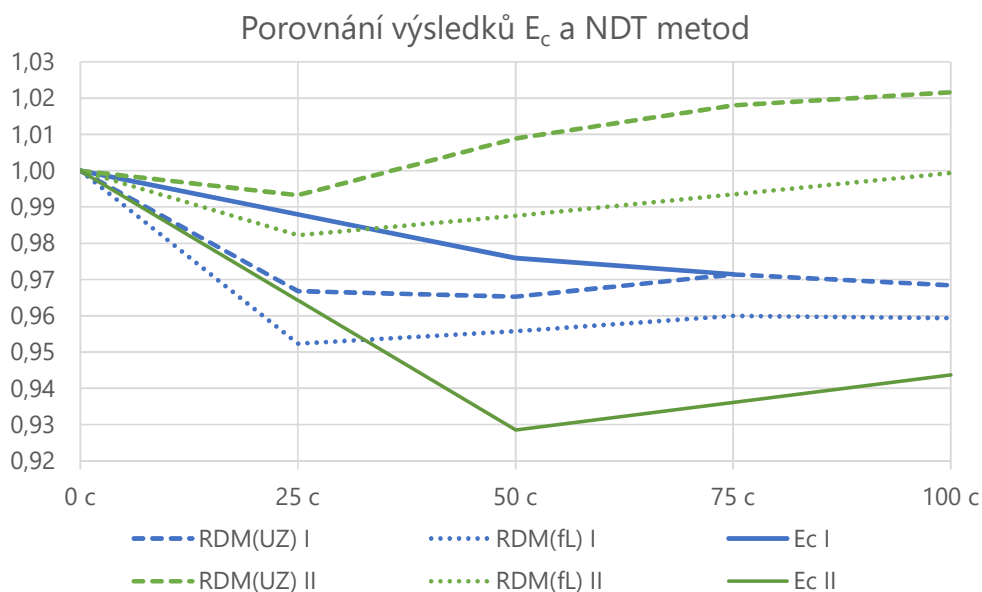
Statický modul pružnosti betonu v tlaku byl stanoven zkouškou podle ČSN ISO 1920-10 [37] na devíti hranolech vyráběných ve formách a devíti válcích odebraných z betonového bloku. Výsledky těchto zkoušek byly porovnány s parametry naměřenými NDT metodami na stejných tělesech a také s moduly pružnosti zjištěnými při lomových zkouškách těles z forem. Hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 2.11 a 2.12.

Z Obr. 2.24 jsou patrné rozdíly mezi zkoušenými skupinami těles. Hodnoty modulů těles z forem vykazují nižší pokles a zároveň jsou celkově o několik GPa vyšší než u vývrtů. Moduly pružnosti zjištěné při lomových zkouškách, které budou blíže popsány v pozdější kapitole, zaznamenaly větší pokles, než moduly zjištěné klasicky podle [37] na tělesech ze stejné série.



Obr. 2.24: Statický modul pružnosti v tlaku zjištěný klasicky na tělesech z forem ($E_c I$) a z vývrtů ($E_c II$), a modul pružnosti z lomových zkoušek ($E_c lom$).

Pro názornost je ještě na Obr. 2.25 uvedeno porovnání výsledků statického modulu pružnosti s výsledky ultrazvukové a rezonanční metody získanými na stejných sadách těles v první a druhé sérii měření. Můžeme zde vidět, že u těles z forem (série I, v grafu značeno modře) jsou relativní hodnoty poklesů u všech parametrů vzájemně velmi podobné, zatímco u těles z vývrtů (série II, značeno zeleně) se výsledky modulu pružnosti s relativními moduly poměrně rozcházejí. Zároveň je patrný větší pokles vlastností po první etapě zmrazování a v případě nedestruktivně získaných výsledků potom mírné opětovné zlepšení způsobené nejspíše zráním betonu.



Obr. 2.25: Porovnání výsledků E_c s NDT metodami provedenými na stejných sadách těles.

Tab. 2.11: Statický modul pružnosti v tlaku zjištěný na tělesech z forem.

	Hranol	E_c [GPa]	σE_c [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Ec_1	32,60	33,0	0,66	2,0	-
	Ec_2	33,89				
	Ec_3	33,04				
50 cyklů	Ec_4	32,24	32,2	0,22	0,7	0,976
	Ec_5	32,47				
	Ec_6	32,02				
100 cyklů	Ec_7	31,97	31,9	0,21	0,7	0,967
	Ec_8	32,15				
	Ec_9	31,72				

Tab. 2.12: Statický modul pružnosti v tlaku zjištěný na tělesech z vývrtů.

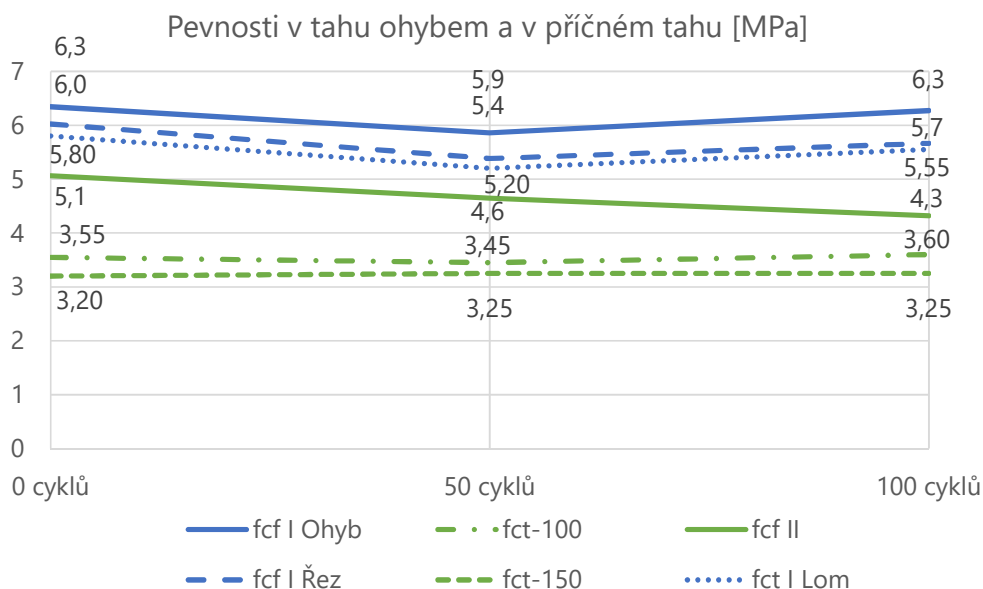
	Válec	E_c [GPa]	σE_c [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Ec_1	26,81	29,6	1,54	5,2	-
	Ec_2	29,41				
	Ec_3	29,57				
50 cyklů	Ec_4	27,09	27,5	0,76	2,8	0,929
	Ec_5	28,33				
	Ec_6	26,94				
100 cyklů	Ec_7	26,48	27,9	1,27	4,5	0,944
	Ec_8	28,90				
	Ec_9	28,33				

2.5.6 Pevnosti v tahu ohybem a v příčném tahu

Při první sérii měření byla na dvou sadách těles zjišťována pevnost v tahu ohybem, přičemž šlo o sadu trámců z forem (Ohyb 1–9) a sadu trámců vyřezaných z větších hranolů (Řez 1–9). Na tělesech Lom 1–9 byla zkoušena pevnost v příčném tahu, a to na koncích trámců po provedení lomových zkoušek. Ve druhé sérii byla pevnost v tahu ohybem zkoušena na sadě trámců vyřezaných z velkých vývrtů (Řez 1–9), a na dvou sadách válců s průměry 100 mm a 150 mm byly provedeny zkoušky pevnosti v příčném tahu (PT-100 1–9 a PT-150 1–9).

Na Obr. 2.26 je znázorněn vývoj výsledků v průběhu zmrazovacích cyklů. U těles ze série I je patrné snížení pevnosti po 50 cyklech a její opětovný nárůst po 100 cyklech způsobený nejspíše zráním betonu. Pevnosti těles vyřezaných z větších hranolů jsou také celkově nižší než u těles přímo z forem. Tento jev se projevil napříč všemi provedenými zkouškami a lze ho přičíst mimo jiné tomu, že při řezání mohla být vnitřní struktura betonu mírně narušena a tělesa pak z toho důvodu vykazují horší vlastnosti. Totéž v o něco větším měřítku platí pro tělesa z vývrtů použitých v sérii II, u kterých byly zjištěné vlastnosti plošně horší než u těles z forem, a to jak při zkouškách destruktivních, tak při nedestruktivních.

Pevnosti v příčném tahu zjištěné na tělesech z vývrtů nevykazují pokles, naopak mírně stoupají. Změny hodnot jsou však nepatrné, takže není vyloučeno, že spadají do rámce chyby měření. Výraznější je oproti tomu vliv velikosti zkoušených těles – pevnosti naměřené na válcích o průměru 150 mm jsou přibližně o 10 % nižší než u průměru 100 mm. Podrobnější číselné výsledky jsou uvedeny v přílohách.



Obr. 2.26: Pevnosti v tahu ohybem (f_{cf}) a v příčném tahu (f_{ct}).

2.5.7 Výsledky lomových zkoušek

Lomové zkoušky byly provedeny na devíti hranolech v rámci první série:

- Lom 1, Lom 2, Lom 3 - referenční tělesa,
- Lom 4, Lom 5, Lom 6 - 50 zmrazovacích cyklů,
- Lom 7, Lom 8, Lom 9 - 100 zmrazovacích cyklů.

Lomové zkoušky proběhly i na tělesech ze druhé série, ale jejich vyhodnocení již není předmětem této práce.

V krátkém časovém úseku na začátku zatěžování jsou často zaznamenány drobné odchylky v měřených hodnotách v důsledku dosedání tělesa na podpory. Po ustálení jsou již změny deformací lineární. Je tedy vhodné před vyhodnocením data upravit následujícím způsobem:

- nalezení části grafu, kde je závislost lineární,
- proložení této části přímkou,
- vyznačení bodu, kde směrnice protíná vodorovnou osu,
- posunutí celého grafu tak, aby tento průsečík byl jeho počátek [45].

Po těchto úpravách byl ze získaného grafu závislosti průhybu na zatížení pomocí akademického softwaru StiCrack [49] vyhodnocen modul pružnosti E_c a pro doplnění také efektivní lomová houževnatost K_{Icc} a lomová energie G_F .

Hodnoty modulu pružnosti E_c byly zprůměrovány pro každá tři tělesa (referenční, 50 a 100 cyklů) a průměrné hodnoty těles po 50 a po 100 cyklech byly porovnány s průměrnou hodnotou referenčních těles. Výsledky jsou v tabulce 2.13.

