VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV VELIKOSTI A TVARU ZKUŠEBNÍHO TĚLESA NA MODUL PRUŽNOSTI LEHKÝCH BETONŮ

THE INFLUENCE OF THE SIZE AND SHAPE OF TEST SPECIMEN ON THE ELASTIC MODULUS OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Aleš Tichý
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Aleš Tichý
Název	Vliv velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti lehkých betonů
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D. Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Odborné knihy, jako jsou např.:
Neville, A. M.: Properties of concrete.
Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Processes.
Newman, J. ; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.
Neville, A. M.; Brooks, J. J.: Concrete technology.
Odborné články pojednávající o zadané problematice, jako jsou např.:
Huňka, P.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Vokáč, M.: Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu – rekapitulace.
Misák, P.; Vymazal, T.: Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku.
Abdelgader, H. S.; Elbaden, A. S.; Diouri, A.; Khachani N.;Alami Talbi, M.: Concreting method that produce high modulus of elasticity.
Lee, B.; Kee, S. H.; Oh, T.; Kim, Y. Y.: Effect of Cylinder Size on the Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests.
Silva, R. V.; Vasco, R.; De Brito, J.; Dhir, R. K.: Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete.
Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN ISO 1920-10, ČSN EN 206, ČSN EN 13791, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: rešerše pramenů – obecné informace o betonu, podrobněji o betonu s lehkým pórovitým kamenivem; dále vlastnosti betonu, především pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku; důraz na faktory ovlivňující hodnotu modulu pružnosti betonu; stručný popis různých metod zkoušení modulu pružnosti betonu.
Praktická část: zpracování plánu experimentu – sledování vlivu velikosti, tvaru a typu zkušebního tělesa na pevnostní a především pružnostní charakteristiky betonu s lehkým kamenivem. Výroba zkušebních těles, z větších bloků odebrat jádrové vývrty. V práci by se měla použít zkušební tělesa ze dvou druhů betonů. Dále provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody a stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Poté zpracování výsledků zkoušek, jejich vyhodnocení a formulace vyplývajících závěrů.
Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá sledováním vlivu tvaru, rozměru a typu zkušebního tělesa na hodnoty modulů pružnosti lehkého betonu. V rámci experimentu byla vyrobena řada různých těles, z betonů dvou receptur. Na tělesech se prováděly zkoušky pro stanovení statického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou. Výsledky byly vyhodnoceny a jsou shrnuty v tabelární a grafické podobě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lehký beton, statický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti, pevnost v tlaku, tvar tělesa, rozměř tělesa, typ tělesa

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the determination of the influence of size, shape and type of test specimen on values of modulus of elasticity of light-weight concrete. A lot of different specimens were prepared from two concrete's mixtures for the experiment. Tests for measurement of static modulus of elasticity and dynamic modulus of elasticity by ultrasonic impulse velocity method were made. The results were assessed and summarized in tabular and graphical form.

KEYWORDS

Lightweight concrete, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity, compressive strength, shape of specimen, size of specimen, type of specimen

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vliv velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti lehkých betonů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 12. 2018

Bc. Aleš Tichý
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti lehkých betonů* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 12. 2018

Bc. Aleš Tichý
autor práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

PODĚKOVÁNÍ

Na této straně bych nejprve rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za jeho ochotu, drahocenný čas a důležité rady a připomínky, které mě posouvaly dále v práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Žíttovi za provedení veškerého jádrového vrtání a Ing. Oldřichu Žaludovi za návrh receptur použitých betonů. Rád bych také poděkoval přítelkyni Martině, která mi byla oporou a za její trpělivost. Dále rodičům za jejich podporu.

Tato diplomová práce byla zpracována v rámci řešení standardního projektu specifického vysokoškolského výzkumu na VUT č. FAST-S-18-4824 „Experimentální analýza odezvy betonových prvků se zabudovanou betonářskou, helikální a sklovláknitou výztuží po vystavení vysokým teplotám“ a projektu GAČR č. 17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“. Při řešení projektu č. FAST-S-18-4824 byl připraven lehký beton, který byl současně použit pro tuto diplomovou práci, a pro potřeby projektu GAČR č. 17-14302S byla v této práci zpracována studie vlivu velikosti a tvaru zkušebního tělesa na modul pružnosti betonu.

OBSAH

1. Úvod 10

2. Cíle práce 12

3. Teoretická část 13

3.1 Charakteristika betonu 13

3.2 Lehký beton 22

3.3 Lehké kamenivo 25

3.5 Stanovení modulu pružnosti 33

4. Experimentální část 45

4.3 Postup měření 51

4.4 Výsledky a jejich diskuze 59

5. Závěr 72

6. Bibliografie 73

7. Seznam obrázků 81

8. Seznam tabulek 82

9. Seznam grafů 82

10. Seznam použitých symbolů a zkratek 84

11. Přílohy 86

1. Úvod

Beton je v současnosti tak významným stavebním materiálem, že si lze bez něj moderní stavebnictví jen těžko představit. Je tedy logické, že v posledních desetiletích prochází mohutným vývojem a zkoumáním. Výsledkem tohoto vývoje je velmi velká variabilita výsledných vlastností. Recepturu betonu lze totiž upravit tak, aby vlastnosti betonu odpovídaly nejrůznějším požadavkům, přičemž možnosti jsou velmi rozsáhlé. Beton se ve své podstatě skládá ze dvou hlavních složek, kameniva a cementové matrice. Pro obě složky platí, že nabízí velkou škálu variant jejich návrhu. Dále lze výsledné vlastnosti betonu upravit přidáním množství různých přísad a příměsí [1], [2].

Lehké betony jsou betony, jejichž objemová hmotnost je podstatně nižší než u betonů běžných. Základní výhodou použití lehkého betonu je tedy snížení zatížení konstrukcí od vlastní tíhy. Lehký beton lze navrhnout ve velmi širokém spektru pevností a objemových hmotností, díky čemuž nachází využití od výplňového izolačního betonu, přes výrobu nosných panelů až pro aplikace lehkého hutného konstrukčního betonu. Zhotovují se z něj tedy tak významné konstrukce, jako jsou mosty, stadióny a administrativní budovy [3], [4], [5].

Poslední dobou se při navrhování betonových konstrukcí dostávají do popředí termíny jako je trvanlivost, životnost, odolnost proti degradaci, environmentální aspekty či trvalá udržitelnost [6], [7]. Při výstavbě je kladen důraz na efektivní využití různých materiálů včetně druhotných surovin a současně se bedlivě hlídá kontrola kvality provádění. Vše je podřízeno výstavbě konstrukcí s co nejdelší životností za současného snížení jejich „eko-nákladů“ [8]. V posledních letech se tedy stále více diskutuje o tématech, jako jsou trvanlivostní vlastnosti betonu (např. propustnost, mrazuvzdornost apod.) či smršťování betonu. V rámci výzkumu smrštění betonu v jeho rané fázi a jeho dopadu na chování

železobetonových prvků (vlivem smrštění vzniká v betonu napětí již velmi brzy po jeho uložení do bednění) je velmi důležitým parametrem modul pružnosti betonu [9]. Ten je možné stanovit během prvních hodin tuhnutí a tvrdnutí pomocí ultrazvukových přístrojů, které ovšem často používají nestandardní zkušební tělesa. Ověření vlivu různých těles na modul pružnosti betonu je cílem této práce.

2. Cíle práce

Pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku jsou doporučena dle norem ISO 1920-10 [10] a ČSN EN 12390-13 [11] válcová zkušební tělesa průměru 150 mm a výšky 300 mm. Bohužel ne vždy je možné taková tělesa pro zkoušky zajistit, například při určování modulu pružnosti betonu ze stávající konstrukce. Proto je vhodné znát vlivy tvarů a rozměrů zkušebních těles na hodnotu modulu pružnosti. Protože je lehký beton u nás stále více rozšířen, je na místě ho více zkoumat.

Cílem teoretické části této práce je rešerše pramenů o betonu, zejména o betonu s lehkým pórovitým kamenivem a jeho vlastnostech, především o pevnosti v tlaku a statickém modulu pružnosti, dále o faktorech ovlivňujících hodnotu modulu pružnosti a o metodách zkoušení modulu pružnosti.

Cílem praktické části je zpracování plánu experimentu, výroba zkušebních těles, odebírání jádrových vývrtů a řezání těles z větších bloků. Pro experiment budou použity dva druhy lehkých betonů. Následně provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové impulzové metody a stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Předmětem je sledování vlivu velikosti, tvaru a typu zkušebního tělesa na pevnostní a především pružnostní charakteristiky betonu s lehkým kamenivem. Poté zpracování výsledků, jejich vyhodnocení a formulace vyplývajících závěrů.

3. Teoretická část

3.1 Charakteristika betonu

Beton je kompozitní materiál, který se skládá ze dvou hlavních složek, kameniva a cementové matrice. Cementovou matricí se rozumí směs cementu a vody, která plní funkci pojiva tím, že obaluje jednotlivá zrna kameniva. Díky vzájemné chemické reakci přestává být po zhruba hodině tvárná, přičemž tento stav se nazývá tuhnutí. Poté následuje další fáze, nazývaná tvrdnutí, při které cementová matrice získává texturu přírodního kamene [3]. Kamenivo se rozděluje podle velikosti zrn na drobné a hrubé kamenivo, v betonu má funkci plniva, snižuje cenu betonu a vylepšuje jeho objemovou stálost, trvanlivost a má vliv i na další vlastnosti betonu [3], [12]. Kromě těchto dvou složek betonu můžeme jeho vlastnosti výrazně ovlivnit přidáním příměsí a přísad do betonu.

Cement je stěžejní složkou betonu, bez které nelze klasický beton vyrobit. Vzniká výpalem přírodních surovin a následným mletím s přídavkem sádrovce nebo anhydritu, který slouží jako regulátor tuhnutí, bez něj by po smíchání s vodou nastalo okamžité tuhnutí a nebylo by možné směs dále zpracovat. Takto vzniká portlandský cement. Je-li při mletí přidáván další materiál, je výsledný produkt nazýván jako směsný portlandský cement, vysokopecní cement, nebo směsný cement, podle toho, jaké množství které přísady bylo přimleto [3]. Použitím těchto příměsí lze dosáhnout snížení hydratačního tepla, ale i například zvýšení pevnosti, nebo odolnosti vůči chemickým látkám, síranům a mořské vodě. Jak již bylo výše zmíněno, cement při smíchání s vodou chemicky reaguje, tato reakce se nazývá hydratace cementu a umožňuje betonu ztvrdnout a získat texturu i vlastnosti podobné přírodnímu kamenu. Potřebné množství vody k úplné hydrataci cementu je přibližně 20-25 % z hmotnosti cementu. Tento poměr vody k hmotnosti cementu je označován jako vodní součinitel [13]:

$$w = v/c \tag{1}$$

kde w je vodní součinitel [-]

v je množství vody v čerstvém betonu [kg]

c je množství cementu v čerstvém betonu [kg]

Vodní součinitel má velmi významný vliv na výsledné parametry jak čerstvého, tak i ztvrdlého betonu. Pro výpočet vodního součinitele je třeba zohlednit i vlhkost kameniva použitého do čerstvého betonu. U čerstvého betonu ovlivňuje jeho zpracovatelnost, tzn., že čím je vyšší hodnota vodního součinitele, tím je lepší zpracovatelnost čerstvého betonu, ale to je v nesouladu s požadavky na ztvrdlý beton, který vykazuje lepší vlastnosti při snižování vodního součinitele. Snižováním vodního součinitele lze dosáhnout vyšší pevnosti, modulu pružnosti, trvanlivosti a rychlejšího vývoje pevností u betonu. Proto je zapotřebí při návrhu betonu dbát na stanovení takové hodnoty vodního součinitele, aby beton splnil požadavky na trvanlivost, ale zároveň i na zpracovatelnost. Jednou z možností je pro zlepšení zpracovatelnosti přidat vodu i cement v takovém množství, aby zůstal zachován vodní součinitel, anebo lze použít produkt zvaný plastifikátor, resp. superplastifikátor. Tyto přísady se dávkují v jednotkách procent hmotnosti cementu, ale i při takto nízké koncentraci dokáží velmi výrazně zlepšit zpracovatelnost betonu, nebo snížit jeho vodní součinitel, a tím zlepšit pevnost a další vlastnosti. Díky použití těchto chemických látek lze vyrobit vysokopevnostní beton, vysokohodnotný beton (HPC) či ultavysokohodnotný beton (UHPC). Proto je používání těchto látek označováno jako největší pokrok za posledních 40 let v oblasti technologie betonů [3].

V průběhu míchání betonu se mohou přidávat i další přísady, které zlepšují některé vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Zpravidla jsou přísady kapalné látky, na rozdíl od příměsí, které bývají v práškové podobě a aplikují se ve větších množstvích než přísady. Přísady se aplikují v množství jednotek procent hmotnosti

cementu. Přísady se mohou rozdělovat do kategorií podle funkce, kterou plní, následovně [3]:

- urychlující přísady
- zpomalující přísady
- provzdušňující přísady
- inhibitory koroze
- inhibitory alkalicko-křemičité reakce
- přísady modifikující viskozitu betonu
- hydrofobizační přísady
- přísady zamezující smršťování betonu
- přísady snižující obsah vody (plastifikátory)
- superplastifikátory, neboli přísady silně snižující obsah vody

Kamenivo tvoří dvě třetiny až tři čtvrtiny celkového objemu betonu. Jelikož je většinou levnější než cement, tak znatelně snižuje cenu betonu. Díky velkému podílu v betonu má významný vliv na jeho vlastnosti. Kamenivo se rozděluje podle [12] :

- Objemové hmotnosti:
  - Pórovité: <2 000 kg/m^3
  - Hutné: 2000 - 3000 kg/m^3
  - Těžké: > 3000 kg/m^3
- Původu:
  - Přírodní: těžené nebo drcené
  - Umělé: druhotná surovina, např. struska, keramzit
  - Recyklované: již dříve použité kamenivo v konstrukcích
- Druhu vzniku:
  - Těžené
  - Těžené předrcené [14] (předdrcené [12])
  - Drcené

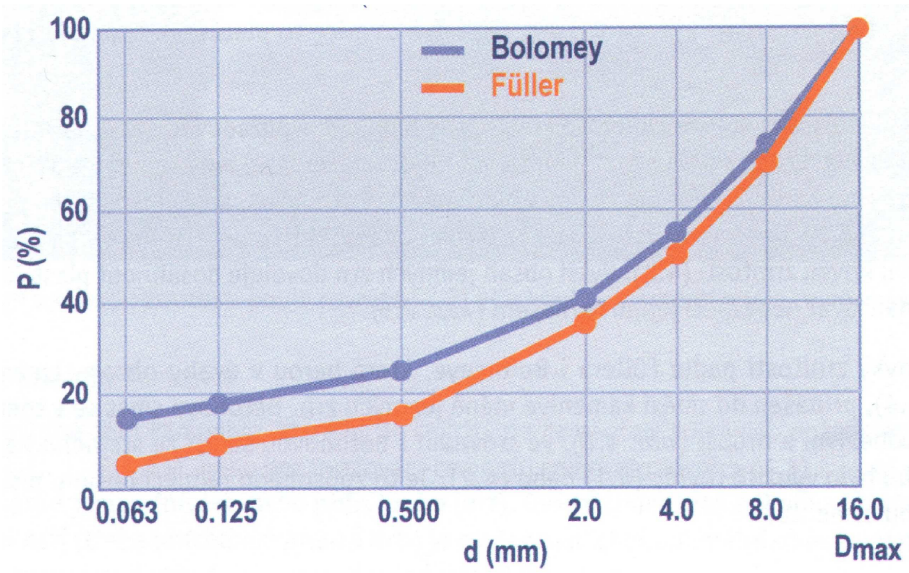
- Velikosti zrn:
    - Jemné částice: < 0,063 mm
    - Drobné kamenivo: 0,063 -4 mm
    - Hrubé kamenivo: 4 – 63 mm

Cementová pasta vyplňuje mezery mezi jednotlivými zrny kameniva. Proto je žádoucí, aby mezerovitost kameniva byla co nejmenší a tím bylo dosaženo pevné kostry z kameniva a menší spotřebě cementu. Toho lze dosáhnout použitím více frakcí kameniva, kdy jemnější zrna kameniva vyplňují mezery mezi hrubšími zrny. Třídění kameniva do jednotlivých frakcí probíhá přesíváním kameniva přes sadu sít, kde se zrna podobných velikostí zachytí na jednotlivých sítech. Tímto se rozdělí do samotných frakcí omezených velikosti otvorů spodního a horního síta, např. frakce 4/8 označuje zrna zachycená na sítu s otvory 4 mm, které se nachází pod sítem s otvory 8 mm. Pro dosažení minimálního objemu mezer mezi zrny (cement + kamenivo) slouží Füller-Thompsonův vztah:

$$P = 100\ (d/D_{max})^{1/2} \tag{2}$$

kde P je propad sítem o velikosti otvoru d

D_{max} je velikost maximálního zrna kameniva

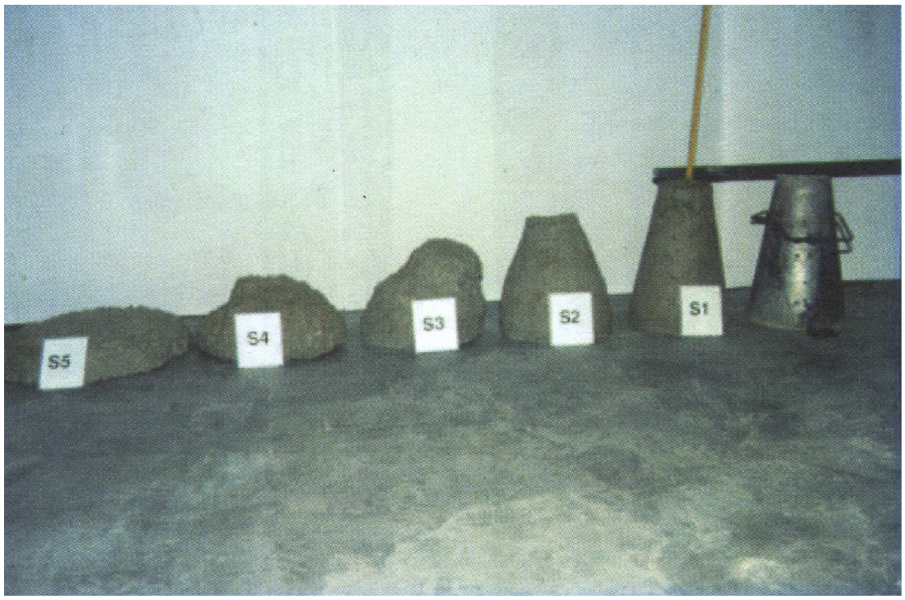


Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Füllerovy rovnice pro D_{max} = 16 mm [3]

Při použití vztahu (2) lze dosáhnout větších hodnot pevnosti a modulu pružnosti betonu. Na druhou stranu se zhoršuje zpracovatelnost čerstvého betonu z důvodu dosažení maximální hutnosti [15]. Proto se v praxi využívá spíše modifikovaná rovnice podle Bolomeye, která zvyšuje podíl menších frakcí, a tím zlepšuje zpracovatelnost. Dále má vliv na vlastnosti betonu především pevnost a modul pružnosti samotného kameniva, pórovitost a řada dalších věcí, jako jsou nečistoty na kamenivu, tvarový index zrn, obsah chloridů, síranů atd. [3], [16].

Zpracovatelnost je vlastnost čerstvého betonu se pohybovat a být zhutňován. Proto je potřeba při návrhu konstrukce specifikovat míru zpracovatelnosti tak, aby bylo možno čerstvý beton do bednění uložit a následně zhutnit (při silném vyztužení nebo složitých tvarech to může být docela obtížné). Pokud to zpracovatelnost betonu nedovolí, může se zásadně zhoršit spolupůsobení betonu s výztuží, pevnost v tlaku a celková trvanlivost betonu. Pro měření zpracovatelnosti existuje více metod, avšak nejpoužívanější je sednutí kužele dle normy ČSN EN 12350-2 [17]. Zkouška spočívá v naplnění formy, zvané Abramsův

kužel, čerstvým betonem a následnému změření poklesu výšky vzorku (po odebrání formy), viz Obr. 2.



Obr. 2 Sednutí kužele betonu s různou třídou konzistence (od S5 k S1) [3]

Další běžně používanou zkouškou, je zkouška rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 [18]. Tato zkouška se prováděla i v praktické části práce a probíhá naplněním kuželové formy čerstvým betonem na tzv. setřásacím stolku, následně se forma sejme a horní deska stolku se zvedne a nechá volně padnout. Provádí se celkem 15 rázů, po kterých se rozlitý beton změří ve dvou na sebe kolmých směrech (viz. Obr. 3) a poté se určí stupeň konzistence, dle tabulky v normě.

Obr. 3 Zkouška rozlitím

Pevnost je u betonu nejsledovanější mechanickou vlastností. Udává maximální hodnotu napětí, kterou je schopen přenést do okamžiku porušení. Prostý beton velmi dobře snáší tlakové namáhání, ale při ohybovém a tahovém namáhání je velmi slabý. Proto se pro prvky, které jsou namáhané ohybem nebo tahem, vyztužuje ocelovou výztuží, která tato namáhání přebere. Použití betonu a oceli společně je umožněno téměř stejným koeficientem teplotní roztažnosti obou materiálů [19]. Pevnost v tlaku se stanovuje podle normy ČSN EN 12390-3 [20], pevnost v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [21] a pevnost v příčném tahu podle ČSN EN 12390-6 [22] na zkušebních tělesech o rozměrech daných normou ČSN EN 12390-1 [23] a vyrobených a ošetřených podle normy ČSN EN 12390-2 [24]. U betonu se stanovují tyto čtyři druhy pevností:

- Pevnost v tlaku - f_c
- Pevnost v tahu - f_t
- Pevnost v tahu ohybem - f_{cf}
- Pevnost v příčném tahu - f_{ct}

Pevnost v tlaku se provádí dle normy ČSN EN 12390-4 [25]. Stanovuje se krychelná nebo válcová pevnost, podle tvaru zkušebního tělesa. Standardní válce o průměru podstavy 150 mm a výšky 300 mm vykazují nižší naměřené hodnoty pevnosti (přibližně 80 %) než krychle o hraně 150 mm. To je ovlivněno rozdílným poměrem výška/příčný rozměr, což ovlivňuje způsob porušení [3]. Pevnost se může stanovit i na vzorcích odebraných přímo z konstrukce pomocí vrtné soupravy. Rozměry těchto vzorků závisí na použité vrtné soupravě a hloubce vrtání, proto je nutné naměřenou pevnost upravit dle doporučených vztahů.

Vzorek se umístí mezi zatěžovací desky lisu a začne samotné zatěžování až do porušení vzorku. Pevnost v tlaku se určí z jednoduchého vztahu:

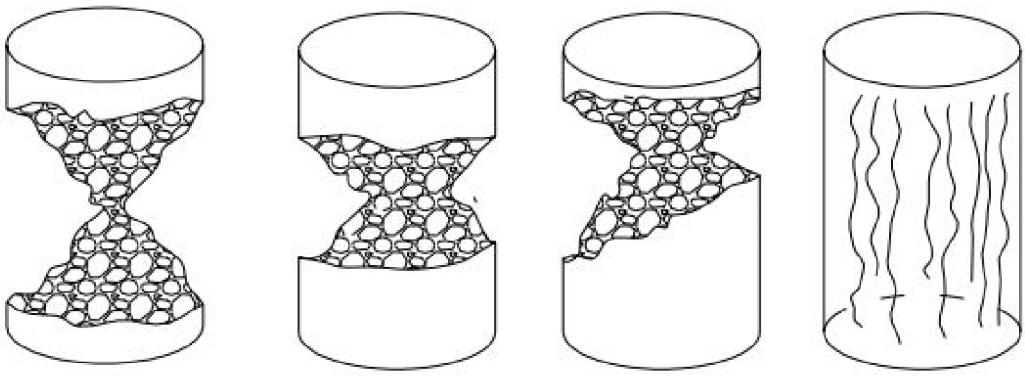
$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \tag{3}$$

kde f_c je pevnost v tlaku [MPa]

F_{max} je maximální zatěžovací síla odečtená z lisu [N]

A je zatěžovaná plocha vzorku [mm^2]

Správné porušení má tvar proti sobě směřujících komolých kuželů, či jehlanů (podle tvaru vzorku), které je zobrazeno na Obr. 4.



