



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ**

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VLIV MNOHONÁSOBNÉHO ZATĚŽOVÁNÍ  
NA VYBRANÉ PARAMETRY LEHKÉHO BETONU**

INFLUENCE OF MULTIPLE CYCLIC LOADING ON THE SELECTED PARAMETERS  
OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Martin Alexa**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                        |                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Student</b>         | Bc. Martin Alexa                                                   |
| <b>Název</b>           | Vliv mnohonásobného zatěžování na vybrané parametry lehkého betonu |
| <b>Vedoucí práce</b>   | Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.                                          |
| <b>Datum zadání</b>    | 31. 3. 2017                                                        |
| <b>Datum odevzdání</b> | 12. 1. 2018                                                        |

V Brně dne 31. 3. 2017

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

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.

Odborné články pojednávající o zadané problematice, jako jsou např.:

Huňka, P.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Vokáč, M.: Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu – rekapitulace.

Misák, P.; Vymazal, T.: Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku.

Abdelgader, H. S.; Elbadan, A. S.; Diouri, A.; Khachani N.; Alami Talbi, M.: Concreting method that produce high modulus of elasticity.

Lee, B.; Kee, S. H.; Oh, T.; Kim, Y. Y.: Effect of Cylinder Size on the Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests.

Silva, R. V.; Vasco, R.; De Brito, J.; Dhir, R. K.: Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN ISO 1920-10, ČSN EN 206, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: rešerše pramenů – beton, zejména s lehkým pórovitým kamenivem; vlastnosti betonu, především pevnost v tlaku a modul pružnosti v tlaku; důraz na aspekty ovlivňující výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu; popis různých metod zkoušení modulu pružnosti betonu. Praktická část: zpracování plánu experimentu – sledování vlivu mnohonásobného zatěžování lehkého betonu na jeho pružnostní a pevnostní charakteristiky. Výroba zkušebních těles; provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody před i po zatěžování; provedení zatěžovacích zkoušek. Dále zpracování výsledků zkoušek, jejich vyhodnocení a formulace 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 VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá sledováním hodnot vybraných parametrů (zejména statického modulu pružnosti) lehkého betonu v tlaku před a po vícenásobném cyklickém zatěžování. Pomocí odporových tenzometrů byly měřeny deformace zkušebních těles při zatěžování. Cyklicky zatěžována byla zkušební tělesa tvaru válce průměru 150 mm a výšky 300 mm a bylo provedeno až 4 500 zatěžovacích cyklů, které vycházely ze zkoušky statického modulu pružnosti v tlaku. Z naměřených hodnot zatížení a deformací byl stanoven modul pružnosti v tlaku. Cílem práce je posouzení změny hodnoty statického modulu pružnosti a dalších vlastností lehkého betonu vlivem vícenásobného zatěžování.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lehký beton, modul pružnosti, vícenásobné cyklické zatěžování, pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, hmotnostní úbytek

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the observation of the values of selected parameters (especially the static modulus of elasticity) of light-weight concrete in compression before and after multiple cyclic loading. The deformation of test specimens during multiple cyclic loading were measured with resistive strain gauges. Test specimens (cylinders with a diameter of 150 mm and height of a 300 mm) were cyclically loaded and up to 4 500 loading cycles were performed. The aim of this thesis is assessment changes in the values of static modulus of elasticity depending on the number of loading cycles.

## **KEYWORDS**

Light-weight concrete, modulus of elasticity, multiple cyclic loading, compressive strength, tensile splitting strength, mass loss

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 10. 2017

---

Bc. Martin Alexa  
autor práce

# **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP**

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 10. 1. 2018

---

Bc. Martin Alexa  
autor práce

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Martin Alexa *Vliv mnohonásobného zatěžování na vybrané parametry lehkého betonu*. Brno, 2017. 74 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

*Tuto stránku s poděkováním bych chtěl věnovat především Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za jeho drahocenný čas a nedocenitelné rady, které mě provázely po celou dobu zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. za pomoc při měření praktické části, Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za rady a pomoc při výrobě zkušebních těles, stejný dík patří i zaměstnancům BETOTECHu, s.r.o. v Brně, kteří se na výrobě podíleli také. Rád bych také poděkoval Ing. Petru Misákovi, Ph.D. za rady při vyhodnocení naměřených dat z měření. V neposlední řadě patří poděkování Bc. Matěji Pokornému, kamarádovi, který mne naučil vše potřebné pro práci se softwarem Mathematica.*

*Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS a za finanční podpory standardního specifického projektu VUT č. FAST-S-17-4693 „Posouzení vlivu vícenásobného cyklického zatěžování na pevnostní a přetvárné charakteristiky lehkého konstrukčního betonu“.*



# Obsah

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. Úvod .....                              | 10 |
| 2. Cíle práce .....                        | 11 |
| 3. Teoretická část .....                   | 12 |
| 3.1 Lehký beton .....                      | 12 |
| 3.2 Kamenivo .....                         | 17 |
| 3.3 Statický modul pružnosti v tlaku ..... | 21 |
| 4. Experimentální část .....               | 30 |
| 4.1 Popis experimentu .....                | 30 |
| 4.2 Výroba zkušebních těles .....          | 30 |
| 4.3 Měření .....                           | 35 |
| 4.3.1 Dynamický modul pružnosti .....      | 36 |
| 4.3.2 Pevnost v tlaku .....                | 38 |
| 4.3.3 Pevnost v příčném tahu .....         | 40 |
| 4.3.4 Hmotnostní úbytek .....              | 41 |
| 4.3.5 Statický modul pružnosti .....       | 42 |
| 4.4 Výsledky měření .....                  | 46 |
| 5. Závěr .....                             | 65 |
| 6. Seznam použité literatury .....         | 67 |
| 7. Seznam obrázků a grafů .....            | 70 |
| 8. Seznam tabulek .....                    | 72 |
| 9. Seznam použitých symbolů a zkratk ..... | 73 |
| 10. Přílohy .....                          | 75 |
| 10.1. Deformační diagramy .....            | 75 |
| 10.1.1 Deformační diagram válce C-2 .....  | 75 |
| 10.1.2 Deformační diagram válce C-3 .....  | 75 |
| 10.1.3 Deformační diagram válce C-4 .....  | 76 |
| 10.1.4 Deformační diagram válce C-5 .....  | 76 |
| 10.1.5 Deformační diagram válce C-6 .....  | 77 |
| 10.1.6 Deformační diagram válce C-7 .....  | 77 |
| 10.1.7 Deformační diagram válce C-8 .....  | 78 |
| 10.1.8 Deformační diagram válce C-9 .....  | 78 |
| 10.1.9 Deformační diagram válce C-10 ..... | 79 |
| 10.2. Výstup z Minitabu .....              | 79 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 10.2.1 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ .....          | 79 |
| 10.2.2 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ .....         | 80 |
| 10.2.3 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{crf}$ .....         | 80 |
| 10.2.3 ANOVA pro dynamický modul pružnosti ve smyku $G_{cr}$ ..... | 81 |
| 10.2.4 ANOVA pro pevnost v tlaku $f_c$ .....                       | 81 |

# 1. Úvod

Použití lehkého betonu ve stavebnictví je stále častější, ať už pro rekonstrukce, nebo pro novostavby. Avšak první zmínky o výstavbě z betonu, ve kterém bylo použito lehké kamenivo, pocházejí již z antického období přibližně 3 000 let př. n. l., kdy byla v éře Harappské civilizace (doba bronzová) vybudována slavná města Mohenjo-Daro a Harappa. Římané stavěli z betonu, ve kterém byla použita pemza jako kamenivo. Některé stavby se dochovaly dodnes, jako například Colosseum, Římský pantheon a aquadukt Pont du Gard [1; 2].

Zmíněná pemza je používána do lehkých betonů dodnes v Itálii, Německu, Japonsku a na Islandu. Kvůli nedostupnosti lehkého kameniva ve zbytku světa narostla poptávka po umělém, průmyslově vyráběném lehkém plnivu do betonu. Stephen J. Hayde si nechal patentovat kamenivo „Haydite“ v roce 1918 a byl první, kdo zavedl technologii expandaci břidlic [2].

Na území Evropy bylo první průmyslově vyráběné lehké kamenivo použito v Německu v roce 1935, ale výrobu i aplikace provázela řada potíží, a proto lze obecně považovat za zakladatele výroby tohoto typu kameniva Dánsko, kde byla založena továrna v roce 1939. Dodnes se v Dánsku vyrábí lehké kamenivo nesoucí název Leca. Na území Československa byly vybudovány dva závody vyrábějící lehké kamenivo v roce 1955 a 1964 [2].

V roce 1958 byla postavena ve Velké Británii, konkrétně v Bentofrdu, administrativní budova z lehkého vyztuženého betonu. Další krok ve vývoji byla výroba lehkého vysokopevnostního betonu, který probíhal především v Norsku. Potřeba výstavby mostních konstrukcí a plovoucích plošin, kde je nízká objemová hmotnost nanejvýš vhodná, avšak je nutná vysoká pevnost v tlaku, byla prvotním impulsem pro vývoj tohoto stavebního materiálu [2].

## 2. Cíle práce

Každá konstrukce je opakovaně a mnohonásobně zatěžovaná, ať už dopravou, lidmi nebo povětrnostními vlivy. Protože v poslední době je stále více používán ve stavebnictví lehký beton, je vhodné znát účinky od těchto typů zatížení, nejen na jeho pevnost, ale také na modul pružnosti.

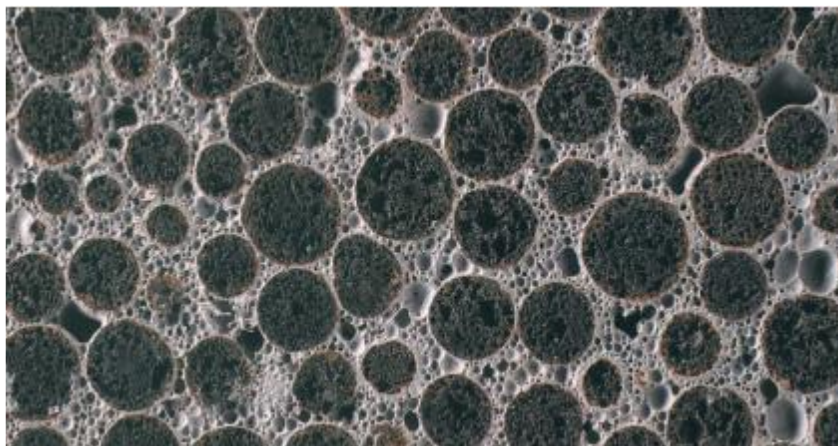
Cílem teoretické části této práce je rešerše pramenů betonu, zejména s lehkým pórovitým kamenivem a jeho vlastnosti, jako je pevnost v tlaku, nebo aspekty ovlivňující výslednou hodnotu modulu pružnosti. Dále cílem bylo popsat různé metody zkoušení modulu pružnosti lehkého betonu.

Cílem praktické části je zpracování plánu experimentu, výroba zkušebních těles a měření. Předmětem sledování je vliv mnohonásobného zatěžování lehkého betonu na jeho pružnostní a pevnostní charakteristiky. Na zkušebních tělesech se stanoví dynamické moduly pružnosti nedestruktivními metodami, konkrétně pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody. Dynamické moduly se stanoví během zrání betonu, a také před a po provedení zatěžovacích zkoušek. Následně jsou zpracovány výsledky těchto zkoušek, vyhodnocení těchto výsledků a formulace vyplývajících závěrů.

### 3. Teoretická část

#### 3.1 Lehký beton

Lehký beton (dále LC) je definován svou objemovou hmotností. V normě ČSN EN 206 [3] je popisován jako kompozitní materiál, který má objemovou hmotnost ve vysušeném stavu v sušárně vyšší než  $800 \text{ kg/m}^3$  a nižší než  $2\,000 \text{ kg/m}^3$ . Snížení objemové hmotnosti lze dosáhnout přímo, vnesením vzduchu do cementového tmele pomocí pěnотvorných přísad, nebo nepřímo vylehčením betonu lehkým pórovitým kamenivem. Dále lze objemovou hmotnost betonu zmenšit kombinací obou těchto postupů, výsledek je poté zobrazen na Obr. 1 [3; 4].



*Obr. 1 Vylehčení betonu kombinací pěnотvorných přísad a pórovitým kamenivem [5]*

Rozdělení betonů podle objemové hmotnosti  $\rho$  v  $\text{kg/m}^3$  je následující [3]:

- lehký beton  $800 \geq \rho \geq 2000$ ,
- obyčejný beton  $2000 > \rho \geq 2600$ ,
- těžký beton  $\rho > 2600$ .

Dále se lehký beton dělí do tříd podle objemové hmotnosti  $\rho$  v  $\text{kg/m}^3$  následovně [3]:

- LC 1,0 -  $800 \geq \rho \geq 1000$ ,
- LC 1,2 -  $1000 > \rho \geq 1200$ ,
- LC 1,4 -  $1200 > \rho \geq 1400$ ,
- LC 1,6 -  $1400 > \rho \geq 1600$ ,
- LC 1,8 -  $1600 > \rho \geq 1800$ ,
- LC 2,1 -  $1800 > \rho \geq 2000$ .

Podle struktury dělíme LC na [2]:

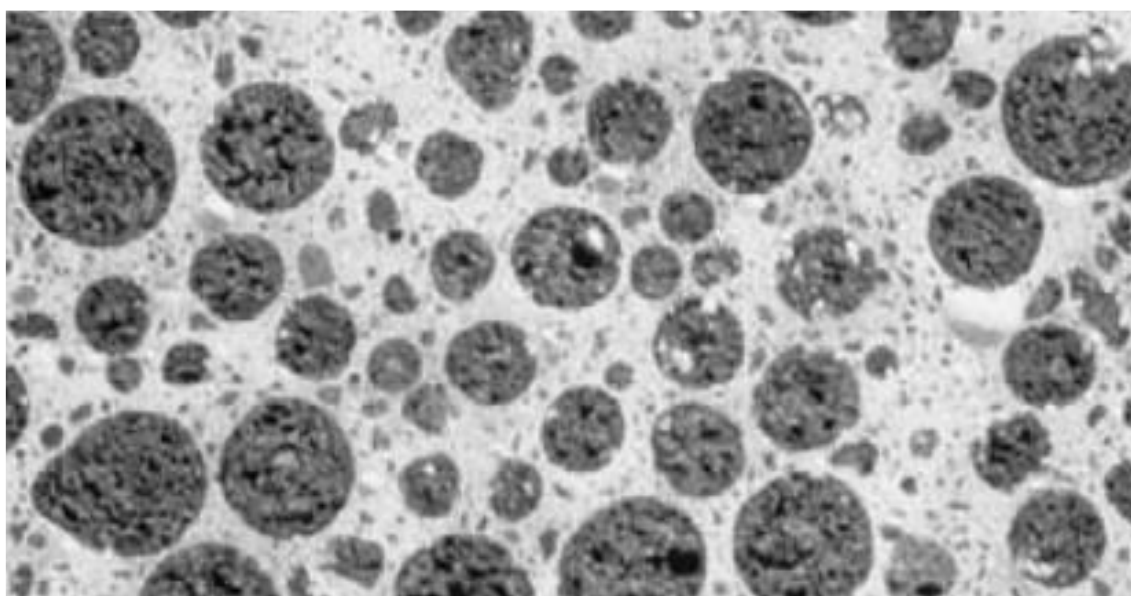
- mezerovitý,
- hutný,
- napěněný, provzdušněný.

Mezerovitý beton se vyrábí z kameniva, kde je použita hrubá frakce kameniva a jemné frakce jsou omezeny, nebo úplně vynechány. Tímto postupem se dosáhne toho, že struktura betonu obsahuje větší množství mezer a obalená zrna kameniva jsou spojena v místě dotyku. Mezerovitý beton, který je zobrazen na Obr. 2, dosahuje v závislosti na použitém kamenivu pevnosti v tlaku okolo 1-10 MPa a jeho objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 500 – 1500  $\text{kg/m}^3$ . Díky množství mezer se dají tyto betony použít jako lehké drenážní betony a vynikají svou odolností vůči mrazu. Některé normy připouštějí použití nosné výztuže v mezerovitém betonu pouze za předpokladu její ochrany proti korozi [5; 4].



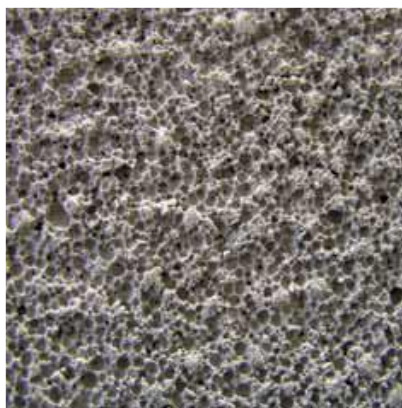
*Obr. 2 Mezerovitý beton [5]*

Hutné konstrukční LC jsou vyrobeny použitím lehkého kameniva (buď z části, nebo zcela) jako plniva. Tímto přístupem se sníží objemová hmotnost betonu, kde póry jsou pouze v kamenivu, nikoliv v cementové pastě (viz Obr. 3). Při výrobě tohoto typu betonu je vhodné sledovat objem vody použitý při výrobě, protože lehké kamenivo je většinou silně nasákavé, a proto by mohl být čerstvý beton obtížně zpracovatelný. Zvláště u čerpaného betonu tento problém může negativně ovlivnit manipulaci, kdy po zvýšení hustoty čerstvého betonu blokuje trubky. Tento problém lze odstranit přidáním chemických přísad pro lepší zpracovatelnost [1].



*Obr. 3 LC s hutnou strukturou a pórovitým kamenivem [5]*

Lehké napěněné, nebo provzdušněné betony jsou vylehčené pouze pomocí pórů v jemnozrnné maltě, viz Obr. 4. Často jsou označovány jako pórobetony a vylehčení pórů je dosaženo pěnotvornou přísadou, nebo plynem po přidání plynotvorné látky. Nejčastěji je tento materiál použit pro výrobu zdících prvků (Calsilox, Hebel, Ytong).



*Obr. 4 Plynobeton [2]*

Z hlediska funkce se LC rozděluje na [2]:

- konstrukční,
- konstrukčně izolační,
- tepelně izolační.

Lehký beton byl v minulosti používán především jako izolační, nebo výplňový díky nižší objemové hmotnosti a lepším tepelně izolačním vlastnostem. V dnešní době, především díky pokročilé technologii výroby lehkého kameniva, se dá využít jako konstrukční beton pro výrobu monolitických konstrukcí a také pro výrobu prefabrikovaných dílců. Lehké betony lze použít jako prosté, vyztužené i předpjaté díky pevnostem obdobným jako u obyčejného betonu [lehký beton]. Rozdělení LC dle pevnostních tříd je uvedeno v Tab. 1.



Tab. 1 Pevnosti LC v tlaku [3]

| Pevnostní třída | $f_{ck,cyl}$<br>[MPa] | $f_{ck,cube}$<br>[MPa] |
|-----------------|-----------------------|------------------------|
| LC 8/9          | 8                     | 9                      |
| LC 12/13        | 12                    | 13                     |
| LC 16/18        | 16                    | 18                     |
| LC 20/22        | 20                    | 22                     |
| LC 25/28        | 25                    | 28                     |
| LC 30/33        | 30                    | 33                     |
| LC 35/38        | 35                    | 38                     |
| LC 40/44        | 40                    | 44                     |
| LC 45/50        | 45                    | 50                     |
| LC 55/60        | 55                    | 60                     |
| LC 60/66        | 60                    | 66                     |
| LC 70/77        | 70                    | 77                     |
| LC 80/88        | 80                    | 88                     |

Největší výhodou LC je jeho objemová hmotnost, z čehož plyne, že oproti obyčejnému betonu vyvoluje mnohem menší zatížení vlastní tíhou. V důsledku nižší hmotnosti se u prefabrikátů snižují náklady na dopravu a montáž. Další velkou výhodou LC je jeho tepelná vodivost a neprůzvučnost, která je lepší než u betonu s klasickým kamenivem. Díky pórovité struktuře kameniva má LC oproti obyčejnému betonu také lepší mrazuvzdornost [6].

Pórovitost lehkého kameniva má za následek to, že cementový tmel proniká do povrchových otevřených pórů kameniva, a tím je posílená vazba mezi oběma materiály. Tato zesílená vazba snižuje počet mikrotrhlin, které vznikají při zrání betonu, a na základě toho se může tato skutečnost projevit jako zvýšení mrazuvzdornosti a omezením průniku chloridů do betonu, což je zásadní pro ochranu výztuže. U klasických betonů vznikají mezi cementovým tmelem a kamenivem mikrotrhliny a spojováním těchto mikrotrhlin dochází k porušování vnitřní struktury betonu. U LC má kamenivo menší pevnost než cementová pasta a dochází k drcení kameniva. Obecně lze říct, že pevnost lehkého kameniva omezuje maximální pevnost LC. Tato pevnost se nazývá „stropová pevnost“. Výsledná pevnost LC je ovlivněna také použitým pojivem, příměsemi a přísadami a v neposlední řadě vodním součinitelem [1].

LC má obecně oproti obyčejnému betonu nižší modul pružnosti, což má za následek vyšší deformace, a v důsledku nižší tuhosti lehkého kameniva vzniká větší dotvarování a smršťování na konstrukci. Díky nižší teplotní roztažnosti (o 20 až 30 % ve srovnání s obyčejným betonem) se snižuje napjatost v konstrukci, a to snižuje riziko vzniku trhlin.

### **3.2 Kamenivo**

Kamenivo, které je používané do LC, je z pravidla pórovité kamenivo, které je definováno normou ČSN EN 13055 [7] jako kamenivo, jehož objemová hmotnost ve vysušeném stavu je maximálně  $2000 \text{ kg/m}^3$ , nebo se sypnou hmotností nepřesahující hodnotu  $1200 \text{ kg/m}^3$  [7].

Hlavní funkcí kameniva v betonu je vytvořit pevnou, nosnou kostru a použitím vhodných frakcí dosáhnout toho, aby mezerovitost byla minimální (pokud se nejedná o mezerovitý beton). Obsah kameniva v objemu betonu je přibližně 65 – 85 % a pro výrobu betonu se používají zrna o maximální velikost 32 mm. Ovšem u lehkého kameniva (LK) se stoupající velikostí zrn klesá jeho pevnost v tlaku, a proto se používají zrna maximální velikosti 16 mm, častěji 8 mm. Kamenivo do betonu je popsáno i v normě ČSN EN 12620 + A1 [8].