Vzhledem k poměrně velkému rozptylu hodnot lze zprůměrované výsledky považovat pouze za orientační. Z Obr. 2.24 je patrné, že modul pružnosti získaný z lomových zkoušek vykazuje při vyšším počtu zmrazovacích cyklů větší pokles, než byl zjištěn na jiných tělesech z první série klasickým měřením E_c při namáhání tlakem. To může být způsobeno tím, že při namáhání ohybem se výrazněji projeví vliv mikrotrhlin způsobených mrazem.

Zároveň byl pokles E_c větší i ve srovnání s poklesem hodnot získaných nedestruktivními zkouškami na stejných tělesech. Pro statický modul pružnosti z lomových zkoušek je součinitel mrazuvzdornosti 81,4 % pro 50 zmrazovacích cyklů a 78,4 % pro 100 cyklů, zatímco u dynamických modulů pružnosti se pohybuje kolem 96 % pro hodnoty odvozené z rychlosti průchodu ultrazvuku a 95 % pro rezonanční metodu (50 i 100 cyklů).

Tab. 2.13: Statický modul pružnosti zjištěný lomovou zkouškou.

	Hranol	E_c [GPa]	σE_c [GPa]	σ [GPa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Lom-1	36,06	34,8	1,13	3,3	-
	Lom-2	33,88				
	Lom-3	34,43				
50 cyklů	Lom-4	27,98	28,3	0,30	1,1	0,814
	Lom-5	28,48				
	Lom-6	28,53				
100 cyklů	Lom-7	24,82	27,3	2,97	10,9	0,784
	Lom-8	30,56				
	Lom-9	26,40				

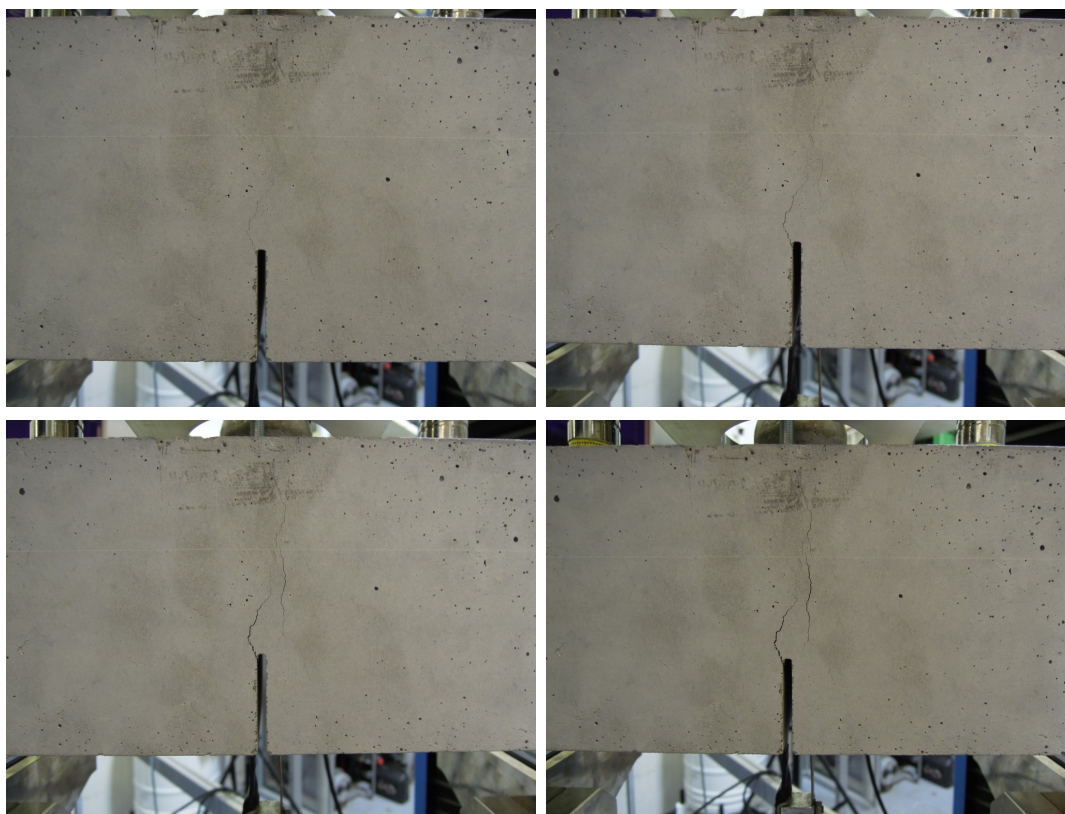
Hodnoty efektivní lomové houževnatosti $K_{I_{ce}}$ a lomové energie G_F (uvedeny v tabulkách 2.14 a 2.15) mají napříč tělesy velký rozptyl a s počtem zmrazovacích cyklů stoupají. Zvyšování hodnot může být způsobeno tím, že při vytvoření sítě mikrothlin v důsledku zmrazování se pak hlavní trhlinka, kterou se těleso poruší, nešíří nejkratší možnou cestou, ale více se větví. Pro porušení tělesa je pak potřeba vynaložit více energie.

Tab. 2.14: Efektivní lomová houževnatost.

	Hranol	$K_{I_{ce}}$ [MPa·m ^{1/2}]	$\sigma K_{I_{ce}}$ [MPa·m ^{1/2}]	σ [MPa·m ^{1/2}]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Lom-1	1,171	1,250	0,155	12,4	-
	Lom-2	1,429				
	Lom-3	1,150				
50 cyklů	Lom-4	1,409	1,479	0,107	7,3	1,183
	Lom-5	1,426				
	Lom-6	1,603				
100 cyklů	Lom-7	1,615	1,337	0,265	19,8	1,070
	Lom-8	1,309				
	Lom-9	1,087				

Tab. 2.15: Lomová energie.

	Hranol	G_F [J/m ²]	σG_F [J/m ²]	σ [J/m ²]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Lom-1	124,2	130,0	11,76	9,1	-
	Lom-2	143,5				
	Lom-3	122,2				
50 cyklů	Lom-4	156,7	163,6	17,93	11,0	1,259
	Lom-5	150,2				
	Lom-6	184,0				
100 cyklů	Lom-7	189,3	145,4	38,27	26,3	1,118
	Lom-8	119,3				
	Lom-9	127,5				



Obr. 2.27: Vývoj trhliny v průběhu lomové zkoušky.

2.5.8 Shrnutí výsledků

Tab. 2.16: Relativní změny hodnot zjištěné na všech sadách těles v jednotlivých etapách měření.

	Sada	Parametr	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů
I. Série	Řez	RDM _{UZ}	0,983	0,981	0,983	0,986
		RDM _{fL}	0,961	0,963	0,964	0,967
		f _{cf}		0,894		0,941
	Ohyb	RDM _{UZ}	0,962	0,960	0,964	0,964
		RDM _{fL}	0,955	0,955	0,956	0,959
		f _{cf}		0,924		0,988
	Ec	RDM _{UZ}	0,967	0,965	0,971	0,968
		RDM _{fL}	0,952	0,956	0,960	0,959
		E _c		0,976		0,967
	Lom	RDM _{UZ}	0,965	0,965	0,965	0,965
		RDM _{fL}	0,955	0,956	0,957	0,959
		E _c		0,814		0,784
f _{ct}			0,897		0,957	
II. Série	Řez	RDM _{UZ}	0,995	1,003	1,003	1,018
		RDM _{fL}	0,981	0,971	0,978	0,984
		f _{cf}		0,917		0,853
	Ec	RDM _{UZ}	0,993	1,009	1,018	1,022
		RDM _{fL}	0,982	0,988	0,993	0,999
		E _c		0,929		0,944
	Lom	RDM _{UZ}	0,987	0,992	0,999	1,002
		RDM _{fL}	0,973	0,977	0,981	0,986
	PT 100	f _{ct}		0,972		1,014
	PT 150	f _{ct}		1,016		1,016

Tabulka 2.16 uvádí hodnoty součinitele mrazuvzdornosti zjištěné na jednotlivých sadách těles. Téměř žádná ze sledovaných veličin nezaznamenala výrazné zhoršení. Pokles hodnot zjištěných na tělesech po zmrazovacích cyklech oproti tělesům referenčním se jen výjimečně dostal přes 10 %, nejčastěji se jeho velikost pohybovala do 5 %.

Prostřednictvím nedestruktivních měření, která byla prováděna po každých 25 cyklech, bylo možné sledovat podrobnější průběh vývoje vlastností betonu. V podstatě u všech sad těles byl zaznamenán největší pokles po prvních 25 cyklech a

v dalším průběhu zmrazování následoval mírný opětovný nárůst hodnot sledovaných parametrů. Důvodem naprosto minimální degradace a tohoto vývoje vlastností je pravděpodobně provzdušnění betonu – při prvním zmrazování vzniklo malé množství mikrotrhlin spojujících kapilární póry a provzdušňovací bubliny. Po otevření těchto cest má voda možnost se rozpínat ve větších pórech a k dalšímu poškození již nedochází. Vlivem zrání betonu v průběhu času pak vlastnosti vykazují velmi mírné zlepšení.

Při vyhodnocení nedestruktivních zkoušek byly zohledněny různé postupy, o kterých se (ať už více či méně konkrétně) vyjadřují platné normy. U ultrazvukové i rezonanční metody vyplynulo, že spíše než z porovnávání samotných naměřených parametrů (rychlost průchodu UZ, vlastní frekvence) je možné získat lepší představu o změně vlastností materiálu použitím druhých mocnin těchto hodnot, ze kterých v obou případech vychází výpočet dynamického modulu pružnosti.

Do tohoto výpočtu pak vstupuje ještě objemová hmotnost materiálu a především součinitele zohledňující tvar a rozměry tělesa, které se zároveň odvíjí i od hodnoty Poissonova čísla. Použití celých hodnot dynamických modulů pružnosti může být tím pádem problematické, protože Poissonovo číslo se může vlivem zmrazování měnit a vnáší tak další proměnný faktor do vyhodnocení výsledků. Hlavně v případě ultrazvukové metody má ve výpočtu poměrně silnou váhu a i při malých změnách jsou výsledky po jejich započítání značně nekonzistentní. Oproti tomu změny objemové hmotnosti v malém rozsahu měly na průběh změny modulu pružnosti vliv pouze zanedbatelný.

Pro UZ impulsovou i rezonanční metodu se tedy jako nejvýhodnější projevilo použití relativního dynamického modulu, který uvažuje pouze s kvadráty rychlosti průchodu impulsu nebo vlastní frekvence.

Trend počátečního poklesu a následného růstu vlastností se projevilo i ve většině výsledků destruktivních zkoušek, ačkoliv byla polovina počtu zmrazovaných těles zkoušena po 50 a zbytek po 100 cyklech, takže ho nebylo možné sledovat detailně. Vlastnosti zjištěné na tělesech vystavených 100 cyklům zmrazování byly však často vyšší než u těles po 50 cyklech.

