



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV VELIKOSTI ZKUŠEBNÍHO TĚLESA NA HODNOTY MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ STANOVENÝCH REZONANČNÍ METODOU

THE INFLUENCE OF SPECIMEN SIZE ON THE VALUES OF MATERIAL CHARACTERISTICS
DETERMINED USING THE RESONANCE TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Čaněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|-----------------|---|
| Student | Michal Čaněk |
| Název | Vliv velikosti zkušebního tělesa na hodnoty materiálových vlastností stanovených rezonanční metodou |
| Vedoucí práce | Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2018 |
| Datum odevzdání | 24. 5. 2019 |

V Brně dne 30. 11. 2018

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Cikrle, P. a kol.: NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu CŽV, VUT, 2010.

Anton, O. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2002.

Schmid, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

Neville, A. M.: Properties of concrete. Harlow, Pearson Education Limited, 2011.

Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties. London, Butterworth-Heinemann, 2004.

Bungey, J. H., Millard, S. G., Grantham, M. G.: Testing of Concrete in Structure. Boca Raton, CRC Press, 2018.

Malhotra V. M., Carino, N. J.: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. Boca Raton, CRC Press, 2004.

Balayssac, J.-P., Garnier, V.: Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures. London, ISTE Press – Elsevier, 2017.

Odborné tuzemské i zahraniční příspěvky pojednávající o zadané problematice.

Všechny toho času platné normy, zejména s přihlédnutím k normám ČSN EN 206, ČSN 73 1372 a k řadě ČSN EN 12390.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: rešerše pramenů – obyčejný a lehký beton a jeho parametry s důrazem na pevnost v tlaku a především modul pružnosti, dále problematika nedestruktivního zkoušení betonu, podrobně rezonanční metoda.

Praktická část: zpracování plánu experimentu – ověření vlivu velikosti, tvaru a způsobu získání zkušebních těles na dynamické parametry betonu vypočtené z výsledků měření rezonanční metodou. Provedení nedestruktivního měření v laboratoři (na lehkém nebo obyčejném betonu), vyhodnocení výsledků měření, tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek, základní statistická analýza výsledků a sepsání vyplývajících závěrů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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 bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá sledováním vlivu velikosti zkušebního tělesa na hodnoty materiálových charakteristik stanovených rezonanční metodou. V rámci experimentu byla odzkoušena řada těles různých rozměrů a tvarů z betonů dvou různých receptur. Na tělesech se prováděly zkoušky pro stanovení dynamických materiálových vlastností, především modulů pružnosti. Výsledky byly následně shrnuty do tabelární a grafické podoby a byly podrobeny jednoduchým statistickým analýzám pro zjištění vyplývajících závěrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, lehký beton, nedestruktivní zkoušení, dynamický modul pružnosti, rezonanční metoda, pevnost, tvar tělesa, rozměr tělesa.

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with influence of specimen size on the values of material characteristics determined using the resonance testing. Different sizes and shapes of specimen made from two different concretes were tested in the experiment. The specimens were tested to determine the dynamic material characteristics (especially dynamic modulus of elasticity). The results were summarized in tabular and graphical form and were examined by simple statistical analysis to determine resulting conclusions.

KEY WORDS

Concrete, light-weight concrete, non-destructive testing, dynamic modulus of elasticity, resonance method, strength, shape of specimen, size of specimen.

PROHÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv velikosti zkušebního tělesa na hodnoty materiálových vlastností stanovených rezonanční metodou* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23. 5. 2019

Michal Čaněk
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv velikosti zkušebního tělesa na hodnoty materiálových vlastností stanovených rezonanční metodou* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2019

Michal Čaněk
autor práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Michal Čaněk Vliv velikosti zkušebního tělesa na hodnoty materiálových vlastností stanovených rezonanční metodou. Brno, 2019. 67 s., 22 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za jeho pomoc, rady a vstřícné jednání při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji tímto také panu Ing. Petru Žíttovi za provedení jádrového vrtání v rámci přípravy zkušebních vzorků a panu Ing. Petru Misákovi, Ph.D. za konzultaci statistických testů provedených v rámci práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům, přítelkyni, rodině a přátelům za podporu během celé doby studia.

Tato bakalářská práce byla zpracována v rámci řešení projektu GAČR č. 17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“. Pro potřeby projektu byla v této práci zpracována studie vlivu velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti betonu.

OBSAH

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD | 10 |
| 2 | CÍLE PRÁCE | 11 |
| 3 | TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 3.1 | OBYČEJNÝ BETON | 12 |
| 3.2 | LEHKÝ BETON..... | 14 |
| 3.3 | PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY..... | 16 |
| 3.4 | STANOVENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI POMOCÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD | 21 |
| 4 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 28 |
| 4.1 | EXPERIMENT č. 1 | 28 |
| 4.1.1 | Popis a metodika práce | 28 |
| 4.1.2 | Zkušební tělesa | 28 |
| 4.1.3 | Průběh zkoušení | 33 |
| 4.1.4 | Zpracování, výsledky zkoušek a jejich diskuse | 38 |
| 4.2 | EXPERIMENT č. 2..... | 51 |
| 4.2.1 | Popis a metodika práce | 51 |
| 4.2.2 | Zkušební tělesa | 51 |
| 4.2.3 | Průběh zkoušení | 53 |
| 4.2.4 | Zpracování, výsledky zkoušek a jejich diskuse | 55 |
| 5 | ZÁVĚR..... | 58 |
| 6 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 59 |
| 7 | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 62 |
| 8 | SEZNAM GRAFŮ..... | 63 |
| 9 | SEZNAM TABULEK..... | 64 |
| 10 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ | 65 |
| 11 | PŘÍLOHY | 67 |

1 ÚVOD

V poslední době je v souvislosti s navrhováním betonových konstrukcí kladen velký vliv na trvanlivost (tzn. schopnost konstrukce splňovat požadavky, které jsou na ni kladené po dobu její životnosti) [1]. K posouzení stavu konstrukce v době její životnosti jsou používány různé diagnostické metody, pomocí kterých je možné zjistit aktuální vlastnosti betonu, jako je například jeho pevnost, Poissonovo číslo a modul pružnosti.

Z betonu zabudovaného v konstrukci je však obtížné stanovit statický modul pružnosti, proto se stanovuje tzv. dynamický modul pružnosti, který se následně pomocí zmenšovacích koeficientů přepočítává na modul statický, který je dále využíván ke statickému posouzení konstrukcí. Ke stanovení dynamického modulu pružnosti se v současné době nejvíce využívají dvě metody – metoda ultrazvuková, která spočívá v měření času, za který projde ultrazvukový impulz daným materiálem, a metoda rezonanční, která spočívá v nalezení prvních vlastních kmitočtů tělesa [2, 3, 4].

Tato práce se podrobně zabývá metodou rezonanční. Rezonanční metoda s výhodou využívá změření určitého druhu (podélného, příčného nebo krouťového) kmitání zkušebních těles pravidelných geometrických tvarů (známých délek, příčných rozměrů těles a jejich vzájemných poměrů), pro které je možné teoreticky odvodit vztahy mezi vlastními frekvencemi a odpovídajícími dynamickými vlastnostmi materiálu. Jako jedna z mála diagnostických metod dokáže rezonanční metoda stanovit také dynamický modul pružnosti ve smyku, a tím i dynamickou hodnotu Poissonova čísla [5].

2 CÍLE PRÁCE

Podle normy ČSN 73 1372 [3], která se zabývá nedestruktivním zkoušením betonu pomocí rezonanční metody, je doporučeno jako zkušební tělesa použít hranoly nebo válce s délkou rovnající se nejméně dvojnásobku delší strany průřezu (případně dvojnásobku průměru základny). Také je ale v normě [3] uvedeno, že lze zkoušet i tělesa jiných geometrických rozměrů, např. krátké hranoly se čtvercovou základnou, krychle nebo krátké válce. Předmětem této práce je tedy porovnat výsledné moduly pružnosti zjištěné na různých tělesech (s důrazem na tvar a velikost těles, ale i na způsob jejich získání).

Cílem teoretické části práce je rešerše pramenů o betonu, lehkém betonu a nedestruktivních metodách používaných ke stanovení dynamického modulu pružnosti, se zaměřením na metodu rezonanční, která byla využita v rámci experimentální části.

Cílem praktické části práce je provedení dvou experimentů. První z nich je zaměřený na vliv velikosti, tvaru a původu těles z lehkého betonu na výsledné hodnoty dynamických charakteristik stanovených pomocí rezonanční metody. Druhý experiment zkoumá vliv příčných rozměrů tělesa (hranol s obdélníkovým průřezem) na výsledné dynamické moduly pružnosti stanovené rezonanční metodou na zkušebních tělesech z obyčejného betonu.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 OBYČEJNÝ BETON

Beton je kompozitní látka, která vzniká ztvrdnutím jeho základních složek, kterými je pojivo (nejčastěji cement), plnivo (písky, šterky, drtě) a voda. Kamenivo zaujímá v betonu přibližně dvě třetiny až tři čtvrtiny jeho objemu, propůjčuje mu lepší objemovou stabilitu i trvanlivost a hraje důležitou roli z hlediska pevnosti betonu. Směs vody a cementu se nazývá cementovou matricí, ta obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva. Chemickou reakcí se z cementové matrice stává hmota, která za několik hodin ztrácí svoji plasticitu (tuhne) a během několika hodin získává vlastnosti, díky kterým je schopná odolávat mechanickému zatížení (tvrdne) [1, 7].

Vzhledem k tomu, že kamenivo zaujímá zhruba 75 % objemu betonu, má jeho kvalita značný význam. Kamenivo bylo původně považováno za levný materiál dispergovaný v cementové matrici, sloužící k dosažení velkého objemu materiálu [8]. Ve skutečnosti však není kamenivo podřadnou složkou, protože jeho fyzikální, mechanické a někdy i chemické vlastnosti ovlivňují výsledné vlastnosti betonu. Nejnápadnějším rysem kameniva je jeho zrnitý charakter. Kamenivo se podle velikosti zrn dělí na písky (zrna do 4 mm) a na hrubé kamenivo (tj. šterky a drtě). Ekonomický návrh složení čerstvého betonu spočívá v návržení co nejmenší mezerovitosti kameniva, což zajistí pevnou kostru z kameniva a menší spotřebu cementu [1, 9, 10].

I přes velký význam použitého kameniva by nebylo možné vyrobit beton bez stěžejní složky – cementu. Cement je v současné době nejvíce rozšířeným a používaným druhem pojiva ve stavebnictví. Podle normy [11] je cement hydraulické pojivo pálené nad mez slinutí, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou v důsledku hydratačních reakcí a procesů tuhne a tvrdne a po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost jak na vzduchu, tak ve vodě [11]. Cement musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou ve vhodném poměru umožnit výrobu malt a betonů zachovávajících po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít požadovanou pevnost a objemovou stálost. Hydraulické tvrdnutí cementů probíhá hlavně v důsledku hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. Množství vody potřebné k úplné hydrataci cementu je cca 20–25 % z hmotnosti cementu. Poměr obsahu vody a obsahu cementu v čerstvém betonu se nazývá vodní součinitel. Běžně se vodní součinitel pohybuje v rozmezí od 0,3 do 0,6, přičemž beton s nižším vodním

součinitelem vykazuje lepší mechanické vlastnosti a vyšší trvanlivost, ale horší zpracovatelnost. Hlavní složkou všech současných cementových pojiv je portlandský cement, základem jeho výroby je pálení směsi přírodních nebo průmyslových surovin (vápenec, jíl atd.). Tímto procesem vzniká slínek, který se dále mele v kulovém mlýně. Do slínku se při mletí přidává dané množství síranu vápenatého, aby bylo dosaženo prodloužení doby tuhnutí betonu. Všechny ostatní cementy, které jsou k dispozici, obsahují určité množství portlandského cementu a dále se do nich přidávají různé příměsi. Tyto příměsi jsou minerální podstaty a zahrnují přírodní vulkanické pucolány, umělé pucolány, granulovanou vysokopecní strusku, popílký, křemičité úlety, vápenec a kalcinovanou břidlici. Kromě základních složek je možné do betonu přidat také chemické přísady, které se přidávají těsně před nebo v průběhu míchání betonu. Ve většině případů se jedná o kapalné látky, které se používají pro zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu [1, 12].

3.2 LEHKÝ BETON

Za lehké betony jsou obecně považovány betony s objemovou hmotností menší než 2000 kg/m^3 . Lehké betony je možné rozdělit na základě použité technologie vylehčení do tří základních skupin. První z nich je použití expandovaných anorganických jíílů jako kameniva, v praxi se k tomuto účelu často používá keramzit, agloporit nebo perlit. Dalšími možnostmi jak vylehčit beton, je použití pěnového polystyrenu nebo vylehčení pomocí pórů vznikajících přímo v cementové pastě (tzv. pórobeton). Ve všech případech je dosaženo vylehčení pomocí pórů, které jsou dispergovány v keramické matici v případě expandovaného jíilu nebo v polymerní fázi u polystyrenu nebo přímo v cementové pastě. Betony vyrobené použitím lehkých expandovaných anorganických jíílů mohou být dále rozděleny na betony hutné a mezerovité. Zda je beton hutný nebo mezerovitý se posuzuje z obsahu vzduchu v betonu ve ztuhnutém stavu. Lehké hutné betony (někdy nazývány též lehké konstrukční betony) se používají v podstatě pro stejné účely jako beton obyčejný, zatímco betony mezerovité jsou výhradně používány na konstrukce nenosné a nevyztužené a to hlavně z důvodu špatné ochrany výztuže v prostředí mezerovitého betonu [1, 13, 14].

Konstrukční lehký beton má mnoho různých aplikací, včetně ráámů vícepodlažních budov, obvodových plášťů budov, stře, stropů, mostů i předpjatého betonu či prefabrikovaných prvků všeho druhu. V mnoha případech je výhodné jeho použití zejména s přihlédnutím na architektonické požadavky a možnost efektivně snížit zatížení celé konstrukce, což v kombinaci s možnou nižší cenou a v některých příkladech i s možností ekologického využití recyklovaného odpadu jako kameniva dělá z lehkého betonu velice významný a moderní materiál [15, 16].

Jedním z nejrozšířenějších materiálů, který se používá pro výrobu těchto konstrukčních betonů, je kamenivo nazývané keramzit, které se v ČR prodává pod obchodním názvem Liapor. Keramzit je keramické kamenivo vyráběné výpalem a expanzí třetihorních jíílů v rotačních pecích, obsahuje materiály jako je illit, kaolinit nebo křemík, úlomky slíd a také fosilní zbytky. Tyto zbytky spolu s některými minerály působí při expanzi během výroby. Díky porézní struktuře mají zrna keramzitu velmi nízkou objemovou hmotnost, která se u jednotlivých zrn pohybuje mezi 500 a 1500 kg/m^3 . Zrna jsou téměř kulovitá, s pevnou skořápkou a rovnoměrně porézním jádrem, což jim dodává poměrně vysokou pevnost v tlaku, ta se pohybuje mezi $0,7$ a 10 MPa . Dalšími dobrými vlastnostmi keramzitu jsou objemová stálost, trvanlivost, odolnost proti kyselinám i louhům, mrazuvzdornost, žáruvzdornost a v neposlední řadě

ekologičnost. Protože je keramzit čistý přírodní jíl, mohou být výrobky po skončení životnosti recyklovány a znovu použity jako lehké kamenivo. Chemicky je keramzit (Liapor) ideální pro použití do vyztužených a předpjatých betonů, celkový obsah síry je 0,2-0,5 %, siřičku 0,02-0,05 % a chloridů 0,005-0,01 % hmotnosti [14, 17].

Tab. 1 Kamenivo keramzit vhodné k výrobě konstrukčních lehkých betonů [14].

| Obchodní označení | Frakce [mm] | Sypná hmotnost [kg/m ³] | Objemová hmotnost zrna [kg/m ³] |
|-------------------|-------------|-------------------------------------|---|
| 1-4/500 | 1-4 | 500 ± 15 % | 925 |
| 4-8/350 | 4-8 | 350 ± 10 % | 700 |
| 4-8/650 | 4-8 | 650 ± 10 % | 1200 |
| 8-16/275 | 8-16 | 275 ± 15 % | 575 |

Dalším významným materiálem používaným při výrobě lehkých konstrukčních betonů je kamenivo, které se vyrábí z černouhelných, případně antracitických popílků. Takto vyrobené kamenivo je u nás známé pod názvem agloporit nebo například v Anglii pod názvem Lytag. Pomocí výrobních technologií jsou popílkové transformovány na malé kulaté pelety, které jsou následně zahřáty na 1100 °C, tím vzniká velmi tvrdá peleta s pórovou vnitřní strukturou. Anglický výrobce Lytag uvádí, že při použití tohoto druhu kameniva lze snížit hmotnost konstrukce ve srovnání s běžným kamenivem až o 32 %. Kamenivo má dobrou odolnost proti ohni a velmi dobré tepelněizolační vlastnosti. Hlavní předností je však výborný poměr mezi hmotností a pevností. Agloporit dosahuje pevnosti mezi 5 a 9 MPa a to při objemové hmotnosti 1200 kg/m³ [18, 19].

Tab. 2 Kamenivo agloporit vhodné k výrobě konstrukčních lehkých betonů [18, 19].

| Obchodní označení | Frakce [mm] | Sypná hmotnost [kg/m ³] | Objemová hmotnost zrna [kg/m ³] |
|-------------------|-------------|-------------------------------------|---|
| Agloporit 4/8 | 4-8 | 590-680 | 1200-1250 |
| Agloporit 8/16 | 8-16 | 590-680 | 1150-1250 |

Při porovnání agloporitu a keramzitu lze konstatovat, že oba materiály mají v podstatě stejnou strukturu, která je tvořena venkovní tuhouskořepinou a vnitřní pórovitou strukturou. Keramzit má nižší pevnost a často i nižší objemovou hmotnost. Výhodou agloporitu může být kratší doba potřebná k úplnému nasáknutí. Keramzit je pro použití možné vyrábět ve frakcích od cca 1 mm, zatímco agloporit až cca od 4 mm [19].

3.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY

- **PEVNOST**

Za nejdůležitější vlastnost betonu se všeobecně považuje pevnost, je to právě ta vlastnost, podle které se ve většině případů posuzuje kvalita betonu. V pevných látkách platí závislost mezi pevností a pórovitostí. V kompozitních materiálech, jako je beton, může být rozhodující pórovitost každé ze základních složek. Přírodní kamenivo je materiál hutný, málo pórovitý a pevný, proto je pevnost obyčejného betonu z velké části určována pórovitostí cementové matrice a přechodné zóny mezi cementovou maticí a kamenivem. Nejdůležitějšími faktory jsou vodní součinitel čerstvého betonu, mineralogické složení a zrnitost kameniva, kvalita cementu, přísady a příměsi, zhutnění čerstvého betonu a ošetřování [20].

Pevnost je charakterizována jako maximální napětí, které je daný materiál (ve formě zkušebního tělesa) schopen přenést do okamžiku porušení. V závislosti na druhu napětí – σ_c (tlakové napětí), σ_t (tahové napětí), nebo σ_f (ohybové napětí) určujeme odpovídající pevnost jako tlakovou f_c , tahovou f_t , tahovou v příčném tahu f_{ct} a tahovou ohybem f_{cf} . V praxi jsou nejčastěji prováděny zkoušky na pevnost betonu v tlaku a v tahu ohybem. Prostý beton má velmi dobrou pevnost v tlaku, pevnost v tahu je však asi desetkrát menší, proto se do betonu přidává ocelová výztuž, která má velmi dobrou schopnost tahová namáhání přenést [1].

Pevnost betonu v tlaku se stanovuje podle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [21]. Zkouška se provádí na dvou různých tělesech – na válcích o průměru 150 mm a délce 300 mm (tzv. válcová pevnost f_{cy}) a na krychlích o hraně 150 mm (tzv. krychelná pevnost f_{cu}) – viz ČSN EN 12390 – 1 [6]. Kvůli rozdílnému poměru výška/plocha podstavy jsou pevnosti zjištěné na válcích cca o 20 % nižší [1]. Tlaková pevnost se vypočte ze vztahu [21]:

$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

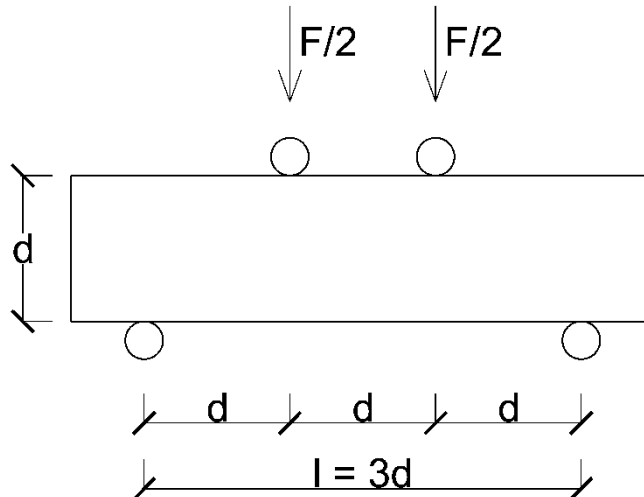
Kde f_c je pevnost v tlaku [MPa]
 F_{max} maximální zatížení při porušení [N]
 A zatěžovaná plocha tělesa [mm²].

Pevnost betonu v tahu ohybem se stanovuje podle ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu část 5: Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles [22]. Zkušebními tělesy jsou hranoly

o hraně 150 mm a délce 700 mm nebo o hraně 100 mm a délce 400 mm [6]. Zkouška se provádí v lisu za použití dvou podpěrných válečků a dvou horních zatěžovacích válečků (tzv. čtyřbodový ohyb, viz obrázek 1). Zatěžuje se rovnoměrně až do porušení. Výsledná pevnost v tahu ohybem se potom vypočítá ze vztahu [22]:

$$f_{cf} = \frac{F l}{d_1 d_2^2} \quad (2)$$

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



Obr. 1 Schéma provedení zkoušky pevnosti v tahu ohybem [22].

Norma povoluje provádět zkoušku pevnosti v tahu za ohybu také jako zkoušku tříbodovým ohybem (tzn. zatěžováním jedním břemenem uprostřed), upozorňuje však, že výsledky získané z takto provedené zkoušky vychází o 13 % vyšší než při zatěžování dvěma břemeny [22].

Poslední zkouškou pevnosti je zkouška pevnosti v příčném tahu, ta se provádí podle ČSN EN 12390 – 6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles [23]. Zkouška se provádí pomocí zkušebního lisu a roznášecích proužků.

Výsledná pevnost v příčném tahu se vypočítá ze vztahu [23]:

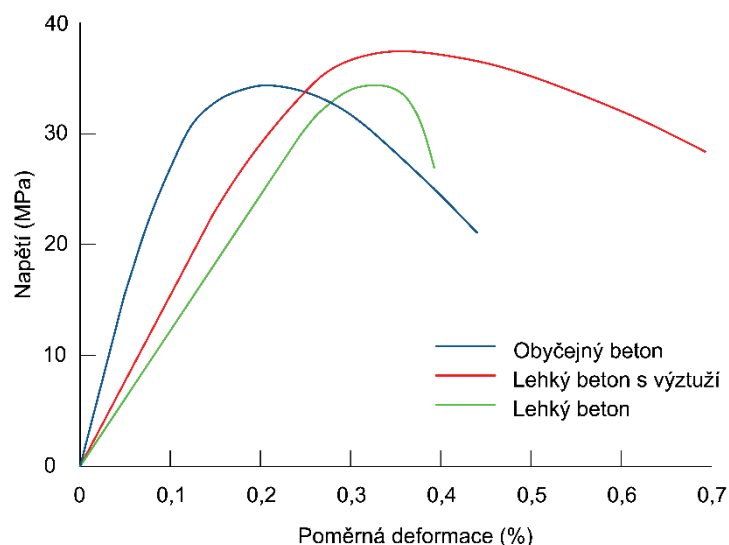
$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L d} \quad (3)$$

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

U lehkého betonu z důvodu použití pórovitého kameniva závisí pevnost v tlaku ve velké míře na pevnosti použitého kameniva, ale samozřejmě také na druhu a množství použitého cementu. Vztah mezi krychelnou a válcovou pevností betonu v tlaku udává, že pevnost na válcích je u obyčejného betonu rovna zhruba 0,8 násobku pevnosti krychelné. U betonu s použitím lehkého kameniva se tento poměr změní zhruba na 0,85 násobek. Výzkum ukazuje, že zatímco u použití běžného hutného kameniva vede zvýšení obsahu cementu o 10 % ke zvýšení krychelné pevnosti zhruba o 15 %, u lehkého betonu dojde ke zvýšení krychelné pevnosti maximálně o 10 %, zpravidla však méně. Pro dosažení co možná nejvyšší pevnosti lehkého betonu v tlaku je doporučeno použít jako jemnou složku písek o frakci 0-4 mm kombinovaný s lehkým kamenivem o maximální velikosti zrna 8 mm [13, 15, 24].

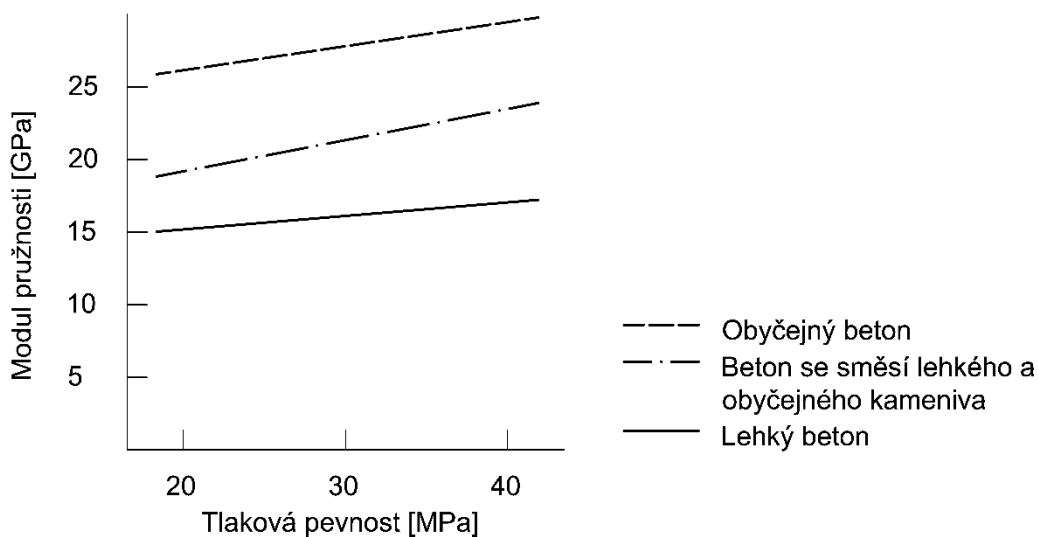
• MODUL PRUŽNOSTI

Modul pružnosti se definuje jako poměr mezi napětím a jemu odpovídající deformací. Je závislý na dílčích modulech pružnosti použitého kameniva a cementové pasty. Obyčejný beton má vyšší modul pružnosti než beton lehký, protože modul pružnosti přírodního hutného kameniva použitého při jejich výrobě je vyšší než modul pružnosti lehkého pórovitého kameniva použitého při výrobě lehkého betonu. Modul pružnosti se u lehkého betonu pohybuje zhruba v rozmezí $\frac{1}{2}$ až $\frac{3}{4}$ modulu pružnosti obyčejného betonu při stejné pevnosti [15]. Čím vyšší je vodní součinitel betonu (w/c), tím nižší je hodnota modulu pružnosti. Modul pružnosti je závislý na sklonu křivky napětí - deformace (tzv. deformační diagram), jeho podoba v případech obyčejného a lehkého betonu je patrná z obr. 2. V betonu z lehkého kameniva se modul pružnosti přibližuje modulu pružnosti cementové pasty, a proto modul pružnosti lehkého betonu není tolik závislý na objemovém podílu kameniva a cementové pasty [1].



Obr. 2 Deformační diagramy obyčejného a lehkého betonu [1].

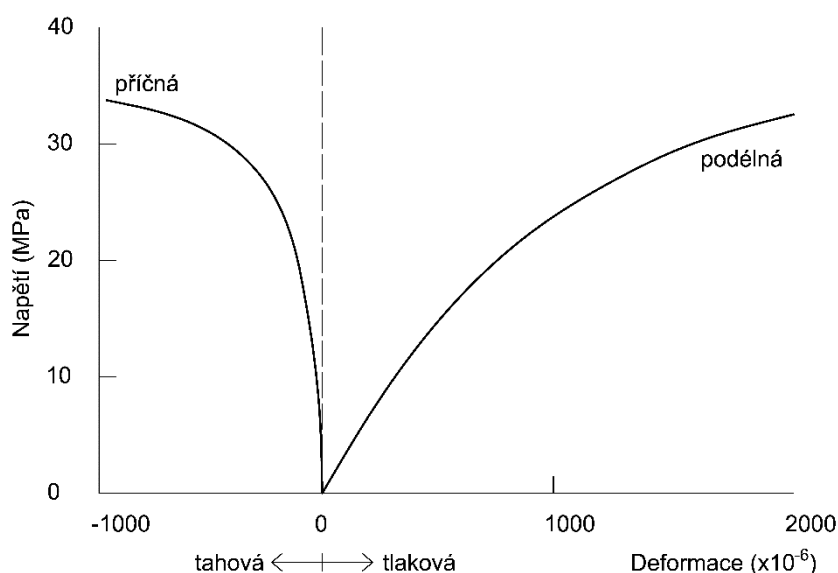
Je nutné rozlišovat modul pružnosti statický (zjišťuje se destruktivními zkouškami z deformací, které nastávají při známém zatížení) a dynamický (zjišťuje se nedestruktivními zkouškami, např. ultrazvukem nebo rezonanční metodou). Dynamické moduly vycházejí vždy větší, než moduly statické [4, 25]. Na obr. 3 je zobrazeno porovnání modulů pružnosti obyčejného a lehkého betonu.