Pro výrobu LK se používají suroviny přírodního původu, např. jíly, břidlice, lupky nebo suroviny na bázi vedlejších průmyslových produktů, jako je vysokopecní struska, poléťavý a ložový popílek, nebo odpadní materiál získaný spalováním pevných částic během procesu extrakce palmového oleje. Dále se používá i syntetické organické kamenivo (např. polystyrenové kuličky) [2] [9].

V minulosti bylo používáno přírodní kamenivo většinou sopečného původu (pemza, škvára, tuf atd., viz Obr. 5). Používalo se jako hrubé i jemné kamenivo do betonu a v případě použití jemné frakce (tzv. filler) je přírodní kamenivo známo jako aktivní pucolánový materiál. Tato aktivita způsobuje, že jemné kamenivo reaguje s hydroxidem vápenatým, který vzniká při hydrataci cementu a produkuje CSH produkty, které mají vliv na pevnost struktury a upravují strukturu samotných pórů. Tento jev má za následek to, že se zvyšuje životnost betonu [2].



*Obr. 5 Vpravo pemza, vlevo tuf [10], [11]*

Umělá pórovitá LK se vyrábí nejčastěji tepelným zpracováním, a to takovými postupy, aby výsledný produkt měl co největší předpoklady splnit kladené požadavky na kvalitu kameniva. Na výrobu z přírodních materiálů se nejčastěji používají jíly, břidlice, perlit a vermikulit. V Evropě jsou nejznámější tyto typy LK z přírodních materiálů: Liapor, Leca a Perlit. LK na bázi průmyslových produktů, jako je například sklo, jsou nejznámější Liaver, Poraver, Technopor, Refaglass. Z průmyslových vedlejších produktů (popílků) je např. kamenivo Lytag. LK lze vyrábět i bez tepelného zpracování a zástupcem těchto kameniv je např. Aardelit, který je za studena sbalkované popílkové kamenivo vyráběné v Holandsku. Ukázky vybraných lehkých kameniv je možné vidět na Obr. 6 [2].



*Obr. 6 Vpravo liapor, uprostřed liaver, vpravo aardelit [12] [13] [14]*

Vlastnosti a hlavně pórovitost povrchu LK je hlavní faktor, který ovlivňuje volbu vstupních surovin a technologického postupu výroby. Jsou typy lehkých kameniv, které mají zřetelné rozdíly mezi strukturou povrchu a pórovitým vnitřkem zrna, zejména expandované břidlice a jíly. Jiné typy LK, jako jsou popílková kameniva

nebo kameniva na bázi expandovaného skla nemají tyto odlišnosti ve struktuře. Tyto rozdíly v pórovitosti povrchu mají za následek to, že ovlivňují chování lehkého kameniva v betonu, zejména nasákavost v čerstvém stavu [15].

Mezi nejdůležitější fyzikálně-mechanické vlastnosti LK patří zejména objemová hmotnost, pevnost a nasákavost, a mohou se u jednotlivých druhů lehkých pórovitých kameniv lišit. Jak již bylo výše zmíněno, velikost maximálního zrna přímo ovlivňuje výslednou pevnost. Tato větší zrna LK mají sklon inklinovat k segregaci, což způsobuje rozdílná objemová hmotnost jednotlivých složek. Měrný povrch LK, stejně jako u přírodního kameniva, ovlivní zpracovatelnost v čase, a to zejména v případě u LK, která mají otevřenou pórovitou strukturu povrchu [2].

Pro dosažení vyšších pevností se často kombinuje LK s přírodním hutným kamenivem. Faktory, které ovlivňují optimální mísení těchto dvou druhů kameniv, jsou jejich vlastnosti, zejména objemová hmotnost, pevnost, kvalita a velikost zrn. Jemná frakce (0-1 mm) u LK se nejčastěji dá dosáhnout pouze drcením, a to má za následek to, že zpracovatelnost čerstvého betonu je mnohem horší. Experimentálními pracemi [16] bylo prokázáno, že je nejvhodnější používat přírodní písek frakce 0-4 mm s malým množstvím jemných podílů, a dále je vhodné vynechat velké frakce přírodního kameniva. Z těchto závěrů plyne, že je nejvhodnější kombinovat přírodní kamenivo s frakcí 0-4 mm a lehké kamenivo s max. zrnem o velikosti 8 mm [2].

Vliv vody na hmotnostní vlhkost je u LK mnohem větší než u přírodních hutných kameniv. Rozptyl výrobních tolerancí některých vlastností, i když jsou menší než normami povolené, způsobuje nerovnoměrnost sytné a objemové hmotnosti zrna. Z toho plyne, že je nutná zvýšená pozornost při dávkování LK, a je vhodné častěji kontrolovat vlhkosti kameniva při stanovení sytné a objemové hmotnosti. Díky pórovité struktuře mohou mít LK výraznou vnitřní vlhkost oproti hutnému kamenivu. Tato vnitřní vlhkost nemá vliv na vodní součinitel, ale má vliv na celkovou vlhkost betonu, a to ovlivňuje především dobu vysychání.

Při návrhu dávek vody pro míchání LC je nutné zohlednit vyšší nasákavost LK. Záměsová voda pro míchání LC se sestává z vody přídatné a vody účinné. Voda účinná se započítává do vodního součinitele, zatímco voda přídatná se bezprostředně nepodílí na tvorbě cementového tmele, a během míchání čerstvého betonu se vsákne do lehkého kameniva. Množství přídatné vody se odvíjí od nasákavosti daného druhu LK a na jeho okamžité vlhkosti. Pokud používáme suché lehké kamenivo, je nutné dodat přídatnou vodu potřebnou pro jeho nasáknutí. Její množství by se mělo stanovit na základě skutečné vlhkosti a nasákavosti použitého lehkého kameniva a času nezbytného pro míchání, dopravu a uložení betonu. Jsou výzkumy [6], které pojednávají o tom, že pokud chceme dosáhnout plného nasycení LK, je k tomu zapotřebí doba, která může trvat několik měsíců za normálního tlaku. Vyplnění všech pórů může být dosaženo tlakem vody min. 50 barů. To poukazuje na skutečnost, že pórový systém LK je složen částečně z kapilár a částečně z uzavřených pórů. Kamenivo na bázi spékáných popílků má vyšší procento vzájemně spojených pórů než např. kamenivo na bázi expandovaných jíílů. Kamenivo na bázi skla má pouze povrchovou nasákavost, protože obsahuje zejména uzavřené póry [2].

Při čerpání je čerstvý beton vystaven vyššímu tlaku než je atmosférický, proto má velký význam hodnota nasákavosti za vysokého tlaku. Lehké kamenivo je vystaveno vyššímu tlaku a při tomto dochází ke vtlačení části vody z cementového tmele do zrn lehkého kameniva. Množství vody závisí na použitém druhu kameniva, jeho okamžité vlhkosti a na maximálním dosaženém tlaku v potrubí. Tento fakt je vhodné zahrnout do receptury čerstvého betonu, aby se předcházelo potížím při čerpání [2].

Předvlhčením kameniva lze omezit nebo eliminovat nasákavost lehkého kameniva za normálního i vysokého tlaku. Toto ošetření lehkého kameniva lze provést postřikem na skládce, zkrápěním na páse během dopravy do zásobníků nebo přímo v míchačce na začátku procesu míchání. Tato voda není zahrnuta při výpočtu vodního součinitele, ale je nutné stanovit vnitřní vlhkost a nasákavost kameniva po tomto předmáčení, a následně s těmito hodnotami pracovat při návrhu záměsové vody [2].

Mezi nejpoužívanější lehké kamenivo v České republice patří určitě Liapor. Název pro toto kamenivo vznikl složením dvou slov, Lias je druhohorní období staré 150 miliónu let, a právě z tohoto období se usazovaly jíly, které mají nejlepší vlastnosti pro výrobu tohoto kameniva. Zbytek názvu, jak si jistě každý domyslí, popisuje jeho pórovitou strukturu. Továrna na výrobu tohoto kameniva sídlí ve Vintířově u Karlových Varů, společnost vyrábějící toto kamenivo nese název Lias Vintířov, lehký stavební materiál k.s. V minulosti bylo toto kamenivo dodáváno na náš trh pod názvem Keramzit [17] [2].

Výrobní proces těchto kameniv z expandovaných jílu a břidlic závisí na vstupních surovinách, jejich vlhkosti a historii jejich vzniku. Obecně se používají dva typy postupů – suchý a plastický. Plastický postup se používá pro vlhké plastické jíly, které se protlačují rotačním šnekem skrz tvarovací síto. Suchý postup je skrze drcení nebo mletí a následně granulování, a používá se pro tvrdší břidlice [18].

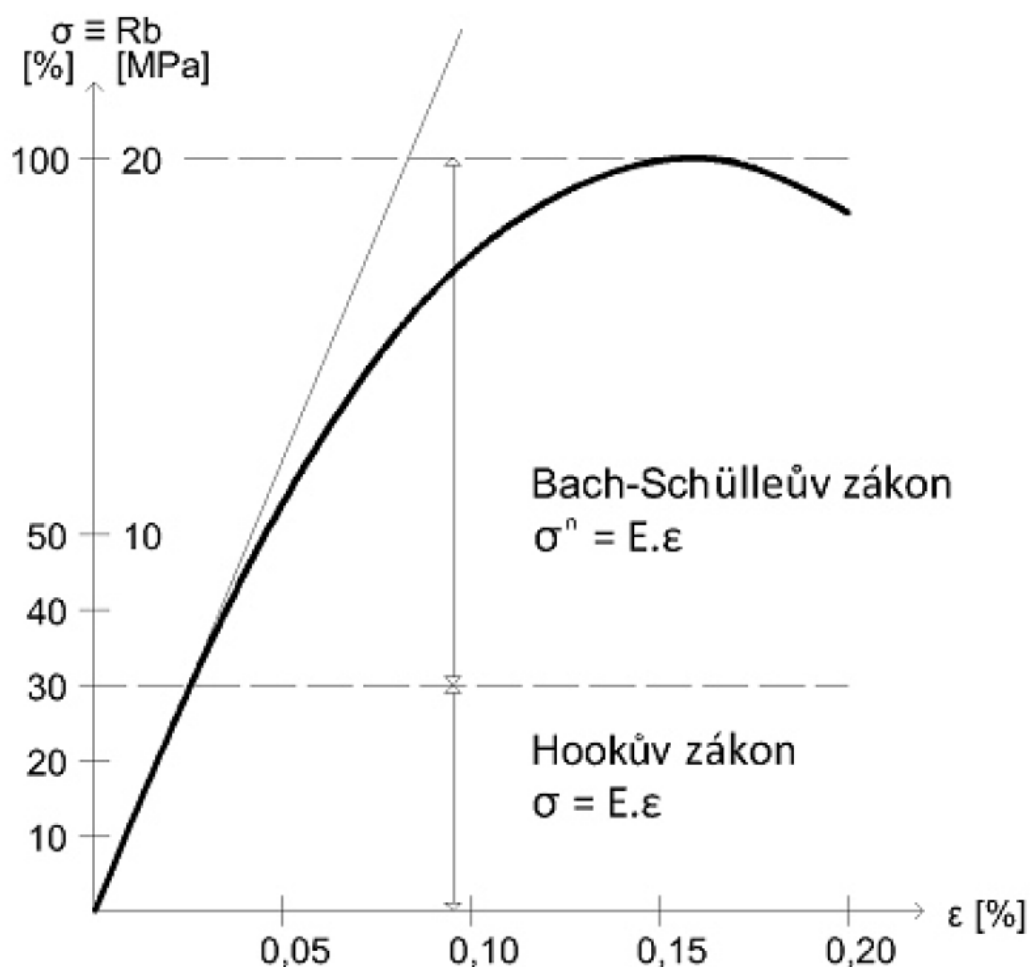
Zmíněná firma Lias Vintířov používá plastický postup výroby, a jako vstupní materiál jsou používány třetihorní cypřišové jíly z nadloží hnědouhelných slojí Sokolovské pánve. Pro výrobu se nepoužívají žádné umělé plynotvorné přísady a podmínkou pro expanzi je pouze dobré zpracování jílu a jeho vhodné složení [17].

Vytěžený jíl je v několika stupních drcen a plastifikován. Takto se materiál zpracuje do granulí (perel), které dále pokračují do rotačních pecích, kde při teplotě kolem 1 150°C expandují. Následný expandovaný granulát je zchlazen a pokračuje do třídící linky, kde je přesně tříděn na široké a úzké frakce. Vytříděné kamenivo je uloženo v uzavřených silech (aby se zachovala jeho minimální vlhkost), nebo na otevřených skládkách. Pro dosažení jemnějších frakcí může být takto vyrobené kamenivo následně ještě drceno [17].

### **3.3 Statický modul pružnosti v tlaku**

Statický modul pružnosti v tlaku ztvrdlého betonu vyjadřuje závislost mezi napětím a přetvořením, které daný prvek či konstrukce vykazuje při namáhání. Deformace betonu od vnějších sil mohou být trvalé nebo dočasné. Na deformačním diagramu (Obr. 7) lze vidět rozdělení na pružnou a plastickou oblast, přičemž statický

modul pružnosti se určuje pouze v oboru pružných deformací, které definuje Hookův zákon [19].



Obr. 7 Deformační diagram [20]

Postup pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku pro beton je definován v normách ČSN ISO 1920-10 [21] a ČSN EN 12390-13 [19]. Tyto normy popisují princip, jak pomocí osového zatížení zkušebních těles za současného měření deformací stanovit statický modul pružnosti. Samotný modul pružnosti v tlaku se vyhodnotí pomocí rozdílu horního a spodního zatěžovacího napětí podělený rozdílem odpovídajících poměrných přetvoření:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

kde  $\Delta\sigma$  - rozdíl horní a spodní zatěžovací meze v MPa,  
 $\Delta\varepsilon$  - rozdíl odpovídajících poměrných přetvoření [-].

Norma ČSN ISO 1920-10 [21] požaduje, aby zkouška byla prováděna na zkušebním lisu, který odpovídá ČSN EN 12390-4 [22]. Zkušební lis odpovídající této normě umožní nastavit požadované zatížení, rychlost změny zatížení a udržování na požadované hodnotě napětí. Pro měření deformací musí mít přístroje základnu v rozmezí  $2/3 d$  až  $d$ , kde  $d$  je průměr zkušebního válce. Umístěny musí být takovým způsobem, aby měřené body byly ve stejné vzdálenosti od konců zkušebního tělesa, nejméně však ve vzdálenosti  $L/4$ , kde  $L$  je délka zkušebního tělesa.

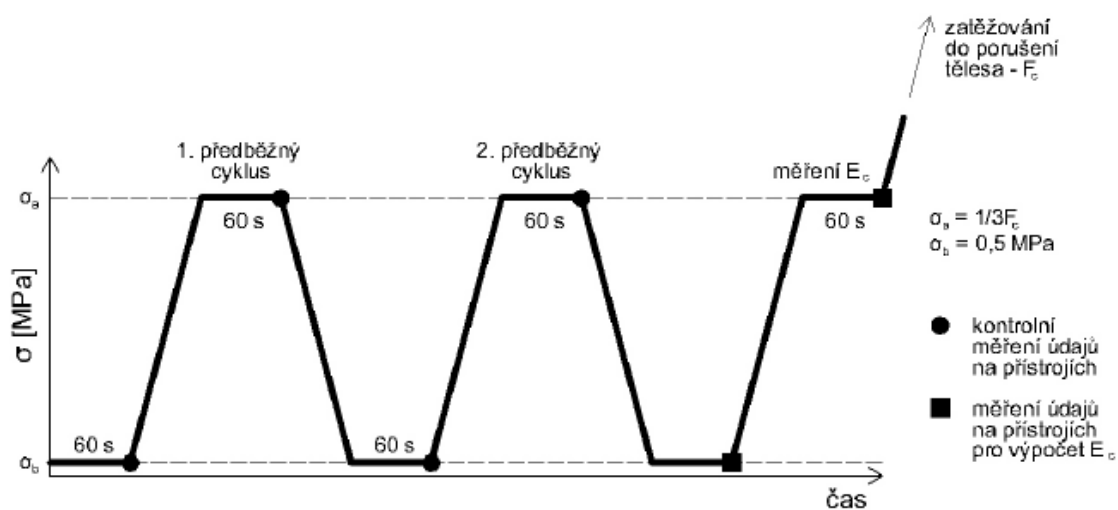
Pevnost betonu v tlaku se stanoví na válcích, které mají poměr délky k průměru  $L/d = 2$ . Modul pružnosti se nejčastěji stanovuje na zkušebních válcích, které mají průměr  $d = 150$  mm a výšku  $L = 300$  mm. Při použití zkušebních těles, které mají jiné rozměry nebo tvar (tělesa čtvercového průřezu), se musí dodržet podmínky, které jsou uvedené v normě.

Pro stanovení střední hodnoty pevnosti v tlaku je nutné postupovat dle normy ISO 1920-4 [23], která uvádí, že pevnost v tlaku se stanoví na 3 zkušebních tělesech. Z výsledků pevností, které jsou vyhodnoceny na základě zkoušek, se následně stanoví střední hodnota pevnosti betonu v tlaku  $f_c$ , která slouží pro určení horní meze napětí. Toto napětí se vypočítá ze vztahu  $\sigma_a = f_c/3$ , základní napětí je označeno jako  $\sigma_b$  a je rovno 0,5 MPa. Napětí je plynule zvyšováno a snižováno konstantní rychlosti 0,20 MPa/s – 0,60 MPa/s. Zkušební těleso, které je dostředně umístěno (vycentrováno) ve zkušebním lisu a je osově osazeno snímači deformací, se zatíží základním napětím  $\sigma_b$ . Toto napětí se udržuje po dobu 60 s a během tohoto intervalu se zaznamenávají deformace. Následně se plynule zvyšuje zatížení až do dosažení horní meze  $\sigma_a$ , kde se setrvá po dobu 60 s. V následujících 30 s se zaznamenávají přetvoření, a pokud se tyto jednotlivá přetvoření liší o více než 20 % od své průměrné hodnoty, znamená to, že zkušební těleso není správně vycentrované, musí se lépe dostředně umístit a následně se měření musí zopakovat. Pokud se jednotlivá přetvoření neliší od průměrné hodnoty o více jak 20 %, je centrace dostatečná a napětí se může plynule snížit na základní hodnotu napětí  $\sigma_b$ . Takto se provedou alespoň dva předběžné zatěžovací cykly, následně se udržuje základní napětí  $\sigma_b$  po dobu 60 s. Poté se zaznamenávají jednotlivá přetvoření po dobu 30 s, tyto deformace jsou označeny jako  $\varepsilon_b$ . Následuje plynule zvyšování napětí



až do dosažení horní meze napětí  $\sigma_a$ , na této hranici se setrvává po dobu 60 s a poté se zaznamenávají jednotlivé deformace ( $\varepsilon_a$ ) v intervalu 30 s. Po dokončení všech měření se plynule zvyšuje zatížení až do porušení zkušebního tělesa, čímž se stanoví skutečná pevnost zkušebního tělesa v tlaku. Pokud se tato pevnost liší o více jak 20 % od střední hodnoty pevnosti v tlaku stanovené na 3 zkušebních tělesech, nemusí být výsledek spolehlivý. Znárodnění průběhu zatěžovacích cyklů je na Obr. 8.

Na tělesech, které jsou odebrány z konstrukce, není v některých případech možné stanovit pevnost v tlaku. Proto norma uvádí alternativní způsob stanovení modulu pružnosti, kdy přetvoření jsou průběžně měřeny během zatížení, a protože není stanovena horní mez napětí, pokračuje se v plynulém zatěžování až do porušení zkušebního tělesa a tím se zjistí skutečná pevnost v tlaku. Následně je stanovena horní mez napětí jako třetina ze skutečné pevnosti v tlaku a poměrné přetvoření se určí jako hodnota odpovídající příslušné hladině zatížení na základě nepřetržitého měření. Pokud se tato jednotlivá měření liší o více než 20 % od průměrné hodnoty, uvede se tato skutečnost v závěrečné zprávě.



Obr. 8 Průběh zatěžovacích cyklů [21]

ČSN EN 12390-13 [19] popisuje metodu, která umožňuje stanovit počáteční modul  $E_{c,0}$  měřený v prvním zatěžovacím cyklu. Dále norma popisuje jak stanovit ustálený modul pružnosti  $E_{c,s}$ , který je měřený po třech zatěžovacích cyklech. V této normě jsou popsány dvě metody. První je metoda A, pomocí které se stanoví oba moduly pružnosti – počáteční i ustálený. Metoda B popisuje určení pouze ustáleného modulu pružnosti betonu v tlaku [19].

Stanovení samotného modulu pružnosti musí probíhat ve zkušebním lisu, který odpovídá normě ČSN EN 12390-4 [22]. Lis odpovídající této normě musí umožňovat naprogramování zatěžovacích cyklů, zvýšení a snížení konstantní rychlostí s danou přesností a udržování zvolené hladiny zatížení s maximální odchylkou  $\pm 5\%$ . Je vhodné, aby snímače deformací odpovídaly normě ČSN EN ISO 9513 [24] a byly usazeny tak, že měřené body jsou ve stejné vzdálenosti od konce zkušebního tělesa. Poměrná deformace  $\varepsilon$  je měřená přímo, nebo vypočtená na základě naměřených délkových změn [19]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (2)$$

kde  $\varepsilon$  – poměrná deformace

$\Delta L$  – změna délky zkušebního tělesa,

$L_0$  – původní délka zkušebního tělesa.

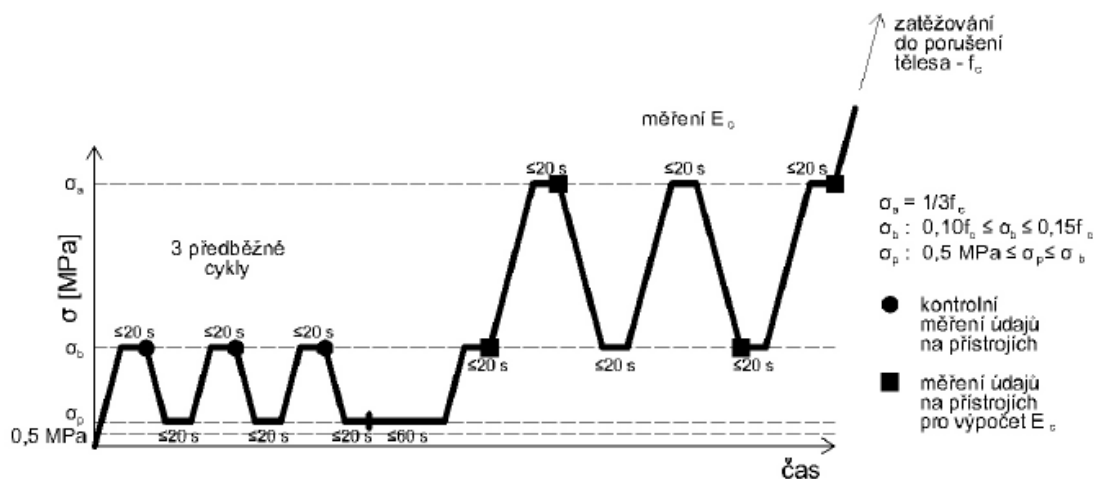
Základna snímače deformací musí být v rozmezí mezi  $2/3 d$  a  $1/2 L$ , ale nesmí být menší než  $3 D_{max}$ , kde  $d$  je průměr nebo délka strany zkušebního tělesa,  $L$  je délka zkušebního tělesa a  $D_{max}$  je největší rozměr max. zrna kameniva. Měřicí základna může být zvětšena až na dvě třetiny délky zkušebního tělesa u těles, která mají poměr  $L/d$  mezi 3,4 a 4,0 [19].