Největší pokles hodnot nastal u statického modulu pružnosti určeného lomovými zkouškami. Statický modul pružnosti měřený klasicky zaznamenal v případě těles z vývrtů také nadprůměrný pokles, stejně jako pevnost v tahu ohybem. U těles z forem měly pevnosti v tahu ohybem a statický modul srovnatelnou míru poklesu. Změny pevnosti v příčném tahu naměřené na koncích trámů po lomových zkouškách těles z forem měly podobný průběh jako charakteristiky ostatních těles, zatímco na vývrtech nevykázaly pevnosti v příčném tahu změny téměř žádné.

Ve srovnání s parametry naměřenými nedestruktivně vykazovaly pevnosti a moduly pružnosti u většiny sad těles větší pokles. Celkově však byly z důvodu pro-

vzdušnění betonu všechny změny vlastností velmi malé, takže i míra odlišnosti mezi NDT a destruktivními zkouškami je nízká (v jednotkách procentních bodů). Otázkou je, jakou vypovídající hodnotu má porovnávání použitých metod v kontextu tak malé míry poškození. V rámci probíhajícího projektu je v plánu výroba a zkoušení betonu stejného složení, ale bez provzdušnění. Na tom by se nejspíše názorněji projevila účinnost a použitelnost srovnávaných postupů, avšak toto řešení je již bohužel mimo rozsah této diplomové práce.

Tělesa vyrobená ve formách a odebraná z konstrukce vykazovala ve výsledcích jisté odlišnosti, a to především v absolutních hodnotách naměřených veličin, které byly u vývrtů přibližně o 15 % nižší než u těles z forem pravděpodobně z důvodu mírného narušení struktury betonu při odebírání vývrtů. U nedestruktivních metod a především u ultrazvuku se pak projevila nižší citlivost na pozdější pokles vlastností v důsledku zmrazování.

Norma ČSN EN 13791 [50] zmiňuje, že pevnost v tlaku naměřená na tělesech odebraných z konstrukce nabývá přibližně 85 % hodnoty charakteristické pevnosti daného betonu. Na základě provedených experimentů lze říct, že tento rozdíl se projevuje i u dalších druhů pevnosti betonu, u statického modulu pružnosti, i u nedestruktivně naměřených parametrů. Tento rozdíl je vhodné brát v úvahu při posuzování mrazuvzdornosti betonu v konstrukci na základě zkoušení vývrtů.

Výsledky zjištěné na referenčních tělesech první série měření 100 dní po betonáži byly porovnány s výsledky zkoušek provedených ve 28 dnech stáří betonu. Hodnoty pevností, statického i dynamického modulu pružnosti se zvýšily o 3–5 % v důsledku zrání betonu.

V neposlední řadě je potřeba zmínit výsledky zkoušek odolnosti proti CHRL a jejich vztah k mrazuvzdornosti betonu. Hodnoty odpadu betonu po 100 zmrazovacích cyklech byly značné – téměř $5000 \frac{g}{m^2}$ při metodě A i C, povrch betonu byl silně poškozený. To je v porovnání s velmi nízkým stupněm poškození vnitřní struktury názornou ukázkou toho, že dobrá odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování nemusí zároveň znamenat odolnost proti kombinaci mrazu a chemických rozmrazovacích látek.

Závěr

Hlavní náplní práce byl rozbor různých postupů pro určení míry degradace betonu vlivem mrazu, jejich aplikace na tělesech z provzdušněného betonu vyráběných ve formách i odebraných z konstrukce a následné porovnání výsledků a jejich interpretace.

Teoretický úvod se zabývá problematikou vlastností betonu, a to především co se týče jeho trvanlivosti a možných způsobů degradace, které mohou v průběhu životnosti konstrukce nastat. Pozornost je zde věnována hlavně účinkům opakovaného mrznutí a rozmrazání a z toho vyplývajícím zhoršování vlastností ať už hlediska narušení povrchu při současném působení chemických látek, nebo poškození vnitřní struktury betonu. Součástí je také popis základního principu fungování provzdušněného betonu.

Důležitým bodem je pak shrnutí postupů, které k určení mrazuvzdornosti betonu předepisují platné normy. Následuje podrobnější popis zkoušek podle příslušných norem, které jsou následně použity v experimentální části práce.

V experimentální části pak byly vyhodnoceny různé postupy pro zjištění mrazuvzdornosti betonu. Jelikož se jednalo o beton provzdušněný, naměřené hodnoty před zmrazovacími cykly a po nich zaznamenaly jen malý pokles. V tomto omezeném rozsahu byly výsledky všech použitých metod srovnatelné. Nelze však posoudit, do jaké míry jsou takové výsledky vypovídající. Pro lepší zhodnocení citlivosti jednotlivých postupů a jejich porovnání by nejspíš byla vhodnější jejich aplikace na betonu s nižší mírou mrazuvzdornosti (tedy neprovzdušněném).

Výrazně se i v malém rozsahu poškození betonu projevil vliv Poissonova čísla na hodnotu dynamického modulu pružnosti počítaného na základě rychlosti průchodu ultrazvukového impulsu tělesem. Pokud by se při výpočtu uvažovalo se změnami Poissonova čísla, které v průběhu zmrazování nastávají, i jeho velmi mírné odlišnosti by způsobovaly výrazné výkyvy výsledných hodnot modulu. To vede k závěru, že UZ impulsová metoda je vhodná ke sledování změn vlastností betonu prostřednictvím rychlosti průchodu impulsu, ale určovat na jejím základě konkrétní hodnoty dynamického modulu, na kterých se výrazně projevuje vliv Poissonova čísla (a nižší měrou i objemová hmotnost) není ideální.

Dalším výraznějším výstupem provedených zkoušek je také srovnání zjištěné odolnosti proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám s mrazuvzdorností. Při zkouškách CHRL byly zjištěny vysoké hodnoty odpadu a značné poškození povrchu vzorků. Z toho jasně vyplývá, že vysoká odolnost betonu proti poškození vnitřní struktury mrazem nijak nesouvisí s odolností proti chemické degradaci povrchu, na což někdy nebývá brán dostatečný zřetel.

Literatura

- [1] COLLEPARDI, M.: *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, první vydání, 2009, ISBN 978-80-87093-75-7, 344 s.
- [2] PYTLÍK, P.: *Technologie betonu*. Brno: VUT, první vydání, 1997, ISBN 8021407794, 346 s.
- [3] NEVILLE, A. M.: *Properties of Concrete*. Harlow: Pearson Education Limited, páté vydání, 2011, ISBN 978-0-273-75580-7, 872 s.
- [4] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [5] ČSN EN 12350-3. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [6] ČSN EN 12350-4. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [7] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [8] ČSN EN 12350-8. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [9] ČSN EN 12350-9. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] ČSN EN 12350-10. *Zkouška čerstvého betonu – Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlíkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [11] ČSN EN 12350-12. *Zkouška čerstvého betonu – Část 12: Samozhutnitelný beton - Zkouška J-kroužkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [12] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [13] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [14] ČSN EN 206+A1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [15] COUFAL, R.: Odolnost betonu v prostředí s mrazovými cykly. *Materiály pro stavbu*. 2013, 4, 32–37. ISSN 1213-0311.
- [16] HUBERTOVIÁ, M.: Trvanlivost lehkého konstrukčního betonu. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2013, 6, 18–21 [cit. 10.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-6-18_0.pdf
- [17] TEPLÝ, B. a ROVNANÍK, P.: Účinky mrazu na beton. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2007, 4, 42–45 [cit. 10.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2007-4-42_0.pdf
- [18] KOCÁB, D., MISÁK, P., VYMAZAL, T., KOMÁRKOVÁ, T., HALAMOVÁ, R.: Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek - metody, praxe, problémy. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2017, 2, 42–47 [cit. 10.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-42_0.pdf
- [19] VYMAZAL, T., ŽALUD, O., MISÁK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B., JANOUŠEK, P.: Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovené NDT metodami. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2011, 4, 73–75 [cit. 31.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-4-73_0.pdf
- [20] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1968.
- [21] ČSN 73 1380. *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [22] ASTM C666/C666M-15. *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [23] CIKRLE, P., POSPÍCHAL, O.: Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2011, 3, 56–61 [cit. 30.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-3-56_0.pdf

- [24] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1984.
- [25] ČSN P CEN/TS 12390-9. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - Odlupování*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [26] DOHNÁLEK, J., HELA, R., TŮMA, P., KOLÍSKO, J., HROMÁDKO, J.: Zkoušení mrazuvzdornosti betonu. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2008, 3, 54–60 [cit. 2.1.2020]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2008-3-54_0.pdf
- [27] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [30] CIKRLE, P., KOCÁB, D., POSPÍCHAL, O.: Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2013, 3, 74–79 [cit. 20.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-3-74_0.pdf
- [31] HOBST, L., ADÁMEK, J., CIKRLE, P., SCHMID, P.: *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky*. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2005.
- [32] BROŽOVSKÝ, J.: K problematice určování pevnosti betonu v konstrukci z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu podle ČSN EN 13791. *Beton – technologie, konstrukce, sanace* [online]. 2012, 1, 80–83 [cit. 21.12.2019]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-1-80.pdf>
- [33] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [34] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.

- [35] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [36] SCHMID, P.: *Zkušebnictví a technologie MODUL BI02 -- M02 Stavební zkušebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004.
- [37] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [38] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [39] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [40] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [41] ČSN EN 12504-1. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [42] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [43] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [44] ROVNANÍK, P., ŠIMONOVÁ, H., TOPOLÁŘ, L., BAYER, P., SCHMID, P., KERŠNER, Z.: Carbon nanotube reinforced alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*. 2016, 119, 223–229. ISSN 0950-0618.
- [45] ŠIMONOVÁ, H., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z., SCHMID, P., ROVNANÍK, P.: Components of the Fracture Response of Alkali-Activated Slag Composites with Steel Microfibers. *Applied Sciences - Basel* [online]. 2019, 9, 1–14 [cit. 17.12.2019]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/173199>

- [46] KARIHALOO, B. L.: *Fracture Mechanics and Structural Concrete*. Harlow: Longman Scientific & Technical, první vydání, 1995, ISBN 978-0582215825, 330 s.
- [47] RILEM TC: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*. 1985, 18, 287-290. ISSN 1359-5997.
- [48] KOCÁB, D., MISÁK, P., JINDROVÁ, B., ALEXA, M., VYMAZAL, T.: Analýza vlivu frekvence použitých sond při ultrazvukovém měření rovnoměrnosti betonu. 15. *KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY, sborník příspěvků*. Skalský dvůr: SEKURKON s.r.o, 2018, 16-21. ISBN 978-80-86604-78-7.
- [49] STIBOR, M.: *Lomové parametry betonu a jejich určování*. Brno, 2004. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [50] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

