



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

POSOUZENÍ VLIVU PŮVODU A FRAKCE HRUBÉHO KAMENIVA NA PRUŽNOST A TRVANLIVOST KONSTRUKČNÍHO BETONU

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF ORIGIN AND THE FRACTION OF COARSE
AGGREGATE FOR FLEXIBILITY AND DURABILITY OF STRUCTURAL
CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Hanuš

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ VYMAZAL, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav stavebního zkušebnictví |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Petr Hanuš |
| Název | Posouzení vlivu původu a frakce hrubého kameniva na pružnost a trvanlivost konstrukčního betonu |
| Vedoucí práce | doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2016 |
| Datum odevzdání | 26. 5. 2017 |

V Brně dne 30. 11. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Colleparidi, M., Moderní beton, ČKAIT, 2009

ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu, ÚNMZ, 2014

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ÚNMZ, 2014

ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, ÚNMZ, 2016

ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, ÚNMZ, 2009

ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu, ÚNMZ, 1969

EA-04/16 Směrnice EA o vyjadřování nejistoty v kvantitativním zkoušení, ČIA, 2006

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úvod

Stručný úvod do problematiky

Teoretická část

V teoretické části proveďte rešerše doporučené literatury a vypracujte podklady pro metodiku řešení bakalářské práce.

Cíl práce

Posouzení vlivu původu a frakce hrubého kameniva na pružnost a trvanlivost konstrukčního betonu.

Metodika řešení

Na základě rešerší literatury a poskytnutých informací posuďte jednotlivé vlivy a navrhnete odpovídající postup a metodiku práce.

Experimentální část

Aplikujte návrh postupu a metodiky na konkrétní soubor výsledků, zpracujte podklady pro diskuzi a zhodnocení výsledků.

Závěr

V závěru proveďte krátké shrnutí a jasně a přehledně deklarujte výsledky práce a zhodnoťte jejich význam pro teorii a praxi. Zhodnoťte vliv nejistot měření na interpretaci výsledků.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

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

doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem původu a frakce hrubého kameniva na trvanlivost a pružnost konstrukčního betonu. Jako kritérium trvanlivosti se sleduje především mrazuvzdornost betonu.

V teoretické části jsou popsány druhy kameniva, které se používají do konstrukčních betonů. Dále jsou zde popsány zkušební metody, kterými se zjišťuje pružnost a trvanlivost betonů dle zkušebních norem platných v ČR.

V experimentální části práce bylo navrženo a namícháno sedm betonů o stejné konzistenci a pevnosti, které se lišily použitím různých druhů hrubého kameniva. Sledovala se změna pružnosti v průběhu zmrazovacích cyklů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, kamenivo, pružnost, trvanlivost, mrazuvzdornost, závislost, dynamický modul pružnosti.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with influence of origin and fraction of rough aggregate on the durability and elasticity of structural concrete. As a criterion of durability, the frost resistance of concrete is monitored.

In the theoretical part describes the types of aggregates, which are used in structural concretes. In addition, test methods are described to determine the elasticity and durability of concrete according to the test standards valid in the czech republic.

In the experimental part of the thesis, seven concretes of the same consistency and strength were designed and mixed, which differed using different types of coarse aggregate. A change in elasticity during freezing cycles was observed.

KEYWORDS

Concrete, aggregate, elasticity, durability, frost resistance, dependence, dynamic modulus of elasticity.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Petr Hanuš *Posouzení vlivu původu a frakce hrubého kameniva na pružnost a trvanlivost konstrukčního betonu*. Brno, 2017. 47 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 2. 3. 2017

Petr Hanuš
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 2. 3. 2017

Petr Hanuš
autor práce

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Vymazalovy, Ph.D. za odbornou pomoc a rady při zpracování práce, Ing. Daliborovi Kocábovy, Ph.D. za pomoc při měření a laboratoři BETOTECH za použití jejich prostor a zdrojů při přípravě vzorků.

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | CÍL PRÁCE | 10 |
| 2 | TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 2.1 | Beton | 11 |
| 2.1.1 | Kamenivo..... | 11 |
| 2.1.2 | Příspěvy | 13 |
| 2.2 | Postupy zkoušení čerstvého betonu | 13 |
| 2.2.1 | Konzistence určená sednutím kužele | 13 |
| 2.2.2 | Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu | 15 |
| 2.3 | Postupy zkoušení ztvrdlého betonu..... | 17 |
| 2.3.1 | Stanovení statického a dynamického modulu pružnosti v tlaku | 17 |
| 2.3.2 | Rezonanční metoda..... | 18 |
| 2.3.3 | Ultrazvuková impulzová metoda | 21 |
| 2.3.4 | ČSN EN 12390-8 Hloubka průsaku tlakovou vodou | 23 |
| 2.3.5 | ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu..... | 24 |
| 3 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 25 |
| 3.1 | Popis a metodika práce | 25 |
| 3.2 | Suroviny použité pro výrobu betonu | 32 |
| 3.2.1 | Cement | 32 |
| 3.2.2 | Voda | 32 |
| 3.2.3 | Kamenivo..... | 32 |
| 3.2.4 | Příspěvy | 32 |
| 3.3 | Složení jednotlivých betonů..... | 33 |
| 3.4 | Výsledky zkoušek jednotlivých betonů | 33 |
| 3.4.1 | Zkoušky čerstvého betonu | 33 |
| 3.4.2 | Pevnost v tlaku a objemová hmotnost..... | 34 |
| 3.4.3 | Hloubka průsaku tlakovou vodou | 34 |
| 3.4.4 | Mrazuvzdornost | 35 |
| 3.4.5 | Dynamické moduly pružnosti..... | 36 |
| 3.5 | Zatřídění betonů..... | 45 |
| 4 | Závěr..... | 45 |
| 5 | Seznam použitých zdrojů | 47 |

ÚVOD

Beton je nejrozšířenější stavební materiál dnešní doby a jsou kladeny požadavky na jeho kvalitu a trvanlivost. Výroba betonu je dnes na vysoké úrovni. Její kvalita je zajišťována kontrolou shody jeho vlastností. Trvanlivost betonu závisí na mnoha kritériích. Tato práce se zabývá jedním z nich a to vlivem použití různých druhů a frakcí hrubého kameniva.

Vlastností, podle kterých lze hodnotit trvanlivost betonu je celá řada, tato práce se bude zabývat mimo jiných zejména součinitelem mrazuvzdornosti a sledováním změny dynamických modulů pružnosti betonu v průběhu zmrazování. Co se týče vlivu druhu kameniva lze podle ČSN EN 1992-1-1 [1] konstatovat, že čím větší modul pružnosti má samotné kamenivo tím větší je pak modul pružnosti betonu. Je známo, že volbou kameniva se dá výrazně ovlivnit modul pružnosti betonu [2] a s ním spojená trvanlivost.

1 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je vyhodnotit pružnost a trvanlivost konstrukčních betonů s ohledem na původ a frakci hrubého kameniva, které bylo do betonu použito. Jako kritériem trvanlivosti bude použita zejména odolnost betonu proti mrazu, tzv. mrazuvzdornost betonu.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Beton

Beton je silikátový kompozitní materiál, ve kterém plní funkci kostry (výplně) kamenivo a matrice je zde tvořena cementovým kamenem. Cementový kámen jsou krystaly vznikající postupným tuhnutím a tvrdnutím C-S-H gelů cementového tmelu (cement a voda). Pro výrobu betonu se musí použít minimálně dvě frakce kameniva, standardně se však beton běžně míchá ze tří až čtyř frakcí. Do betonu lze také přidávat různé příměsi a přísady, které ovlivňují vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Za čerstvý beton se považuje stav kdy se všechny složky smíchají v mísícím zařízení a následně je tato směs uložena do formy nebo bednění. Po zhutnění a proběhnutí hydratačních procesů se mění struktura a vzniká pevný kompaktní materiál, pro který se používá výraz ztvrdlý beton [3; 4].

2.1.1 Kamenivo

Kamenivo zaujímá ve struktuře betonu 75 – 80 % objemu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry. Celková směs obsahuje různé frakce kameniva (velikosti zrn) smíchané ve vhodném poměru tak, aby se dosáhlo minimální mezerovitosti. Kamenivo lze základně rozdělit na přírodní a umělé, přičemž ve stavební praxi se ve velké většině používá přírodní. To se dále dělí podle původu na drcené (vzniká odstřelem masy horniny a následným vícefázovým drcením) a těžené (odtěžováním z vody nebo stěny). Těžené kamenivo vzniklo přirozeným rozpadem hornin a následným transportem zvětralých hornin většinou ve vodě získalo svou hladkost a tvar podobný kouli. Drcené kamenivo má většinou nepravidelný ostrohranný tvar, který je méně vhodný pro výrobu betonu. Na druhou stranu mají tyto zrna větší drsnost a tím i lepší adhezi s cementovým tmelem a proto jsou vhodnější pro výrobu betonů s vyšší pevností.

Další dělení je podle velikosti zrn :

- hrubé kamenivo s velikostí zrn 4 – 32,5 mm (štěrk, drť)
- drobné kamenivo s velikostí zrn do 4 mm (písek)
- jemné kamenivo s velikostí zrn do 0,25 mm (moučka, filer)

Frakce kameniva kromě fileru jsou specifikovány použitím výrazu d/D , kde d je velikost nejmenšího zrna a D je velikost největšího zrna frakce. Frakce musí být specifikovány dvojicí sít vybraných ze základní řady, základní řady plus 1 mm nebo základní řady plus 2 mm. Kombinace sít z řady 1 a z řady 2 není možná. Frakce kameniva nesmí mít poměr D/d menší než 1,4. [4; 5].

Tabulka 1 – Velikost sít pro specifikaci frakcí kameniva [5]

| Základní řada mm | Základní řada plus 1 mm | Základní řada plus 2 mm |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 |
| 4 | 4 | 4 |
| - | 5,6(5) | - |
| - | - | 6,3(6) |
| 8 | 8 | 8 |
| - | - | 10 |
| - | 11,2(11) | - |
| - | - | 12,5(12) |
| - | - | 14 |
| 16 | 16 | 16 |
| - | - | 20 |
| - | 22,4(22) | - |
| 31,5(32) | 31,5(32) | 31,5(32) |
| - | - | 40 |
| - | 45 | - |
| 63 | 63 | 63 |

POZNÁMKA Zaokrouhlené velikosti uvedené v závorkách se mohou použít jako zjednodušené označení frakce kameniva.

2.1.2 Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se do betonu přidávají během míchání, za účelem modifikovat vlastnosti jak čerstvého tak zatvrdlého betonu. Dávkují se od 0,2 do 5% hmotnosti cementu, celkové množství nesmí přesáhnout maximální dávkování doporučené výrobcem. Přísady se rozdělují podle toho, jakou vlastnost betonu modifikují, např. plastifikační (redukují množství vody při stejné zpracovatelnosti čerstvé směsi) nebo provzdušňovací (vytvářejí jemně rozptýlené vzduchové póry, beton pak lépe odolává působení mrazu) [4].