Pro stanovení statického modulu pružnosti se mohou jako zkušební tělesa používat válce i hranoly. Tělesa odebraná z konstrukce musí splňovat podmínku, která klade nárok na velikost průměru, jenž musí být větší než  $3,5 D_{max}$ , dále poměr mezi délkou  $L$  a průměrem  $d$  musí být v intervalu  $4 \geq L/d \geq 2$ . Je doporučeno používat válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Norma ČSN EN 12390-1 [25] uvádí alternativní zkušební tělesa, která vyhovují výše zmíněným předpokladům. Pro stanovení pevnosti v tlaku se musí vyrobit srovnávací tělesa ze stejné záměsi, v případě jádrových vývrtů je vhodné odebírat ze stejné oblasti konstrukce [19].

Na srovnávacích zkušebních tělesech je stanovena pevnost v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 [26]. Pevnost v tlaku  $f_c$  je dále použita pro stanovení napětí při zatěžovacím cyklu. Nelze-li stanovit pevnost v tlaku destruktivním zkoušením, může se určit nedestruktivní metodou. Základní napětí  $\sigma_p$  je v intervalu  $\sigma_b \geq \sigma_p \geq 0,5 \text{ MPa}$ , dolní napětí  $\sigma_b$  je v rozmezí  $0,15 f_c \geq \sigma_b \geq 0,1 f_c$  a horní napětí  $\sigma_a = f_c/3$ . Změny napětí

v průběhu zatěžovacího cyklu se plynule mění konstantní rychlostí  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s. Doba držení napětí na dané úrovni napětí je vždy taková, aby nepřesáhla 20 s [19].

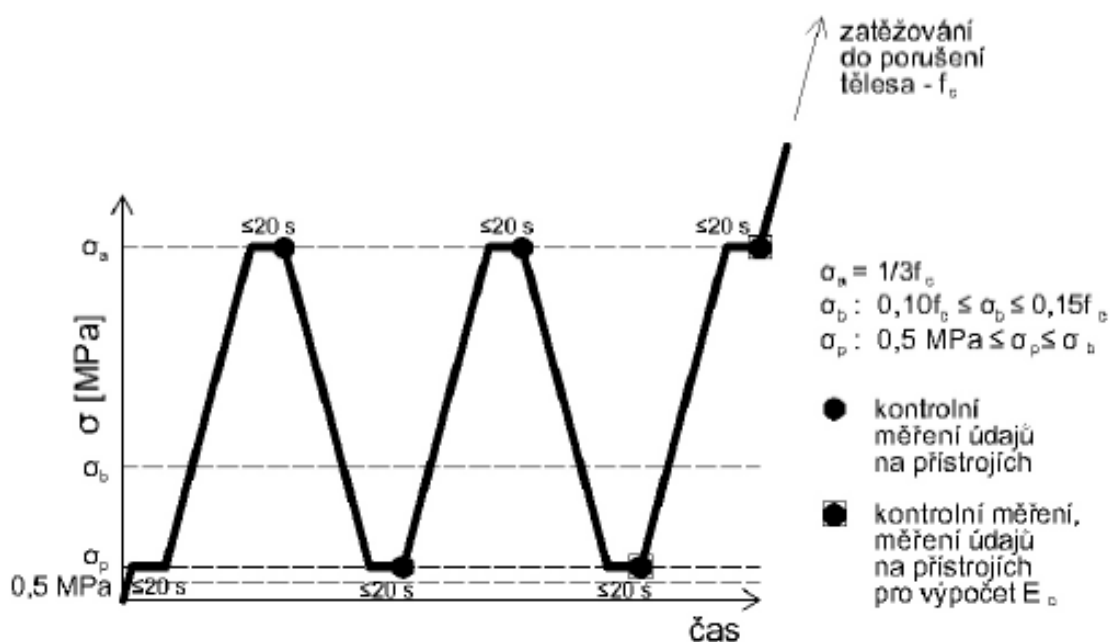
Metoda A uvádí postup, kde těleso osazené snímači deformací je uloženo osově v lisu, a jsou na něm provedeny tři předběžné cykly, aby se zkontrolovalo správné vycentrování tělesa. Během prvního předběžného cyklu se zkušební těleso zatíží dolní hodnotou napětí  $\sigma_b$ , po dobu kdy se tato hladina udržuje, se zaznamenává napětí  $\sigma_b^m$ . Následně se zatížení sníží na hodnotu odpovídající hladině základního napětí  $\sigma_p$  a je podržena po dobu, která nepřesáhne 20 s. Takovýto cyklus se celkem třikrát opakuje. Během druhého a třetího cyklu se zaznamenávají poměrné deformace  $\varepsilon_b$ , které odpovídají zatížení  $\sigma_b$ . Jakmile se dokončí třetí cyklus, jsou zkontrolovány hodnoty jednotlivých poměrných deformací  $\varepsilon_b$ . Doba pro kontrolu je 60 s, a těleso je zatížené hodnotou napětí  $\sigma_p$ . Provádí se dvě kontroly, první ověřuje, jestli jednotlivé poměrné deformace  $\varepsilon_b$  se vzájemně neliší o více jak 10 %. Druhá kontrola ověřuje, zda se jednotlivé poměrné deformace  $\varepsilon_b$  neliší o více než 20 % od průměrné hodnoty poměrné deformace  $\varepsilon_b$ . Jestliže nejsou tyto podmínky splněny, musí se zkušební těleso lépe vycentrovat a měření probíhá opět od začátku. Pokud není možné zkušební těleso lépe vycentrovat, zkouška nelze provést. Následně se konstantní rychlostí zvýší napětí na hodnotu odpovídající hladině napětí  $\sigma_b$ , kdy se během doby držení hladiny napětí zaznamenává odpovídající poměrné přetvoření  $\varepsilon_{b,0}$ . Následují tři zatěžovací cykly, ze kterých bude vyhodnocen modul pružnosti v tlaku. Zkušební těleso se zatíží na horní hladinu napětí  $\sigma_a$  a v této úrovni napětí drží nejdéle 20 s, poté se napětí sníží na hodnotu  $\sigma_b$  a opět se podrží po dobu nepřesahující 20 s. Pro danou hladinu napětí se zaznamenávají následující poměrná přetvoření – v prvním a třetím cyklu  $\varepsilon_{a,1}$  a  $\varepsilon_{a,3}$ , v druhém cyklu  $\varepsilon_{b,2}$ . Po dokončení třetího zatěžovacího cyklu se zkušební těleso zatěhuje do porušení pro zjištění pevnosti v tlaku. Pokud se hodnota pevnosti v tlaku stanovená po zkoušce liší o více než 20 % od průměrné hodnoty stanovené na srovnávacích tělesech, uvede se to do závěrečné zprávy o zkoušce. Průběh zkoušky je schématicky znázorněn na Obr. 9 [19].



Obr. 1 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 - metoda A [19]

Metoda B požaduje stejně jako metoda A, aby zkušební těleso osazené snímači deformací bylo centricky uloženo ve zkušebním lisu a bylo zatíženo základním napětím  $\sigma_p$  po dobu méně než 20 s. První cyklus probíhá plynulým zvyšováním zatížení na horní úroveň napětí  $\sigma_a$ , na této hladině zatížení se vyčká nezbytně dlouhou dobu a zaznamená se poměrné přetvoření  $\varepsilon_{a,1}$ . Následně se snižuje konstantní, předem volenou rychlostí na základní napětí  $\sigma_p$ , po dosažení základního napětí se zaznamená poměrné přetvoření  $\varepsilon_{p,1}$ . Tento postup se opakuje a zaznamenávají se poměrná přetvoření  $\varepsilon_{a,1}$  a  $\varepsilon_{p,2}$ . Jednotlivá poměrná přetvoření  $\varepsilon_a$  v druhém cyklu se nesmí lišit o více než 20 % od průměrné hodnoty  $\varepsilon_{a,1}$ . Pokud tato podmínka není splněna, těleso se musí znovu vycentrovat a měření musí být provedeno znovu od začátku. Jestliže není ani po následné centraci rozdíl poměrných přetvoření menší než 20 %, měření musí být ukončeno. Ve třetím cyklu se zatížení zvýší na  $\sigma_a$ , tato hladina zatížení se drží po dobu kratší než 20 s a zaznamená se poměrné přetvoření  $\varepsilon_{a,3}$ . Poté se provádí kontrola, jestli se poměrná přetvoření  $\varepsilon_a$  ve druhém a třetím cyklu neliší o více jak 10 %. Pokud tato podmínka není splněna, je nutné, aby těleso bylo opět vycentrováno, a měření se uskutečňuje od začátku. Není-li možná přesnější centrace, měření na tomto zkušebním tělese musí být ukončeno. Po dokončení třetího cyklu je těleso plynulou rychlostí zatěžováno až do porušení. Tímto způsobem stanovená pevnost v tlaku se nesmí lišit o více než 20 % od průměrné hodnoty zjištěné na srovnávacích tělesech,

pokud je tato hodnota odlišná, je nutné tento fakt uvést do závěrečného protokolu. Schématické znázornění průběhu zkoušky je znázorněno na Obr. 10.



Obr. 2 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 - metoda B [19]

Statický modul pružnosti betonu v tlaku  $E_{c,s}$  se stanoví z následujícího vztahu [19]:

$$\text{Metoda A: } E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}}, \quad (3)$$

$$\text{Metoda B: } E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}, \quad (4)$$

kde  $\sigma_a$  – horní napětí v MPa,  
 $\sigma_b$  – dolní napětí v MPa,  
 $\sigma_p$  – základní napětí v MPa,  
 $\varepsilon_{a,3}$  – průměrné přetvoření při horním napětí [-],  
 $\varepsilon_{b,2}$  – průměrné přetvoření při dolním napětí [-],  
 $\varepsilon_{p,2}$  – průměrné přetvoření při základním napětí [-].

Výsledná hodnota statického modulu pružnosti v tlaku se uvádí v GPa zaokrouhlená na nejbližší desetinné místo [19].

Dále byly v experimentální části měřeny dynamické moduly pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou a rezonanční metodou. Ultrazvuková impulzová metoda měří dobu průchodu ultrazvukového impulzu zkušebním tělesem, z které se vypočítá rychlost a následně pomocí vzorců dle normy ČSN 73 1371 [27] se vypočítá dynamický modul pružnosti. Rezananční metoda pomocí oscyloskopu měří vlastní frekvence zkušebního tělesa a z nich se dle normy ČSN 73 1372 [28] stanoví dynamické moduly. Obě metody jsou podrobněji popsány v experimentální části.

## **4. Experimentální část**

### **4.1 Popis experimentu**

V současné době se stává moderním trendem ve stavebnictví stále více využívat lehký beton i do konstrukčních prvků. Zároveň se dostává do popředí zájmu odborné veřejnosti i vědeckých institucí problematika týkající se modulu pružnosti a vlivů, které ovlivňují jeho hodnotu. Vícenásobnému cyklickému zatěžování a jeho vlivu na hodnotu modulu pružnosti lehkého betonu dosud nebylo věnováno mnoho pozornosti, proto je hlavním předmětem této práce.

Modul pružnosti je jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností, která charakterizuje beton jako materiál. Vyhovět požadavkům na výslednou hodnotu modulu pružnosti je mnohem složitější, než vyhovět požadavkům na pevnostní třídu, kterou lze výrazně zvýšit přidáním cementu či nejmodernějších přísad a příměsí. Variabilita výsledných hodnot modulu pružnosti je ovlivněna konkrétním složením betonu, především použitým typem kameniva. Zejména lehké porézní kamenivo, pokud není předvlhčeno, může absorbovat část vody při míchání čerstvého betonu. Nedostatek vody, zejména v raném věku, má kritický vliv na celkový rozvoj hydratace. Tento vliv může způsobit tvorbu mikrotrhlin uvnitř struktury betonu, které mají nepříznivý dopad na výslednou hodnotu modulu pružnosti [29].

V rámci experimentu byla stanovena na zkušebních tělesech z lehkého betonu celá řada parametrů. Výběr měřených vlastností odpovídal zadání diplomové práce a také skutečnosti, že byl pro experimentální část práce použit lehký beton, u něhož jsou velmi důležité vlhkostní parametry. V rámci práce tedy byly stanoveny statické a dynamické moduly pružnosti, dále pevnost v tlaku a v příčném tahu, hmotnostní úbytky a objemová hmotnost.

### **4.2 Výroba zkušebních těles**

Zkušební tělesa byla vyrobena v betonárně BETOTECH, s.r.o. v Brně - Bosonohách. Během betonáže bylo vyrobeno více zkušebních těles, než bylo použito v této práci. Pro popisovaný experiment bylo vyrobeno 22 válců a 9 krychlí, přičemž

válce měly jmenovitý průměr 150 mm a výšku 300 mm, krychle měly jmenovitý rozměr 150 mm (viz Obr. 11). Beton použitý pro výrobu zkušebních těles měl recepturu uvedenou v Tab. 2.

*Tab. 2 Receptura čerstvého betonu*

| Materiál                                 | Množství na 1 m <sup>3</sup> čerstvého betonu [kg] |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Cement CEM II/B-S 32,5 R                 | 450                                                |
| Písek 0/4 Bratčice                       | 776                                                |
| Kamenivo 1/4 Liapor                      | 52                                                 |
| Kamenivo 4/8 Liapor                      | 198                                                |
| Přísada VZ 10 - zpomalovač               | 0,68                                               |
| Plastifikační přísada Sika stabilizer 4R | 0,45                                               |
| Voda                                     | 208                                                |
| Vodní součinitel                         | 0,46                                               |



*Obr. 9 Vyrobená zkušební tělesa*



Zkušební tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN 12390-1 [25] dne 26. 5. 2017 ukládáním do forem ve výše zmíněné betonárně. Míchání čerstvého betonu bylo prováděno v laboratorní míchačce a všechny složky betonu byly pečlivě zváženy (viz Obr. 12). Lehké kamenivo Liapor, které bylo použito v betonu, bylo předvlhčeno 24 hodin před mícháním čerstvého betonu. Celkem bylo namícháno 6 míchaček, které byly rovnoměrně rozděleny do dvou nádob. Čerstvý beton byl v těchto dvou nádobách průběžně promícháván (viz Obr. 13) a po smíchání kompletního množství čerstvého betonu byl beton z obou nádob rovnoměrně vrácen do míchačky, kde byl opět zamíchán. Celková doba výroby čerstvého betonu trvala 1 hodinu a 40 minut, bylo vyrobeno celkem 413 l čerstvého betonu. Následně se čerstvý beton ukládal do forem po dobu 35 minut, kdy se během této doby také hutnilo (Obr. 14).



*Obr. 10 Vážení cementu*



*Obr. 11 Průběžné míchání čerstvého betonu*



*Obr. 12 Hutnění čerstvého betonu*

Během výroby byly provedeny zkoušky čerstvého betonu, jmenovitě zkouška rozlitím (viz Obr. 15) dle ČSN EN 12350-5 [30] a také byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle normy ČSN EN 12350-6 [31]:

- rozlití: 500 x 490 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 1620 kg/m<sup>3</sup>.



*Obr. 13 Vyhodnocování zkoušky rozlítím*

Formy s čerstvým betonem byly přikryty PE fólií a zkušební tělesa ve formách zrála 72 hodin ve standardních laboratorních podmínkách. Následně byla zkušební tělesa převezena do laboratoře SZK Fakulty stavební VUT dne 29. 5. 2017, kde byla ve stáří 3 dny odformována. Většina z nich byla následně uložena do vodní lázně s teplotou vody 20 °C (viz Obr. 16), pouze vybraná tělesa byla použita pro měření hmotnostního úbytku. O samotném průběhu měření pojednává následující kapitola.



*Obr. 14 Skladování zkušebních těles*

### **4.3 Měření**

Cyklické zatěžování je velmi časově náročné, každé těleso je ve zkušebním lisu několik desítek hodin, zkoušení všech 12 vybraných zkušebních těles trvá několik týdnů. Zkušební tělesa pro cyklické zatěžování musejí být výrazně starší než 28 dní kvůli zrání betonu a z těchto důvodů je nutné, aby celé zkoušení bylo důkladně naplánované. Během zrání byla zkušební tělesa uložena ve vodě, a v průběhu této doby (především v prvních 90 dnech) byl sledován vývoj modulu pružnosti. Ve stáří 28 dní byly provedeny kontrolní zkoušky na trojicích těles. Byla ověřena pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu na trojicích zkušebních těles ve tvaru krychle.

Po 90 dnech zrání betonu byla část zkušebních těles přemístěna do sušičky, kde byla sušena při  $90\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ . Na další části zkušebních těles byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu. Během sušení byl sledován průběh hmotnostních úbytků. Hmotnostní úbytek byl také sledován během samovolného vysychání v laboratorních podmínkách.



Po ustálení hmotnosti zkušebních těles (více jak 180 dní od betonáže) byla zkušební tělesa vyjmuta ze sušičky a proběhlo obroušení tlačných ploch. Poté byly na zkušební tělesa nalepeny snímače deformací a opět byl stanoven dynamický modul pružnosti. Následně byla zkušební tělesa převezena do centra AdMaS v Brně.

Po převezení bylo každé jednotlivé těleso usazeno do zkušebního lisu a snímače deformací byly napojeny na datovou ústřednu. Poté proběhlo cyklické zatěžování a následně byly opět stanoveny dynamické moduly pružnosti. Po stanovení dynamických modulů pružnosti byla tělesa opět umístěna do zkušebního lisu a proběhlo zatěžování tlakovou silou až do jejich porušení.

#### 4.3.1 Dynamický modul pružnosti

Na 12 válcích, které byly pečlivě změřeny a zváženy, se následně stanovily hodnoty dynamického modulu pružnosti ultrazvukem a rezonanční metodou (viz Obr. 17). Dynamické moduly pružnosti byly stanoveny podle postupu uvedeného v normách ČSN 73 1371 [27] a ČSN 73 1372 [28].



*Obr. 15 Vlevo měření doby UZ impulsu zkušebním tělesem, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa*

Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly stanoveny ve 3, 7, 14, 28 a 90 dnech od betonáže zkušebních těles. Po celou dobu zrání betonu byla zkušební tělesa uložena ve vodní lázni.

Dynamický modul pružnosti byl stanoven pomocí ultrazvukové (UZ) impulzové metody. Principem této metody je vysílání UZ impulsů do zkušebního

tělesa a měření doby průchodu UZ impulzu zkušebním tělesem. Ze zjištěné doby průchodu  $T$  se následně stanoví rychlost šíření UZ vlnění  $v_L$  daným materiálem. Následně dle vztahu z výše zmíněné normy ČSN 73 1371 [27] byl stanoven dynamický modul pružnosti:

$$E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot k^{-2}, \quad (5)$$

kde  $E_{cu}$  – dynamický modul pružnosti v MPa,

$D$  – objemová hmotnost zkoušeného materiálu v  $\text{kg/m}^3$ ,

$v_L$  – rychlost šíření ultrazvuku v  $\text{km/s}$ ,

$k$  – koeficient rozměrnosti prostředí.

Hodnota koeficientu rozměrnosti prostředí  $k$  je pro jednorozměrné prostředí rovna 1, pro dvojrozměrné a trojrozměrné prostředí je závislý na hodnotě Poissonova poměru  $\mu$ , který byl stanoven pomocí rezonanční metody v rámci praktické části této práce.

Dynamický modul pružnosti byl stanoven přístrojem Pundit PL-200 od švýcarské firmy Proceq se sondami o frekvenci 150 kHz. Doba průchodu UZ impulzu  $T$  byla měřena na každém zkušebním tělese třikrát a pro každou naměřenou dobu byla následně vypočítána rychlost šíření UZ impulzu  $v_L$ . Do výpočtu modulu pružnosti byla dosazena průměrná hodnota rychlosti  $v_L$ .

Rezonanční metodou byl v rámci praktické části této práce stanoven dynamický modul pružnosti z podélného a příčného kmitání. Principem rezonanční metody je, že pomocí mechanického impulzu (úderu impakt kladívka) se zkušební těleso na pružné podložce rozkmitá. Vlastní frekvence podélného  $f_L$ , příčného  $f_f$  a kroutivého kmitání  $f_t$  byly stanoveny pomocí osciloskopu Handyscope HS4 se snímačem akustické emise (AE), přičemž frekvence byly vyhodnoceny pomocí softwaru (dodávka k osciloskopu), který pracuje na základě rychlé Fourierovy transformace. Ze stanovených vlastních frekvencí lze následně dle normy ČSN 73 1372 [28] vypočítat dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku (z podélného kmitání) ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho, \quad (6)$$

kde  $E_{crL}$  – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu v MPa,  
 $L$  – délka zkoušeného tělesa v m,  
 $f_L$  – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa v Hz,  
 $\rho$  – objemová hmotnost betonu v kg/m<sup>3</sup>.

Dále byl stanoven modul pružnosti  $E_{crf}$  (z příčného kmitání), a to ze vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot L^4 \cdot f_f^4 \cdot c_1 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}, \quad (7)$$

kde  $E_{crf}$  – dynamický modul pružnosti v tahu nebo tlaku v MPa,  
 $L$  – délka zkoušeného tělesa v m,  
 $c_1$  – korekční součinitel, bezrozměrný,  
 $f_f$  – první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa v Hz,  
 $\rho$  – objemová hmotnost betonu v kg/m<sup>3</sup>  
 $i$  – poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa v m.