Seznam obrázků

1.1	Schéma zkoušky sednutím kužele	13
1.2	Vzorek betonu vystavený napětí v tlaku (σ_c), v tahu (σ_t), v tahu ohybem (σ_f) a v příčném tahu (σ_{ct})	14
1.3	Povrch betonu porušený mrazem a rozmrazovacími prostředky	17
1.4	Závislost teploty tvorby ledu na velikosti pórů	18
1.5	Ukázka grafu pro vyhodnocení zkoušky odolnosti proti CHRL metodou automatického cyklování II	26
1.6	Způsoby prozvučení konstrukce	28
1.7	Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem (čtyřbodový ohyb)	35
1.8	Zkušební zařízení a osazení vzorku pro lomovou zkoušku	37
1.9	Tělesa opatřená břity a lomové plochy těles	38
2.1	Zkouška obsahu vzduchu tlakovým hrcem	40
2.2	Zkouška rozlitím	41
2.3	Zkoušky objemové hmotnosti čerstvého betonu a sednutí kužele	41
2.4	Betonáž svislého bloku	42
2.5	Betonáž vodorovného bloku	42
2.6	Vykládka betonu na FAST a zkouška tlakovým hrcem	43
2.7	Výroba zkušebních trámců	44
2.8	Výroba těles na zkoušky CHRL	44
2.9	Hutnění betonu ve velkých formách	45
2.10	Zkouška v tlaku a v tahu ohybem ve stáří 28 dní	47
2.11	Vývoj množství odpadu při zkoušce odolnosti proti CHRL metodou C	49
2.12	Tělesa zkoušená na odolnost proti CHRL metodou A	49
2.13	Tělesa zkoušená na odolnost proti CHRL metodou C	49
2.14	Povrch tělesa poškozený CHRL při metodě A	50
2.15	Povrch tělesa poškozený CHRL při metodě C	50
2.16	Schéma rozmístění vývrtů na bloku a jejich označení	51
2.17	Vývrty v bloku	52
2.18	Tělesa pro první a druhou sérii měření	54
2.19	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	56
2.20	Relativní změny vlastní frekvence, dynamického modulu pružnosti a RDM (podélná frekvence)	58
2.21	Relativní změny vlastní frekvence, dynamického modulu pružnosti a RDM (příčná frekvence)	59
2.22	Graf podélných vlastních frekvencí a jejich změn v průběhu cyklů	60
2.23	Měření podélné vlastní frekvence rezonanční metodou	60

2.24	Statický modul pružnosti v tlaku	61
2.25	Porovnání výsledků E_c s NDT metodami na stejných sadách těles	62
2.26	Pevnosti v tahu ohybem a v příčném tahu	63
2.27	Vývoj trhliny v průběhu lomové zkoušky	66
A.1	Montáž bednění pro svislý blok	84
A.2	Montáž bednění pro vodorovný blok	85
A.3	Tenzometry osazené na výztuži vodorovného a svislého bloku	86
A.4	Odběr vzorku čerstvého betonu pro zkoušky	86
A.5	Betonáž bloků	87
A.6	Betonáž a hutnění vodorovného bloku	88
A.7	Ošetření bloků proti ztrátám vlhkosti	89
A.8	Odbednění vodorovného bloku	90
A.9	Odbednění svislého bloku	90
A.10	Plnění forem a výroba těles	91
A.11	Výroba velkých hranolů a zkušebních válců	91
A.12	Hutnění betonu na vibračním stole	92
A.13	Uložení těles a ošetření proti ztrátám vlhkosti	92
A.14	Odběr vývrtů ze svislého bloku	93
A.15	Odběr vývrtů	93
A.16	Dělení vývrtu na dvě zkušební tělesa	94
A.17	Úprava vývrtu na těleso tvaru hranolu	94
B.1	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	95
B.2	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	95
B.3	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	96
B.4	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	96
B.5	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	97
B.6	Relativní změny rychlosti průchodu UZ, dynamického modulu pružnosti a relativní dynamický modul podle UZ	97
B.7	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	98
B.8	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	98
B.9	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	99

B.10	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	99
B.11	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	100
B.12	Relativní změny vlastní podélné frekvence, dynamického modulu pružnosti a relativního dynamického modulu	100
B.13	Grafický výstup měření příčné vlastní frekvence	101
B.14	Grafický výstup měření kroutivé vlastní frekvence	101
B.15	Vybavení pro zkoušku statického modulu pružnosti	102
B.16	Těleso před a v průběhu zkoušky statického modulu pružnosti	102
B.17	F–d diagramy z lomových zkoušek pro referenční tělesa	105
B.18	F–d diagramy z lomových zkoušek pro tělesa po 50 cyklech	105
B.19	F–d diagramy z lomových zkoušek pro tělesa po 100 cyklech	106
B.20	F–d diagramy z lomových zkoušek pro všechna tělesa – detail	106

Seznam tabulek

2.1	Složení čerstvého betonu	39
2.2	Objemová hmotnost zjištěná na krychlích ve stáří 28 dní	46
2.3	Pevnost v tlaku zjištěná na krychlích ve stáří 28 dní	46
2.4	Objemová hmotnost zjištěná na hranolech ve stáří 28 dní	46
2.5	Pevnost v tahu ohybem ve stáří 28 dní	46
2.6	Dynamický modul pružnosti zjištěný ultrazvukovou metodou ve stáří 28 dní	47
2.7	Dynamický modul pružnosti zjištěný z podélné vlastní frekvence ve stáří 28 dní	47
2.8	Statický modul pružnosti ve stáří 28 dní	47
2.9	Odolnost proti působení vody a CHRL – metoda A	48
2.10	Odolnost proti působení vody a CHRL – metoda C	48
2.11	Statický modul pružnosti v tlaku – hranoly z forem	62
2.12	Statický modul pružnosti v tlaku – válce z vývrtů	62
2.13	Statický modul pružnosti zjištěný lomovou zkouškou	65
2.14	Efektivní lomová houževnatost	65
2.15	Lomová energie	66
2.16	Relativní změny hodnot v jednotlivých etapách měření	67
B.1	Pevnosti v tahu ohybem těles Řez 1–9 v první sérii měření	103
B.2	Pevnosti v tahu ohybem těles Ohyb 1–9 v první sérii měření	103
B.3	Pevnosti v tahu ohybem těles Řez 1–9 ve druhé sérii měření	103
B.4	Pevnosti v příčném tahu těles Lom 1–9 v první sérii měření	104
B.5	Pevnosti v příčném tahu těles PT-100 ve druhé sérii měření	104
B.6	Pevnosti v příčném tahu těles PT-150 ve druhé sérii měření	104

Seznam symbolů, veličin a zkratek

E_c	modul pružnosti betonu v tahu a tlaku [GPa]
σ_c	pevnost betonu v tlaku [MPa]
σ_t	pevnost betonu v tahu [MPa]
σ_f	pevnost betonu v tahu ohybem [MPa]
σ_{ct}	pevnost betonu v příčném tahu [MPa]
G	modul pružnosti betonu ve smyku [GPa]
ν_{cu}	Poissonovo číslo [–]
pH	<i>potential of hydrogen</i> – exponent vodíku [–]
CO_2	oxid uhličitý
$Ca(OH)_2$	hydroxid vápenatý
$NaCl$	chlorid sodný
$CaCl_2$	chlorid vápenatý
$MgCl_2$	chlorid hořečnatý
RDM_{FF}	relativní dynamický modul na základě vlastní příčné frekvence [%]
f_n	vlastní příčná frekvence tělesa vystaveného n zmrazovacím cyklům [kHz]
f_0	vlastní příčná frekvence tělesa před zmrazováním [kHz]
RDM_{UPTT}	relativní dynamický modul na základě doby průchodu ultrazvukového impulsu [%]
$t_{S,0}$	doba průchodu UZ impulsu tělesem před zmrazováním [s]
$t_{S,n}$	doba průchodu UZ impulsu tělesem vystaveným n zmrazovacím cyklům [s]
ρ_a	hmotnost odpadu na plochu [$\frac{g}{m^2}$]
v_L	rychlost průchodu ultrazvukového impulsu [$\frac{km}{s}$]
L	délka měřicí základny [mm]
T	čas, za který impuls projde měřicí základnou [μs]
T_L	čas od vyslání signálu budičem do jeho detekce na snímači [μs]
t_{kor}	korekce složená z mrtvého času přístroje a rozdílu času šíření impulsů zjištěného při kalibraci přístroje [μs]
t_e	doba průchodu ultrazvuku etalonem [μs]
E	časová charakteristika etalonu [μs]
E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]
ρ	objemová hmotnost betonu [$\frac{kg}{m^3}$]
k_n	součinitel rozměrnosti prostředí [–]
k_1	součinitel pro jednorozměrné prostředí [–]
k_2	součinitel pro dvojrozměrné prostředí [–]
k_3	součinitel pro trojrozměrné prostředí [–]

f_L	vlastní podélná frekvence tělesa [kHz]
f_f	vlastní příčná frekvence tělesa [kHz]
f_t	vlastní kroutivá frekvence tělesa [kHz]
$E_{cr,L}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu zjištěný z podélné vlastní frekvence [MPa]
$E_{cr,f}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu zjištěný z příčné vlastní frekvence [MPa]
c_1	korekční součinitel zohledňující vliv smyku a setrvačných momentů [–]
i	poloměr setrvačnosti příčného řezu k ose kolmé na rovinu kmitání [m]
G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa]
ν_{cr}	dynamická hodnota Poissonova čísla [–]
σ_a	horní zatěžovací napětí při zkoušce statického modulu pružnosti [MPa]
σ_b	základní zatěžovací napětí při zkoušce statického modulu pružnosti [MPa]
ϵ_a	průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [–]
ϵ_b	průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí [–]
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
F	maximální zatížení [N]
A_c	průřezová plocha tělesa zatěžovaná tlakem [mm^2]
f_{cf}	pevnost v tahu ohybem [MPa]
f_{ct}	pevnost v příčném tahu [MPa]
F_i	zatížení v lineárně pružné oblasti $F - d$ diagramu [kN]
d_i	průhyb v polovině rozpětí odpovídající hodnotě F_i [mm]
B	šířka tělesa [mm]
D	výška tělesa [mm]
S	vzdálenost podpor [mm]
q	vlastní tíha tělesa vztažená na jednotku délky [$\frac{kN}{m}$]
$Y(x)$	funkce geometrie pro tříbodový ohyb
a_0	počáteční hloubka zářezu [mm]
K_{Ice}	efektivní lomová houževnatost [$MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$]
a_e	efektivní délka trhliny [mm]
$Y(\alpha_e)$	funkce geometrie
G_F	lomová energie [J/m^2]
W_F	lomová práce – plocha pod křivkou $F-d$ [$N \cdot m$]
σ	výběrová směrodatná odchylka
CoV	variační koeficient [%]
CHRL	chemické rozmrazovací látky

NDT	nedestruktivní
UZ	ultrazvuk
RDM	relativní dynamický modul
CMOD	<i>crack mouth opening displacement</i> – otevření ústí zářezu