Obr. 4 Vyhovující porušení zkušebních válců [52]

Pevnost v tahu ohybem se provádí podle normy ČSN EN 12390-5 [21], na trámcích 150 × 150 × 700 mm nebo 100 × 100 × 400 mm. Trámce jsou zatěžovány ohybovým vyvozeným dvěma osamělými břemeny ve třetinách rozpětí trámce podepřeného na obou koncích. Při postupném zatěžování vznikají v horních vláknech trámce tlaková a ve spodních tahová napětí. Při vyčerpání tahové pevnosti vznikne při spodním okraji trhlina, která se rychle rozšíří po celé výšce hranolu. Trámec se zlomí v místě největšího ohybového momentu, tedy mezi břemeny. Pevnost v tahu ohybem se vypočte ze vztahu:

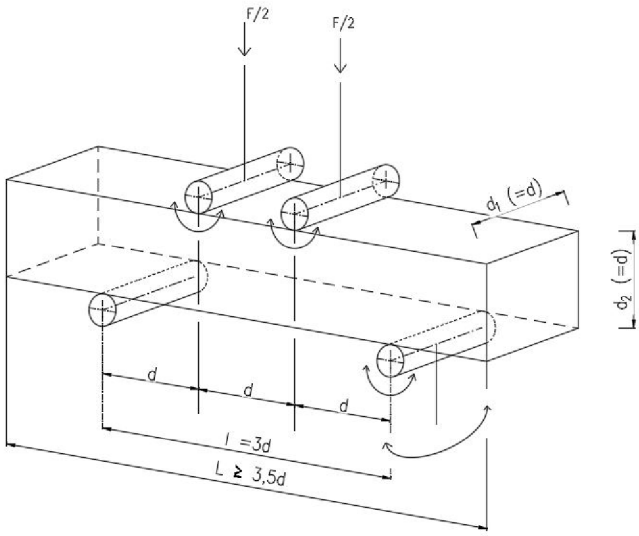
$$f_{fc} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \tag{4}$$

kde f_{fc} je pevnost v tahu ohybem [MPa]

F je maximální zatížení [N]

l je vzdálenost mezi podepřenými válečky [mm]

d_1 a d_2 jsou rozměry příčného řezu [mm]



Obr. 5 Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem [21]

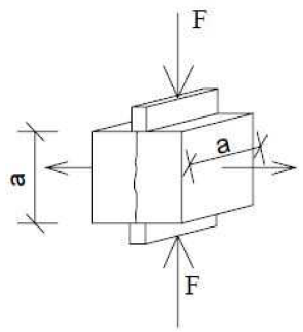
Pevnost v příčném tahu se zkouší dle normy ČSN EN 12390-6 [22]. Zjišťuje se tlakovým namáháním válců, krychlí nebo hranolů, přes úzké příložky. Jde o vyvození soustředěného namáhání, které uvnitř tělesa způsobí příčné napětí v tahu. Vzorek se poruší ve svislé ploše spojující obě tlačené příložky. Pevnost v příčném tahu se vypočte ze vztahu:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a^2} \tag{5}$$

kde f_{ct} je pevnost v příčném tahu [MPa]

F je maximální zatížení [N]

a délky stran porušené plochy [mm]



Obr. 6 Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu na krychli [22]

3.2 Lehký beton

Lehký beton je beton, jehož objemová hmotnost se pohybuje mezi 800 – 2000 kg/m^3, tedy je výrazně menší než u obyčejného betonu [26]. Objemová hmotnost běžného betonu je tak vysoká, že představuje významnou část zatížení betonových konstrukcí, proto může použití lehkého betonu být výhodné. Objemovou hmotnost lze snížit buď přímo vnesením vzduchu do cementového tmele pomocí pěnotvorných přísad, nebo nepřímo použitím lehkého pórovitého kameniva. Případně lze použít oba postupy [4]. Podle fyzikální struktury lehkého betonu, rozeznáváme tyto druhy [27]:

a) Lehké mezerovité betony
b) Lehké betony hutné
c) Lehké betony pórovité

Dále lehký beton dělíme do tříd podle objemové hmotnosti ρ v kg/m^3 [26] :

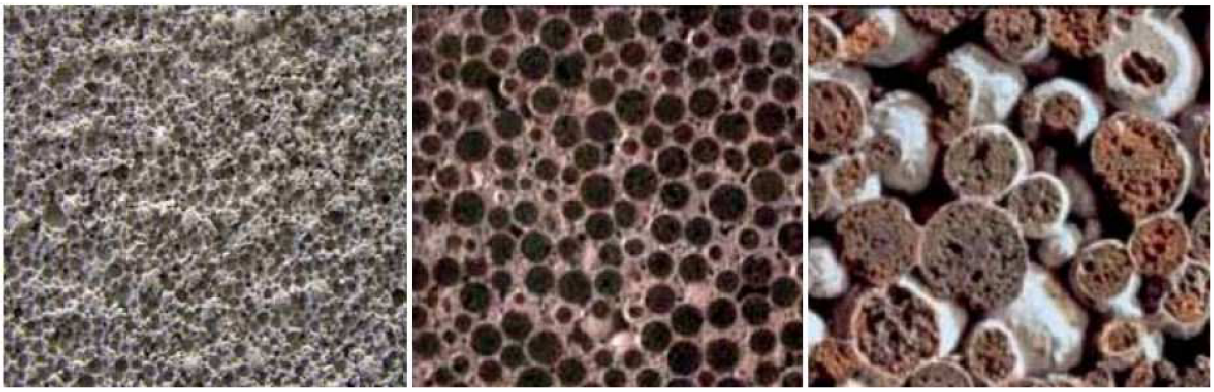
- LC 1,0 – $800 \leq \rho \leq 1000$
- LC 1,2 – $1000 < \rho \leq 1200$
- LC 1,4 – $1200 < \rho \leq 1400$
- LC 1,6 – $1400 < \rho \leq 1600$
- LC 1,8 – $1600 < \rho \leq 1800$
- LC 2,1 – $1800 < \rho \leq 2000$

Ad.: a) Mezerovitý lehký beton je tvořen pórovitým nebo hutným kamenivem a malé objemové hmotnosti je docíleno především pomocí zvýšené mezerovitosti kameniva. Zpravidla bývá použita pouze jedna frakce kameniva, které je obaleno cementovým tmelem. Jednotlivá zrna se spojují pouze bodové, vznikají mezi nimi četné vzduchové mezery, jako lze vidět na obrázku Obr. 7. Pevnost v tlaku takového betonu se v závislosti na použitém kamenivu pohybuje v rozmezí 1-10 MPa a objemová hmotnost mezi 500-1000 kg/m^3. Takový beton nachází využití

jako drenážní beton, díky četnému množství mezer. Dle normy ČSN EN 1520 [28] , lze mezerovité betony i vyztužovat, ale to pouze za předpokladu, že je zajištěna antikorozní ochrana výztuže a je omezena využitelná pevnost oceli [29], [27].

Ad.: b) Snížení objemové hmotnosti u hutného betonu je docíleno použitím pórovitého přírodního či umělého kameniva. Tyto betony se využívají obdobně, jako obyčejné betony. Oproti mezerovitým betonům nejsou mezi zrny přítomny vzduchové mezery, zrna jsou tedy spojena prakticky téměř hutnou maltou (viz. Obr. 7). Pevnost v tlaku u těchto betonů může nabývat značně vysokých hodnot, což lze vidět v Tab. 1, uvedené v normě ČSN EN 206-1+A1 [26]. Na základě dosahovaných pevností je vhodný pro použití v běžně vyztužených i předpjatých konstrukcích a zároveň přináší výhodu ve snížení vlastní tíhy konstrukce. Zvýšenou pozornost je ale třeba věnovat některým odlišným vlastnostem oproti obyčejnému betonu, jako jsou složitější technologické procesy výroby, obtížnější zpracovatelnost a nižší dosahované moduly pružnosti. Tyto faktory budou dále podrobněji popsány v této práci [3], [27], [26].

Ad.: c) Lehké pórovité betony jsou přímo vylehčené póry v jemnozrnné maltě. Tyto póry mohou být vytvořeny pomocí pěnotvorné přísady nebo chemickou

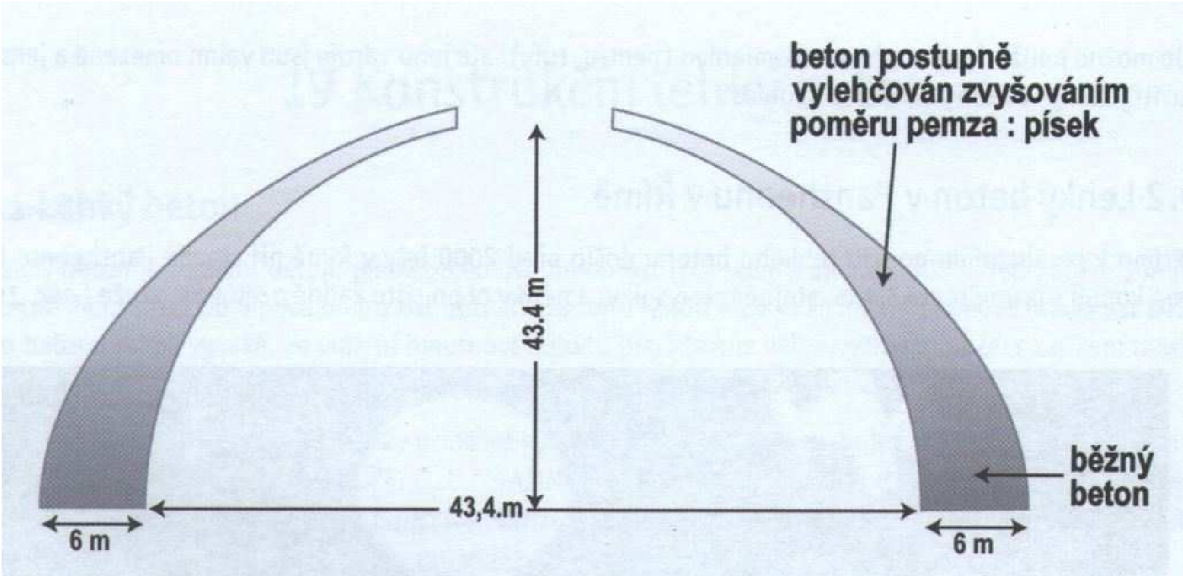


Obr. 7 Struktury lehkých betonů- zleva pórovitý, hutný, mezerovitý [4]

reakcí přísady plynotvorné. Struktura tohoto betonu, často označovaného jako pórobeton, lze vidět na Obr. 7 Struktury lehkých betonů- zleva pórovitý, hutný,

mezerovitý . Tento beton slouží výborně pro výrobu lehčených betonových tvárnic pro zdění [27].

Historie lehkých betonů sahá do dávných dob. Římané z něj realizovali mnoho významných staveb, ale přímo revoluční byla jejich aplikace lehkého betonu při stavbě Pantheonu v Římě, který má kopuli o průměru a výšce 43,4 m z prostého lehkého betonu. Úspěšná technologie její stavby je založena na dvou geniálních myšlenkách. Obě se týkají vylehčení klenby a to, že s výškou klenby snižovali průřez stěny a zároveň zvětšovali poměr pemzy vůči písku v betonu [3].



Obr. 8 Průřez kopulí Pantheonu [3]

LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

V dnešní době je lehký beton stále častěji používán jako konstrukční beton, oproti dobám minulým, kdy byl využíván především jako izolační či výplňový materiál. Tento fakt je dán pokročilou technologií, jak výroby umělého kameniva, tak samotného betonu. Lehký beton je úspěšně využíván pro výrobu prefabrikovaných dílců, kde přináší redukci hmotnosti dílců a tím snižuje náklady na dopravu a montáž dílců. Největší výhodou lehkých betonu je bezesporu snížená

objemová hmotnost, díky které snižuje zatížení konstrukce vlastní tíhou a to může mít za následek redukci průřezů prvků, či menší nároky na základové konstrukce. Další vhodnou aplikací konstrukčního lehkého betonu je při budování dodatečných podlaží na stávajících budovách. Lehký beton disponuje zvýšenou odolností proti mrazu, zapříčiněnou přítomností pórů kameniva, které slouží jako expanzní prostor pro zvětšující se objem zamrzající vody. Tato vlastnost je velmi žádaná u dopravních staveb, proto jsou lehké betony hojně využívány v mostním stavitelství, kde jsou lídry v této oblasti v Evropě bezesporu Skandinávské země a dále Severní Amerika. Důležitým aspektem lehkých betonů je vyšší trvanlivost. Toto zlepšení trvanlivosti může být způsobeno určitou pucolánovou aktivitou kameniva. Zajímavým jevem u lehkých betonů je takzvané samoošetřování, které je zapříčiněno nasákavostí pórovitého kameniva, kdy voda obsažená v kamenivu doplňuje vodu spotřebovanou při hydrataci cementu a působí jako ošetřovací voda uvnitř betonu [4], [1].

V povědomí je nutné brát nasákavost kameniva, která může způsobit komplikace při míchání a zpracovávání betonu. Pokud není kamenivo dostatečně nasycené vodou, tak může odebírat vodu z cementové pasty a tím výrazně zhoršovat zpracovatelnost směsi. Velké problémy mohou nastat při čerpání betonu, pokud je kamenivo nedostatečně nasycené. V takovém případě velký tlak při čerpání směsi vtlačuje vodu do pórů kameniva, čímž dochází ke zhoršení pohyblivosti a zpracovatelnosti betonu a může vést k ucpání čerpadla. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat nižším hodnotám modulu pružnosti oproti obyčejnému betonu stejné pevnosti [4].

3.3 Lehké kamenivo

V počátcích historie lehkých betonů, se používalo výhradně lehké přírodní kamenivo, jako je pemza, tufy, škváry a podobně. Tedy především kamenivo sopečného původu. Zdroje těchto minerálů jsou ovšem dostupné jen ojediněle a jsou snadno vyčerpatelné. I přesto se lehké kamenivo, konkrétně pemza, v dnešní sobě stále používá v Itálii, Německu, Japonsku a na Islandu. Z těchto důvodů se začalo na počátcích 20. století experimentovat s výrobou umělého lehkého kameniva. V roce 1918 si Stephen J. Hayde nechal patentovat první umělé kamenivo, na bázi expandace břidlic, s obchodním názvem Haydite. Toto kamenivo se dodnes v USA vyrábí. Na území Evropy byla první výroba umělého kameniva zavedena v Německu v letech 1935 – 1939, výrobu a aplikaci však provázela řada potíží. Proto se za prvního výrobce lehkého kameniva považuje Dánsko, kde byla v roce 1939 spuštěna výroba kameniva, na bázi expandovaného jílu, s názvem Leca, které se dodnes vyrábí. Za zmínku stojí i vývoj technologií pro výrobu umělého kameniva v Rusku, kde profesor Kostyrko spustil výzkum již v roce 1930. V dalších desetiletích byly na území Ruska postaveny stovky výroben, ale z důvodu nízké reálné efektivity výroby jich k dnešní době, zůstalo aktivních jen zlomek. Nicméně právě zde bylo, umělé kamenivo na bázi expandovaných jílu, nazváno Keramzit. Na území tehdejšího Československa byly vybudovány dva závody v Bratislavě a ve Vintířově v letech 1955 a 1964 [4].

Lehké kamenivo je definováno normou ČSN EN 13055 [30] jako kamenivo, jehož objemová hmotnost ve vysušeném stavu nepřesahuje 2000 kg/m^3 a sypná hmotnost 1200 kg/m^3. Lehké kamenivo se dělí na:

- Přírodní
- Umělé

Přírodní lehké kamenivo, které se používá pro výrobu lehkého betonu, je převážně vulkanického původu a získává se těžením a následným drcením a tříděním se rozdělí na jednotlivé frakce. Mezi nejvýznamnější kameniva sopečného původu patří tufy, pemzy a přírodní škvára. Tyto přírodní kameniva jsou známa

jako aktivní pucolánový materiál. Reagují tedy při zrání betonu s hydroxidem vápenatým a vytvářejí CSH produkty, to má příznivý vliv na především na životnost betonu. Mezi přírodní lehká kameniva se řadí i křemelina, což je zpevněná zemina tvořená sedimentovanými křemičitými schránkami jednobuněčných rozsivek. V některých zemích, jako je Malajsie, Indonésie a Nigérie, jsou jako přírodní kamenivo používány zemědělské odpady, např. skořápky palmových ořechů [4], [29].

Obr. 9 Zleva: pemza, škvára, tuf [54], [55], [56]

Umělé pórovité lehké kamenivo vzniklo především kvůli poptávce po lehkém kamenivu v místech, kde se přírodní kamenivo tohoto typu nevyskytovalo. Vyrábí se nejčastěji tepelným zpracováním [4]:

- Přírodních materiálů
- Průmyslových produktů
- Průmyslových vedlejších produktů

Přírodními materiály, které se nejčastěji využívají pro výrobu umělých kameniv, jsou jíly, břidlice, vermikulity a perlity. Jíly se zpracovávají do formy malých kuliček, které se následně vypalují za vysokých teplot, při kterých expandují a tím snižují svojí objemovou hmotnost. Takto vyrobené kamenivo se běžně nazývá Keramzit a u nás se prodává pod obchodním názvem Liapor. Díky výpalu za vysokých teplot, může toto kamenivo vykazovat jistou pucolánovou aktivitu a tím zlepšovat trvanlivost betonu. Dalším materiálem, který se používá pro výrobu je břidlice, ta

se nejprve předdrcuje a třídí na frakce, následně probíhá vypalování, při kterém rovněž expanduje. Toto kamenivo se nazývá Expandit. U Perlitu při výpalu vznikají páry z vody, která je v nich obsažená, což způsobuje značné nadýmání horniny. Vermikulit se za vysokých teplot rozlístkovává. U posledních dvou metod, se výrobky nazývají stejně, jako vstupní surovina [27], [3].

Z průmyslových produktů se nejčastěji vyrábějí kameniva na bázi expandovaného skla. Sklo se používá recyklované a vzniklé kamenivo obsahuje převážně uzavřené póry, tudíž jeho nasákavost je relativně nízká, oproti ostatním lehkým kamenivům. Mezi nejznámější, tímto postupem vyrobená kameniva, patří Technopor, Liaver, Poraver a Refaglass.

Mezi kameniva z průmyslových odpadů patří strusky a škváry. Ty vznikají při tavícím, respektive spalovacím procesu a jsou tvořeny roztavenými minerálními zbytky ze vstupních surovin. Jako odpadové lehké kamenivo lze zařadit i cihelnou drť, či Cihloporit. Dále se potom vyrábí popílkový Agloporit, který se vyrábí z popílku především z energetického průmyslu. Z popílků se nejprve na sbalkovacích talířích vytvoří sbalky, u kterých se následně na aglomeračních roštech zahájí krátkodobý samovýpal, díky obsahu jistého množství spalitelných látek, při kterém slinují. Při výrobním procesu se tedy zpracovává odpadní materiál a zároveň se získává energie v podobě tepla. Obecně jsou kameniva z této kategorie šetrnější k přírodě, protože se zpracovávají odpadní materiály a jejich výroba se nevyznačuje vysokou spotřebou tepelné energie, jako to je v případě ostatních kategorií [2], [27], [31].

Umělá lehká kameniva lze vyrábět i bez tepelného zpracování, takovým představitelem jsou např. za studena sbalkovaná popílková kameniva Aardelit z Holandska. Dále se používá granulát z expandovaného polystyrenu, či recyklát z lehkého betonu [4].

Obr. 10 Zleva: Agloporit, Poraver, Liapor [57], [58], [59]

Nejdůležitější vlastností lehkého kameniva je jeho nízká objemová hmotnost, velmi důležité jsou ale i další charakteristiky jako pevnost a nasákavost, které se mohou napříč jednotlivými druhy výrazně lišit. Důležitá je rovněž distribuce a velikost maximálního zrna kameniva, ta se doporučuje 8 mm, větší zrna výrazně snižují pevnost betonu a díky rozdílné objemové hmotnosti jednotlivých složek, mohou způsobovat segregaci kameniva. Pro optimální složení lehkého konstrukčního betonu se doporučuje kombinovat přírodní písek frakce 0 – 4 mm s lehkým kamenivem 4 – 8 mm. U lehkého kameniva je totiž jemná frakce kameniva 0 – 1 mm dosažitelná pouze v drcené formě a to má pak nežádoucí vlastnosti [4].

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, důležitou vlastností lehkých kameniv je jejich nasákavost. Ta je ovlivněna druhem pórovitosti kameniva, kamenivo na bázi spékaných popílků má vyšší procento vzájemně spojených pórů než kamenivo na bázi expandovaných jílů. Kamenivo na bázi expandovaného skla obsahuje zejména uzavřené póry, jeho nasákavost je tedy pouze povrchová. Tyto rozdílnosti je třeba brát na vědomí, protože vyšší nasákavost některých kameniv může odebrat znatelnou část vody z čerstvého betonu a tím zhoršit jeho

zpracovatelnost i vlastnosti ztvrdlého betonu. Tomu lze předejít buď dodáním přídavné vody anebo předvlhčením, či máčením kameniva před samotnou výrobou betonu. Dále vyšší nasákavost výrazně prodlužuje dobu vysychání betonu. Vysoká nasákavost může mít vliv i na standartní hmotnostní dávkování kameniva při výrobě betonu. Je nutné tedy vlhkost lehkého kameniva kontrolovat častěji, než vlhkost obyčejné kameniva. Rozptyl objemových hmotností téhož lehkého kameniva bývá zpravidla docela velký, výrobce většinou deklaruje odchylku objemových hmotností až ± 15%, z tohoto i předchozí důvodu, je vhodné místo hmotnostního dávkování uplatňovat dávkování objemové [4], [3], [1].

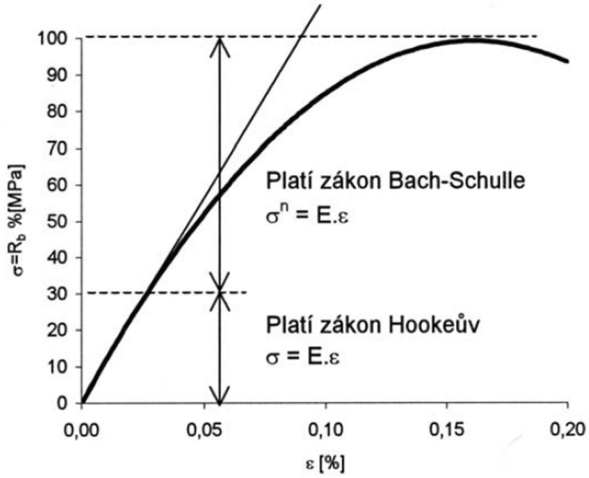
Lehká kameniva dosahují spíše nižších pevností a je potvrzeno, že jako primární faktor omezují možnosti dosažení horní meze pevnosti. Neblahý vliv mají i na výsledný modul pružnosti betonu. I přes tyto fakta lze vyrobit z lehkých kameniv vysokohodnotný beton, který dosahuje pevnosti v tlaku okolo 100 MPa [2].

Liapor je jedno z nejpoužívanějších lehkých kameniv v České republice. Závod na výrobu Liaporu se nachází ve Vintířově u Karlových Varů. Název kameniva je odvozen ze dvou slov. První slovo je Lias, tak se označuje druhohorní období 175 – 200 miliónu let před naším letopočtem. Právě v tomto období se usazovaly jíly, z kterých se Liapor vyrábí. Druhé část názvu je odvozena od pórovitého struktury materiálu. Dříve se pro toto kamenivo používal název Keramzit [32].

Lehké keramické kamenivo Liapor je vyráběno plastickým postupem. Vytěžený jíl je v několika stupních drcen a plastifikován. Při tomto procesu se zpracuje do tvaru granulí (perel). Následně prochází rotační pecí, kde při teplotě přibližně 1150 °C expanduje. Poté je granulát zchlazen a pokračuje na třídící linku, kde je roztříděn na úzké a široké frakce. Takto vyrobené kamenivo je skladováno v uzavřených silech, pro zachování jeho minimální vlhkosti [33].

3.4 Modul pružnosti

Modul pružnosti *E* je základní charakteristikou betonu. Popisuje pružné chování materiálu při působení napětí. Závislost napětí na přetvoření je u betonu lineární přibližně do 30 % pevnosti betonu, po překročení tohoto napětí začínají v betonu vznikat trhlinky a projevují se trvalé deformace. Průběh napětí a



Obr. 11 Deformační diagram betonu v tlaku [13]

deformací se znázorňuje deformačními a pracovními diagramy betonu [13].

Na Obr. 11 je deformační diagram betonu v tlaku. V jeho lineární (pružné) oblasti platí Hookův zákon, který je definován jako:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{6}$$

kde ε je poměrné přetvoření [-]

σ je napětí [MPa]

E je modul pružnosti [GPa]

Modul pružnosti víceméně vyjadřuje tuhost materiálu – platí, že čím vyšší modul pružnosti, tím menší deformační změny. Pro ověřování deformací, dotvarování, smršťování, rozdělení vnitřních sil na staticky neurčitých konstrukcí

atd. je nutné znát jeho hodnotu. Stanovení správné hodnoty modulu pružnosti je pro navrhování konstrukcí z betonu velmi důležité. Dle normy ČSN EN 1992-1-1 [34] lze podle vztahu (7) stanovit hodnotu modulu pružnosti v závislosti na pevnostní třídě betonu.

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \tag{7}$$

kde E_{cm} je sečnový modul pružnosti [GPa]

f_{cm} je průměrná hodnota válcové pevnosti v tlaku vyjádřená jako $f_{cm} = f_{ck} + 8$ [MPa]

f_{ck} je charakteristická válcová pevnost v tlaku ve stáří 28 dní [MPa]

Tímto vztahem lze získat pouze orientační hodnota, protože modul pružnosti ovlivňuje mnohem více aspektů než samotná pevnost betonu v tlaku. Modul pružnosti sice většinou roste s pevností betonu, kterou určuje především vodní součinitel, ale rozhodně se nejedná o obecné pravidlo – významnější vliv má např. použité kamenivo. Kamenivo tvoří většinovou část objemu betonu, proto mají jeho parametry zásadní vliv na modul pružnosti. Výsledný modul pružnosti do značné míry závisí na modulu pružnosti kameniva. Podle ČSN EN 1992-1-1 [34] se má hodnota E_{cm} pro vápencové či pískovcové kamenivo snížit o 10 %, resp. 30 % oproti běžnému silikátovému kamenivu. Pro čedičové kamenivo naopak zvýšit o 20 %. Moduly pružnosti betonů stejných pevností mohou tedy nabývat až nebývalých rozdílů v závislosti na použitém kamenivu [16]. Mezi další aspekty, které mohou ovlivňovat hodnotu modulu pružnosti, patří vlastnosti cementu, tvarový index kameniva, křivka zrnitosti, míra zhutnění a pórovitosti a způsob ošetřování a stáří betonu. Proto se stanovuje přesný statický modul pružnosti z vyrobených či odebraných těles, nebo dynamický modul pružnosti přímo z konstrukce.

Modul pružnosti je hlavní parametr pro stanovení deformací betonových konstrukcí. Vliv modulu pružnosti na deformace konstrukcí je významnější u předpjatých konstrukcí než u železobetonových. A to především z důvodu působení, téměř vždy celého betonového průřezu při mezním stavu použitelnosti na rozdíl od železobetonových konstrukcí, u kterých průřez zásadně ovlivňují trhliny. Stanovení správného modulu pružnosti pro předpjaté konstrukce je proto zcela stěžejní [35].

3.5 Stanovení modulu pružnosti

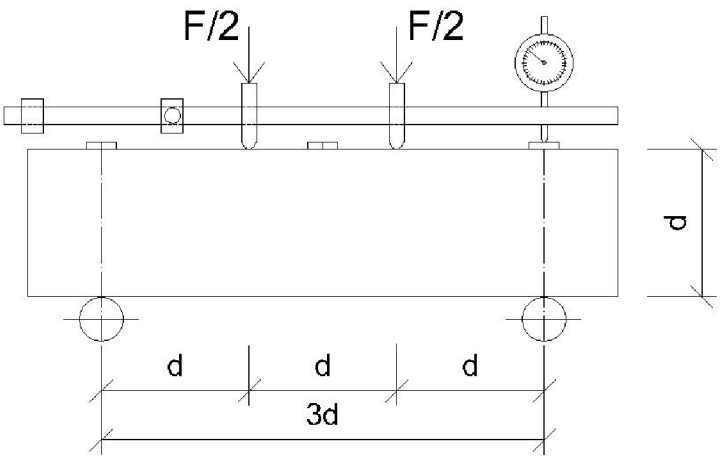
Modul pružnosti betonu lze stanovit pomocí destruktivních i nedestruktivních metod. Metodami destruktivními se měří statický modul pružnosti a metodami nedestruktivními dynamický modul pružnosti. Destruktivní metody jsou:

- Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahu ohybem dle ČSN 73 6174 [36]
- Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-13 [11]
- Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku dle ISO 1920-10 [10]
- a další, bez opory v platných normách (např. z lomových testů)

Nedestruktivní metody jsou:

- Stanovení modulu pružnosti rezonanční metodou dle ČSN 73 1372 [37]
- Stanovení modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou dle ČSN 73 1371 [38]
- a další, bez opory v platných normách (např. pomocí metody impact-echo)

Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahu ohybem podléhá metodice uvedené v normě ČSN 73 6174 [36]. Metoda spočívá v zatížení zkušebního tělesa tzv. čtyřbodovým ohybem a měřením průhybu tělesa, schéma zkoušky na Obr. 12.