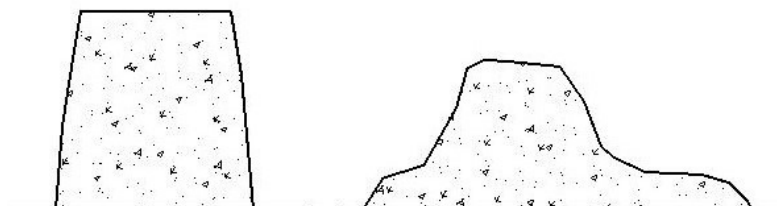
2.2 Postupy zkoušení čerstvého betonu

2.2.1 Konzistence určená sednutím kužele

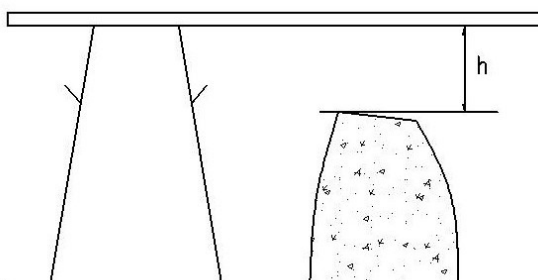
Tato zkouška je vhodná pro betony obsahující zrno kameniva o velikosti maximálně 40 mm. Pomůcky pro tuto zkoušku jsou propichovací tyč, násypka, podkladní deska, lopatka a nádoba ve tvaru komolého kuželu o průměru dolní základny $200 \pm$ mm, průměru horní základny 100 ± 2 mm výšce 300 ± 2 mm a tloušťce stěny 1,5 mm.

Postupuje se tak, že se navlhčí podkladní deska, na kterou se položí nádoba. Ta musí být během plnění pevně přišlápnutá k podkladní desce pomocí dvou příložek. Nádoba se plní postupně ve třech vrstvách vždy po 1/3 výšky. Každá vrstva se zhutní 25ti vpichy propichovací tyče rovnoměrně rozloženými po ploše tak, aby mírně zasahovaly do předchozí vrstvy (u 2 a 3 vrstvy). Přebytečný beton na horní ploše se odstraní otáčením a příčným pohybem propichovací tyče a zároveň se odklidí i beton spadlý na podkladní desku. Následně se forma oddělí od betonu konstantním vertikálním pohybem trvajícím 5 až 10 sekund. Sednutí h (S) kužele se změří ihned po zvednutí nádoby a zaokrouhlí se na 10 mm (obr. 3).

Výsledek zkoušky je platný pouze v případě, že beton zůstane neporušený a kužel je symetrický (obr. 1), jestliže tomu tak není a vzorek se usmýkne potom se zkouška opakuje s jiným vzorkem (obr. 2). Pokud se usmýknutí opakuje tak to znamená, že má beton nedostatečnou plasticitu a je nevhodný pro zkoušku sednutím [6].



Obr. 1 Správné sednutí [6]. Obr. 2 Usmýknuté sednutí [6].



Obr. 3 Měření sednutí [6].

Tabulka 2 – Klasifikace podle sednutí kužele, S – Slumptest [6]

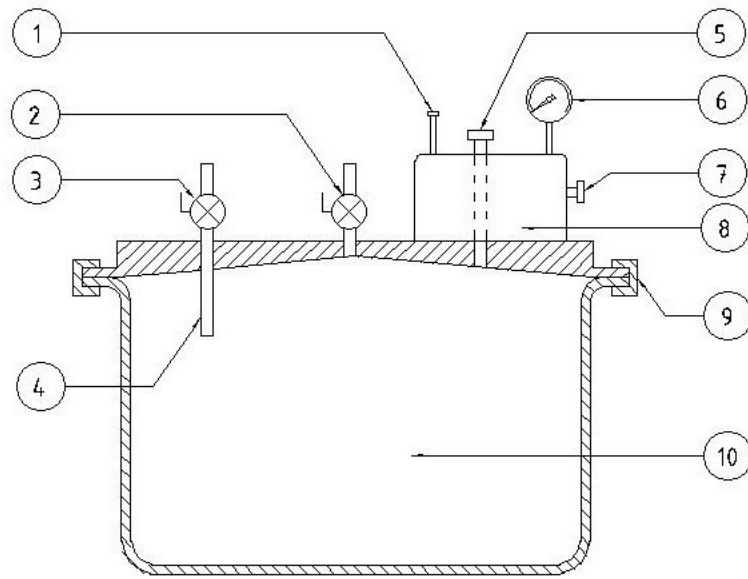
| Stupeň | Sednutí [mm] |
|--------|--------------|
| S1 | 10 až 40 |
| S2 | 50 až 90 |
| S3 | 100 až 150 |
| S4 | 160 až 210 |
| S5 | ≥220 |

2.2.2 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Podstatou zkoušky je, že je známý objem vzduchu o známém tlaku propojen v uzavřené nádobě s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu. Kruhá stupnice tlakoměru je nastavena v procentním podílu vzduchu ve vzorku betonu. Tlaková metoda je určena pro beton s maximální velikostí zrna 63mm.

Nádoba na vzorek o obsahu min. 5l se naplní betonem v jedné nebo více vrstvách tak, aby bylo zajištěno úplné zhutnění. Zhutnění se může provést pomocí ponorného vibrátoru, vibračního stolu nebo propichovací tyčí. Hladítkem se odebere přebytečný beton a povrch se urovná. Vnější část nádoby se očistí a pomocí svorek se připevní k nádobě víko. Hlavní ventil se uzavře a ventilem A se prostor pod víkem naplní vodou při otevřeném ventilu B, dokud se nevytlačí všechny vzduch nad povrchem betonu, což se pozná podle toho, že přebytečná voda vytéká ventilem B. Zároveň se paličkou lehce poklepává nádoba, aby se odstranili vzduchové bubliny. Hlavní vzduchový ventil se uzavře. Do vzduchové komory se natlačí vzduch a ručička tlakoměru se nastaví na počáteční hodnotu (na tlakoměr se lehce poklepává). Ventily A i B se uzavřou a otevře ve vyrovnávací ventil.

Po ustálení tlakoměru se odečte obsah vzduchu s přesností na 0,1% a před sejmutím víka se otevřou ventily A a B, aby se uvolnil tlak. Obsah vzduchu se stanoví jako průměrná hodnota ze dvou měření, které se neliší víc jak o 10% od průměru a zaokrouhlí se na 0,5% [7].



Obr. 4 Schéma tlakové nádoby, 1 – hustilka, 2 – ventil B, 3 – ventil A, 4 – prodlužovací hadička trubice kalibrační zkoušky, 5 – hlavní vzduchový ventil, 6 – tlakoměr, 7 – odvzdušňovací ventil, 8 – vzduchová komora, 9 – svorky, 10 – nádoba [7].

2.3 Postupy zkoušení ztvrdlého betonu

2.3.1 Stanovení statického a dynamického modulu pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku se stanoví přepočtením z dynamických modulů pružnosti, ty se určí pomocí ultrazvukové (viz. kap.2.3.3) a rezonanční metody (viz. kap.2.3.2). Tyto metody jsou popsány v ČSN 73 1371, ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1372. Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu $E_{dyn,U}$ [MPa] se vypočítá z naměřených rychlostí šíření ultrazvukových impulsů jako:

$$E_{dyn,U} = D \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Rovnice 1, kde je D – objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]; v_L – rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m/s]; k – koeficient rozměrnosti prostředí [-] [8; 9].

Hodnotu dynamického modulu pružnosti z rezonančních frekvencí lze stanovit dvěma způsoby a to z podélného kmitání jako $E_{dyn,FL}$ [MPa] a z příčného kmitání $E_{dyn,FF}$ [MPa] takto:

$$E_{dyn,FL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot D \quad (2)$$

$$E_{dyn,FF} = 0,0789 \cdot c \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot D \cdot i^{-2} \quad (3)$$

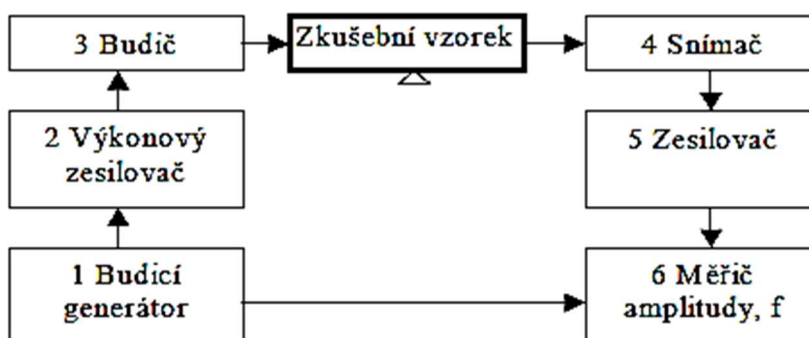
Rovnice 2 a 3, kde je L – délka vzorku [m]; f_L, f_t – vlastní frekvence podélného a příčného kmitání [kHz]; D – objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]; i – poloměr setrvačnosti průřezu [m]; c – korekční součinitel závislý na poměru i/L a na Poissonově koeficientu μ_{br} [-] [8; 9].

K přepočtení mezi dynamickými a statickými moduly pružnosti se používají zmenšovací součinitele. Pro ultrazvukové moduly κ_u a pro rezonanční κ_r , jejichž orientační hodnoty jsou uvedeny v normě ČSN 73 2011 a jsou závislé především na pevnostní třídě betonu, době zrání betonu a druhu hrubého kameniva [8].

2.3.2 Rezonanční metoda

Po udělení mechanického impulsu, se každý předmět z tuhého materiálu rozkmitá. Kmitání se uskutečňuje mnoha způsoby. Tato metoda je založena na měření vlastních kmitočtů pravidelných těles, nejvhodnější jsou pro tento účel hranoly o rozměrech 100x100x400 mm. K určení dynamických materiálových charakteristik se používají vlastní kmitočty podélného f_L , kroutivého f_t a příčného f_f kmitání. Vlastním kmitočtem neboli Rezonancí se označuje jev vzrůstu amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum, ke kterému dochází v případě, kdy kmitočet vnější budící síly je shodný s vlastním kmitočtem tělesa.

Rezonanční přístroj vysílá do zkoušeného vzorku mechanické kmitání, jehož frekvence je plynule laditelná, obvykle od 30 Hz do 30 kHz. Přístroj dále měří odezvu vzorku na vysílaný kmitočet a případně zobrazuje amplitudu kmitání vzorku. Měřicí sestava znázorněna na obr. 5 se skládá z budícího (1 – 3) a snímacího (4 – 6) obvodu [9].



Obr. 5 Schéma měřicí sestavy přístrojů pro rezonanční metodu [9].

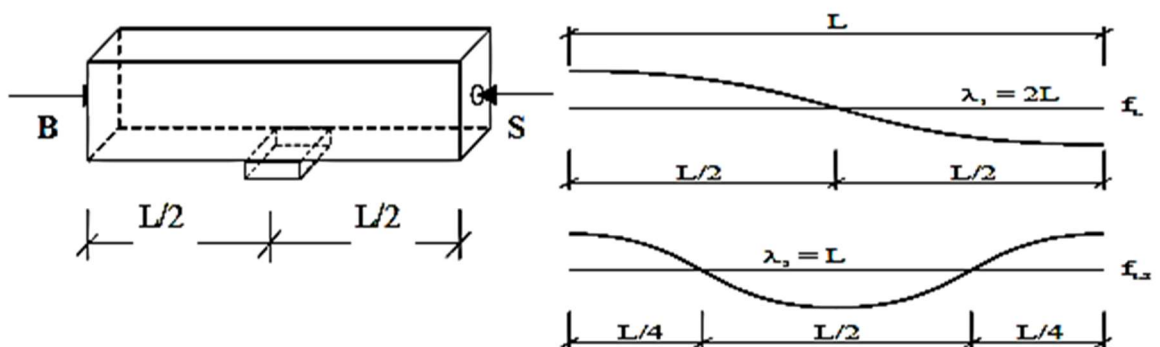
Pro určení dynamických charakteristik je potřeba určit rozměry a hmotnost vzorku. Příčné rozměry a , b se měří na 0,1 mm přesně posuvným měřítkem, délka vzorku L se měří na 1 mm přesně ocelovým měřítkem. Všechny hodnoty se uvádějí v metrech. Vážením se stanoví hmotnost vzorku m na 5 g přesně.