Obr. 3 Porovnání modulů pružnosti obyčejného a lehkého betonu [15].

• POISSONOVO ČÍSLO

Podélná deformace ve směru působícího zatížení vyvolává v témže čase také deformaci příčnou (viz obr. 4). Poměr příčné a podélné deformace se nazývá Poissonovo číslo nebo v některé literatuře součinitel příčného přetvoření [20]. Experimenty bylo zjištěno, že Poissonovo číslo zatvrdnuté cementové kaše není ovlivněno vodním součinitelem a má hodnotu okolo 0,25 [26]. Přidáním kameniva se hodnoty příčných deformací zmenšují a tím se snižuje i Poissonovo číslo. Hodnoty Poissonova čísla zjištěny jak dynamickými, tak statickými metodami se pohybují mezi 0,15 a 0,25, což dává průměrnou hodnotu Poissonova čísla 0,20 [15].



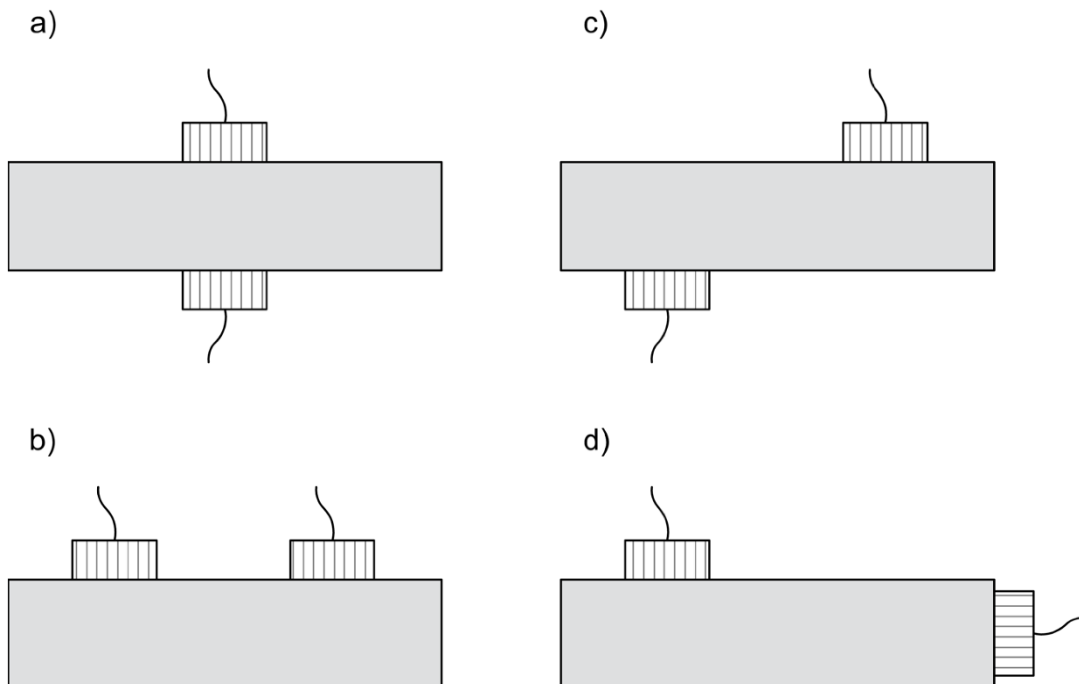
Obr. 4 Křivky závislosti podélné a příčné deformace při tlakovém zatížení [20].

3.4 STANOVENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI POMOCÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD

Mezi nejčastěji používané nedestructivní metody, pomocí kterých je možné určit dynamické charakteristiky materiálu, patří ultrazvuková impulzová metoda a rezonanční metoda.

• ULTRAZVUKOVÁ IMPULZOVÁ METODA

Spočívá ve stanovení rychlosti šíření ultrazvukových vln v materiálu. Ze stanovené rychlosti šíření UZ vlnění se určují fyzikálně mechanické vlastnosti s využitím vztahů mezi rychlostí UZ vlnění a sledovanými dynamickými charakteristikami betonu. Touto metodou lze stanovit především rychlost šíření UZ vlnění, dynamický modul pružnosti a rovnoměrnost betonu. Při měření rozeznáváme tři základní polohy snímače a budiče a to polohu přímou – snímač a budič jsou umístěny na protilehlých stranách proti sobě, polopřímou – snímač a budič jsou umístěny na protilehlých stranách, ale ne přímo proti sobě a nepřímou – snímač a budič jsou na stejné straně [2]. Polohy snímače a budiče při ultrazvukové impulzové zkoušce jsou zobrazeny na obr. 5.



Obr. 5 Polohy snímače a budiče, a) přímá, b) nepřímá, c) polopřímá (šikmá), d) polopřímá (boční).

Rychlost šíření ultrazvukových vln materiálem se určí ze vztahu [2]:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (4)$$

Kde v_L je rychlost UZ impulzu [km/s]
 L délka zkušební tělesa [mm]
 T čas, včetně času t_{kor} , který uplyne při průběhu impulzu měřící základnou [μ s].

Dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku se potom vypočítá ze vztahu [2]:

$$E_{cu} = \rho v_L^2 \frac{1}{k^2} \quad (5)$$

Kde E_{cu} je modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]
 ρ objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]
 v_L rychlost UZ impulzu [μ s]
 k součinitel závislý na rozměrnosti prostředí.

• REZONANČNÍ METODA

Podstatou této metody je stanovení hodnot určitého druhu vynuceného rezonančního kmitání zkušebních těles pravidelného geometrického tvaru, pro něž lze teoreticky určit vztahy mezi vlastními frekvencemi a odpovídajícími dynamickými charakteristikami materiálu [5].

Zkušební tělesa mají nejčastěji tvar hranolů nebo válců, jejichž délka je nejméně dvojnásobkem rozměru delší strany základny (případně průměru základny). Při zkoušce jsou tělesa uložena na podklad, který nesmí omezovat jejich kmitání. V praxi se k tomuto používá nejčastěji gumová podložka (nebo jiný pružný materiál, který netlumí kmitání), kterou je těleso podepřeno v předpokládaných uzlech kmitání (tj. body, které se při kmitání nepohybují). K takto podloženému zkušebnímu tělesu se připevní sondy zkušebního přístroje v místech vhodných pro vznik požadovaného druhu kmitání [3].

Rozlišujeme tři základní druhy kmitání:

- Podélné (longitudinální) kmitání f_L
- Příčné (ohybové) kmitání f_f
- Kroutivé (torzní) kmitání f_t

Zkušební těleso se rozkmitá budičem (nejčastěji přímým stykem se zkušebním vzorkem). Jeho kmitání se snímá snímacím zařízením – snímačem, které zaznamenává velikost amplitudy. Sleduje se maximální amplituda, která definuje vlastní kmitočet tělesa [3].

Kontrola naměřených hodnot je možná podle tabulky 3, která ukazuje očekávaný vzájemný poměr mezi podélným, příčným a torzním kmitáním.

Tab. 3 Očekávané poměry podélného, příčného a torzního kmitání hranolů [3].

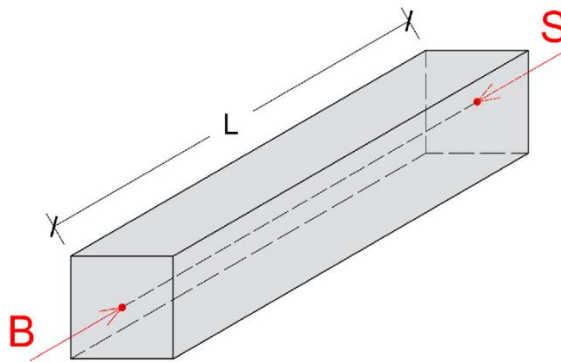
| Poměry velikostí hran | Poměry kmitočetů $f_L : f_t : f_f$ |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 1 : 1 : 3 | 1 : 0,59 : 0,52 |
| 1 : 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,43 |
| 1 : 1 : 5 | 1 : 0,59 : 0,36 |

Prvním z modulů pružnosti, který je možné stanovit rezonanční metodou, je modul pružnosti zjištěný z podélného kmitání tělesa E_{crL} . Na zkušební těleso se přiloží sondy zkušebního přístroje B (budič) a S (snímač) v místech znázorněných na obr. 6 a zjistí se první vlastní kmitočet podélného kmitání zkušebního tělesa.

Dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku zjištěný z podélného kmitání se vypočítá ze vztahu [3]:

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

Kde E_{crL} je dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]
 f_L první vlastní kmitočet podélného kmitání [kHz]
 L délka zkušební tělesa [m]
 ρ objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m³].

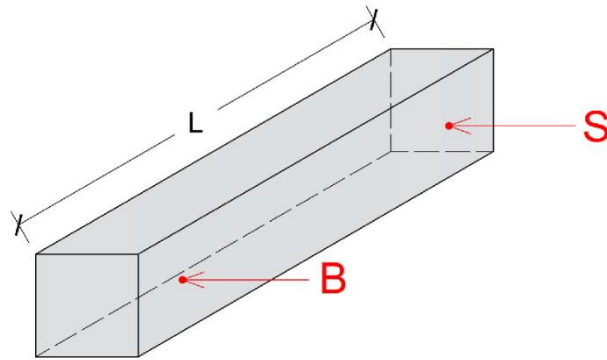


Obr. 6 Uspořádání snímače a budiče při zkoušce podélného kmitání [3].

Dalším z modulů pružnosti, které je možné stanovit rezonanční metodou, je modul pružnosti v tahu/tlaku stanovený z příčného kmitání E_{crf} , ten se vypočítá ze vztahu [3]:

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

Kde E_{crf} je dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]
 f_f první vlastní kmitočet příčného kmitání [kHz]
 L délka zkušební tělesa [m]
 ρ objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m³]
 i poloměr setrvačnosti příčného řezu tělesa [m]
 c_1 korekční součinitel zahrnující vliv smyku a momentů setrvačnosti.



Obr. 7 Uspořádání snímače a budiče při zkoušce příčného kmitání [3].

Součinitel c_1 je korekční součinitel, který do výpočtu zahrnuje vliv smyku a momentů setrvačnosti při kmitání zkušebního tělesa a závisí na poměru poloměru setrvačnosti i a délky tělesa L . Podle aktuálně platné normy ČSN 73 1372 [3] se určí z tab. 4 (mezilehlé hodnoty se stanoví interpolací). Podle původní, již neplatné normy lze určit i ze vztahu:

$$c_1 = \frac{1}{2} + \frac{a^2 i^2}{2 L^2} \left(1 + \frac{2}{\chi} (1 + \nu_{cr}) \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \frac{a^2 i^2}{2 L^2} \left(1 + \frac{2}{\chi} (1 + \nu_{cr}) \right) + \frac{a^4 i^4}{4 L^4} \left(1 + \frac{2}{\chi} (1 + \nu_{cr}) \right)^2} \quad (8)$$

Kde c_1 je korekční součinitel zahrnující vliv smyku a momentů setrvačnosti

L délka zkušebního tělesa [m]

i poloměr setrvačnosti příčného řezu tělesa [m]

a parametr pro vlastní kmitočty, pro první vlastní kmitočty $a = 4,73$

χ součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa (pro obdélník $\chi = 5/6$, pro kruhový průřez $\chi = 27/32$)

ν_{cr} Poissonovo číslo určené podle vztahu 11.

Tab. 4 Stanovení korekčního součinitele c_1 [3].

| i/L | Korekční součinitel c_1 | | | | | | | | |
|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Poissonovo číslo ν_{cr} | | | | | | | | |
| | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,22 | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 |
| 0,01 | 1,008 | 1,008 | 1,009 | 1,009 | 1,009 | 1,009 | 1,009 | 1,009 | 1,009 |
| 0,02 | 1,033 | 1,034 | 1,034 | 1,035 | 1,035 | 1,035 | 1,036 | 1,036 | 1,037 |
| 0,03 | 1,074 | 1,075 | 1,076 | 1,077 | 1,078 | 1,079 | 1,080 | 1,081 | 1,082 |
| 0,04 | 1,131 | 1,133 | 1,134 | 1,136 | 1,137 | 1,139 | 1,141 | 1,142 | 1,144 |
| 0,05 | 1,202 | 1,204 | 1,207 | 1,210 | 1,212 | 1,215 | 1,217 | 1,220 | 1,222 |
| 0,06 | 1,287 | 1,291 | 1,294 | 1,298 | 1,302 | 1,305 | 1,309 | 1,313 | 1,316 |
| 0,07 | 1,386 | 1,391 | 1,396 | 1,401 | 1,406 | 1,410 | 1,416 | 1,420 | 1,425 |
| 0,08 | 1,498 | 1,504 | 1,510 | 1,517 | 0,523 | 1,529 | 1,536 | 1,542 | 1,549 |
| 0,09 | 1,662 | 1,630 | 1,638 | 1,646 | 1,654 | 1,662 | 1,690 | 1,678 | 1,686 |
| 0,10 | 1,758 | 1,768 | 1,778 | 1,787 | 1,797 | 1,807 | 1,817 | 1,827 | 1,837 |
| 0,11 | 1,906 | 1,918 | 1,930 | 1,942 | 1,954 | 1,965 | 1,977 | 1,989 | 2,001 |
| 0,12 | 2,066 | 2,080 | 2,094 | 2,103 | 2,122 | 2,136 | 2,150 | 2,164 | 2,179 |
| 0,13 | 2,238 | 2,254 | 2,270 | 2,287 | 2,303 | 2,320 | 2,336 | 2,353 | 2,369 |
| 0,14 | 2,421 | 2,440 | 2,459 | 2,478 | 2,497 | 2,510 | 2,535 | 2,554 | 2,574 |
| 0,15 | 2,616 | 2,637 | 2,659 | 2,681 | 2,703 | 2,725 | 2,747 | 2,769 | 2,791 |
| 0,16 | 2,822 | 2,846 | 2,871 | 2,896 | 2,921 | 2,946 | 2,971 | 2,996 | 3,021 |
| 0,17 | 3,039 | 3,067 | 3,095 | 3,123 | 3,151 | 3,179 | 3,208 | 3,236 | 3,264 |
| 0,18 | 3,268 | 3,300 | 3,331 | 3,362 | 3,394 | 3,926 | 3,457 | 3,489 | 3,521 |
| 0,19 | 3,509 | 3,544 | 3,579 | 3,614 | 3,649 | 3,684 | 3,720 | 3,755 | 3,791 |
| 0,20 | 3,761 | 3,800 | 3,839 | 3,877 | 3,916 | 3,956 | 3,995 | 4,034 | 4,074 |
| 0,25 | 5,194 | 5,255 | 5,137 | 5,378 | 5,440 | 5,502 | 5,564 | 5,626 | 5,689 |
| 0,289 | 6,496 | 6,578 | 6,661 | 6,744 | 6,828 | 6,910 | 6,993 | 7,077 | 7,161 |
| 0,30 | 6,920 | 7,009 | 7,098 | 7,188 | 7,278 | 7,368 | 7,459 | 7,549 | 7,640 |

Posledním modulem pružnosti je modul pružnosti ve smyku G_{cr} stanovený z vlastního kmitočtu kroutivého kmitání (poloha budiče a snímače viz obr. 8). Dynamický modul pružnosti ve smyku lze stanovit ze vztahu [3]:

$$G_{cr} = 4 k L^2 f_t^2 \rho \quad (9)$$

Kde G_{cr} je modul pružnosti ve smyku [MPa]

f_t první vlastní kmitočet torzního kmitání [kHz]

L délka zkušební tělesa [m]

ρ objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]

k korekční součinitel charakterizující tvar příčného řezu.

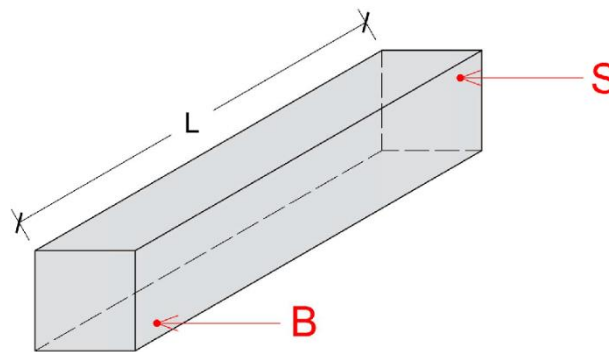
Korekční součinitel k je pro válce roven 1 a pro hranoly se čtvercovým průřezem 1,183. Pro tělesa s jiným než kruhovým nebo čtvercovým průřezem lze stanovit ze vztahu [3]:

$$k = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4\left(\frac{b}{h}\right) - 2,52\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21\left(\frac{b}{h}\right)^6} \quad (10)$$

Kde k je korekční součinitel charakterizující tvar příčného řezu

b délka kratší strany příčného řezu tělesa [m]

h délka delší strany příčného řezu tělesa [m].



Obr. 8 Uspořádání snímače a budiče při zkoušce torzního kmitání [3].

Z výsledků naměřených rezonanční metodou je dále možné stanovit dynamické Poissonovo číslo, a to přímo z hodnot naměřených vlastních kmitočtů ze vztahu [3]:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (11)$$

Kde ν_{cr} je Poissonovo číslo

f_t první vlastní kmitočet podélného kmitání [kHz]

f_L první vlastní kmitočet torzního kmitání [kHz]

k korekční součinitel charakterizující tvar příčného řezu.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 EXPERIMENT č. 1

4.1.1 Popis a metodika práce

Cílem tohoto experimentu je zkoumat vliv velikosti, tvaru a původu zkušebních těles z lehkého betonu na výsledné dynamické charakteristiky zjištěné rezonanční metodou. Pro tento účel byly použity dva druhy lehkých betonů, které budou dále označovány jako LB1 a LB2. Oba tyto betony byly vylehčeny lehkým kamenivem Liapor, které bylo před betonáží 24 hodin předvlhčováno. U LB1 byl použit cement CEM II/B-S 32,5 R (Mokrý) a u LB2 cement CEM I 42,5 R (Mokrý). U betonů bylo zvoleno různé množství a frakce lehkého kameniva a také přidány jiné druhy přísad, což zapříčinilo různé vlastnosti a objemové hmotnosti (podle výsledků měření: $\rho_{LB1}=1620 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{LB2}=1830 \text{ kg/m}^3$).

Z obou betonů bylo vyrobeno několik základních těles vybetonovaných do forem, z těles větších rozměrů (u LB1 především z trámce o příčném rozměru 300 mm a délce 900 mm a u LB2 z tělesa, které bylo vybetonováno do plastové nádoby na maltu) bylo jádrovým vrtáním a řezáním získáno velké množství dalších zkušebních těles menších rozměrů. Zkušební tělesa byla podrobena nedestruktivnímu měření modulu pružnosti v tahu/tlaku a ve smyku rezonanční metodou. Celkem bylo odzkoušeno 164 těles. Všechny výsledky byly zpracovány podle normy ČSN 73 1372 [3] a bylo provedeno vyhodnocení a porovnání.

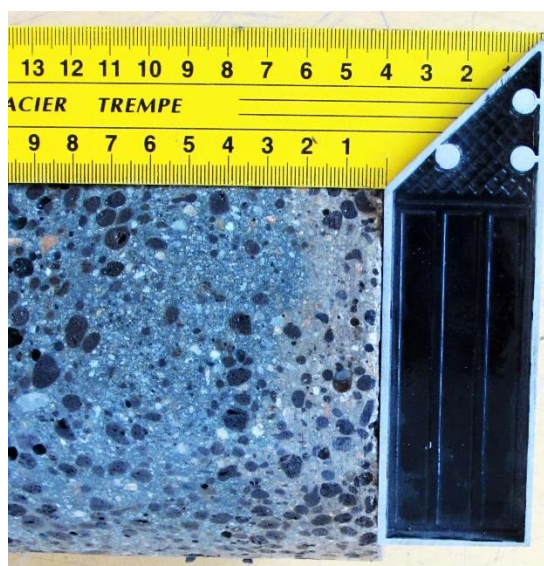
4.1.2 Zkušební tělesa

Základními tělesy vybetonovanými do forem z LB1 bylo 7 ks válců o průměru 150 mm a délce 300 mm, 8 ks trámců o průřezu 100 mm a délce 400 mm, 3 ks trámců o průřezu 150 mm a délce 600 mm, jeden trámec o průřezu 300 mm a délce 900 mm a dvě dlaždice o rozměru 300/300/150 (ty byly vyrobeny pouze pro získání jádrových vývrtů). Z trámce T300/900 a z obou dlaždic byly jádrovým vrtáním získány vývrty o průměru 50 mm (7 ks), 75 mm (6 ks), 100 mm (6 ks) a 150 mm (6 ks). Vývrty o průměru 50 mm byly dále nařezány na délky 150, 120 a 80 mm. Receptura čerstvého betonu LB1 je uvedena v tabulce 5.

Tab. 5 Receptura čerstvého betonu LB1 [28].

| Materiál | Množství na 1 m ³ 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 |

Základní tělesa ze sady LB1 byla vyrobena 26. 5. 2017. Odformována byla po třech dnech, poté byla pro optimální zrání uložena na 90 dní do vodní lázně. Po vyjmutí z vodní lázně byla tělesa uložena ve standardních laboratorních podmínkách, aby mohla vysychat. Dne 19. 6. 2018 (tedy ve stáří 389 dní) bylo provedeno měření všech těles rezonanční metodou. Dne 3. 7. 2018 (tedy ve stáří 403 dní) bylo provedeno jádrové vrtání z tělesa T300/900 a z dlaždic. Vývrty byly zkoušeny dne 12. 7. 2018 (stáří 412 dní). Nakonec bylo provedeno řezání vývrtů o průměru 50 mm, tato tělesa byla měřena 19. 7. 2018 (stáří 419 dní). Z následujícího obrázku je patrné, že při stáří betonu 403 dní, kdy byly prováděny vývrty, bylo těleso T300/900 vyschnuté pouze přibližně do 2 cm pod povrchem.



Obr. 9 Detail částečného vyschnutí vývrtu z T300/900 (LB1).

Celkem tedy bylo odzkoušeno 62 těles z LB1, jejich přehled a označení jsou uvedeny v tab. 6. Obrázky 10 a 11 zobrazují sadu základních zkušebních těles a odebrané jádrové vývrty.

Tab. 6 Zkušební tělesa z LB1.

| OZN. | Druh | Průřez [mm] | Délka [mm] | Typ | Původ | Počet |
|------------|--------|-------------|------------|--------------|----------|-------|
| V 150/300 | válec | 150 | 300 | forma | - | 7 |
| T 100/400 | hranol | 100 | 400 | forma | - | 8 |
| T 150/600 | hranol | 150 | 600 | forma | - | 3 |
| T 300/900 | hranol | 300 | 900 | forma | - | 1 |
| JV 50/300 | válec | 50 | 300 | vývrt | T300/900 | 7 |
| JV 75/300 | válec | 75 | 300 | vývrt | T300/900 | 6 |
| JV 100/300 | válec | 100 | 300 | vývrt | T300/900 | 6 |
| JV 150/300 | válec | 150 | 300 | vývrt | T300/900 | 6 |
| JV 50/150 | válec | 50 | 150 | řez z vývrtu | JV50/300 | 6 |
| JV 50/120 | válec | 50 | 120 | řez z vývrtu | JV50/300 | 6 |
| JV 50/80 | válec | 50 | 80 | řez z vývrtu | JV50/300 | 6 |



Obr. 10 Základní tělesa z LB1.



Obr. 11 Zkušební tělesa – jádrové vývrty průměrů 50, 75, 100 a 150 mm (LB1).

Z LB2 bylo vyrobeno 5 druhů základních těles – válce o průměru 150 mm a délce 300 mm, trámce o průřezu 100 mm a délce 400 mm, trámce o průřezu 150 mm a délce 600 mm, trámce o průřezu 40 mm a délce 160 mm a jedno těleso, pro které byla jako forma použita plastová nádoba na maltu (lidově zvaná „kalfas“). Z tělesa vybetonovaného do nádoby na maltu a z trámce o průřezu 150 mm a délce 600 mm bylo jádrovým vrtáním (viz obr. 12) a řezáním získáno mnoho dalších vzorků menších rozměrů. Receptura čerstvého betonu LB2 je uvedena v tabulce 7.

Tab. 7 Receptura čerstvého betonu LB2 [27].

| Materiál | Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg] |
|---|--|
| Cement CEM I/42,5 R | 450 |
| Písek 0/4 Bratčice | 662 |
| Kamenivo 2/10 Liapor | 408 |
| Popel Dětmárovice | 100 |
| Pří sada VZ 10 - zpomalovač | 0,68 |
| Plastifikační pří sada Sika stabilizer 4R | 0,45 |
| Sikaplast 501 | 3,6 |
| Voda | 230 |

Základní tělesa ze sady LB2 byla vyrobena 17. 4. 2018. Odformována byla po třech dnech, poté byla pro optimální zrání uložena na 90 dní do vodní lázně. Po vyjmutí z vodní lázně byla tělesa uložena ve standardních laboratorních podmínkách, aby mohla vysychat. Dne 29. 10. 2018 (tedy ve stáří 195 dní) bylo provedeno měření všech těles rezonanční metodou. Dne 30. 10. 2018 (tedy ve stáří 196 dní) bylo provedeno jádrové vrtání z tělesa vybetonovaného do plastové nádoby na maltu. O několik dní později bylo také provedeno řezání trámců T150/600 na menší trámečky. Vývrty a řezy byly zkoušeny ve stáří 203 dní.

Celkem bylo odzkoušeno 102 těles z LB2, jejich označení, rozměry, typy a počty jsou patrné z tabulky 8.

Tab. 8 Zkušební tělesa z LB2.

| Označení | Druh | Průřez [mm] | Délka [mm] | Typ | Původ | Počet |
|------------|--------|-------------|------------|--------------|----------|-------|
| V 150/300 | válec | 150 | 300 | forma | - | 7 |
| T 100/400 | hranol | 100 | 400 | forma | - | 7 |
| T 150/600 | hranol | 150 | 600 | forma | - | 6 |
| T 40/160 | hranol | 40 | 160 | forma | - | 9 |
| Nádoba | - | - | 650 | forma | - | 1 |
| JV 50/270 | válec | 50 | 270 | vývrt | nádoba | 6 |
| JV 75/270 | válec | 75 | 270 | vývrt | nádoba | 6 |
| JV 100/270 | válec | 100 | 270 | vývrt | nádoba | 6 |
| T 150/300 | hranol | 150 | 300 | řez | T150/600 | 6 |
| JV 50/175 | válec | 50 | 175 | řez z vývrtu | JV50/270 | 6 |
| JV 50/95 | válec | 50 | 95 | řez z vývrtu | JV50/270 | 6 |
| T 75/100 | hranol | 75 | 100 | řez | T150/600 | 6 |
| T 75/200 | hranol | 75 | 200 | řez | T150/600 | 6 |
| T75/300 | hranol | 75 | 300 | řez | T150/600 | 6 |
| T 50/100 | hranol | 50 | 100 | řez | T150/600 | 6 |
| T 50/200 | hranol | 50 | 200 | řez | T150/600 | 6 |
| T 50/300 | hranol | 50 | 300 | řez | T150/600 | 6 |



Obr. 12 Získávání zkušebních těles jádrovým vrtáním (LB2).

4.1.3 Průběh zkoušení

Všechna zkušební tělesa byla řádně identifikována a nesmazatelným způsobem označena (viz obr. 13). Následně byly posuvným měřidlem změřeny všechny rozměry (viz obr. 14) a tělesa byla zvážena.



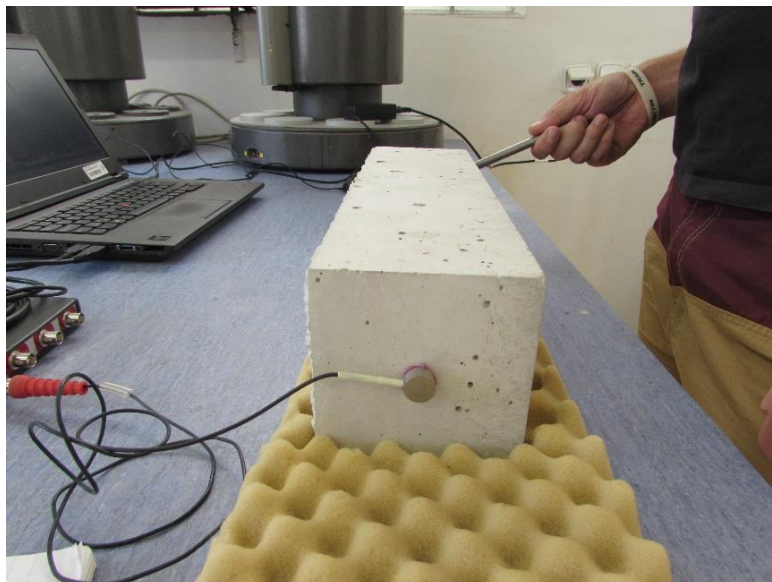
Obr. 13 Identifikace zkušebních těles.