Obr. 12 Schéma měření modulu pružnosti zkouškou v tahu ohybem [36]

Zkušební těleso se osadí měřícím rámečkem s digitálním úchylkoměrem. Následně se zatěžuje silou F_1, která vyvozuje napětí v tahu ohybem σ_1 o hodnotě 0,1 R_j (pevnosti v tahu ohybem) a stanoví se celkový průhyb $s_{tot,1}$. V dalším kroku se těleso zatíží silou F_2, která je rovná 2 x F_1 a určí se celkový průhyb $s_{tot,2}$. Poté se zatížení sníží na F_1 a určí se pružný průhyb $s_{t,2}$. Tento postup se opakuje se silami F_3 až F_n, které jsou obvykle násobky síly F_1. Při zatěžování se vždy měří celkový průhyb a při odtěžování pružný průhyb. Modul pružnosti se stanoví ze vztahu [36]:

$$E = \frac{F \cdot l}{f_e \cdot b \cdot h}\left(0{,}213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0{,}46\right) \tag{8}$$

kde E je statický modul pružnosti [Pa]

F je zatížení vzorku [N]

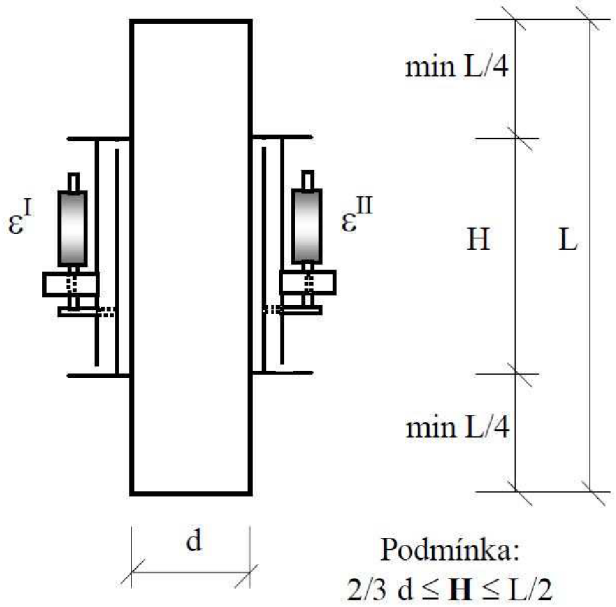
f_e je celkový pružný průhyb tělesa [m]

b, h jsou příčné rozměry tělesa [m]

l *je* vzdálenost podpor [m]

Tato metoda se v praxi již příliš nepoužívá, zejména kvůli složitému postupu zkoušky a nadhodnoceným výsledkům zkoušky. To je způsobeno vstupem Poissonova součinitele s hodnotou 0,15 do výpočtu. Tato hodnota neodpovídá moderním betonům a nelze ji ve výpočtu upravit [39].

Používanější metodou je stanovení statického modulu pružnosti v tlaku podle normy ČSN ISO 1920-10 [20] nebo podle normy ČSN EN 12390-13 [11]. Zkouška spočívá v měření hodnot poměrného přetvoření zkušebního tělesa při zatěžování v jeho pružné oblasti. Zkušební tělesa mohou být válce, krychle nebo jádrové vývrty splňující požadavky normy ISO 1920-3 [40] nebo ISO 1920-6 [41]. Poměr délky *L* ku příčnému rozměru *d* by měl být v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$ a příčný rozměr *d* by měl být aspoň 4 krát větší než maximální velikost zrna kameniva D_{max}. Doporučují se válcová zkušební tělesa o průměru 150 mm a délce 300 mm. Pevnost v tlaku f_c se stanoví na srovnávacích tělesech, nejlépe stejných rozměrů jako mají tělesa pro stanovení statického modulu pružnosti, v souladu s normou ISO 1920-4 [42]. Z pevnosti v tlaku se určí horní hodnota napětí rovna $f_c/3$ používaná pro stanovení modulu pružnosti. Zatěžování se provádí na lisech vyhovujících ČSN EN 12390-4



Obr. 13 Umístění měřícího zařízení na zkušebním tělese [52]

[25] a na tělesech opatřených přístroji měřícími přetvoření tělesa. Přístroje pro měření délkových změn musí mít délku měřící základny *H* větší než *2/3 d* a menší než *L/2*. Vzdálenost od čel tělesa musí být nejméně *L/4.*

Přístroje pro měření délkových změn musí být umístěny alespoň na dvou protilehlých stranách a před provedením samotné zkoušky je nutno zkontrolovat, jestli se naměřené deformace na jednotlivých přístrojích neliší o více jak 20 % od jejich průměru. Pokud ano, je nutno upravit polohu tělesa v lisu.

Podle normy ISO 1920-10 [10] se zkušební tělesa mají zatěžovat a odtěžovat konstantní rychlostí 0,2 – 0,6 MPa/s. Zkušební těleso se nejprve zatíží základním napětím σ_b, které se drží po dobu 60 s, následně se konstantní rychlostí přitíží na horní mez napětí σ_a, které se opět udržuje 60 s. Následuje odtížení na základní napětí a proces se opakuje. Celkově se provádí tři zatěžovací cykly, přičemž u posledního cyklu se sledují míry poměrné deformace při spodní a horní mezi napětí ε_b a ε_a. Hodnota modulu pružnosti se následně vypočte ze vztahu:

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \tag{9}$$

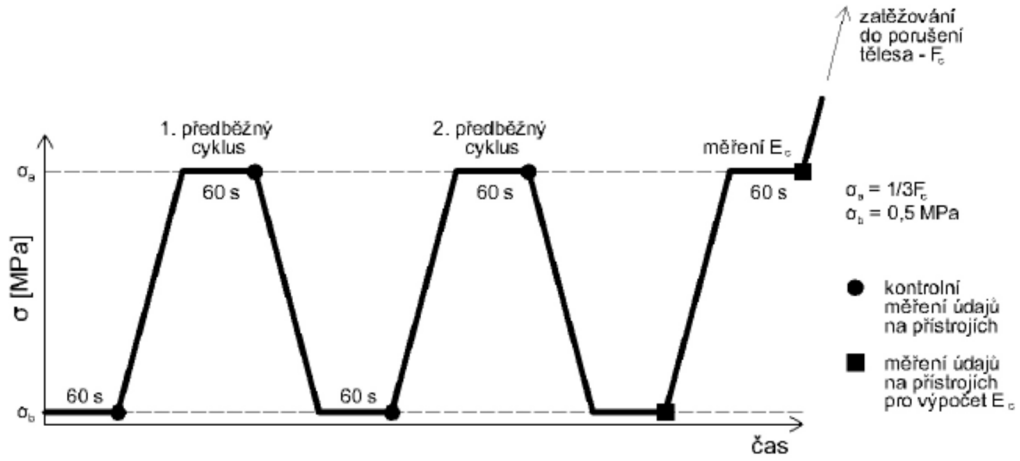
kde E_c je statický modul pružnosti [MPa]

σ_a je horní mez napětí [MPa]

σ_b je základní (spodní) mez napětí [MPa]

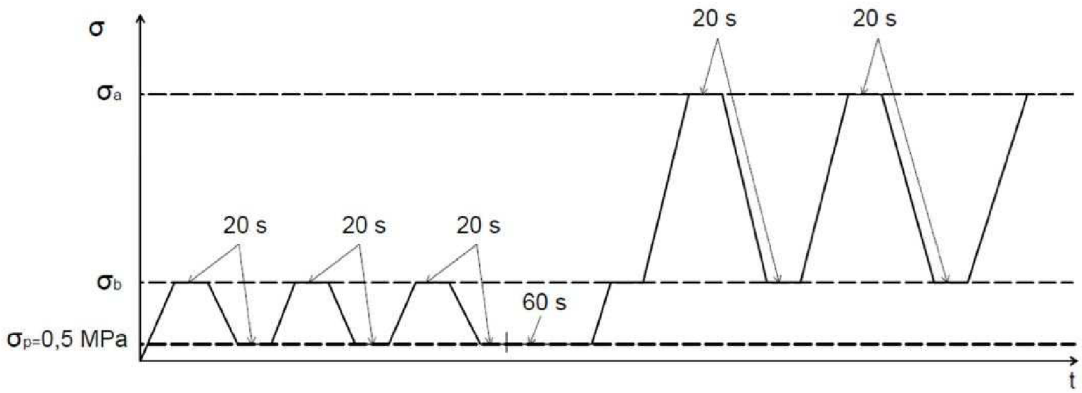
ε_a je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_a u třetího cyklu [-]

ε_b je je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_b po druhém cyklu [-]



Obr. 14 Průběh zatěovacích cyklů, podle normy ISO 1920-10 [10], [60]

Podle 12390-13 [11] se zkušební tělesa musí vždy zatěžovat a odtěžovat konstantní rychlostí (0,6 ± 0,2) MPa/s. Podle metody A se touto rychlostí nejprve zkušební těleso zatíží na hodnotu σ_b, která je v rozmezí $0{,}1\, f_c \leq \sigma_b \leq 0{,}15\, f_c$, po dobu menší než 20 s. Poté se těleso odtíží na základní napětí σ_p, rovno 0,5 MPa, na kterém opět setrvá nejdéle 20 s. Po tomto cyklu se vynuluje měřící zařízení a následně se cyklus ještě dvakrát zopakuje. Při druhém a třetím zatěžovacím cyklu se při napětí σ_b zaznamená poměrná deformace ε_b. Po těchto třech cyklech se vzorek ponechá dalších 60 s při základním napětím σ_p, což slouží ke kontrole, zda



Obr. 15 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody A *[11], [53]*

není rozdíl změřených deformacích druhého a třetího cyklu větší než 10 %. Pokud není, zkouška může dále pokračovat.

Na Obr. *15* je postup zatěžování zkušebního tělesa. Následují tři zatěžovací cykly, ze kterých se stanoví sečnový modul pružnosti. Nejprve se konstantní rychlostí vzorek zatíží na hodnotu σ_b po dobu nejdéle 20 s a zaznamená se příslušná deformace $\varepsilon_{b,0}$. Poté se napětí zvýší na hodnotu σ_a, která se rovná $f_c/3$ po dobu menší než 20 s. Následně se těleso odtíží na napětí σ_b. Tento cyklus se opakuje ještě dvakrát, přičemž u prvního a třetího cyklu se při napětí σ_a zaznamená hodnota přetvoření $\varepsilon_{a,1}$ a $\varepsilon_{a,3}$. Po druhém cyklu se při napětí σ_b stanoví hodnota deformace $\varepsilon_{b,2}$. Poté se vzorek zatěžuje až do porušení, pro stanovení pevnosti v tlaku. Ta by se neměla lišit o více než 20 % oproti zjištěné pevnosti f_c na srovnávacích tělesech. Modul pružnosti se určí ze vztahu:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \tag{10}$$

kde $E_{c,s}$ je sečnový modul pružnosti [MPa]

$\Delta\sigma$ je rozdíl napětí σ_a a σ_b [MPa]

$\Delta\varepsilon_s$ je rozdíl poměrných přetvoření $\varepsilon_{a,3}$ a $\varepsilon_{b,2}$ [-]

σ_a je zatěžovací hodnota horního napětí (odečtená z lisu) [MPa]

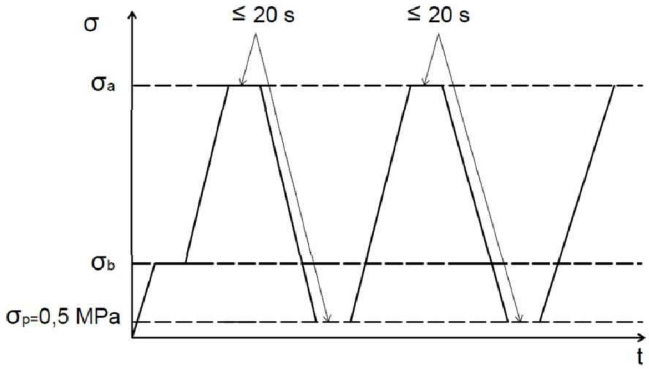
σ_b je zatěžovací hodnota napětí (odečtená z lisu) [MPa]

$\varepsilon_{a,3}$ je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_a u třetího cyklu [-]

$\varepsilon_{b,2}$ je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_b po druhém cyklu [-]

Metoda A je oproti metodě B složitější na provedení a výsledné hodnoty statického sečnového modulu pružnosti jsou nadhodnocené oproti metodě B i oproti původní normě ČSN ISO 6784 [43] (více na toto téma viz článek [39]).

Metoda B spočívá ve třech zatěžovacích cyklech. Nejprve se těleso zatíží konstantní rychlostí na základní napětí σ_p, rovno 0,5 MPa, na které setrvá po dobu



Obr. 16 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody B [11], [53]

menší než 20 s. Na konci této doby je nutno vynulovat měřící zařízení. Následně se vzorek zatíží na horní napětí σ_a, které se rovná $f_c/3$, po dobu nejvíce 20 s. Při tomto napětí se zaznamená deformace $\varepsilon_{a,1}$. Poté se těleso odtíží na napětí σ_p a zjistí se deformace $\varepsilon_{p,1}$.

Následují ještě dva zatěžovací cykly, při kterých se vždy zaznamená hodnota deformace při horním i při základním napětí. Pokud se naměřené hodnoty deformací liší o více jak 10 %, musí se zkouška opakovat. Těleso se po naměření všech hodnot zatíží až do porušení pro stanovení pevnosti v tlaku, která by se neměla lišit o více než 20 % od stanovené f_c. Statický sečnový modul pružnosti se stanoví ze vztahu:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \tag{11}$$

kde $E_{c,s}$ je sečnový modul pružnosti [MPa]

$\Delta\sigma$ je rozdíl napětí σ_a a σ_p [MPa]

$\Delta\varepsilon_s$ je rozdíl poměrných přetvoření $\varepsilon_{a,3}$ a $\varepsilon_{b,2}$ [-]

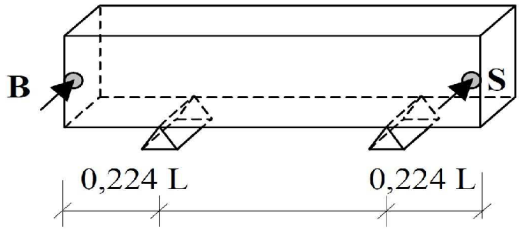
σ_a je zatěžovací hodnota horního napětí (odečtená z lisu) [MPa]

σ_p je zatěžovací hodnota základního napětí (odečtená z lisu) [MPa]

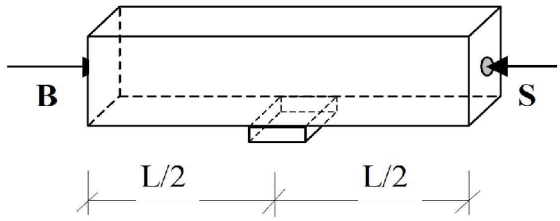
$\varepsilon_{a,3}$ je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_a u třetího cyklu [-]

$\varepsilon_{p,2}$ je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_p po druhém cyklu [-]

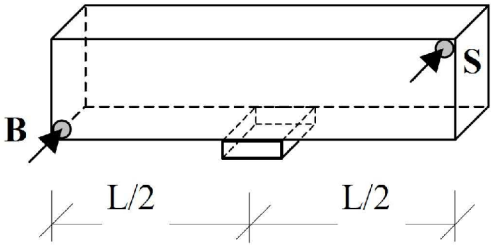
Rezonanční metoda popsaná v normě ČSN 73 1372 [37] spočívá v měření vlastních frekvencí kmitání zkušebního tělesa. Zpravidla se používají tělesa ve tvaru hranolů nebo válců s délkou nejméně dvakrát větší než jejich příčný rozměr. Zkušební těleso se uloží na pružný podklad upravený tak, aby neomezoval pohyb vzorku při jeho kmitání a aby jeho vlastní kmitočet byl mimo rozsah kmitočtů vzorku. Následně se do zkušebního tělesa vnese mechanický impulz a snímačem



Obr. 17 Poloha snímače a budiče pro příčné kmitání [52].



Obr. 18 Poloha snímače a budiče pro podélné kmitání [52].



Obr. 19 Poloha snímače a budiče pro kroutivé kmitání [52].

měřicího přístroje se v místech daných Obr. 17,11,12 změří vlastní frekvence tělesa. Podle poloh snímače a budiče frekvencí rozlišujeme naměřené kmitání na podélné, příčné a kroutivé.

Snímač zaznamená průběh kmitání zkušebního tělesa, přičemž frekvence s největší amplitudou je vlastní frekvence tělesa. Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu při podélném kmitání se stanoví ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \tag{12}$$

kde E_{crL} je dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu [MPa]

L je délka zkoušeného tělesa [m]

f_L je první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa [kHz]

ρ je objemová hmotnost betonu [kg·m^{-3}]

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu při příčném kmitání se stanoví ze vztahu:

$$E_{crf} = 0{,}0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \frac{1}{i^2} \tag{13}$$

kde E_{crf} je dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu [MPa]

c_1 je korekční součinitel podle tab. 2 v normě ČSN 73 1372 [37] [-]

L je délka zkušebního tělesa [m]

f_f je první vlastní kmitočet příčného kmitání zkušebního tělesa [kHz]

ρ je objemová hmotnost betonu [kg·m^{-3}]

i je poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušebního tělesa k ose kolmé na rovinu kmitání [m]

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku se stanoví ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \tag{14}$$

kde G_{cr} je dynamický modul pružnosti betonu ve smyku [MPa]

k je součinitel charakterizující příčný tvar tělesa [-]

L je délka zkušebního tělesa [m]

f_t je první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušebního tělesa [kHz]

ρ je objemová hmotnost betonu [kg·m^{-3}]

Další možností, jak stanovit dynamický modul pružnosti, je zkoušením betonu ultrazvukovou impulzovou metodou dle normy ČSN 73 1371 [38]. Metoda se zakládá na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového (dále UZ) vlnění v betonu.

Měří se doba průchodu UZ vlnění betonem, ze kterého se následně pomocí vztahu (15) stanoví rychlost šíření UZ vlnění v betonu. Přístroj pro stanovení doby průchodu UZ vlnění v betonu musí odpovídat požadavkům v normě ČSN EN 12504-4 [44]. Pracovní kmitočty přístroje se ve stavební praxi zpravidla pohybují mezi 20 – 250 kHz a sondami opatřenými akustickým vazebným prostředkem se změří doba průchodu UZ vlnění. S identickým nastavením přístrojem se stanoví doba průchodu UZ vlnění etalonem, pro zjištěný tzv. mrtvého času.

$$v_L = \frac{L}{T} \tag{15}$$

kde v_L je rychlost impulzu [km·s^{-1}]

L je délka měřící základny [mm]

T je čas včetně t_{kor}, který uplyne při průběhu impulzu měřící základnou,

tj. $T = T_L \pm t_{kor}$ [μs]

t_{kor} je korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulzů UZ vln, který se zjistí kalibrací přístroje

Měření doby průchodu UZ vlnění se musí provádět při teplotě (20±10) °C. Při měření za jiných teplot je třeba naměřené časy upravit korekčním činitelem. Dynamický modul pružnosti betonu se stanoví ze vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \tag{16}$$

kde E_{cu} je dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu [MPa]

ρ je objemová hmotnost betonu [kg·m^{-3}]

v_L je impulzová rychlost podélného UZ vlnění [km·s^{-1}]

k je součinitel rozměrnosti prostředí viz ČSN 73 1371 [38]

Využití této metody, pro stanovení modulu pružnosti, je velmi výhodné u konstrukcí, u kterých nemůžeme vykonat destruktivní zásah. Ultrazvuková impulzová metoda je vhodná i pro sledování vývoje vlastností betonu v raných fázích zrání, což je například velmi důležité pro určení doby, kdy je možno vnést předpětí do konstrukcí. Při vhodné kalibraci přístroje se odchylka naměřeného modulu pružnosti pohybuje do 2 GPa od skutečné hodnoty [45].

4. Experimentální část

4.1 Popis a cíl experimentu

Norma ISO 1920-10 [20] doporučuje válcová zkušební tělesa pro měření statického modulu pružnosti v tlaku a současně udává další tvarové a rozměrové požadavky na tělesa. Ne vždy je ale možné takové tělesa pro zkoušky získat. Proto bude hlavním předmětem této práce sledování vlivu tvaru, velikosti a typu tělesa na modul pružnosti betonu. Zároveň je v současnosti aplikace lehkých betonů pro konstrukční prvky stále více rozšířenější, proto byl pro výrobu těles zvolen právě beton lehký.

Experiment spočíval ve sledování vlivu tvaru, velikosti a typu zkušebních těles na pružnostní charakteristiky betonu s lehkým kamenivem. Na čerstvých betonech byly provedeny zkoušky pro stanovení jejich vlastností. Pro potřeby experimentu bylo vyrobeno mnoho typů těles, všemi možnými postupy, tedy z forem, jádrovým vrtáním a řezáním z větších bloků. Pro experiment byly použity dva druhy betonu. Na tělesech bylo provedeno nedestruktivní měření dynamického modulu pružnosti pomocí ultrazvukové impulzové metody a dále stanovení statického modulu pružnosti v tlaku a následně pevnost v tlaku. Naměřené výsledky byly zpracovány a vyhodnocovány.

4.2 Zkušební tělesa

Pro účely experimentu byly použity betony dvou receptur. Receptury obou betonů jsou uvedeny v Tab. 2. Za povšimnutí stojí, že v betonu 2 byla použita plastifikační přísada Sikaplast 501, cement s vyšší pevností CEM I 42,5 R Mokrá a lehké kamenivo s vyšší pevností v tlaku. U betonu 2 lze tedy očekávat větší pevnost v tlaku.

U obou betonů byl jako jemná frakce kameniva použit písek 0/4 mm z Bratčic, pro dosažení optimální křivky zrnitosti. Lehké kamenivo Liapor bylo v obou případech předvlhčeno 24 hodin před mícháním čerstvého betonu.

Tab. 2 Receptury betonů

Materiál (naváženo)	Množství na 1 m^3 ČB [kg]	
	Beton 1	Beton 2
Cement CEM II/B-S 32,5 R (Mokrá)	450	-
Cement CEM I 42,5 R (Mokrá)	-	450
Písek 0-4 mm (Bratčice)	776	662
Kamenivo Liapor 1-4 mm 350	52	-
Kamenivo Liapor 4-8 mm 350	198	-
Kamenivo Liapor 2-10 mm 650	-	408
Zpomalovač Sika VZ 10	0,68	0,68
Sika Stabilizer 4R	0,45	0,45
Sikaplast 501	-	3,6
Popel Dětmarovice	-	100
Voda celková	208	230

Hodnoty vodních součinitelů jsou uvedeny v Tab. 2. Vzhledem k použití elektrárenského popílku v receptuře betonu 2, byl pro výpočet vodního součinitele použit vztah z normy ČSN EN 206-1+A1 [26]. Přídavek popílku je tedy ve vodním součiniteli zohledněn.

$$w = v\ /(c + k \cdot p) \tag{17}$$

kde w je vodní součinitel [-]

v je množství vody v čerstvém betonu [kg]

c je množství cementu v čerstvém betonu [kg]

k je 0.4 y normy ČSN EN 206-1+A1 [-]

p-hmotnost popílku v čerstvém betonu [kg]

Tab. 3 Vodní součinitelé

Označení betonu	1	2
Vodní součinitel [-]	0,46	0,47

Výroba betonu 1 probíhala dne 26. 5. 2017 a výroba betonu 2 dne 17. 4. 2018. Na čerstvých betonech byly provedeny zkoušky pro stanovení jejich vlastností. Konkrétně zkouška rozlití dle ČSN EN 12350-5 [18] a zkouška pro stanovení objemové hmotnosti v souladu s ČSN EN 12350-6 [46]. (Stupně konzistence byly určeny jako F4 a F3.

Tab. 4 Vlastnosti čerstvých betonů

Označení betonu	1	2
Obj. hm čerstvého betonu [kg/m^3]	1620	1830
Rozlití [mm]	490	460

Pro účely experimentu byla vyrobena zkušební tělesa dle normy ČSN EN 12390-1 a dále větší betonové bloky. Většina těles byla po 3 dnech odformována a následně uložena do vodní lázně pro optimální zrání. Větší bloky nebylo možné vložit do vodní lázně, nicméně byly ošetřovány dle norem [24], [47],

Po dostatečné době zrání (90 dní) byla zkušební tělesa vyjmuta z vody a umístěna do standardních laboratorních podmínek, kde dále volně vysychala. Ve stáří 404 dní v případě betonu 1 a 204 dní v případě betonu 2 byla z betonových bloků jádrovým vrtáním a řezáním na kotoučové pile vyrobena další tělesa.

Obr. 20 Průběh jádrového vrtání, soupravu obsluhoval ing. Petr Žítt

Obr. 21 Rozložení jádrových vrtů v bloku

Pro přehlednost jsou všechna zkušební tělesa uvedena v Tab. 5. U všech těles byly zabroušeny tlačné plochy pomocí korundového prášku pro dosažení optimální rovinnosti čel.

Tab. 5 Přehled těles

Beton 1					
Označení sady těles	Tvar těles	Průřez [mm]	Délka [mm]	Počet	Poznámka
P-100	Hranol	100	400	8	Plastová forma
P-150	Hranol	150	300	6	Plastová forma + řez
C (Cube)	Krychle	150	150	7+6	Plastová forma (6 ks pro zkoušky ve stáří 28 dní)
C (Cylinder)	Válec	150	300	7+3	Plastová forma (3 ks pro zkoušky ve stáří 28 dní)
JV-100	Válec	100	300	6	Jádrový vývrt
JV-150	Válec	150	300	6	Jádrový vývrt
JV-75	Válec	75	300	6	Jádrový vývrt
JV-50A	Válec	50	150	6	Jádrový vývrt
JV-50B	Válec	50	120	6	Jádrový vývrt
JV-50ABC	Válec	50	80	6	Jádrový vývrt
Beton 2					
Označení sady těles	Tvar těles	Průřez [mm]	Délka [mm]	Počet	Poznámka
T100	Hranol	100	400	7+6	Plastová forma (6 ks pro zkoušky ve stáří 28 dní)
T40	Hranol	40	160	9	Plastová forma
T150	Hranol	150	300	6	Plastová forma + řez
K	Krychle	150	150	7+3	Plastová forma (3 ks pro zkoušky ve stáří 28 dní)
V	Válec	150	300	7	Plastová forma
JV100	Válec	100	270	6	Jádrový vývrt
JV75	Válec	75	270	6	Jádrový vývrt
JV50A	Válec	50	175	6	Jádrový vývrt
JV50B	Válec	50	95	6	Jádrový vývrt
JV50AB	Válec	50	135	8	Jádrový vývrt
JV75AB	Válec	75	135	6	Jádrový vývrt
R-TR40	Hranol	40	160	7	Řez
R75/100	Hranol	75	100	6	Řez
R75/200	Hranol	75	200	6	Řez
R75/300	Hranol	75	300	6	Řez
R50/100	Hranol	50	100	6	Řez
R50/200	Hranol	50	200	6	Řez
R50/300	Hranol	50	300	6	Řez

Z betonu 1 byly ve formách vyrobeny válce C, které byly hutněny rovnoběžně se směrem zatěžování. Ostatní tělesa z betonu 1 byla hutněna kolmo na směr zatěžování. Byly vyrobeny 3 hranoly 150/150/600, které byly kotoučovou pilou řezány na poloviny a tím vzniklo 6 těles P150. Jádrové vývrty byly odebírány z bloku 300/300/900 mm a ze 2 dlaždic 150/300/300 mm. Vznikla tělesa délky 300 mm. Vývrtů průměru 50 mm bylo 8, 6 bylo rozděleno na dvě části a vznikla tělesa JV50A a JV50B. Zbylé 2 kusy vývrtů 50 mm byly rozděleny na tři části, čímž vzniklo 6 těles JV50ABC.