V rámci vyhodnocení byl stanoven i dynamický modul pružnosti ve smyku  $G_{cr}$  ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho, \quad (8)$$

kde  $G_{cr}$  – dynamický modul pružnosti ve smyku v MPa,  
 $k$  – součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa, bezrozměrný,  
 $L$  – délka zkoušeného tělesa v m,  
 $f_t$  – první vlastní frekvence kroutivého kmitání zkoušeného tělesa v Hz,  
 $\rho$  – objemová hmotnost betonu v kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je nejsledovanější charakteristika betonu. Vyjadřuje schopnost daného materiálu odolávat tlakové síle do porušení. V praktické části této práce byla pevnost lehkého betonu v tlaku stanovena na 3 krychlích ve 28 dnech zrání betonu. Následně byla stanovena pevnost v tlaku na 3 zkušebních válcích ve

stáří betonu 90 dní. Zkušební tělesa byla uložena po celou dobu zrání ve vodní lázni a po 90 dnech byla přemístěna do sušičky, která byla vyhřátá na  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}$ . Po 186 dnech od betonáže byla provedena zkouška pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech, která měla ustálenou vlastní hmotnost.

Stanovení výsledné hodnoty pevnosti v tlaku bylo prováděno dle normy ČSN EN 12390-3 [26], a samotné vyhodnocení pevnosti v tlaku  $f_c$  vycházelo ze vztahu:

$$f_c = F_c / A, \quad (9)$$

kde  $f_c$  – pevnost betonu v tlaku v MPa,

$F_c$  – naměřená maximální tlaková síla v N,

$A$  – tlačná plocha zkušebního tělesa v  $\text{mm}^2$ .

Zkušební tělesa byla zatěžována ve zkušebním hydraulickém lise ALPHA 3-3000 S (firmy FORM + TEST Seidner&Co. GmbH) s rozsahem 3000 kN (viz Obr. 18).



*Obr. 16 Stanovení pevnosti v tlaku zatěžovací zkouškou*



#### 4.3.3 Pevnost v příčném tahu

Přestože pevnost betonu v tahu je ve srovnání s tlakovou pevností zanedbatelná, je vhodné znát její hodnotu. Samotná podstata zkoušky spočívá v tom, že těleso je zatěžováno tlakovou silou v úzké linii po jeho délce. Betonový materiál způsobí, že roznese tlakovou sílu a kolmo na ní vznikne výslednice tahové síly, která poruší zkušební těleso tahem. V experimentální části byla pevnost v příčném tahu stanovena ve 28 dnech zrání betonu na krychlích. Ve 186 dnech byla stanovena na válcích, které byly po 90 dní uloženy ve vodní lázni a následně přemístěny do sušičky, která byla vyhřátá na  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde došlo k ustálení hmotnosti zkušebních těles.

Pevnost v příčném tahu byla stanovena dle normy ČSN EN 12390-6 [32] ze vztahu:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d'} \quad (10)$$

kde  $f_{ct}$  – pevnost v příčném tahu v MPa,  
 $F$  – naměřená maximální tlaková síla v N,  
 $L$  – délka dotykové přímky tělesa v mm,  
 $d$  – příčný rozměr tělesa v mm.

Zkušební tělesa byla zatěžována ve zkušebním hydraulickém lise ALPHA 3-3000 S (firmy FORM + TEST Seidner&Co. GmbH) s rozsahem 3000 kN (viz Obr. 19).



*Obr. 17 Stanovení pevnosti v příčném tahu zatěžovací zkouškou*

#### 4.3.4 Hmotnostní úbytek

V rámci experimentální části této práce, jako doplňující měření, byl sledován hmotnostní úbytek zkušebních těles, protože lehký beton, ze kterého byla zkušební tělesa vyrobena, obsahuje lehké pórovité kamenivo, které bylo předem navlhčeno. Proto toto kamenivo mělo podstatnou vnitřní vlhkost, která má vliv na celkovou vlhkost betonu a na dobu vysychání.

Hmotnostní úbytek byl sledován na třech různých druzích vysychání. Samovolné vysychání v laboratorních podmínkách při teplotě  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a vzdušné vlhkosti  $55\% \pm 10\%$  bylo sledováno na třech krychlích a jednom válci ihned po odformování. Dále byl měřen hmotnostní úbytek v laboratorních podmínkách na válci, který byl po odformování vložen do vodní lázně a po 28 dnech vyjmut. Po 90 dnech od betonáže byly z vodní lázně přemístěny další tři zkušební válce (spolu s ostatními zkušebními tělesy, viz Obr. 21) do sušičky, která byla vyhřátá na  $90\text{ °C}$ . Na těchto válcích byl také sledován hmotnostní úbytek.

Výše zmíněné 3 krychle, které byly váženy po odformování na váze s nosností do 49 kg od firmy TONAVA a.s. (typ použitého nosiče byl TF 30 S, použité krytí IP 54, typ snímače TEDEA 1040/50). Váha měřila s kontinuálním záznamem, k čemuž byla použita datová ústředna, na kterou byla váha připojena. Jedná se o ústřednu typu Spider8 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Zbylý válec byl vážen v předem naplánovaných časech ručně, na digitální váze (viz Obr. 20). Ustálení hmotnosti zkušebních těles, sušených v sušárně, bylo vyhodnoceno dle normy ČSN EN 12390-7 [33]. Tato norma říká, že těleso má ustálenou hmotnost, pokud se během 24 hodin hmotnost nemění o více než 0,2 %.



*Obr. 18 Měření hmotnostního úbytku vlevo váha s kontinuálním záznamem, vpravo ručně na digitální váze*

#### **4.3.5 Statický modul pružnosti**

Jak již bylo výše zmíněno, mnohonásobné zatěžování je velmi časově náročné, a protože zkoušení trvalo několik týdnů, bylo do termínu odevzdání této diplomové práce (DP) odzkoušeno pouze 10 těles. Stanovení statického modulu pružnosti probíhalo cyklickým zatěžováním zkušebních těles v lisu, které bylo prováděno dle normy ČSN EN 12390-13 [19], konkrétně byla zvolena metoda B. Tato metoda byla zvolena, protože umožňuje větší rozpětí při volbě parametrů zkoušení. Zvolené parametry byly stanoveny tak, aby bylo možné stihnout co nejvíce cyklů v daném čase. Měření statického modulu pružnosti probíhalo na tělesech, která měla ustálenou hmotnost.



*Obr. 19 Sušení zkušebních těles*

Po ustálení hmotnosti zkušebních těles byla tělesa vyjmuta ze sušičky, a tlačené plochy zkušebních těles byly obroušeny do požadované rovinnosti (viz Obr. 22).



*Obr. 20 Zbroušení tlačené plochy*



Následně po zabroušení tlačných ploch byly pomocí rychletuhnoucího dvousložkového epoxidového lepidla osazeny odporové tenzometry. Dva podélné a dva příčné (viz Obr. 23). Použité podélné tenzometry jsou 1-LY41-100/120 a příčné 1-LY41-50/120. Příčné tenzometry sloužily k měření příčných deformací, z nichž je možné stanovit statickou hodnotu Poissonova součinitele, což ovšem nebylo předmětem této DP. Po osazení tenzometrů byly opět na všech tělesech stanoveny dynamické moduly pružnosti UZ impulzovou a rezonanční metodou.



*Obr. 21 Osazení odporových tenzometrů*

Následně byla zkušební tělesa odvezena do centra AdMaS v Brně, kde probíhalo samotné cyklické zkoušení. Horní zatěžovací hladina je pevně dána na  $\sigma_a = f_c/3$ . Základní napětí  $\sigma_p$  se má pohybovat v intervalu  $\sigma_b \geq \sigma_p \geq 0,5 \text{ MPa}$ , přičemž  $\sigma_b$  je dolní hladina napětí. Tato dolní hladina má nabývat hodnotu v intervalu  $0,15 f_c \geq \sigma_b \geq 0,1 f_c$ . Pro stanovení pevnosti v tlaku byla odzkoušena 3 zkušební tělesa čistě na tlak. Z výsledků byla stanovena horní zatěžovací mez  $\sigma_a$ , rovnající se přibližně 6,8 MPa (napětí vyvozeno silou  $F_a = 120 \text{ kN}$ ) a dolní mez  $\sigma_b$ , rovnající se přibližně

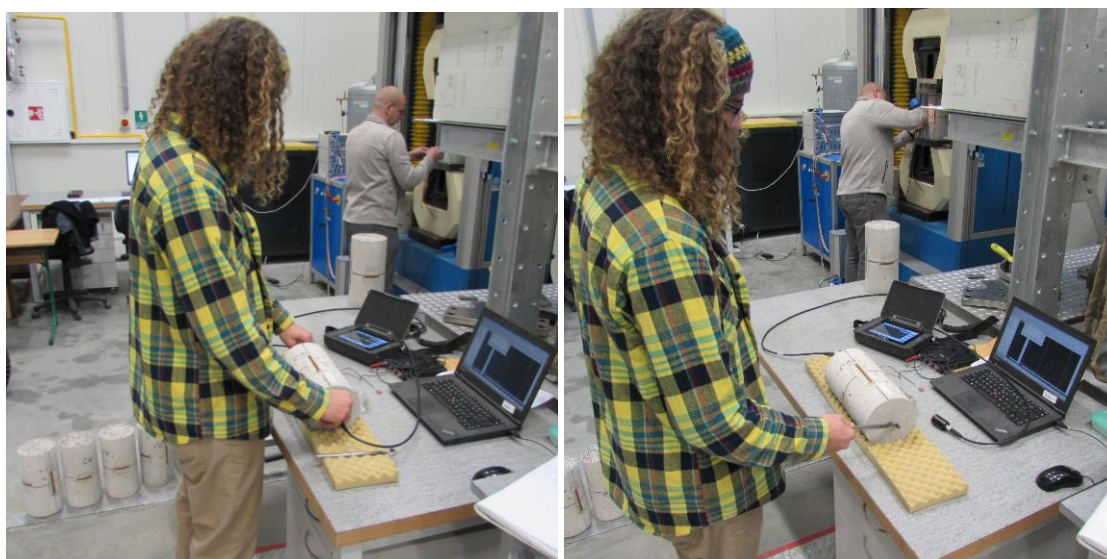
1,1 MPa (napětí vyvozeno silou  $F_b = 20 \text{ kN}$ ). Rychlost zatěžování byla nastavena na 14,1 kN/s (přibližně 0,8 MPa/s) a požadovaný počet cyklů byl 4000, a na horní i dolní hladině zatížení se setrvalo po dobu 3 sekund. Měření probíhalo na mechanickém lisu LaborTech s rozsahem 1000 kN (viz Obr. 24), který odpovídá požadavkům normy ČSN EN 12390-13 [19]. Použitá datová ústředna QuatumX od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH zaznamenávala a uchovávala naměřená data. Současně při měření deformací na zatěžovaném tělese probíhalo měření deformací na tělese, které zatěžované nebylo. Toto nezatěžované těleso (tzv. kompenzační díl) sloužilo pro měření deformací, které vznikaly vlivem změny teplot. Deformace naměřené od cyklického zatěžování pak byly opraveny o deformace způsobené změnami teplot. Tento postup zajistil přesnější stanovení deformací, které jsou podstatné pro tuto práci. Na Obr. 24 jsou zobrazena obě tělesa, těleso cyklicky zatěžované, umístěné ve zkušebním lisu, i kompenzační díl (vlevo dole).



*Obr. 22 Mechanický lis LaborTech*

Vyhodnocení statického modulu pružnosti se řídilo dle normy ČSN EN 12390-13 [19], kde je uveden vztah (4), přičemž vyhodnocení proběhlo pro každý zatěžovací cyklus.

Po skončení cyklování byla tělesa vyjmuta ze zkušebního lisu. Následně byla na každém tělesa stanovena hodnota dynamických modulů pružnosti (viz Obr. 25). Po stanovení dynamických modulů pružnosti byla tělesa vložena opět do mechanického lisu, kde se stanovila pevnost v tlaku zatěžováním silou až do porušení jednotlivých zkušebních těles.



*Obr. 23 Vlevo měření doby průchodu UZ impulsu, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa*

Naměřené hodnoty z datové ústředny byly zpracovány programem, který byl vytvořen v softwaru Mathematica. Výstupem programu byla zpracovaná data maximálních a minimálních hodnot poměrných deformací v jednotlivých cyklech a tomu odpovídající hodnoty síly, která deformaci vyvolala. Následně byly tyto hodnoty zpracovány v tabulkovém programu MS Office Excel.

#### **4.4 Výsledky měření**

Dynamické moduly pružnosti byly průběžně během prvních 90 dní zrání stanovovány na 12 válcích, které byly po tuto dobu uloženy ve vodní lázni, a následně byla tato tělesa umístěna do sušičky. Všechna tělesa byla pečlivě změřena a zvážena



(viz Tab. 3). Doba průchodu ultrazvukového impulsu zkušebními válci a jejich vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání byly stanoveny dle již dříve uvedeného postupu. Z naměřených hodnot byly vypočteny dynamické moduly pružnosti. Dále byly v rámci vyhodnocení stanoveny informativní pevnost betonu  $R_{ce}$  (z UZ zkoušky) a modul pružnosti ve smyku  $G_{cr}$  (pomocí rezonanční metody). Výsledky zkoušení nedestruktivními metodami jsou v tabulkách 4, 5, 6, 7 a 8.

*Tab. 3 Rozměry zkušebních válců*

| válec | d <sub>1</sub> [mm] | d <sub>2</sub> [mm] | d <sub>3</sub> [mm] | d <sub>4</sub> [mm] | L <sub>1</sub> [mm] | L <sub>2</sub> [mm] | L <sub>3</sub> [mm] | <b>d[mm]</b>  | <b>L[mm]</b>  |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|
| C-1   | 149,15              | 149,29              | 149,32              | 149,28              | 299,37              | 299,67              | 299,36              | <b>149,26</b> | <b>299,47</b> |
| C-2   | 147,16              | 149,20              | 149,13              | 149,33              | 299,40              | 300,34              | 300,10              | <b>148,71</b> | <b>299,95</b> |
| C-3   | 149,25              | 149,34              | 149,27              | 148,18              | 299,79              | 300,54              | 300,57              | <b>149,01</b> | <b>300,30</b> |
| C-4   | 149,20              | 149,18              | 149,17              | 149,20              | 298,83              | 299,34              | 299,92              | <b>149,19</b> | <b>299,36</b> |
| C-5   | 149,19              | 149,22              | 149,28              | 149,14              | 296,93              | 298,48              | 298,19              | <b>149,21</b> | <b>297,87</b> |
| C-6   | 149,23              | 149,21              | 149,23              | 149,18              | 298,40              | 298,34              | 299,64              | <b>149,21</b> | <b>298,79</b> |
| C-7   | 149,21              | 149,24              | 149,27              | 149,11              | 298,96              | 302,00              | 298,57              | <b>149,21</b> | <b>299,84</b> |
| C-8   | 149,25              | 149,33              | 149,09              | 149,16              | 299,31              | 291,62              | 299,78              | <b>149,21</b> | <b>296,90</b> |
| C-9   | 149,15              | 149,43              | 149,17              | 149,24              | 299,03              | 298,82              | 300,37              | <b>149,25</b> | <b>299,41</b> |
| C-10  | 149,15              | 149,14              | 149,20              | 149,25              | 299,19              | 298,05              | 298,63              | <b>149,19</b> | <b>298,62</b> |
| C-11  | 149,25              | 149,18              | 149,23              | 149,11              | 300,36              | 299,70              | 300,05              | <b>149,19</b> | <b>300,04</b> |
| C-12  | 149,33              | 149,27              | 149,28              | 149,11              | 300,94              | 299,98              | 301,92              | <b>149,25</b> | <b>300,95</b> |

V následujících tabulkách lze pozorovat, že hodnoty měřené na válci C-5 jsou nadprůměrné, přičemž tato skutečnost nemá zjevnou příčinu.



Tab. 4 Dynamický modul pružnosti  $E_{cu}$

| Dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ [MPa] |              |              |              |              |              |
|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Označení                                 | 3. den       | 7. den       | 14. den      | 28. den      | 90. den      |
| C-1                                      | 15500        | 15100        | 18400        | 19900        | 20200        |
| C-2                                      | 16200        | 17200        | 18600        | 19800        | 19900        |
| C-3                                      | 15800        | 16800        | 18700        | 20100        | 19900        |
| C-4                                      | 16100        | 17500        | 18800        | 19700        | 20100        |
| C-5                                      | 17700        | 18900        | 19900        | 21400        | 22400        |
| C-6                                      | 15400        | 17800        | 18400        | 20100        | 20000        |
| C-7                                      | 15000        | 17400        | 18300        | 19400        | 20700        |
| C-8                                      | 15500        | 16200        | 18600        | 18800        | 19900        |
| C-9                                      | 15400        | 16600        | 17600        | 19500        | 19900        |
| C-10                                     | 16200        | 17700        | 18700        | 19900        | 21000        |
| C-11                                     | 16000        | 17900        | 18600        | 19700        | 20100        |
| C-12                                     | 16100        | 17900        | 18200        | 19400        | 19400        |
| <b>Průměrná hodnota</b>                  | <b>15900</b> | <b>17300</b> | <b>18600</b> | <b>19800</b> | <b>20300</b> |
| Směr. výběrová odchylka                  | 684,2        | 977,5        | 528,0        | 617,1        | 779,8        |

Tab. 5 Dynamický modul pružnosti  $E_{crL}$

| Dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ [MPa] |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Označení                                  | 3. den       | 7. den       | 14. den      | 28. den      | 90. den      |
| C-1                                       | 12800        | 13900        | 15000        | 16000        | 16900        |
| C-2                                       | 12800        | 14000        | 15100        | 16100        | 17000        |
| C-3                                       | 12500        | 13600        | 14700        | 15600        | 16500        |
| C-4                                       | 12800        | 13800        | 14900        | 15800        | 16700        |
| C-5                                       | 14100        | 15300        | 16500        | 17500        | 18500        |
| C-6                                       | 12900        | 14000        | 15100        | 16100        | 17000        |
| C-7                                       | 12500        | 13600        | 14700        | 15700        | 16500        |
| C-8                                       | 12800        | 13800        | 14800        | 15700        | 16600        |
| C-9                                       | 12500        | 13600        | 14700        | 15600        | 16400        |
| C-10                                      | 12900        | 14000        | 15100        | 16100        | 17000        |
| C-11                                      | 12800        | 13900        | 15000        | 16000        | 16800        |
| C-12                                      | 12700        | 13700        | 14700        | 15700        | 16500        |
| <b>Průměrná hodnota</b>                   | <b>12800</b> | <b>13900</b> | <b>15000</b> | <b>16000</b> | <b>16900</b> |
| Směr. výběrová odchylka                   | 423,1        | 457,9        | 493,8        | 514,3        | 559,8        |

Tab. 6 Dynamický modul pružnosti  $E_{crf}$

| Dynamický modul pružnosti $E_{crf}$ [MPa] |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Označení                                  | 3. den       | 7. den       | 14. den      | 28. den      | 90. den      |
| C-1                                       | 13700        | 14500        | 16000        | 17000        | 18000        |
| C-2                                       | 13300        | 14500        | 15700        | 17100        | 18000        |
| C-3                                       | 13100        | 14300        | 15300        | 16300        | 17200        |
| C-4                                       | 13500        | 14400        | 15700        | 16700        | 17400        |
| C-5                                       | 14800        | 16100        | 17200        | 18300        | 19500        |
| C-6                                       | 13800        | 15000        | 15900        | 17300        | 17600        |
| C-7                                       | 13300        | 14400        | 15600        | 16600        | 17600        |
| C-8                                       | 13300        | 14400        | 15300        | 16300        | 17200        |
| C-9                                       | 13100        | 14200        | 15400        | 16400        | 17200        |
| C-10                                      | 13700        | 14700        | 16100        | 16800        | 17900        |
| C-11                                      | 13600        | 14700        | 15800        | 16800        | 17800        |
| C-12                                      | 13400        | 14500        | 15800        | 16600        | 17600        |
| <b>Průměrná hodnota</b>                   | <b>13600</b> | <b>14600</b> | <b>15800</b> | <b>16900</b> | <b>17800</b> |
| Směr. výběrová odchylka                   | 456,3        | 505,4        | 506,0        | 551,9        | 626,0        |

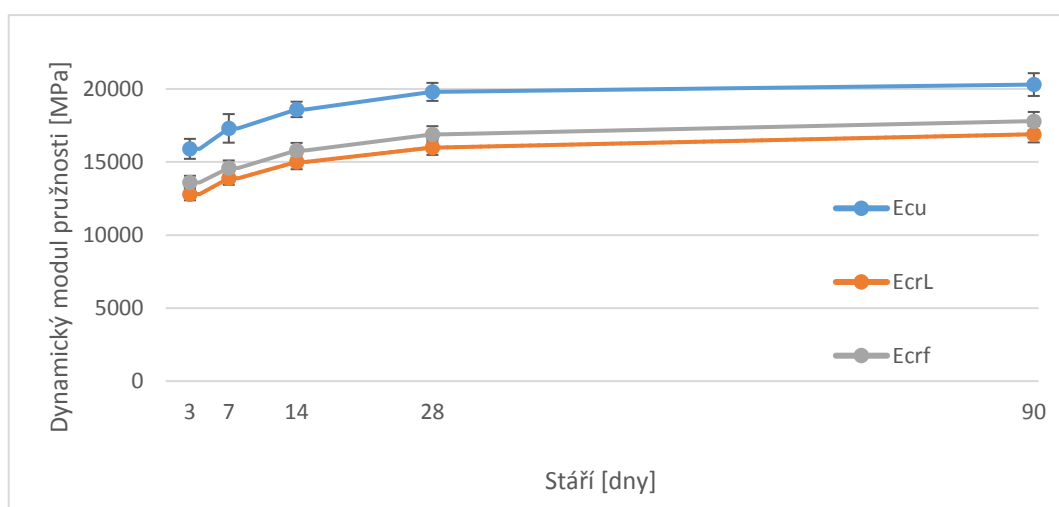
Tab. 7 Informativní pevnost betonu v tlaku  $R_{ce}$  (pomocí UZ metody)

| Informativní pevnost betonu $R_{ce}$ [MPa] |             |             |             |             |             |
|--------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Označení                                   | 3. den      | 7. den      | 14. den     | 28. den     | 90. den     |
| C-1                                        | 14,8        | 22,4        | 20,4        | 21,2        | 23,0        |
| C-2                                        | 15,5        | 19,7        | 21,6        | 24,4        | 26,8        |
| C-3                                        | 15,1        | 17,9        | 20,9        | 22,7        | 23,7        |
| C-4                                        | 15,5        | 18,2        | 19,8        | 23,4        | 24,2        |
| C-5                                        | 16,5        | 19,7        | 22,1        | 25,5        | 26,3        |
| C-6                                        | 17,3        | 18,4        | 21          | 25,4        | 27,0        |
| C-7                                        | 16,0        | 16,3        | 20,3        | 22,8        | 22,9        |
| C-8                                        | 16,3        | 17,6        | 20,4        | 23,9        | 24,9        |
| C-9                                        | 14,6        | 17,7        | 21,8        | 21,8        | 22,4        |
| C-10                                       | 16,3        | 18,1        | 21,5        | 24,4        | 25,6        |
| C-11                                       | 15,3        | 17,8        | 20,4        | 23,1        | 25,6        |
| C-12                                       | 14,7        | 16,1        | 19,8        | 22,4        | 25,9        |
| <b>Průměrná hodnota</b>                    | <b>16,0</b> | <b>18,0</b> | <b>21,0</b> | <b>23,0</b> | <b>25,0</b> |
| Směr. výběrová odchylka                    | 0,8         | 1,7         | 0,8         | 1,3         | 1,6         |

Tab. 8 Dynamický modul pružnosti ve smyku  $G_{cr}$

| Dynamický modul pružnosti ve smyku $G_{cr}$ [MPa] |             |             |             |             |             |
|---------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Označení                                          | 3. den      | 7. den      | 14. den     | 28. den     | 90. den     |
| C-1                                               | 5200        | 5400        | 6100        | 6600        | 6900        |
| C-2                                               | 5200        | 5600        | 6100        | 6500        | 6800        |
| C-3                                               | 5100        | 5500        | 6000        | 6400        | 6700        |
| C-4                                               | 5200        | 5600        | 6100        | 6400        | 6800        |
| C-5                                               | 5800        | 6200        | 6700        | 7100        | 7600        |
| C-6                                               | 5100        | 5700        | 6100        | 6500        | 6800        |
| C-7                                               | 5000        | 5600        | 6000        | 6400        | 6800        |
| C-8                                               | 5100        | 5500        | 6000        | 6300        | 6700        |
| C-9                                               | 5100        | 5500        | 5900        | 6400        | 6700        |
| C-10                                              | 5200        | 5700        | 6100        | 6500        | 6900        |
| C-11                                              | 5200        | 5700        | 6100        | 6500        | 6800        |
| C-12                                              | 5200        | 5700        | 6000        | 6400        | 6600        |
| <b>Průměrná hodnota</b>                           | <b>5200</b> | <b>5600</b> | <b>6100</b> | <b>6500</b> | <b>6800</b> |
| Směr. výběrová odchylka                           | 200,0       | 202,1       | 200,0       | 204,5       | 253,9       |

V následujícím grafu 1 je zobrazen časový vývoj dynamických modulů pružnosti. Z grafu lze vyčíst, že dynamický modul pružnosti stanovený pomocí ultrazvukové impulsní metody je přibližně v průměru o 3 GPa vyšší než modul pružnosti stanovený rezonanční metodou, tato skutečnost je obvyklá. Dále lze na grafu pozorovat očekávaný strmý nárůst hodnoty dynamického modulu pružnosti v raném stáří betonu. Pro chybové úsečky byla použita směrodatná výběrová odchylka.