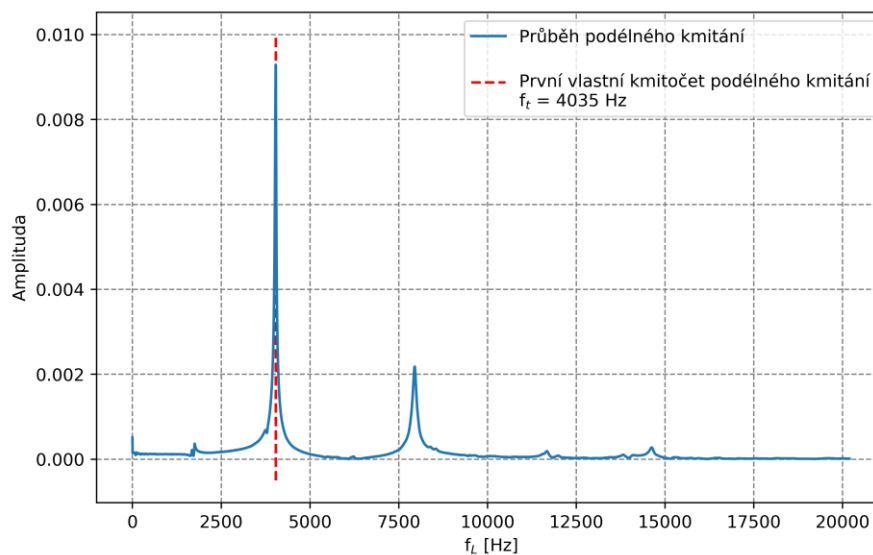
Obr. 14 Měření rozměrů zkušebních těles.

Všechny vlastní frekvence byly měřeny třikrát, přičemž do dalších výpočtů vstupovala průměrná hodnota. Rozkmitání zkušebního tělesa bylo provedeno vnesením mechanického impulzu úderem kovovým kladívkem. Vlastní frekvence byly zjištěny pomocí snímače osciloskopu Handyscope HS4 umístěného na zkušebních tělesech a softwaru v počítači (ten pracuje na principu rychlé Fourierovi transformace).

První byla měřená vlastní frekvence podélného kmitání zkušebních těles (uspořádání snímače a budiče rovnoběžně s podélnou osou zkušebního tělesa - viz obrázek 6 a 15). Na grafu 1 je zachycen záznam frekvenčního spektra při podélném kmitání.



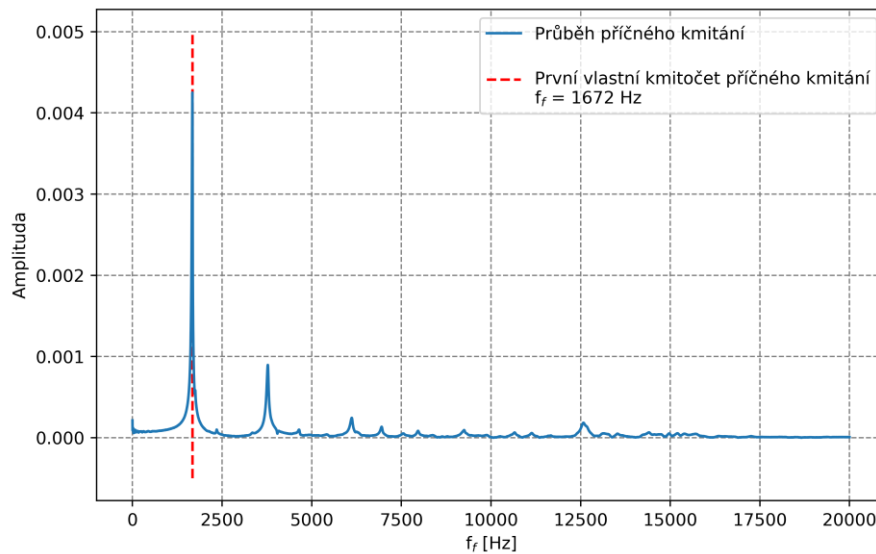
Obr. 15 Měření vlastní frekvence podélného kmitání na tělese T100/400.



Graf 1 Záznam frekvenčního spektra podélného kmitání na tělese T100/400.

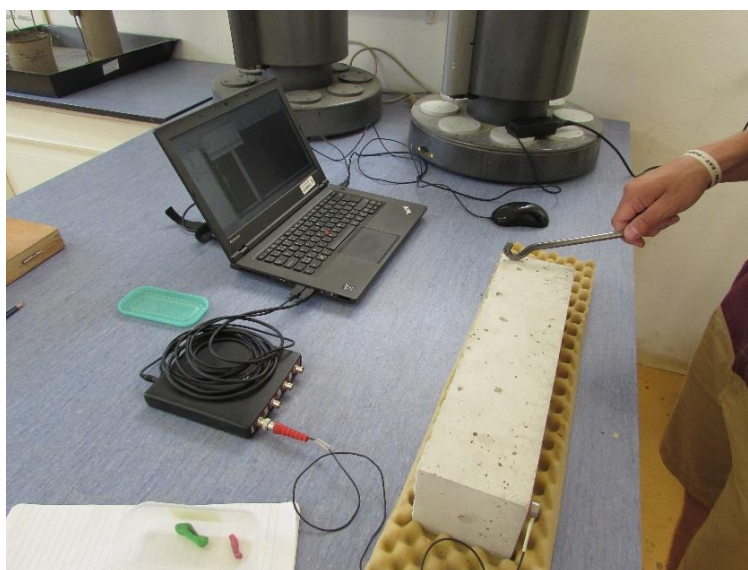
Jako další byla měřena vlastní frekvence příčného kmitání zkušebních těles, ze které se stanovuje stejně jako z vlastní frekvence podélného kmitání dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku. Uspořádání budiče a snímače bylo při této zkoušce kolmo k podélné ose

zkušební tělesa v její úrovni, uspořádání je patrné z obrázku 7. Na grafu 2 je zachycen záznam frekvenčního spektra při zkoušce příčného kmitání.

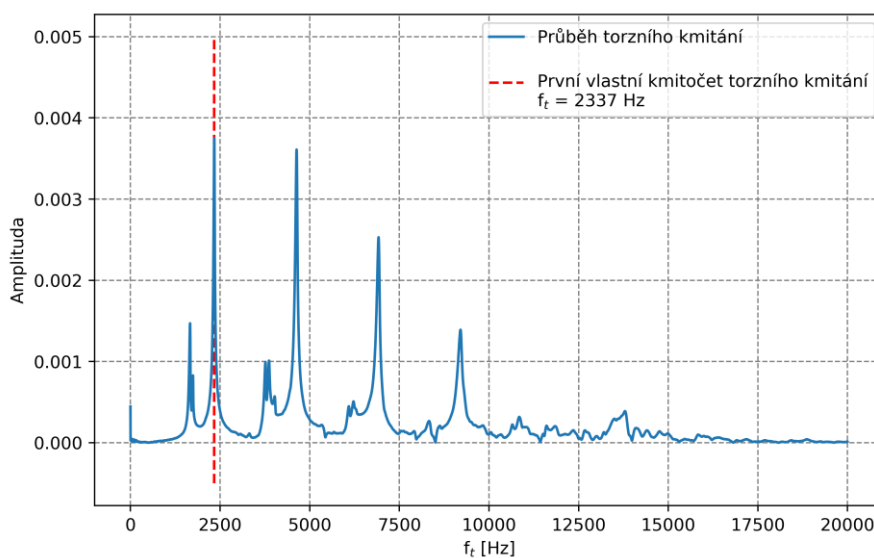


Graf 2 Záznam frekvenčního spektra příčného kmitání na tělese T100/400.

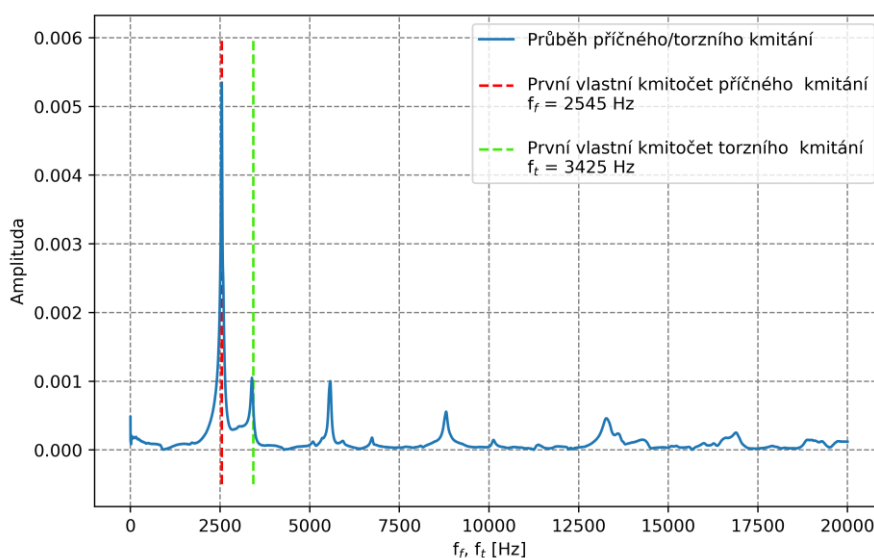
Třetím a posledním druhem kmitání, které se měří rezonanční metodou, je kmitání torzní, neboli kroutivé. Z tohoto kmitání se určuje dynamický modul pružnosti ve smyku. Uspořádání budiče a snímače je stejně jako u zkoušky příčného kmitání kolmo na podélnou osu, tentokrát však ne v její úrovni. Protože je cílem těleso „rozkroutit“ umístí se budič a snímač např. do protilehlých rohů tělesa (příklad umístění budiče a snímače pro torzní kmitání je znázorněn na obrázku 8 a 16).



Obr. 16 Měření vlastní frekvence torzního kmitání na tělese T100/400.



Graf 3 Záznam frekvenčního spektra torzního kmitání na tělese ve tvaru hranolu (T100/400).



Graf 4 Záznam frekvenčního spektra příčného a torzního kmitání na tělese ve tvaru válce (JV100/300).

Jak je patrné z grafu 4, příčné a krouživé kmitání u zkušebních těles ve tvaru válce je spolu úzce spjato (toto platí i u těles ve tvaru hranolu, kde to ale z důvodů větších štíhlostí není ze záznamu frekvenčního spektra tolik patrné – peaky jsou dále od sebe). Důvodem je geometrie těchto těles a fakt, že těleso jde jen těžko samostatně „rozkroužit“ aniž by u toho nebylo způsobeno také kmitání příčné, proto se u zkoušení příčného kmitání těleso většinou rozkmitá i krouživě a naopak.

Naměřené hodnoty prvních vlastních kmitočtů na všech tělesech z LB1 i z LB2 byly zaznamenány do tabulek. Níže uvádím pro ukázkou tabulky jen s některými tělesy (všechna měření jak rozměrů, tak vlastních frekvencí byla prováděna třikrát, v tabulkách níže jsou zaznamenány již průměrné hodnoty). Tabulky všech naměřených výsledků se nachází v přílohouvé části této bakalářské práce.

Tab. 9 Naměřené hodnoty – vybrané jádrové vývrty z T300/900 – LB1.

| OZN. | $\varnothing d$ [m] | $\varnothing L$ [m] | m [kg] | V [m ³] | ρ [kg/m ³] | $\varnothing f_L$ [kHz] | $\varnothing f_f$ [kHz] | $\varnothing f_t$ [kHz] |
|-------------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| JV100/300-1 | 0,103 | 0,302 | 3,921 | 0,00253 | 1550 | 5,411 | 2,595 | 3,441 |
| JV100/300-2 | 0,103 | 0,301 | 3,850 | 0,00253 | 1520 | 5,366 | 2,566 | 3,411 |
| JV100/300-3 | 0,103 | 0,300 | 3,987 | 0,00252 | 1581 | 5,425 | 2,656 | 3,509 |
| JV100/300-4 | 0,104 | 0,299 | 4,078 | 0,00252 | 1618 | 5,490 | 2,676 | 3,499 |
| JV100/300-5 | 0,103 | 0,299 | 3,962 | 0,00251 | 1578 | 5,460 | 2,645 | 3,481 |
| JV100/300-6 | 0,103 | 0,298 | 4,071 | 0,00251 | 1625 | 5,452 | 2,637 | 3,481 |
| JV150/300-1 | 0,144 | 0,299 | 7,823 | 0,00485 | 1614 | 5,536 | 3,280 | 3,528 |
| JV150/300-2 | 0,143 | 0,299 | 7,680 | 0,00483 | 1592 | 5,469 | 3,253 | 3,500 |
| JV150/300-3 | 0,144 | 0,299 | 7,945 | 0,00484 | 1641 | 5,628 | 3,322 | 3,577 |
| JV150/300-4 | 0,143 | 0,299 | 7,711 | 0,00481 | 1602 | 5,492 | 3,252 | 3,512 |
| JV150/300-5 | 0,143 | 0,299 | 7,965 | 0,00481 | 1656 | 5,618 | 3,300 | 3,576 |
| JV150/300-6 | 0,143 | 0,300 | 7,752 | 0,00484 | 1602 | 5,499 | 3,251 | 3,485 |

Tab. 10 Naměřené hodnoty – vybrané jádrové vývrty – LB2.

| OZN. | $\varnothing d$ [m] | $\varnothing L$ [m] | m [kg] | V [m ³] | ρ [kg/m ³] | $\varnothing f_L$ [kHz] | $\varnothing f_f$ [kHz] | $\varnothing f_t$ [kHz] |
|-------------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| JV50/270-1 | 0,050 | 0,272 | 0,985 | 0,00054 | 1811 | 6,555 | 1,958 | 3,934 |
| JV50/270-2 | 0,051 | 0,269 | 1,001 | 0,00055 | 1829 | 6,431 | 1,967 | 4,181 |
| JV50/270-3 | 0,051 | 0,271 | 0,999 | 0,00055 | 1809 | 6,460 | 1,945 | 4,150 |
| JV50/270-4 | 0,051 | 0,272 | 1,004 | 0,00056 | 1802 | 6,591 | 1,952 | 4,037 |
| JV50/270-5 | 0,051 | 0,268 | 1,006 | 0,00055 | 1822 | 6,750 | 2,062 | 4,111 |
| JV50/270-6 | 0,051 | 0,273 | 1,024 | 0,00055 | 1860 | 6,487 | 1,951 | 4,066 |
| JV75/270-1 | 0,074 | 0,268 | 2,108 | 0,00115 | 1830 | 6,714 | 2,780 | 4,260 |
| JV75/270-2 | 0,074 | 0,271 | 2,104 | 0,00116 | 1806 | 6,630 | 2,618 | 4,124 |
| JV75/270-3 | 0,074 | 0,272 | 2,128 | 0,00117 | 1820 | 6,674 | 2,743 | 4,211 |
| JV75/270-4 | 0,074 | 0,267 | 2,094 | 0,00115 | 1820 | 6,796 | 2,805 | 4,256 |
| JV75/270-5 | 0,074 | 0,272 | 2,127 | 0,00117 | 1820 | 6,646 | 2,714 | 4,148 |
| JV75/270-6 | 0,074 | 0,272 | 2,134 | 0,00117 | 1824 | 6,681 | 2,715 | 4,139 |
| JV100/270-1 | 0,103 | 0,272 | 4,143 | 0,00229 | 1813 | 6,715 | 3,481 | 4,223 |
| JV100/270-2 | 0,103 | 0,269 | 4,164 | 0,00226 | 1840 | 6,719 | 3,501 | 4,243 |
| JV100/270-3 | 0,103 | 0,272 | 4,144 | 0,00228 | 1820 | 6,718 | 3,481 | 4,262 |
| JV100/270-4 | 0,103 | 0,265 | 4,024 | 0,00222 | 1812 | 6,805 | 3,625 | 4,304 |
| JV100/270-5 | 0,103 | 0,267 | 4,041 | 0,00223 | 1813 | 6,783 | 3,545 | 4,281 |
| JV100/270-6 | 0,103 | 0,274 | 4,174 | 0,00229 | 1819 | 6,618 | 3,414 | 4,213 |

4.1.4 Zpracování, výsledky zkoušek a jejich diskuse

Celkem bylo měření podrobena 164 těles různých rozměrů, štíhlostí a typů ze dvou různých lehkých betonů. Měřeny byly tři vlastní frekvence kmitání (podélná, příčná a kroutivá) a z nich byly podle normy ČSN 73 1372 [3] ze vztahů 6, 7 a 9 vypočítány příslušné dynamické moduly pružnosti (E_{crL} – dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku stanovený z podélného kmitání, E_{crf} – dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku stanovený z příčného kmitání a G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku stanovený z torzního kmitání).

V normě ČSN 73 1372 [3] je uvedená tabulka s předpokládanými poměry jednotlivých vlastních kmitočtů hranolů při dané štíhlosti. Tyto předpokládané poměry jsou uvedeny v tabulce 3. Při měření na zkušebních tělesech se ukázalo, že vlastní kmitočty opravdu vycházely, až na nepatrné rozdíly (max. 2 % u trámů z LB1), podle předpokládaného poměru uváděného normou. V tabulce 11 jsou ukázány poměry vlastních kmitočtů pro tělesa se štíhlostí 1:4.

Tab. 11 Naměřené poměry vlastních kmitočtů hranolů se štíhlostí 1:4.

| OZN. | šířka : délka | Poměry kmitočtů $f_L : f_t : f_f$ |
|----------------|---------------|--------------------------------------|
| T100/400 - LB1 | 1 : 4 | 1 : 0,58 : 0,41 |
| T150/600 - LB1 | 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,41 |
| T100/400 - LB2 | 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,42 |
| T150/600 - LB2 | 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,43 |
| T40/160 - LB2 | 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,42 |
| T75/300 - LB2 | 1 : 4 | 1 : 0,58 : 0,43 |
| T50/200 - LB2 | 1 : 4 | 1 : 0,59 : 0,43 |

Podle aktuálně platné normy [3] by měl být modul pružnosti v tahu/tlaku vypočítaný z podélného kmitání (ze vztahu 6) stejný (maximální rozdíl 10 %) s modulem pružnosti v tahu/tlaku vypočteným z příčného kmitání (ze vztahu 7). Také je v normě [3] uvedeno, že pokud tyto moduly nebudou shodné má přednost modul pružnosti stanovený z podélného kmitání - E_{crL} . Z tohoto důvodu je ve většině následujících vyhodnocení a grafů použit pro srovnání právě modul pružnosti stanovený z podélného kmitání.

Obecně všechny moduly pružnosti vycházely z důvodu rozdílného složení lehkých betonů, a tím i rozdílné objemové hmotnosti, asi o 25 % větší u LB2. V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty všech dynamických modulů pružnosti. Uvedené hodnoty jsou průměry z celé sady, pro každý z nich je uvedena příslušná směrodatná odchylka. Všechny výsledky byly podrobena Grubbsovu testu odlehlých hodnot, který nevyřadil žádný z výsledků.

Původním záměrem bylo vývrtky z tělesa T300/900 a z obou dlaždic sloučit do jedné sady (s cílem mít v každé sadě nejméně 6 těles). Provedený oboustranný statistický t-test na rovnost středních hodnot však ukázal, že střední hodnoty těles získaných z T300/900 a z dlaždic se ve čtyřech ze šesti případů statisticky významně liší. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že se tělesa získaná z dlaždic a z trávce T300/900 rozdělí na samostatné sady (ve všech případech – tedy u sad: JV50/300, JV75/300, JV100/300, JV50/150, JV50/120 a JV50/80). Dalším důvodem, který vedl k rozdělení vývrtů na samostatné sady, byla možnost přímého porovnání tělesa T300/900 a vývrtů z něj získaných. Sady těles získané z T300/900 jsou tedy v následující tabulce označeny písmenem T a sady z dlaždic písmenem D. Tabulka 12 ukazuje výsledky na všech sadách těles z LB1. Tabulka 13 ukazuje výsledky na všech sadách těles z LB2.

Tab. 12 Výsledné hodnoty modulů pružnosti E_{crL} , E_{crf} , G_{cr} v GPa pro tělesa z LB1.

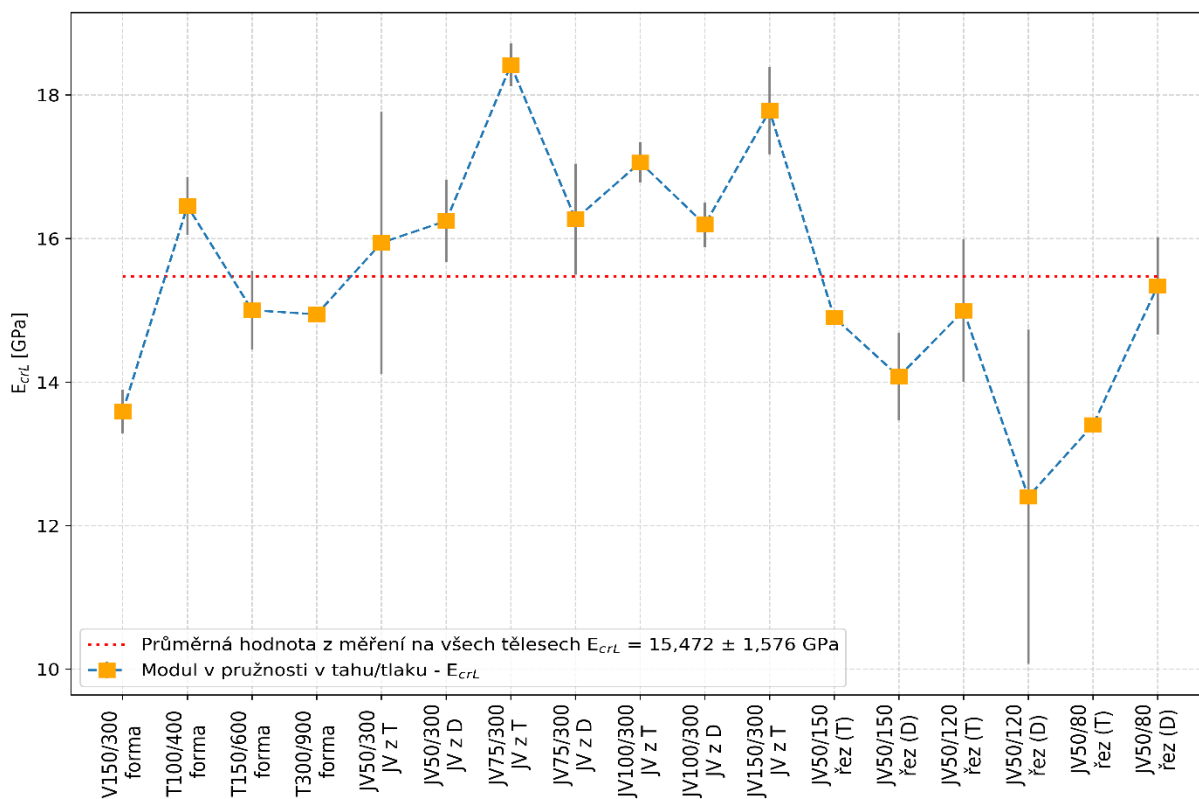
| OZN. | E_{crL} | S_{EcrL} | G_{cr} | S_{Gcr} | E_{crf} | S_{Ecrf} |
|----------------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|------------|
| V 150/300 | 13,590 | 0,306 | 5,315 | 0,140 | 12,913 | 0,388 |
| T 100/400 | 16,454 | 0,402 | 6,589 | 0,195 | 15,047 | 0,674 |
| T 150/600 | 15,001 | 0,550 | 6,161 | 0,234 | 13,275 | 0,422 |
| T 300/900 | 14,945 | 0,000 | 6,080 | 0,000 | 13,287 | 0,000 |
| JV 50/300 (T) | 15,942 | 1,830 | 7,978 | 1,038 | 14,570 | 1,526 |
| JV 50/300 (D) | 16,246 | 0,574 | 8,108 | 0,567 | 15,235 | 1,436 |
| JV 75/300 (T) | 18,419 | 0,297 | 7,433 | 0,092 | 17,582 | 0,700 |
| JV 75/300 (D) | 16,271 | 0,773 | 6,639 | 0,214 | 15,607 | 0,839 |
| JV 100/300 (T) | 17,062 | 0,279 | 6,988 | 0,084 | 17,038 | 0,281 |
| JV 100/300 (D) | 16,195 | 0,311 | 6,547 | 0,130 | 15,909 | 0,379 |
| JV 150/300(T) | 17,782 | 0,611 | 7,217 | 0,230 | 18,085 | 0,498 |
| JV 50/150 (T) | 14,901 | 0,096 | 5,502 | 0,006 | 14,063 | 0,341 |
| JV 50/150 (D) | 14,077 | 0,607 | 5,543 | 0,288 | 13,205 | 1,233 |
| JV 50/120 (T) | 14,995 | 0,991 | 5,378 | 1,097 | 14,906 | 0,760 |
| JV 50/120 (D) | 12,402 | 2,328 | 3,777 | 0,608 | 12,118 | 2,723 |
| JV 50/80 (T) | 13,402 | 0,103 | 5,876 | 0,418 | 11,092 | 0,527 |
| JV 50/80 (D) | 15,340 | 0,678 | 6,937 | 0,289 | 12,959 | 0,336 |

Tab. 13 Výsledné hodnoty modulů pružnosti E_{crL} , E_{crf} , G_{cr} v GPa pro tělesa z LB2.

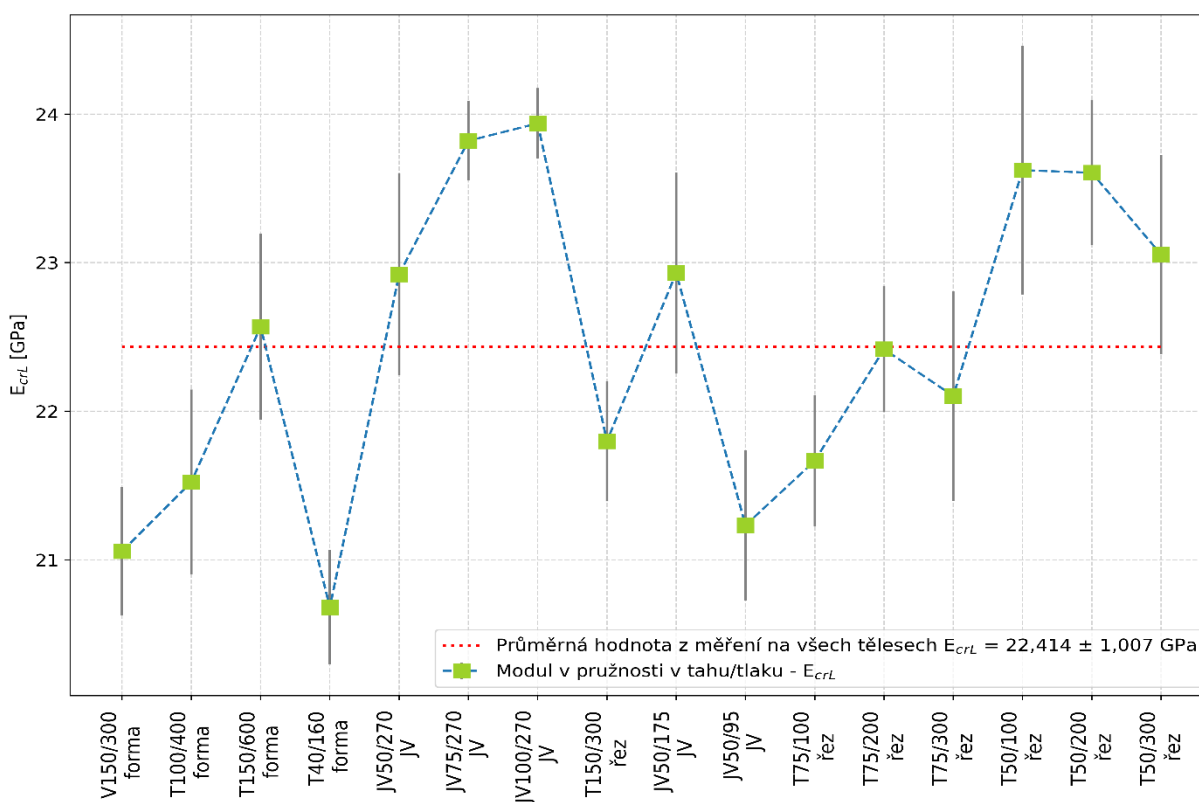
| OZN. | E_{crL} | S_{EcrL} | G_{cr} | S_{Gcr} | E_{crf} | S_{Ecrf} |
|------------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|------------|
| V 150/300 | 21,057 | 0,434 | 8,292 | 0,180 | 21,151 | 0,777 |
| T 100/400 | 21,523 | 0,622 | 8,852 | 0,273 | 19,679 | 1,145 |
| T 150/600 | 22,569 | 0,625 | 9,161 | 0,223 | 22,027 | 0,840 |
| T 40/160 | 20,680 | 0,386 | 8,599 | 0,110 | 19,065 | 0,897 |
| JV 50/270 | 22,922 | 0,680 | 8,906 | 0,328 | 22,242 | 0,791 |
| JV 75/270 | 23,821 | 0,268 | 9,343 | 0,192 | 23,352 | 0,836 |
| JV 100/270 | 23,938 | 0,237 | 9,577 | 0,112 | 24,363 | 0,168 |
| T 150/300 | 21,798 | 0,404 | 8,946 | 0,165 | 22,105 | 0,662 |
| JV 50/175 | 22,932 | 0,677 | 9,219 | 0,600 | 21,024 | 2,133 |
| JV 50/95 | 21,232 | 0,507 | 8,725 | 0,436 | 23,836 | 0,361 |
| T 75/100 | 21,666 | 0,443 | 9,240 | 0,210 | 22,402 | 0,357 |
| T 75/200 | 22,418 | 0,422 | 8,970 | 0,223 | 22,214 | 0,378 |
| T 75/300 | 22,102 | 0,706 | 8,887 | 0,418 | 21,895 | 0,857 |
| T 50/100 | 23,623 | 0,836 | 9,564 | 0,383 | 24,219 | 0,743 |
| T 50/200 | 23,606 | 0,487 | 9,749 | 0,233 | 23,456 | 0,654 |
| T 50/300 | 23,055 | 0,671 | 9,250 | 0,279 | 22,112 | 1,306 |

V grafech 5 a 6 je zobrazen přehled modulů pružnosti v tahu/tlaku na všech tělesech z jednotlivých betonů. V grafech jsou znázorněny průměrné hodnoty z celé sady a směrodatná odchylka. U tělesa JV50/300 (T) je velká směrodatná odchylka z toho důvodu, že byla odebrána tři zkušební tělesa, z toho dvě z krajní části a jedno ze středu (to vykazovalo vyšší modul pružnosti). U tělesa JV50/120 (D) je velká směrodatná odchylka, protože vývrty byly odebrány ze dvou různých dlaždic. Velký rozptyl může být tedy způsoben rozdílným umístěním vývrtnů v rámci dlaždic (dva u spodního povrchu a dva u horního povrchu). Na grafech jsou rovněž uvedeny a graficky znázorněny průměrné hodnoty ze všech těles z jednotlivých betonů. Průměrná hodnota E_{crL} u zkušebních těles z LB1 vyšla 15,5 GPa se směrodatnou odchylkou 1,58 GPa. U LB2 vyšla průměrná hodnota E_{crL} 22,4 GPa se směrodatnou odchylkou 1,01 GPa.