Tělesa vyrobená z betonu 2 z forem jsou kromě válců V hutněna kolmo na směr zatěžování. Bylo vyrobenu 6 hranolů 150/150/600 mm, všechny byly rozpůleny – vzniklo 6 těles T150 a zbylých 6 půlek posloužilo k výrobě těles R50 a R75 kotoučovým řezáním. Při betonáži byl beton vylit i do přibližně 90litrového „kalfasu“, ze kterého byly odebrány všechny vývrty a řezáním vyrobeny trámečky R-TR40. Všechna tělesa z kalfasu byla tedy hutněna rovnoběžně se směrem zatěžování.

4.3 Postup měření

První měření probíhalo 23. 6. 2017 na šesti krychlích a třech válcích z betonu 1 ve stáří 28 dní. Na třech krychlích byla provedena zkouška pevnosti v tlaku, na zbývajících třech se měřila pevnost v příčném tahu. Na válcích se pomocí ultrazvukové impulzové metody určoval dynamický modul pružnosti. Tohoto měření jsem se nezúčastnil, nicméně výsledky mám k dispozici, a proto je v následujících tabulkách uvádím.

Tab. 7 Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a příčném tahu na krychlích

Ozn. tělesa	ρ [kg/m^3]	F_{MAX} [kN](př.tah)	F_{MAX} [kN](tlak)	f_{ct} [MPa]	f_c [MPa]
C-8	1623	-	506,1	-	22,4
C-9	1684	-	535,1	-	23,8
C-10	1638	-	548,2	-	24,2
C-11	1659	87,3	-	2,45	-
C-12	1611	81,8	-	2,30	-
C-13	1619	87,5	-	2,45	-
Průměr	1639	85,5	529,8	2,40	23,4

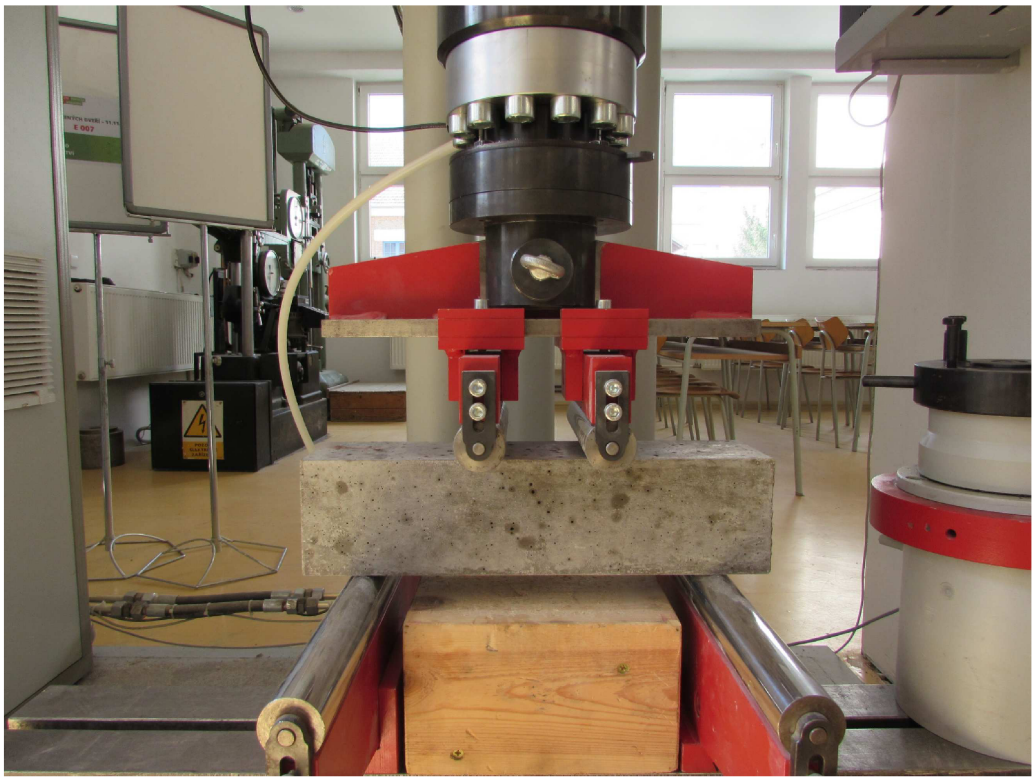
Tab. 6 Výsledky dynamických modulů pružnosti na válcích

Ozn. tělesa	ρ [kg/m^3]	E_{cu} [MPa]
C-1	1615	20200
C-2	1629	20900
C-3	1619	20800
Průměr	1621	20600

Další měření probíhalo dne 15. 5. 2018 na tělesech vyrobených z betonu 2 ve stáří 28 dní. Stanovoval se dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou. Dále se zjišťovala pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku. Zkoušky dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou rezonanční metodou dle ČSN 73 1372 [37] a pevnosti v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5 [18] byly provedeny pouze orientačně pro srovnání výsledků z různých metod, dále v experimentu se už neprováděly. Toto měření bylo provedeno pro zjištění

charakteristik betonu ve stáří 28 dní a pro možnost sledování jejich vývoje v čase. Všechna měření probíhala v laboratořích ústavu SZK. Zkouška pevnosti v tahu ohybem byla prováděna na třech hranolech o rozměrech 100 × 100 × 400 mm, jednalo se o 4-bodový ohyb s rozpětím podpor 300 mm.

Na dalších třech hranolech byl určen statický modul pružnosti v tlaku, pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti ultrazvukovou rezonanční metodou.



Obr. 22 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Zvolena byla metoda s vnesením mechanického impulzu úderem kovového kladívka do zkušebního tělesa. Tělesa byla opatřena snímačem akustické emise a pomocí softwaru v počítači, který je příslušenstvím osciloskopu Handyscope HS4, byly zjištěny jejich vlastní frekvence. Zjišťovaly se vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v Tab. 8 a Tab. 9.

Obr. 23 Měření dyn. modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Tab. 8 Naměřené výsledné charakteristiky hranolů

Ozn. tělesa	ρ [kg/m^3]	F_{MAX} [kN](ohyb)	F_{MAX} [kN](tlak)	f_c [MPa]	f_{cf} [MPa]	E_c [MPa]	E_{cu} [MPa]	E_{crL} [MPa]	E_{crf} [MPa]
T100-8	1784	-	475,8	46,3	-	18400	24700	21800	22300
T100-9	1807	-	472,9	46,7	-	18500	25000	22200	22500
T100-10	1820	-	486,7	47,5	-	18900	25300	22400	23200
T100-11	1808	17,91	-	-	5,2	-	-	-	-
T100-12	1799	17,89	-	-	5,2	-	-	-	-
T100-13	1809	15,45	-	-	4,5	-	-	-	-
Průměr	1800	17,08	478,5	46,8	5,0	18600	25000	22100	22700

Tab. 9 Pevnost v tlaku na krychlích

Ozn. tělesa	ρ [kg/m^3]	F_{MAX} [kN]	f_c [MPa]
K-8	1823	1083,6	49,3
K-9	1809	1120,9	49,5
K-10	1820	1135,9	50,5
Průměr	1820	1113,5	49,8

Další měření probíhalo ve dnech 8. – 10. 8. 2018. Jednalo se o 64 těles vyrobených z betonu 1. Experiment byl naplánován tak, abychom eliminovali vliv časového vývoje vlastností betonu mezi jednotlivými termíny zkoušek. V případě betonu 1 se zkoušky prováděly ve stáří 439 – 441 dní. Měření rozměrů bylo prováděno digitálním posuvným měřítkem.

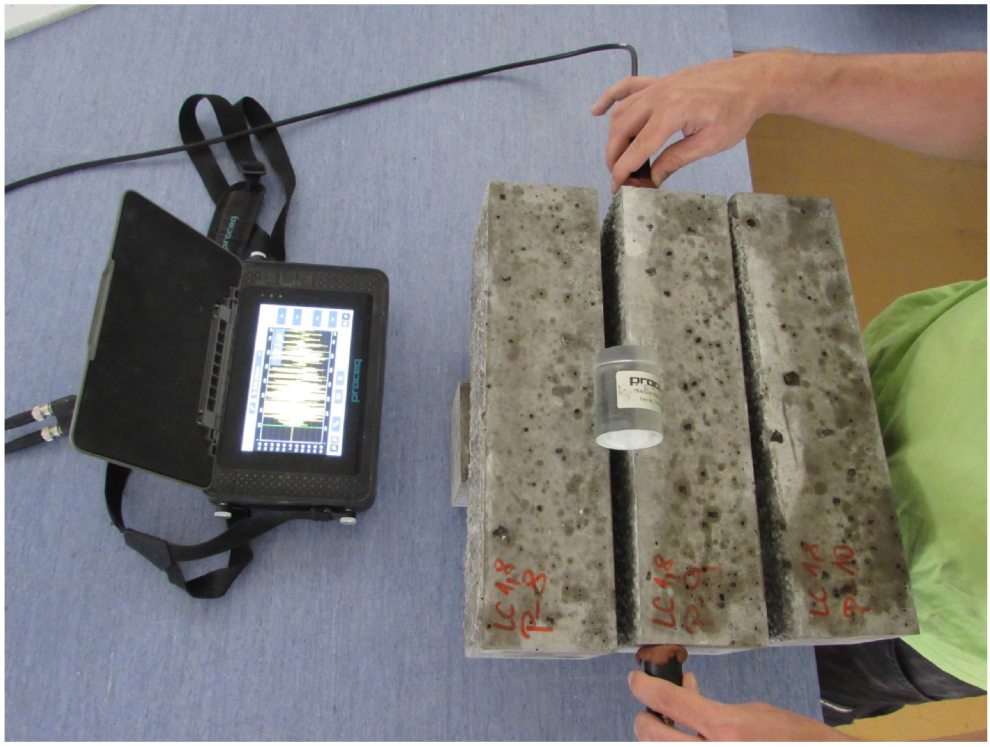
Obr. 24 Měření rozměrů těles

Dále se určovala hmotnost těles, následovala zkouška dynamického modulu pružnosti, stanovení statického modulu pružnosti a určení pevnosti v tlaku. Pevnost v tlaku se měřila na všech tělesech a to destruktivně v hydraulickém zkušebním lisu FORM+TEST dle normy ČSN EN 12390-3 [20].

Obr. 25 Ukázka porušení válce V -7 tlakem

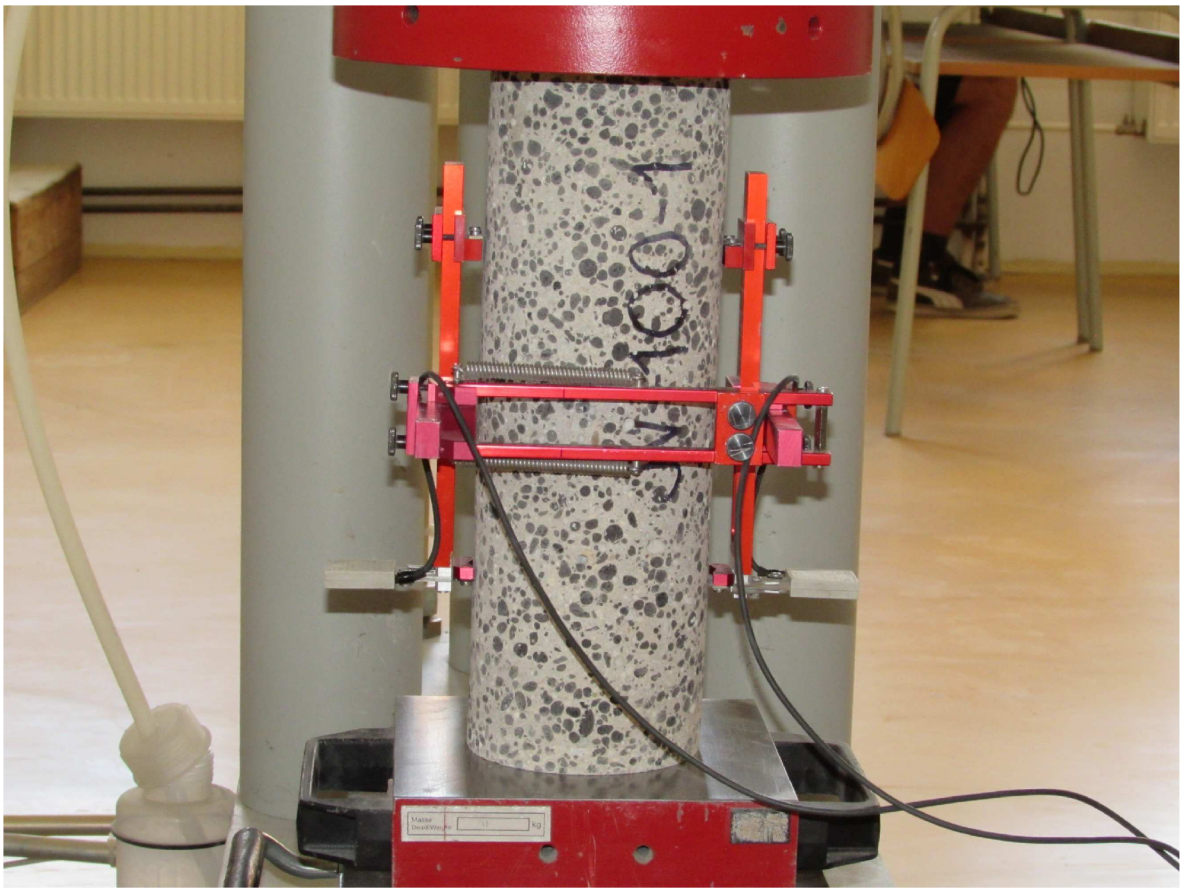
Pro stanovení dynamického modulu pružnosti byla použita ultrazvuková impulzová metoda. Měření se provádělo na všech tělesech dle normy ČSN 73 1371 [38]. Byl použit přístroj Pundit PL-200 od švýcarské firmy Proceq, který disponuje automatickou kalibrací pomocí dodávaného etalonu o známé době průchodu UZ vlnění. Mrtvý čas, u tohoto přístroje, není tedy třeba znát. Přístroj na dotykovém displeji zobrazuje v reálném čase tvary vln a dobu průchodu UZ vlnění tělesem. Naměřené hodnoty automaticky ukládá. Sondy byly použity o pracovní frekvenci 150 kHz a byly opatřeny akusticky vazebným prostředkem. Dále byly nastaveny

parametry měření, přičemž síla impulzu byla 100 V a zisk, nebo-li citlivost snímače, byla zvolena 20x.

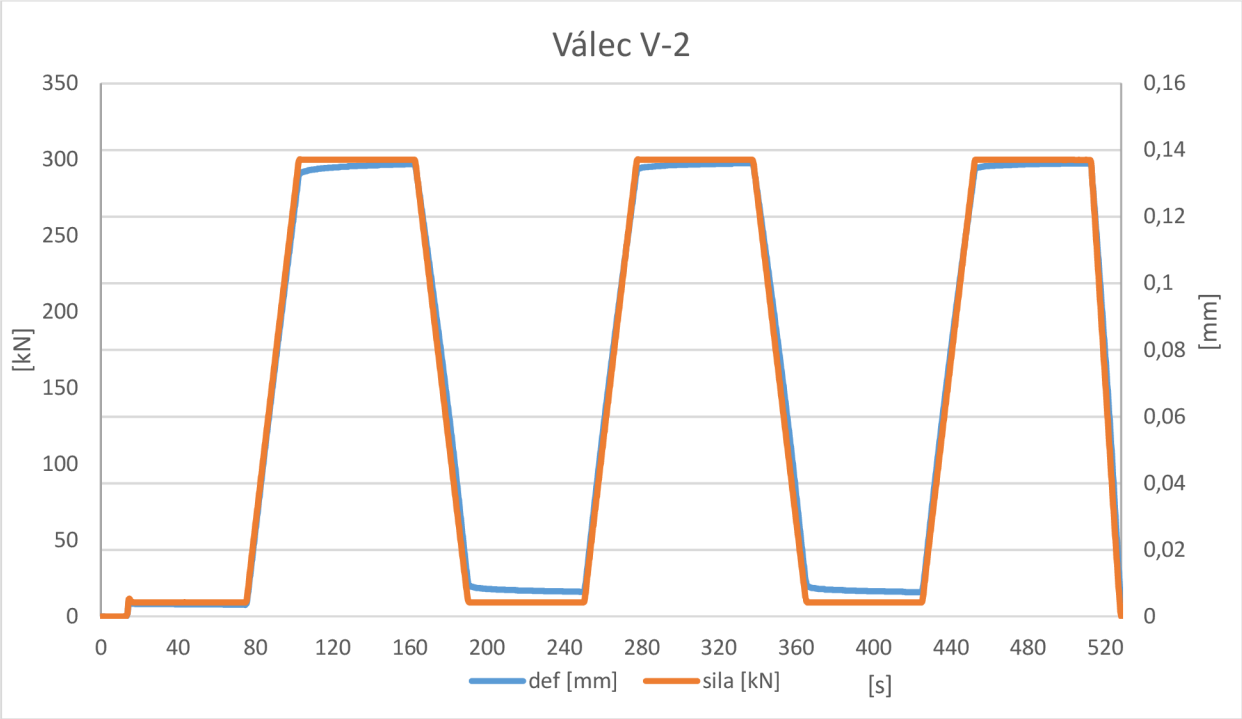


Obr. 26 Průběh měření dynamických modulů pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Pro měření statického modulu pružnosti byl použit zkušební lis od firmy FORM+TEST a byly využity obě jeho části – ALPHA 3-3000 S s rozsahem 3000 kN i DELTA 6-300 s rozsahem 300 kN. V každé sadě těles se stanovoval modul pružnosti alespoň na 6 tělesech. U sad, které disponovaly 7 a více tělesy, byla vždy na jednom tělese provedena zkouška pevnosti v tlaku pro přesnější určení horní zatěžovací meze. U ostatních sad byla horní mez úspěšně odhadována. Pro sledování deformací byla tělesa opatřena měřící soupravou tvořenou dvěma tenzometry, které jsou příslušenstvím lisu FORM+TEST. Deformace byly snímány přes ústřednu Spider8 a vyhodnocovány softwarem catmanEasy. Po nastavení hodnot zatěžovacích mezí v SW zkušebního lisu (program Proteus), probíhá zkouška automaticky. Všechna tělesa byla úspěšně vycentrována.



Obr. 28 Vývrt JV-100-1 osazen měřící soupravou v lisu DELTA 6-300



Obr. 27 Průběhy deformace a síly při zkoušení statického modulu pružnosti

Další měření ve dnech 6. – 16. 11. 2018 probíhalo obdobně, jen s větším počtem těles (111 ks) a stářím betonu 203 – 213 dní.

Obr. 29 Měření rozměrů těles z betonu 2

4.4 Výsledky a jejich diskuze

Měřeními bylo podrobeno 199 těles různých tvarů, rozměrů a typů. Výsledné hodnoty statických a dynamických modulů pružnosti a pevnosti v tlaku jsou pro všechny sady těles sumarizovány v Tab. 10.

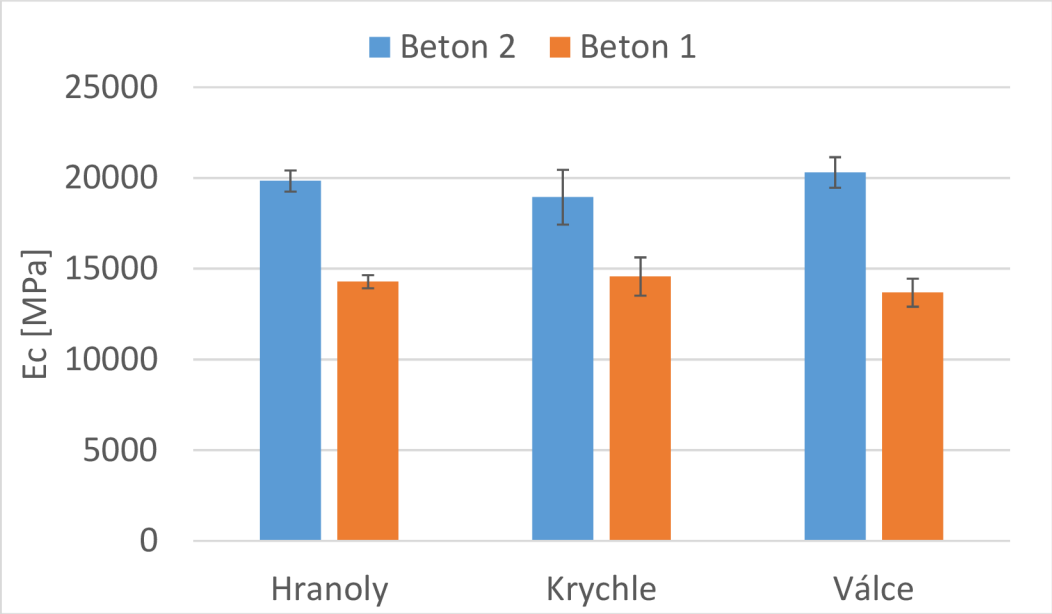
Uvedené hodnoty jsou průměry jednotlivých sad a je k nim uvedena výběrová směrodatná odchylka. Beton 2 dosahoval oproti betonu 1 přibližně dvojnásobné pevnosti a o 40 % vyšších modulů pružnosti. Naměřené dynamické moduly pružnosti relativně spolehlivě reflektovaly hodnoty získané statickou metodou, a to s průměrnou hodnotou zmenšovacího koeficientu k_u rovno 0,71 pro beton 1 a 0,76 pro beton 2.

U všech zkušebních těles byla zkouška statického modulu pružnosti ukončena zatěžováním do porušení, tedy stanovením pevnosti v tlaku. Následně bylo ověřeno, zda se zvolená horní zatěžovací hladina napětí (σ_a) nelišila od 1/3 skutečné pevnosti v tlaku f_c o více než 20 %. výsledky jsou v tabulce v příloze. U několika málo těles byl limit 20 % překročen, ale hodnoty modulu pružnosti ze souborů dat vyřazeny nebyly – odchylka se od 20 % nelišila natolik výrazně, aby to mohlo výsledek zásadním způsobem ovlivnit, viz článek na toto téma [48].

Na naměřených hodnotách byly provedeny testy normality v programu na statistické analýzy Minitab. Testy byly prováděny podle postupu Anderson-Darling a to na jednotlivých sadách obou betonů pro hodnoty statického i dynamického modulu pružnosti. Grafické znázornění těchto testů je uvedeno v přílohách. Hypotézy o normálním rozdělení výsledků na jednotlivých sadách byly ve všech případech potvrzeny. Následně byly testy provedeny i na širších souborech dat, konkrétně na hodnotách statických a dynamických modulu pružnosti a to zvlášť a pro beton 1 a 2 jednotlivě. Hypotéza o normálním rozdělení hodnot byla potvrzena pouze v jednom případě, tedy pouze u statického modulu pružnosti betonu 2 byla p-hodnota vyšší, než zvolená hladina významnosti 0,05 (viz přílohy).

Tab. 10 Výsledky pružnostních a pevnostních zkoušek na všech sadách těles - pro jednotlivé vlastnosti je vždy uvedena průměrná hodnota a výběrová směrodatná odchylka (označena s)

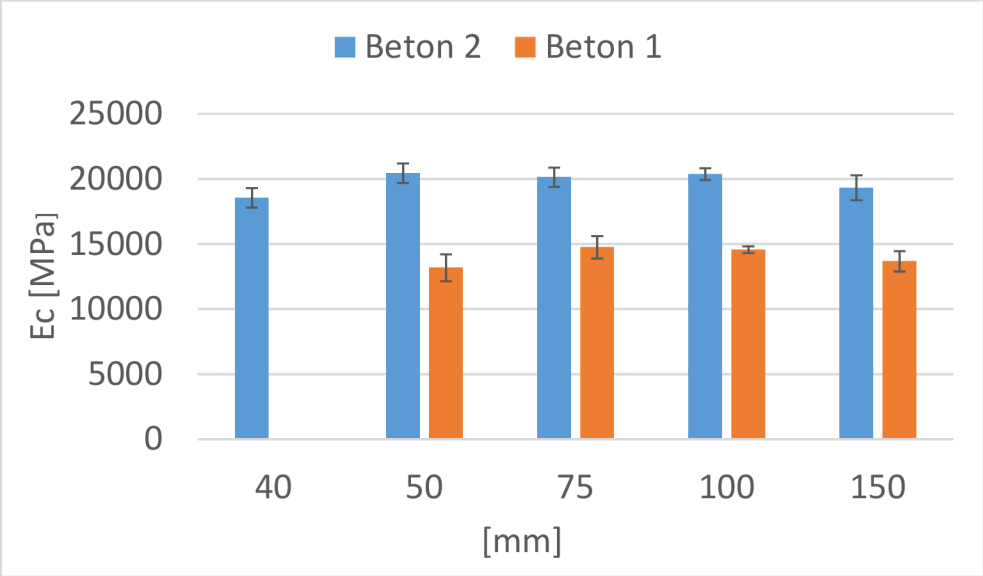
Beton 1							
Označení sady těles	ρ [kg/m^3]	Stat. modul pružnosti		Dyn. modul pružnosti		Pevnost v tlaku	
		E_c [MPa]	*s* [MPa]	E_{cu} [MPa]	*s* [MPa]	f_c [MPa]	*s* [MPa]
P-100	1558	14700	242	18700	534	26,9	1,0
P-150	1560	13900	486	18600	525	23,4	2,4
C (Cube)	1550	14600	1054	18700	150	26,7	1,3
C (Cylinder)	1551	12500	787	20400	198	22,7	0,9
JV-100	1578	14500	266	20300	1140	24,0	2,2
JV-150	1605	14500	390	21300	985	26,9	2,0
JV-75	1590	14800	860	20900	1302	23,1	2,4
JV-50A	1557	12900	924	19800	885	20,4	2,0
JV-50B	1561	13200	1288	19700	634	22,6	2,2
JV-50ABC	1556	13500	893	19300	1089	23,9	1,5
Beton 2							
Označení sady těles	ρ [kg/m^3]	Stat. modul pružnosti		Dyn. modul pružnosti		Pevnost v tlaku	
		E_c [MPa]	*s* [MPa]	E_{cu} [MPa]	*s* [MPa]	f_c [MPa]	*s* [MPa]
T100	1757	19600	502	24900	481	54,8	1,6
T40	1730	19000	424	24200	535	50,5	3,4
T150	1785	19700	429	25900	388	48,6	2,8
K	1788	18900	1483	25700	621	61,0	1,3
V	1793	19600	666	26300	332	51,7	3,0
JV100	1824	21100	407	26800	522	54,4	4,4
JV75	1817	20900	354	26100	367	50,6	4,0
JV50A	1819	20100	716	26800	914	48,0	4,2
JV50B	1795	19800	829	26000	788	50,0	4,2
JV50AB	1836	20300	1342	27500	893	51,5	2,9
JV75AB	1836	20300	1518	27500	410	51,5	3,9
R-TR40	1763	18100	1069	23100	825	43,5	5,3
R75/100	1772	19100	892	27400	954	53,0	5,0
R75/200	1779	20200	388	26700	539	50,5	2,1
R75/300	1782	20200	532	26100	903	50,9	4,3
R50/100	1791	20200	857	27400	1151	50,9	5,0
R50/200	1811	21200	190	27900	525	51,2	3,3
R50/300	1817	21100	605	27400	266	49,7	1,7



Graf 1 Statický modul pružnosti podle tvaru těles pro oba betony.