Pro stanovení podélné rezonanční frekvence f_L neznámého vzorku je vhodné nejprve vypočítat přibližnou hodnotu vlastních frekvencí a potom hledat v jejím okolí skutečnou vlastní frekvenci. U neznámého vzorku je totiž těžko odlišitelná skutečná rezonanční frekvence od nepravých, způsobených jinými druhy kmitání. Přibližná hodnota f'_L v kHz se určí výpočtem z doby průchodu ultrazvukového vlnění vzorkem ve směru jeho délky.

$$f'_L = \frac{500}{T} \quad (4)$$

Rovnice 4, kde je T – doba průchodu ultrazvuku ve směru L [μ s], [9].

Při měření rezonančních frekvencí se vzorek rozkmitává, při čemž jsou známa místa, v nichž vznikají uzly a kmitny. Podle toho, které kmitání je sledováno, se ukládá vzorek na podložky v místě uzlů a sondy se přikládají v místech největších amplitud neboli kmiten. Tímto způsobem se preferuje sledované kmitání a ostatní druhy kmitání se potlačují.



Obr. 6 Způsob podepření hranolu, umístění budiče B a snímače S při měření f_L [9].

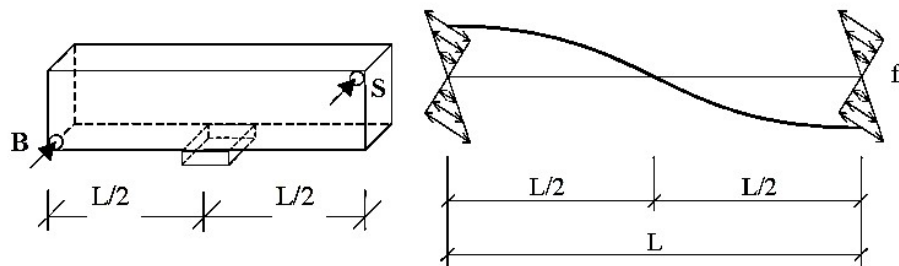
Přístroj se nastaví na vypočtenou hodnotu podélné rezonanční frekvence f'_L . Potom se plynule snižuje nebo zvyšuje vysílaná frekvence a sleduje se obrazovka přístroje, až se dosáhne maximální výchylky amplitudy, tato hodnota je pak skutečná frekvence podélného kmitání f_L [9].

Přibližné hodnoty kroutivé a příčné frekvence se stanoví přepočtením ze skutečné podélné frekvence pomocí následujících vztahů:

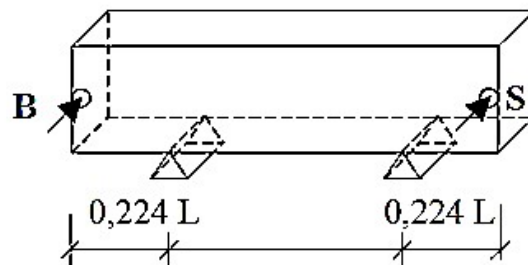
$$f'_t = \alpha \cdot f_L \qquad f'_f = \beta \cdot f_L \qquad (5,6)$$

Rovnice 5 a 6, kde je f_L – skuteční frekvence podélného kmitání [kHz]; α – koeficient o hodnotě 0,59; β – koeficient závislí na poměru a/L [9].

Postup měření vlastních kroutivých a příčných kmitání zkušebního vzorku je dále shodný s postupem měření vlastních podélných kmitů. Liší se pouze uložením vzorků a umístěním budiče a snímače.



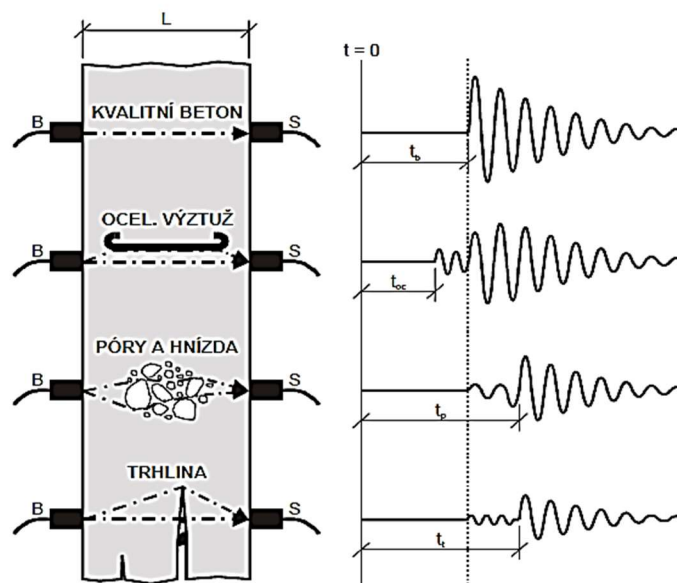
Obr. 7 Způsob podepření hranolů, umístění budiče B a snímače S při měření f_t [9].



Obr. 8 Způsob podepření hranolů, umístění budiče B a snímače S při měření f_f [9].

2.3.3 Ultrazvuková impulzová metoda

Metoda je založená na opakovaném vysílání UZ impulzů do zkoušeného materiálu a měření doby průchodu ultrazvukového vlnění materiálem. Používají se kmitočty v rozmezí od 20 kHz do 150kHz (výjimečně do 500kHz). Výhodou této metody je, že se vlnění šíří i relativně silnými vrstvami materiálů, kde se slyšitelné vlnění rychle utlumí. Ultrazvuková impulzová metoda se převážně používá pro zjištění jakosti zkoušeného materiálu a pro určení jeho mechanicko-fyzikálních charakteristik. Z doby průchodu UZ vlnění se určí jeho rychlost, která je pro různé materiály různá a mění se s jejich vlastnostmi.



Obr. 9 Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar UZ impulzu [9].

Nejvhodnějším tvarem zkušebních těles pro laboratorní zjišťování vlastností betonu touto metodou jsou hranoly o rozměrech 100x100x400 mm. Provádí se přesné měření a vážení vzorků, rozměry do 150 mm se měří s přesností na 0,1 mm, delší rozměry pak s přesností na celé milimetry, hmotnost zjištěná vážením na 5 g přesně. Je nutné dodržet orientaci vzorku během zkoušení, protože průřezové charakteristiky se používají pro další výpočty [9].

Měření se provádí na třech měřících základnách, rovnoběžných s podélnou osou vzorku. Měřící základna je nejkratší spojnice dotkových ploch budiče a snímače, je závislá na použitém měřícím přístroji a kmitočtu budiče. Místa měření se volí tak, aby nedošlo k ovlivnění měřeného času přítomností poruchy betonu, není-li právě cílem měření nehomogenita betonu. Sondy (snímač a budič) se opatřují na kontaktních plochách co nejtenčí vrstvou akustického vazebného média, které zaručuje plynulý přechod UZ impulsu do materiálu vzorku, nejčastěji se používá plastelína nebo sklářský tmel. Při měření doby průchodu prochází impulzy UZ vlnění určitou dobu i vrstvou média, tato doba se označuje jako mrtvý čas. Pro určení mrtvého času se používá etalon o známé době průchodu UZ vlnění. O tuto dobu je pak nutné upravit naměřené údaje. U moderních přístrojů se na etalonu provede kalibrace přístroje a naměřené údaje už se dále neupravují.

Rychlost UZ vlnění také záleží na tvaru a velikosti zkoušeného vzorku. Pro určení dynamických charakteristik materiálu se do výpočtu zavádí koeficient rozměrnosti prostředí k . Rozměrnost prostředí se určuje porovnáním délky vlny impulsu UZ vlnění s rozměry vzorku. Rozlišují se tři druhy prostředí 1D, 2D a 3D [9].

$$\lambda_L = \frac{v_L}{f_u} \quad (7)$$

Rovnice 7, kde je v_L – průměrná rychlost šíření impulsu UZ vlnění [ms^{-1}]; f_u – jmenovitá frekvence použité sondy [Hz]

Koeficient rozměrnosti se vyjadřuje hodnotami k_1, k_2 a k_3 , pro jednorozměrné prostředí platí $k_1 = 1$, pro dvojrozměrné a trojrozměrné je závislý na hodnotě Poissonova poměru μ a vypočte se za vzorců:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1-\mu^2}} \quad (8)$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \quad (9)$$

Rovnice 8 a 9, [9].

2.3.5 ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Zkouška se provádí na betonových zkušebních hranolech o velikosti 100x100x400 mm nebo 150x150x600 mm. Tato tělesa jsou nasyceny čistou vodou, uloženy 25 dní ve vlhkém prostředí a poté 3 dny ve vodním uložení. Resp. 57 dní ve vlhkém prostředí a poté 3 dny ve vodě v případě, že bude konstrukce vystavena účinkům zmrazování ve stáří betonu delší než 90 dní. Tělesa jsou zmrazována při teplotě -15 až -20°C (4 hodiny) a rozmrazována vodou při teplotě +15 až + 22°C (2 h). Počet zkušebních cyklů je 50, 100 a 150. Po daných počtech zkušebních cyklů se zjistí hmotnostní úbytek zkušebních těles a provede se zkouška pevnosti za ohybu jak zmrazovaných, tak referenčních nezmrzovaných těles. Součinitel mrazuvzdornosti je dán jako poměr pevností zmrazovaných těles k pevnosti těles referenčních. V případě, že tento poměr je menší než 75%, je beton vyhodnocen dle ČSN 73 1322 jako nemrazuvzdorný [3; 11].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Popis a metodika práce

V experimentální části byla vyrobena zkušební tělesa ze sedmi receptur betonu, do kterých se použijí různé kombinace hrubého kameniva. Současně byl dán požadavek, aby se tyto betony co nejméně lišili v konzistenci čerstvého betonu a také ve výsledné pevnosti v tlaku. Důvodem bylo, aby byly vlastnosti betonů co nejvíce závislé právě na použitém kamenivu a zaručila se tak porovnatelnost výsledků. Proto byly do betonů použity plastifikační a provzdušňovací přísady, které tyto vlastnosti upravují.

Receptury betonů byly rozděleny do dvou podskupin, do první skupiny patří receptury označené A, B a C, na kterých se sledoval výhradně vliv frakce hrubého kameniva na pružnost a trvanlivost betonu a do druhé patří receptury označené D, E, F a G, na kterých se sledoval výhradně vliv původu a druhu hrubého kameniva na pružnost a trvanlivost betonu. Ihned po zamíchání byl u každého betonu změřen obsah vzduchu dle *ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody* [7] a stanovena konzistence dle *ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím* [6]. Z každé záměsi bylo vyrobeno 6 trámců o rozměrech čela 100 x 100 mm a délce 400 mm a 7 krychlí o hraně 150 mm. Trámce byly po odformování uloženy po dobu 28 dní ve vlhkém prostředí a následně ve vodě až do začátku zkoušek mrazuvzdornosti, což bylo u vzorků A, B a C 14 dní a u vzorků D, E, F a G 7 dní. Krychle byly po odformování uloženy přímo do vody až po dobu zkoušek pevnosti, což bylo u vzorků A, B, a C 42 dní a u vzorků D, E, F a G 35 dní. Rozdíly v době uložení jsou dány tím, že betonáže vzorků probíhaly ve dvou krocích, vzdálených od sebe 7 dní.

Po vyjmutí těles z vodního uložení byla na třech krychlích od každé záměsi provedena zkouška pevnosti betonu v tlaku dle *ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles* [12]. Zbylé krychle byly využity pro určení hloubek průsaků podle *ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou* [10].