Grafy 5 a 6 jsou zde uvedeny pouze pro přehlednost o tom, jak vycházely výsledky v porovnání se všemi tělesy. V další části budou srovnávány pouze zkušební tělesa, která mají stejný nebo podobný rozměr, tvar, původ, či štíhlost.

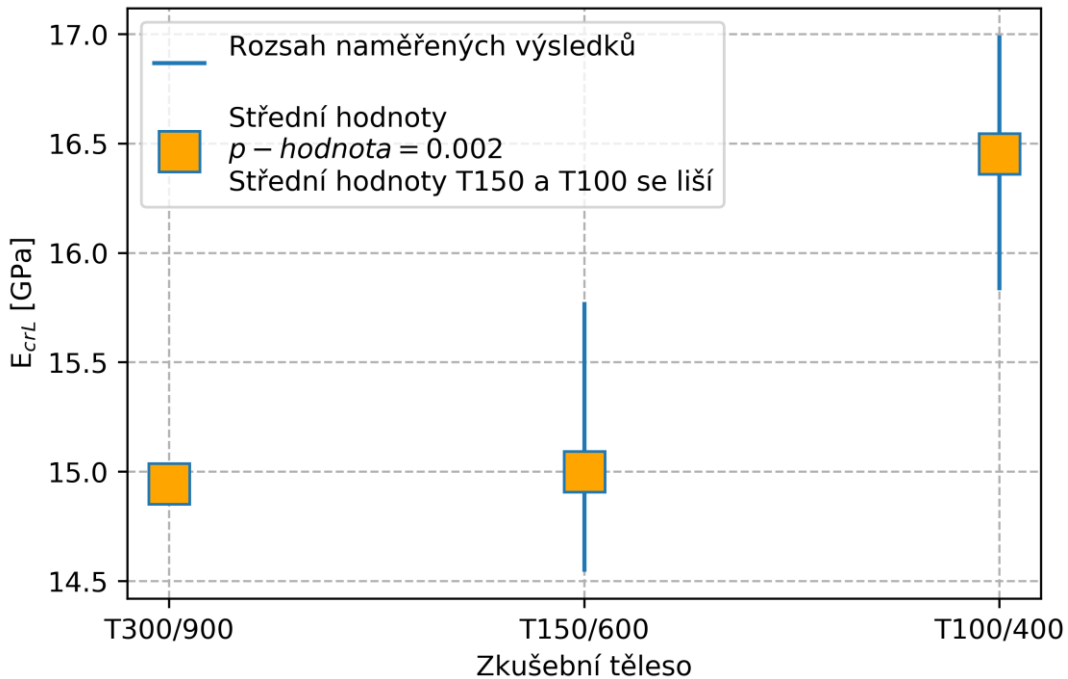


Graf 5 Výsledky modulu pružnosti v tahu/tlaku na všech tělesech z LB1



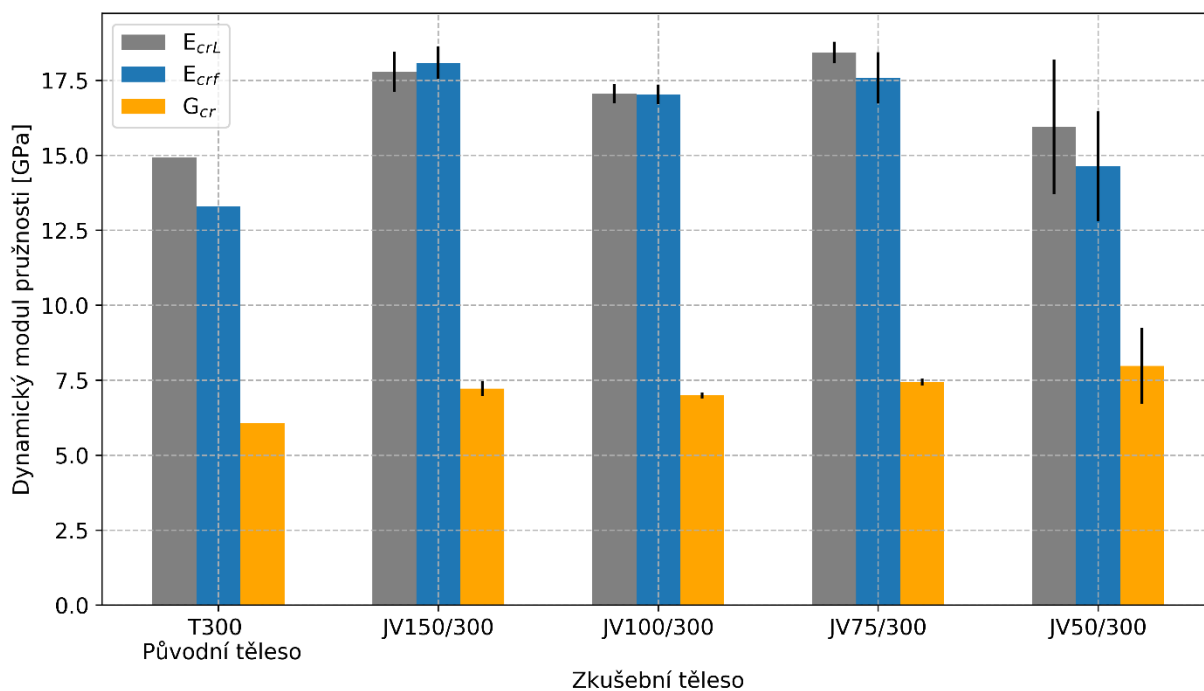
Graf 6 Výsledky modulu pružnosti v tahu/tlaku na všech tělesech z LB2.

V grafu 7 jsou znázorněny výsledky trámů z LB1, které byly vybetonovány do forem. Výsledky z trámů T150/600 a T100/400 byly podrobeny oboustrannému t-testu za účelem rozhodnutí o rovnosti středních hodnot, test potvrdil, že střední hodnoty těchto dvou těles se liší. Těleso T300/900 nebylo do statistického testu zahrnuto, protože je pouze jedno. Z grafu je patrné že výsledky z tělesa T150/600 se blíží výsledku na tělese T300/900. Výsledky na tělese T100/400 vycházejí asi o 10 % větší.



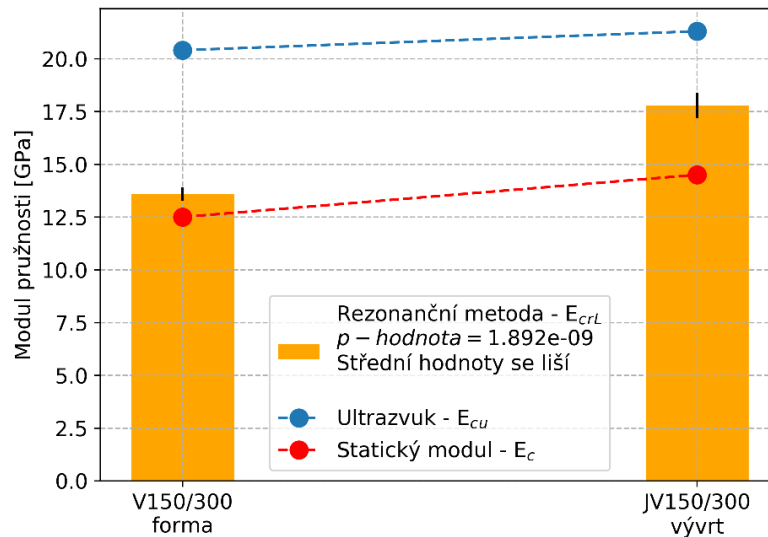
Graf 7 Porovnání výsledků trámů z LB1 betonovaných do formy.

V grafu 8 jsou zobrazeny výsledky všech měřených modulů pružnosti na tělese T300/900 a jádrových vývrtech z něj získaných. Z grafu je patrné že výsledné moduly pružnosti jak v tahu/tlaku, tak ve smyku zjištěné na jádrových vývrtech jsou vyšší než hodnoty na původním tělese. Ze statistického testu ANOVA bylo zjištěno, že střední hodnoty modulu pružnosti v tahu/tlaku zjištěné na vývrtech (p -hodnota = 0,231) se od sebe statisticky významně neliší a hodnoty modulu pružnosti ve smyku zjištěné na vývrtech (p -hodnota = 0,164) se od sebe také statisticky významně neliší.



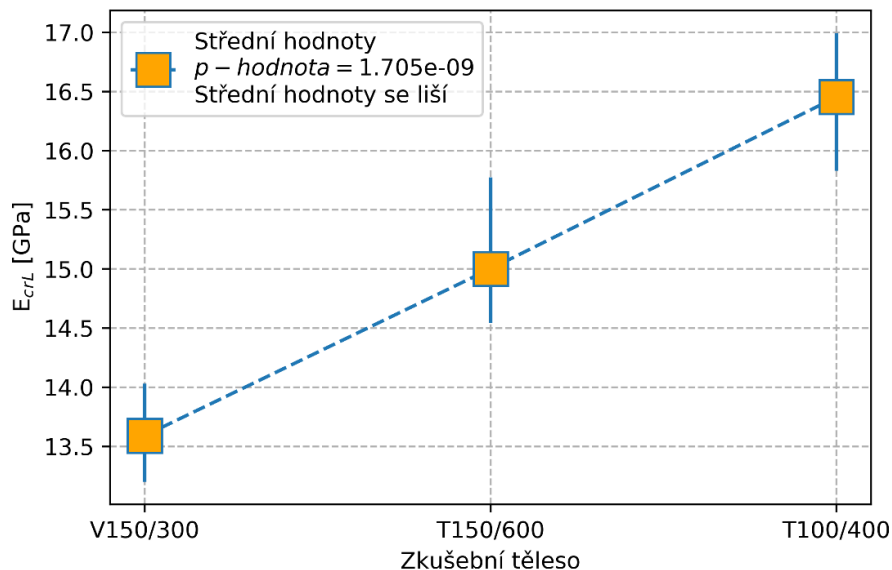
Graf 8 Porovnání výsledků tělesa T300/900 a všech jádrových vývrtů z něj (LB1)

Graf 9 ukazuje rozdílné výsledky na geometricky shodných tělesech, prvním z nich je válec V150/300, který byl vybetonován do formy, a druhým je JV150/300, tedy těleso získané jádrovým vrtáním. Výsledky na tělese V150/300 byly obecně jedny z nejnižších z celé sady, oproti výsledkům ostatních těles z forem byly nižší asi o 10-17 %. Oproti tělesu JV150/300 byly výsledky nižší dokonce o 23 %. Nízké výsledky na tělese V150/300 oproti tělesům JV150/300 mohou být způsobeny rozdílným směrem hutnění nebo skutečností, že těleso z formy má oproti tělesu T300/900, ze kterého byly získány vývrty JV150/300, podstatně menší objem, což vede k rychlejšímu vysychání. Rychlejší vysychání vede k nižší objemové hmotnosti, ale také k utlumení procesu hydratace – oba tyto aspekty ovlivňují výsledný dynamický modul pružnosti. Objemová hmotnost vstupuje přímo do výpočtu a délka zraní přímo ovlivňuje dynamické charakteristiky. Některá tělesa ze sady LB1 i LB2 byla v rámci jiné závěrečné práce [27] změřena ultrazvukovou metodou a byly stanoveny také statické moduly pružnosti, proto se nabízí možnost tyto hodnoty porovnat (z práce [27] byly použity pouze průměrné hodnoty pro celou sadu). Je patrné, že i dynamický modul pružnosti stanovený ultrazvukovou metodou - E_{cu} a statický modul pružnosti - E_c jsou u tělesa JV150/300 větší než u tělesa vybetonovaného do formy.



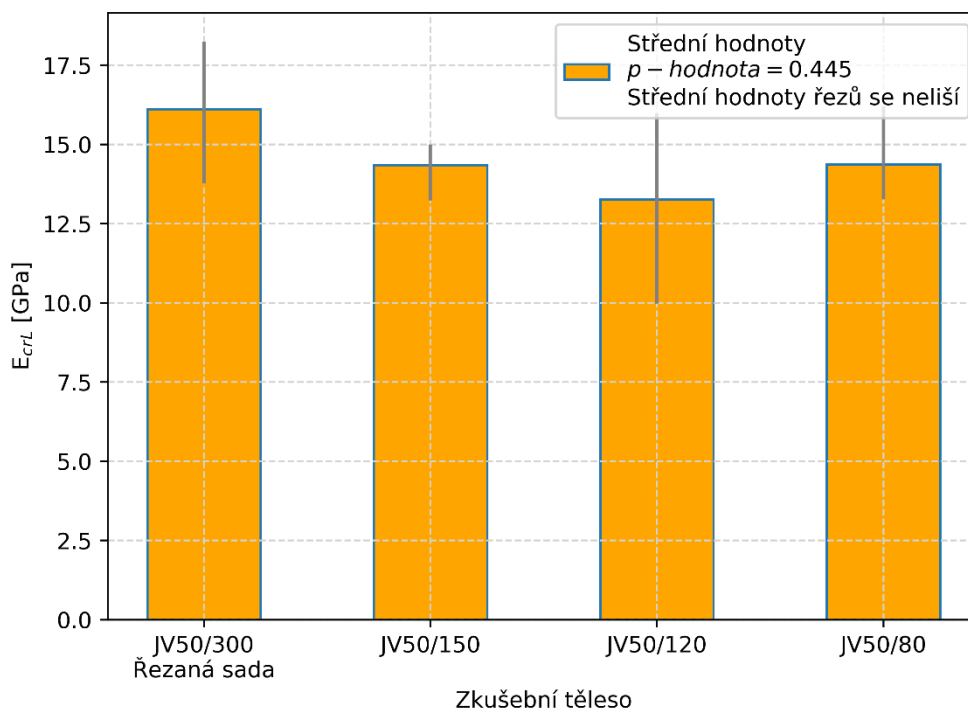
Graf 9 Porovnání výsledků tělesa V150/300 a JV150/300 (LB1).

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, výsledky na tělese V150/300 byly nejmenší ze všech těles, které byly vybetonovány do formy. Tato skutečnost je zobrazena na grafu 10. Tělesa V150/300, T150/600 a T100/400 byly také testovány statistickým testem na rovnost středních hodnot. Výsledkem testu je zamítnutí rovnosti středních hodnot s p-hodnotou rovnající se $1,705E-9$, tedy velmi výrazně nižší než je rozhodující hladina významnosti 0,05. Je však nutné si uvědomit, že například u sady T150/600 byly použity pouze 3 tělesa, takže pro větší průkaznost provedených zkoušek a testů by bylo nutné podstatně zvýšit počet těles v sadě.



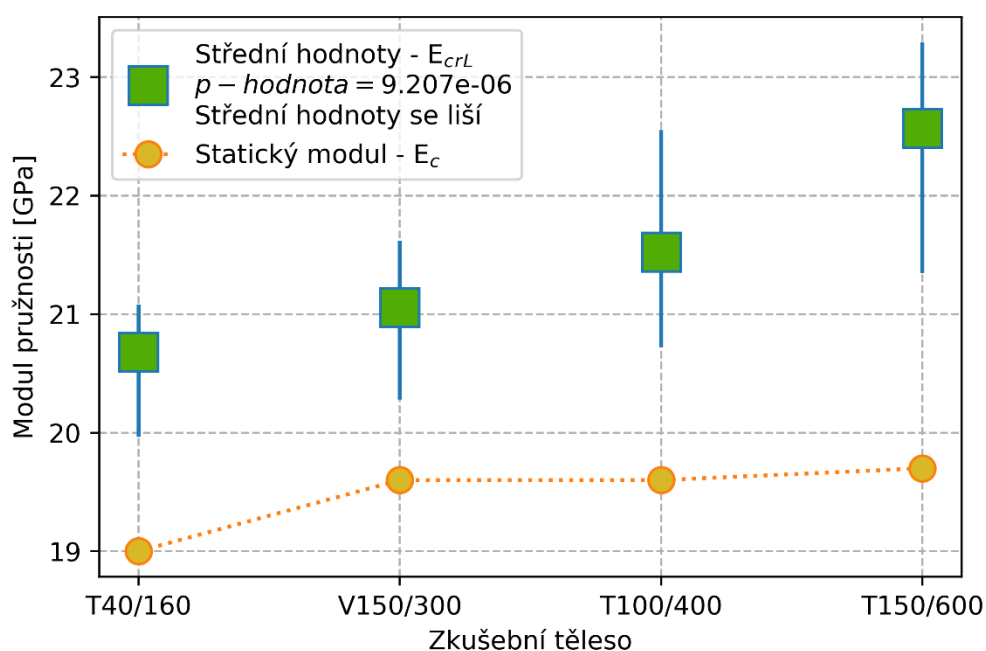
Graf 10 Porovnání výsledků těles betonovaných do formy (LB1).

Posledním grafem zabývajícím se srovnáním těles z LB1 je graf 11, na kterém jsou zobrazeny výsledné hodnoty z válce JV50/300 a těles, které z něj byly nařezány (tedy JV50/150, JV50/120 a JV50/80). Podle testu ANOVA se střední hodnoty všech třech nařezaných těles statisticky významně neliší (p -hodnota = 0,445).



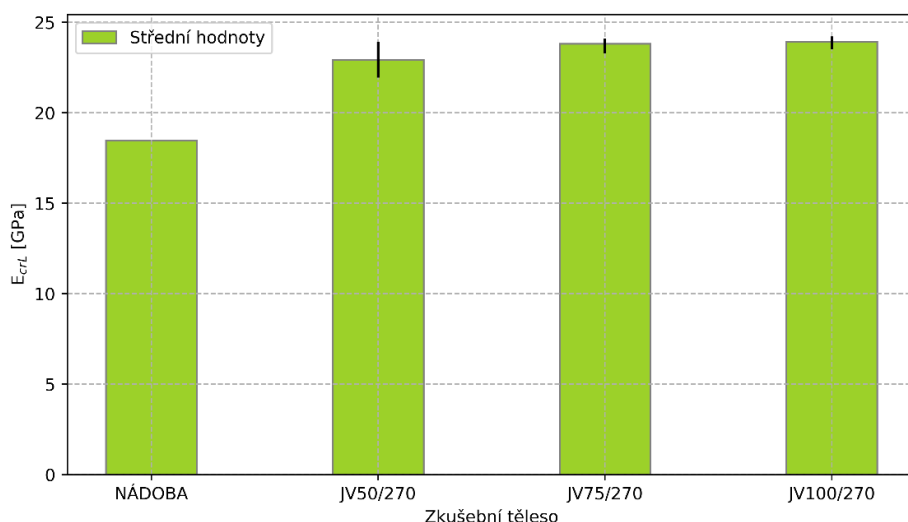
Graf 11 Porovnání výsledků JV50/300 a těles nařezaných z něj (LB1)

Následující skupina grafů se bude zabývat porovnáváním výsledků z LB2. První z grafů zobrazuje základní tělesa vybetonovaná do forem. Podle statistického testu ANOVA je rovnost středních hodnot zamítnuta (ovšem při porovnání pouze těles V150/300 a T100/400 rovnost středních hodnot zamítnuta nebyla). V porovnání lze vidět zvětšující se modul pružnosti s velikostí tělesa, to může být způsobeno různým vysycháním zkušebních těles (větší těleso vysychá déle – beton déle zraje, naopak u malého trámečku T40/160 dochází k vysychání rychleji – zrání se rychleji utlumí). V grafu jsou také znázorněny hodnoty statických modulů pružnosti [27], které stejně jako dynamické moduly pružnosti stanovené rezonanční metodou lehce vzrůstají s délkou tělesa.



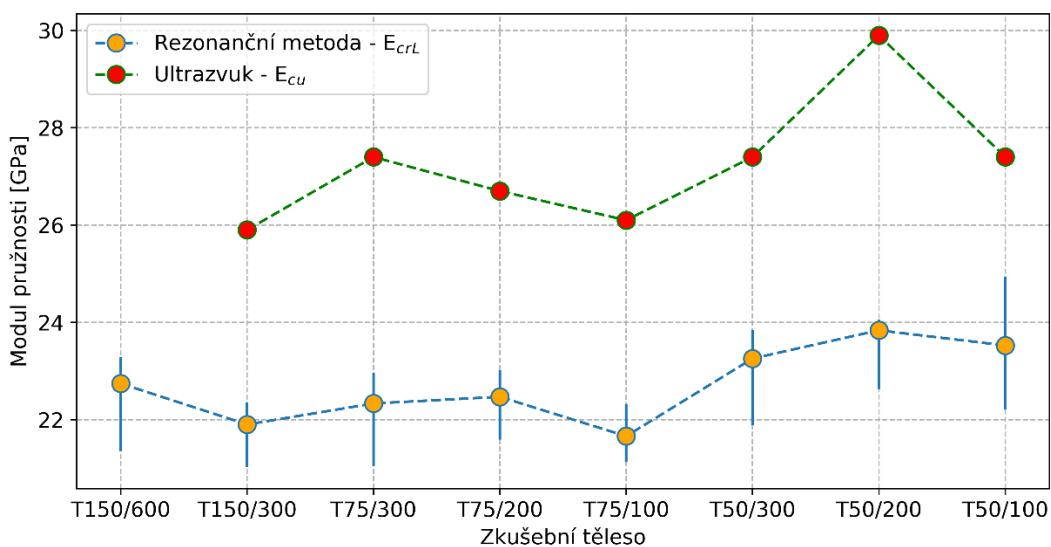
Graf 12 Porovnání výsledků těles z forem (LB2).

Graf 13 ukazuje výsledky zkušebního tělesa, které bylo vybetonované do plastové nádoby a všech jádrových vývrtů, které z něj byly odebrány. Z grafu i z tabulky 13 je patrné, že směrodatná odchylka pro všechny průměry vývrtů je malá. Měření na těchto vývrtech tedy vykazovalo malou variabilitu a rozptyl naměřených výsledků. Statistický test na rovnost středních hodnot ukázal, že střední hodnoty vývrtů o průměru 75 a 100 mm se statisticky významně neliší. Výsledky na vývrtnu o průměru 50 mm vycházely asi o 5 % nižší. Z grafu je také patrné, že moduly pružnosti vypočtené z vývrtů jsou významně vyšší než modul pružnosti ze základního tělesa. Podobné chování je zřejmé i z grafu 8, tedy u vývrtů z tělesa T300/900 z LB1.



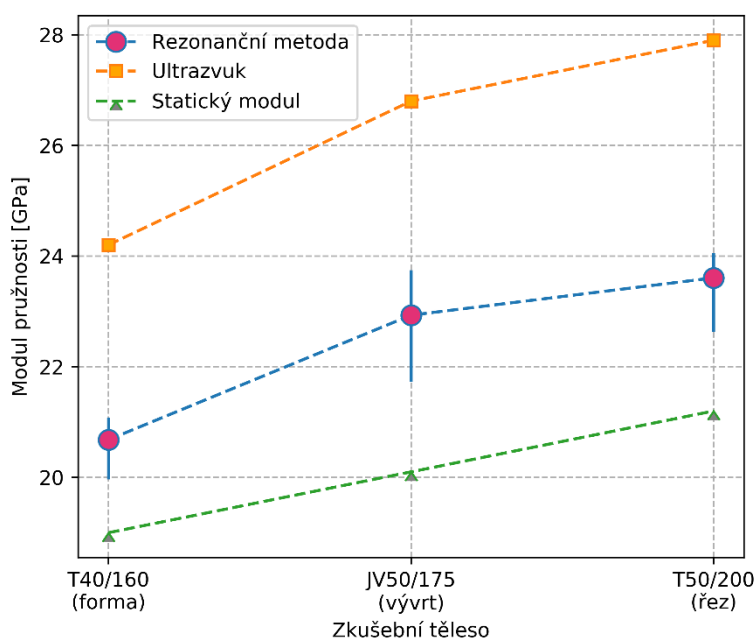
Graf 13 Porovnání výsledků tělesa vybetonovaného do plastové nádoby a vývrtů z něj (LB2).

Na grafu 14 můžeme vidět výsledky modulu pružnosti na tělese T150/600 a všech tělesech, které z něj byly nařezány. Statistický test rovnosti středních hodnot ukázal, že tělesa o průřezu 50 mm se mezi sebou statisticky významně neliší (p -hodnota = 0,349) a tělesa o průřezu 75 mm se mezi sebou taktéž statisticky významně neliší (p -hodnota = 0,120). Výsledky na tělese T150/600 jsou asi o 4 % vyšší než na tělese T150/300 (zamítnutí rovnosti středních hodnot – p -hodnota = 0,042). Na grafu jsou znázorněny taktéž hodnoty modulů pružnosti stanovených ultrazvukovou metodou [27], které shodně kopírují trendy hodnot naměřených rezonanční metodou. Hodnoty naměřené ultrazvukem vycházely průměrně o 17 % vyšší.



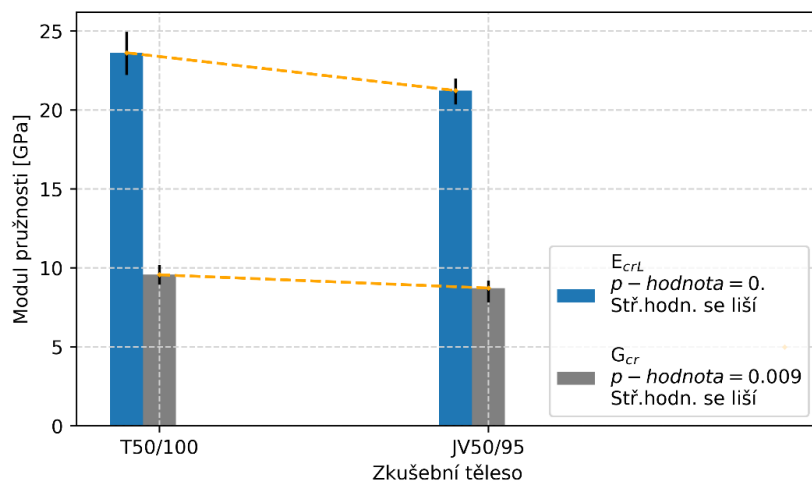
Graf 14 Porovnání výsledků tělesa T150/600 a všech těles, které z něj byly nařezány (LB2).

Na grafu 15 jsou porovnána tělesa různých původů (forma, jádrový vývrt a řez), které mají velmi podobné rozměry. Ze statistického hlediska se střední hodnoty těles získaných vývrtem a řezem významně neliší. Na tělesech vybetonovaných do formy vycházel modul pružnosti v tahu/tlaku zjištěný rezonanční metodou zhruba o 10 % menší. V grafu jsou pro porovnání přidány hodnoty dynamického modulu pružnosti změřeného ultrazvukem a modulu pružnosti statického [27]. Z grafu je také patrné lehké zvětšování modulu pružnosti s délkou zkušební tělesa.

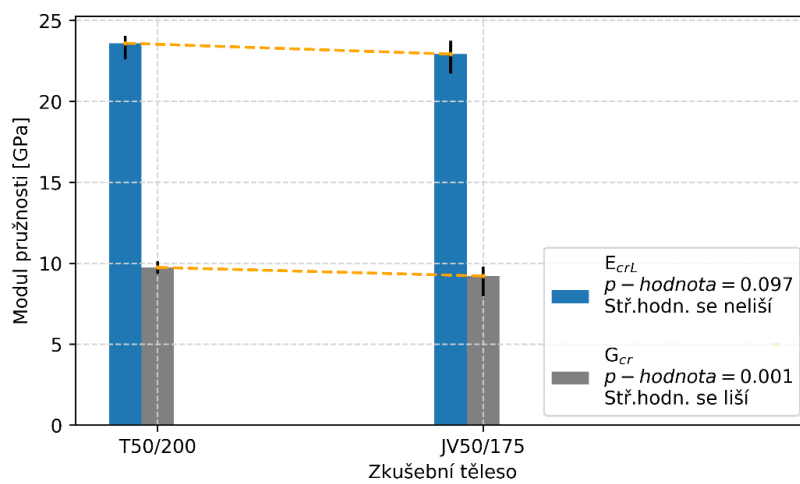


Graf 15 Porovnání výsledků těles T40/160, JV50/175 a T50/200 (LB2).