Na grafu 1 jsou průměrné výsledky statických modulů pružnosti obou betonů pro tělesa tvaru hranolů, krychlí a válců, výběrové směrodatné odchylky jsou znázorněny chybovými úsečky. Jak lze pozorovat, tak tvary těles na výsledky nemají statisticky významný vliv.

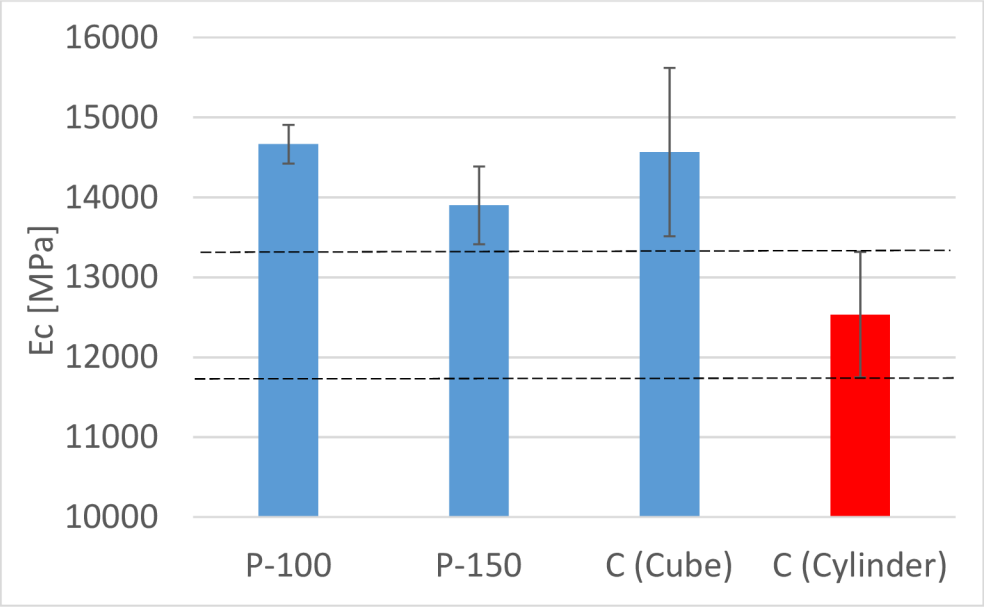
V grafu 2 jsou uvedeny výsledky statických modulů pružnosti rozděleny podle velikosti příčného rozměru. V případě betonu 1 došlo u těles s příčným rozměrem 50 mm ke snížení naměřených hodnot, to samé lze pozorovat u betonu 2 v případě těles s příčným rozměrem 40 mm. V normě ISO 1920-10 [10] je uvedeno doporučení, že nejmenší rozměr zkušebního tělesa by neměl být menší než 100 mm a přinejmenším 4x větší než maximální velikost zrna kameniva. Druhá podmínka byla i u těchto těles splněna, ale i přesto se zdá, že by nižší naměřené hodnoty, získané u těchto těles, mohly být zapříčiněny právě jejich relativně malými příčnými rozměry.



Graf 2 Statické moduly pružnosti dle velikosti příčného rozměru.

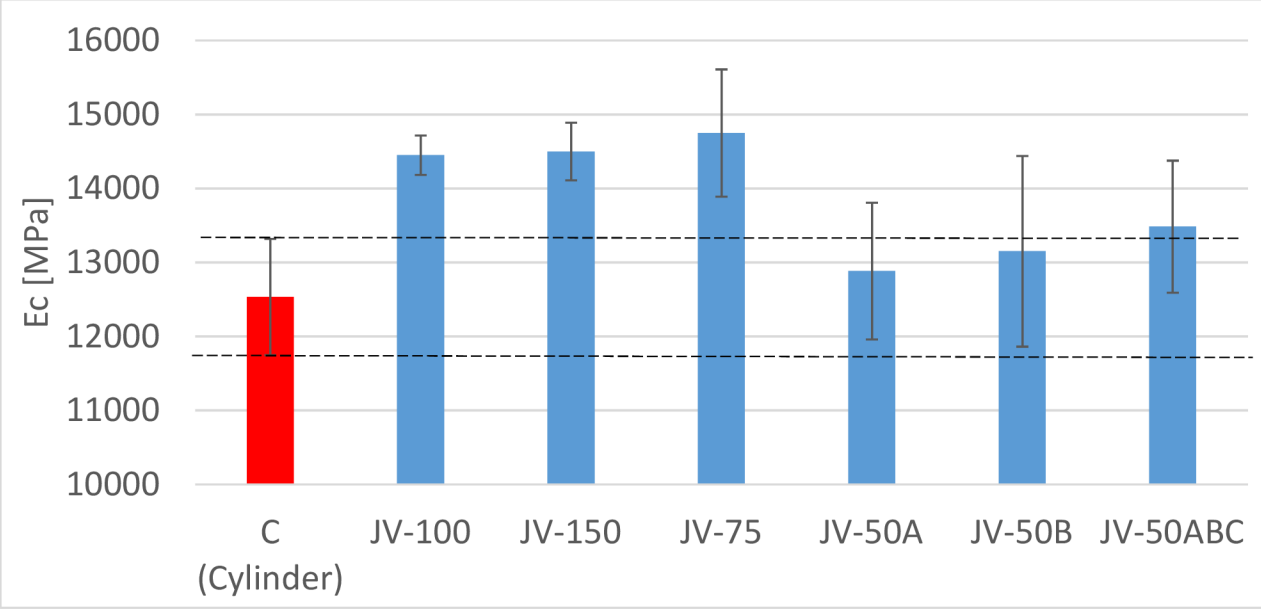
V grafech 3 a 4 jsou zobrazeny statické moduly pružnosti jednotlivých sad betonu 1. Výsledky jsou rozděleny podle způsobu výroby těles, tedy z forem jádrovým vrtáním. Vždy je pro srovnání uveden i výsledek ze sady normou doporučených válců průměru 150 mm a délky 300 mm.

Z grafů je patrné, že hodnota statického modulu pružnosti vyšla u vláce C prakticky nejnižší a významně se neliší pouze od jádrových vývrtů průměru 50 mm.



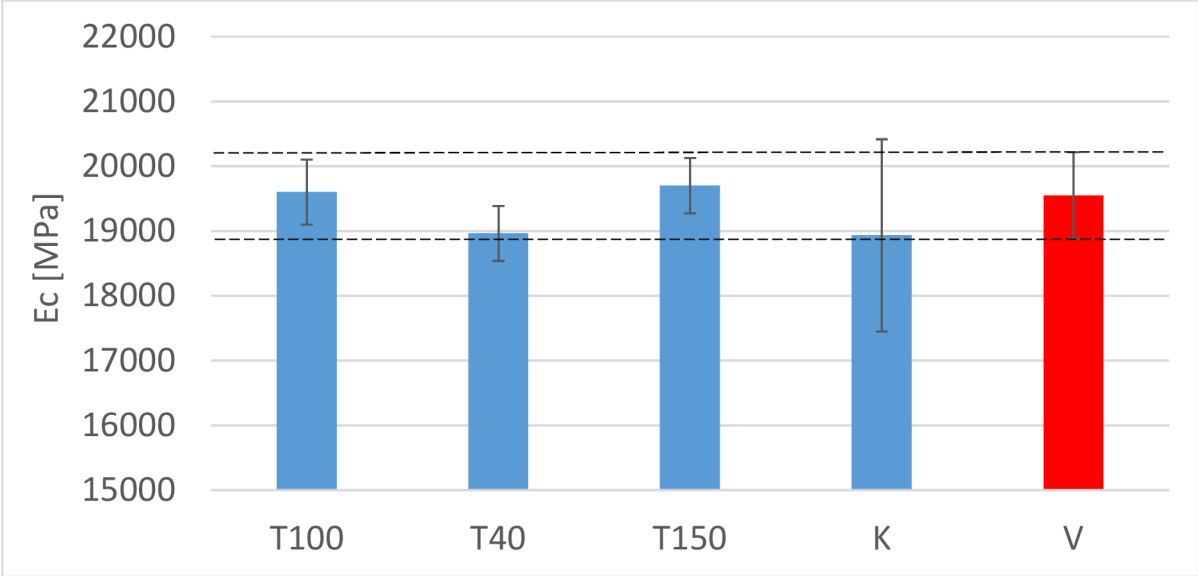
Graf 3 Statické moduly pružnosti na tělesech z forem - beton 1

To by mohlo být způsobeno odlišným směrem hutnění válců C oproti ostatním tělesům.

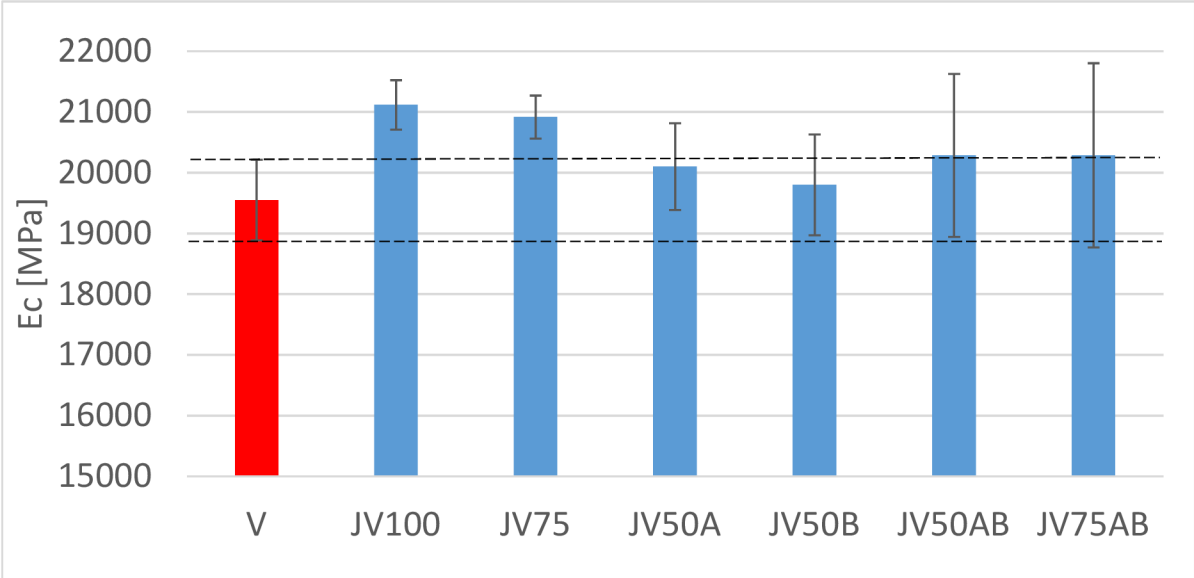


Graf 4 Statické moduly pružnosti na vývrtech - beton 1

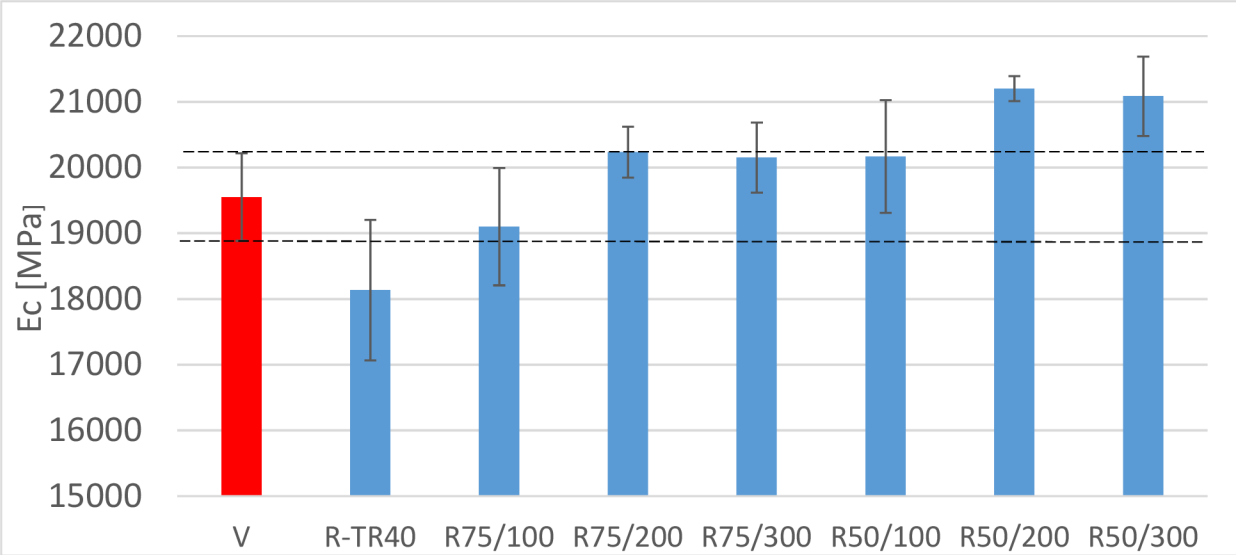
Grafy 5 až 7 zobrazují stejná data, jako předchozí grafy, ale pro beton 2. Z grafů lze vyčíst, že hodnoty modulu pružnosti z krychlí K vyšly mírně nižší a s relativně vysokou variabilitou. To by mohlo být zapříčiněno poměrnou štíhlostí, která je rovna jedné. Norma doporučuje štíhlostní poměr mezi 2 – 4. Rozdílná štíhlost způsobu jinou napjatou v koncových partiích zkoušených vzorků a tím může ovlivňovat naměřenou hodnotu deformace. [49] Dále trámečky 40 × 40 × 160 mm, jak z forem, tak řezané dosáhly nižších hodnot modulu pružnosti, což by mohlo být zapříčiněno jejich malým příčným rozměrem, jak bylo uvedeno již dříve. Tělesa, která vykazovala vyšší hodnoty oproti doporučeným válcům, jsou JV100, JV75, R50/200 a R50/300. Tento fakt by opět mohl být způsoben štíhlostním poměrem těles, v tomto případě ale vyšším, a to podle pořadí 2,7; 3,6; 4,0 a 6,0.



Graf 5 Statické moduly pružnosti na tělesech z forem - beton 2



Graf 6 Statické moduly pružnosti na vývrtech - beton 2



Graf 7 Statické moduly pružnosti na řezaných tělesech - beton 2

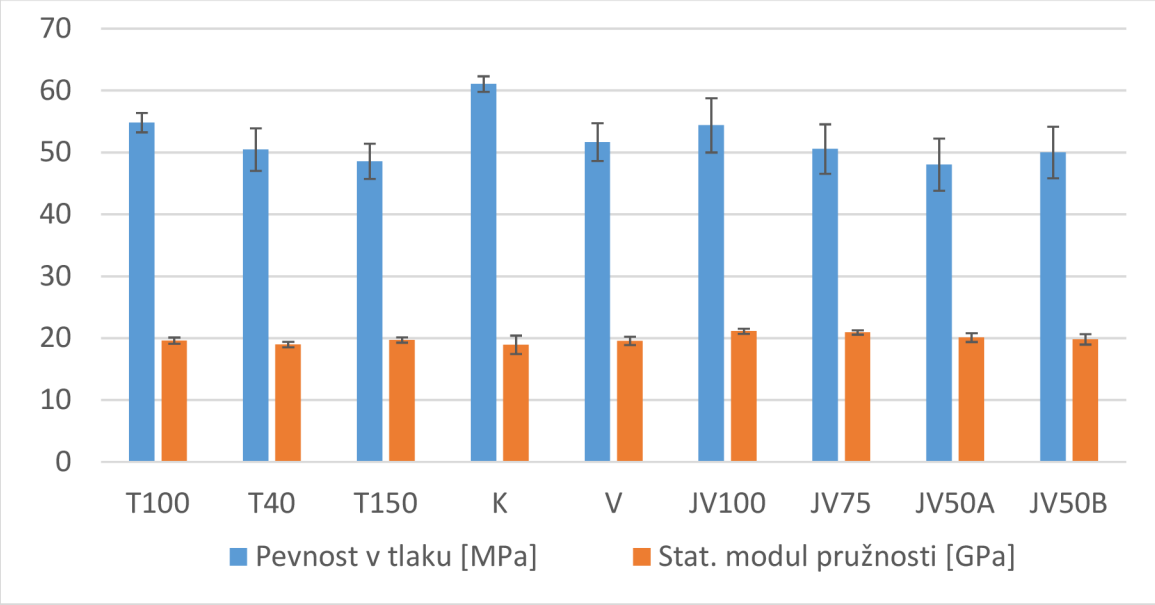
Pro všechna tělesa z betonu 1 a betonu 2 byly provedeny oboustranné Studentovy t-testy, pro zjištění, zda se naměřené hodnoty ostatních sad od „normových“ válců

Tab. 11 Výsledky 2t-testu pro všechny sady těles - v případě, že se výsledky liší, je uvedeno, zda jsou vyšší nebo nižší než "normové" hodnoty na válci 150×300 mm

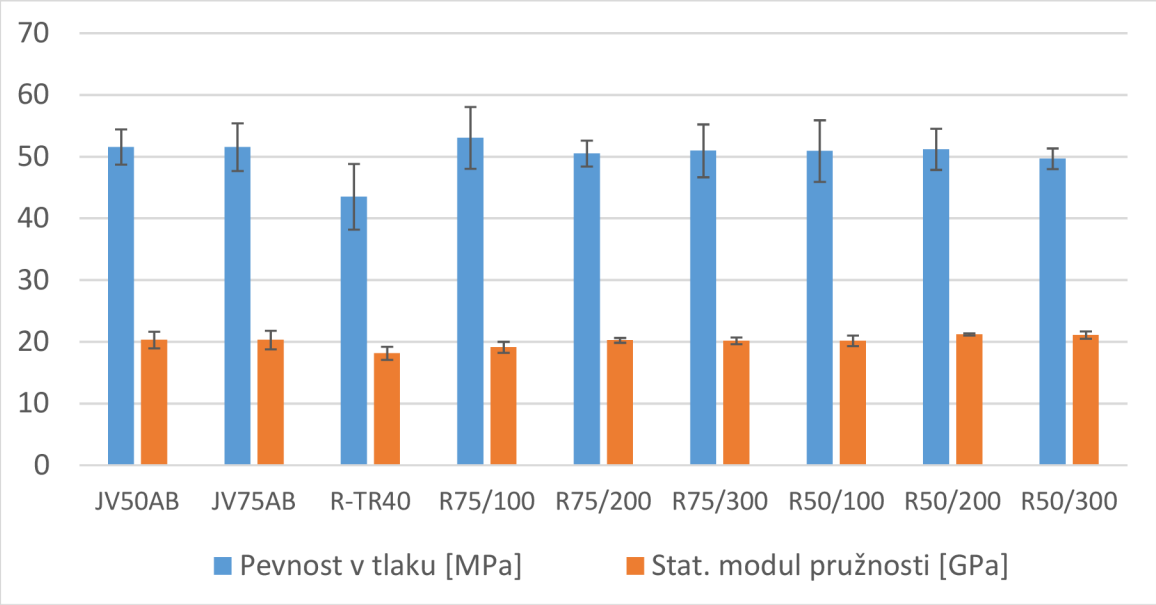
Beton 1		Beton 2	
Označení sady těles	Výsledek	Označení sady těles	Výsledek
P-100	**liší se (vyšší)**	T100	neliší se
P-150	**liší se (vyšší)**	T40	neliší se
C (Cube)	**liší se (vyšší)**	T150	neliší se
JV-100	**liší se (vyšší)**	K	neliší se
JV-150	**liší se (vyšší)**	JV100	**liší se (vyšší)**
JV-75	**liší se (vyšší)**	JV75	**liší se (vyšší)**
JV-50A	neliší se	JV50A	neliší se
JV-50B	neliší se	JV50B	neliší se
JV-50ABC	neliší se	JV50AB	neliší se
		JV75AB	**liší se (vyšší)**
		R-TR40	**liší se (nižší)**
		R75/100	neliší se
		R75/200	neliší se
		R75/300	neliší se
		R50/100	neliší se
		R50/200	**liší se (vyšší)**
		R50/300	**liší se (vyšší)**

statisticky významně neliší. Pokud se liší, je v Tab. 11 uvedeno, zda jsou hodnoty na jiných tělesech vyšší či nižší, než hodnoty dosažené na válcích. Je vidět, že nižších hodnot statického modulu pružnosti na hladině významnosti 0,05 dosahují pouze trámečky 40×40×160 mm vyřezané z betonového bloku.

V grafech 8 a 9, jsou porovnány pevnosti v tlaku a statické moduly pružnosti těles z betonu 2. Z těchto grafů lze tvrdit, že vliv tvarů, rozměrů a typů těles má výrazně větší vliv na hodnoty pevností než modulů. V těchto dvou grafech jsou



Graf 8 Srovnání vlivu tvarů, rozměrů a typů těles na pevnost v tlaku a statický modul pružnosti pro sady z betonu 2 - 1. část

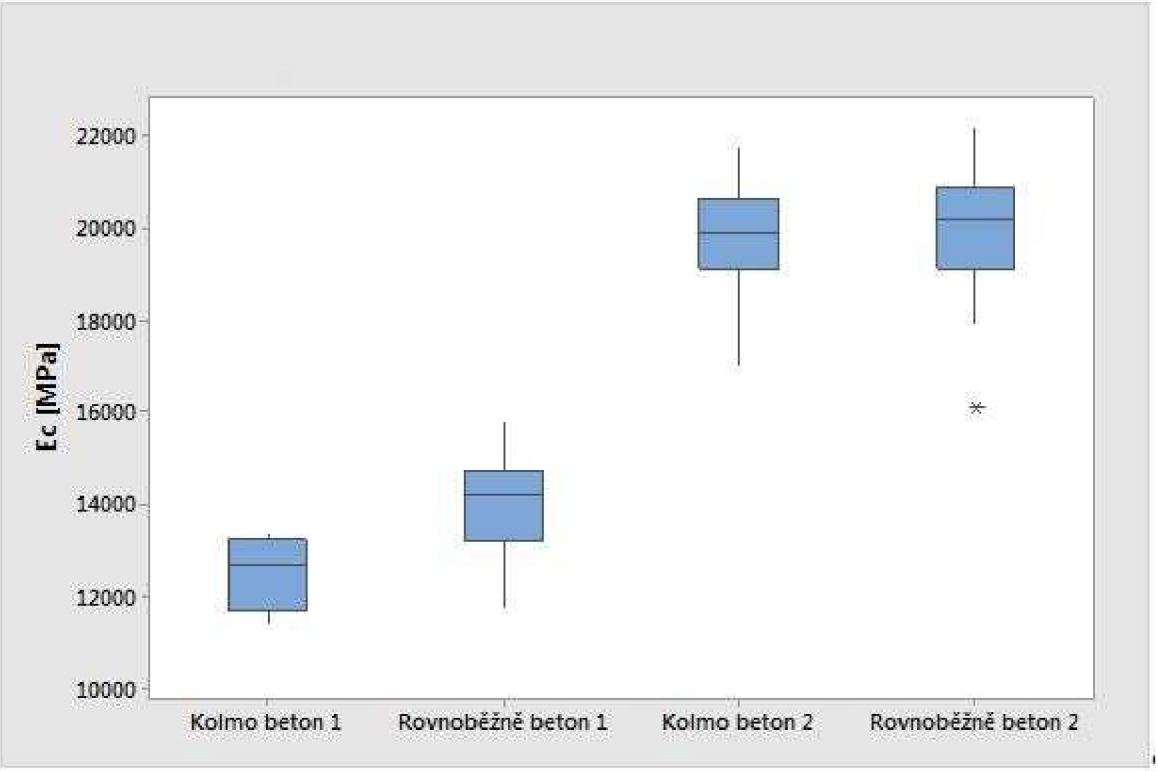


Graf 9 Srovnání vlivu tvarů, rozměrů a typů těles na pevnost v tlaku a statický modul pružnosti pro sady z betonu 2 - 2. část

moduly pružnosti uvedeny v GPa – je to jediná výjimka v této DP, aby bylo možné

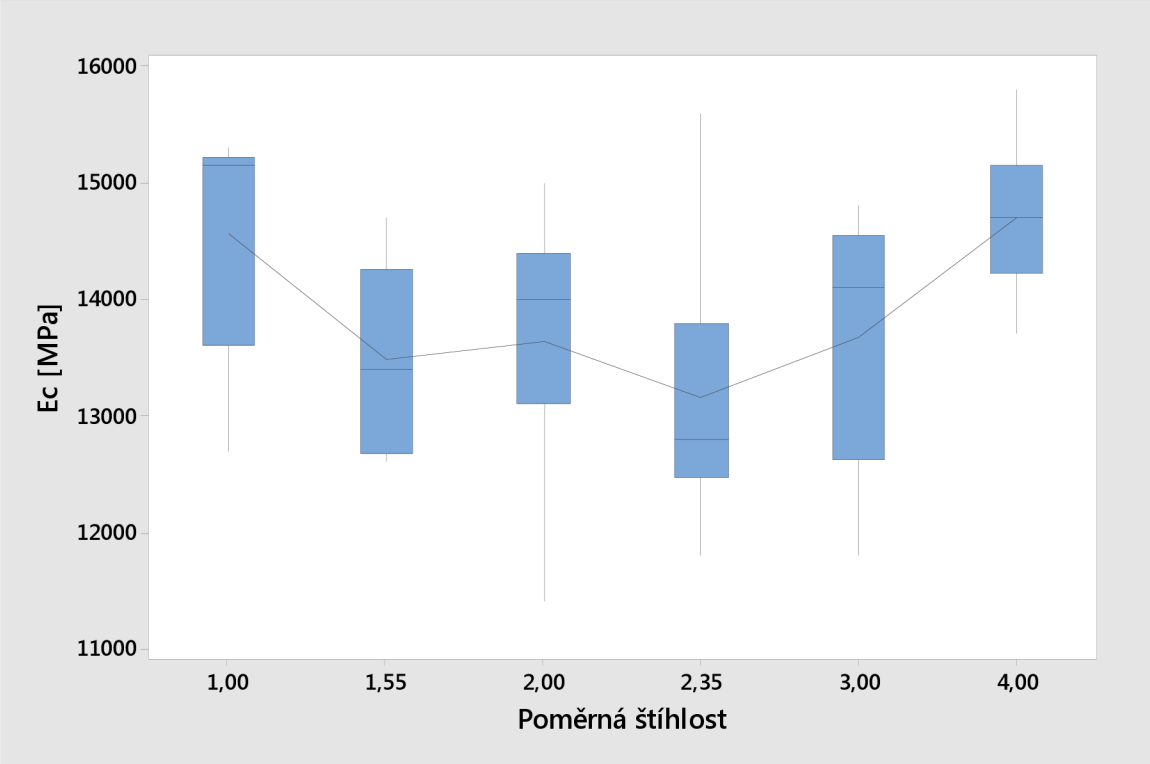
znázornit data na jedné společné ose (ve všech ostatních grafech a tabulkách je modul pružnosti uveden vždy v MPa).

V krabicovém grafu 10 jsou naměřené hodnoty statického modulu pružnosti rozděleny podle směru hutnění. Horní a dolní ohraničení představuje 75% respektive 25% kvartil. Prostřední vodorovná úsečka je medián a hvězdička představuje odlehlé hodnoty. Vliv směru hutnění z těchto výsledků nelze potvrdit.