Graf 1 Vývoj dynamických modulů pružnosti v čase

Pevnost v tlaku byla stanovena ve 28 dnech na krychlích. V 90 a 186 dnech od betonáže byla pevnost v tlaku stanovena na válcích. Výsledné hodnoty pevností v tlaku jsou v tabulkách 9, 10 a 11. Mírný pokles pevností v tlaku mezi 90 a 186 dny je způsoben vysušením zkušebních těles. Pevnostní třída použitého betonu není definovaná, neboť se nejedná o komerční recepturu. Zatřídění lehkého betonu nebylo provedeno, je však pravděpodobné, že by se zřejmě jednalo o LC16/18.

*Tab. 9 Krychelná pevnost v tlaku  $f_c$  po 28 dnech zrání*

| Pevnost v tlaku $f_c$ 28 dní |             |
|------------------------------|-------------|
| Označení krychle             | $f_c$ [MPa] |
| C-1                          | 22,4        |
| C-2                          | 23,8        |
| C-3                          | 24,2        |
| <b>Průměrná hodnota</b>      | <b>23,4</b> |
| Směr. výběrová odchylka      | 1,0         |

*Tab. 10 Válcová pevnost v tlaku  $f_c$  po 90 dnech zrání*

| Pevnost v tlaku $f_c$ 90 dní |             |
|------------------------------|-------------|
| Označení válce               | $f_c$ [MPa] |
| C-13                         | 21,2        |
| C-14                         | 22,7        |
| C-15                         | 21,1        |
| <b>Průměrná hodnota</b>      | <b>21,6</b> |
| Směr. výběrová odchylka      | 0,9         |

*Tab. 11 Válcová pevnost v tlaku  $f_c$  po 186 dnech zrání (před zatěžováním)*

| Pevnost v tlaku $f_c$ 186 dní |             |
|-------------------------------|-------------|
| Označení válce                | $f_c$ [MPa] |
| C-16                          | 21,4        |
| C-17                          | 20,4        |
| C-18                          | 20,8        |
| <b>Průměrná hodnota</b>       | <b>20,8</b> |
| Směr. výběrová odchylka       | 0,5         |

Pevnost v příčném tahu byla stanovena na krychlích ve 28 dnech zrání betonu a na válcích ve 186 dnech. Výsledné hodnoty jsou v tabulkách 12 a 13. Na Obr. 26 je zobrazena plocha porušení příčným tahem na válci. Mírný pokles výsledné pevnosti je způsoben ztrátou volné vody materiálu sušením.

Tab. 12 Pevnost v příčném tahu  $f_{ct}$  po 28 dnech zrání na krychlích

| Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ 28 dní |                |
|----------------------------------------|----------------|
| Označení krychle                       | $f_{ct}$ [MPa] |
| C-4                                    | 2,5            |
| C-5                                    | 2,3            |
| C-6                                    | 2,4            |
| <b>Průměrná hodnota</b>                | <b>2,4</b>     |
| Směr. výběrová odchylka                | 0,1            |

Tab. 13 Pevnost v příčném tahu  $f_{ct}$  po 186 dnech zrání na válcích

| Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ 186 dní |                |
|-----------------------------------------|----------------|
| Označení válce                          | $f_{ct}$ [MPa] |
| C-19                                    | 2,2            |
| C-20                                    | 2,0            |
| C-21                                    | 2,3            |
| <b>Průměrná hodnota</b>                 | <b>2,2</b>     |
| Směr. výběrová odchylka                 | 0,2            |



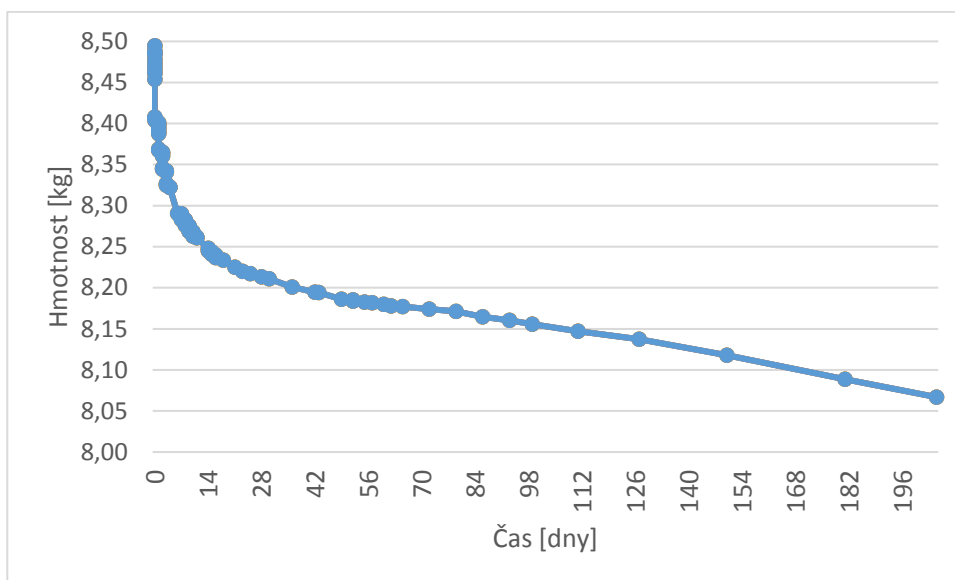
Obr. 24 Plocha porušení příčným tahem na zkušebním válci

Krychle i válce použité pro měření hmotnostního úbytku byly pečlivě změřeny. Výsledné hodnoty jsou sepsány v Tab. 14.

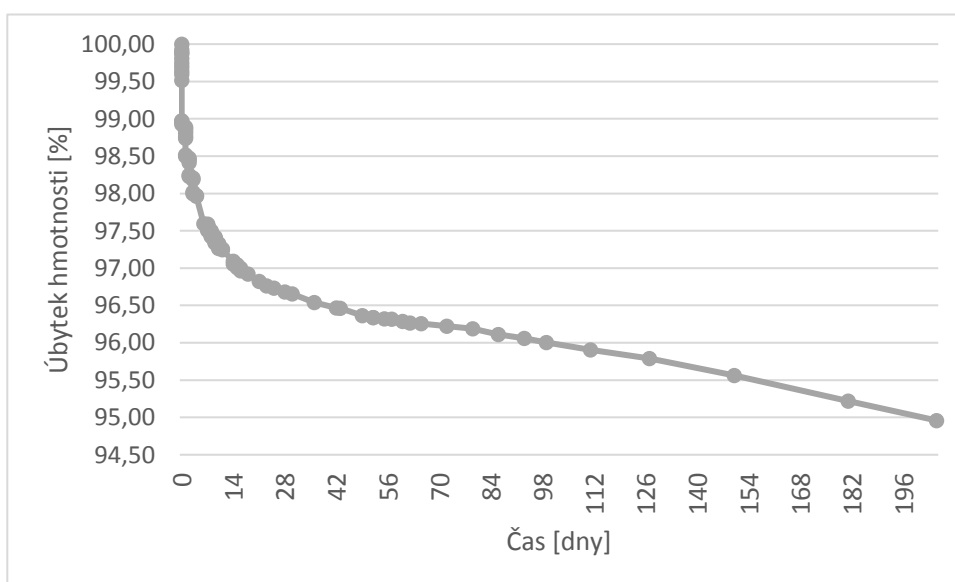
Tab. 14 Rozměry válců a krychlí pro měření hm. úbytku

| Označení     | a [mm] | b [mm] | c [mm] |
|--------------|--------|--------|--------|
| Krychle č. 1 | 150,13 | 150,30 | 151,66 |
| Krychle č. 2 | 150,45 | 150,48 | 150,97 |
| Krychle č. 3 | 150,29 | 150,39 | 151,31 |
|              | d [mm] | L [mm] |        |
| Válec C-19   | 149,19 | 296,68 |        |
| Válec C-20   | 149,29 | 298,93 |        |
| Válec C-21   | 149,09 | 298,87 |        |
| Válec C-22   | 149,40 | 301,30 |        |
| Válec C-23   | 149,21 | 299,87 |        |

Měření úbytku hmotnosti na válci C-22 probíhalo od 29. 5. 2017 a probíhá stále. Jedná se o volné vysychání měřené od chvíle odformování zkušebního válce. Pro potřeby DP byla hmotnost naposledy zjištěna 20. 12. 2017, tedy přesně ve stáří 208 dní. Hmotnostní úbytek v kg je zobrazen v grafu 2, procentuální úbytek hmotnosti je potom zobrazen v grafu 3.

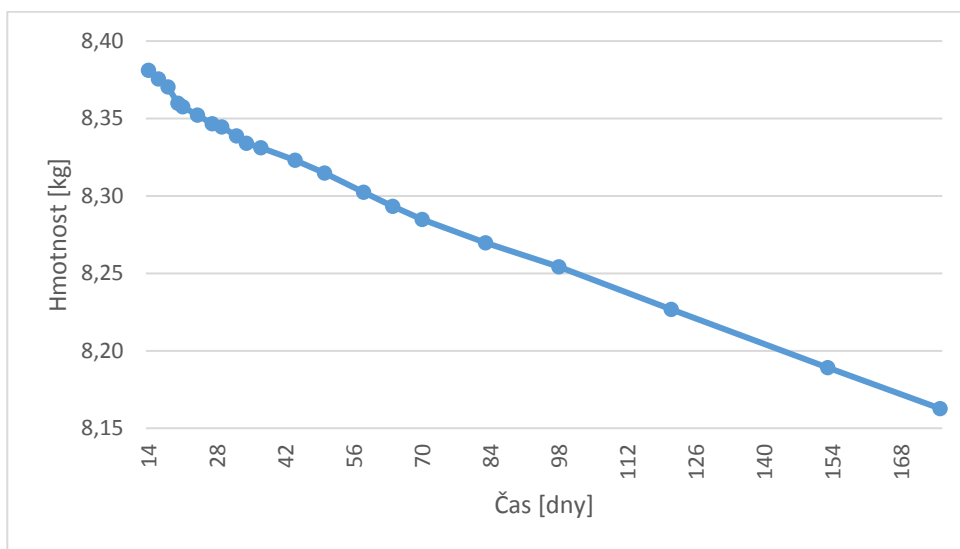


*Graf 2 Hmotnostní úbytek válce C-22*

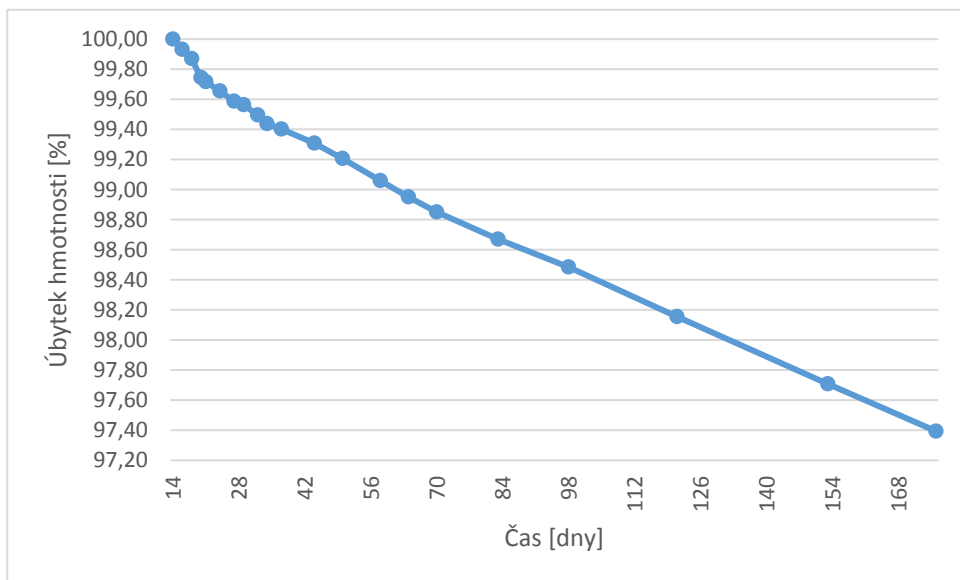


*Graf 3 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku válce C-22*

Hmotnostní úbytek na válci C-23 byl měřen od 11. 7. 2017 a probíhá stále. Pro potřeby DP byla hmotnost naposledy zjištěna taktéž dne 20. 12. 2017. Zkušební těleso bylo po celou dobu po odformování skladováno ve vodní lázni a po 28 dnech od betonáže bylo vyjmuto a průběžně váženo pro měření hmotnostního úbytku (volné vysychání). Měření probíhalo ručně v předem naplánovaných intervalech. Průběh hmotnostního úbytku je zobrazen v grafech 4 a 5.



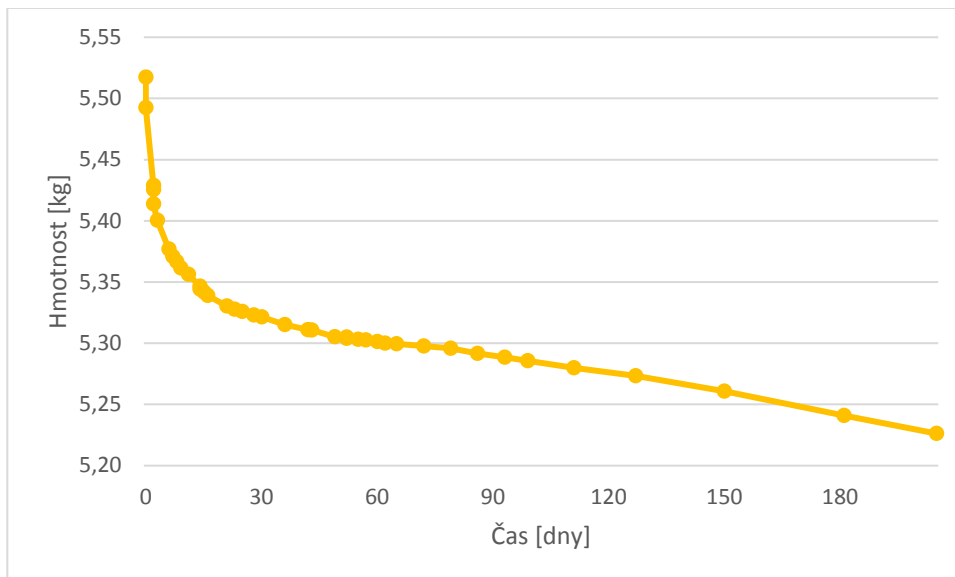
*Graf 4 Hmotnostní úbytek válce C-23*



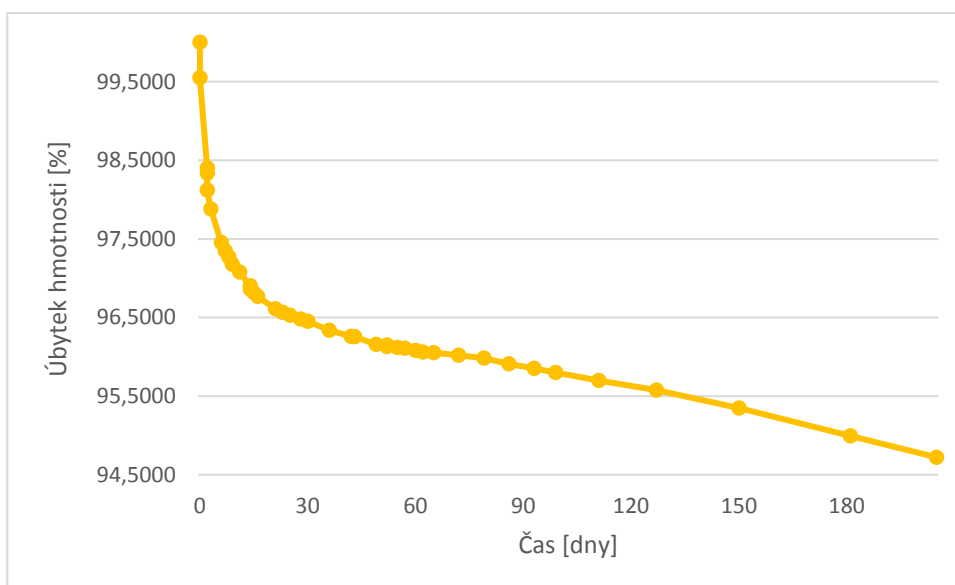
*Graf 5 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku válce C-23*

Vážení krychlí probíhalo kontinuálně na digitální váze TONAVA. Probíhalo od 29. 5. 2017 po doby tří dnů a poté začalo měření ručně v předem naplánovaných

intervalech. Měření probíhá stále, pro potřeby DP byla poslední data stanovena dne 20. 12. 2017. Všechny 3 krychle byly kontinuálně váženy na jedné váze, a proto jsou hmotnostní úbytky zprůměrovány a v grafech 6, 7 je uvedena průměrná hodnota.