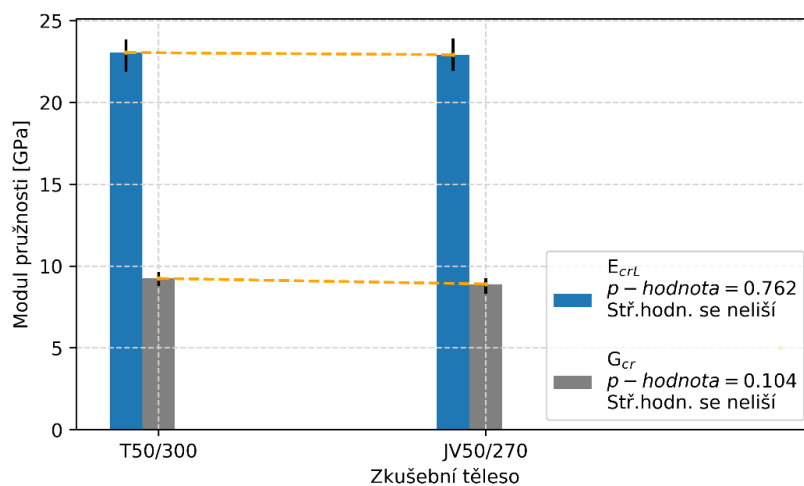
Na grafech 16-18 je ukázáno porovnání modulů pružnosti v tahu/tlaku a také modulů pružnosti ve smyku stanovených z řezů (T50/100, T50/200, T50/300) s jádrovými vývrty stejného příčného rozměru a podobných délek (JV50/95, JV50/175, JV50/270). Ve všech případech vycházely hodnoty získané z řezů vyšší než z jádrových vývrtů. Největší rozdíl mezi hodnotami vykazovaly tělesa o délce 100 mm (až 10 %), nejnižší rozdíl tělesa nejdelší, tedy o délce 300 mm (necelé 1 %). V případě těles s délkou 100 mm byla rovnost středních hodnot modulu pružnosti v tahu/tlaku i modulu pružnosti ve smyku zamítnuta. Naopak u těles o délce 300 mm rovnost středních hodnot jak u modulu pružnosti v tahu/tlaku tak i modulu pružnosti ve smyku zamítnuta nebyla. U těles s délkou 200 mm vyšlo ze statického testu, že rovnost středních hodnot u modulu pružnosti v tahu/tlaku nezamítáme a u modulu pružnosti ve smyku naopak zamítáme.



Graf 16 T50/100 vs. JV50/95 (LB2).

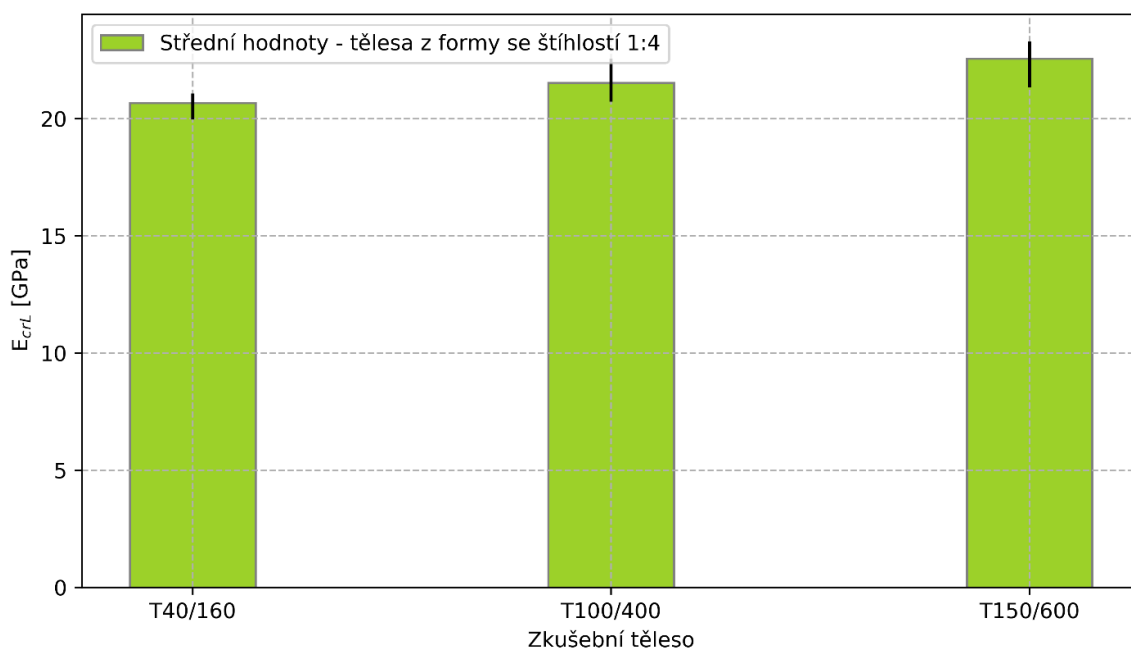


Graf 17 T50/200 vs. JV50/175 (LB2).

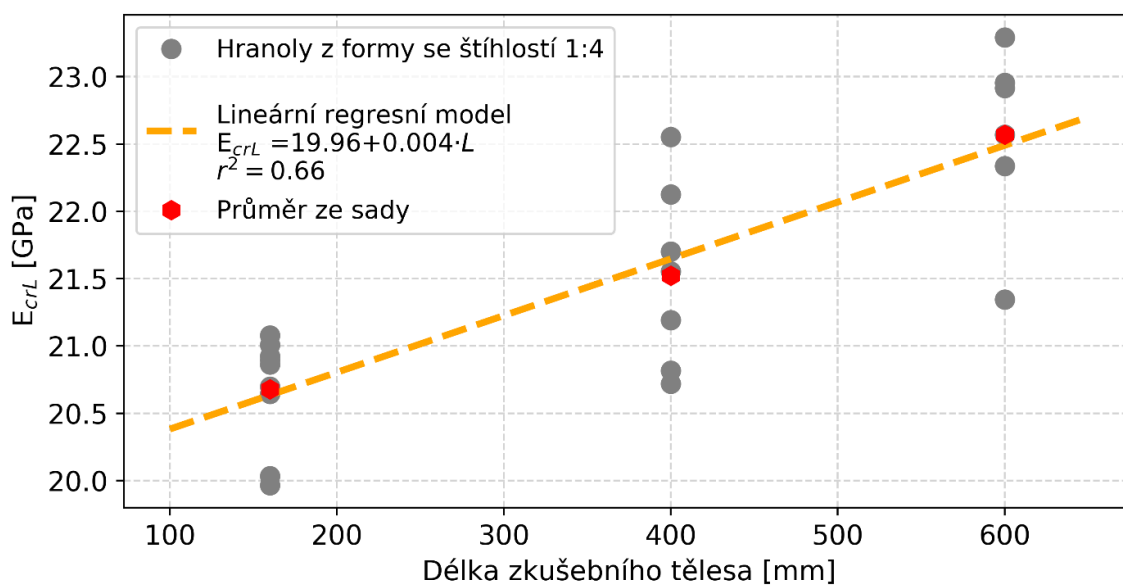


Graf 18 T50/300 vs. JV50/270 (LB2).

Poslední ukázkou porovnávání naměřených hodnot ukazují grafy 19 a 20 - tělesa z LB2 která byla vybetonována do formy (T40/160, T100/400 a T150/600) a která mají shodný štíhlostní poměr 1:4. Z grafů je patrné, že modul pružnosti v případě těchto těles vzrůstá s velikostí zkušební tělesa, což může být opět ovlivněno rychlostí vysychání betonu a tím pádem dobou jeho zrání.



Graf 19 Hranoly z forem se štíhlostí 1:4 (LB2)



Graf 20 Závislost hranolů z forem se štíhlostí 1:4 na délce tělesa (LB2)

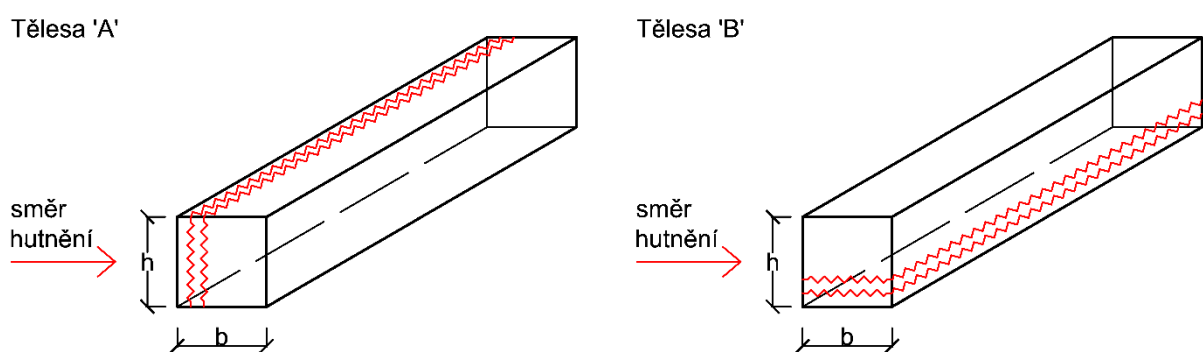
4.2 EXPERIMENT č. 2

4.2.1 Popis a metodika práce

Cílem tohoto experimentu je ověřit vliv tvaru příčného řezu zkušební tělesa na dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku stanovený rezonanční metodou z vlastního kmitočtu příčného kmitání. Výsledný dynamický modul byl vyhodnocen podle normy ČSN 73 1372 [3], konkrétně podle vztahu 7, ve kterém vystupuje poloměr setrvačnosti příčného řezu - i . Jak je v následující části práce popsáno, je to právě poloměr setrvačnosti, který hraje ve vyhodnocení klíčovou roli. Při experimentu bylo použito 12 trámčů, ze kterých bylo ve dvou fázích odříznuto 15 mm za účelem získání nepravidelného průřezu těles. Celkem bylo tedy v tomto experimentu odzkoušeno 36 zkušebních těles.

4.2.2 Zkušební tělesa

Základními zkušebními tělesy pro tento experiment bylo 12 kusů trámčů z obyčejného betonu (objemová hmotnost 2280 kg/m^3) o příčném rozměru 100 mm a délce 400 mm. Tyto trámce byly rozděleny na dvě sady po šesti kusech a označeny jako sada A a sada B. Ze všech těles bylo následně ve dvou fázích odříznuto 15 mm, a to tak, že ze sady A bylo odřezáváno kolmo na směr hutnění a z těles B rovnoběžně se směrem hutnění. Princip odřezávání ze základních těles je znázorněn na následujícím obrázku (tělesa jsou na obrázku znázorněna tak, jak by byla ukládána na zkoušku pevnosti v ohybu).



Obr. 17 Schémata odřezávání ze základních těles.

Řezání těles bylo provedeno na kotoučové pile opatřené diamantovým řezným kotoučem pro řezání betonu. Při řezání byl kotouč chlazen vodou, takže zkušební tělesa byla po dokončení řezání mokrá, proto se musela před měřením umístit asi na 15 minut do sušárny.



Obr. 18 Řezání původního tělesa.



Obr. 19 Zkušební tělesa po prvním seříznutí.

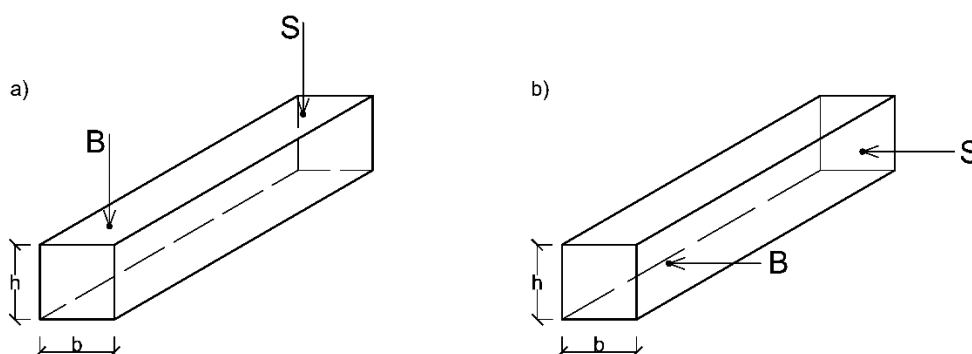
Tab. 14 Zkušební tělesa – experiment č. 2.

| OZN. | Druh | Šířka b [mm] | Výška h [mm] | Délka L [mm] | Počet |
|------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| A | základní | 100 | 100 | 400 | 6 |
| A-R1 | řez 1 | 85 | 100 | 400 | 6 |
| A-R2 | řez 2 | 70 | 100 | 400 | 6 |
| B | základní | 100 | 100 | 400 | 6 |
| B-R1 | řez 1 | 100 | 85 | 400 | 6 |
| B-R2 | řez 2 | 100 | 70 | 400 | 6 |

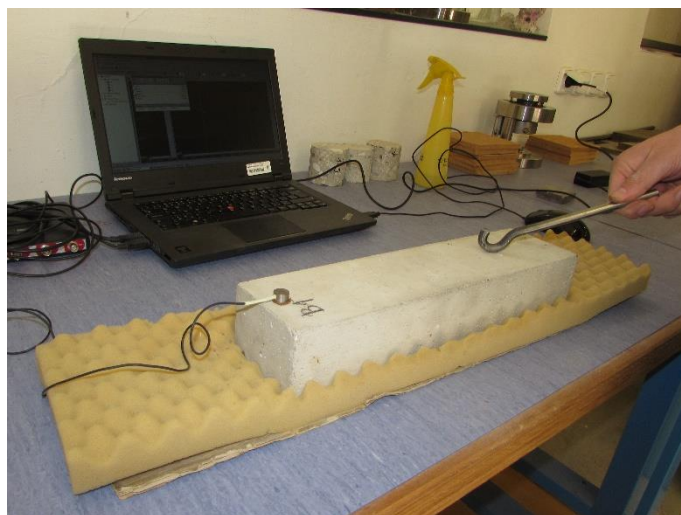
4.2.3 Průběh zkoušení

Cílem experimentu bylo ověřit vliv nepravidelného průřezu na dynamický modul pružnosti zjištěný z vlastní frekvence příčného kmitání, přesto však byly měřeny všechny tři vlastní frekvence. Především vlastní frekvence podélného kmitání byla určena pro porovnání výsledků z příčného kmitání (ty by měly podle normy [3] vycházet velmi podobné). Zkoušení bylo prováděno shodně jako v experimentu č. 1, tedy vnesením mechanického impulzu a zjištěním vlastní frekvence pomocí osciloskopu Handyscope HS4 a softwaru v počítači.

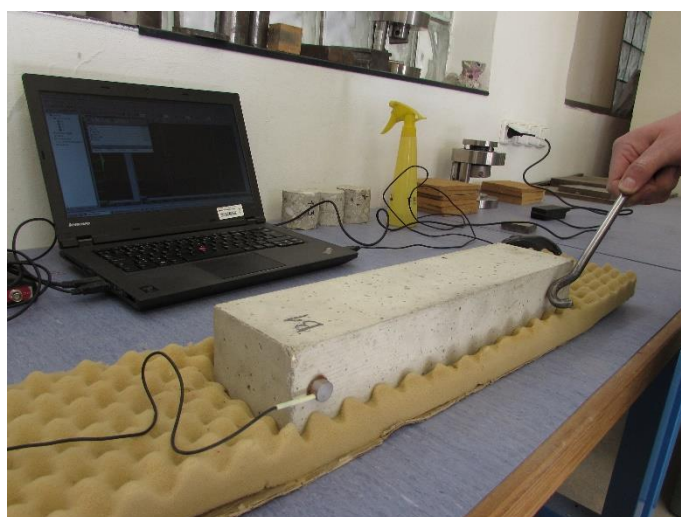
Zkušební tělesa byla uložena na podložku tak, jak by byla uložena na zkoušku pevnosti v ohybu. Vlastní frekvence získaná z příčného kmitání byla stanovena v obou směrech příčných řezů, tedy kolmo na výšku průřezu a rovnoběžně s výškou průřezu. Úder kovovým kladívkem byl tedy proveden při prvním měření shora a při druhém z boku. Vlastní frekvence příčného kmitání zkušební tělesa vyvolaná úderem shora byla označena f_{f1} a vlastní frekvence, která byla vyvolána úderem z boku f_{f2} . Uspořádání snímače a budiče při zkoušení podélného a torzního kmitání je shodné s uspořádáním popsáním v kapitole 4.1.3 této práce. Uspořádání při zkoušení příčného kmitání v obou směrech, tedy pro získání f_{f1} a f_{f2} je patrné z následujícího schématu a z obrázků 21 a 22.



Obr. 20 Uspořádání snímače a budiče pro získání a) f_{f1} , b) f_{f2} .



Obr. 21 Měření vlastního kmitočtu z příčného kmitání (úder shora).



Obr. 22 Měření vlastního kmitočtu z příčného kmitání (úder z boku).

Všechny vlastní frekvence byly stejně jako u experimentu č. 1 měřeny třikrát, přičemž do dalšího výpočtu vstupovala průměrná hodnota. V tabulce 15 jsou pro ukázkou zobrazeny naměřené hodnoty na sadě těles B-R2. Ostatní naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohové části této práce.

Tab. 15 Zkušební tělesa – experiment č. 2.

| OZN. | $\varnothing b$ [m] | $\varnothing h$ [m] | $\varnothing L$ [m] | ρ [kg/m ³] | $\varnothing f_l$ [kHz] | $\varnothing f_{f1}$ [kHz] | $\varnothing f_{f2}$ [kHz] | $\varnothing f_t$ [kHz] |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| B-R2-1 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2293 | 4,930 | 1,601 | 2,090 | 2,736 |
| B-R2-2 | 0,101 | 0,071 | 0,400 | 2301 | 4,832 | 1,587 | 2,084 | 2,684 |
| B-R2-3 | 0,100 | 0,071 | 0,400 | 2304 | 4,962 | 1,633 | 2,142 | 2,769 |
| B-R2-4 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2277 | 4,812 | 1,568 | 2,038 | 2,691 |
| B-R2-5 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2297 | 5,008 | 1,633 | 2,084 | 2,769 |
| B-R2-6 | 0,100 | 0,071 | 0,400 | 2306 | 4,949 | 1,620 | 2,110 | 2,756 |

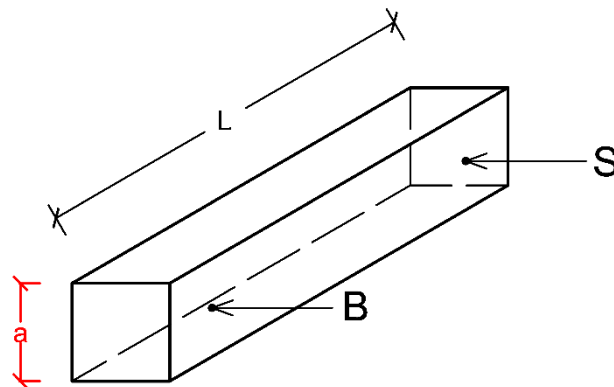
4.2.4 Zpracování, výsledky zkoušek a jejich diskuse

Jelikož je cílem zjistit, zda má vliv nepravidelnost průřezu tělesa na vyhodnocení zkoušky z příčného kmitání, byly vyhodnoceny moduly pružnosti z vlastní frekvence vyvolané úderem shora a moduly pružnosti z vlastní frekvence vyvolané úderem z boku. Byly také vyhodnoceny moduly pružnosti z podélného kmitání, které budou v tomto případě sloužit jako referenční hodnoty, ke kterým by se měl modul zjištěný z příčného kmitání přibližovat.

Modul pružnosti vyhodnocený z podélného kmitání E_{crL} byl vypočítán ze vztahu 6 stejně jako v experimentu č. 1. Pro výpočet modulu pružnosti z příčného kmitání zde ještě jednou připomenou vztah 7, ze kterého se modul pružnosti E_{crf} počítá [3]:

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

Význam všech vstupních veličin je vysvětlen v kapitole 3.4 části o rezonanční metodě. V této části se však zaměřím na důležitost poloměru setrvačnosti - i vstupujícího do výpočtu (ovlivní i součinitel c_1). V normě [3] je uvedeno, že se jedná o poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušebního tělesa k ose kolmé na rovinu kmitání, který se vypočte jako $a/\sqrt{12}$. Část o výpočtu modulu E_{crf} je také v normě doplněna následujícím obrázkem, na kterém je vyobrazen rozměr a při daném uspořádání budiče a snímače.



Obr. 23 Uspořádání budiče a snímače při zkoušce příčného kmitání [22].

Protože podle výpočtů respektujících rozměr a tak jak je zobrazen na předchozím obrázku (tedy při úderu z boku $a =$ výška tělesa, při úderu shora $a =$ šířka tělesa) nevycházely dobré výsledky, byly výpočty zopakovány a za rozměr a byla do vztahu dosazena při úderu z boku šířka tělesa a při úderu shora výška tělesa. Výsledky a jejich porovnání je zobrazeno v tabulkách a grafech v následující části práce.

V tabulce 16 jsou zobrazeny výsledky Poissonova čísla, modulu pružnosti ve smyku, modulu pružnosti v tahu/tlaku zjištěného z podélného kmitání a modulu pružnosti v tahu/tlaku zjištěného z příčného kmitání při dosazení rozměrů kolmých na směr úderu za rozměr a při výpočtu poloměru setrvačnosti. Za povšimnutí stojí zvětšující se rozdílnost modulů E_{crf1} a E_{crf2} při zmenšování jednoho z příčných rozměrů.

Tab. 16 Výsledky z experimentu 2 - 1.

| OZN. | ν_{cr} | E_{crL} [GPa] | G_{cr} [GPa] | E_{crf1} [GPa] | E_{crf2} [GPa] |
|------|------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| A | 0,22 | 35,7 | 14,6 | 35,8 | 34,7 |
| A-R1 | 0,21 | 35,1 | 14,5 | 43,5 | 27,6 |
| A-R2 | 0,21 | 34,9 | 14,4 | 58,5 | 20,3 |
| B | 0,23 | 36,7 | 14,9 | 35,9 | 36,2 |
| B-R1 | 0,21 | 35,7 | 14,7 | 28,2 | 43,5 |
| B-R2 | 0,22 | 35,4 | 14,5 | 20,5 | 58,8 |

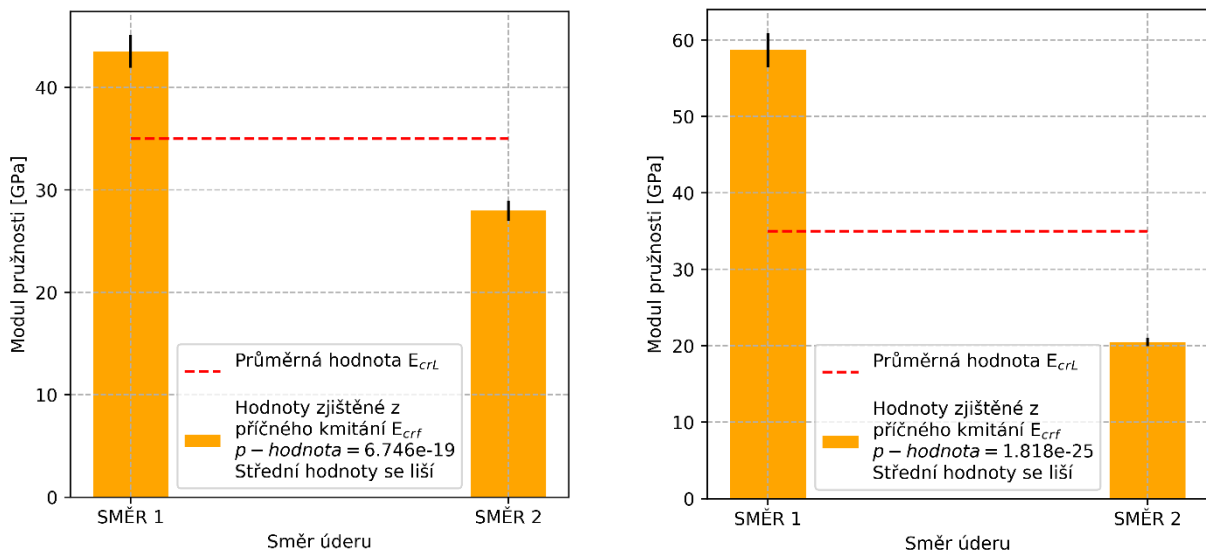
Tabulka 17 naopak zobrazuje výsledky při dosazení rozměrů rovnoběžných za rozměr a při výpočtu poloměru setrvačnosti. Oproti předchozí tabulce je při této variantě jasně vidět, že moduly pružnosti E_{crf1} a E_{crf2} vychází v podstatě totožně. V tabulkách 16 a 17 jsou zobrazeny průměrné výsledky z celé sady, podrobné výsledky na jednotlivých tělesech jsou uvedeny v přílohové části.

Tab. 17 Výsledky z experimentu 2 -2.

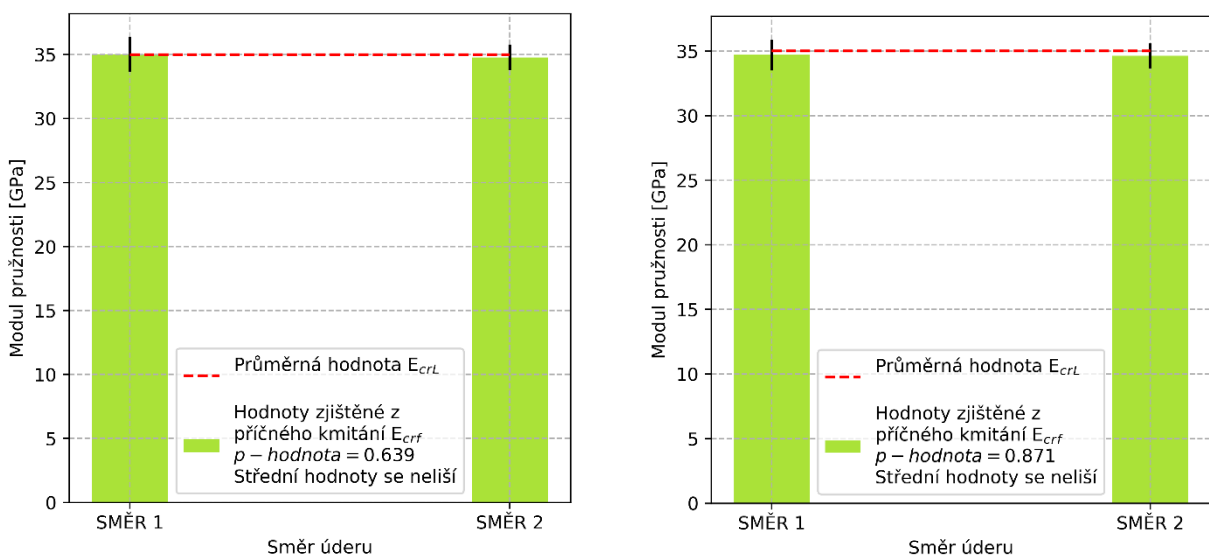
| OZN. | ν_{cr} | E_{crL} [GPa] | G_{cr} [GPa] | E_{crf1} [GPa] | E_{crf2} [GPa] |
|------|------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| A | 0,22 | 35,7 | 14,6 | 35,3 | 35,2 |
| A-R1 | 0,21 | 35,1 | 14,5 | 34,7 | 34,6 |
| A-R2 | 0,21 | 34,9 | 14,4 | 34,6 | 34,4 |
| B | 0,23 | 36,7 | 14,9 | 36,1 | 36,0 |
| B-R1 | 0,21 | 35,7 | 14,7 | 35,2 | 34,9 |
| B-R2 | 0,22 | 35,4 | 14,5 | 34,7 | 34,8 |

Výsledky byly také v obou případech podrobeny statistickému testu na rovnost středních hodnot. V případě, kdy byl za rozměr a dosazen rozměr kolmý na směr úderu vyšlo, že se střední hodnoty modulů E_{crf1} a E_{crf2} významně liší (s p-hodnotou daleko pod hladinou významnosti) a navíc se rozdíl mezi těmito hodnotami po druhém odříznutí ještě podstatně zvětšil (asi o dalších 25 %). V případě dosazení rozměru rovnoběžného se směrem úderu za rozměr a ukázal statistický test, že střední hodnoty se ani po prvním (p-hodnota = 0,639) ani po druhém seříznutí (p-hodnota = 0,871) statisticky významně neliší.