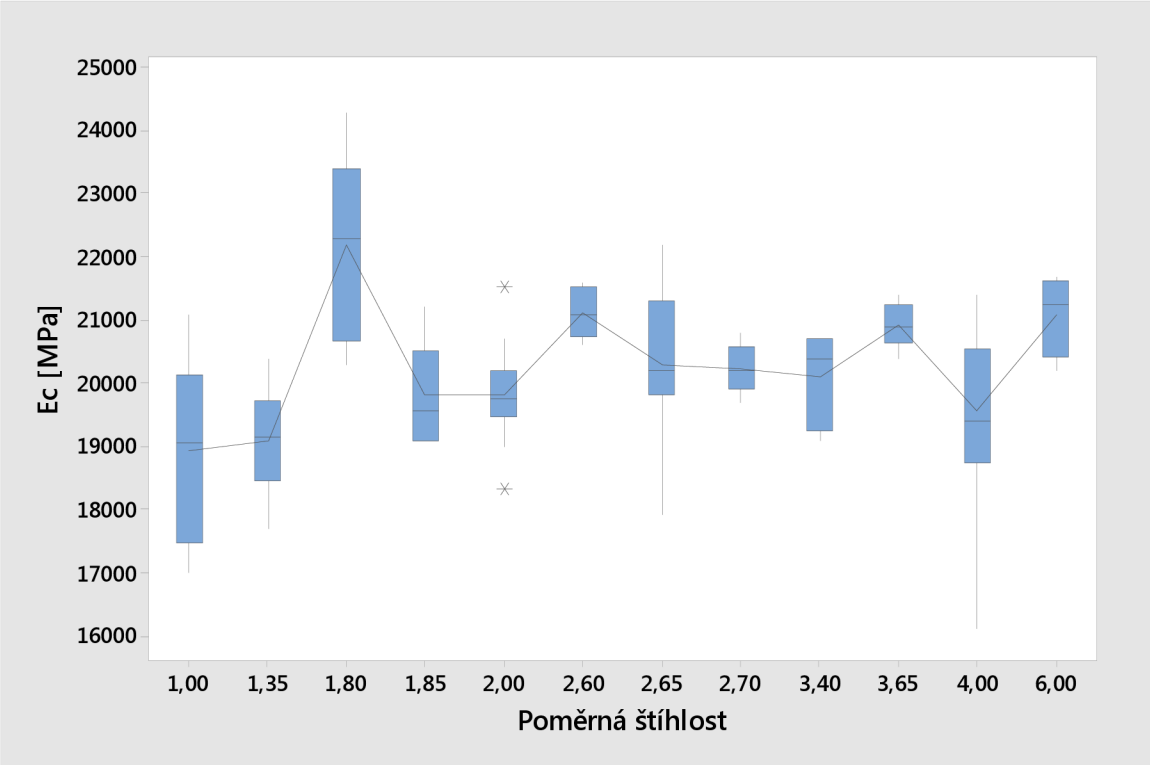


Graf 10 Porovnání vlivů směru hutnění na statický modul pružnosti obou betonů

Dále byl proveden krabicový graf 11 srovnávající hodnoty modulu pružnosti těles z forem hutněnými různými směry, obdobně byly v grafu 12 srovnány rozdílným směrem hutněné vývrty a tělesa vyrobené řezáním. Tato tělesa byla pro srovnání zvolena, z důvodů podobné míry možného ovlivnění tělesa procesem výroby (vrtání/řezání). Vliv nelze prokázat.



Graf 11 Krabicový graf ukazující závislost statického modulu pružnosti na poměrné štíhlosti – beton 1

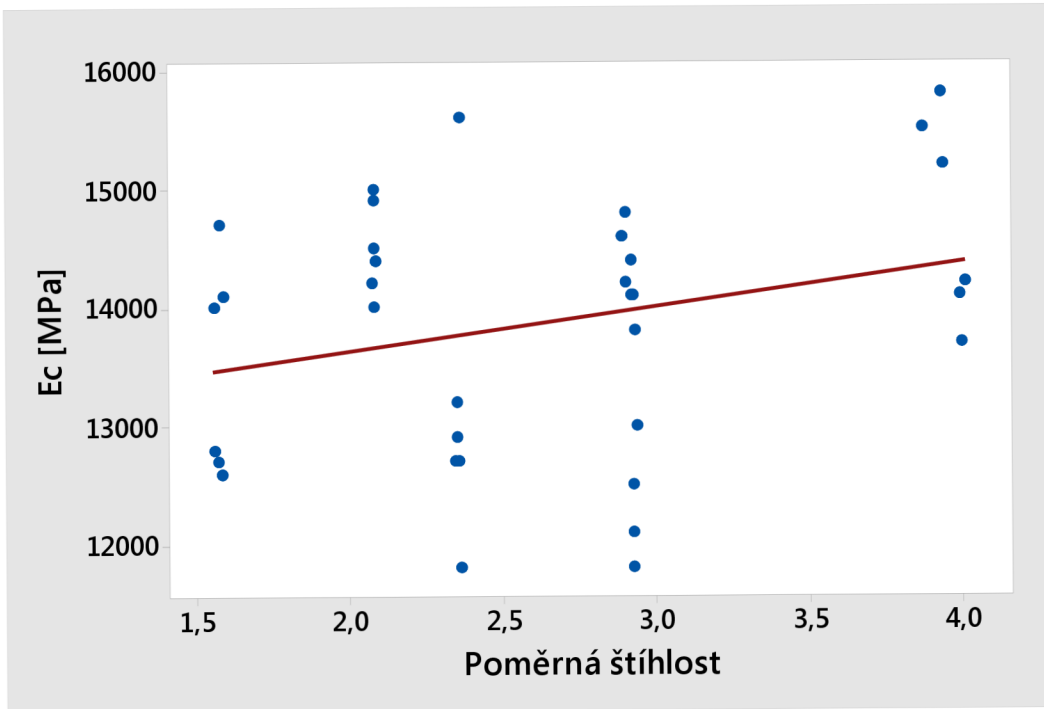


Graf 12 Krabicový graf ukazující závislost statického modulu pružnosti na poměrné štíhlosti - beton 2

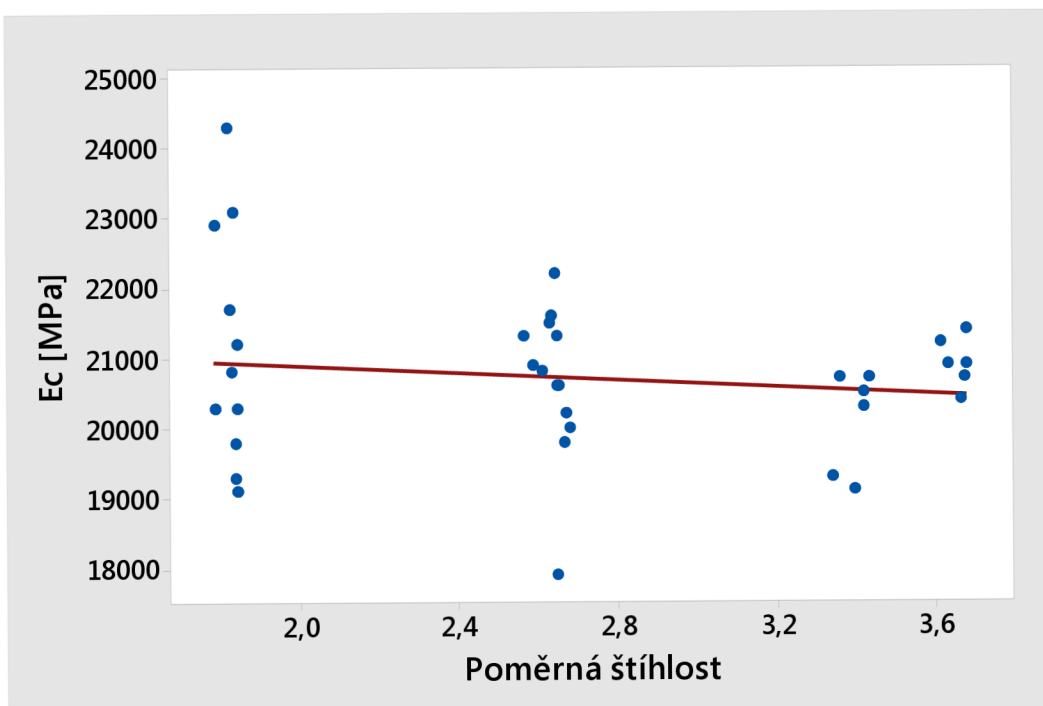
Na krabicových grafech 11 a 12 je znázorněna vliv poměrné štíhlosti na modulu pružnosti. Z prezentovaných výsledků, pokud se porovnají všechny typy a velikosti zkušebních těles, není možné učinit žádný jednoznačný závěr. Teoreticky by mělo platit, že čím je zkušební těleso štíhlejší, tím je naměřený modul pružnosti vyšší, viz např. [50]. To se však při sloučení všech naměřených výsledků do jednoho statistického souboru dat nepotvrdilo – a pravděpodobně ani potvrdit nemohlo, neboť do porovnání vstupuje více proměnných (faktorů, které výsledek ovlivňují).

Variantou by v tomto případě mohlo být porovnání pouze na tělesech, které sice mají jiný štíhlostní poměr, ale v ostatních aspektech se neliší. V grafech 13, 14 a 15 je proto toto porovnání znázorněno. V grafu 13 je uvedena závislost statického modulu pružnosti v tlaku na jádrových vývrtech z betonu 1. Všechna tělesa jsou vyrobena pomocí jádrového vrtání a všechna jsou při zkoušce v lisu umístěna kolmo na směr hutnění betonu. V grafu 14 je obdobné porovnání na jádrových vývrtech z betonu 2. Opět platí, že typ těles je stejný, jsou odebrány z jediného bloku a směr zkoušení mají také všechna tělesa shodný – rovnoběžný se směrem hutnění betonu. Graf 15 poté znázorňuje obdobnou závislost zjištěnou na tělesech, která byla vyrobena pomocí kotoučového řezání z trámců 150×150×600 mm a která mají tvar hranolu.

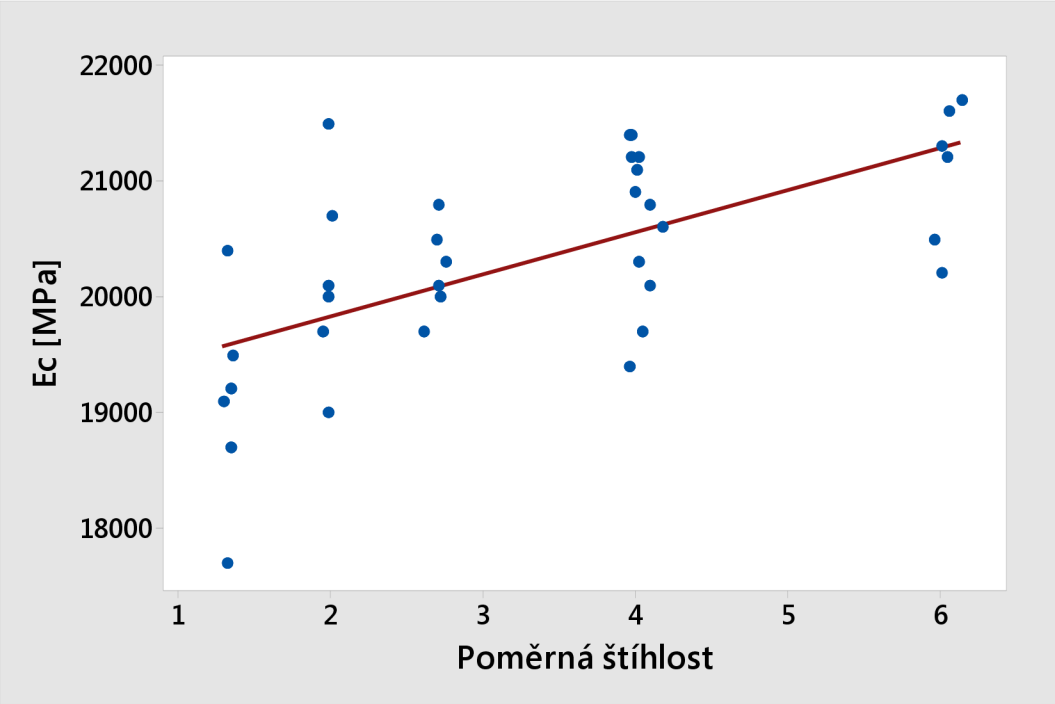
V prvních dvou případech, tedy v grafu 13 a 14 se ani v případě porovnávání na stejném typu těles hypotéza o vlivu štíhlosti nepotvrdila. V případě grafu 15 lze, do určité míry, závislost pozorovat, nicméně míra korelace této závislosti je relativně nízká (0,63).



Graf 13 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 1, vývrty



Graf 14 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 2, vývrty



Graf 15 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 2, tělesa vyrobené řezáním

5. Závěr

V rámci experimentálních prací na této DP bylo provedeno měření dynamických i statických modulů pružnosti různých zkušebních tělesech z lehkých betonů s kamenivem Liapor.

Cílem bylo zjištění vlivu typu, tvaru a rozměrů zkušebních těles především na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku. Veškerá získaná data byla podrobena statistické analýze v programu Minitab, která potvrdila normalita dat jednotlivých souborů na hladině významnosti 0,05.

Výsledky jednotlivých sad zkušebních tělesech byly porovnány s hodnotami na získanými ze zkoušek na válcích 150×300 mm. Důvod je ten, že norma ISO1920+10 i TP ČBS 05 [10] , [51] jednoznačně doporučují a upřednostňují pro zkoušku statického modulu pružnosti betonu právě zkušební těleso z formy, tvaru válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm.

Statistická analýza ukázala, že drtivá většina zkušebních těles vykazuje hodnoty modulu pružnosti, které se od hodnot zjištěných na válci statisticky významně neliší, anebo jsou statisticky významně vyšší. Je tedy možné konstatovat, že zkoušení statického modulu pružnosti na válci z formy je na straně bezpečné, neboť hodnoty stanovené na jiných tělesech (především jádrových vývrtech) nedosahují nižších hodnot.

Jedinou výjimkou je trámeček 40×40×160 mm získaný pomocí kotoučového řezání ze segmentů většího bloku, které vznikly při jádrovém vrtání (viz fotodokumentace v příloze). To může být způsobeno jednak malým příčným rozměrem a jednak tím, že takto malé těleso bylo řezáno, což mohlo způsobit jeho porušení vlivem mikrotrhlin.

6. Bibliografie

[1] *Lightweight Aggregate Concrete: Part 1: Recommended extensions to Model Code 90*. 1. Switzerland: Fédération internationale du béton, 2000. ISBN 2-8839-048-7.

[2] MELICHAR, Tomáš, David PROCHÁZKA a Vít ČERNÝ. Studium fyzikálně-mechanických parametrů lehkých vysokopevnostních betonů s pórovitým kamenivem na bázi spékaných popílků. *Beton TKS*. 2010, **2010**(4), 54-60.

[3] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

[4] HUBERTOVÁ, Michala. Lehký beton. *Beton TKS: Betonové konstrukce 21. století - betony s přidanou hodnotou*. 2012, **12**(), 107-119.

[5] NILSSKOG, Jan-Eirik, Rolf VALUM a Kenneth HARMON. Čerpaný vysokohodnotný lehký beton pro most Raftsundet, Severní Norsko. *Beton TKS: Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou*. 2012, **2012**(7), 127-132.

[6] ALEXANDER, Mark, Arnon BENTUR a Sidney MINDESS. *Durability of concrete: design and construction*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2017. Modern concrete technology series. ISBN 978-113-8746-749.

[7] ŠOMODÍKOVÁ, M., D. VOŘECHOVSKÁ, M. TEPLÝ a D. LEHKÝ. Modelling of the service life of concrete structures under combined mechanical and environmental actions. In: *Safety and*

Reliability of Complex Engineered Systems. Curych, Švýcarsko: L. Podofillini et al., 2015, s. 4219-4224. ISBN 978-1-138-02879-1.

[8] VYMAZAL, Tomáš, Břetislav TEPLÝ a Pavla ROVNANÍKOVÁ. Metodika hodnocení trvalé udržitelnosti betonu. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, 2018, **2018**(2), 58-63.

[9] HALAMOVÁ, R., D. KOCÁB, B. KUCHARCZYKOVÁ a P. DANĚK. The development of the early-age elastic modulus in cement-materials with different water coefficient. In: *Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: Synergizing Expertise and Bridging Scales of Space and Time.* [online]. Madeira, Portugalsko: RILEM Publications S.A.R.L., 2018, s. 345-350 [cit. 2019-01-11]. ISBN 978-2-35158-211-4.

[10] *ISO 1920-10: Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compresion*. 1st. Switzerland: Internation standart, 2010.

[11] *ČSN EN 12390-13: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. 1. Praha: ÚNMZ, 2014.

[12] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Maltoviny a kamenivo*. Brno, 2004.

[13] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Beton*. Brno, 2004.

[14] SVOBODA, . *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6007-1.

[15] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu. *SGS 2011*. 2011, **2011**(1), 18. Dostupné také z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_priprava_HSC_a_UHSC.pdf

[16] CIKRLE, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení. *Beton TKS*. 2010, **2010**(5), 40-44.

[17] *ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 1. Praha: ČNI, 2009.

[18] *ČSN EN 12350-5: Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. 1. Praha: ČNI, 2000.

[19] *ČSN EN 206: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 1. Praha: ÚNMZ, 2014.

[20] *ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.

[21] *ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.

[22] *ČSN EN 12390-6: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2010.

[23] *ČSN EN 12390-1: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 1. Praha: ÚNMH, 2013.

[24] *ČSN EN 12390-2: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. 1. 2009: ÚNMZ, 2009.

[25] *ČSN EN 12390-4 - Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. 1. Praha: ČNI, 2001.

[26] *ČSN EN 206+A1: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 1. Praha: ÚNMZ, 2018.

[27] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky: Studijní opory, předmět BJ10, Modul M01*. Brno, 2006.

[28] *ČSN EN 1520: Prefabrikované vyztužené dílce z mezerovitého betonu z pórovitého kameniva vyztužené nosnou a nenosnou výztuží*. Ed. 2. Praha: ÚNMZ, 2011.

[29] HUBERTOVÁ, Michala. Statický modul pružnosti lehkých konstrukčních betonů. *Beton TKS*. 2010, **2010**(4), 50-53.

[30] *ČSN EN 13055: Pórovité kamenivo*. 1. Praha: ÚNMZ, 2017.

[31] ČERNÝ, Vít a Magdaléna KOCIÁNOVÁ. Umělé spékané popílkové kamenivo pro výrobu lehkých betonů. *Beton TKS*. 2015, **2015**(5), 44-46.

[32] Liapor: Co je liapor. *Liapor* [online]. Vintířov: LIAS VINTÍŘOV: LEHKÝ STAVEBNÍ MATERIÁL K.S., 2016 [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: http://www.liapor.cz/co-je-liapor

[33] Liapor: Jak se vyrábí. *Liapor* [online]. Vintířov: LIAS VINTÍŘOV: LEHKÝ STAVEBNÍ MATERIÁL K.S., 2016 [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: http://www.liapor.cz/jak-se-vyrabi

[34] *ČSN EN 1992-1-1: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 1. Praha: ČNI, 2011.

[35] *Technologie 2017: 14. Konference*. 1. Jihlava: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906097-9-2.

[36] *ČSN 73 6174: Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. 1. Praha: ČNI, 1994.

[37] *ČSN 73 1372: Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. 1. Praha: ÚNMZ, 2012.

[38] *ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 1. Praha: ÚNMZ, 2011.

[39] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Petr CIKRLE, Tereza KOMÁRKOVÁ a Bronislava MORAVCOVÁ. Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. *Beton TKS*. 2014, **2014**(3), 74-79.

[40] *ISO 1920-3: Testing of concrete - Part 3: Making and curing test specimens*. 1. Switzerland: Internation standart, 2004.

[41] *ISO 1920-6: Testing of concrete -- Part 6: Sampling, preparing and testing of concrete cores*. 1. Switzerland: Internation standart, 2004.

[42] *ISO 1920-4: Testing of concrete -- Part 4: Strength of hardened concrete*. 1. Switzerland: Internation standart, 2005.

[43] *ČSN ISO 6784: Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 1. Praha: ČNI, 1993.

[44] *ČSN EN 12504-4: Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 1. Praha: ČNIČ, 2005.

[45] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *Beton TKS*. 2013, **2013**(3), 74-79.

[46] *ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 1. Praha: ČNI, 2000.

[47] *ČSN EN 12350-1: Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. 1. Praha: ČNI, 2009.

[48] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Petr DANĚK, Barbara KUCHARCZYKOVÁ a Romana HALAMOVÁ. Experimental Determination of how the Static Modulus of Elasticity is Influenced by the Value of the Upper Loading Stress. *Solid State Phenomena* [online]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2018, **2018**(272), 64-69 [cit. 2018-02-28]. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.272.64. ISSN 1662-9779. Dostupné z: https://www.scientific.net/SSP.272.64

[49] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu - rekapitulace. *Beton TKS*. 2012, **2012**(4), 62-67.

[50] KOCÁB, Dalibor. *Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Petr Cikrle.

[51] VÍTEK, Jan L., Jiří KOLÍSKO, Robert COUFAL a Petr HUŇKA. *Technická pravidla ČBS 05 Modul pružnosti betonu*. 1. Praha: Česká betonářská

společnost ČSSI, 2016. Technická pravidla ČBS. ISBN 978-80-906097-5-4.

[52] ANTON, Ondřej. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI02: Zkušebnictví a technologie*. Brno, 2005.

[53] HALAMOVÁ, Romana. *Ověřování modulu pružnosti na konstrukcích*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT - Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb PhD.

[54] Přírodní vulkanická pemza. In: *MořskáHouba.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: http://www.morskahouba.cz/cz/eshop/?prirodni-vulkanicka-pemza-epn-500

[55] Cinder [Přírodní škvára]. In: *Wikipedie.org* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cinder

[56] Tuf. In: *EncyklopediaPoznania.sk* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://encyklopediapoznania.sk/clanok/2642/tuf

[57] Granulovaná surovinová vsázka kulovitého tvaru [Agloporit]. In: *Agloporit.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: http://agloporit.cz/granulovana-surovinova-vsazka-kuloviteho-tvaru/

[58] DENNERT-PORAVER-GLA116-3 [Poraver]. In: *MaterialDistrict.com* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://materialdistrict.com/material/poraver/dennert-poraver-gla116-3/

[59] Liapor - kamenivo pro stavební účely. In: *ObchodLiapor.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://obchod.liapor.cz/keramicke-kamenivo-keramzit-liapor-8-16-mm-50-l

[60] ALEXA, Martin. *Vliv mnohonásobného zatěžování na vybrané parametry lehkého betonu*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Dalibor Kocáb.

7. Seznam obrázků

Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Füllerovy rovnice pro D_{max} = 16 mm [3] 17
Obr. 2 Sednutí kužele betonu s různou třídou konzistence (od S5 k S1) [3] 18
Obr. 3 Zkouška rozlitím 18
Obr. 4 Vyhovující porušení zkušebních válců [52] 20
Obr. 5 Schéma zkoušky pevnosti v tahu ohybem [21] 21
Obr. 6 Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu na krychli [22] 21
Obr. 7 Struktury lehkých betonů- zleva pórovitý, hutný, mezerovitý [4] 23
Obr. 8 Průřez kopulí Pantheonu [3] 24
Obr. 9 Zleva: pemza, škvára, tuf [54], [55], [56] 27
Obr. 10 Zleva: Agloporit, Poraver, Liapor [57], [58], [59] 29
Obr. 11 Deformační diagram betonu v tlaku [13] 31
Obr. 12 Schéma měření modulu pružnosti zkouškou v tahu ohybem [36] 34
Obr. 13 Umístění měřícího zařízení na zkušebním tělese [52] 35
Obr. 14 Průběh zatěovacích cyklů, podle normy ISO 1920-10 [10], [60] 37
Obr. 15 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody A [11], [53] 37
Obr. 16 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody B [11], [53] 39
Obr. 17 Poloha snímače a budiče pro příčné kmitání [52]. 41
Obr. 18 Poloha snímače a budiče pro podélné kmitání [52]. 41
Obr. 19 Poloha snímače a budiče pro kroutivé kmitání [52]. 41
Obr. 20 Průběh jádrového vrtání, soupravu obsluhoval ing. Petr Žítt 48
Obr. 21 Rozložení jádrových vrtů v bloku 48
Obr. 22 Zkouška pevnosti v tahu ohybem 52
Obr. 23 Měření dyn. modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou 53
Obr. 24 Měření rozměrů těles 54

Obr. 25 Ukázka porušení válce V -7 tlakem 55
Obr. 26 Průběh měření dynamických modulů pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou 56
Obr. 27 Průběhy deformace a síly při zkoušení statického modulu pružnosti 57
Obr. 28 Vývrt JV-100-1 osazen měřící soupravou v lisu DELTA 6-300 57
Obr. 29 Měření rozměrů těles z betonu 2 58

8. Seznam tabulek

Tab. 1 Pevnostní třídy lehkých betonů [24] 24
Tab. 2 Receptury betonů 46
Tab. 3 Vodní součinitelé 47
Tab. 4 Vlastnosti čerstvých betonů 47
Tab. 5 Přehled těles 49
Tab. 6 Výsledky dynamických modulů pružnosti na válcích 51
Tab. 7 Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a příčném tahu na krychlích 51
Tab. 8 Naměřené výsledné charakteristiky hranolů 53
Tab. 9 Pevnost v tlaku na krychlích 53
Tab. 10 Výsledky pružnostních a pevnostních zkoušek na všech sadách těles - pro jednotlivé vlastnosti je vždy uvedena průměrná hodnota a výběrová směrodatná odchylka (označena s) 60
Tab. 11 Výsledky 2t-testu pro všechny sady těles - v případě, že se výsledky liší, je uvedeno, zda jsou vyšší nebo nižší než "normové" hodnoty na válci 150×300 mm 65

9. Seznam grafů

Graf 1 Statický modul pružnosti podle tvaru těles pro oba betony. 61
Graf 2 Statické moduly pružnosti dle velikosti příčného rozměru. 62
Graf 3 Statické moduly pružnosti na tělesech z forem - beton 1 62

Graf 4 Statické moduly pružnosti na vývrtech - beton 1 63
Graf 5 Statické moduly pružnosti na tělesech z forem - beton 2 64
Graf 6 Statické moduly pružnosti na vývrtech - beton 2 64
Graf 7 Statické moduly pružnosti na řezaných tělesech - beton 2 64
Graf 8 Srovnání vlivu tvarů, rozměrů a typů těles na pevnost v tlaku a statický modul pružnosti pro sady z betonu 2 - 1. část 66
Graf 9 Srovnání vlivu tvarů, rozměrů a typů těles na pevnost v tlaku a statický modul pružnosti pro sady z betonu 2 - 2. část 66
Graf 10 Porovnání vlivů směru hutnění na statický modul pružnosti obou betonů 67
Graf 11 Krabicový graf ukazující závislost statického modulu pružnosti na poměrné štíhlosti – beton 1 68
Graf 12 Krabicový graf ukazující závislost statického modulu pružnosti na poměrné štíhlosti - beton 2 68
Graf 13 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 1, vývrty 70
Graf 14 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 2, vývrty 70
Graf 15 Porovnání vlivů poměrné štíhlosti na statický modul pružnosti - beton 2, tělesa vyrobené řezáním 71

10. Seznam použitých symbolů a zkratek

LC – lehký beton

ρ – objemová hmotnost

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

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

MPa – Megapascal

UZ- ultrazvuk

L - délka

d – průměr

f_c - pevnost betonu v tlaku

σ – napětí

E_c – statický modul pružnosti

ε – poměrná deformace

D_{max} – velikost maximálního zrna kameniva

E_{cu} – dynamický modul pružnosti – UZ metoda

D – objemová hmotnost zkoušeného materiálu

v_L – rychlost impulzu

k – koeficient rozměrnosti prostředí

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

f_L – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa

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

c_1 – korekční součinitel

f_f – první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa

i – poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa

G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku

k – součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa

f_t – první vlastní frekvence kroutivého kmitání zkoušeného tělesa

F_c – naměřená maximální tlaková síla

A – tlačená plocha zkušebního tělesa

f_{ct} – pevnost v příčném tahu

F – naměřená maximální tlaková síla

w – vodní součinitel

v – množství vody v čerstvém betonu

c – množství cementu v čerstvém betonu

HPC – vysokohodnotný beton

UHPC – ultra-vysokohodnotný beton

P – proprad sítem o velikosti otvoru d

f_c – pevnost v tlaku

f_{fc} – pevnost v tahu ohybem

f_{ct} – pevnost v příčném tahu

F_{max} – maximální zatěžovací síla odečtená z lisu

a – délka strany porušené plochy

E_{cm} – sečnový modul pružnosti

f_{cm} – průměrná hodnota pevnosti v tlaku

f_{ck} – charakteristická válcová pevnost v tlaku ve stáří 28 dní

σ_a – horní mez napětí

σ_b – spodní mez napětí

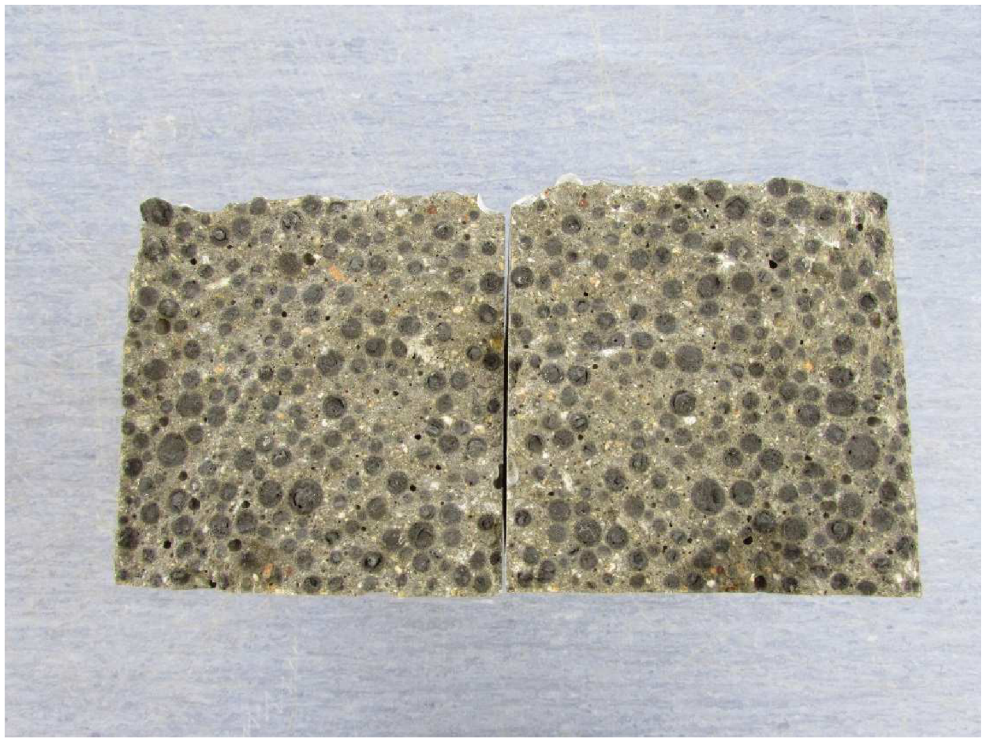
11. Přílohy

Obr. P1- Výroba zkušebních těles – plnění forem.