*Graf 6 Hmotnostní úbytek krychlí*

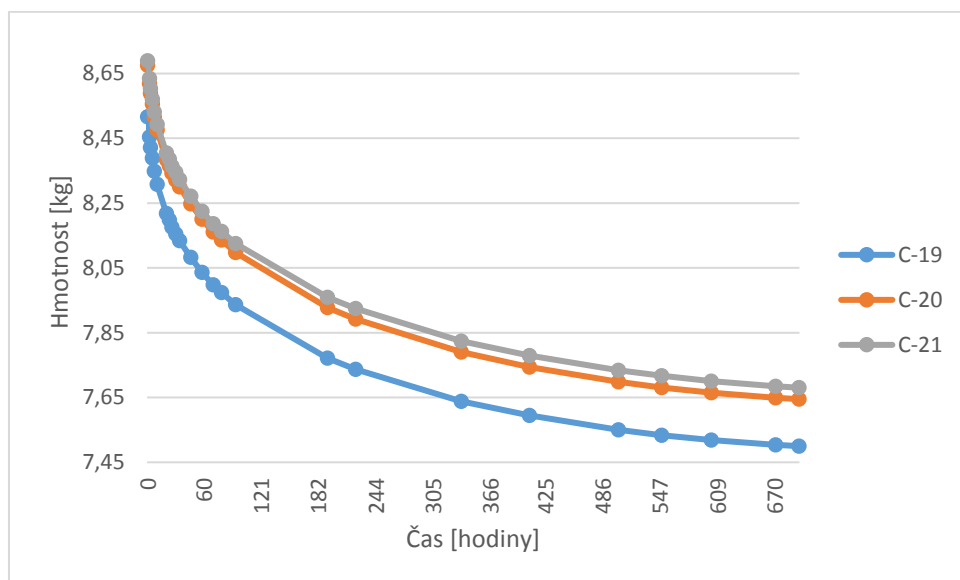


*Graf 7 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku krychlí*

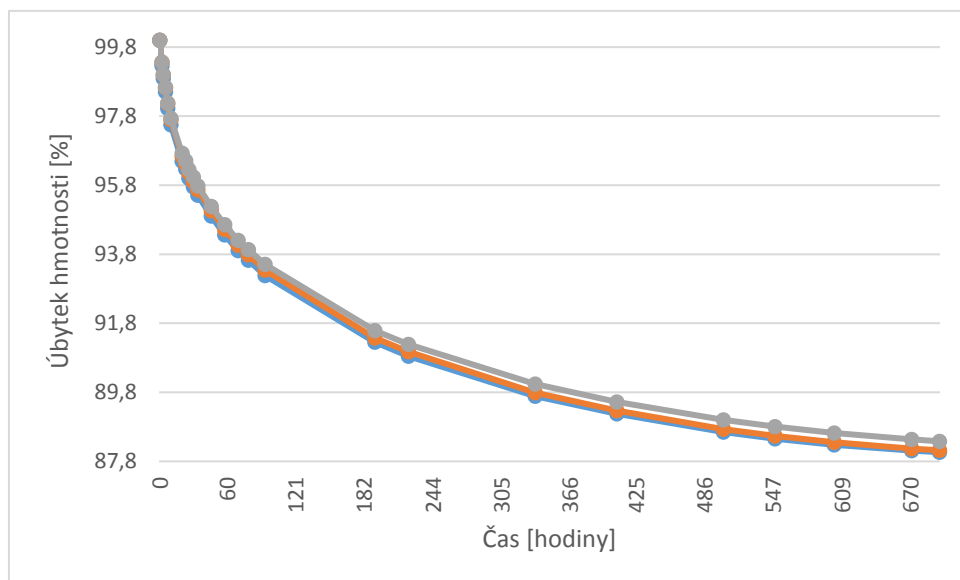
Válce C-19, C-20 a C-21 byly po odformování uloženy do vodní lázně a po 90 dnech zrání byly umístěny do sušičky, která byla vyhřáta na 90 °C. Během sušení v sušičce byla tělesa ručně vážena na digitální váze, v předem naplánovaných intervalech. Hmotnostní úbytek je zobrazen na grafu 8 a 9. Zkušební tělesa po



ustálení hmotnosti byla použita pro stanovení pevnosti v příčném tahu. Hmotnost zkušebních válců se ustálila po 14 dnech v sušičce. Průměrná vlhkost zkušebních válců byla 11,3 %. Volným vysycháním zkušební krychle ztratily v průměru 5,57 % vlhkosti a válec, který vysychal ihned po odformování 5,31 % po 208 dnech od betonáže



*Graf 8 Úbytek hmotnosti zkušebních válců C-16, C-17 a C-18*

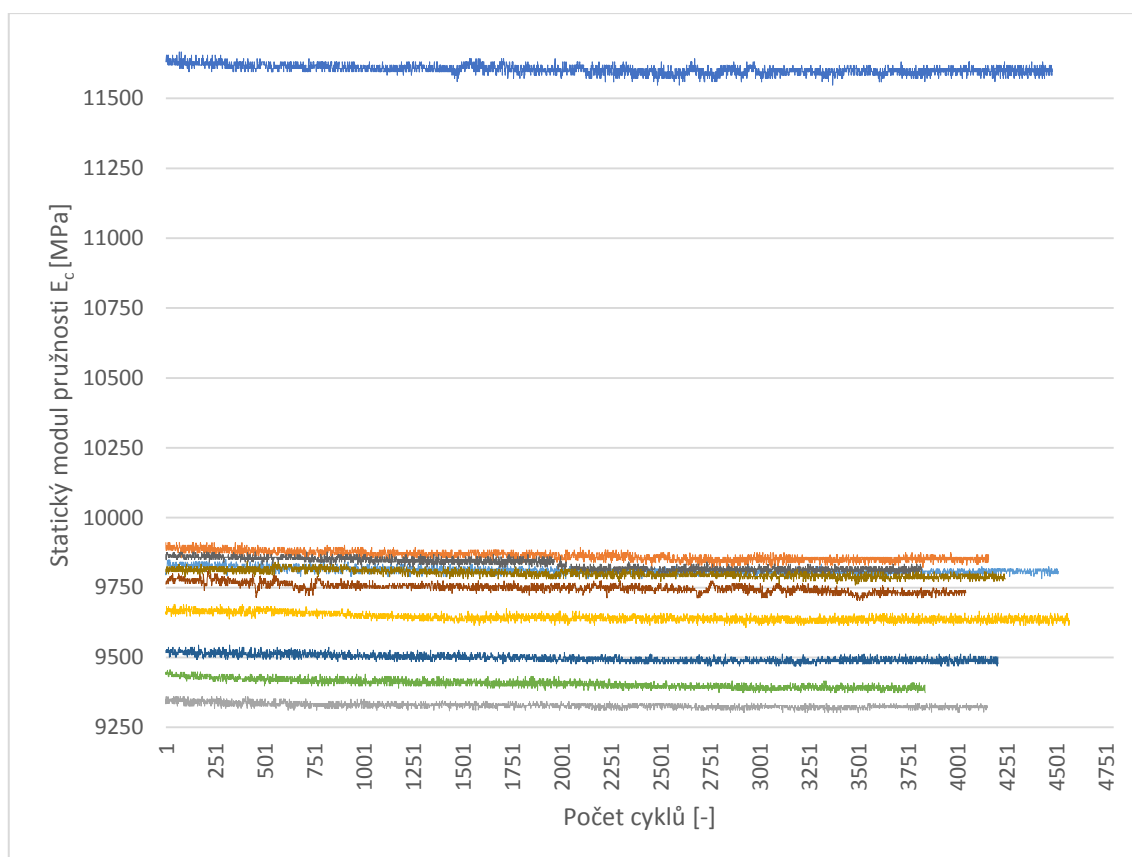


*Graf 9 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku zkušebních válců*

Jiný přístup k návrhu receptury lehkých betonů oproti betonům obyčejným (větší podíl menší frakce kameniva) a jiné vlastnosti cementového kamene a

především pórovitého kameniva vedou k delší době vysychání. Doba vysychání u lehkého betonu, který je používán v konstrukcích (např. podlahy), je při výstavbě bedlivě sledována kvůli dalším fázím. Výše prezentované výstupy hmotnostních úbytků jednoznačně ukazují, že vysychání lehkého betonu opravdu probíhá velmi pozvolna, viz rozdíly v procentuální ztrátě vlhkosti betonu v sušičce a betonu vysychajícího volně.

Jak již bylo výše zmíněno, cyklickým zatěžováním bylo z časových důvodů odzkoušeno 10 válců, konkrétně C-1 až C-10. Z grafu 9 lze pozorovat, že hodnota statického modulu pružnosti je v podstatě stále stejná. Je tedy zřejmé, že se lehký beton při zatěžování v pružné oblasti chová jinak než beton obyčejný. U něj zpravidla dochází k mírnému poklesu modulu pružnosti, jak je prezentováno např. v [34]. Dále je na grafickém zpracování vidět velký rozdíl hodnoty statického modulu pružnosti zkušebního válce C-5 s porovnáním výsledných hodnot ostatních těles. Válec C-5 po celou dobu měření dosahoval nejvyšších výsledků a měl největší objemovou hmotnost, tudíž tento rozdíl byl očekáván. Po zpracování transformovaných hodnot bylo vyhodnoceno až 4500 cyklů, nejmenší počet cyklů měl válec C-9 (3820).



*Graf 10 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna zkušební tělesa*

V Tab. 15 jsou výsledné hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku seřazeny ve vybraných cyklech. Hodnoty jsou zaokrouhleny dle normy a jejich změna je buď žádná (u 7 válců) či pouze nepatrná (pokles o 100 MPa u 3 válců).

*Tab. 15 Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům*

| Počet cyklů | Statický modul pružnosti v tlaku $E_c$ [MPa] |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|             | C-1                                          | C-2  | C-3  | C-4  | C-5   | C-6  | C-7  | C-8  | C-9  | C-10 |
| 1           | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9700 | 11600 | 9400 | 9500 | 9800 | 9900 | 9800 |
| 500         | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9700 | 11600 | 9400 | 9500 | 9800 | 9900 | 9800 |
| 1000        | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9700 | 11600 | 9400 | 9500 | 9800 | 9900 | 9800 |
| 2000        | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9600 | 11600 | 9400 | 9500 | 9700 | 9800 | 9800 |
| 3000        | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9600 | 11600 | 9400 | 9500 | 9700 | 9800 | 9800 |
| poslední    | 9800                                         | 9900 | 9300 | 9600 | 11600 | 9400 | 9500 | 9700 | 9800 | 9800 |

V následující tabulce 16 jsou pro lepší přehlednost uvedeny výsledné hodnoty statických modulů pružnosti ve vybraných cyklech, se zaokrouhlením na jednotky MPa – zaokrouhlení tedy není provedeno dle požadavků normy, aby byla viditelná změna statického modulu pružnosti v tlaku.

*Tab. 16 Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům*

| Počet cyklů | Statický modul pružnosti v tlaku $E_c$ [MPa] |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|             | C-1                                          | C-2  | C-3  | C-4  | C-5   | C-6  | C-7  | C-8  | C-9  | C-10 |
| 1           | 9815                                         | 9894 | 9347 | 9663 | 11640 | 9445 | 9521 | 9770 | 9866 | 9814 |
| 500         | 9824                                         | 9880 | 9336 | 9670 | 11623 | 9419 | 9510 | 9770 | 9857 | 9812 |
| 1000        | 9820                                         | 9880 | 9337 | 9652 | 11609 | 9413 | 9504 | 9758 | 9854 | 9814 |
| 2000        | 9806                                         | 9856 | 9331 | 9643 | 11590 | 9407 | 9493 | 9747 | 9833 | 9806 |
| 3000        | 9810                                         | 9857 | 9321 | 9633 | 11594 | 9391 | 9486 | 9742 | 9822 | 9791 |
| poslední    | 9808                                         | 9853 | 9322 | 9632 | 11601 | 9389 | 9486 | 9735 | 9843 | 9787 |

Vliv cyklování snížil hodnotu statického modulu pružnosti řádově v desítkách MPa (maximální hodnota 56 MPa).

Dále byl vliv cyklického zatěžování sledován na vývoji dynamického modulu pružnosti, který je v následujících tabulkách 17 a 18. Dynamický modul pružnosti byl stanoven v 90 dnech stáří betonu, kdy zkušební tělesa zrála ve vodě, a následně před zatěžováním (stáří 186 dní), kdy měla tělesa ustálenou hmotnost, čehož bylo docíleno v sušičce, a po zatěžování (stáří 208 dní). Ztráta volné vody ve zkušebních tělesech má za příčinu pokles hodnot dynamického modulu pružnosti. Snížení hodnoty modulu pružnosti po cyklickém zatížení bylo pomocí dynamických metod průkaznější.

Tab. 17 Dynamický modul pružnosti stanoven UZ impulzovou metodou

| Dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ [MPa] |              |              |              |
|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Označení                                 | 90. den      | 186. den     | 208. den     |
| C-1                                      | 20200        | 11900        | 11500        |
| C-2                                      | 19900        | 11700        | 11100        |
| C-3                                      | 19900        | 12000        | 11400        |
| C-4                                      | 20100        | 11800        | 11200        |
| C-5                                      | 22400        | 12900        | 12300        |
| C-6                                      | 20000        | 11800        | 11200        |
| C-7                                      | 20700        | 11500        | 10900        |
| C-8                                      | 19900        | 11600        | 10900        |
| C-9                                      | 19900        | 11300        | 10700        |
| C-10                                     | 21000        | 12100        | 11200        |
| C-11                                     | 20100        | 11400        | -            |
| C-12                                     | 19400        | 11300        | -            |
| <b>Průměrná hodnota</b>                  | <b>20300</b> | <b>11800</b> | <b>11200</b> |
| Směr. výběrová odchylka                  | 779,8        | 441,3        | 442,7        |

Tab. 18 Dynamický modul pružnosti stanoven rezonanční metodou

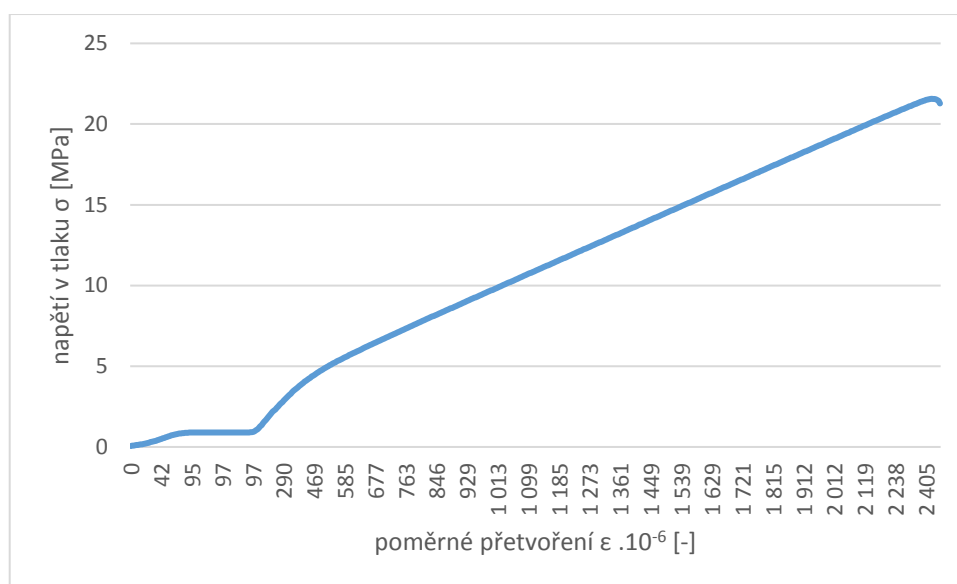
| Dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ [MPa] |              |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Označení                                  | 90. den      | 186. den     | 208. den     |
| C-1                                       | 16900        | 10800        | 10300        |
| C-2                                       | 17000        | 10700        | 10200        |
| C-3                                       | 16500        | 10400        | 9900         |
| C-4                                       | 16700        | 10500        | 10100        |
| C-5                                       | 18500        | 11600        | 11100        |
| C-6                                       | 17000        | 10800        | 10300        |
| C-7                                       | 16500        | 10600        | 10000        |
| C-8                                       | 16600        | 10700        | 10000        |
| C-9                                       | 16400        | 10500        | 9900         |
| C-10                                      | 17000        | 11000        | 10300        |
| C-11                                      | 16800        | 10600        | -            |
| C-12                                      | 16500        | 10400        | -            |
| <b>Průměrná hodnota</b>                   | <b>16900</b> | <b>10700</b> | <b>10200</b> |
| Směr. výběrová odchylka                   | 559,8        | 329,8        | 351,0        |

Po stanovení dynamického modulu pružnosti byly zkušební válce zatěžovány v lisu tlakovou silou až do jejich porušení. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 19.

Tab. 19 Pevnost v tlaku  $f_c$  stanovená na válcích po zatěžování (ve stáří betonu 208 dní)

| Pevnost v tlaku $f_c$ 208 dní |             |
|-------------------------------|-------------|
| Označení válce                | $f_c$ [MPa] |
| C-1                           | 21,6        |
| C-2                           | 21,7        |
| C-3                           | 21,0        |
| C-4                           | 20,9        |
| C-5                           | 23,6        |
| C-6                           | 21,1        |
| C-7                           | 20,4        |
| C-8                           | 21,3        |
| C-9                           | 21,1        |
| C-10                          | 21,9        |
| <b>Průměrná hodnota</b>       | <b>21,5</b> |
| Směr. výběrová odchylka       | 0,9         |

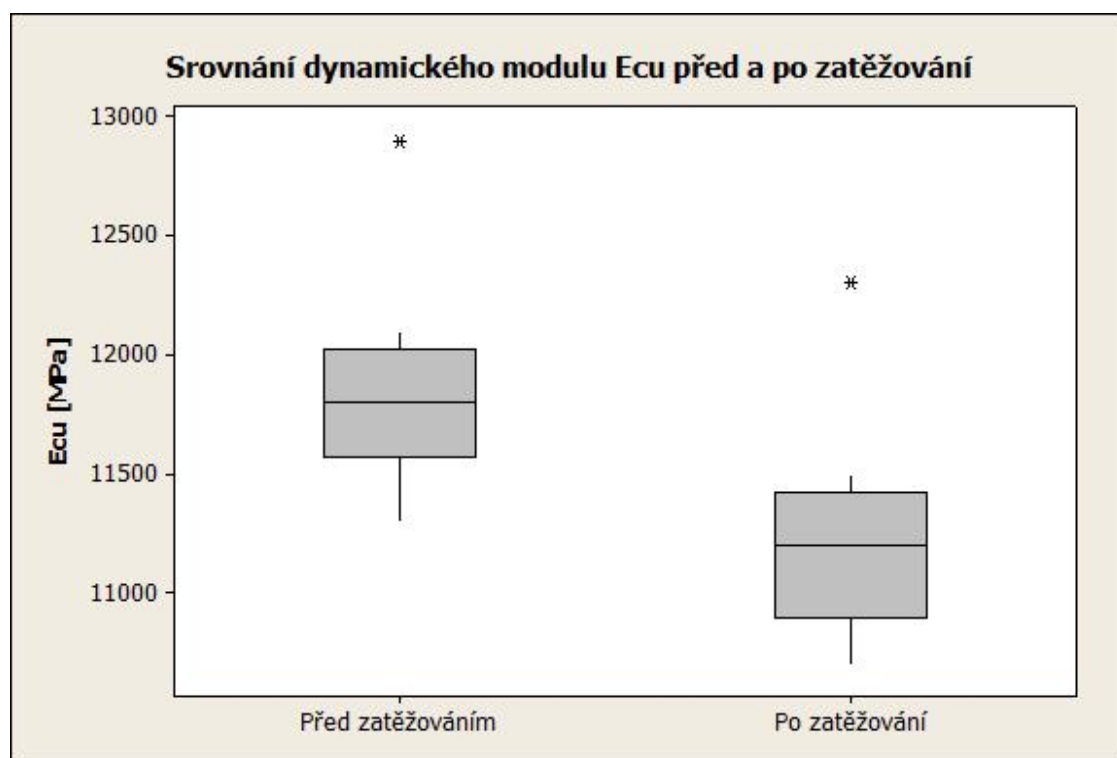
Následující graf 11 je tzv. deformační diagram. Vyjadřuje závislost zatížení  $\sigma$  [MPa] na poměrné deformaci  $\epsilon$  [-]. Vykreslený deformační diagram je z průběhu zkoušení válce C-1, ostatní jsou v příloze.



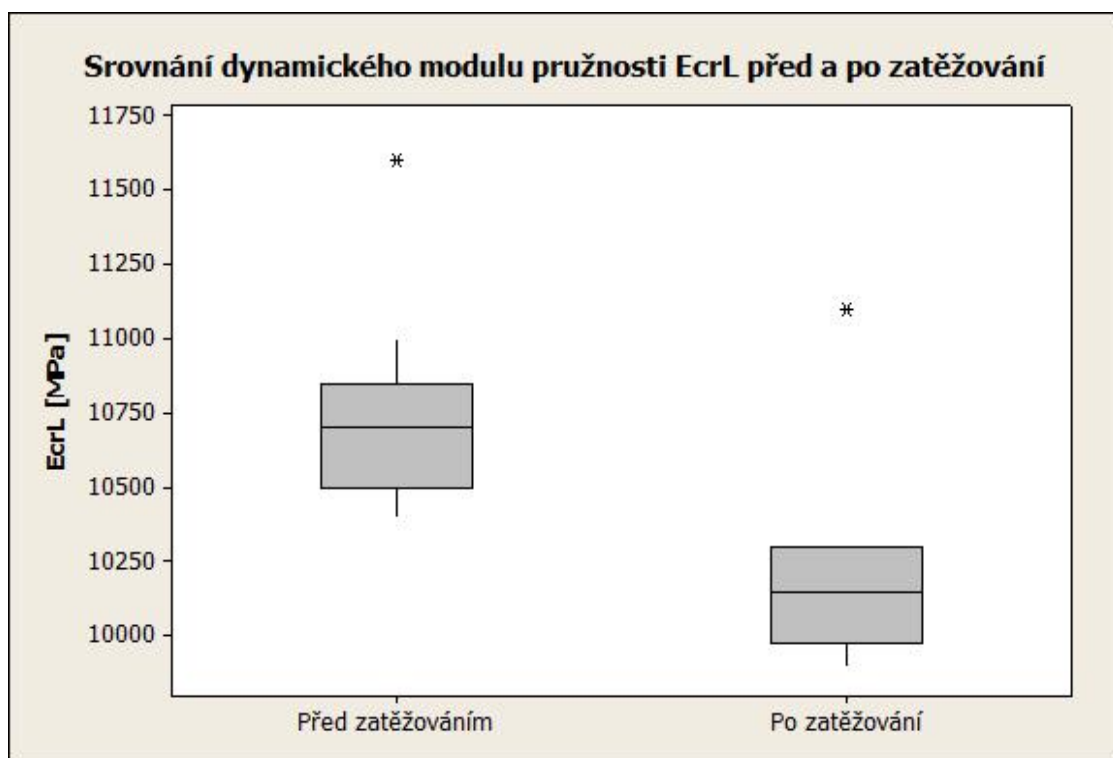
Graf 11 Deformační diagram zkušebního válce C-1

Z deformačního diagramu je patrné, že zatěžovací síla byla držena na hodnotě přibližně 15 kN po určitou dobu (přibližně 1 sekunda). Toto podržení zatížení je v lisu nastaveno z výroby a slouží pro lepší usazení zkušebního tělesa, pro provedení zkoušky toto nastavení nebylo nutné měnit.

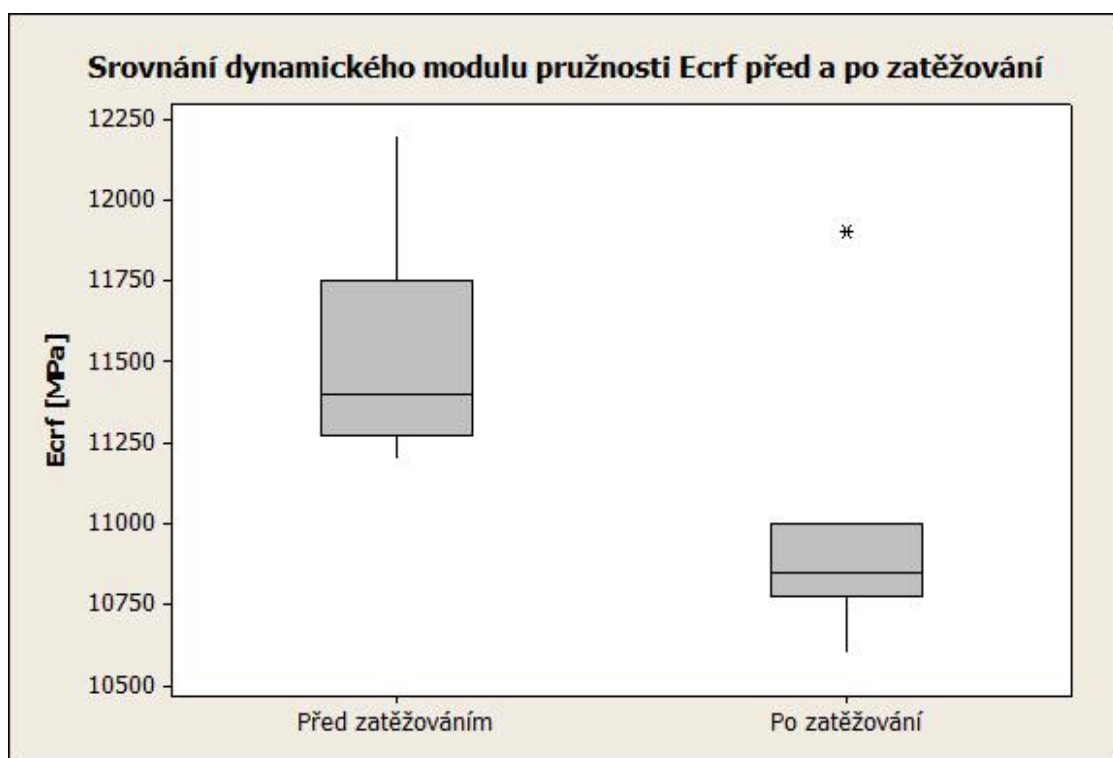
V následujících krabicových grafech (grafy 12 až 15) je zobrazen vliv cyklického zatěžování na dynamický modul pružnosti. Vysvětlení krabicového grafu je následující. Horní část ohraničení znázorňuje 75% kvartil, dolní část ohraničení je 25% kvartil. Střední úsečka v krabici označuje medián. Konce svislých čar jsou maximální a minimální hodnoty souboru dat a hvězdička znázorňuje odlehlou hodnotu.