Seznam příloh

A	Dokumentace výroby betonových bloků a zkušebních těles	84
A.1	Betonové bloky v centru AdMaS	84
A.2	Výroba zkušebních těles	91
A.3	Odběr vývrtů a příprava těles	93
B	Výsledky a dokumentace zkoušek	95
B.1	UZ impulsová metoda	95
B.2	Rezonanční metoda	98
B.3	Statický modul pružnosti	99
B.4	Zkoušky pevnosti v tahu ohybem	103
B.5	Zkoušky pevnosti v příčném tahu	104
B.6	Lomové zkoušky	105

A Dokumentace výroby betonových bloků a zkušebních těles

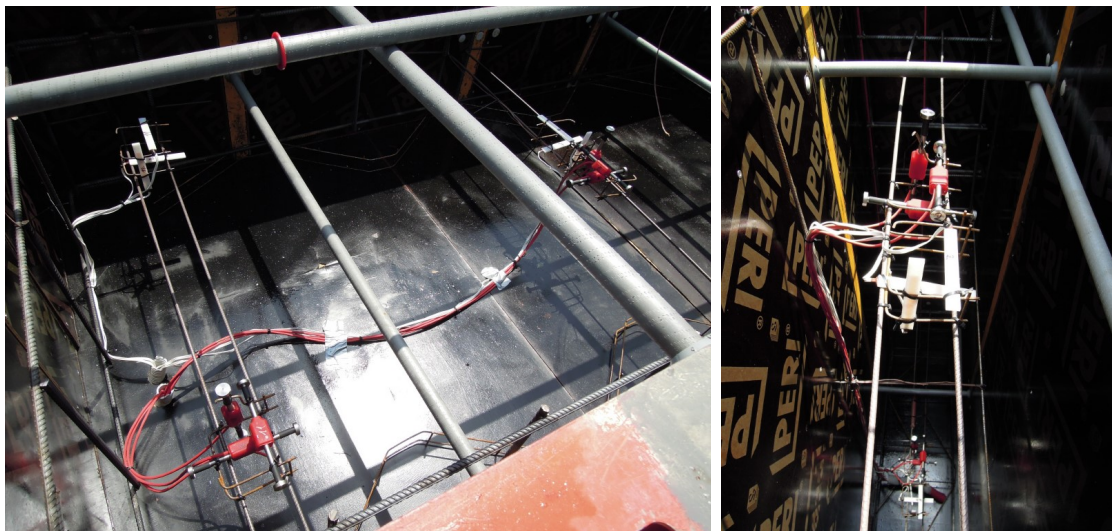
A.1 Betonové bloky v centru AdMaS



Obr. A.1: Montáž bednění pro svislý blok.



Obr. A.2: Montáž bednění pro vodorovný blok.



Obr. A.3: Tenzometry osazené na výztuži vodorovného a svislého bloku.



Obr. A.4: Odběr vzorku čerstvého betonu pro zkoušky.



Obr. A.5: Betonáž bloků.



Obr. A.6: Betonáž a hutnění vodorovného bloku.



Obr. A.7: Ošetření bloků proti ztrátám vlhkosti.



Obr. A.8: Odbednění vodorovného bloku.



Obr. A.9: Odbednění svislého bloku.

A.2 Výroba zkušebních těles



Obr. A.10: Plnění forem a výroba těles.



Obr. A.11: Výroba velkých hranolů a zkušebních válců.



Obr. A.12: Hutnění betonu na vibračním stole.



Obr. A.13: Uložení těles a ošetření proti ztrátám vlhkosti.

A.3 Odběr vývrtů a příprava těles



Obr. A.14: Odběr vývrtů ze svislého bloku.



Obr. A.15: Odběr vývrtů.



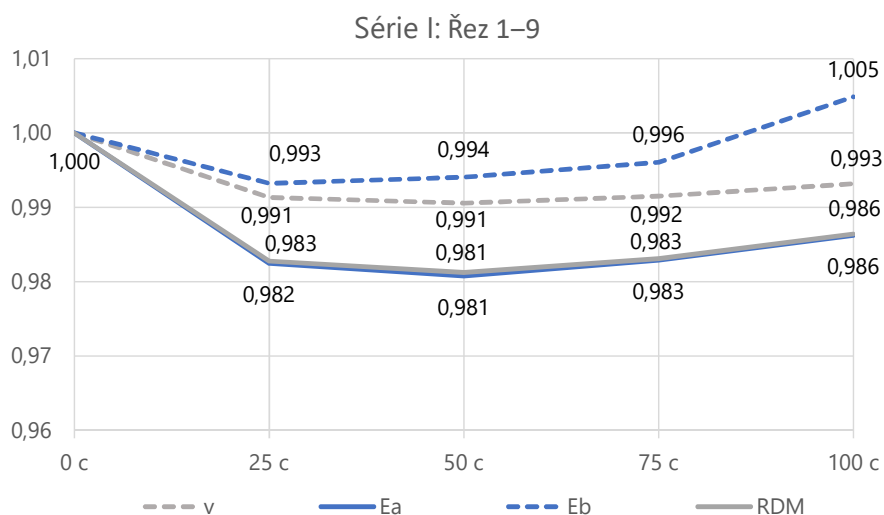
Obr. A.16: Dělení vývrtnu na dvě zkušební tělesa.



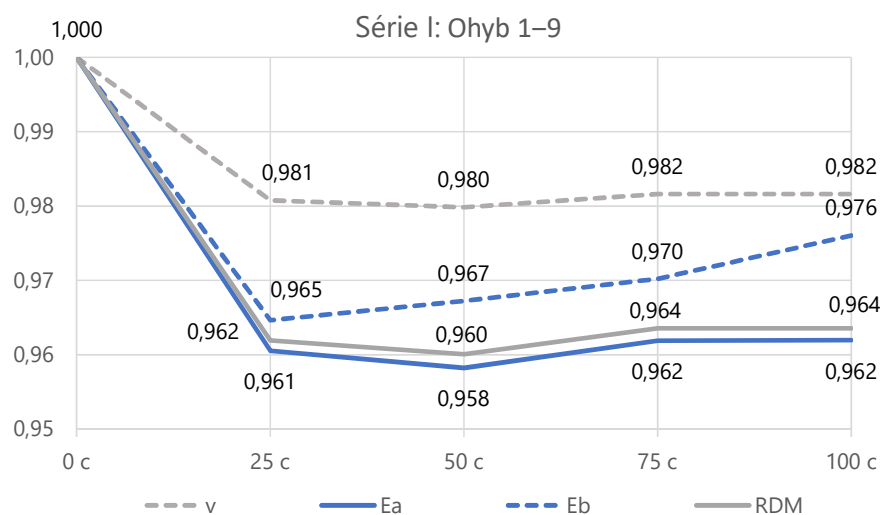
Obr. A.17: Úprava vývrtnu na těleso tvaru hranolu.

B Výsledky a dokumentace zkoušek

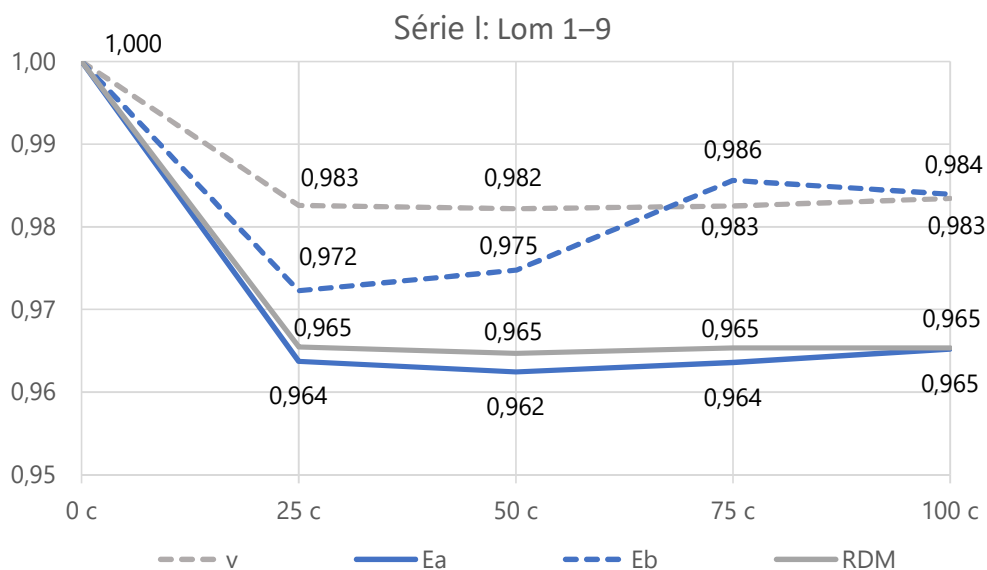
B.1 UZ impulsová metoda



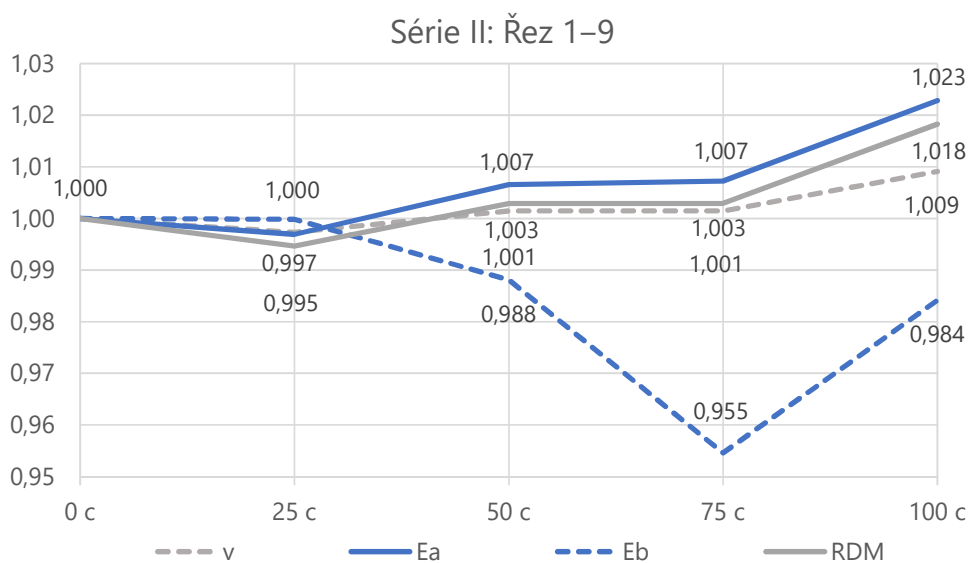
Obr. B.1: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.