Obr. 11 Ukládání vzorků do vody



Obr. 12 Uložení vzorků ve vodě



Obr. 13 Zkouška pevnosti betonu v tlaku



Obr.14 Usazování krychlí na stoličce pro zkoušení hloubky průsaku tlakovou vodou



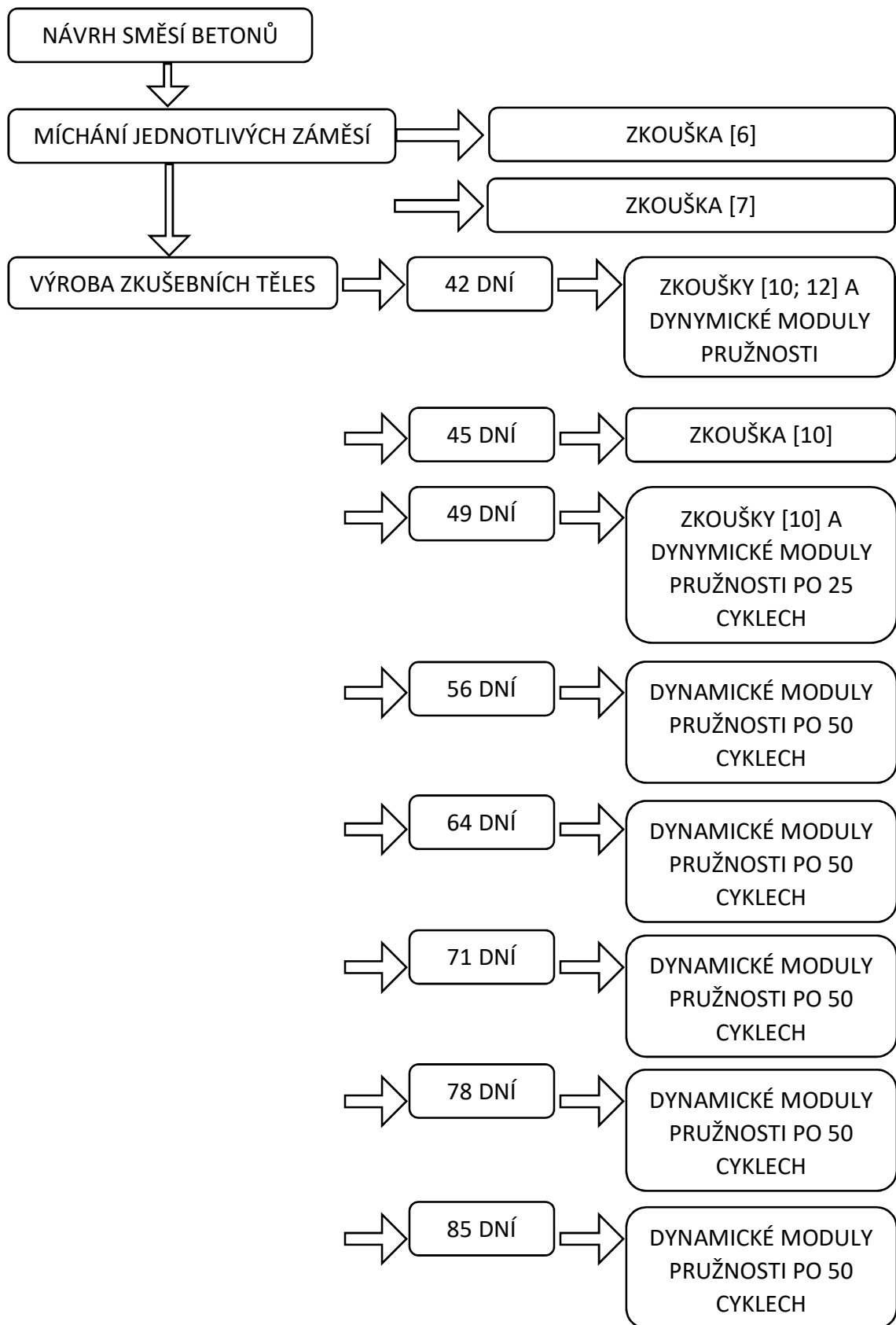
Obr. 15 Zkouška pevnosti betonu v tahu tříbodovým ohybem



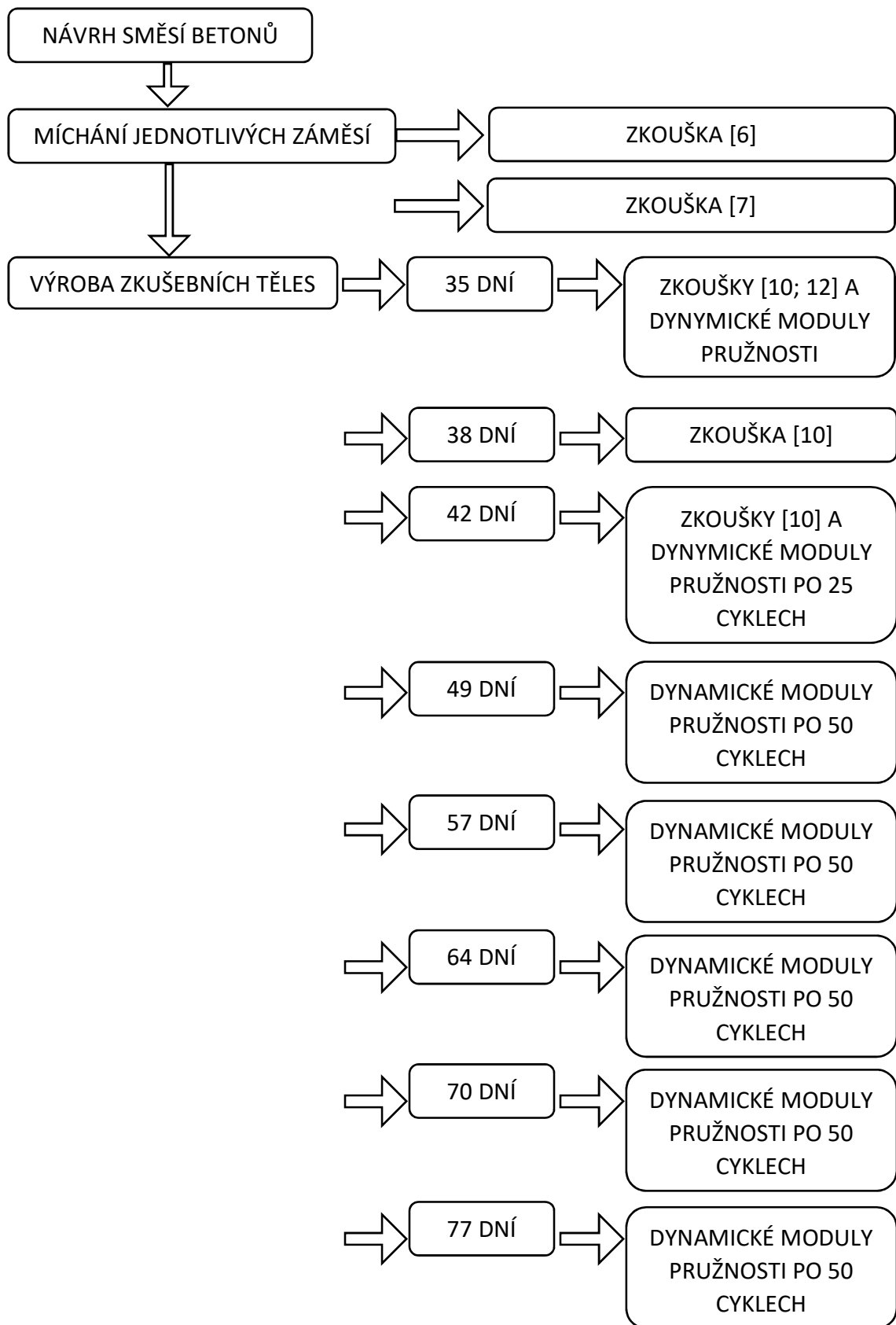
Obr. 16 Lom po zkoušce tříbodovým ohybem u vzorku betonu G

Na trámčích byly určeny hodnoty dynamických modulů pružnosti betonů a to rezonanční a ultrazvukovou metodou. Na základě těchto hodnot byly vybrány od každého druhu betonu 3 referenční trámce, které byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za obyhu a 3 trámce, které byly určeny pro zkoušení mrazuvzdornosti a určení změny pružnosti betonů v průběhu zmrazování. Pružnost byla sledována pomocí dynamických modulů pružnosti $E_{dyn,FL}$, $E_{dyn,FF}$ a $E_{dyn,U}$. Ty byly určovány vždy po 25 zmrazovacích cyklech.

Další zkouškou, která se zabývá trvanlivostí betonu je Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL). Výsledky této zkoušky jsou však ovlivněny mnoha faktory jako je už samotná výroba zkušebních těles, příprava rozmrazovací látky, uložení těles do roztoku, manipulace s tělesy během zkoušení, tvar těles, odečítání výsledných hodnot a v neposlední řadě postup výpočtu výsledků. Výsledky této zkoušky určitě nějakou hodnotu mají, avšak vyznačují se nejistou opakovatelností a reprodukovatelností. Zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení CHRL je také velice náročná časově [13]. Kvůli výše uvedeným důvodům nebyla tato zkouška pro účely bakalářské práce použita.



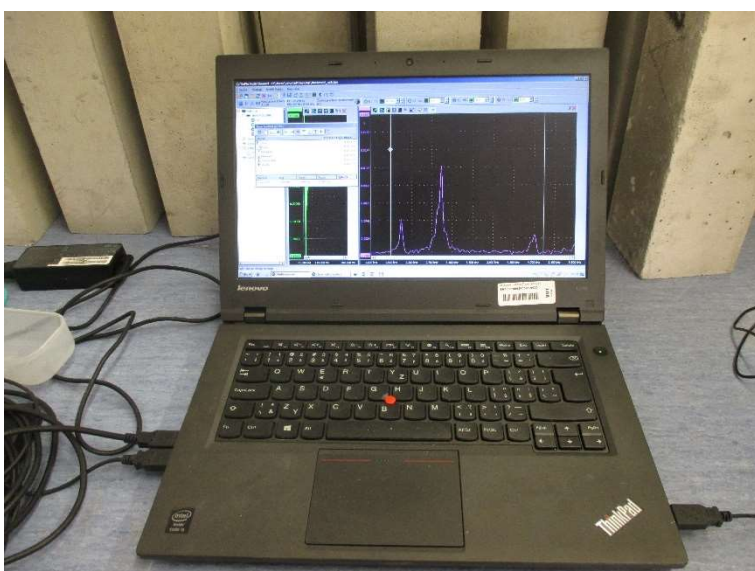
Obrázek 17 Schéma prováděných zkoušek vzorků betonů A,B a C



Obrázek 18 Schéma prováděných zkoušek vzorků betonů D,E,F a G



Obr. 19 Měřící sestava pro rezonanční metodu



Obr. 20 Grafický výstup rezonanční metody



Obr. 21 Měření doby průchodu impulzu UZ vlnění vzorkem

3.2 Suroviny použité pro výrobu betonu

3.2.1 Cement

Byl použit cement CEM II/B-S 32,5 R Mokrý.

3.2.2 Voda

Byla použita voda z vodovodního řádu laboratoře BETOTECH.

3.2.3 Kamenivo

Byla použita následující kameniva:

Drobné kamenivo těžené, frakce 0 – 4 mm Bratčice

Drobné kamenivo těžené, frakce 0 – 4 mm Tovačov

Hrubé kamenivo těžené, frakce 4 – 8 mm Tovačov

Hrubé kamenivo těžené, frakce 8 – 16 mm Tovačov

Hrubé kamenivo těžené, frakce 11 – 22 mm Tovačov

Hrubé kamenivo drcené, frakce 4 – 8 mm Luleč

Hrubé kamenivo drcené, frakce 8 – 16 mm Luleč

Hrubé kamenivo drcené, frakce 11 – 22 mm Luleč

3.2.4 Přísady

Byla použita plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 4035 a provzdušňovací přísada Sika LPSA 94.