Na grafech 21 a 22 jsou graficky zobrazeny výsledky modulů E_{crf1} a E_{crf2} , je z nich patrné stejně jako z tabulek 16 a 17, že výsledky v případě dosazení rozměru kolmého na směr úderu vedou k hodnotám velice rozdílným. Také je z grafu patrné, že se hodnoty po druhém odříznutí ještě výrazněji oddálily. V obou grafech je čárkovanou čarou označena průměrná hodnota modulu E_{crL} , která byla brána jako hodnota referenční, protože podle normy [3] by měly být hodnoty dynamických modulů pružnosti zjištěných z podélného a příčného kmitání shodné (maximální rozdíl 10 %). To se v případě dosazení rovnoběžného rozměru při výpočtu poloměru setrvačnosti potvrdilo, hodnoty E_{crL} , E_{crf1} a E_{crf2} se v tomto případě statisticky výrazně neliší.



Graf 21 Výsledky po prvním a druhém seříznutí při dosazení rozměru kolmého na směr úderu.



Graf 22 Výsledky po prvním a druhém seříznutí při dosazení rozměru rovnoběžného na směr úderu.

5 ZÁVĚR

V rámci první části experimentů bylo rezonanční metodou zkoušeno 164 těles ze dvou druhů lehkých betonů. Účelem bylo stanovit vliv velikosti zkušebních těles na výsledné dynamické charakteristiky (především na modul pružnosti v tahu/tlaku) vyhodnocené podle ČSN 73 1372 [3].

Na základě naměřených a vyhodnocených výsledků není bohužel možné prokazatelně stanovit obecný vliv velikosti zkušebního tělesa na dynamický modul pružnosti, který by platil na všech tělesech. Z výsledků je však možné vyvodit několik vyplývajících závěrů. Prvním z nich je fakt, že tělesa získaná jádrovým vrtáním z těles podstatně větších objemů, vykazují vyšší modul pružnosti než původní tělesa. To bylo potvrzeno u obou zkoušených betonů (u LB1 o 8-16 % a u LB2 o 19-23 %). Druhým jevem, který bylo možné při měření pozorovat, byla skutečnost, že zde hraje velkou roli míra vyschnutí betonu. Protože tělesa větších rozměrů vysychají déle, objemová hmotnost válců získaných jádrovým vrtáním z těles velkých rozměrů je o něco vyšší, než objemová hmotnost těles vybetonovaných do formy. Objemová hmotnost přímo ovlivňuje výpočet modulů pružnosti – čím větší objemová hmotnost, tím větší modul pružnosti. Tuto skutečnost potvrzují výsledky na tělese V150/300 (které bylo betonováno do formy) a na tělese JV150/300 (které bylo získáno jádrovým vrtáním) - u V150/300 modul pružnosti o 23 % nižší než u JV150/300. S dobou vysychání zároveň souvisí skutečnost, že u malých těles, které vyschnou podstatně rychleji, dojde dříve k utlumení zráni betonu. U menších těles z toho důvodu vychází nižší modul pružnosti, než u těles větších (toto potvrzují výsledky na tělesech z forem u LB2).

Ve druhé části experimentů bylo rezonanční metodou zkoušeno několik těles z obyčejného betonu. Cílem bylo zjistit, zda nepravidelnost příčného rozměru tělesa ovlivňuje výsledný modul pružnosti v tahu/tlaku stanovený z příčného kmitání. Jako hlavní parametr se při výpočtu ukázal rozměr a (ten není s přihlédnutím na popis a obrázek v normě [3] úplně jasně definován), který vstupuje do výpočtu poloměru setrvačnosti. Bylo zjištěno, že dosazení rozměru kolmého (ke směru úderu kladívka při zkoušení) za rozměr a vede k naprosto rozdílným výsledkům modulu pružnosti v obou zkoušených směrech. Naopak při dosazení rozměru rovnoběžného (se směrem úderu kladívka při zkoušení) za rozměr a se ukázalo, že výsledky v obou směrech vychází téměř shodné i při zvětšujícím se rozdílu příčných rozměrů. Tyto výsledky vychází také velmi podobné modulu pružnosti zjištěnému z podélného kmitání, což značí jejich správnost.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [3] ČSN 73 1372: Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [4] CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. *Tzbinfo* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2014 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>.
- [5] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Vyd. 2. opr. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021425849.
- [6] ČSN EN 12390-1: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. 1. Praha: ÚNMH, 2013.
- [7] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6007-1.
- [8] NEVILLE, Adam M. a J. J. BROOKS. *Concrete technology*. 2nd ed. Harlow, England: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-273-73219-8.
- [9] ČSN EN 12620+A1 *Kamenivo do betonu*. 1. Praha: ČNI, 2008.
- [10] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *ZKUŠEBNICTVÍ A TECHNOLOGIE MODUL: BI02-MO1 TECHNOLOGIE BETONU, STAVEBNÍ KERAMIKA*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [11] ČSN EN 197-1 ED. 2 *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [12] NEVILLE, Adam M. *Properties of concrete*. 5th ed. New York: Pearson, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.

- [13] ŠMERDA, Zdeněk a Bohumír VÍTEK. *Konstrukční lehký beton*. Praha: SNTL, 1976. Typové číslo L17-B3-IV-41f/72059.
- [14] VETCHÝ, Jan. LEHKÉ BETONY A MALTY. In: *MCT* [online]. Praha: <https://www.mct.cz>, 2015 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/lehke-betony-a-malty/>
- [15] RIES, John. *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete* [online]. , 38 [cit. 2019- 05-17].Dostupné z:<http://www.uomisan.edu.iq/library/admin/book/68340626265.pdf>.
- [16] *Advanced concrete technology*. Editor John NEWMAN, editor Ban Seng CHOO. Amsterdam: Elsevier, 2003. ISBN 9780750651042.
- [17] *Liapor* [online]. Vintířov [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz>
- [18] Lytag Ltd. *Technical Manual - Section 1 Introduction to Lytag lightweight aggregate* [online]. In: London: Lytag, 2017, s. 7 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.aggregate.com/our-businesses/lytag/applications/lytacrete>
- [19] *Agloporit* [online]. Brno: Svoboda [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- [20] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-8076-032-2.
- [21] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [22] ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [23] ČSN EN 12390-6: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. 1. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [24] COSTA, Hugo, Pedro SANTOS a Eduardo JÚLIO. Bond Strength of Normal-to-Lightweight Concrete Interfaces. *Research Gate*[online]. 2011 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/268803630>.

- [25] BUNGEY, J. H., S. G. MILLARD a Mike GRANTHAM. *Testing of concrete in structures*. 4th ed. New York: Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-415-26301-8.
- [26] SOROKA, I. *Portland cement paste and concrete*. London: Macmillan, 1979. ISBN 0333242319.
- [27] Bc. Aleš Tichý Vliv velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti lehkých betonů. Brno, 2019. 85 s., 17 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
- [28] 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.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Schéma provedení zkoušky pevnosti v tahu ohybem [22]..... | 17 |
| Obr. 2 | Deformační diagramy obyčejného a lehkého betonu [1]..... | 19 |
| Obr. 3 | Porovnání modulů pružnosti obyčejného a lehkého betonu [15]. | 19 |
| Obr. 4 | Křivky závislosti podélné a příčné deformace při tlakovém zatížení [20]. | 20 |
| Obr. 5 | Polohy snímače a budiče, a) přímá, b) nepřímá, c) polopřímá (šikmá), d) polopřímá (boční). | 21 |
| Obr. 6 | Uspořádání snímače a budiče při zkoušce podélného kmitání [3]..... | 24 |
| Obr. 7 | Uspořádání snímače a budiče při zkoušce příčného kmitání [3]. | 25 |
| Obr. 8 | Uspořádání snímače a budiče při zkoušce torzního kmitání [3]. | 27 |
| Obr. 9 | Detail částečného vyschnutí vývrty z T300/900 (LB1). | 29 |
| Obr. 10 | Základní tělesa z LB1..... | 30 |
| Obr. 11 | Zkušební tělesa – jádrové vývrty průměrů 50, 75, 100 a 150 mm (LB1)..... | 30 |
| Obr. 12 | Získávání zkušebních těles jádrovým vrtáním (LB2)..... | 32 |
| Obr. 13 | Identifikace zkušebních těles. | 33 |
| Obr. 14 | Měření rozměrů zkušebních těles..... | 33 |
| Obr. 15 | Měření vlastní frekvence podélného kmitání na tělese T100/400. | 34 |
| Obr. 16 | Měření vlastní frekvence torzního kmitání na tělese T100/400..... | 35 |
| Obr. 17 | Schémata odřezávání ze základních těles..... | 51 |
| Obr. 18 | Řezání původního tělesa. | 52 |
| Obr. 19 | Zkušební tělesa po prvním seříznutí..... | 52 |
| Obr. 20 | Uspořádání snímače a budiče pro získání a) f_{f1} , b) f_{f2} | 53 |
| Obr. 21 | Měření vlastního kmitočtu z příčného kmitání (úder shora)..... | 54 |
| Obr. 22 | Měření vlastního kmitočtu z příčného kmitání (úder zboku). | 54 |
| Obr. 23 | Uspořádání budiče a snímače při zkoušce příčného kmitání [22]. | 55 |

8 SEZNAM GRAFŮ

| | | |
|---------|--|----|
| Graf 1 | Průběh podélného kmitání na tělese T100/400. | 34 |
| Graf 2 | Průběh příčného kmitání na tělese T100/400..... | 35 |
| Graf 3 | Průběh torzního kmitání na tělese ve tvaru hranolu (T100/400). | 36 |
| Graf 4 | Průběh příčného a torzního kmitání na tělese ve tvaru válce (JV100/300). | 36 |
| Graf 5 | Výsledky modulu pružnosti v tahu/tlaku na všech tělesech z LB1..... | 41 |
| Graf 6 | Výsledky modulu pružnosti v tahu/tlaku na všech tělesech z LB2..... | 41 |
| Graf 7 | Porovnání výsledků trámů z LB1 betonovaných do formy. | 42 |
| Graf 8 | Porovnání výsledků tělesa T300/900 a všech jádrových vývrtů z něj (LB1) | 43 |
| Graf 9 | Porovnání výsledků tělesa V150/300 a JV150/300 (LB1)..... | 44 |
| Graf 10 | Porovnání výsledků těles betonovaných do formy (LB1)..... | 44 |
| Graf 11 | Porovnání výsledků JV50/300 a těles nařezaných z něj (LB1)..... | 45 |
| Graf 12 | Porovnání výsledků těles z forem (LB2)..... | 46 |
| Graf 13 | Porovnání výsledků tělesa vybetonovaného do plastové nádoby a vývrtů z něj (LB2)..... | 47 |
| Graf 14 | Porovnání výsledků tělesa T150/600 a všech těles, které z něj byly nařezány (LB2)..... | 47 |
| Graf 15 | Porovnání výsledků těles T40/160, JV50/175 a T50/200 (LB2)..... | 48 |
| Graf 16 | T50/100 vs. JV50/95 (LB2)..... | 49 |
| Graf 17 | T50/200 vs. JV50/175 (LB2)..... | 49 |
| Graf 18 | T50/300 vs. JV50/270 (LB2)..... | 49 |
| Graf 19 | Hranoly z forem se štíhlostí 1:4 (LB2) | 50 |
| Graf 20 | Závislost hranolů z forem se štíhlostí 1:4 na délce tělesa (LB2)..... | 50 |
| Graf 21 | Výsledky po prvním a druhém seříznutí při dosazení rozměru kolmého na směr úderu. | 57 |
| Graf 22 | Výsledky po prvním a druhém seříznutí při dosazení rozměru rovnoběžného na směr úderu..... | 57 |

9 SEZNAM TABULEK

| | | |
|---------|---|----|
| Tab. 1 | Kamenivo keramzit vhodné k výrobě konstrukčních lehkých betonů [14]..... | 15 |
| Tab. 2 | Kamenivo agloporit vhodné k výrobě konstrukčních lehkých betonů [18, 19]... | 15 |
| Tab. 3 | Očekávané poměry podélného, příčného a torzního kmitání hranolů [3]. | 23 |
| Tab. 4 | Stanovení korekčního součinitele c_1 [3]. | 26 |
| Tab. 5 | Receptura čerstvého betonu LB1 [28]..... | 29 |
| Tab. 6 | Zkušební tělesa z LB1..... | 30 |
| Tab. 7 | Receptura čerstvého betonu LB2 [27]..... | 31 |
| Tab. 8 | Zkušební tělesa z LB2..... | 32 |
| Tab. 9 | Naměřené hodnoty – vybrané jádrové vývrty z T300/900 – LB1..... | 37 |
| Tab. 10 | Naměřené hodnoty – vybrané jádrové vývrty – LB2. | 37 |
| Tab. 11 | Naměřené poměry vlastních kmitočtů hranolů se štíhlostí 1:4..... | 38 |
| Tab. 12 | Výsledné hodnoty modulů pružnosti E_{crL} , E_{crf} , G_{cr} v GPa pro tělesa z LB1. | 39 |
| Tab. 13 | Výsledné hodnoty modulů pružnosti E_{crL} , E_{crf} , G_{cr} v GPa pro tělesa z LB2. | 40 |
| Tab. 14 | Zkušební tělesa – experiment č. 2..... | 53 |
| Tab. 15 | Zkušební tělesa – experiment č. 2..... | 54 |
| Tab. 16 | Výsledky z experimentu 2 – 1..... | 56 |
| Tab. 17 | Výsledky z experimentu 2 -2. | 56 |

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

σ_c – tlakové napětí

σ_t – tahové napětí

σ_f – ohybové napětí

f_c – tlaková pevnost

f_t – pevnost v tahu

f_f – pevnost v tahu za ohybu

f_{cu} – krychelná pevnost

f_{cyl} – válcová pevnost

F_{max} – maximální zatížení

A – zatěžovaná plocha

d_1, d_2 – rozměry příčného řezu tělesa

L – délka tělesa

w – vodní součinitel

c – množství cementu v čerstvém betonu

UZ – ultrazvuk

LB – lehký beton

v_L – rychlost šíření UZ vln

T – čas průchodu ultrazvuku

E_{cu} – dynamický modul pružnosti z ultrazvuku

ρ - objemová hmotnost

f_L – podélné kmitání

f_f – příčné kmitání

f_t – torzní kmitání

B – budič

S – snímač

E_{crL} – modul pružnosti v tahu/tlaku z podélného kmitání

E_{crf} – modul pružnosti v tahu/tlaku z příčného kmitání

c_1 – korekční součinitel zahrnující vliv smyku a setrvačných momentů

i – poloměr setrvačnosti příčného řezu

χ – součinitel závislý na průřezu tělesa

a – parametr pro vlastní kmitočet

ν – Poissonovo číslo

k – korekční součinitel charakterizující tvar příčného řezu

b – šířka tělesa

h – výška tělesa

JV – jádrový vývrt

G_{cr} – modul pružnosti ve smyku

T – tělesa získané z T300/900

D – tělesa získané z dlaždic

f_{f1} – vlastní frekvence příčného kmitání při úderu shora

f_{f2} – vlastní frekvence příčného kmitání při úderu z boku

E_{crf1} – modul pružnosti vypočtený z f_{f1}

E_{crf2} – modul pružnosti vypočtený z f_{f2}

11 PŘÍLOHY

V přílohách se nacházejí obrázky podrobněji mapující proces měření, tabulky se všemi naměřenými hodnotami a grafy, které nebyly použity v kapitole 4.



Obr. P1 *Výroba těles LB1 dne 26. 5. 2017.
U betonáže jsem nebyl přítomen, foto poskytl vedoucí práce*



Obr. P2 *Výroba těles LB1 dne 26. 5. 2017.
U betonáže jsem nebyl přítomen, foto poskytl vedoucí práce*



Obr. P3 *Průběh jádrového vrtání na LB1 – vývrt z dlaždice.*



Obr. P4 *Průběh jádrového vrtání na LB1 – vývrt z T300/900.*



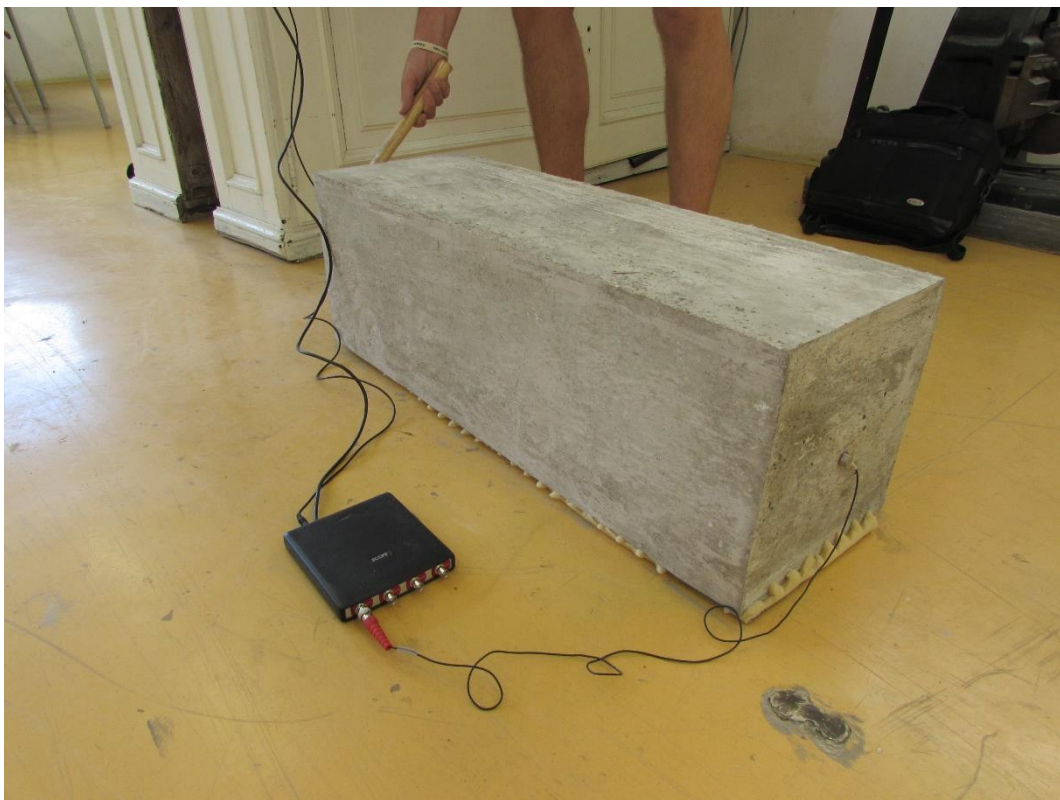
Obr. P5 Těleso T300/900 a vývrty z něj (LB1).



Obr. P6 Vývrty z dlaždic (LB1)



Obr. P7 *Vážení těles (LB1)*



Obr. P8 *Měření podélného kmitání na tělese T300/900 (LB1).*

Tab. P1 Naměřené hodnoty na všech válcích z LB1 – část 1.

| TĚLESO | Ød [m] | ØL[m] | m [kg] | V[m3] | ρ[kg/m3] | Øf _l [kHz] | Øf _r [kHz] | Øf _t [kHz] |
|-------------|--------|-------|--------|---------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| V150/300-1 | 0,149 | 0,300 | 8,121 | 0,00523 | 1552 | 4,902 | 2,798 | 3,022 |
| V150/300-2 | 0,149 | 0,299 | 8,174 | 0,00523 | 1563 | 4,859 | 2,834 | 3,051 |
| V150/300-3 | 0,149 | 0,300 | 8,164 | 0,00526 | 1553 | 4,971 | 2,909 | 3,117 |
| V150/300-4 | 0,149 | 0,299 | 8,109 | 0,00524 | 1549 | 4,911 | 2,827 | 3,085 |
| V150/300-5 | 0,149 | 0,299 | 8,171 | 0,00523 | 1561 | 4,888 | 2,811 | 3,061 |
| V150/300-6 | 0,149 | 0,299 | 8,168 | 0,00524 | 1559 | 5,008 | 2,893 | 3,133 |
| V150/300-7 | 0,149 | 0,300 | 8,109 | 0,00525 | 1546 | 5,005 | 2,899 | 3,133 |
| JV50/300-1 | 0,050 | 0,292 | 0,930 | 0,00058 | 1607 | 5,568 | 1,599 | 3,995 |
| JV50/300-2 | 0,051 | 0,290 | 0,927 | 0,00060 | 1545 | 5,637 | 1,612 | 4,013 |
| JV50/300-3 | 0,051 | 0,291 | 0,924 | 0,00060 | 1535 | 5,564 | 1,610 | 3,955 |
| JV50/300-4 | 0,051 | 0,291 | 0,928 | 0,00060 | 1552 | 5,424 | 1,454 | 3,707 |
| JV50/300-5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| JV50/300-6 | 0,051 | 0,276 | 0,882 | 0,00057 | 1552 | 5,787 | 1,619 | 3,716 |
| JV50/300-7 | 0,051 | 0,287 | 0,963 | 0,00059 | 1624 | 5,832 | 1,656 | 4,077 |
| JV50/300-8 | 0,051 | 0,287 | 0,945 | 0,00059 | 1588 | 5,132 | 1,531 | 4,032 |
| JV75/300-1 | 0,074 | 0,303 | 2,034 | 0,00131 | 1554 | 5,394 | 2,003 | 3,423 |
| JV75/300-2 | 0,074 | 0,302 | 2,044 | 0,00130 | 1568 | 5,449 | 2,043 | 3,465 |
| JV75/300-3 | 0,074 | 0,303 | 2,001 | 0,00130 | 1536 | 5,197 | 1,932 | 3,360 |
| JV75/300-4 | 0,074 | 0,298 | 2,102 | 0,00128 | 1638 | 5,676 | 2,161 | 3,582 |
| JV75/300-5 | 0,074 | 0,298 | 2,108 | 0,00129 | 1639 | 5,610 | 2,076 | 3,586 |
| JV75/300-6 | 0,074 | 0,299 | 2,047 | 0,00129 | 1591 | 5,636 | 2,106 | 3,581 |
| JV100/300-1 | 0,103 | 0,302 | 3,921 | 0,00253 | 1550 | 5,411 | 2,595 | 3,441 |
| JV100/300-2 | 0,103 | 0,301 | 3,850 | 0,00253 | 1520 | 5,366 | 2,566 | 3,411 |
| JV100/300-3 | 0,103 | 0,300 | 3,987 | 0,00252 | 1581 | 5,425 | 2,656 | 3,509 |
| JV100/300-4 | 0,104 | 0,299 | 4,078 | 0,00252 | 1618 | 5,490 | 2,676 | 3,499 |
| JV100/300-5 | 0,103 | 0,299 | 3,962 | 0,00251 | 1578 | 5,460 | 2,645 | 3,481 |
| JV100/300-6 | 0,103 | 0,298 | 4,071 | 0,00251 | 1625 | 5,452 | 2,637 | 3,481 |
| JV150/300-1 | 0,144 | 0,299 | 7,823 | 0,00485 | 1614 | 5,536 | 3,280 | 3,528 |
| JV150/300-2 | 0,143 | 0,299 | 7,680 | 0,00483 | 1592 | 5,469 | 3,253 | 3,500 |
| JV150/300-3 | 0,144 | 0,299 | 7,945 | 0,00484 | 1641 | 5,628 | 3,322 | 3,577 |
| JV150/300-4 | 0,143 | 0,299 | 7,711 | 0,00481 | 1602 | 5,492 | 3,252 | 3,512 |
| JV150/300-5 | 0,143 | 0,299 | 7,965 | 0,00481 | 1656 | 5,618 | 3,300 | 3,576 |
| JV150/300-6 | 0,143 | 0,300 | 7,752 | 0,00484 | 1602 | 5,499 | 3,251 | 3,485 |
| JV50/150-1 | 0,051 | 0,150 | 0,479 | 0,00031 | 1545 | 10,149 | 4,955 | 6,281 |
| JV50/150-2 | 0,051 | 0,150 | 0,473 | 0,00031 | 1530 | 9,941 | 4,423 | 6,138 |
| JV50/150-3 | 0,051 | 0,150 | 0,483 | 0,00031 | 1565 | 10,148 | 4,692 | 6,505 |
| JV50/150-4 | 0,051 | 0,150 | 0,473 | 0,00031 | 1530 | 9,735 | 4,573 | 6,283 |
| JV50/150-7 | 0,051 | 0,151 | 0,495 | 0,00031 | 1594 | 10,066 | 4,631 | 6,170 |
| JV50/150-8 | 0,051 | 0,150 | 0,493 | 0,00031 | 1592 | 10,160 | 4,754 | 6,181 |

Tab. P2 Naměřené hodnoty na všech válcích z LB1 – část 2.

| TĚLESO | Ød [m] | ØL[m] | m [kg] | V[m3] | ρ[kg/m3] | Øf _L [kHz] | Øf _r [kHz] | Øf _t [kHz] |
|------------|--------|-------|--------|---------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| JV50/150-8 | 0,051 | 0,150 | 0,493 | 0,00031 | 1592 | 10,160 | 4,754 | 6,181 |
| JV50/120-1 | 0,051 | 0,121 | 0,380 | 0,00025 | 1523 | 12,675 | 6,541 | 6,969 |
| JV50/120-2 | 0,051 | 0,121 | 0,389 | 0,00025 | 1562 | 12,631 | 6,654 | 6,916 |
| JV50/120-3 | 0,051 | 0,121 | 0,384 | 0,00025 | 1548 | 10,446 | 5,300 | 6,100 |
| JV50/120-4 | 0,051 | 0,121 | 0,388 | 0,00025 | 1556 | 10,471 | 5,370 | 5,733 |
| JV50/120-7 | 0,051 | 0,122 | 0,403 | 0,00025 | 1614 | 12,852 | 7,020 | 8,237 |
| JV50/120-8 | 0,051 | 0,121 | 0,392 | 0,00025 | 1576 | 12,241 | 6,451 | 6,815 |
| JV50/80-1 | 0,051 | 0,081 | 0,256 | 0,00016 | 1554 | 18,583 | 12,033 | 12,639 |
| JV50/80-2 | 0,051 | 0,080 | 0,260 | 0,00017 | 1574 | 19,115 | 12,315 | 13,254 |
| JV50/80-3 | 0,051 | 0,082 | 0,271 | 0,00017 | 1612 | 19,141 | 12,046 | 12,909 |
| JV50/80-4 | 0,051 | 0,081 | 0,251 | 0,00017 | 1498 | 18,053 | 11,030 | 11,729 |

Tab. P3 Naměřené hodnoty na všech hranolech z LB1.

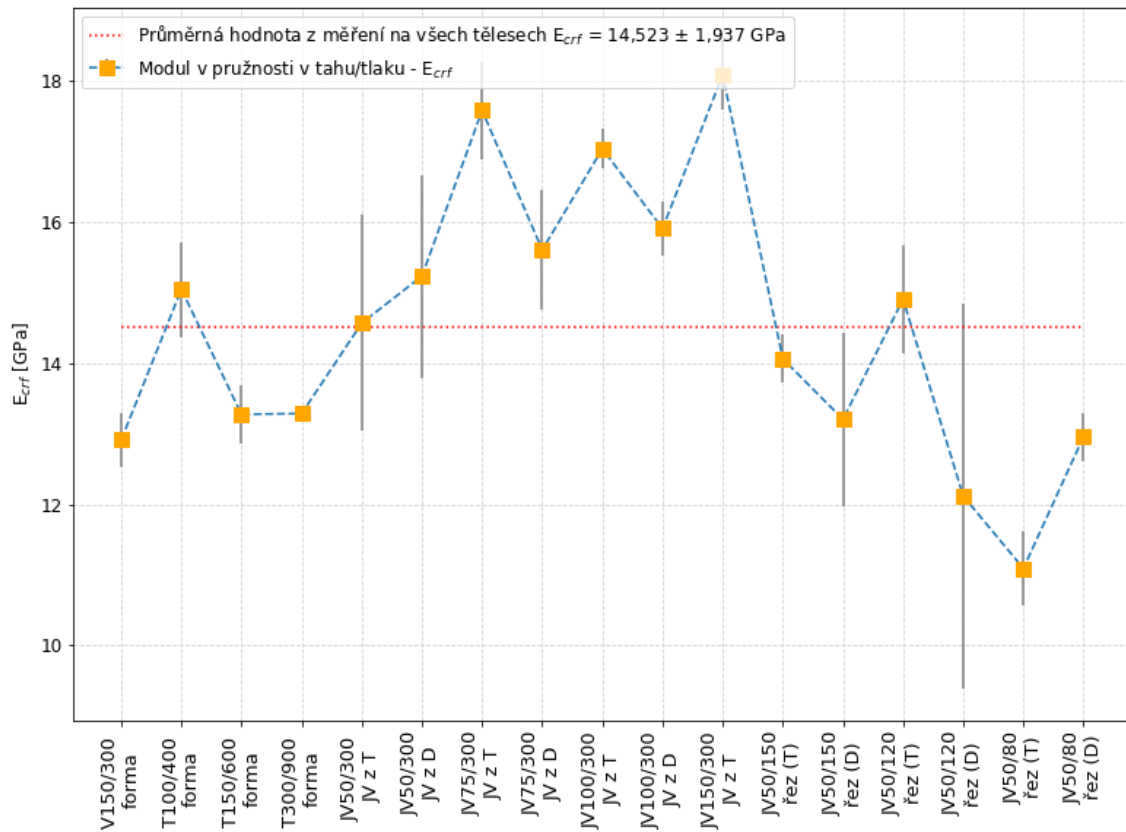
| TĚLESO | Øb[m] | Øh[m] | ØL[m] | m [kg] | ρ[kg/m3] | Øf _L [kHz] | Øf _r [kHz] | Øf _t [kHz] |
|------------|-------|-------|-------|---------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T100/400-1 | 0,104 | 0,100 | 0,399 | 6,392 | 1542 | 4,010 | 1,616 | 2,308 |
| T100/400-2 | 0,102 | 0,100 | 0,400 | 6,386 | 1553 | 4,040 | 1,672 | 2,360 |
| T100/400-3 | 0,103 | 0,100 | 0,400 | 6,409 | 1553 | 4,029 | 1,667 | 2,333 |
| T100/400-4 | 0,103 | 0,100 | 0,399 | 6,400 | 1552 | 4,061 | 1,683 | 2,365 |
| T100/400-5 | 0,102 | 0,100 | 0,400 | 6,422 | 1578 | 4,103 | 1,717 | 2,395 |
| T100/400-6 | 0,101 | 0,100 | 0,400 | 6,314 | 1557 | 4,043 | 1,677 | 2,347 |
| T100/400-7 | 0,102 | 0,100 | 0,400 | 6,438 | 1576 | 4,103 | 1,707 | 2,376 |
| T100/400-8 | 0,102 | 0,100 | 0,400 | 6,422 | 1574 | 4,088 | 1,691 | 2,381 |
| T150/600-1 | 0,152 | 0,151 | 0,603 | 21,446 | 1553 | 2,536 | 1,027 | 1,487 |
| T150/600-2 | 0,152 | 0,151 | 0,604 | 21,363 | 1550 | 2,549 | 1,037 | 1,507 |
| T150/600-3 | 0,152 | 0,151 | 0,603 | 21,824 | 1578 | 2,621 | 1,059 | 1,543 |
| T300/900 | 0,304 | 0,300 | 0,902 | 130,632 | 1586 | 1,701 | 0,834 | 0,997 |

Tab. P4 Vypočítané hodnoty na LB1 – část 1.