*Graf 12 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti  $E_{cu}$*

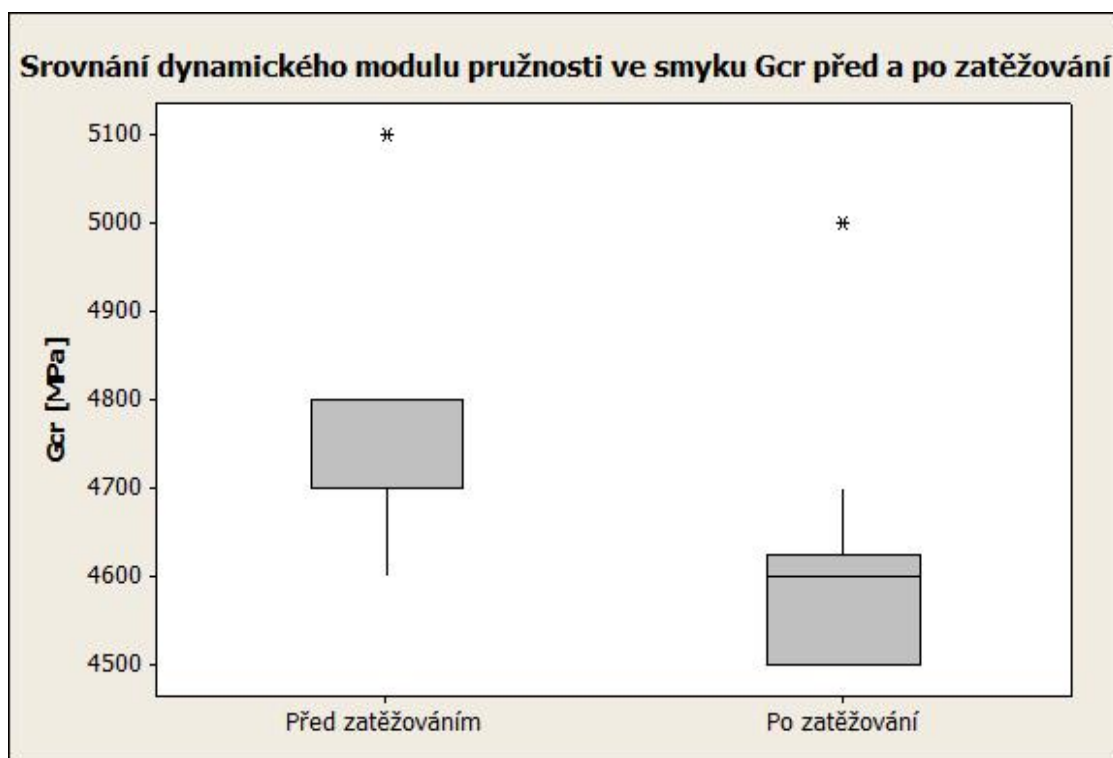


Graf 13 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti  $E_{crL}$

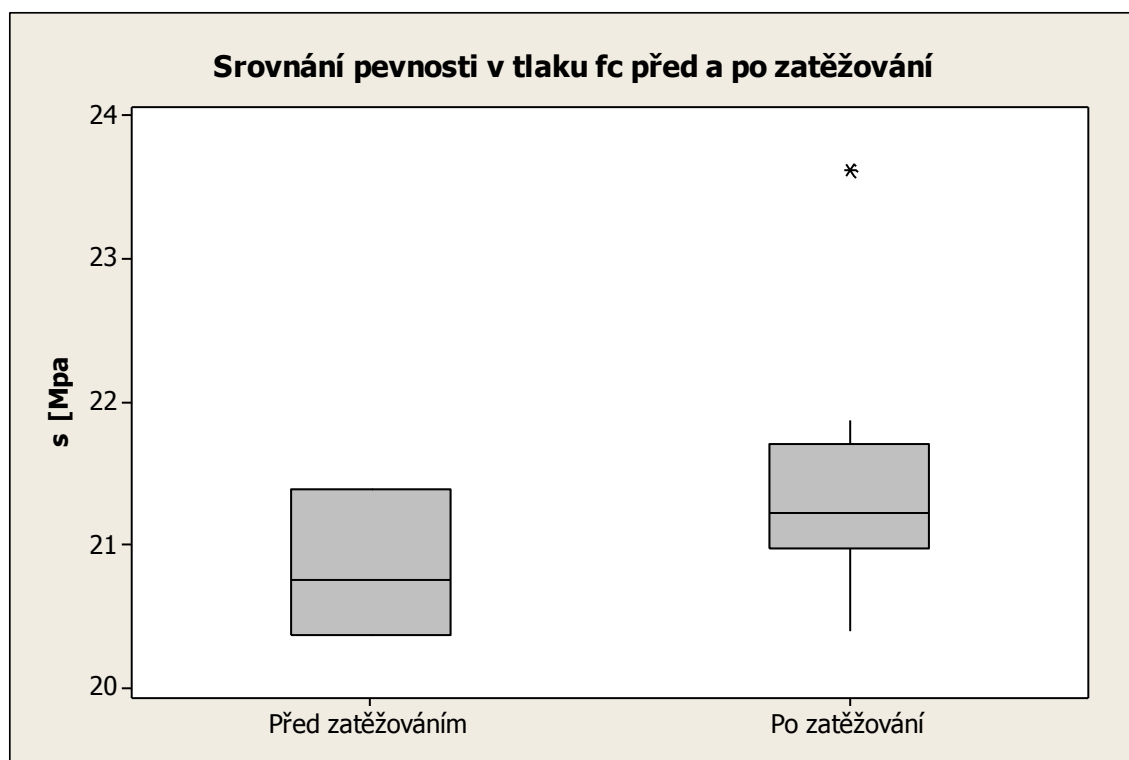


Graf 14 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti  $E_{crf}$





*Graf 15 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti ve smyku  $G_{cr}$*



*Graf 16 Krabicový graf pevnosti v tlaku  $f_c$*

## 5. Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu vybraných parametrů lehkého betonu, především statického modulu pružnosti v tlaku. Bylo zatěžováno deset zkušebních těles ve tvaru válce a dosažený počet zatěžovacích cyklů byl až 4500 na jednom tělese, přičemž každé těleso bylo zatěžováno ve zkušebním lisu přibližně 40 hodin.

Vlivem mnohonásobného cyklického zatěžování mírně klesá hodnota dynamického modulu pružnosti lehkého betonu v tlaku. Tento závěr byl ověřen i statistickou analýzou ANOVA provedenou v programu Minitab, která prokázala změnu dynamického modulu pružnosti na hladině významnosti 0,05. Další sledovaný parametr lehkého betonu, pevnost v tlaku, po mnohonásobném cyklickém zatěžování se téměř nezměnil. Opět byl tento závěr potvrzen statistickou metodou ANOVA, která na hladině významnosti 0,05 potvrdila, že nedošlo ke statisticky významné změně. Matematická statistika dále neprokázala změnu na hladině významnosti 0,05 u dynamického modulu pružnosti ve smyku.

Snížení statického modulu pružnosti je tak nepatrné, že nelze vyloučit vliv chyby měření, zejména kvůli celkové náročnosti dané zkoušky. Pouze u tří zkušebních těles byl naměřen pokles statického modulu pružnosti v tlaku, a to jen o 0,1 GPa, u zbylých sedmi zkušebních těles hodnota po mnohonásobném cyklickém zatěžování v pružné oblasti se neměnila, pokud byly výsledky zaokrouhleny dle normy. Výsledné hodnoty vedou k závěru, že zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku (v pružné oblasti) na jednom tělese může být prováděno opakovaně bez ovlivnění výstupů.

V rámci diplomové práce byly stanovovány další vybrané parametry. Sledování hmotnostních úbytků poukázalo na dlouhou dobu vysychání lehkého betonu, což je důležitá informace při výstavbě. Dále výsledky prokazují vliv vody ve vnitřní struktuře lehkého betonu na jeho pevnost i na modul pružnosti, kdy po vysušení těles došlo k poklesu výsledných hodnot těchto parametrů.



## 6. Seznam použité literatury

- [1] CHANDRA, S. a L. BERTSSON. *Lightweight aggregate concrete: science, technology. and applications*. 1. Norwich, N.J.: Noyes Publications, 2003. ISBN 08-155-1486-7.
- [2] HUBERTOŮVÁ, Michala. Lehký beton. *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. 2012, **2012**(7), 106-119.
- [3] ČSN EN 206: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [4] DROCHYTKA, Rostislav. *Lehké stavební látky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0514-7.
- [5] Cemex: Příručka liaporbeton. *BETON server* [online]. Praha: Cemex, 2006 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: [https://www.betonserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka\\_liapor.pdf](https://www.betonserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka_liapor.pdf)
- [6] RUSIN, Zbigniew a Przemysław ŚWIERCZ. Frost resistance of rock materials. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **148**, 704-714 [cit. 2017-12-13]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.198. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817308668>
- [7] ČSN EN 13055: *Pórovité kamenivo*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [8] ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu*. 3. vydání. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [9] ASLAM, Muhammad, Payam SHAFIGH a Mohd Zamin JUMAAT. Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: a review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **2016**(126), 56-73 [cit. 2017-12-12]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.100. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616301718>
- [10] *INSTITUT GEOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ* [online]. Ostrava: Hornicko-geologická fakulta Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, b.r. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/pemza%2001\\_resize.JPG](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/pemza%2001_resize.JPG)
- [11] *File:Tuff welded.jpg* [online]. San Francisco: Wikimedia Commons contributors, 2015 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Tuff\\_welded.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Tuff_welded.jpg)
- [12] *9\_40\_1356028222\_871926\_max.jpg* [online]. Vintířov: Lias Vintířov, LSM, k.s., b.r. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [http://obchod.liapor.cz/administrace/foto\\_zbozi/9\\_40\\_1356028222\\_871926\\_max.jpg](http://obchod.liapor.cz/administrace/foto_zbozi/9_40_1356028222_871926_max.jpg)
- [13] *4fb7cfe9b3.jpg* [online]. Ilmenau: LIAVER GmbH & Co KG, b.r. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://www.liaver.com/typo3temp/pics/4fb7cfe9b3.jpg>
- [14] *4-14mm-mg-3764.jpg* [online]. Edinburgh: 3 Lady Lawson, b.r. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/specifiedbypro/2047/462/4-14mm-mg-3764.jpg>
- [15] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. 1. české vyd. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.

- [16] INTERNAL CURING: FROM THE LABORATORY TO IMPLEMENTATION. *LWC Bridges Workshop* [online]. 2009, **2009**, 1-13 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: [http://escsi.org/uploadedFiles/Technical\\_Docs/Structural\\_Lightweight\\_Concrete/IBC%20Wkshop%2009%20Internal%20Curing%20Henkenseifkenet%20al.pdf](http://escsi.org/uploadedFiles/Technical_Docs/Structural_Lightweight_Concrete/IBC%20Wkshop%2009%20Internal%20Curing%20Henkenseifkenet%20al.pdf)
- [17] Liapor: Jak se vyrábí. *Liapor* [online]. Vintířov: LIAS VINTÍŘOV, LEHKÝ STAVEBNÍ MATERIÁL K.S., 2016 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/jak-se-vyrabi>
- [18] Liapor: Co je liapor. *Liapor* [online]. Vintířov: LIAS VINTÍŘOV, LEHKÝ STAVEBNÍ MATERIÁL K.S., 2016 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/co-je-liapor>
- [19] ČSN EN 12390-13: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [20] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. *Stavební materiály*. 1. vydání. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [21] ČSN ISO 1920-10: *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [22] ČSN EN 12390-4: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: ÚNMZ, 2001.
- [23] ISO 1920-4: *Testing of concrete - Part 4: Strength of hardened concrete*. International Organization for Standardization, 2005.
- [24] ČSN EN ISO 9513: *Kovové materiály - Kalibrace průtahoměřových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2003.
- [25] ČSN EN 12390-1: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [26] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 1. vydání. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [27] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [28] ČSN 73 1372: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [29] KOCÁB, D., M. KRÁLÍKOVÁ, P. CIKRLÉ, P. MISÁK a B. KUCHARCZYKOVÁ. Experimental analysis of the influence of concrete curing on the development of its elastic modulus over time. *Materiali in tehnologije*. 2017, **51**(4), 657-665. DOI: 10.17222/mit.2016.248. ISSN 15802949. Dostupné také z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit174/kocab.pdf>
- [30] ČSN EN 12350-5: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitem*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [31] ČSN EN 12350-6: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [32] ČSN EN 12390-6: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [33] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2009.

- [34] *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **148** [cit. 2017-12-13]. ISSN 09500618.

## 7. Seznam obrázků a grafů

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Vylehčení betonu kombinací pěnotvorných přísad a pórovitým kamenivem [5] .....                                               | 12 |
| Obr. 2 Mezerovitý beton [5] .....                                                                                                   | 14 |
| Obr. 3 LC s hutnou strukturou a pórovitým kamenivem [5] .....                                                                       | 14 |
| Obr. 4 Plynobeton [2] .....                                                                                                         | 15 |
| Obr. 5 Vpravo pemza, vlevo tuf [10], [11].....                                                                                      | 18 |
| Obr. 6 Vpravo liapor, uprostřed liaver, vpravo aardelit [12] [13] [14].....                                                         | 18 |
| Obr. 7 Deformační diagram [20] .....                                                                                                | 22 |
| Obr. 8 Průběh zatěžovacích cyklů [21].....                                                                                          | 24 |
| Obr. 9 Vyrobená zkušební tělesa.....                                                                                                | 31 |
| Obr. 10 Vážení cementu .....                                                                                                        | 32 |
| Obr. 11 Průběžné míchání čerstvého betonu.....                                                                                      | 32 |
| Obr. 12 Hutnění čerstvého betonu .....                                                                                              | 33 |
| Obr. 13 Vyhodnocování zkoušky rozlitím .....                                                                                        | 34 |
| Obr. 14 Skladování zkušebních těles .....                                                                                           | 35 |
| Obr. 15 Vlevo měření doby UZ impulsu zkušebním tělesem, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa.....                   | 36 |
| Obr. 16 Stanovení pevnosti v tlaku zatěžovací zkouškou .....                                                                        | 39 |
| Obr. 17 Stanovení pevnosti v příčném tahu zatěžovací zkouškou .....                                                                 | 40 |
| Obr. 18 Měření hmotnostního úbytku vlevo váha s kontinuálním záznamem, vpravo ručně na digitální váze .....                         | 42 |
| Obr. 19 Sušení zkušebních těles.....                                                                                                | 43 |
| Obr. 20 Zbroušení tlačené plochy .....                                                                                              | 43 |
| Obr. 21 Osazení odporových tenzometrů.....                                                                                          | 44 |
| Obr. 22 Mechanický lis LaborTech .....                                                                                              | 45 |
| Obr. 23 Vlevo měření doby průchodu UZ impulsu, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa .....                           | 46 |
| Obr. 24 Plocha porušení příčným tahem na zkušebním válci.....                                                                       | 52 |
| <br>                                                                                                                                |    |
| Graf 1 Vývoj dynamických modulů pružnosti v čase .....                                                                              | 50 |
| Graf 2 Hmotnostní úbytek válce C-22 .....                                                                                           | 53 |
| Graf 3 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku válce C-22.....                                                                   | 53 |
| Graf 4 Hmotnostní úbytek válce C-23 .....                                                                                           | 54 |
| Graf 5 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku válce C-23.....                                                                   | 54 |
| Graf 6 Hmotnostní úbytek krychlí .....                                                                                              | 55 |
| Graf 7 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku krychlí .....                                                                     | 55 |
| Graf 8 Úbytek hmotnosti zkušebních válců C-16, C-17 a C-18 .....                                                                    | 56 |
| Graf 9 Procentuální vyjádření hmotnostního úbytku zkušebních válců.....                                                             | 56 |
| Graf 10 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna zkušební tělesa..... | 58 |
| Graf 11 Deformační diagram zkušebního válce C-1 .....                                                                               | 61 |
| Graf 12 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti $E_{cu}$ .....                                                                  | 62 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 13 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti $E_{crL}$ .....         | 63 |
| Graf 14 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti $E_{crf}$ .....         | 63 |
| Graf 15 Krabicový graf dynamického modulu pružnosti ve smyku $G_{cr}$ ..... | 64 |
| Graf 16 Krabicový graf pevnosti v tlaku $f_c$ .....                         | 64 |



## 8. Seznam tabulek

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1 Pevnosti LC v tlaku [3] .....                                                              | 16 |
| Tab. 2 Receptura čerstvého betonu .....                                                           | 31 |
| Tab. 3 Rozměry zkušebních válců.....                                                              | 47 |
| Tab. 4 Dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ .....                                                   | 48 |
| Tab. 5 Dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ .....                                                  | 48 |
| Tab. 6 Dynamický modul pružnosti $E_{crf}$ .....                                                  | 49 |
| Tab. 7 Informativní pevnost betonu v tlaku $R_{ce}$ (pomocí UZ metody).....                       | 49 |
| Tab. 8 Dynamický modul pružnosti ve smyku $G_{cr}$ .....                                          | 50 |
| Tab. 9 Krychelná pevnost v tlaku $f_c$ po 28 dnech zrání.....                                     | 51 |
| Tab. 10 Válcová pevnost v tlaku $f_c$ po 90 dnech zrání .....                                     | 51 |
| Tab. 11 Válcová pevnost v tlaku $f_c$ po 186 dnech zrání (před zatěžováním) .....                 | 51 |
| Tab. 12 Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ po 28 dnech zrání na krychlích.....                       | 52 |
| Tab. 13 Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ po 186 dnech zrání na válcích.....                        | 52 |
| Tab. 14 Rozměry válců a krychlí pro měření hm. úbytku .....                                       | 52 |
| Tab. 15 Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům..... | 58 |
| Tab. 16 Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům..... | 59 |
| Tab. 17 Dynamický modul pružnosti stanoven UZ impulzovou metodou .....                            | 60 |
| Tab. 18 Dynamický modul pružnosti stanoven rezonanční metodou .....                               | 60 |
| Tab. 19 Pevnost v tlaku $f_c$ stanovená na válcích po zatěžování (ve stáří betonu 208 dní) .....  | 61 |