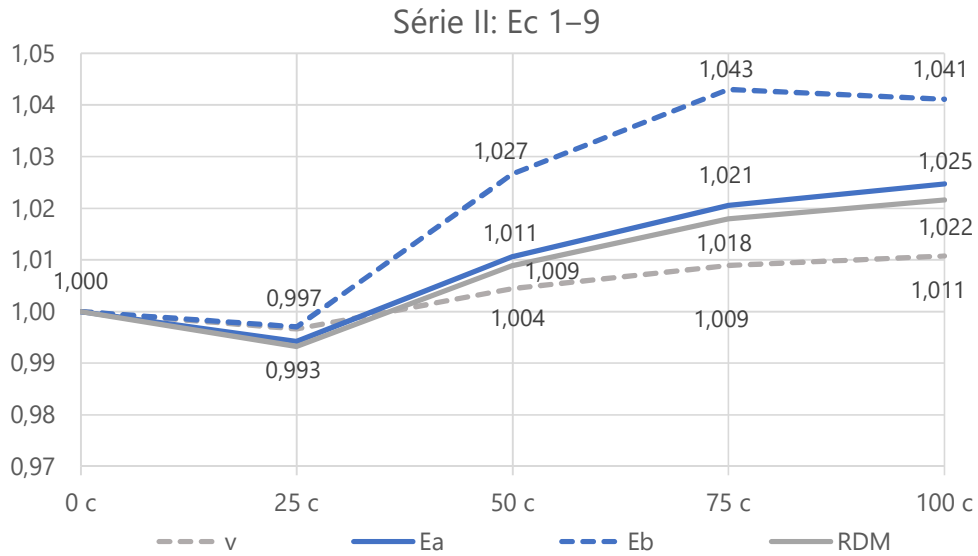
Obr. B.2: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.



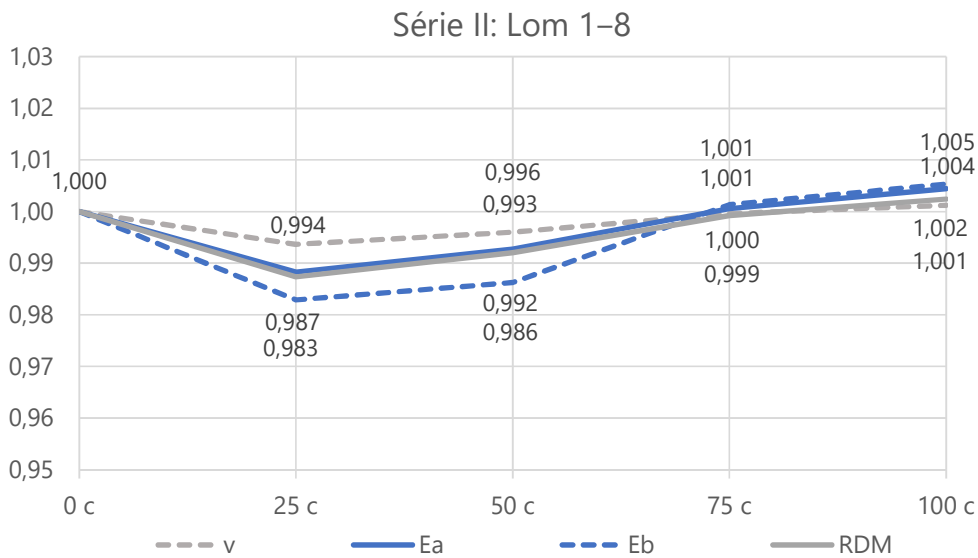
Obr. B.3: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.



Obr. B.4: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.

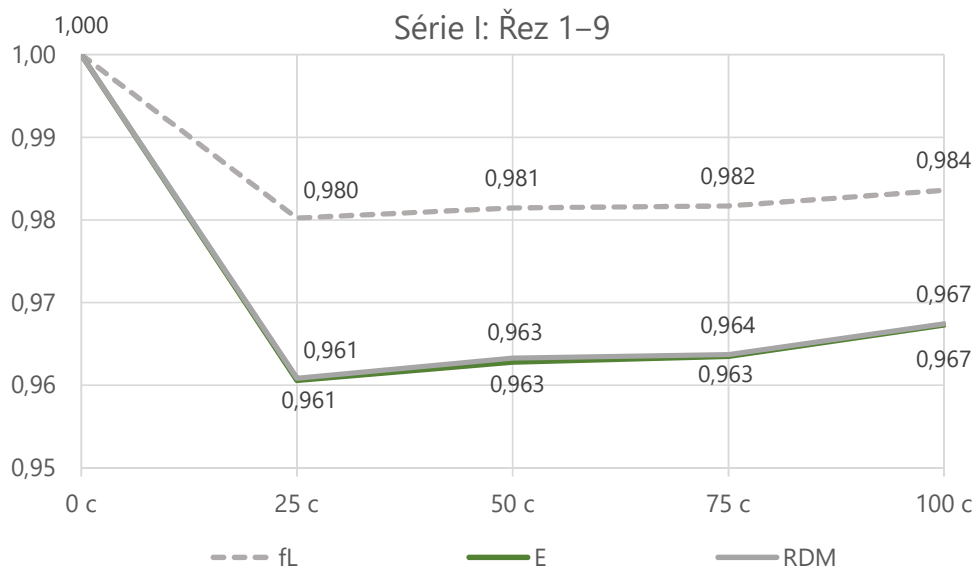


Obr. B.5: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.

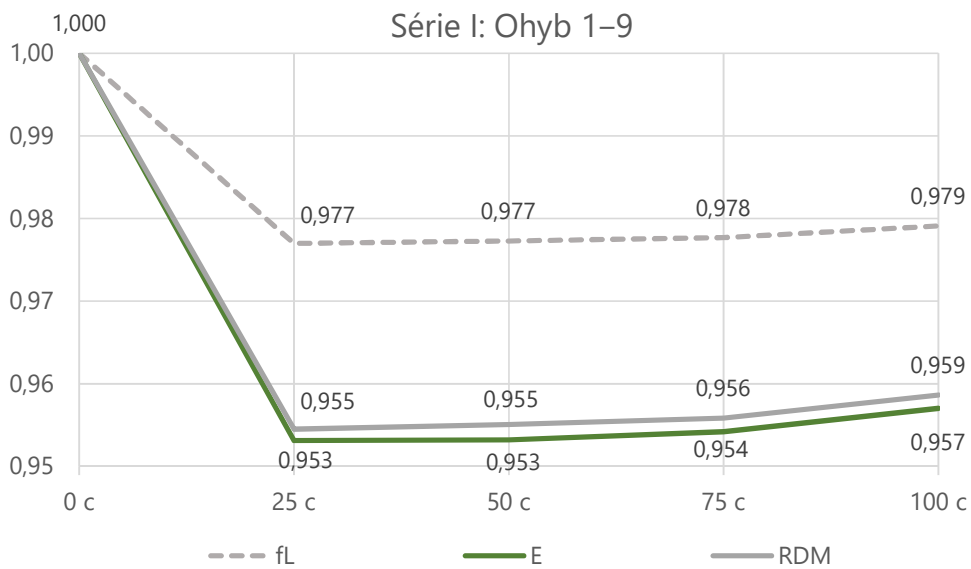


Obr. B.6: Relativní změny rychlosti průchodu UZ (v), dynamického modulu s konstantní (E_a) a proměnlivou (E_b) hodnotou Poissonova čísla a relativní dynamický modul (RDM) podle UZ.

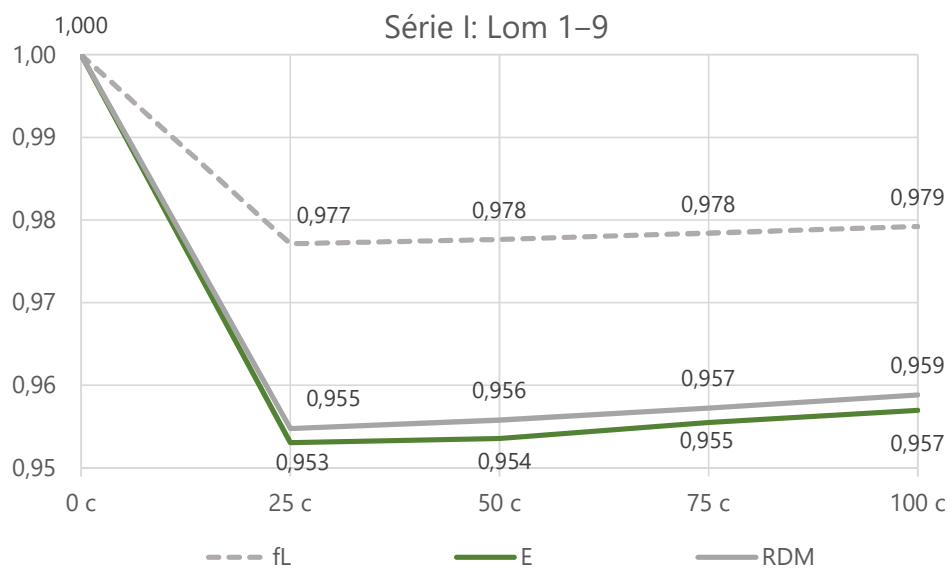
B.2 Rezonanční metoda



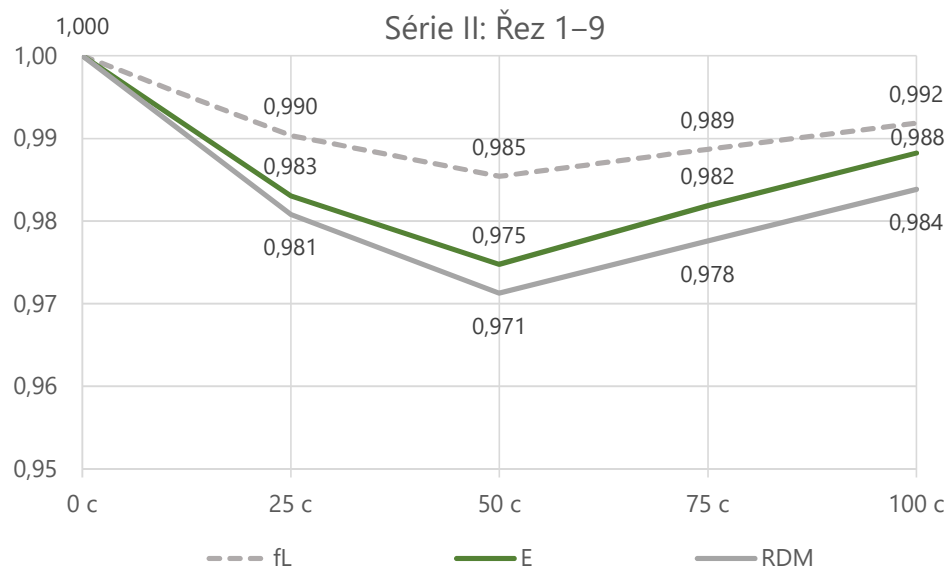
Obr. B.7: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