3.3 Složení jednotlivých betonů

Tab. 3: Složení betonů

| Pro objem 1 m ³ , vodní součinitel 0,454 | | | | | | | | |
|---|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Označení záměsi | | A | B | C | D | E | F | G |
| CEM II/B-S 32,5 R Mokrý | kg/m ³ | 380 | 390 | 420 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Voda | | 190 | 195 | 211 | 185 | 185 | 185 | 185 |
| 0-4 Bratčice | | 766 | 773 | 755 | 763 | - | 760 | - |
| 0-4 Tovačov | | - | - | - | - | 746 | - | 744 |
| 4-8 Luleč/Tovačov | | 136 | 151 | 755 | 136 | 136 | 133 | 133 |
| 8-16 Luleč/Tovačov | | 463 | 762 | - | 461 | 461 | 449 | 449 |
| 11-22 Luleč/Tovačov | | 345 | - | - | 344 | 344 | 338 | 338 |
| SVC 4035 | | 1,71 | 1,76 | 2,10 | 2,00 | 1,80 | 1,80 | 1,60 |
| LPSA 94 | | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |

Každá receptura byla míchána v objemu 0,05 m³.

3.4 Výsledky zkoušek jednotlivých betonů

3.4.1 Zkoušky čerstvého betonu

Tab. 4: Výsledky zkoušek na čerstvém betonu

| Označení záměsi | | A | B | C | D | E | F | G |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teplota | °C | 22,5 | 21,1 | 21,7 | 22,1 | 21,8 | 21,6 | 22,2 |
| Objemová hmotnost | kg/m ³ | 2220 | 2232 | 2164 | 2230 | 2250 | 2190 | 2220 |
| Sednutí kužele | mm | 210 | 220 | 210 | 200 | 220 | 180 | 220 |
| Obsah vzduchu | % | 6,0 | 6,0 | 6,5 | 5,5 | 5,5 | 6,5 | 6,0 |

Dle hodnot sednutí kužele patří všechny betony až na výjimku (F – S4) do stupně konzistence S5. Lze tedy říci, že byl požadavek na to, aby měli betony stejnou konzistenci dodržen.

3.4.2 Pevnost v tlaku a objemová hmotnost

Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti byly určovány vždy na sadě tří zkušebních tělesech (krychlí o délce hrany 150 mm). Hodnoty uvedené v tabulce 5 jsou jejich průměrem.

Tab. 5: Pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti betonů

| Označení záměsi | | A | B | C | D | E | F | G |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_{c,cube,28}$ | MPa | 45,5 | 48,0 | 46,7 | 51,4 | 54,6 | 44,9 | 49,9 |
| Objemová hmotnost | kg/m ³ | 2260 | 2250 | 2200 | 2270 | 2270 | 2230 | 2270 |

3.4.3 Hloubka průsaku tlakovou vodou

Zkoušky hloubek průsaků byly prováděny na sadách tří zkušebních těles (krychlích o délce hrany 150 mm).

Tab. 6: Výsledky hloubek průsaků tlakovou vodou

| Označení záměsi | | A | B | C | D | E | F | G |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Průměrná hloubka průsaku | mm | 15 | 18 | 15 | 27 | 17 | 15 | 15 |
| Maximální hloubka průsaku | mm | 18 | 31 | 18 | 39 | 35 | 21 | 18 |



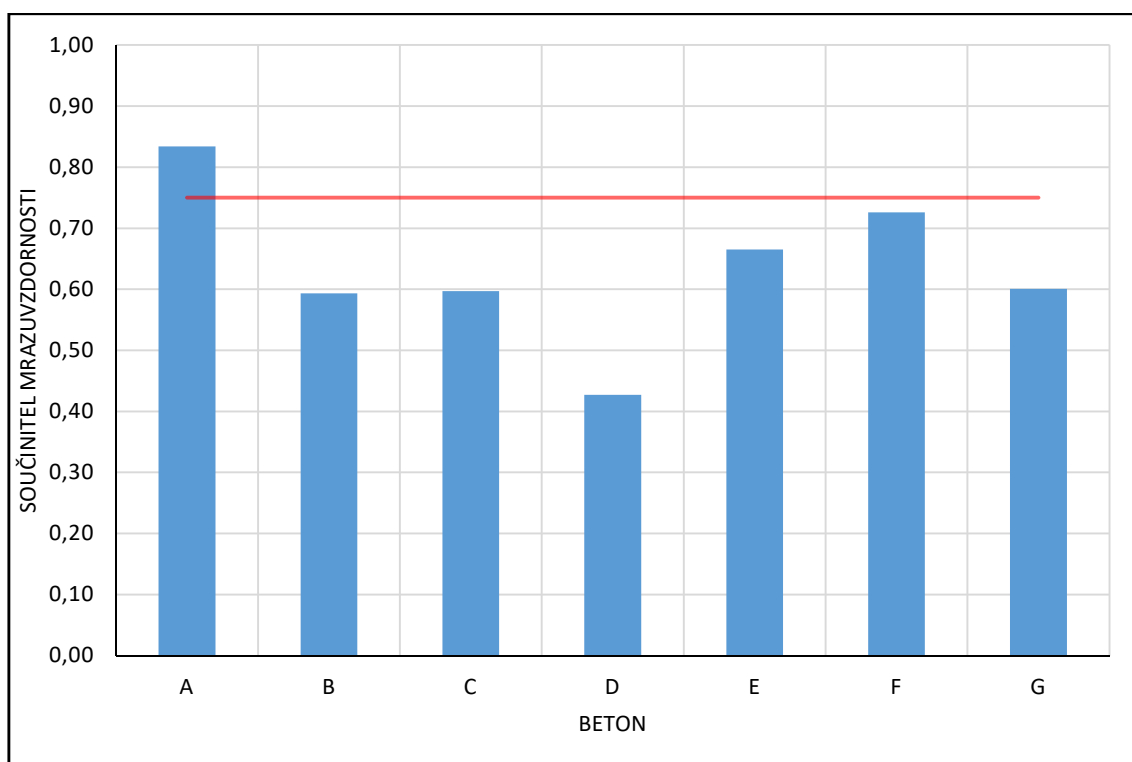
Obrázek 22 Ukázka hloubky průsaku tlakovou vodou [10] na vzorku betonu E

3.4.4 Mrazuvzdornost

Tab. 7: Pevnosti v tahu před a po zmrazování a součinitele mrazuvzdornosti betonů

| beton | A | B | C | D | E | F | G |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pevnost v tahu před zmrazováním [MPa] | 3,73 | 3,79 | 3,38 | 3,90 | 4,68 | 3,22 | 3,40 |
| Pevnost v tahu po zmrazování [MPa] | 3,11 | 2,25 | 2,02 | 1,66 | 3,11 | 2,34 | 2,04 |
| Součinitel mrazuvzdornosti | 0,83 | 0,59 | 0,60 | 0,43 | 0,67 | 0,73 | 0,60 |

Graf 1: Součinitele mrazuvzdornosti betonů



Z výsledků součinitelů mrazuvzdornosti vyplývá, že podle ČSN 73 1322 [11] je mrazuvzdorný pouze beton A. Naopak beton D, který má velice podobné složení jako beton A (viz. kap. 3.3) vyšel z této zkoušky jako nejméně odolný.

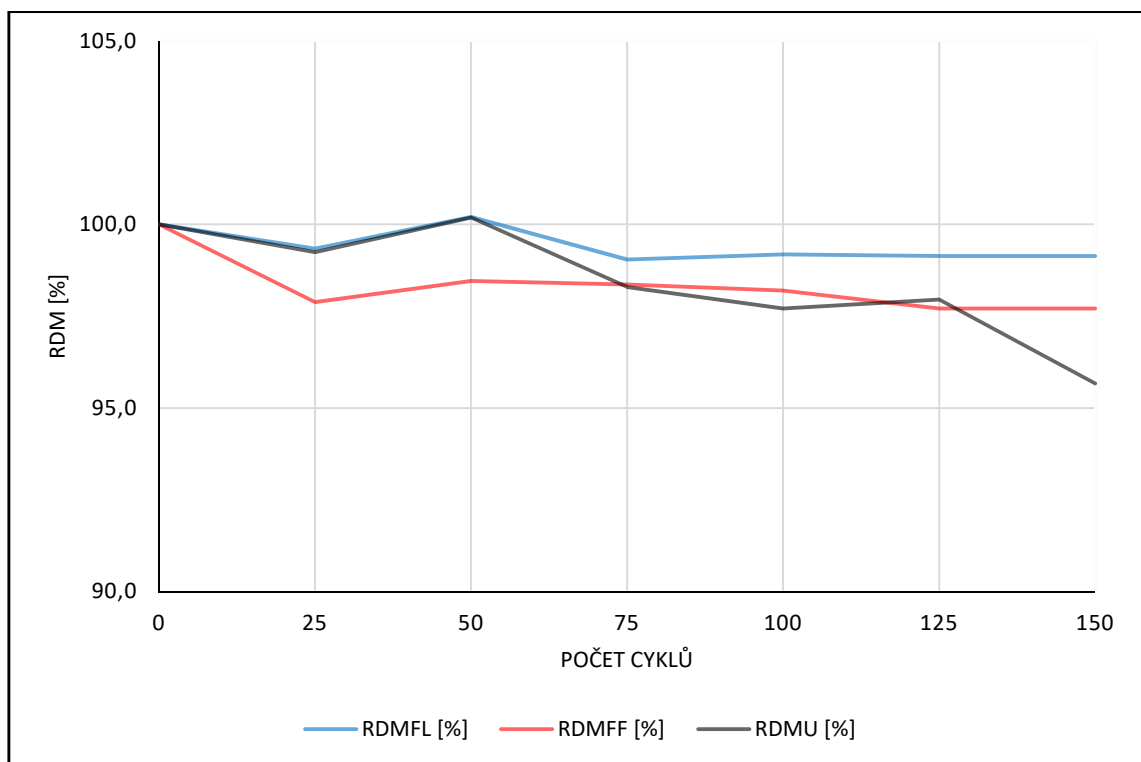
3.4.5 Dynamické moduly pružnosti

Výsledky betonu A:

Tab. 8: Dynamické moduly pružnosti betonu A

| [cyklus] | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 34,88 | 34,65 | 34,95 | 34,55 | 34,60 | 34,58 | 34,58 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 35,35 | 34,60 | 34,81 | 34,77 | 34,72 | 34,54 | 34,54 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 36,52 | 36,25 | 36,59 | 35,90 | 35,68 | 35,77 | 34,94 |
| RDM_{FL} [%] | 100,0 | 99,3 | 100,2 | 99,0 | 99,2 | 99,1 | 99,1 |
| RDM_{FF} [%] | 100,0 | 97,9 | 98,5 | 98,4 | 98,2 | 97,7 | 97,7 |
| RDM_U [%] | 100,0 | 99,2 | 100,2 | 98,3 | 97,7 | 98,0 | 95,7 |