## 9. Seznam použitých symbolů a zkratek

$LC$  – lehký beton

$\rho$  – objemová hmotnost

$f_{c,cyl}$  – cylindrická pevnost v tlaku

$f_{c,cube}$  – krychelná pevnost v tlaku

$MPa$  – Megapascal

$UZ$  – ultrazvuk

$LK$  – lehké kamenivo

$L$  – délka

$d$  – průměr

$f_c$  – pevnost betonu v tlaku

$\sigma$  – napětí

$E_c$  – statický modul pružnosti

$\varepsilon$  – poměrná deformace

$\Delta L$  – změna délky

$D_{max}$  – největší rozměr maximálního zrna kameniva

$PE$  – polyethylen

$E_{cu}$  – dynamický modul pružnosti –  $UZ$  metoda

$D$  – objemová hmotnost zkoušeného materiálu

$v_L$  – rychlost šíření ultrazvuku

$k$  – koeficient rozměrnosti prostředí

$E_{crL}$  – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu - rezonanční

$f_L$  – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa

$E_{crf}$  – dynamický modul pružnosti v tahu nebo tlaku v  $MPa$ ,

$c_1$  – korekční součinitel

$f_f$  – první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa

$i$  – poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa

$G_{cr}$  – dynamický modul pružnosti ve smyku

$k$  – součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa

$f_t$  – první vlastní frekvence kroutivého kmitání zkoušeného tělesa

$F_c$  – naměřená maximální tlaková síla

$A$  – tlačená plocha zkušebního tělesa

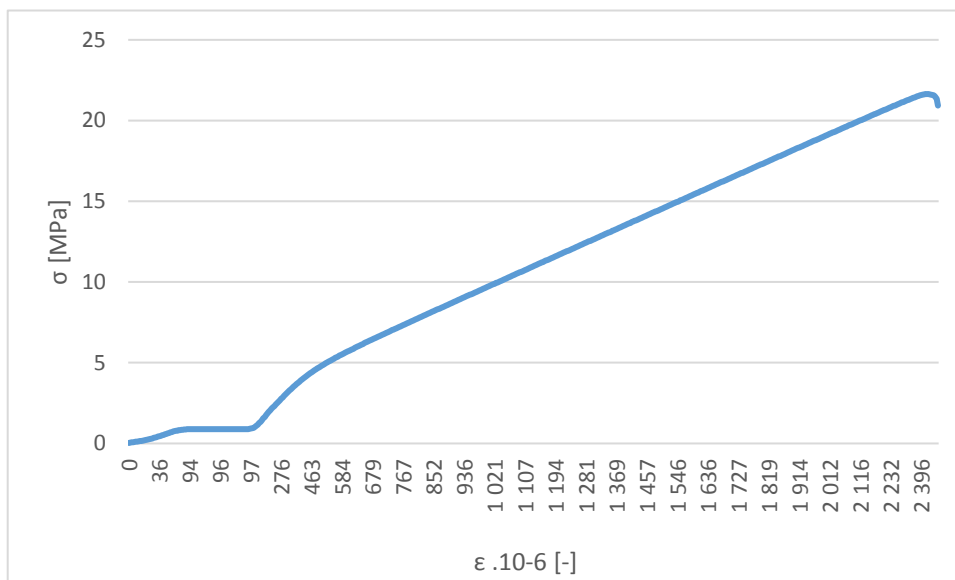
$f_{ct}$  – pevnost v příčném tahu

$F$  – naměřená maximální tlaková síla

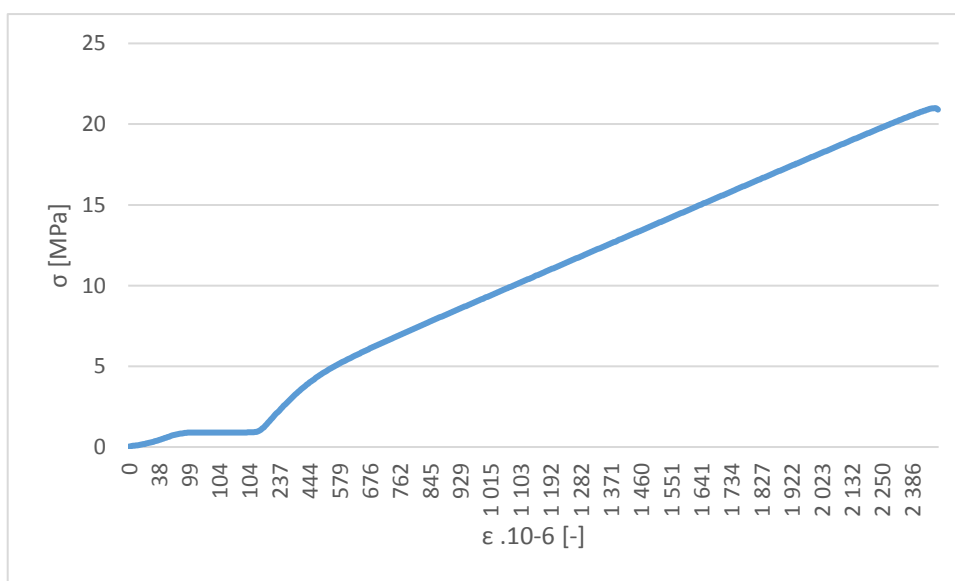
## 10. Přílohy

### 10.1. Deformační diagramy

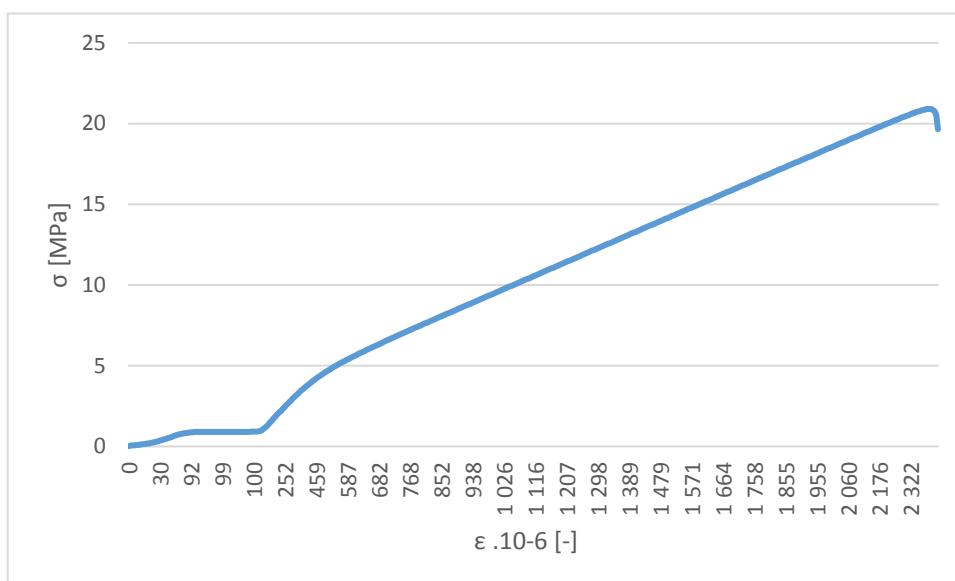
#### 10.1.1 Deformační diagram válce C-2



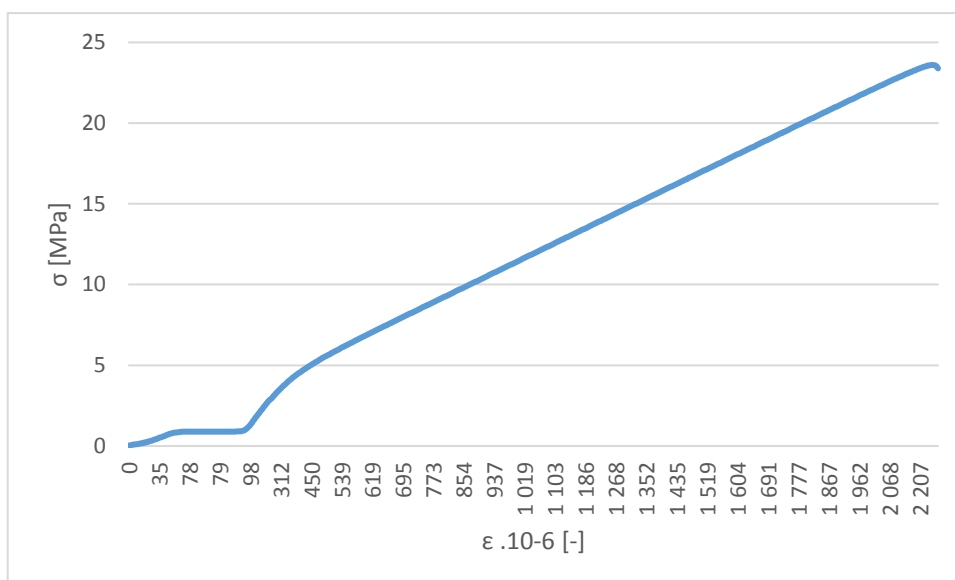
#### 10.1.2 Deformační diagram válce C-3



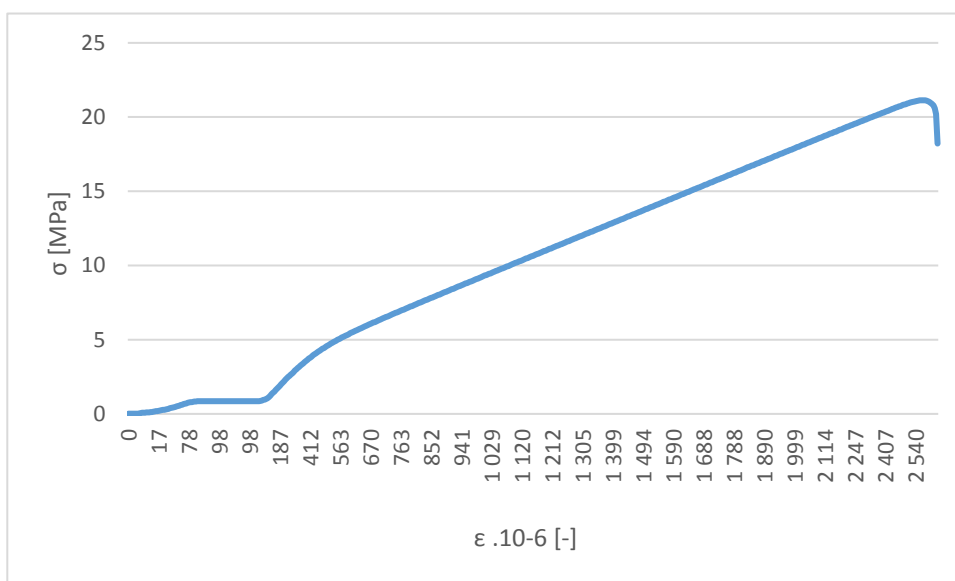
### 10.1.3 Deformační diagram válce C-4



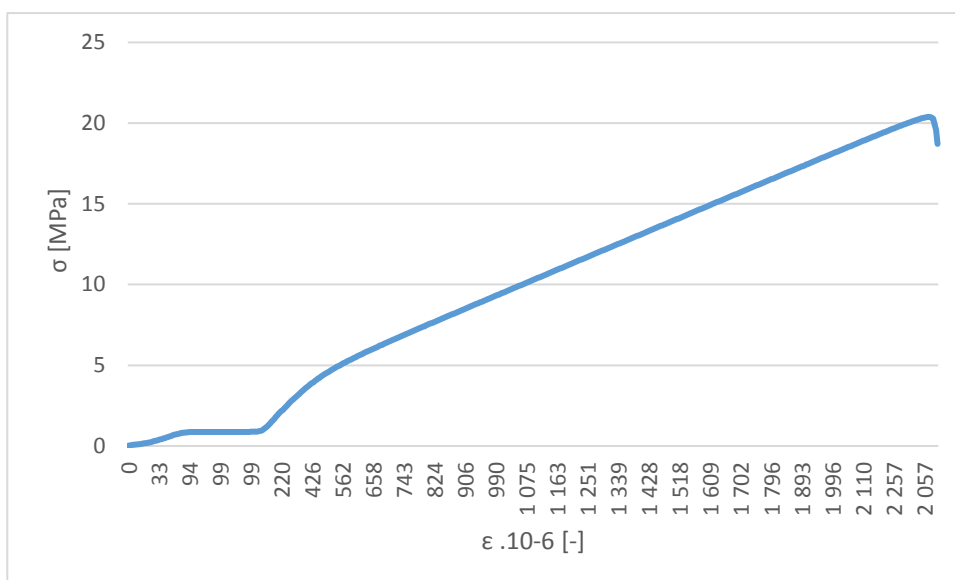
### 10.1.4 Deformační diagram válce C-5



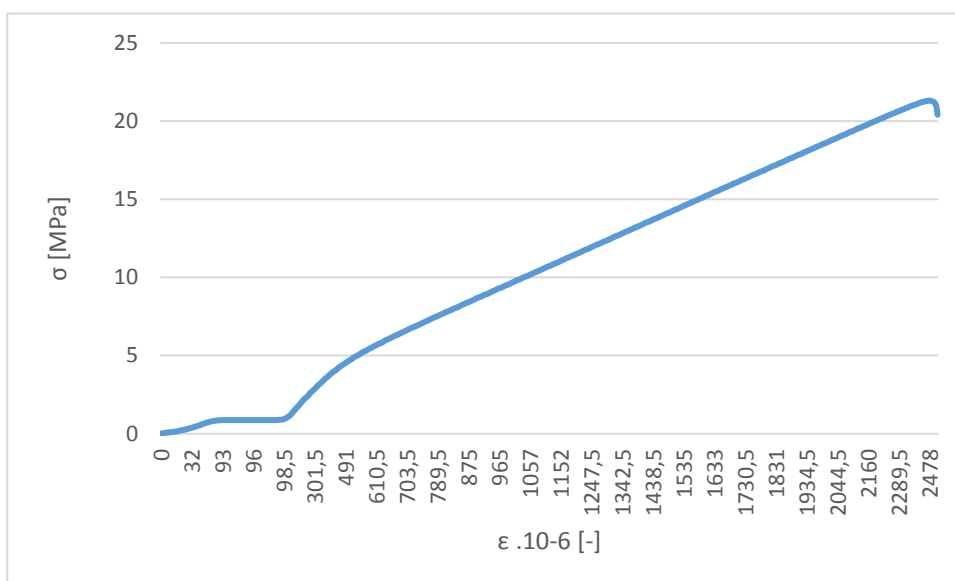
### 10.1.5 Deformační diagram válce C-6



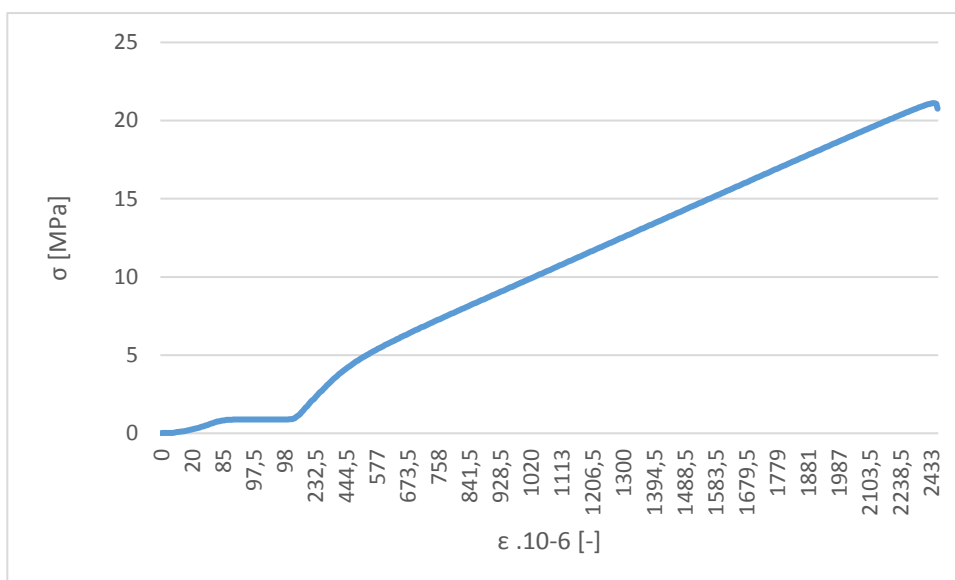
### 10.1.6 Deformační diagram válce C-7



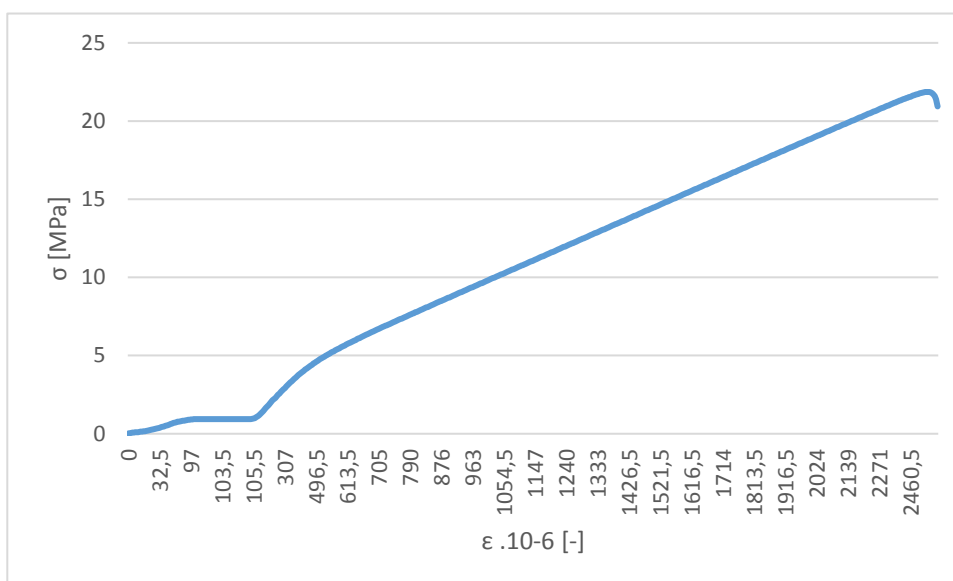
### 10.1.7 Deformační diagram válce C-8



### 10.1.8 Deformační diagram válce C-9



### 10.1.9 Deformační diagram válece C-10



## 10.2. Výstup z Minitabu

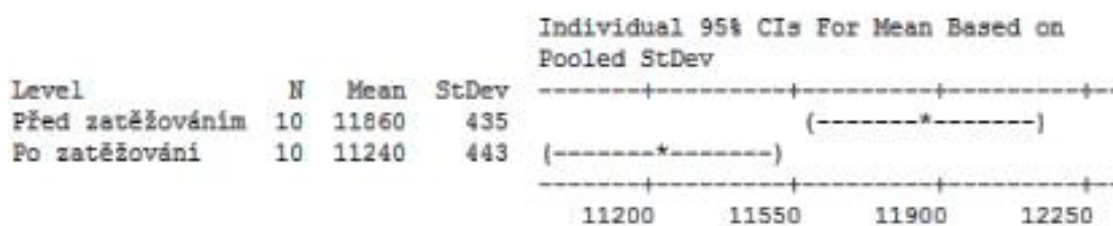
### 10.2.1 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{cu}$

#### Results for: $E_{cu}$

#### One-way ANOVA: Před zatěžováním; Po zatěžování

| Source | DF | SS      | MS      | F    | P     |
|--------|----|---------|---------|------|-------|
| Factor | 1  | 1922000 | 1922000 | 9,98 | 0,005 |
| Error  | 18 | 3468000 | 192667  |      |       |
| Total  | 19 | 5390000 |         |      |       |

S = 438,9    R-Sq = 35,66%    R-Sq(adj) = 32,08%



Pooled StDev = 439



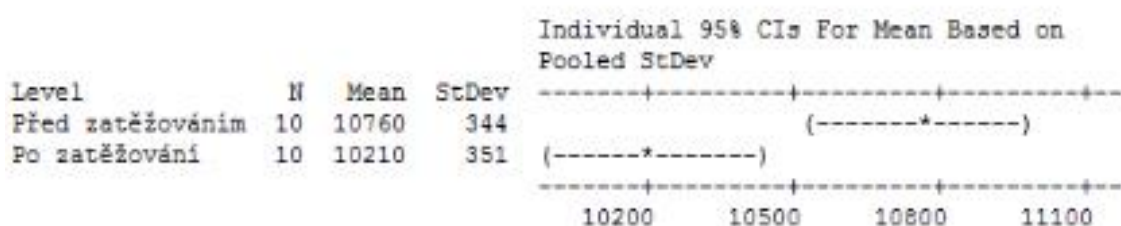
## 10.2.2 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{crL}$

### Results for: $E_{crL}$

#### One-way ANOVA: Před zatěžováním; Po zatěžování

| Source | DF | SS      | MS      | F     | P     |
|--------|----|---------|---------|-------|-------|
| Factor | 1  | 1512500 | 1512500 | 12,53 | 0,002 |
| Error  | 18 | 2173000 | 120722  |       |       |
| Total  | 19 | 3685500 |         |       |       |

S = 347,5    R-Sq = 41,04%    R-Sq(adj) = 37,76%



Pooled StDev = 347

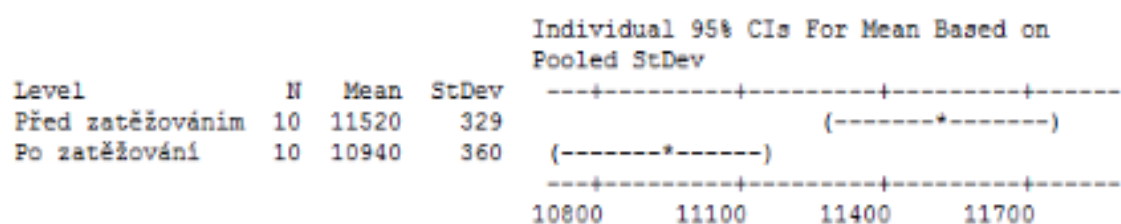
## 10.2.3 ANOVA pro dynamický modul pružnosti $E_{crf}$

### Results for: $E_{crf}$

#### One-way ANOVA: Před zatěžováním; Po zatěžování

| Source | DF | SS      | MS      | F     | P     |
|--------|----|---------|---------|-------|-------|
| Factor | 1  | 1682000 | 1682000 | 14,15 | 0,001 |
| Error  | 18 | 2140000 | 118889  |       |       |
| Total  | 19 | 3822000 |         |       |       |

S = 344,8    R-Sq = 44,01%    R-Sq(adj) = 40,90%



Pooled StDev = 345

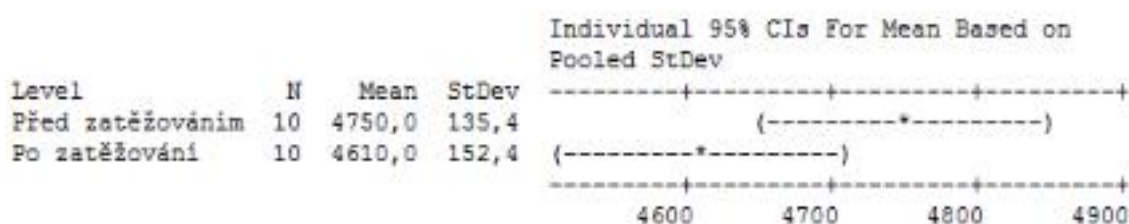
### 10.2.3 ANOVA pro dynamický modul pružnosti ve smyku $G_{cr}$

#### Results for: $G_{cr}$

##### One-way ANOVA: Před zatěžováním; Po zatěžování

| Source | DF | SS     | MS    | F    | P     |
|--------|----|--------|-------|------|-------|
| Factor | 1  | 98000  | 98000 | 4,72 | 0,043 |
| Error  | 18 | 374000 | 20778 |      |       |
| Total  | 19 | 472000 |       |      |       |

S = 144,1    R-Sq = 20,76%    R-Sq(adj) = 16,36%



Pooled StDev = 144,1

### 10.2.4 ANOVA pro pevnost v tlaku $f_c$

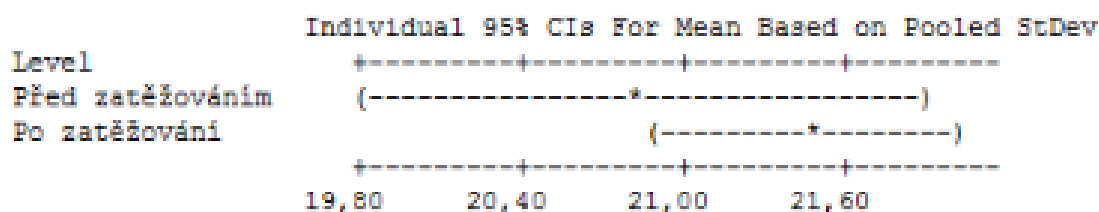
#### Results for: $f_c$

##### One-way ANOVA: Před zatěžováním; Po zatěžování

| Source | DF | SS    | MS    | F    | P     |
|--------|----|-------|-------|------|-------|
| Factor | 1  | 0,890 | 0,890 | 1,34 | 0,271 |
| Error  | 11 | 7,295 | 0,663 |      |       |
| Total  | 12 | 8,184 |       |      |       |

S = 0,8143    R-Sq = 10,87%    R-Sq(adj) = 2,77%

| Level            | N  | Mean   | StDev |
|------------------|----|--------|-------|
| Před zatěžováním | 3  | 20,845 | 0,512 |
| Po zatěžování    | 10 | 21,466 | 0,867 |



Pooled StDev = 0,814