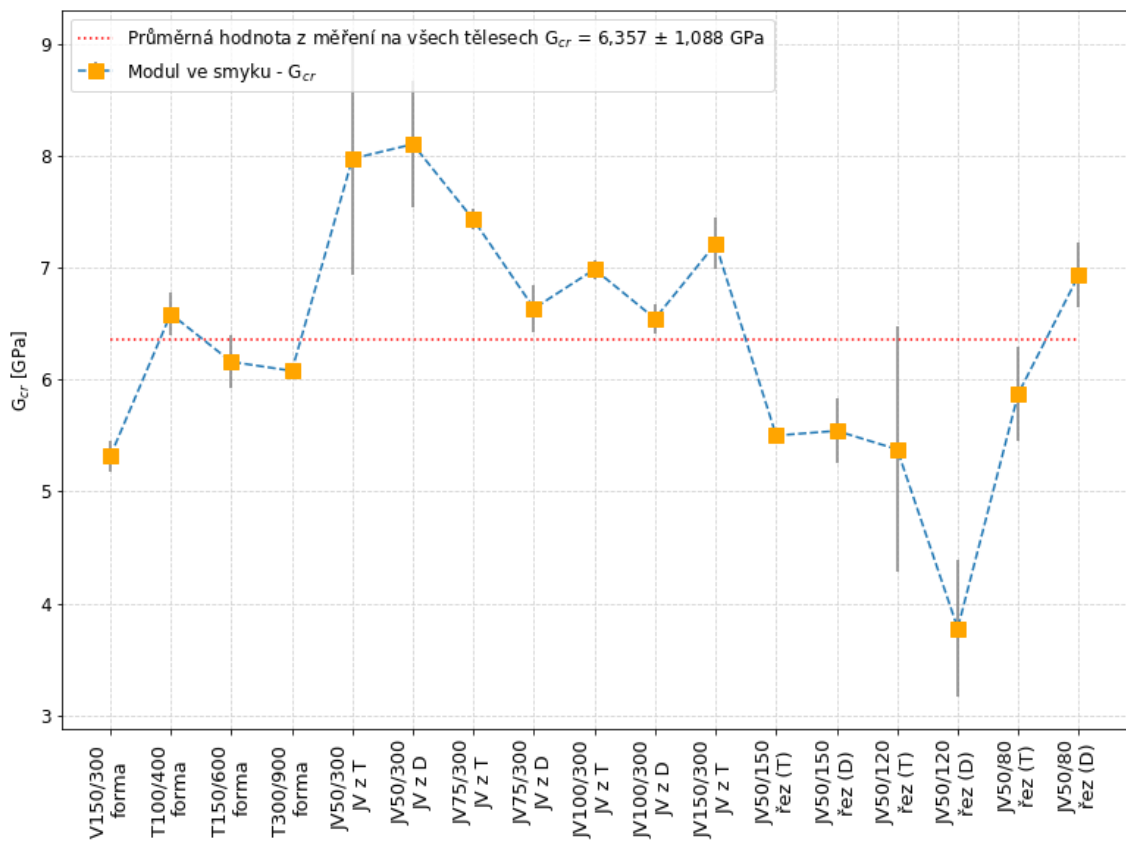
| TĚLESO | TYP | Z ČEHO | ŠTÍHLOST | E_{crL} [Gpa] | G_{cr} [Gpa] | E_{crf} [Gpa] |
|----------------|-------|-----------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| V 150/300 - 1 | forma | - | 2,01 | 13,38 | 5,09 | 12,55 |
| V 150/300 - 2 | forma | - | 2,00 | 13,20 | 5,20 | 12,70 |
| V 150/300 - 3 | forma | - | 2,01 | 13,85 | 5,44 | 13,48 |
| V 150/300 - 4 | forma | - | 2,01 | 13,38 | 5,28 | 12,54 |
| V 150/300 - 5 | forma | - | 2,01 | 13,37 | 5,24 | 12,54 |
| V 150/300 - 6 | forma | - | 2,01 | 14,03 | 5,49 | 13,30 |
| V 150/300 - 7 | forma | - | 2,01 | 13,92 | 5,46 | 13,27 |
| T 100/400 - 1 | forma | - | 3,99 | 15,83 | 6,23 | 13,67 |
| T 100/400 - 2 | forma | - | 3,98 | 16,23 | 6,57 | 14,81 |
| T 100/400 - 3 | forma | - | 3,99 | 16,14 | 6,43 | 14,72 |
| T 100/400 - 4 | forma | - | 3,99 | 16,35 | 6,59 | 14,89 |
| T 100/400 - 5 | forma | - | 4,00 | 17,00 | 6,87 | 15,97 |
| T 100/400 - 6 | forma | - | 3,99 | 16,28 | 6,50 | 15,11 |
| T 100/400 - 7 | forma | - | 4,00 | 16,98 | 6,76 | 15,78 |
| T 100/400 - 8 | forma | - | 4,00 | 16,83 | 6,78 | 15,43 |
| T 150/600 - 1 | forma | - | 4,00 | 14,54 | 5,93 | 12,87 |
| T 150/600 - 2 | forma | - | 4,01 | 14,69 | 6,08 | 13,10 |
| T 150/600 - 3 | forma | - | 4,00 | 15,78 | 6,48 | 13,86 |
| T 300/900 | forma | - | 3,01 | 14,94 | 6,08 | 13,29 |
| JV 50/300 - 1 | JV | dlaždice | 5,82 | 17,00 | 8,75 | 16,97 |
| JV 50/300 - 2 | JV | dlaždice | 5,64 | 16,47 | 8,35 | 15,45 |
| JV 50/300 - 3 | JV | dlaždice | 5,66 | 16,07 | 8,12 | 15,54 |
| JV 50/300 - 4 | JV | dlaždice | 5,68 | 15,43 | 7,21 | 12,98 |
| JV 50/300 - 6 | JV | T 300/900 | 5,39 | 15,83 | 6,53 | 13,41 |
| JV 50/300 - 7 | JV | T 300/900 | 5,60 | 18,24 | 8,91 | 16,73 |
| JV 50/300 - 8 | JV | T 300/900 | 5,58 | 13,76 | 8,49 | 13,57 |
| JV 75/300 - 1 | JV | dlaždice | 4,09 | 16,63 | 6,70 | 15,92 |
| JV 75/300 - 2 | JV | dlaždice | 4,07 | 16,98 | 6,87 | 16,44 |
| JV 75/300 - 3 | JV | dlaždice | 4,09 | 15,20 | 6,35 | 14,46 |
| JV 75/300 - 4 | JV | T 300/900 | 4,03 | 18,81 | 7,49 | 18,56 |
| JV 75/300 - 5 | JV | T 300/900 | 4,03 | 18,37 | 7,51 | 16,98 |
| JV 75/300 - 6 | JV | T 300/900 | 4,04 | 18,09 | 7,30 | 17,20 |
| JV 100/300 - 1 | JV | dlaždice | 2,92 | 16,51 | 6,68 | 16,29 |
| JV 100/300 - 2 | JV | dlaždice | 2,91 | 15,88 | 6,42 | 15,53 |
| JV 100/300 - 3 | JV | T 300/900 | 2,90 | 16,73 | 7,00 | 16,87 |
| JV 100/300 - 4 | JV | T 300/900 | 2,89 | 17,45 | 7,09 | 17,51 |
| JV 100/300 - 5 | JV | T 300/900 | 2,90 | 16,87 | 6,86 | 16,80 |
| JV 100/300 - 6 | JV | T 300/900 | 2,89 | 17,19 | 7,01 | 16,96 |
| JV 150/300 - 1 | JV | T 300/900 | 2,08 | 17,70 | 7,19 | 18,04 |
| JV 150/300 - 2 | JV | T 300/900 | 2,09 | 17,05 | 6,98 | 17,50 |
| JV 150/300 - 3 | JV | T 300/900 | 2,08 | 18,57 | 7,50 | 18,80 |
| JV 150/300 - 4 | JV | T 300/900 | 2,09 | 17,33 | 7,09 | 17,68 |
| JV 150/300 - 5 | JV | T 300/900 | 2,08 | 18,64 | 7,55 | 18,70 |
| JV 150/300 - 6 | JV | T 300/900 | 2,09 | 17,40 | 6,99 | 17,78 |

Tab. P5 Vypočítané hodnoty na LB1 – část 2.

| TĚLESO | TYP | Z ČEHO | ŠTÍHLOST | E_{crL} [Gpa] | G_{cr} [Gpa] | E_{crf} [Gpa] |
|---------------|-----|---------------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| JV 50/150 - 1 | řez | JV 50/300 - 1 | 2,94 | 14,56 | 5,52 | 15,09 |
| JV 50/150 - 2 | řez | JV 50/300 - 2 | 2,93 | 13,77 | 5,20 | 11,85 |
| JV 50/150 - 3 | řez | JV 50/300 - 3 | 2,94 | 14,74 | 6,00 | 13,48 |
| JV 50/150 - 4 | řez | JV 50/300 - 4 | 2,94 | 13,24 | 5,46 | 12,40 |
| JV 50/150 - 7 | řez | JV 50/300 - 7 | 2,94 | 14,80 | 5,51 | 13,72 |
| JV 50/150 - 8 | řez | JV 50/300 - 8 | 2,93 | 15,00 | 5,50 | 14,40 |
| JV 50/120 - 1 | řez | JV 50/300 - 1 | 2,37 | 14,59 | 4,35 | 14,33 |
| JV 50/120 - 2 | řez | JV 50/300 - 2 | 2,37 | 14,86 | 4,39 | 15,27 |
| JV 50/120 - 3 | řez | JV 50/300 - 3 | 2,36 | 9,97 | 3,35 | 8,96 |
| JV 50/120 - 4 | řez | JV 50/300 - 4 | 2,37 | 10,18 | 3,01 | 9,91 |
| JV 50/120 - 7 | řez | JV 50/300 - 7 | 2,38 | 15,99 | 6,48 | 15,67 |
| JV 50/120 - 8 | řez | JV 50/300 - 8 | 2,36 | 14,00 | 4,28 | 14,15 |
| JV 50/80 - 5A | řez | JV 50/300 - 5 | 1,59 | 14,54 | 6,53 | 12,67 |
| JV 50/80 - 5B | řez | JV 50/300 - 5 | 1,57 | 15,28 | 7,13 | 12,78 |
| JV 50/80 - 5C | řez | JV 50/300 - 5 | 1,59 | 16,20 | 7,15 | 13,43 |
| JV 50/80 - 6A | řez | JV 50/300 - 6 | 1,58 | 13,26 | 5,43 | 10,70 |
| JV 50/80 - 6B | řez | JV 50/300 - 6 | 1,59 | 13,45 | 5,76 | 10,74 |
| JV 50/80 - 6C | řez | JV 50/300 - 6 | 1,57 | 13,50 | 6,44 | 11,84 |



GrafP1 Hodnoty modulu E_{crf} na všech tělesech LB1.



GrafP2 Hodnoty modulu pružnosti ve smyku G_{cr} na všech tělesech LB1.



Obr. P9 Výroba těles LB2 dne 17. 4. 2018.
U betonáže jsem nebyl přítomen, foto poskytl vedoucí práce



Obr. P10 Zkušební tělesa z LB2.



Obr. P11 *Zkušební těleso vybetonované do plastové nádoby (LB2)*



Obr. P12 *Jádrové vývrty a původní těleso (LB2).*

Tab. P6 Hodnoty naměřené na všech válcích z LB2.

| TĚLESO | Ød [m] | ØL[m] | m [kg] | V[m3] | ρ[kg/m3] | Ø _L [kHz] | Ø _f [kHz] | Ø _f [kHz] |
|-------------|--------|-------|--------|---------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| V150/300-1 | 0,149 | 0,301 | 9,313 | 0,00526 | 1769 | 5,616 | 3,320 | 3,526 |
| V150/300-2 | 0,149 | 0,302 | 9,502 | 0,00525 | 1810 | 5,705 | 3,472 | 3,572 |
| V150/300-3 | 0,149 | 0,300 | 9,395 | 0,00526 | 1785 | 5,654 | 3,343 | 3,538 |
| V150/300-4 | 0,149 | 0,303 | 9,390 | 0,00528 | 1778 | 5,702 | 3,354 | 3,570 |
| V150/300-5 | 0,149 | 0,302 | 9,521 | 0,00527 | 1808 | 5,735 | 3,386 | 3,588 |
| V150/300-6 | 0,149 | 0,298 | 9,354 | 0,00523 | 1789 | 5,765 | 3,418 | 3,652 |
| V150/300-7 | 0,149 | 0,300 | 9,293 | 0,00524 | 1774 | 5,751 | 3,415 | 3,608 |
| JV50/270-1 | 0,050 | 0,272 | 0,985 | 0,00054 | 1811 | 6,555 | 1,958 | 3,934 |
| JV50/270-2 | 0,051 | 0,269 | 1,001 | 0,00055 | 1829 | 6,431 | 1,967 | 4,181 |
| JV50/270-3 | 0,051 | 0,271 | 0,999 | 0,00055 | 1809 | 6,460 | 1,945 | 4,150 |
| JV50/270-4 | 0,051 | 0,272 | 1,004 | 0,00056 | 1802 | 6,591 | 1,952 | 4,037 |
| JV50/270-5 | 0,051 | 0,268 | 1,006 | 0,00055 | 1822 | 6,750 | 2,062 | 4,111 |
| JV50/270-6 | 0,051 | 0,273 | 1,024 | 0,00055 | 1860 | 6,487 | 1,951 | 4,066 |
| JV75/270-1 | 0,074 | 0,268 | 2,108 | 0,00115 | 1830 | 6,714 | 2,780 | 4,260 |
| JV75/270-2 | 0,074 | 0,271 | 2,104 | 0,00116 | 1806 | 6,630 | 2,618 | 4,124 |
| JV75/270-3 | 0,074 | 0,272 | 2,128 | 0,00117 | 1820 | 6,674 | 2,743 | 4,211 |
| JV75/270-4 | 0,074 | 0,267 | 2,094 | 0,00115 | 1820 | 6,796 | 2,805 | 4,256 |
| JV75/270-5 | 0,074 | 0,272 | 2,127 | 0,00117 | 1820 | 6,646 | 2,714 | 4,148 |
| JV75/270-6 | 0,074 | 0,272 | 2,134 | 0,00117 | 1824 | 6,681 | 2,715 | 4,139 |
| JV100/270-1 | 0,103 | 0,272 | 4,143 | 0,00229 | 1813 | 6,715 | 3,481 | 4,223 |
| JV100/270-2 | 0,103 | 0,269 | 4,164 | 0,00226 | 1840 | 6,719 | 3,501 | 4,243 |
| JV100/270-3 | 0,103 | 0,272 | 4,144 | 0,00228 | 1820 | 6,718 | 3,481 | 4,262 |
| JV100/270-4 | 0,103 | 0,265 | 4,024 | 0,00222 | 1812 | 6,805 | 3,625 | 4,304 |
| JV100/270-5 | 0,103 | 0,267 | 4,041 | 0,00223 | 1813 | 6,783 | 3,545 | 4,281 |
| JV100/270-6 | 0,103 | 0,274 | 4,174 | 0,00229 | 1819 | 6,618 | 3,414 | 4,213 |
| JV50/175-1 | 0,051 | 0,175 | 0,653 | 0,00036 | 1821 | 10,146 | 4,270 | 6,522 |
| JV50/175-2 | 0,051 | 0,172 | 0,642 | 0,00035 | 1820 | 10,345 | 4,520 | 6,690 |
| JV50/175-3 | 0,051 | 0,173 | 0,635 | 0,00036 | 1782 | 10,014 | 3,770 | 6,094 |
| JV50/175-4 | 0,051 | 0,174 | 0,644 | 0,00036 | 1803 | 10,050 | 4,282 | 6,431 |
| JV50/175-5 | 0,051 | 0,171 | 0,643 | 0,00035 | 1831 | 10,412 | 4,487 | 6,636 |
| JV50/175-6 | 0,051 | 0,175 | 0,666 | 0,00036 | 1853 | 10,156 | 4,300 | 6,554 |
| JV50/95-1 | 0,051 | 0,094 | 0,348 | 0,00019 | 1803 | 18,014 | 11,812 | 11,060 |
| JV50/95-2 | 0,051 | 0,094 | 0,345 | 0,00019 | 1790 | 17,762 | 12,106 | 11,738 |
| JV50/95-3 | 0,051 | 0,094 | 0,348 | 0,00019 | 1807 | 17,993 | 12,277 | 11,983 |
| JV50/95-4 | 0,051 | 0,094 | 0,346 | 0,00019 | 1792 | 18,259 | 12,204 | 11,885 |
| JV50/95-5 | 0,051 | 0,094 | 0,349 | 0,00019 | 1802 | 18,397 | 12,106 | 11,812 |
| JV50/95-6 | 0,051 | 0,094 | 0,343 | 0,00019 | 1779 | 18,137 | 12,334 | 11,794 |

Tab. P7 Hodnoty naměřené na hranolech z LB2 – část 1.

| TĚLESO | Øb[m] | Øh[m] | ØL[m] | m [kg] | ρ[kg/m ³] | Øf _L [kHz] | Øf _f [kHz] | Øf _t [kHz] |
|------------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T100/400-1 | 0,104 | 0,100 | 0,399 | 7,293 | 1760 | 4,396 | 1,872 | 2,587 |
| T100/400-2 | 0,104 | 0,101 | 0,399 | 7,296 | 1754 | 4,352 | 1,828 | 2,553 |
| T100/400-3 | 0,106 | 0,101 | 0,399 | 7,383 | 1733 | 4,415 | 1,838 | 2,596 |
| T100/400-4 | 0,102 | 0,100 | 0,400 | 7,079 | 1727 | 4,330 | 1,759 | 2,574 |
| T100/400-5 | 0,106 | 0,101 | 0,400 | 7,336 | 1725 | 4,342 | 1,780 | 2,527 |
| T100/400-6 | 0,101 | 0,100 | 0,399 | 7,134 | 1764 | 4,477 | 1,877 | 2,634 |
| T100/400-7 | 0,105 | 0,101 | 0,400 | 7,493 | 1768 | 4,421 | 1,876 | 2,606 |
| T150/600-1 | 0,152 | 0,151 | 0,603 | 24,610 | 1783 | 2,870 | 1,219 | 1,689 |
| T150/600-2 | 0,150 | 0,151 | 0,603 | 24,598 | 1793 | 2,966 | 1,258 | 1,726 |
| T150/600-3 | 0,153 | 0,151 | 0,603 | 24,720 | 1779 | 2,954 | 1,259 | 1,718 |
| T150/600-4 | 0,153 | 0,151 | 0,603 | 24,683 | 1776 | 2,940 | 1,239 | 1,731 |
| T150/600-5 | 0,151 | 0,151 | 0,604 | 24,625 | 1788 | 2,991 | 1,286 | 1,753 |
| T150/600-6 | 0,151 | 0,151 | 0,604 | 24,735 | 1799 | 2,957 | 1,253 | 1,733 |
| T40/160-1 | 0,043 | 0,040 | 0,160 | 0,464 | 1682 | 10,926 | 4,643 | 6,423 |
| T40/160-2 | 0,042 | 0,040 | 0,160 | 0,454 | 1683 | 10,978 | 4,681 | 6,502 |
| T40/160-3 | 0,042 | 0,040 | 0,160 | 0,447 | 1672 | 11,048 | 4,694 | 6,502 |
| T40/160-4 | 0,043 | 0,040 | 0,160 | 0,453 | 1664 | 10,846 | 4,604 | 6,447 |
| T40/160-5 | 0,043 | 0,040 | 0,160 | 0,474 | 1718 | 10,916 | 4,546 | 6,388 |
| T40/160-6 | 0,042 | 0,040 | 0,161 | 0,468 | 1726 | 10,833 | 4,475 | 6,427 |
| T40/160-7 | 0,042 | 0,040 | 0,160 | 0,458 | 1697 | 10,905 | 4,539 | 6,448 |
| T40/160-8 | 0,044 | 0,040 | 0,161 | 0,469 | 1649 | 10,827 | 4,507 | 6,427 |
| T40/160-9 | 0,040 | 0,040 | 0,161 | 0,443 | 1702 | 10,920 | 4,663 | 6,399 |
| T150/300-1 | 0,153 | 0,151 | 0,301 | 12,293 | 1773 | 5,729 | 3,695 | 3,375 |
| T150/300-2 | 0,151 | 0,151 | 0,299 | 12,221 | 1791 | 5,832 | 3,761 | 3,415 |
| T150/300-3 | 0,152 | 0,151 | 0,299 | 12,205 | 1776 | 5,877 | 3,796 | 3,443 |
| T150/300-4 | 0,154 | 0,151 | 0,300 | 12,226 | 1761 | 5,850 | 3,762 | 3,466 |
| T150/300-5 | 0,151 | 0,151 | 0,296 | 12,008 | 1782 | 5,980 | 3,928 | 3,524 |
| T150/300-6 | 0,150 | 0,151 | 0,298 | 12,068 | 1786 | 5,874 | 3,807 | 3,465 |
| T75/100-1 | 0,074 | 0,077 | 0,099 | 0,978 | 1736 | 17,279 | 13,640 | 10,537 |
| T75/100-2 | 0,073 | 0,077 | 0,099 | 0,977 | 1750 | 17,319 | 13,575 | 10,527 |
| T75/100-3 | 0,076 | 0,076 | 0,099 | 0,999 | 1733 | 17,283 | 13,839 | 10,684 |
| T75/100-4 | 0,073 | 0,076 | 0,099 | 0,988 | 1798 | 17,255 | 13,730 | 10,612 |
| T75/100-5 | 0,076 | 0,073 | 0,099 | 0,993 | 1813 | 17,280 | 13,490 | 10,610 |
| T75/100-6 | 0,074 | 0,076 | 0,099 | 1,002 | 1800 | 17,482 | 13,709 | 10,724 |
| T75/200-1 | 0,072 | 0,077 | 0,198 | 1,938 | 1766 | 8,961 | 5,021 | 5,217 |
| T75/200-2 | 0,074 | 0,077 | 0,202 | 2,010 | 1757 | 8,806 | 4,898 | 5,094 |
| T75/200-3 | 0,076 | 0,076 | 0,198 | 1,992 | 1731 | 8,870 | 5,021 | 5,192 |
| T75/200-4 | 0,073 | 0,076 | 0,197 | 1,982 | 1810 | 8,896 | 4,898 | 5,168 |
| T75/200-5 | 0,074 | 0,076 | 0,199 | 2,028 | 1815 | 8,893 | 4,891 | 5,240 |
| T75/200-6 | 0,073 | 0,076 | 0,198 | 1,973 | 1794 | 8,891 | 4,924 | 5,168 |

Tab. P8 Hodnoty naměřené na hranolech z LB2 – část 2.

| TĚLESO | Øb[m] | Øh[m] | ØL[m] | m [kg] | ρ[kg/m ³] | Øf _L [kHz] | Øf _f [kHz] | Øf _t [kHz] |
|-----------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T75/300-1 | 0,076 | 0,077 | 0,301 | 3,046 | 1740 | 5,928 | 2,545 | 3,403 |
| T75/300-2 | 0,077 | 0,077 | 0,301 | 3,075 | 1735 | 5,777 | 2,520 | 3,354 |
| T75/300-3 | 0,074 | 0,077 | 0,300 | 2,960 | 1735 | 5,830 | 2,476 | 3,381 |
| T75/300-4 | 0,073 | 0,076 | 0,300 | 3,031 | 1822 | 5,824 | 2,543 | 3,451 |
| T75/300-5 | 0,073 | 0,076 | 0,300 | 3,040 | 1825 | 5,853 | 2,470 | 3,405 |
| T75/300-6 | 0,072 | 0,076 | 0,303 | 3,062 | 1833 | 5,821 | 2,449 | 3,430 |
| T50/100-1 | 0,050 | 0,050 | 0,099 | 0,431 | 1732 | 17,867 | 11,861 | 10,512 |
| T50/100-2 | 0,051 | 0,051 | 0,099 | 0,458 | 1802 | 18,144 | 11,953 | 10,831 |
| T50/100-3 | 0,050 | 0,050 | 0,099 | 0,446 | 1805 | 17,990 | 11,812 | 10,610 |
| T50/100-4 | 0,050 | 0,050 | 0,098 | 0,435 | 1777 | 18,283 | 12,081 | 10,809 |
| T50/100-5 | 0,049 | 0,050 | 0,099 | 0,450 | 1839 | 18,429 | 12,130 | 10,937 |
| T50/100-6 | 0,050 | 0,050 | 0,099 | 0,451 | 1831 | 18,200 | 11,876 | 10,634 |
| T50/200-1 | 0,050 | 0,050 | 0,198 | 0,910 | 1841 | 9,047 | 3,917 | 5,364 |
| T50/200-2 | 0,050 | 0,050 | 0,199 | 0,901 | 1812 | 8,992 | 3,868 | 5,339 |
| T50/200-3 | 0,049 | 0,049 | 0,199 | 0,901 | 1862 | 9,003 | 3,844 | 5,388 |
| T50/200-4 | 0,050 | 0,049 | 0,198 | 0,873 | 1790 | 8,968 | 3,843 | 5,315 |
| T50/200-5 | 0,050 | 0,050 | 0,197 | 0,891 | 1823 | 9,145 | 3,965 | 5,388 |
| T50/200-6 | 0,050 | 0,050 | 0,198 | 0,919 | 1844 | 9,075 | 3,960 | 5,319 |
| T50/300-1 | 0,050 | 0,050 | 0,300 | 1,345 | 1809 | 5,952 | 1,834 | 3,452 |
| T50/300-2 | 0,050 | 0,050 | 0,296 | 1,355 | 1828 | 5,922 | 1,785 | 3,452 |
| T50/300-3 | 0,050 | 0,050 | 0,299 | 1,357 | 1834 | 5,769 | 1,728 | 3,361 |
| T50/300-4 | 0,050 | 0,050 | 0,301 | 1,377 | 1845 | 5,969 | 1,829 | 3,488 |
| T50/300-5 | 0,050 | 0,050 | 0,300 | 1,369 | 1822 | 5,991 | 1,869 | 3,467 |
| T50/300-6 | 0,050 | 0,050 | 0,304 | 1,363 | 1813 | 5,911 | 1,791 | 3,456 |

Tab. P9 Hodnoty vypočítané na tělesech LB2 – část 1.