Graf 2: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton A



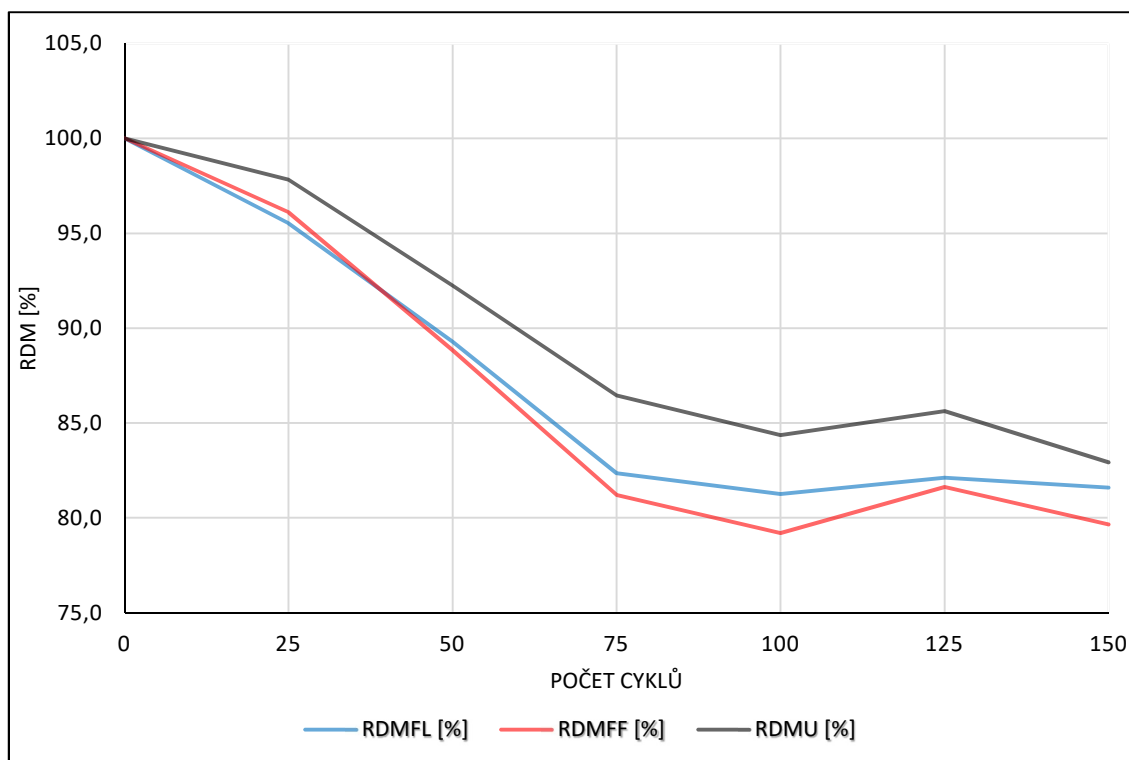
Beton A, který obsahuje všechny tři frakce hrubého drceného kameniva, prakticky nezměnil svoji pružnost v průběhu 150 zmrazovacích cyklů. Podle [11] je beton A mrazuvzdorný.

Výsledky betonu B:

Tab. 9: Dynamické moduly pružnosti betonu B

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 34,33 | 32,80 | 30,65 | 28,27 | 27,89 | 28,19 | 28,01 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 33,84 | 32,52 | 30,06 | 27,48 | 26,80 | 27,63 | 26,96 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 34,92 | 34,16 | 32,21 | 30,19 | 29,46 | 29,90 | 28,96 |
| RDM _{FL} [%] | 100,0 | 95,53 | 89,29 | 82,35 | 81,25 | 82,12 | 81,60 |
| RDM _{FF} [%] | 100,0 | 96,10 | 88,83 | 81,20 | 79,20 | 81,63 | 79,66 |
| RDM _U [%] | 100,0 | 97,83 | 92,25 | 86,46 | 84,37 | 85,62 | 82,93 |

Graf 3: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton B



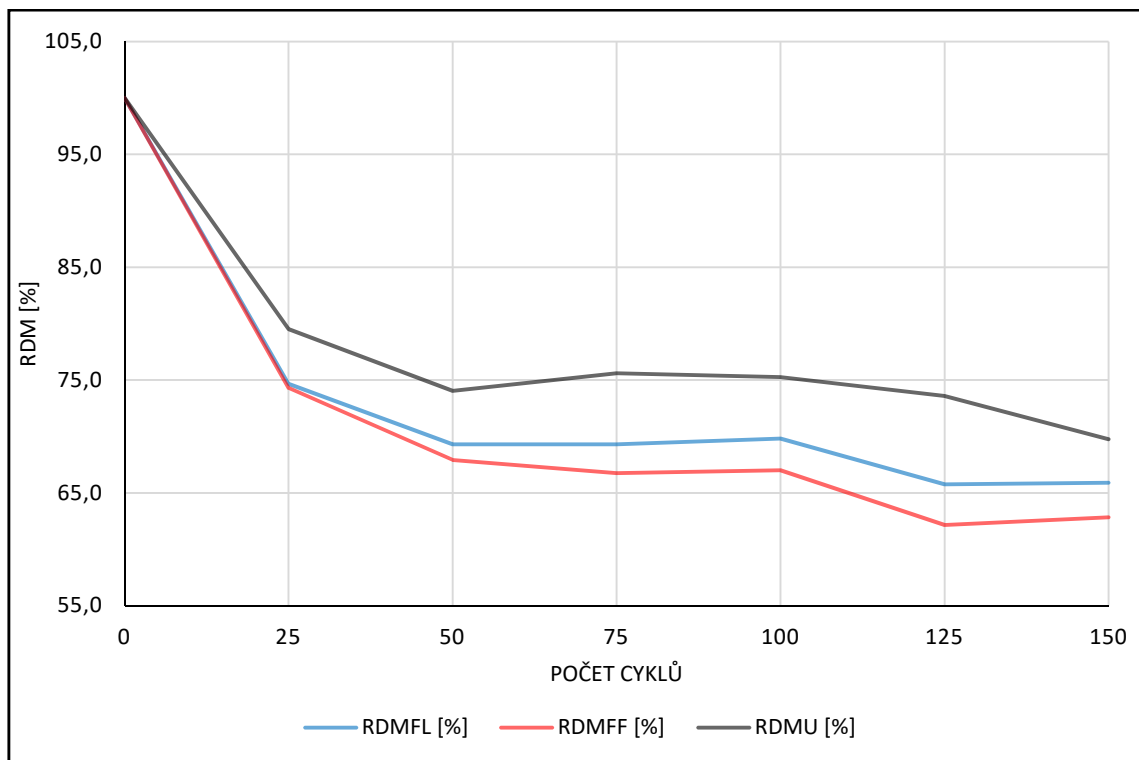
Beton B obsahuje frakce 4/8 a 8/16 hrubého drceného kameniva. U tohoto betonu klesala pružnost až do 75 cyklů. Zde se ustálila na 82 % původní hodnoty. Podle [11] je beton B mrazuvzdorný.

Výsledky betonu C:

Tab. 10: Dynamické moduly pružnosti betonu C

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 31,71 | 23,67 | 21,97 | 21,97 | 22,13 | 20,85 | 20,89 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 31,17 | 23,16 | 21,16 | 20,80 | 20,88 | 19,37 | 19,58 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 31,96 | 25,41 | 23,66 | 24,16 | 24,05 | 23,52 | 22,29 |
| RDM _{FL} [%] | 100,0 | 74,66 | 69,30 | 69,30 | 69,80 | 65,76 | 65,88 |
| RDM _{FF} [%] | 100,0 | 74,29 | 67,90 | 66,74 | 66,99 | 62,15 | 62,84 |
| RDM _U [%] | 100,0 | 79,51 | 74,05 | 75,60 | 75,25 | 73,59 | 69,76 |

Graf 4: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton C



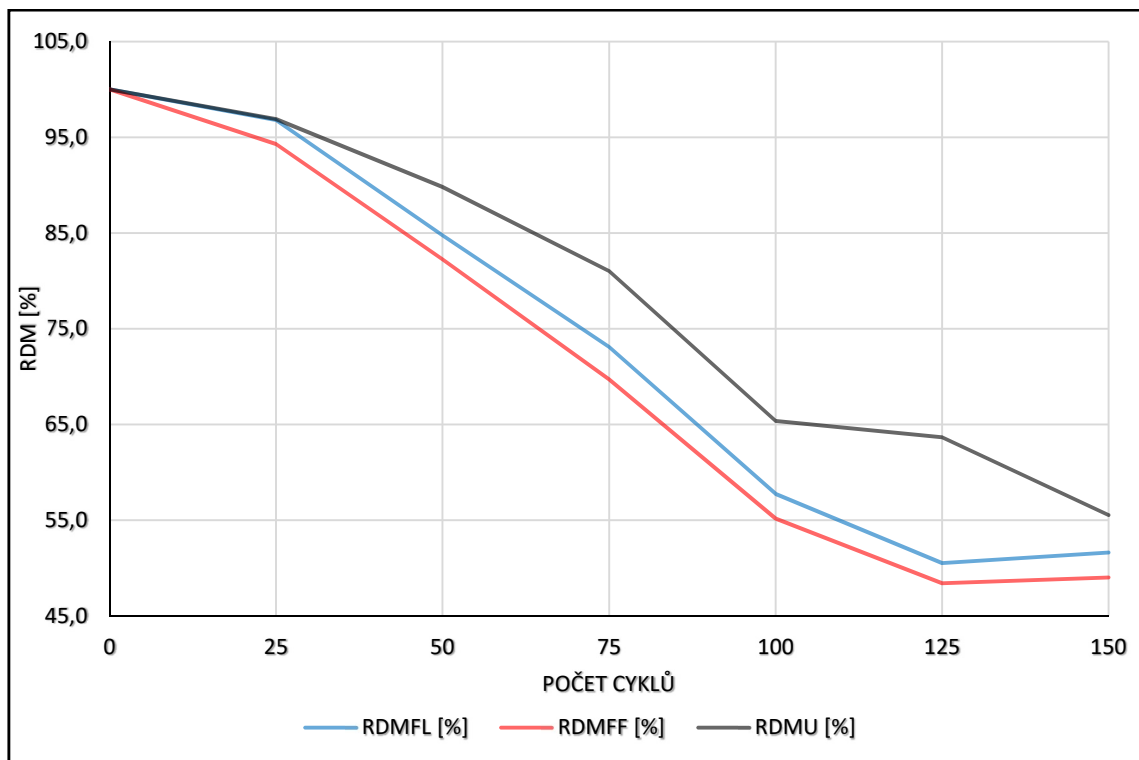
Beton C obsahuje pouze hrubé drcené kamenivo frakce 4/8. Zde pružnost klesla již po 25 cyklech na 75 %, potom se relativně ustálila kolem 64 %. Z výsledků vyplývá, že podle [11] beton C nepatří mezi mrazuvzdorné.