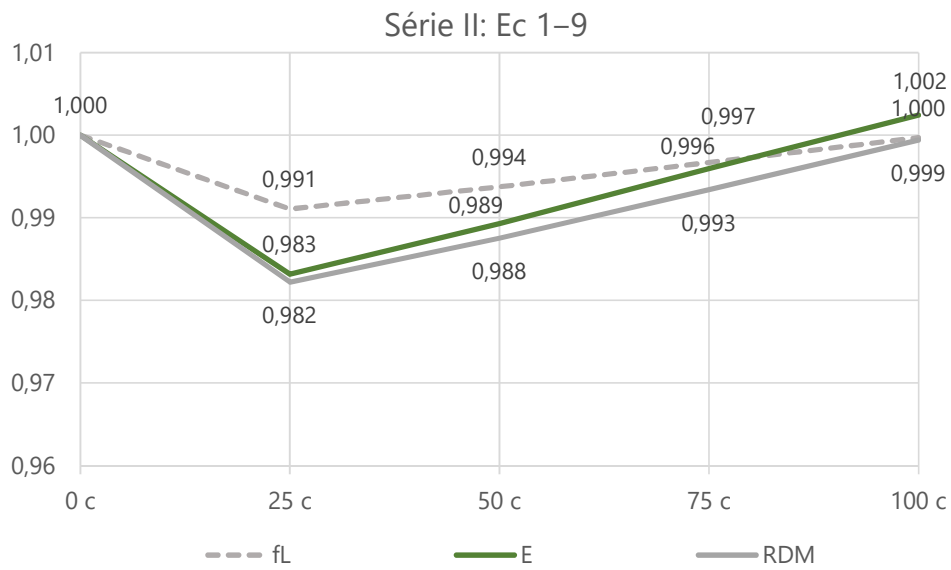
Obr. B.8: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



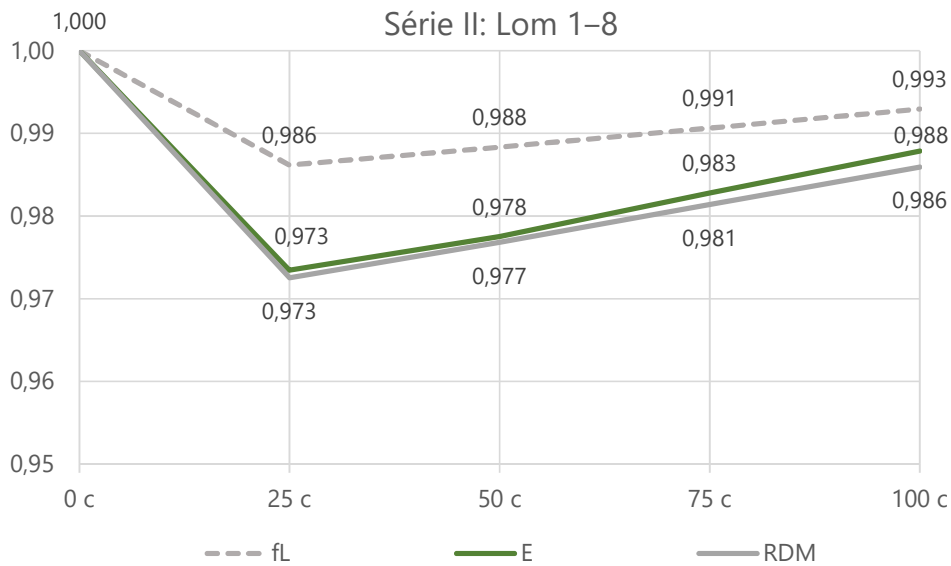
Obr. B.9: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



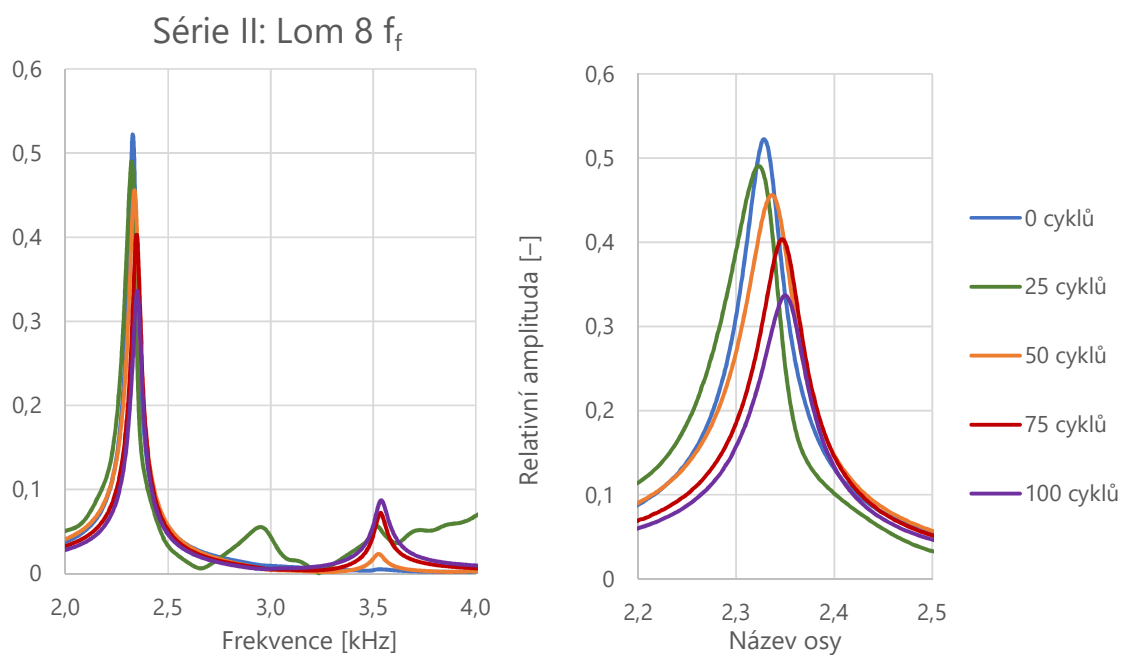
Obr. B.10: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



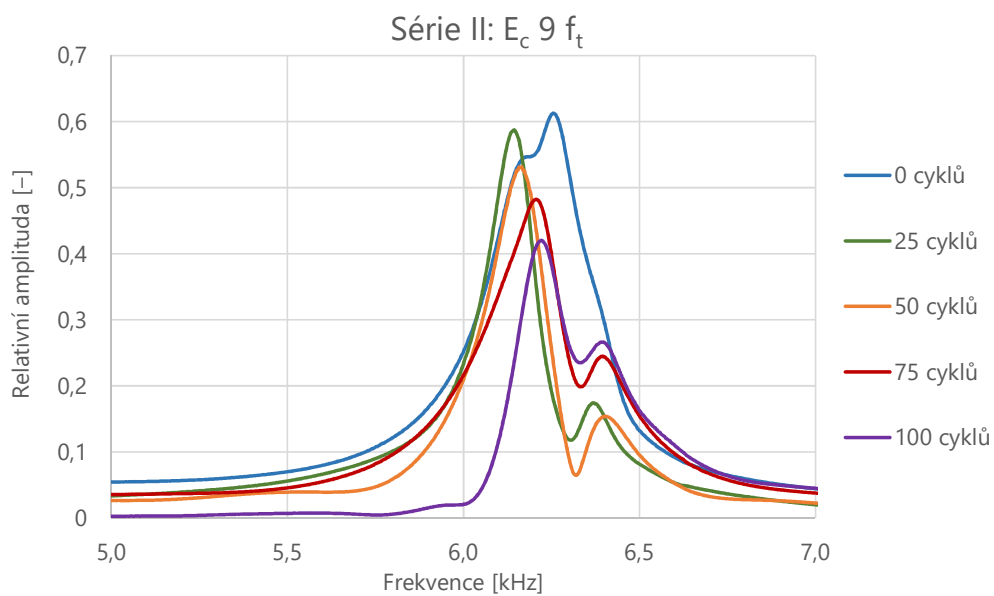
Obr. B.11: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



Obr. B.12: Relativní změny vlastní podélné frekvence (f_L), dynamického modulu pružnosti (E) a relativního dynamického modulu (RDM).



Obr. B.13: Grafický výstup měření příčné vlastní frekvence.

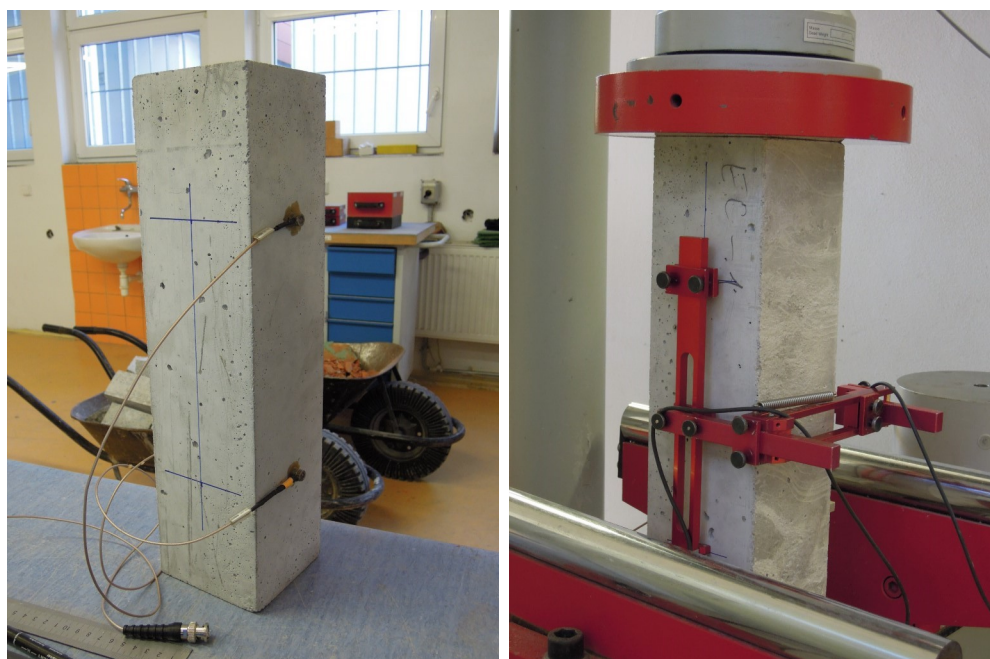


Obr. B.14: Grafický výstup měření kroutové vlastní frekvence.

B.3 Statický modul pružnosti



Obr. B.15: Vybavení pro zkoušku statického modulu pružnosti.



Obr. B.16: Těleso před a v průběhu zkoušky statického modulu pružnosti.

B.4 Zkoušky pevnosti v tahu ohybem

Tab. B.1: Pevnosti v tahu ohybem těles Řez 1–9 v první sérii měření.

	Hranol	f_{cf} [Mpa]	$\sigma_{f_{cf}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Řez-1	5,80	6,0	0,22	3,6	–
	Řez-2	6,03				
	Řez-3	6,24				
50 cyklů	Řez-4	5,51	5,4	0,24	4,5	0,894
	Řez-5	5,10				
	Řez-6	5,53				
100 cyklů	Řez-7	5,90	5,7	0,33	5,8	0,941
	Řez-8	5,29				
	Řez-9	5,81				

Tab. B.2: Pevnosti v tahu ohybem těles Ohyb 1–9 v první sérii měření.