Obr. P2 – Hutnění těles na vibračním stolku

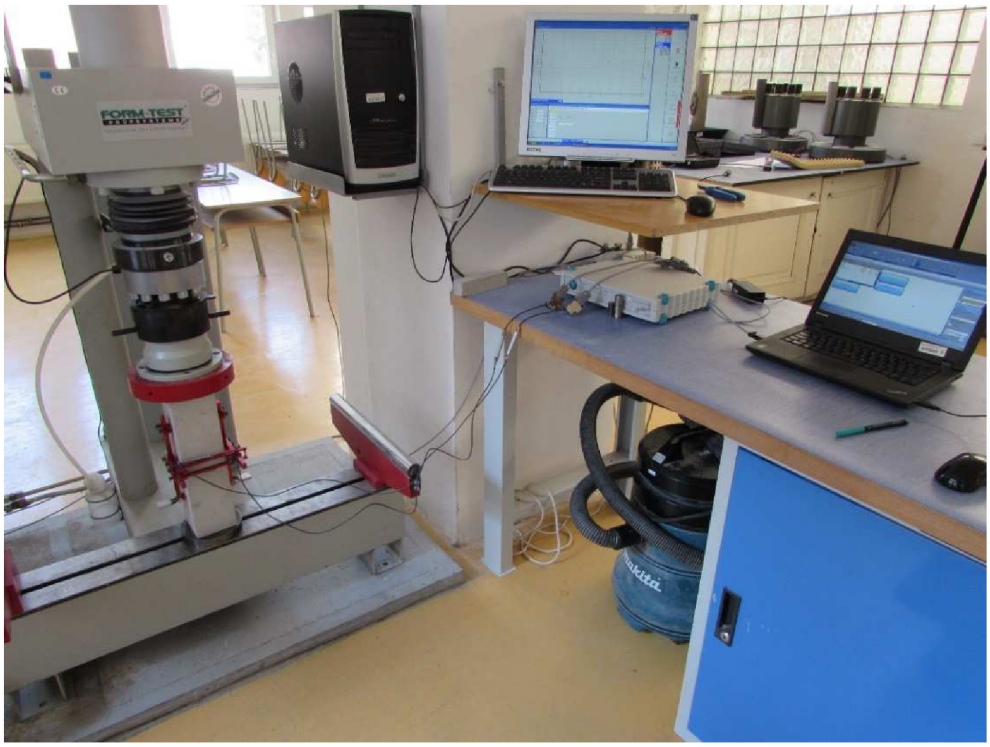
Obr. P3 – Tělesa z betonu 2 těsně po betonáži

Obr. P4 – Skladování těles ve vodní lázni pro optimální zrání



Obr. P5 – Detail lomové plochy tělesa po zkoušce pevnosti v tahu ohybem

Obr. P6 – Betonové bloky po odebrání vývrtů

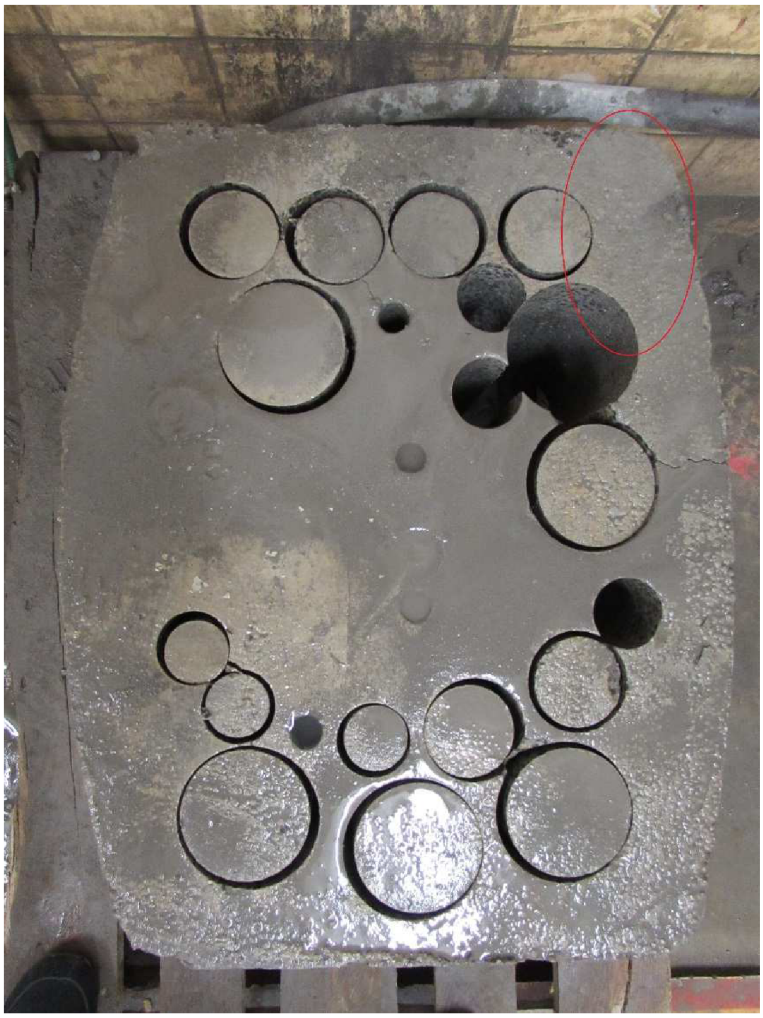


Obr. P7 – Kompletní soustava zařízení pro měření modulu pružnosti

Obr. P8 – Porušení válce po zkoušce pevnosti v tlaku

Obr. P9 – Porušení trámečku po zkoušce pevnosti v tlaku

Obr. P10 – Porušení trámku po zkoušce pevnosti v tlaku

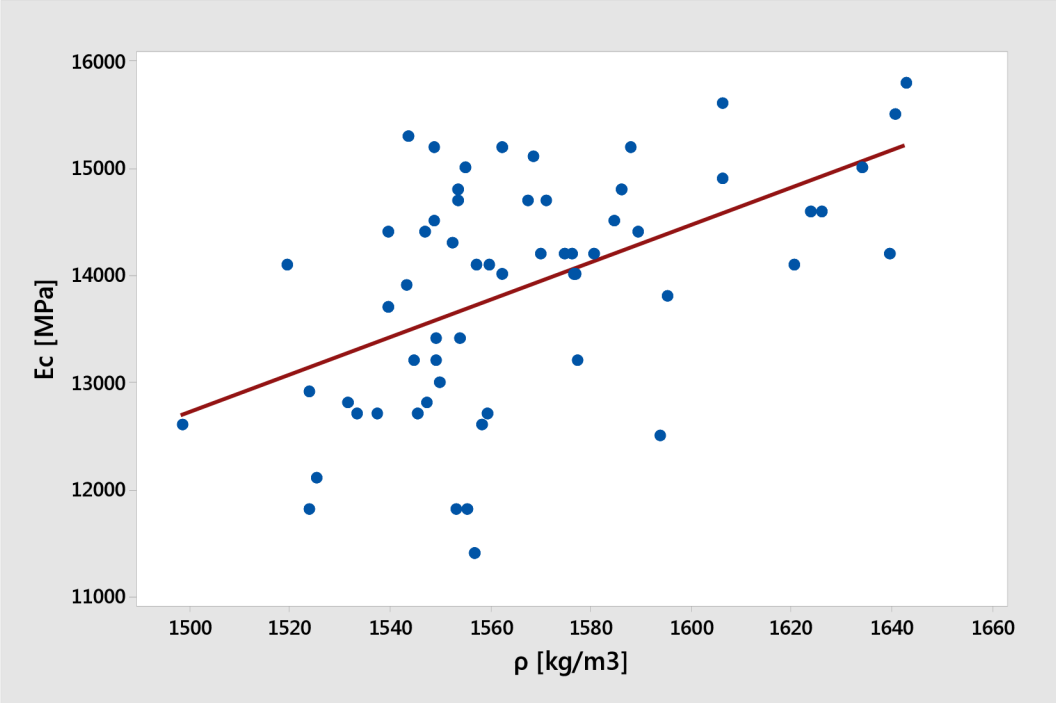


Obr. P11 – Kalfas v procesu odebírání jádrových vývrtů, červená elipsa označuje jedno z míst, ze kterých byla řezána tělesa R-TR40

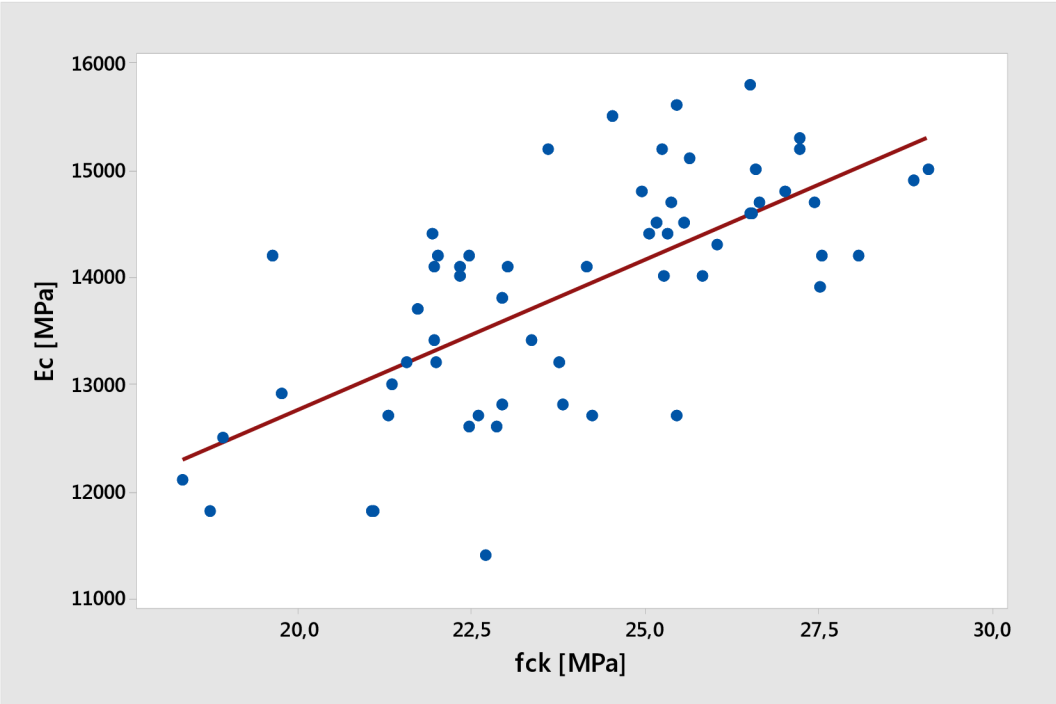
Tabulka všech těles s mírou napětí horní zatěžovací meze vůči skutečné pevnosti fc – zvýrazněné jsou hodnoty lišící se o více jak 20 % od 1/3 fc

P-100-1	36,1 %	P-150-1a	41,5 %	C-1	35,5 %	C-1	32,4 %
P-100-2	35,6 %	P-150-1b	41,9 %	C-2	38,2 %	C-2	33,8 %
P-100-3	34,7 %	P-150-2a	36,7 %	C-3	37,8 %	C-3	33,0 %
P-100-4	34,8 %	P-150-2b	42,4 %	C-4	35,4 %	C-4	35,1 %
P-100-5	33,9 %	P-150-3a	41,7 %	C-5	38,3 %	C-5	34,0 %
P-100-6	34,7 %	P-150-3b	33,4 %	C-6	35,6 %	C-6	36,6 %
JV-100-1	38,1 %	JV-150-1	26,7 %	JV-75-1	30,4 %	JV-50-1A	34,3 %
JV-100-2	38,2 %	JV-150-2	30,5 %	JV-75-2	35,6 %	JV-50-2A	39,0 %
JV-100-3	33,6 %	JV-150-3	26,5 %	JV-75-3	32,3 %	JV-50-3A	30,5 %
JV-100-4	31,5 %	JV-150-4	30,7 %	JV-75-4	33,3 %	JV-50-4A	37,2 %
JV-100-5	37,4 %	JV-150-5	27,4 %	JV-75-5	30,7 %	JV-50-7A	36,0 %
JV-100-6	31,6 %	JV-150-6	30,8 %	JV-75-6	34,5 %	JV-50-8A	29,8 %
JV-50-1B	34,5 %	JV-50-5A	32,3 %	T100-1	31,8 %	T40-1	31,4 %
JV-50-2B	32,0 %	JV-50-5B	28,2 %	T100-2	32,8 %	T40-2	31,3 %
JV-50-3B	28,1 %	JV-50-5C	30,3 %	T100-3	31,4 %	T40-3	30,0 %
JV-50-4B	32,4 %	JV-50-6A	32,6 %	T100-4	33,8 %	T40-4	32,0 %
JV-50-7B	26,8 %	JV-50-6B	28,8 %	T100-5	33,3 %	T40-5	35,0 %
JV-50-8B	28,7 %	JV-50-6C	31,9 %	T100-6	32,5 %	T40-6	33,9 %
						T40-7	31,2 %
						T40-8	34,4 %
K-1	32,6 %	V-1	30,8 %	JV100-1	35,6 %	JV75-1	29,6 %
K-2	33,6 %	V-2	31,2 %	JV100-2	29,7 %	JV75-2	33,4 %
K-3	33,0 %	V-3	36,9 %	JV100-3	28,7 %	JV75-3	35,6 %
K-4	33,0 %	V-4	34,1 %	JV100-4	32,1 %	JV75-4	34,7 %
K-5	34,0 %	V-5	31,7 %	JV100-5	28,6 %	JV75-5	29,7 %
K-6	34,5 %	V-6	31,9 %	JV100-6	30,7 %	JV75-6	31,2 %
JV50-1A	28,3 %	JV50-1B	33,8 %	JV50-7A	35,2 %	JV75-7A	37,5 %
JV50-2A	30,8 %	JV50-2B	28,0 %	JV50-8A	32,9 %	JV75-8A	30,1 %
JV50-3A	34,2 %	JV50-3B	27,5 %	JV50-9A	31,9 %	JV75-9A	32,3 %
JV50-4A	31,8 %	JV50-4B	35,3 %	JV50-10A	32,2 %	JV75-7B	30,7 %
JV50-5A	35,5 %	JV50-5B	31,1 %	JV50-7B	34,3 %	JV75-8B	30,7 %
JV50-6A	38,8 %	JV50-6B	35,6 %	JV50-8B	32,6 %	JV75-9B	31,1 %
				JV50-9B	35,9 %		
T150-1	36,2 %	R75/100-1	32,7 %	R75/200-1	33,8 %	R-TR40-1	31,5 %
T150-2	34,2 %	R75/100-2	33,9 %	R75/200-2	31,2 %	R-TR40-2	38,7 %
T150-3	33,9 %	R75/100-3	32,0 %	R75/200-3	33,9 %	R-TR40-3	32,7 %
T150-4	34,2 %	R75/100-4	28,8 %	R75/200-4	33,2 %	R-TR40-4	42,4 %
T150-5	30,1 %	R75/100-5	28,8 %	R75/200-5	35,3 %	R-TR40-5	31,3 %
T150-6	33,9 %	R75/100-6	35,0 %	R75/200-6	33,7 %	R-TR40-6	29,5 %
R50/200-1	34,6 %	R50/100-1	34,0 %	R50/300-1	29,1 %	R75/300-1	34,3 %
R50/200-2	30,2 %	R50/100-2	32,0 %	R50/300-2	29,1 %	R75/300-2	36,8 %
R50/200-3	30,6 %	R50/100-3	31,8 %	R50/300-3	31,6 %	R75/300-3	32,1 %
R50/200-4	33,4 %	R50/100-4	41,1 %	R50/300-4	30,7 %	R75/300-4	30,9 %
R50/200-5	31,2 %	R50/100-5	30,8 %	R50/300-5	32,3 %	R75/300-5	33,2 %
R50/200-6	28,7 %	R50/100-6	34,6 %	R50/300-6	33,2 %	R75/300-6	31,3 %

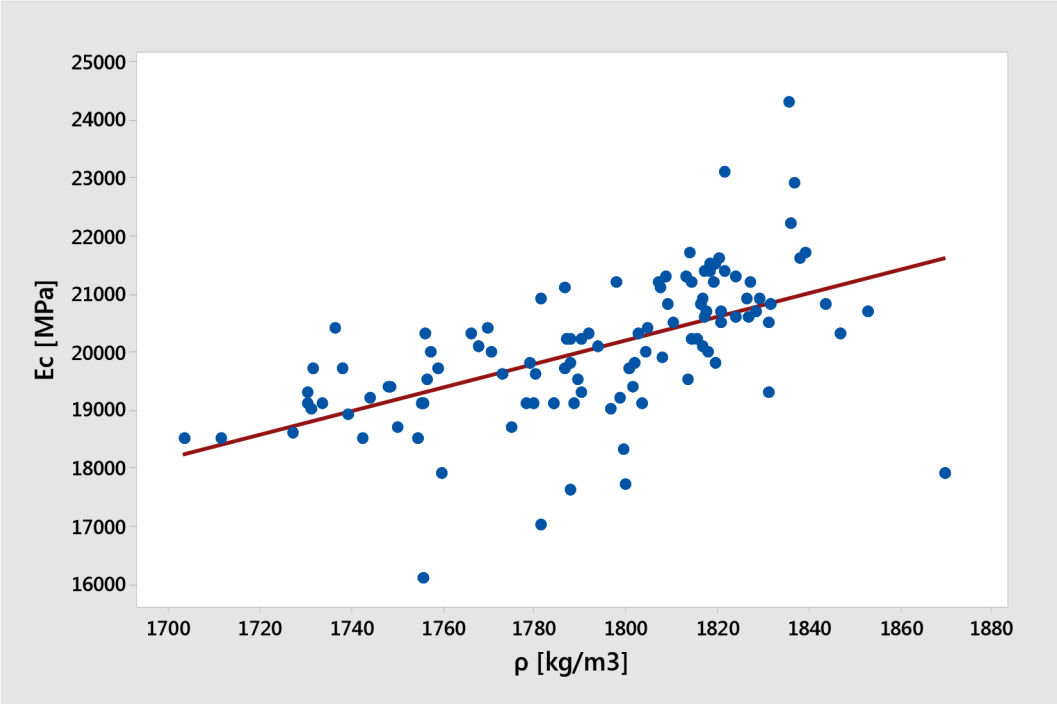
Pro zajímavost jsou uvedeny grafy závislosti statického modulu pružnosti na objemové hmotnosti a statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku.



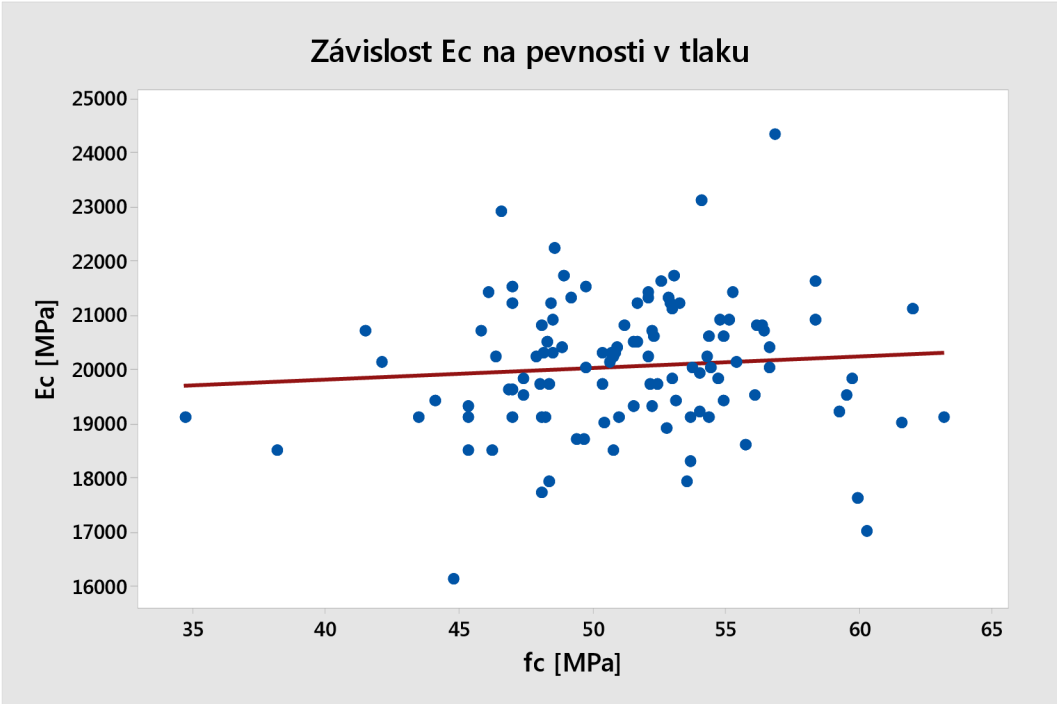
Graf 1P – Závislost modulu pružnosti na objemové hmotnosti – beton 1



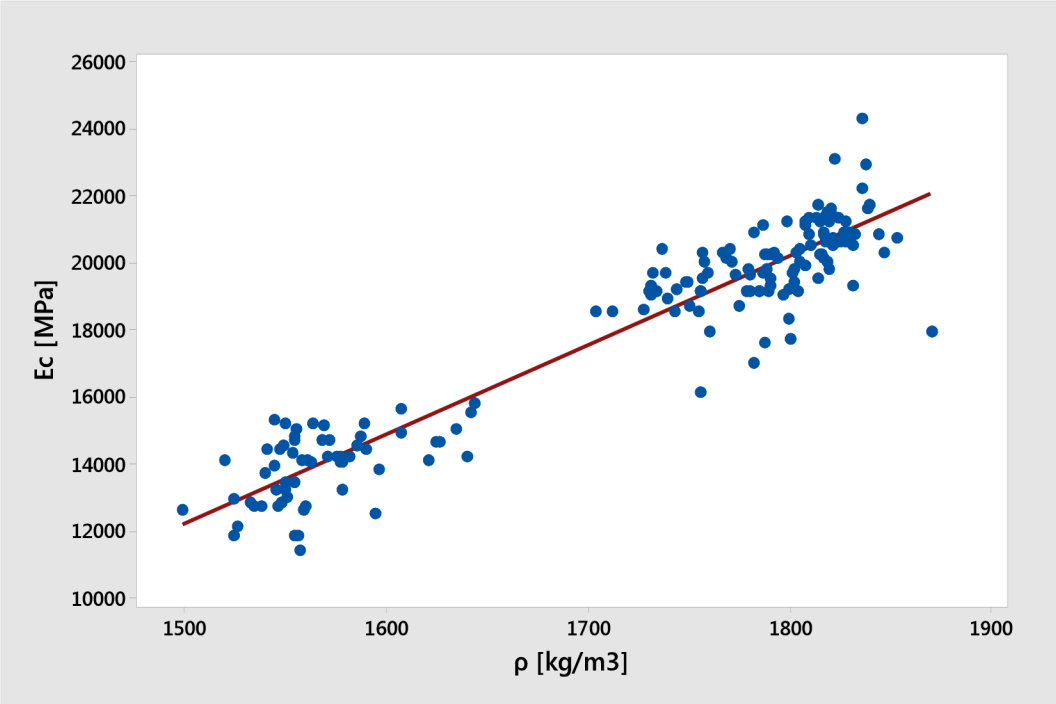
Graf 2P – Závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku – beton 1