Výsledky betonu D:

Tab. 11: Dynamické moduly pružnosti betonu D

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 36,81 | 35,63 | 31,20 | 26,90 | 21,25 | 18,59 | 18,99 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 37,12 | 35,01 | 30,53 | 25,87 | 20,48 | 17,96 | 18,19 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 37,47 | 36,30 | 33,65 | 30,35 | 24,49 | 23,84 | 20,80 |
| RDM_{FL} [%] | 100,0 | 96,80 | 84,75 | 73,07 | 57,72 | 50,52 | 51,60 |
| RDM_{FF} [%] | 100,0 | 94,30 | 82,24 | 69,69 | 55,16 | 48,39 | 49,01 |
| RDM_U [%] | 100,0 | 96,89 | 89,82 | 81,00 | 65,37 | 63,64 | 55,51 |

Graf 5: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton D



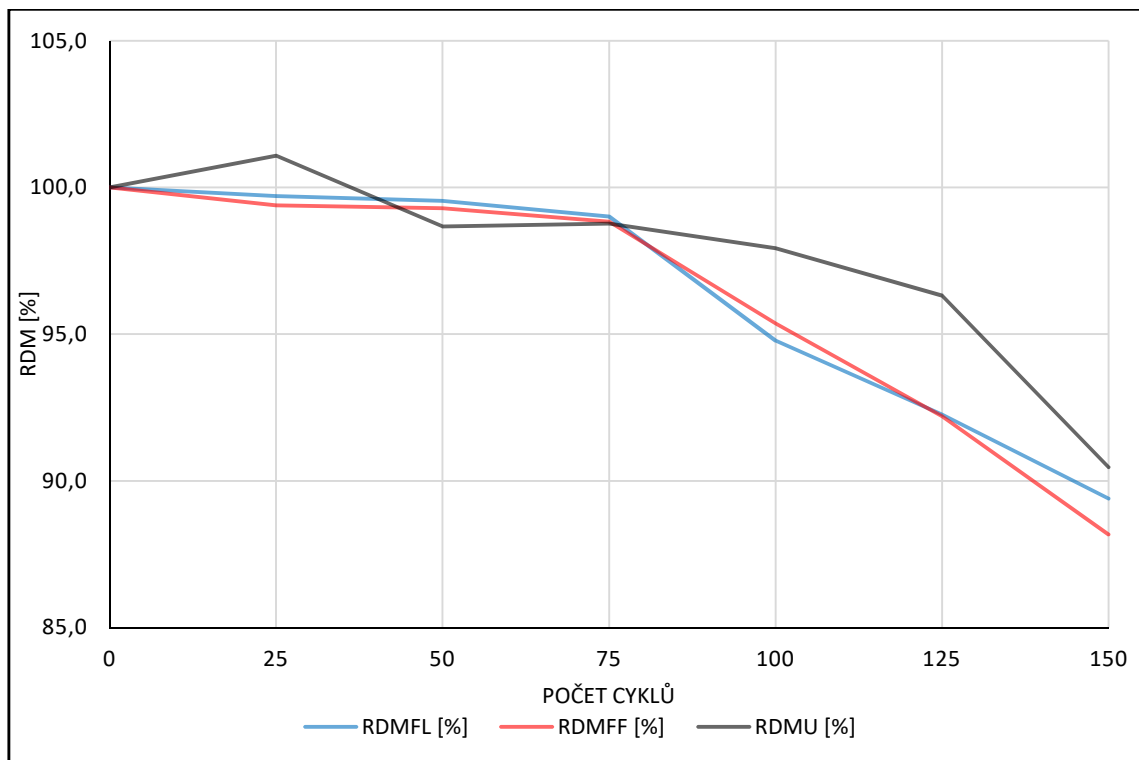
V betonu D jsou obsaženy všechny tři frakce hrubého drceného kameniva v prakticky stejném poměru jako u betonu A, ale výsledky pružnosti se diametrálně liší. Zatímco u betonu A byl pozorován minimální pokles, pružnost betonu D klesala už od začátku zmrazování až do 125 cyklů, kde se ustálila na 50 % původní hodnoty. Podle [11] není beton D mrazuvzdorný.

Výsledky betonu E:

Tab. 12: Dynamické moduly pružnosti betonu E

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|--------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 37,54 | 37,43 | 37,37 | 37,17 | 35,57 | 34,63 | 33,56 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 37,71 | 37,48 | 37,44 | 37,27 | 35,96 | 34,77 | 33,25 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 37,75 | 38,16 | 37,25 | 37,28 | 36,97 | 36,35 | 34,15 |
| RDM_{FL} [%] | 100,0 | 99,71 | 99,55 | 99,01 | 94,77 | 92,26 | 89,40 |
| RDM_{FF} [%] | 100,0 | 99,39 | 99,29 | 98,84 | 95,36 | 92,20 | 88,17 |
| RDM_U [%] | 100,0 | 101,08 | 98,67 | 98,77 | 97,93 | 96,31 | 90,46 |

Graf 6: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton E



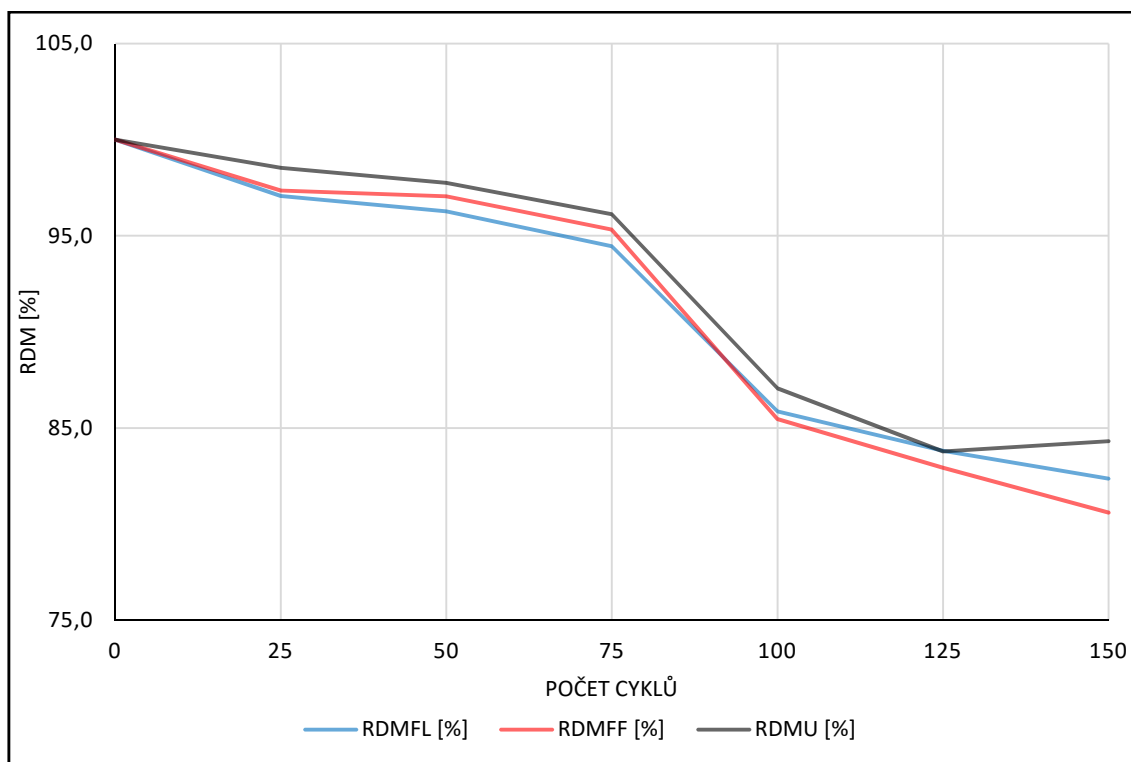
Beton E má totožné složení hrubého kameniva jako beton D, tyto betony se však liší použitím drobného kameniva jiného původu. Pružnost u tohoto betonu začala klesat po 75 cyklech a po 150 cyklech na 89 % původní hodnoty. Dle [11] je beton E mrazuvzdorný.

Výsledky betonu F:

Tab. 13: Dynamické moduly pružnosti betonu F

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 33,00 | 32,03 | 31,77 | 31,17 | 28,34 | 27,66 | 27,18 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 32,64 | 31,78 | 31,68 | 31,11 | 27,90 | 27,07 | 26,31 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 34,14 | 33,64 | 33,37 | 32,82 | 29,72 | 28,61 | 28,79 |
| RDM_{FL} [%] | 100,0 | 97,07 | 96,27 | 94,45 | 85,87 | 83,82 | 82,37 |
| RDM_{FF} [%] | 100,0 | 97,35 | 97,05 | 95,32 | 85,46 | 82,94 | 80,60 |
| RDM_U [%] | 100,0 | 98,53 | 97,75 | 96,12 | 87,07 | 83,79 | 84,31 |

Graf 7: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton F



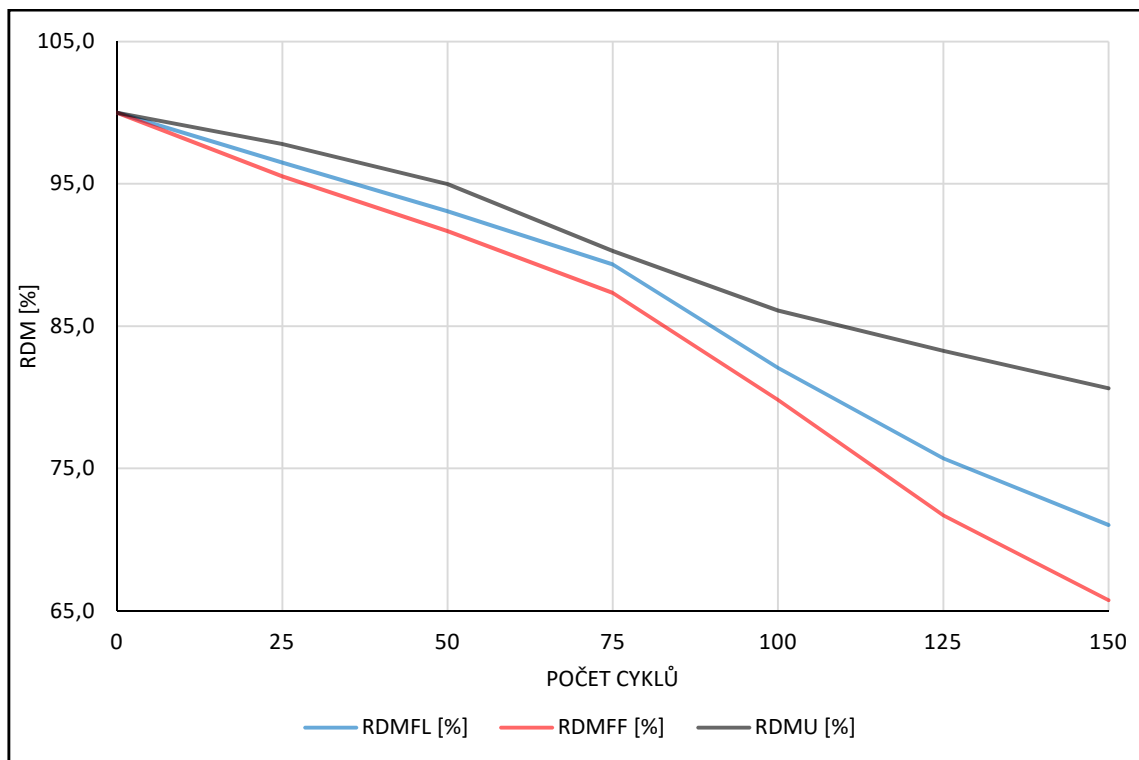
Beton F obsahuje těžené hrubé kamenivo všech 3 frakcí, poměrově ve stejném množství jako betony D a E. Pružnost od začátku mírně klesala. Po 100 cyklech nastal propad na 85% a potom zase mírné klesání. Konečná hodnota pružnosti klesla na 82 % původní. Dle [11] je beton F mrazuvzdorný.