	Hranol	f_{cf} [Mpa]	$\sigma_{f_{cf}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Ohyb-1	6,71	6,3	0,45	7,1	–
	Ohyb-2	6,48				
	Ohyb-3	5,84				
50 cyklů	Ohyb-4	5,67	5,9	0,17	2,9	0,924
	Ohyb-5	5,99				
	Ohyb-6	5,91				
100 cyklů	Ohyb-7	5,91	6,3	0,33	5,2	0,988
	Ohyb-8	6,36				
	Ohyb-9	6,54				

Tab. B.3: Pevnosti v tahu ohybem těles Řez 1–9 ve druhé sérii měření.

	Hranol	f_{cf} [Mpa]	$\sigma_{f_{cf}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Řez-1	5,20	5,1	0,19	3,7	–
	Řez-2	4,85				
	Řez-3	5,14				
50 cyklů	Řez-4	4,40	4,6	0,23	5,0	0,917
	Řez-5	4,85				
	Řez-6	4,69				
100 cyklů	Řez-7	4,12	4,3	0,55	12,8	0,853
	Řez-8	3,90				
	Řez-9	4,94				

B.5 Zkoušky pevnosti v příčném tahu

Tab. B.4: Pevnosti v příčném tahu těles Lom 1–9 v první sérii měření.

	Hranol	f_{ct} [MPa]	$\sigma_{f_{ct}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	Lom_1	6,328	5,80	0,592	10,2	-
	Lom_2	5,938				
	Lom_3	5,166				
50 cyklů	Lom_4	5,357	5,20	0,539	10,4	0,897
	Lom_5	5,652				
	Lom_6	4,607				
100 cyklů	Lom_7	5,204	5,55	0,308	5,5	0,957
	Lom_8	5,735				
	Lom_9	5,738				

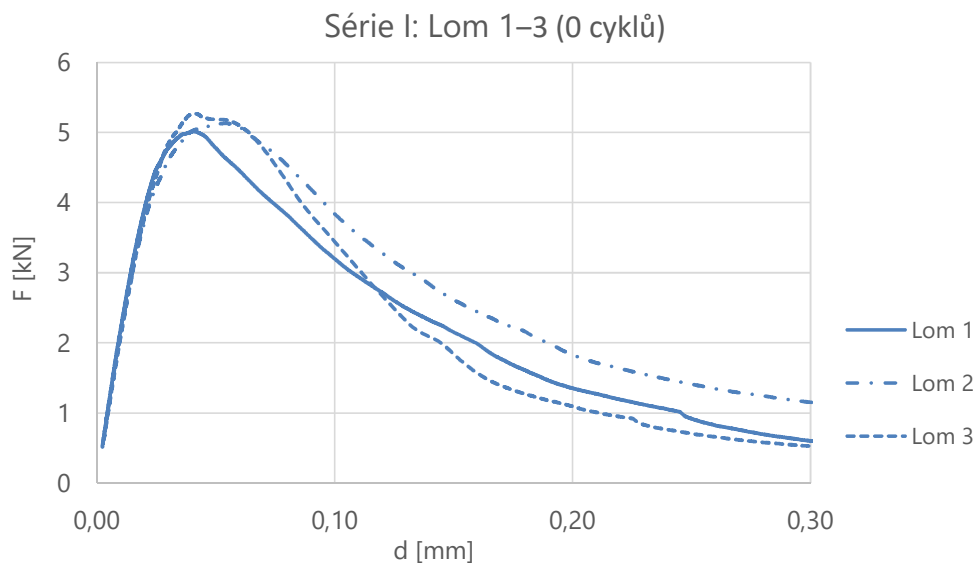
Tab. B.5: Pevnosti v příčném tahu těles PT-100 ve druhé sérii měření.

	Hranol	f_{ct} [MPa]	$\sigma_{f_{ct}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	PT-100-1	3,629	3,55	0,152	4,3	-
	PT-100-2	3,655				
	PT-100-3	3,380				
50 cyklů	PT-100-4	3,217	3,45	0,217	6,3	0,972
	PT-100-5	3,621				
	PT-100-6	3,558				
100 cyklů	PT-100-7	3,713	3,60	0,098	2,7	1,014
	PT-100-8	3,545				
	PT-100-9	3,541				

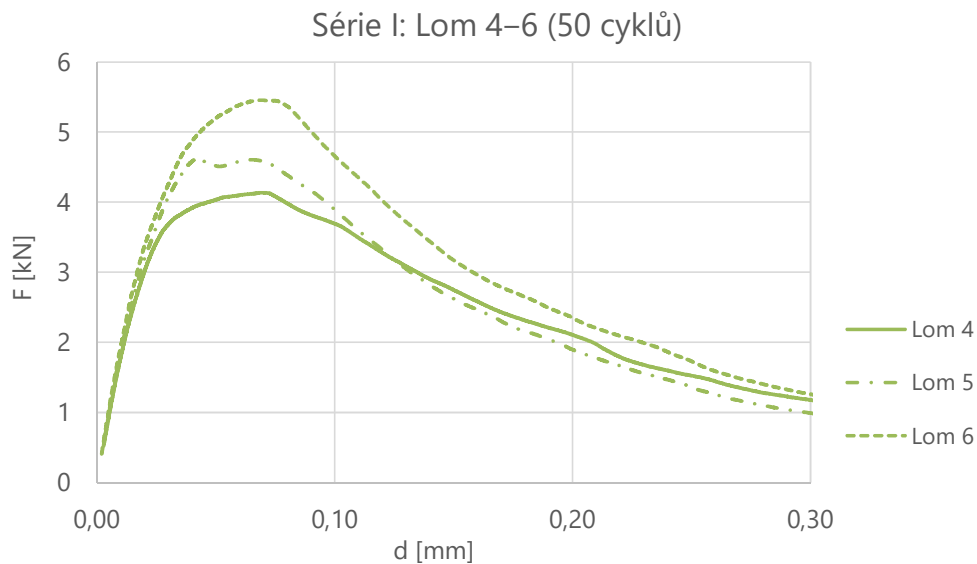
Tab. B.6: Pevnosti v příčném tahu těles PT-150 ve druhé sérii měření.

	Hranol	f_{ct} [MPa]	$\sigma_{f_{ct}}$ [Mpa]	σ [Mpa]	CoV [%]	souč. mraz.
0 cyklů	PT-150-1	3,340	3,20	0,158	4,9	-
	PT-150-2	3,187				
	PT-150-3	3,024				
50 cyklů	PT-150-4	3,158	3,25	0,173	5,3	1,016
	PT-150-5	3,464				
	PT-150-6	3,171				
100 cyklů	PT-150-7	3,216	3,25	0,108	3,3	1,016
	PT-150-8	3,160				
	PT-150-9	3,368				

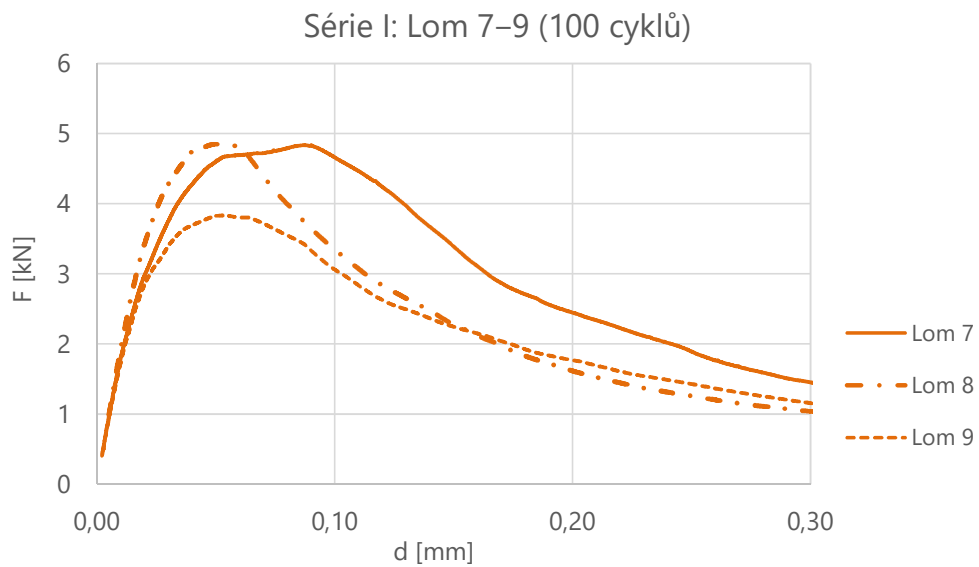
B.6 Lomové zkoušky



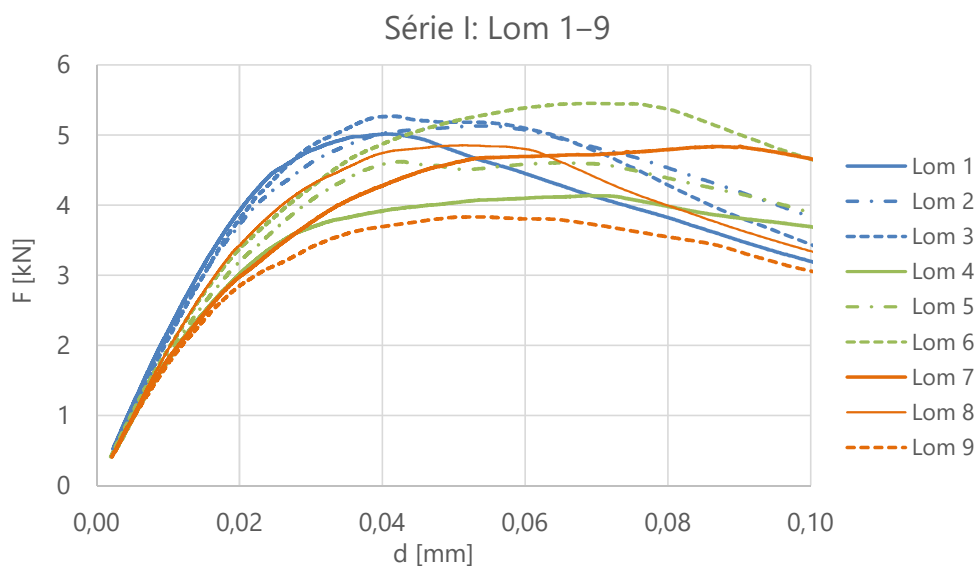
Obr. B.17: F–d diagramy z lomových zkoušek pro referenční tělesa.



Obr. B.18: F–d diagramy z lomových zkoušek pro tělesa po 50 cyklech.



Obr. B.19: F–d diagramy z lomových zkoušek pro tělesa po 100 cyklech.



Obr. B.20: F–d diagramy z lomových zkoušek pro všechna tělesa – detail.