| TĚLESO | TYP | Z ČEHO | ŠTÍHLOST | E_{crL} [Gpa] | G_{cr} [Gpa] | E_{crf} [Gpa] |
|---------------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| V 150/300 - 1 | forma | - | 2,0 | 20,28 | 8,00 | 20,22 |
| V 150/300 - 2 | forma | - | 2,0 | 21,45 | 8,41 | 22,78 |
| V 150/300 - 3 | forma | - | 2,0 | 20,60 | 8,07 | 20,50 |
| V 150/300 - 4 | forma | - | 2,0 | 21,16 | 8,30 | 21,01 |
| V 150/300 - 5 | forma | - | 2,0 | 21,62 | 8,47 | 21,57 |
| V 150/300 - 6 | forma | - | 2,0 | 21,18 | 8,50 | 20,84 |
| V 150/300 - 7 | forma | - | 2,0 | 21,11 | 8,31 | 21,14 |
| T 100/400 - 1 | forma | - | 4,0 | 21,70 | 8,93 | 20,68 |
| T 100/400 - 2 | forma | - | 4,0 | 21,19 | 8,67 | 19,63 |
| T 100/400 - 3 | forma | - | 4,0 | 21,55 | 8,87 | 19,25 |
| T 100/400 - 4 | forma | - | 4,0 | 20,72 | 8,68 | 18,11 |
| T 100/400 - 5 | forma | - | 4,0 | 20,82 | 8,40 | 18,20 |
| T 100/400 - 6 | forma | - | 4,0 | 22,55 | 9,25 | 21,22 |
| T 100/400 - 7 | forma | - | 4,0 | 22,13 | 9,16 | 20,66 |
| T 150/600 - 1 | forma | - | 4,0 | 21,35 | 8,76 | 20,71 |
| T 150/600 - 2 | forma | - | 4,0 | 22,96 | 9,19 | 22,49 |
| T 150/600 - 3 | forma | - | 4,0 | 22,57 | 9,05 | 22,08 |
| T 150/600 - 4 | forma | - | 4,0 | 22,34 | 9,17 | 21,27 |
| T 150/600 - 5 | forma | - | 4,0 | 23,29 | 9,47 | 23,31 |
| T 150/600 - 6 | forma | - | 4,0 | 22,92 | 9,32 | 22,30 |
| T 40/160 - 1 | forma | - | 4,0 | 20,64 | 8,54 | 19,17 |
| T 40/160 - 2 | forma | - | 4,0 | 20,86 | 8,72 | 19,80 |
| T 40/160 - 3 | forma | - | 4,0 | 21,01 | 8,66 | 20,00 |
| T 40/160 - 4 | forma | - | 4,0 | 20,03 | 8,46 | 18,56 |
| T 40/160 - 5 | forma | - | 4,0 | 21,08 | 8,65 | 18,85 |
| T 40/160 - 6 | forma | - | 4,0 | 20,90 | 8,78 | 18,56 |
| T 40/160 - 7 | forma | - | 4,0 | 20,70 | 8,64 | 18,64 |
| T 40/160 - 8 | forma | - | 4,0 | 19,97 | 8,45 | 17,41 |
| T 40/160 - 9 | forma | - | 4,0 | 20,92 | 8,50 | 20,60 |
| JV 50/270 - 2 | JV | kalfas | 5,3 | 23,08 | 8,32 | 22,75 |
| JV 50/270 - 1 | JV | kalfas | 5,4 | 21,94 | 9,27 | 21,48 |
| JV 50/270 - 3 | JV | kalfas | 5,3 | 22,15 | 9,14 | 21,23 |
| JV 50/270 - 4 | JV | kalfas | 5,3 | 23,15 | 8,69 | 21,76 |
| JV 50/270 - 5 | JV | kalfas | 5,2 | 23,92 | 8,87 | 23,37 |
| JV 50/270 - 6 | JV | kalfas | 5,4 | 23,29 | 9,15 | 22,87 |
| JV 75/270 - 2 | JV | kalfas | 3,7 | 23,78 | 9,57 | 23,67 |
| JV 75/270 - 1 | JV | kalfas | 3,6 | 23,29 | 9,02 | 21,50 |
| JV 75/270 - 3 | JV | kalfas | 3,7 | 23,94 | 9,53 | 23,91 |
| JV 75/270 - 4 | JV | kalfas | 3,6 | 24,05 | 9,43 | 23,73 |
| JV 75/270 - 5 | JV | kalfas | 3,7 | 23,75 | 9,25 | 23,54 |
| JV 75/270 - 6 | JV | kalfas | 3,7 | 24,11 | 9,25 | 23,77 |

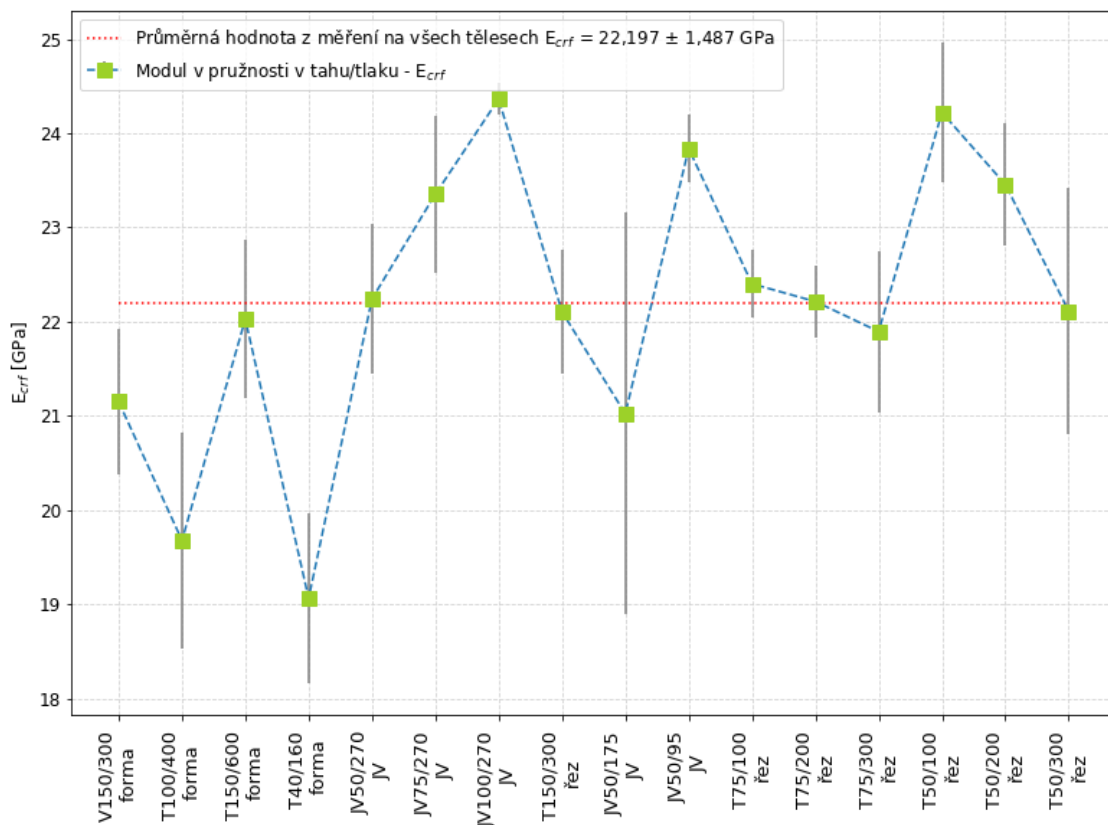
Tab. P10

Hodnoty vypočítané na tělesech LB2 – část 2.

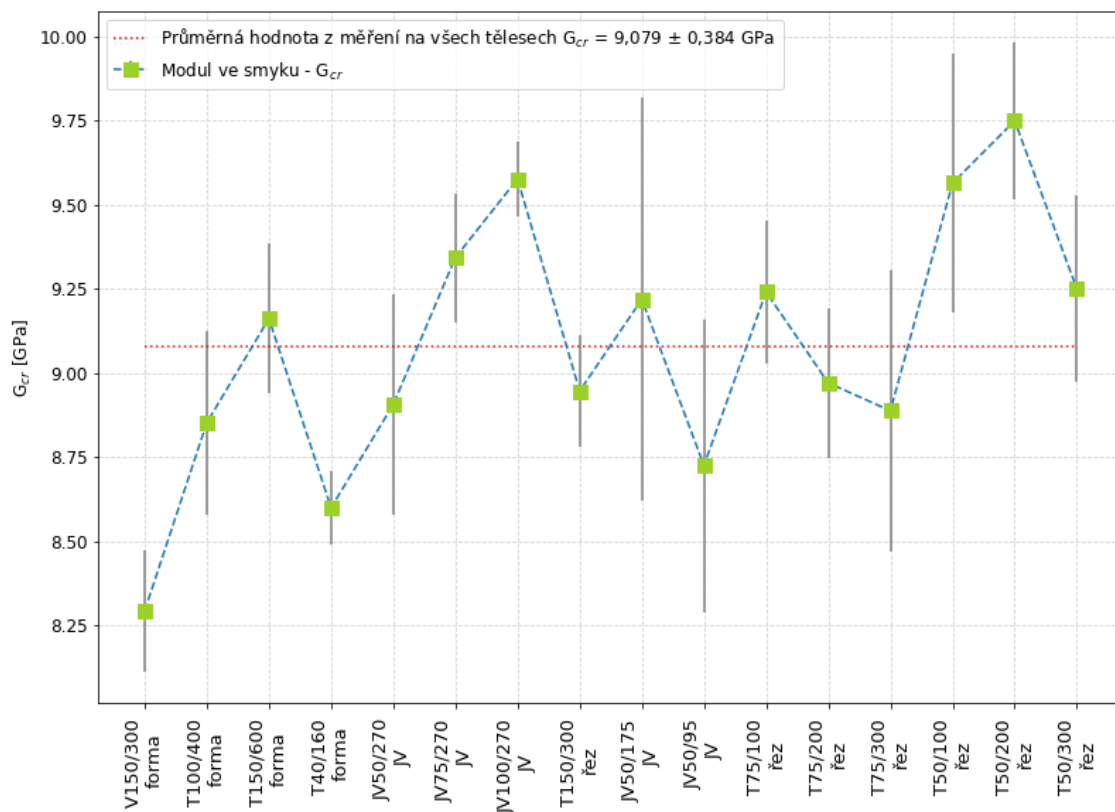
| TĚLESO | TYP | Z ČEHO | ŠTÍHLOST | E_{crL} [Gpa] | G_{cr} [Gpa] | E_{crf} [Gpa] |
|----------------|-----|---------------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| JV 100/270 - 1 | JV | kalfas | 2,6 | 24,16 | 9,55 | 24,59 |
| JV 100/270 - 2 | JV | kalfas | 2,6 | 24,05 | 9,59 | 24,36 |
| JV 100/270 - 3 | JV | kalfas | 2,6 | 24,22 | 9,75 | 24,50 |
| JV 100/270 - 4 | JV | kalfas | 2,6 | 23,52 | 9,40 | 24,42 |
| JV 100/270 - 5 | JV | kalfas | 2,6 | 23,83 | 9,50 | 24,23 |
| JV 100/270 - 6 | JV | kalfas | 2,6 | 23,85 | 9,67 | 24,08 |
| T 150/300 - 1 | řez | T 150/600 - 1 | 2,0 | 21,03 | 8,65 | 21,17 |
| T 150/300 - 2 | řez | T 150/600 - 2 | 2,0 | 21,85 | 8,86 | 22,19 |
| T 150/300 - 3 | řez | T 150/600 - 3 | 2,0 | 21,96 | 8,93 | 22,26 |
| T 150/300 - 4 | řez | T 150/600 - 4 | 2,0 | 21,64 | 9,01 | 21,44 |
| T 150/300 - 5 | řez | T 150/600 - 5 | 2,0 | 22,35 | 9,19 | 23,21 |
| T 150/300 - 6 | řez | T 150/600 - 6 | 2,0 | 21,95 | 9,03 | 22,37 |
| JV 50/175 - 1 | JV | JV 50/270 - 1 | 3,4 | 23,13 | 9,46 | 21,46 |
| JV 50/175 - 2 | JV | JV 50/270 - 2 | 3,4 | 23,19 | 9,60 | 22,53 |
| JV 50/175 - 3 | JV | JV 50/270 - 3 | 3,4 | 21,73 | 7,97 | 16,36 |
| JV 50/175 - 4 | JV | JV 50/270 - 4 | 3,4 | 22,38 | 9,07 | 21,30 |
| JV 50/175 - 5 | JV | JV 50/270 - 5 | 3,3 | 23,41 | 9,42 | 22,13 |
| JV 50/175 - 6 | JV | JV 50/270 - 6 | 3,4 | 23,74 | 9,79 | 22,37 |
| JV 50/95 - 1 | JV | JV 50/270 - 1 | 1,8 | 21,15 | 7,82 | 23,83 |
| JV 50/95 - 2 | JV | JV 50/270 - 2 | 1,8 | 20,35 | 8,71 | 23,10 |
| JV 50/95 - 3 | JV | JV 50/270 - 3 | 1,8 | 21,16 | 9,20 | 23,99 |
| JV 50/95 - 4 | JV | JV 50/270 - 4 | 1,8 | 21,59 | 8,97 | 23,94 |
| JV 50/95 - 5 | JV | JV 50/270 - 5 | 1,8 | 22,01 | 8,89 | 23,88 |
| JV 50/95 - 6 | JV | JV 50/270 - 6 | 1,8 | 21,13 | 8,76 | 24,28 |
| T 75/100 - 1 | řez | T 150/600 | 1,3 | 21,13 | 8,94 | 21,93 |
| T 75/100 - 2 | řez | T 150/600 | 1,3 | 21,49 | 9,05 | 22,13 |
| T 75/100 - 3 | řez | T 150/600 | 1,3 | 21,16 | 9,16 | 22,16 |
| T 75/100 - 4 | řez | T 150/600 | 1,3 | 21,83 | 9,40 | 22,94 |
| T 75/100 - 5 | řez | T 150/600 | 1,4 | 22,06 | 9,36 | 22,51 |
| T 75/100 - 6 | řez | T 150/600 | 1,3 | 22,32 | 9,54 | 22,73 |
| T 75/200 - 1 | řez | T 150/600 | 2,6 | 22,51 | 9,03 | 22,74 |
| T 75/200 - 2 | řez | T 150/600 | 2,6 | 22,43 | 8,83 | 22,64 |
| T 75/200 - 3 | řez | T 150/600 | 2,6 | 21,59 | 8,68 | 21,66 |
| T 75/200 - 4 | řez | T 150/600 | 2,6 | 22,54 | 8,96 | 21,92 |
| T 75/200 - 5 | řez | T 150/600 | 2,6 | 23,02 | 9,40 | 22,22 |
| T 75/200 - 6 | řez | T 150/600 | 2,6 | 22,43 | 8,92 | 22,10 |
| T 75/300 - 1 | řez | T 150/600 | 3,9 | 22,29 | 8,67 | 21,98 |
| T 75/300 - 2 | řez | T 150/600 | 3,9 | 21,04 | 8,35 | 21,06 |
| T 75/300 - 3 | řez | T 150/600 | 3,9 | 21,27 | 8,46 | 20,57 |
| T 75/300 - 4 | řez | T 150/600 | 3,9 | 22,37 | 9,31 | 23,12 |
| T 75/300 - 5 | řez | T 150/600 | 4,0 | 22,67 | 9,08 | 22,11 |
| T 75/300 - 6 | řez | T 150/600 | 4,0 | 22,96 | 9,45 | 22,53 |

Tab. P11 Hodnoty vypočítané na tělesech LB2 – část 3.

| TĚLESO | TYP | Z ČEHO | ŠTÍHLOST | E_{crL} [Gpa] | G_{cr} [Gpa] | E_{crf} [Gpa] |
|--------------|-----|-----------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| T 50/100 - 1 | řez | T 150/600 | 2,0 | 22,22 | 8,93 | 23,30 |
| T 50/100 - 2 | řez | T 150/600 | 2,0 | 23,65 | 9,77 | 23,77 |
| T 50/100 - 3 | řez | T 150/600 | 2,0 | 23,32 | 9,41 | 23,85 |
| T 50/100 - 4 | řez | T 150/600 | 2,0 | 23,40 | 9,48 | 24,10 |
| T 50/100 - 5 | řez | T 150/600 | 2,0 | 24,94 | 10,21 | 25,58 |
| T 50/100 - 6 | řez | T 150/600 | 2,0 | 24,21 | 9,58 | 24,72 |
| T 50/200 - 1 | řez | T 150/600 | 4,0 | 23,84 | 9,87 | 23,78 |
| T 50/200 - 2 | řez | T 150/600 | 4,0 | 23,35 | 9,71 | 23,06 |
| T 50/200 - 3 | řez | T 150/600 | 4,1 | 24,05 | 10,13 | 23,79 |
| T 50/200 - 4 | řez | T 150/600 | 4,0 | 22,63 | 9,35 | 22,18 |
| T 50/200 - 5 | řez | T 150/600 | 4,0 | 23,84 | 9,75 | 23,81 |
| T 50/200 - 6 | řez | T 150/600 | 3,9 | 23,92 | 9,68 | 24,12 |
| T 50/300 - 1 | řez | T 150/600 | 6,0 | 23,11 | 9,20 | 22,67 |
| T 50/300 - 2 | řez | T 150/600 | 5,9 | 22,50 | 9,06 | 20,44 |
| T 50/300 - 3 | řez | T 150/600 | 6,0 | 21,88 | 8,79 | 20,20 |
| T 50/300 - 4 | řez | T 150/600 | 6,0 | 23,85 | 9,64 | 23,21 |
| T 50/300 - 5 | řez | T 150/600 | 6,0 | 23,58 | 9,34 | 23,52 |
| T 50/300 - 6 | řez | T 150/600 | 6,1 | 23,40 | 9,47 | 22,63 |



Graf P3 Hodnoty modulu E_{crf} na všech tělesech LB2.



Graf P4 Hodnoty modulu pružnosti ve smyku G_{cr} na všech tělesech LB1.



Obr. P13 *Základní tělesa pro experiment č. 2.*



Obr. P14 *Řezání základních těles – experiment č. 2.*



Obr. P15 *Tělesa ze sady A – experiment č. 2.*



Obr. P16 *Tělesa ze sady A – experiment č. 2.*

Tab. P12

Hodnoty naměřené při experimentu č. 2.

| TĚLESO | $\varnothing b$ [m] | $\varnothing h$ [m] | $\varnothing L$ [m] | ρ [kg/m ³] | $\varnothing f_l$ [kHz] | $\varnothing f_{f1}$ [kHz] | $\varnothing f_{f2}$ [kHz] | $\varnothing f_t$ [kHz] |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| A-1 | 0,099 | 0,100 | 0,400 | 2285 | 4,995 | 2,144 | 2,077 | 2,937 |
| A-2 | 0,099 | 0,100 | 0,400 | 2297 | 5,047 | 2,181 | 2,135 | 2,969 |
| A-3 | 0,100 | 0,101 | 0,400 | 2240 | 4,904 | 2,116 | 2,077 | 2,880 |
| A-4 | 0,099 | 0,099 | 0,400 | 2277 | 4,950 | 2,103 | 2,103 | 2,904 |
| A-5 | 0,099 | 0,100 | 0,400 | 2262 | 4,962 | 2,123 | 2,097 | 2,917 |
| A-6 | 0,099 | 0,100 | 0,400 | 2296 | 4,892 | 2,044 | 2,110 | 2,893 |
| A-R1-1 | 0,086 | 0,100 | 0,400 | 2309 | 4,930 | 2,116 | 1,868 | 2,873 |
| A-R1-2 | 0,086 | 0,100 | 0,400 | 2315 | 4,969 | 2,149 | 1,907 | 2,893 |
| A-R1-3 | 0,086 | 0,101 | 0,400 | 2261 | 4,845 | 2,085 | 1,849 | 2,827 |
| A-R1-4 | 0,086 | 0,099 | 0,400 | 2282 | 4,877 | 2,077 | 1,855 | 2,834 |
| A-R1-5 | 0,086 | 0,100 | 0,400 | 2288 | 4,903 | 2,103 | 1,881 | 2,854 |
| A-R1-6 | 0,087 | 0,100 | 0,400 | 2304 | 4,838 | 2,051 | 1,862 | 2,841 |
| A-R2-1 | 0,070 | 0,100 | 0,400 | 2316 | 4,923 | 2,110 | 1,594 | 2,736 |
| A-R2-2 | 0,071 | 0,100 | 0,400 | 2313 | 4,943 | 2,135 | 1,614 | 2,762 |
| A-R2-3 | 0,072 | 0,101 | 0,400 | 2268 | 4,832 | 2,077 | 1,601 | 2,704 |
| A-R2-4 | 0,071 | 0,099 | 0,400 | 2291 | 4,884 | 2,077 | 1,594 | 2,710 |
| A-R2-5 | 0,071 | 0,100 | 0,400 | 2293 | 4,884 | 2,097 | 1,614 | 2,730 |
| A-R2-6 | 0,072 | 0,100 | 0,400 | 2307 | 4,812 | 2,051 | 1,601 | 2,710 |
| B-1 | 0,099 | 0,098 | 0,400 | 2277 | 4,910 | 2,057 | 2,090 | 2,886 |
| B-2 | 0,101 | 0,100 | 0,400 | 2295 | 4,975 | 2,103 | 2,136 | 2,919 |
| B-3 | 0,100 | 0,100 | 0,400 | 2305 | 5,073 | 2,177 | 2,181 | 2,995 |
| B-4 | 0,099 | 0,100 | 0,400 | 2281 | 4,969 | 2,123 | 2,095 | 2,913 |
| B-5 | 0,099 | 0,099 | 0,400 | 2294 | 5,067 | 2,150 | 2,116 | 2,965 |
| B-6 | 0,100 | 0,100 | 0,400 | 2305 | 5,027 | 2,129 | 2,142 | 2,945 |
| B-R1-1 | 0,099 | 0,086 | 0,400 | 2287 | 4,884 | 1,855 | 2,070 | 2,841 |
| B-R1-2 | 0,101 | 0,086 | 0,400 | 2299 | 4,877 | 1,862 | 2,090 | 2,834 |
| B-R1-3 | 0,100 | 0,086 | 0,400 | 2305 | 4,988 | 1,914 | 2,142 | 2,913 |
| B-R1-4 | 0,099 | 0,086 | 0,400 | 2279 | 4,858 | 1,842 | 2,051 | 2,828 |
| B-R1-5 | 0,099 | 0,086 | 0,400 | 2303 | 5,021 | 1,927 | 2,097 | 2,913 |
| B-R1-6 | 0,100 | 0,086 | 0,400 | 2309 | 4,962 | 1,901 | 2,116 | 2,893 |
| B-R2-1 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2293 | 4,930 | 1,601 | 2,090 | 2,736 |
| B-R2-2 | 0,101 | 0,071 | 0,400 | 2301 | 4,832 | 1,587 | 2,084 | 2,684 |
| B-R2-3 | 0,100 | 0,071 | 0,400 | 2304 | 4,962 | 1,633 | 2,142 | 2,769 |
| B-R2-4 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2277 | 4,812 | 1,568 | 2,038 | 2,691 |
| B-R2-5 | 0,099 | 0,071 | 0,400 | 2297 | 5,008 | 1,633 | 2,084 | 2,769 |
| B-R2-6 | 0,100 | 0,071 | 0,400 | 2306 | 4,949 | 1,620 | 2,110 | 2,756 |

Tab. P13

Vypočítané hodnoty při dosažení rozměru kolmého na směr úderu při výpočtu poloměru setrvačnosti.

| TĚLESO | u_{cr} | E_{cr1} [GPa] | G_{cr} [GPa] | E_{crf1} [GPa] | E_{crf2} [GPa] |
|--------|----------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| A-1 | 0,22 | 36,495 | 14,923 | 37,153 | 34,103 |
| A-2 | 0,22 | 37,398 | 15,310 | 38,272 | 36,027 |
| A-3 | 0,23 | 34,442 | 14,051 | 34,833 | 33,102 |
| A-4 | 0,23 | 35,656 | 14,520 | 35,311 | 35,235 |
| A-5 | 0,22 | 35,619 | 14,562 | 36,002 | 34,568 |
| A-6 | 0,21 | 35,136 | 14,539 | 33,637 | 35,274 |
| A-R1-1 | 0,21 | 35,917 | 14,869 | 44,850 | 27,792 |
| A-R1-2 | 0,21 | 36,546 | 15,099 | 46,182 | 28,923 |
| A-R1-3 | 0,20 | 33,914 | 14,091 | 42,377 | 26,359 |
| A-R1-4 | 0,22 | 34,704 | 14,253 | 42,756 | 27,432 |
| A-R1-5 | 0,21 | 35,170 | 14,511 | 43,882 | 28,070 |
| A-R1-6 | 0,19 | 34,480 | 14,444 | 41,180 | 27,483 |
| A-R2-1 | 0,21 | 35,925 | 14,826 | 61,490 | 20,313 |
| A-R2-2 | 0,21 | 36,129 | 14,964 | 61,355 | 20,689 |
| A-R2-3 | 0,21 | 33,850 | 13,991 | 55,816 | 19,855 |
| A-R2-4 | 0,23 | 34,933 | 14,211 | 58,046 | 20,374 |
| A-R2-5 | 0,21 | 34,978 | 14,460 | 58,895 | 20,706 |
| A-R2-6 | 0,20 | 34,166 | 14,292 | 55,833 | 20,357 |
| B-1 | 0,22 | 35,069 | 14,333 | 33,939 | 35,146 |
| B-2 | 0,23 | 36,349 | 14,803 | 34,901 | 36,548 |
| B-3 | 0,21 | 37,955 | 15,650 | 37,561 | 38,119 |
| B-4 | 0,23 | 35,965 | 14,622 | 35,915 | 34,654 |
| B-5 | 0,23 | 37,607 | 15,234 | 37,155 | 36,165 |
| B-6 | 0,23 | 37,254 | 15,126 | 36,079 | 36,900 |
| B-R1-1 | 0,22 | 34,846 | 14,322 | 27,684 | 42,562 |
| B-R1-2 | 0,21 | 34,988 | 14,403 | 27,339 | 43,295 |
| B-R1-3 | 0,20 | 36,684 | 15,265 | 28,967 | 45,834 |
| B-R1-4 | 0,21 | 34,338 | 14,142 | 26,929 | 41,332 |
| B-R1-5 | 0,22 | 37,070 | 15,177 | 29,900 | 44,043 |
| B-R1-6 | 0,21 | 36,356 | 15,038 | 28,692 | 44,279 |
| B-R2-1 | 0,23 | 35,597 | 14,453 | 20,730 | 58,977 |
| B-R2-2 | 0,22 | 34,387 | 14,075 | 19,909 | 58,107 |
| B-R2-3 | 0,21 | 36,284 | 15,010 | 21,102 | 61,760 |
| B-R2-4 | 0,21 | 33,670 | 13,906 | 19,489 | 55,240 |
| B-R2-5 | 0,24 | 36,785 | 14,876 | 21,477 | 58,860 |
| B-R2-6 | 0,22 | 36,110 | 14,855 | 20,830 | 59,860 |

Tab. P14

Vypočítané hodnoty při dosažení rozměru rovnoběžného na směr úderu při výpočtu poloměru setrvačnosti.

| TĚLESO | u_{cr} | E_{cr1} [GPa] | G_{cr} [GPa] | E_{crf1} [GPa] | E_{crf2} [GPa] |
|--------|----------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| A-1 | 0,22 | 36,495 | 14,923 | 36,350 | 34,856 |
| A-2 | 0,22 | 37,398 | 15,310 | 37,608 | 36,663 |
| A-3 | 0,23 | 34,442 | 14,051 | 34,357 | 33,561 |
| A-4 | 0,23 | 35,656 | 14,520 | 35,235 | 35,311 |
| A-5 | 0,22 | 35,619 | 14,562 | 35,430 | 35,126 |
| A-6 | 0,21 | 35,136 | 14,539 | 33,102 | 35,844 |
| A-R1-1 | 0,21 | 35,917 | 14,869 | 35,662 | 34,953 |
| A-R1-2 | 0,21 | 36,546 | 15,099 | 36,729 | 36,367 |
| A-R1-3 | 0,20 | 33,914 | 14,091 | 33,518 | 33,327 |
| A-R1-4 | 0,22 | 34,704 | 14,253 | 34,391 | 34,105 |
| A-R1-5 | 0,21 | 35,170 | 14,511 | 35,087 | 35,106 |
| A-R1-6 | 0,19 | 34,480 | 14,444 | 33,345 | 33,941 |
| A-R2-1 | 0,21 | 35,925 | 14,826 | 35,593 | 35,092 |
| A-R2-2 | 0,21 | 36,129 | 14,964 | 36,202 | 35,064 |
| A-R2-3 | 0,21 | 33,850 | 13,991 | 33,416 | 33,164 |
| A-R2-4 | 0,23 | 34,933 | 14,211 | 34,592 | 34,188 |
| A-R2-5 | 0,21 | 34,978 | 14,460 | 34,953 | 34,889 |
| A-R2-6 | 0,20 | 34,166 | 14,292 | 33,410 | 34,020 |
| B-1 | 0,22 | 35,069 | 14,333 | 34,045 | 35,037 |
| B-2 | 0,23 | 36,349 | 14,803 | 35,428 | 36,005 |
| B-3 | 0,21 | 37,955 | 15,650 | 37,980 | 37,699 |
| B-4 | 0,23 | 35,965 | 14,622 | 35,597 | 34,963 |
| B-5 | 0,23 | 37,607 | 15,234 | 37,325 | 36,000 |
| B-6 | 0,23 | 37,254 | 15,126 | 36,453 | 36,521 |
| B-R1-1 | 0,22 | 34,846 | 14,322 | 34,180 | 34,473 |
| B-R1-2 | 0,21 | 34,988 | 14,403 | 34,364 | 34,444 |
| B-R1-3 | 0,20 | 36,684 | 15,265 | 36,596 | 36,279 |
| B-R1-4 | 0,21 | 34,338 | 14,142 | 33,337 | 33,387 |
| B-R1-5 | 0,22 | 37,070 | 15,177 | 37,191 | 35,408 |
| B-R1-6 | 0,21 | 36,356 | 15,038 | 35,738 | 35,549 |
| B-R2-1 | 0,23 | 35,597 | 14,453 | 34,608 | 35,328 |
| B-R2-2 | 0,22 | 34,387 | 14,075 | 33,697 | 34,331 |
| B-R2-3 | 0,21 | 36,284 | 15,010 | 35,896 | 36,307 |
| B-R2-4 | 0,21 | 33,670 | 13,906 | 32,699 | 32,924 |
| B-R2-5 | 0,24 | 36,785 | 14,876 | 36,141 | 34,979 |
| B-R2-6 | 0,22 | 36,110 | 14,855 | 35,286 | 35,337 |