Výsledky betonu G:

Tab. 14: Dynamické moduly pružnosti betonu G

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_{dyn,FL}$ [MPa] | 34,63 | 33,41 | 32,23 | 30,94 | 28,42 | 26,21 | 24,59 |
| $E_{dyn,FF}$ [MPa] | 34,88 | 33,32 | 31,98 | 30,46 | 27,84 | 25,01 | 22,93 |
| $E_{dyn,U}$ [MPa] | 35,12 | 34,34 | 33,36 | 31,71 | 30,23 | 29,24 | 28,31 |
| RDM _{FL} [%] | 100,0 | 96,48 | 93,07 | 89,35 | 82,07 | 75,70 | 71,02 |
| RDM _{FF} [%] | 100,0 | 95,52 | 91,68 | 87,34 | 79,83 | 71,71 | 65,74 |
| RDM _U [%] | 100,0 | 97,79 | 94,99 | 90,29 | 86,09 | 83,25 | 80,63 |

Graf 8: Procentuální závislost dynamických modulů pružnosti na počtu zmrazovacích cyklů pro beton G



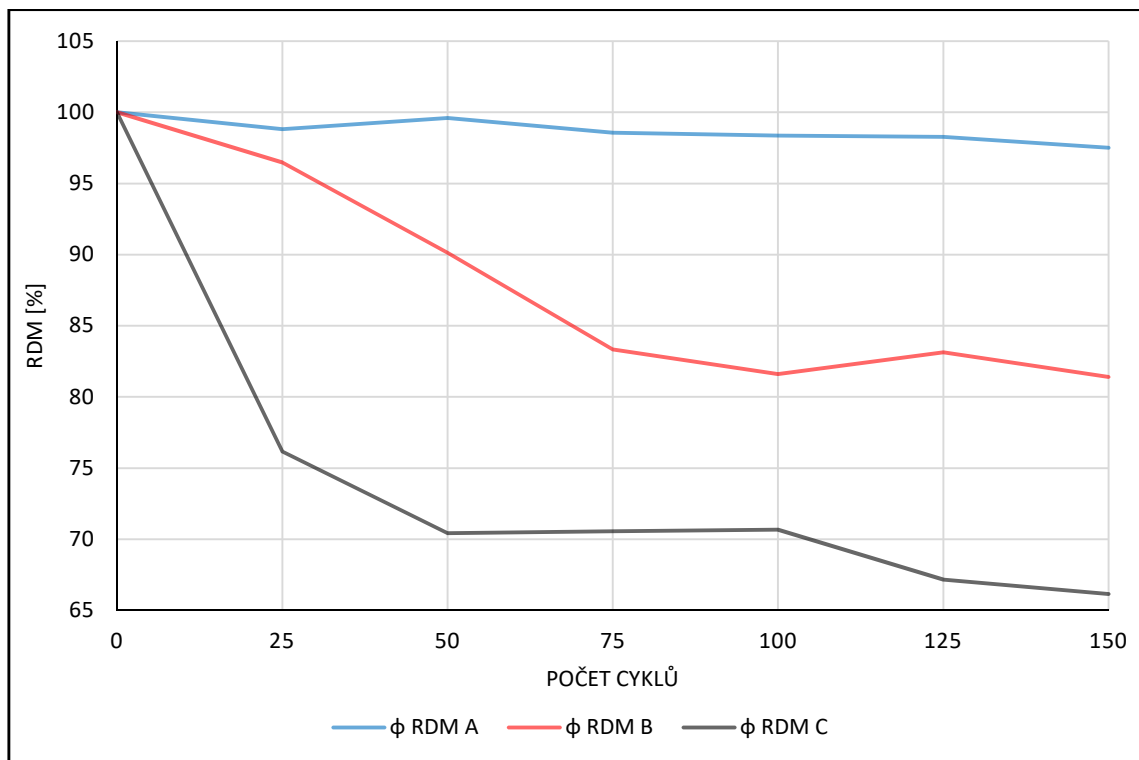
Beton G má totožné složení hrubého kameniva jako beton F, tyto betony se však liší použitím drobného kameniva jiného původu. Pružnost klesá vcelku rovnoměrně od začátku až do konce zkoušení. Konečná hodnota pružnosti klesla na 70 % původní. Dle [11] není beton G mrazuvzdorný

Závislost trvanlivosti a pružnosti betonu na frakci kameniva:

Tab. 15: Průměrné hodnoty RDM betonů A, B a C

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| φ RDM A | 100 | 98,82 | 99,61 | 98,57 | 98,36 | 98,27 | 97,51 |
| φ RDM B | 100 | 96,48 | 90,12 | 83,34 | 81,61 | 83,13 | 81,40 |
| φ RDM C | 100 | 76,15 | 70,42 | 70,55 | 70,68 | 67,17 | 66,16 |

Graf 9: Závislost trvanlivosti a pružnosti betonu na frakci kameniva



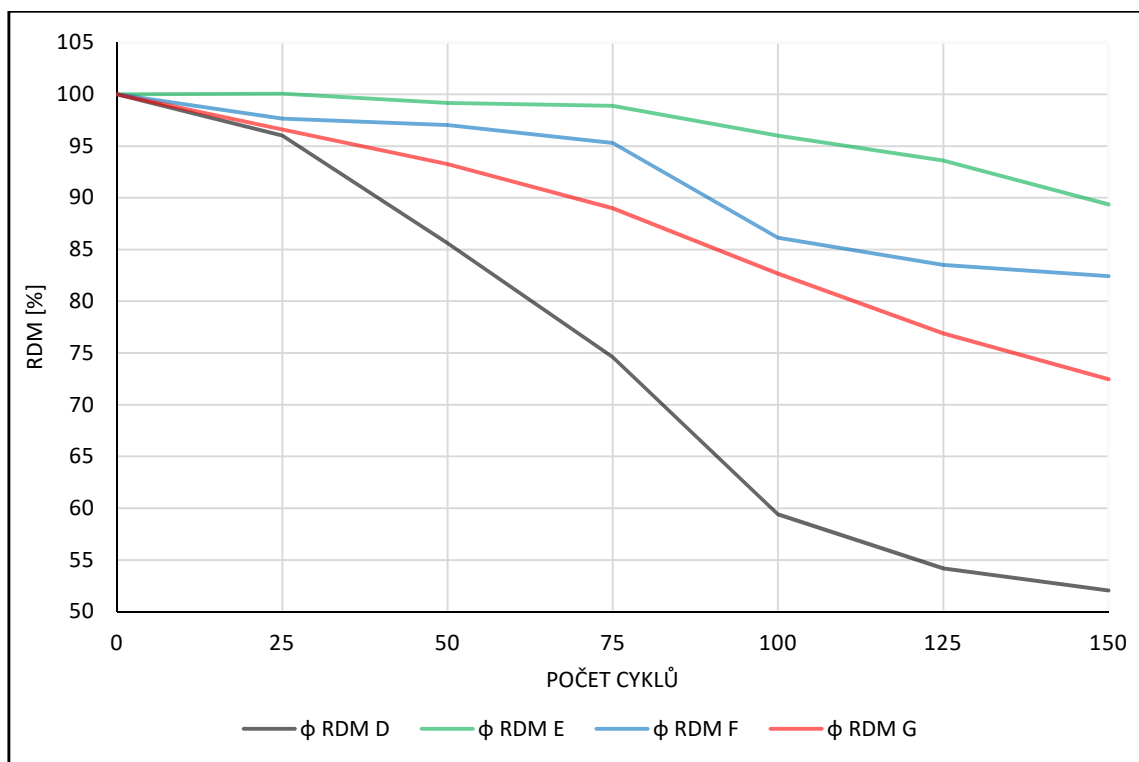
U betonu A se hodnoty pružnosti v průběhu zmrazování prakticky neliší, pružnost betonu B klesla na 81% a pružnost betonu C na 66%. Z těchto hodnot vyplývá, že trvanlivost a pružnost betonu je závislá na frakci kameniva použitého do betonu. Beton, ve kterém jsou použity tři frakce hrubého kameniva (4/8, 8/16 a 11/22) má trvanlivost o 16% lepší než beton se dvěma frakcemi (4/8 a 8/16) a o 31% lepší než beton s jednou frakcí (4/8).

Závislost trvanlivosti a pružnosti betonu na frakci kameniva:

Tab. 16: Průměrné hodnoty RDM betonů D,E,F a G

| počet cyklů | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|-------------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| φ RDM D | 100 | 96,00 | 85,61 | 74,59 | 59,42 | 54,18 | 52,04 |
| φ RDM E | 100 | 100,06 | 99,17 | 98,87 | 96,02 | 93,59 | 89,35 |
| φ RDM F | 100 | 97,65 | 97,03 | 95,30 | 86,13 | 83,52 | 82,43 |
| φ RDM G | 100 | 97,65 | 97,03 | 95,30 | 86,13 | 83,52 | 82,43 |

Graf 10: Závislost trvanlivosti a pružnosti betonu na frakci kameniva



V závislosti na obsahu jak jemného tak hrubého kameniva (viz. kap. 3.3) je možné hodnotit výsledky z více pohledů. Pružnost betonu D klesla na 52 %, betonu E na 89 %, betonu F na 82 % a betonu G na 72 %. U betonů s jemným kamenivem z Bratčic (D a F) je trvanlivější beton obsahující hrubé kamenivo těžené-Tovačov (F). Naopak u betonů s jemným kamenivem z Tovačova (E a G) je trvanlivější beton obsahující hrubé kamenivo drcené-Luleč (E).

3.5 Zatřídění betonů podle ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Beton A – C 30/37, XF3, D_{\max} 22, S5

Beton B – C 35/45, X0, D_{\max} 16, S5

Beton C – C 35/45, X0, D_{\max} 8, S5

Beton D – C 40/50, X0, D_{\max} 22, S5

Beton E – C 40/50, X0, D_{\max} 22, S5

Beton F – C 30/37, X0, D_{\max} 22, S5

Beton G – C 35/45, X0, D_{\max} 22, S5

4 Závěr

Podle zkoušky mrazuvzdornosti [11] je mrazuvzdorný pouze beton A. Nelze však opomenout zkoušky dynamických modulů pružnosti betonů během zmrazování. Výsledky těchto zkoušek jsou mnohem citlivější na změny vnitřní struktury betonů [8]. Podle těchto výsledků lze mezi mrazuvzdorné zařadit i některé další betony. Při tomto postupu je nutné uvést i počet cyklů, do kterých byl beton ještě mrazuvzdorný. Vyhodnocení je vhodné provádět citlivě i s přihlédnutím k výsledkům normové zkoušky. Lze tedy konstatovat, že beton B je mrazuvzdorný do 75 cyklů, beton E do 125 cyklů a betony F a G do 75 cyklů. Betony C a D nelze ani podle tohoto postupu zařadit mezi mrazuvzdorné.

Z výsledků vyplývá, že volba kameniva má značný vliv na výslednou trvanlivost a odolnost betonu. Při zkoušení dynamických modulů pružnosti před zmrazováním se potvrdil předpoklad vlivu druhu kameniva na tuto charakteristiku betonu. Tento vliv je podrobněji popsán v [2]. Trend závislosti trvanlivosti a pružnosti betonu na frakci hrubého kameniva je takový, že beton obsahující více frakcí ve vhodném poměru je trvanlivější než beton s méně frakcemi. Tento trend lze vysvětlit tím, že při použití více frakcí se lépe vyplní mezery mezi hrubým kamenivem a beton se tak stává houževnatějším. Z toho také vyplývá menší spotřeba cementového tmelu, ve kterém se tvoří mikrotrhliny během zmrazování. Trend závislosti trvanlivosti a pružnosti betonu na původu kameniva není z výsledků této práce nějak konkrétní. Lze však konstatovat, že lepší výsledky měli betony (E a F), které obsahovali jemné a hrubé kamenivo odlišného původu.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 7. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] CIKRLE, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení. *Beton TKS*. 2010, **2010**(5), 5.
- [3] ŠŤASTNÝ, Antonín. *Vliv přípravy a úpravy zkušebních těles pro zkoušení trvanlivosti betonu a betonových výrobků v prostředí XF*. Brno, 2013. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [4] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie Modul BIO2-MO1 Technologie betonu, stavební keramika*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [5] ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [6] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [7] ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [8] CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. *TZB-info*. Brno, 2014. ISSN 1801-4399.
- [9] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie Modul BIO2-MO4 Laboratorní cvičení*. Brno: VUT v Brně, FAST, 2004.
- [10] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [11] ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1. Praha: ÚNMZ, 1969.
- [12] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Tomáš VYMAZAL, Tereza KOMÁRKOVÁ a Romana HALAMOVÁ. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek - metody, praxe, problémy. *Beton TKS*. 2017, **17**(22017), 6.