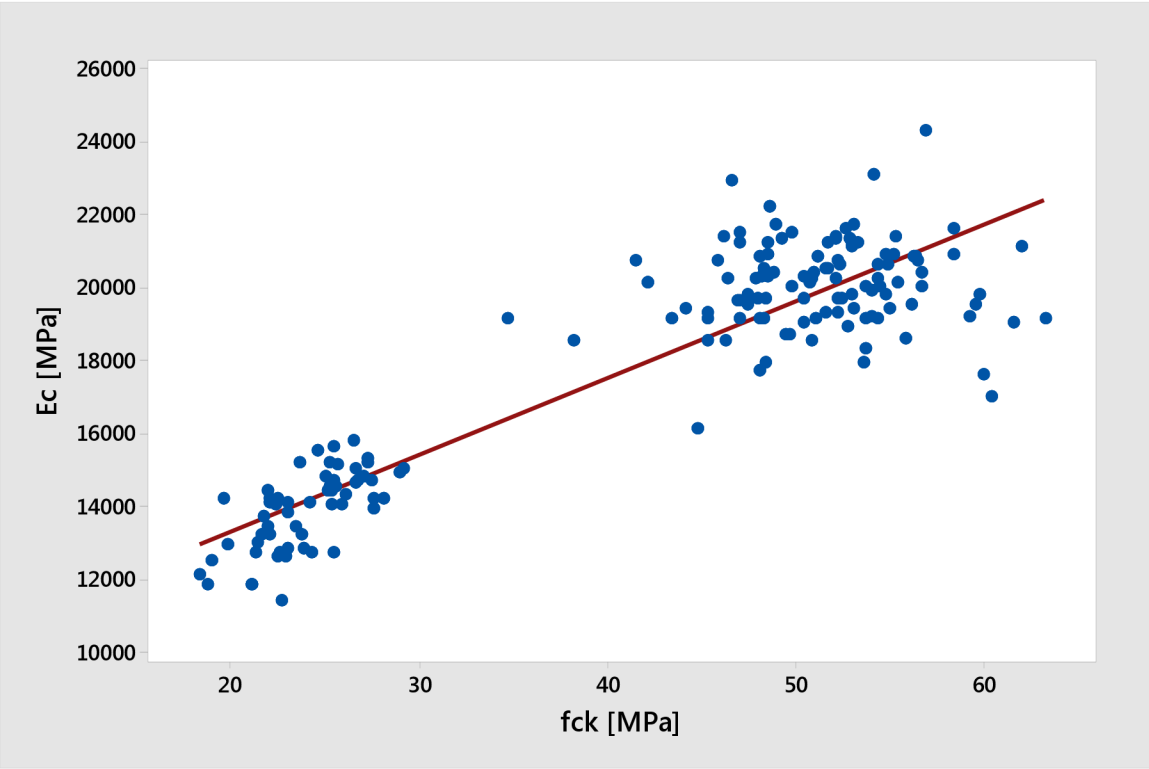
Graf 3P – Závislost modulu pružnosti na objemové hmotnosti – beton 2



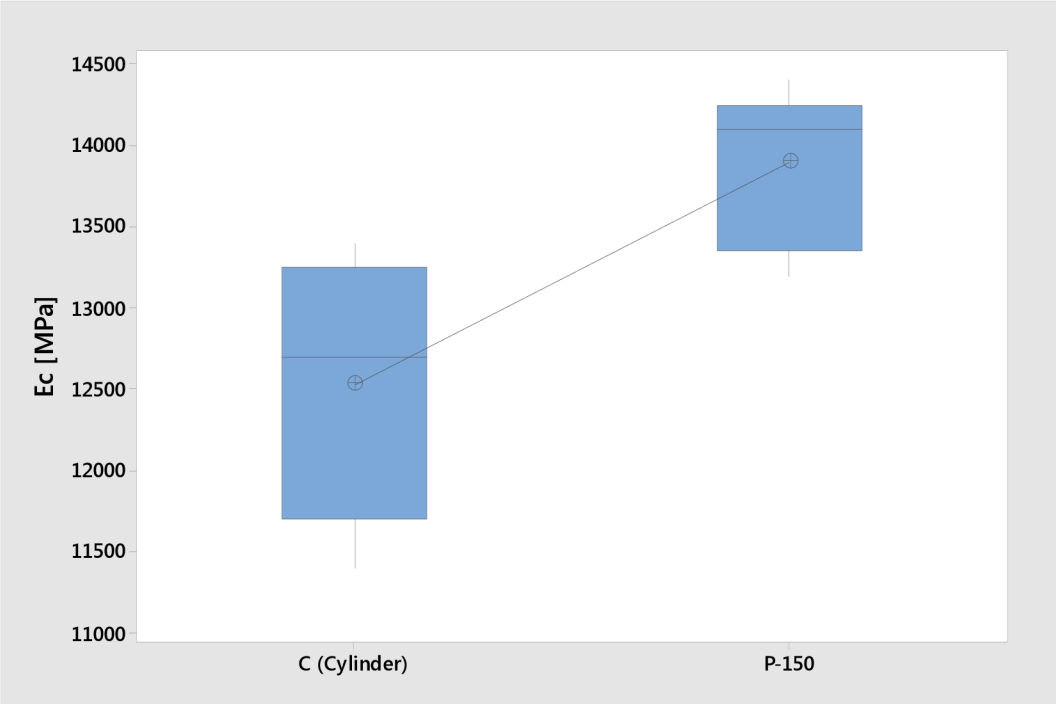
Graf 4P – Závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku – beton 2



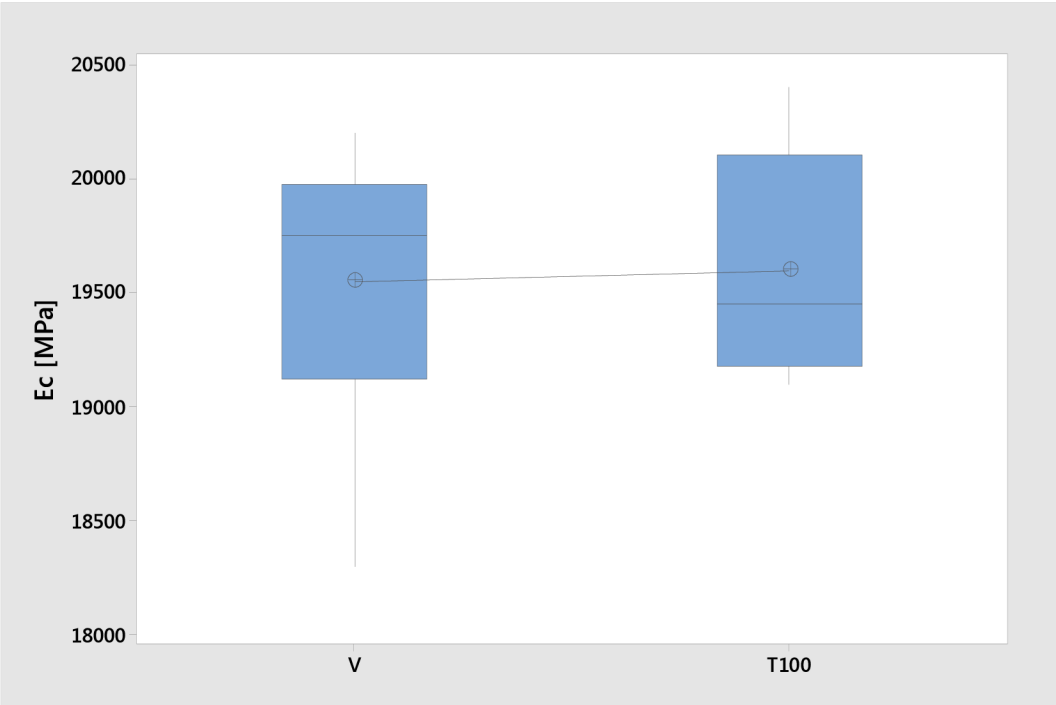
Graf 5P – Závislost modulu pružnosti na objemové hmotnosti – oba betony



Graf 6P – Závislost modulu pružnosti na objemové hmotnosti – oba betony

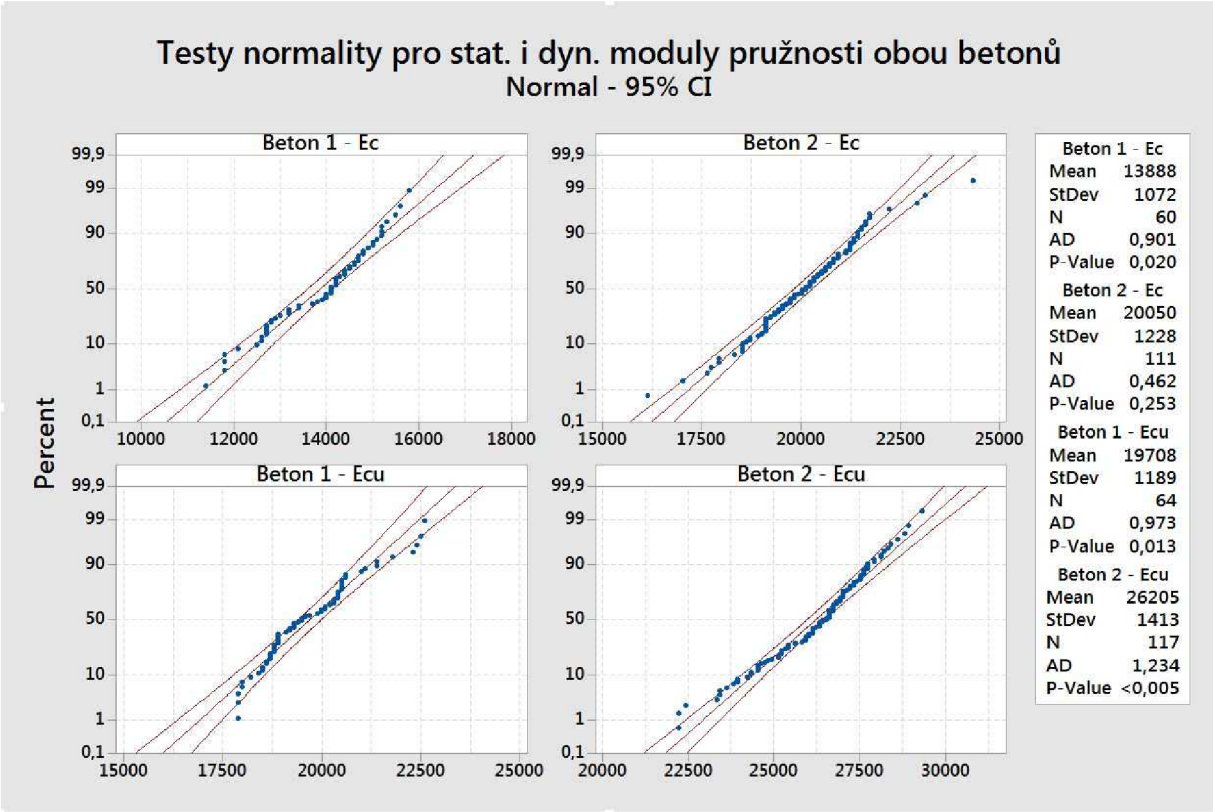


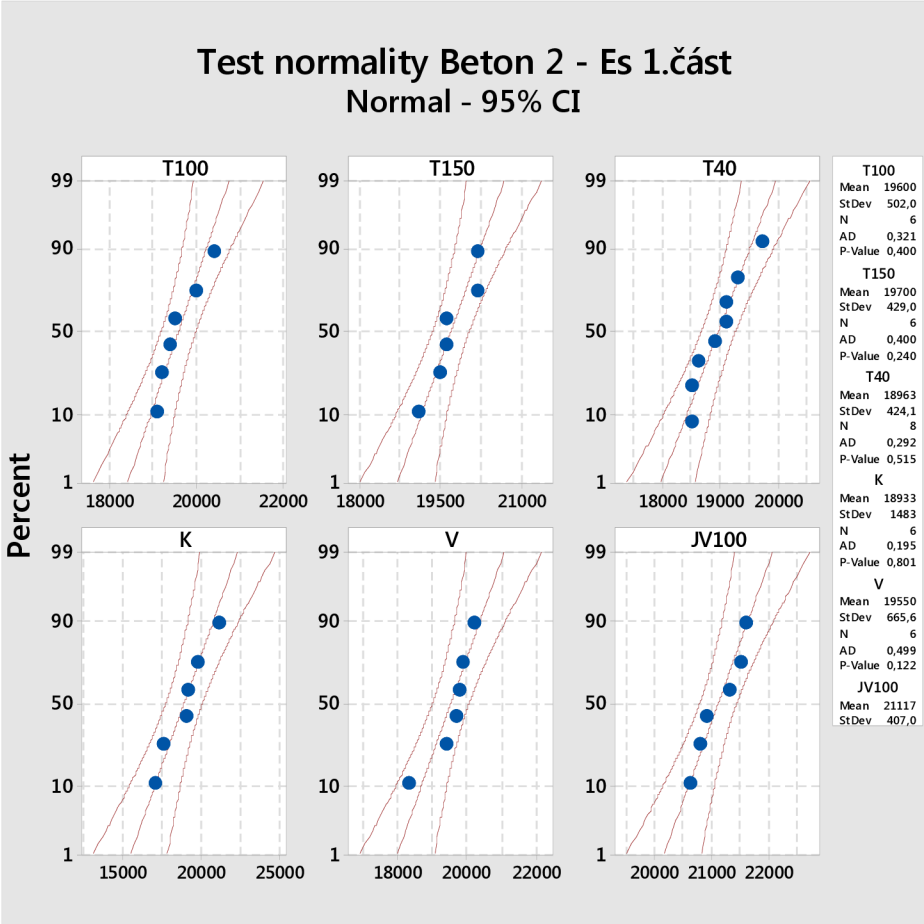
Graf 7P – Výsledek 2t – testu – Válce C vs. hranoly P-150 (liší se)

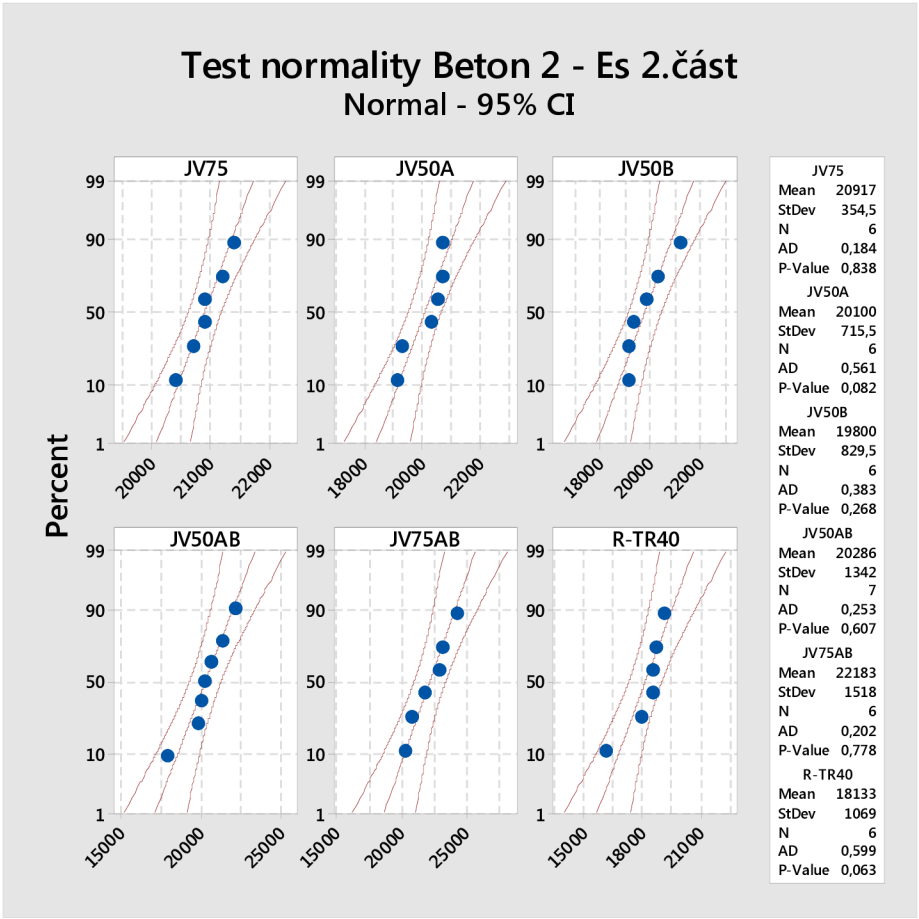


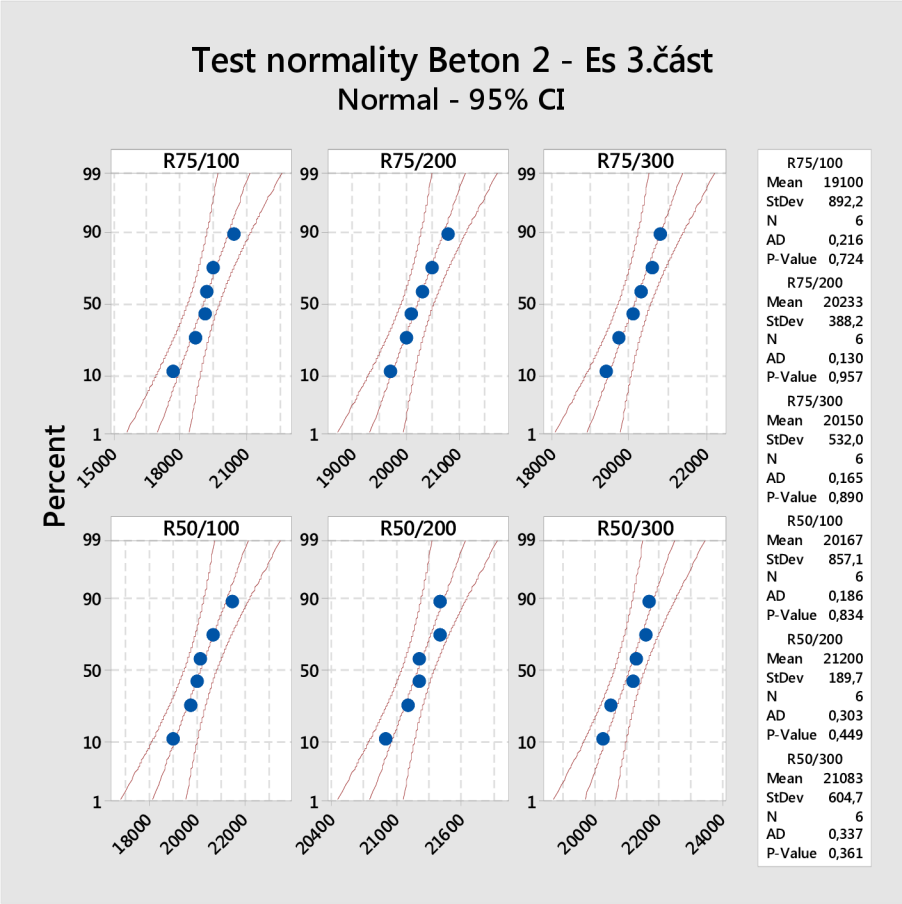
Graf 8P – Výsledek 2t – testu – Válce V vs. hranoly T-100 (neliší se)

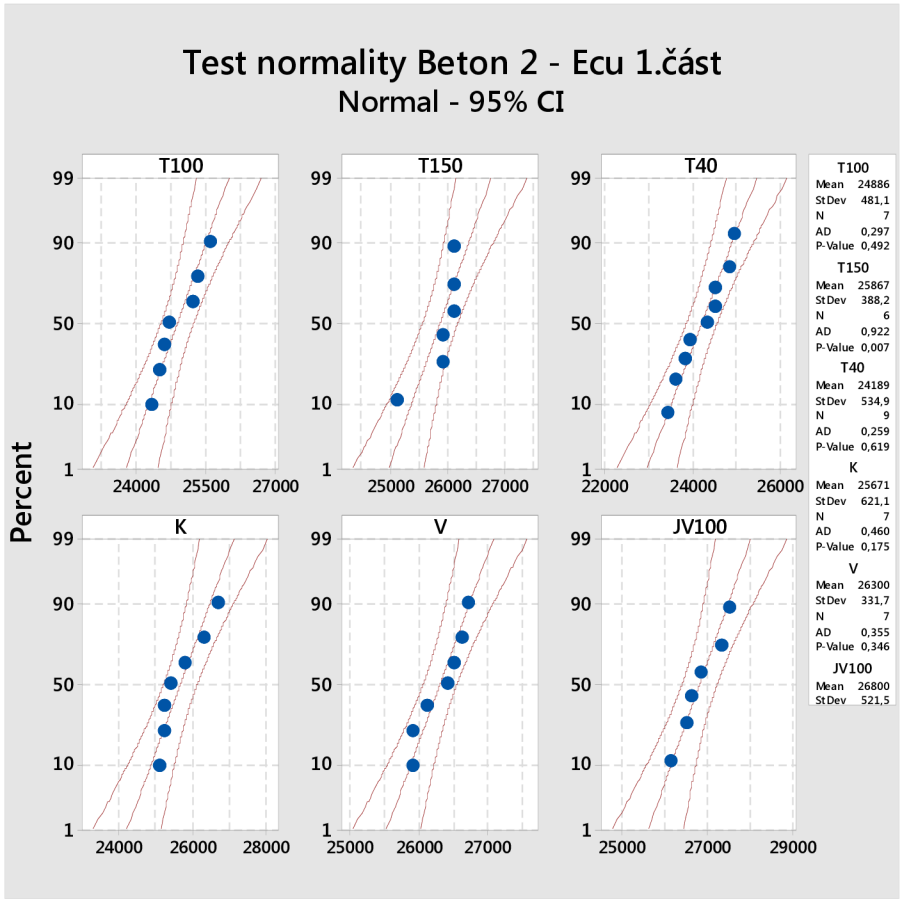
V následujících grafech jsou uvedeny výsledky testů normality. V prvním grafu jsou pro všechny sady jednotlivých betonů pro statický i dynamický modul pružnosti. Zbylé grafy jsou pro jednotlivé sady těles a pro statické i dynamické moduly pružnosti. Pokud je p-hodnota nižší než hladina významnosti 0,05, je hypotéza o normálním rozdělení dat zamítnuta.

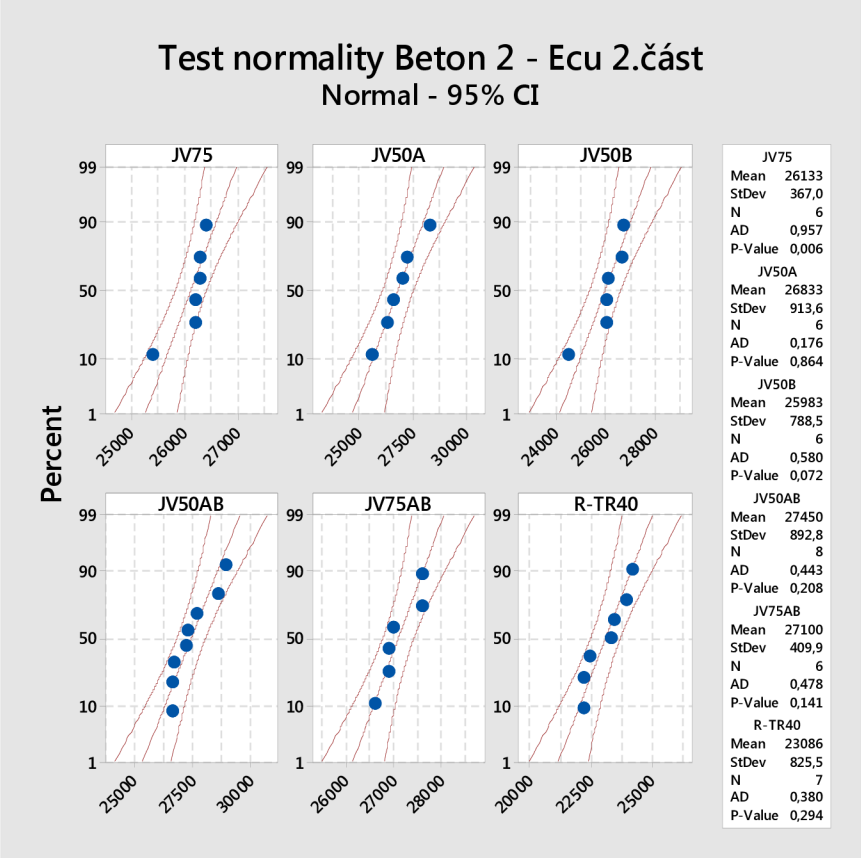


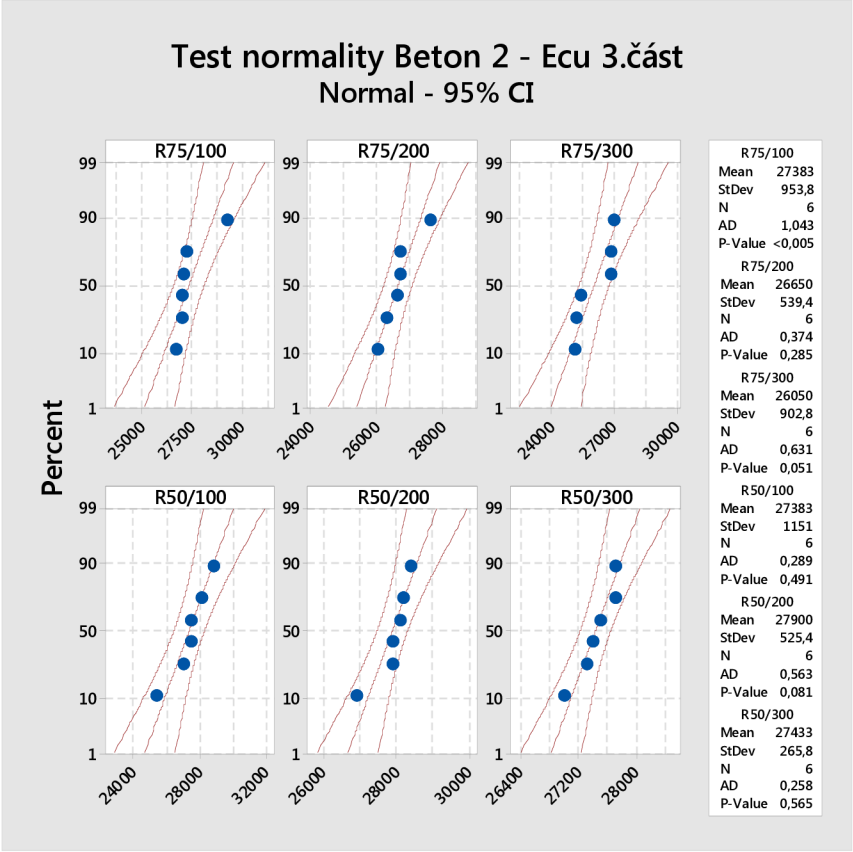

Test normality Beton 2 - Es 1.část
Normal - 95% CI
Percent
T100
T150
T40
K
V
JV100
T100
Mean 19600
StDev 502,0
N 6
AD 0,321
P-Value 0,400
T150
Mean 19700
StDev 429,0
N 6
AD 0,400
P-Value 0,240
T40
Mean 18963
StDev 424,1
N 8
AD 0,292
P-Value 0,515
K
Mean 18933
StDev 1483
N 6
AD 0,195
P-Value 0,801
V
Mean 19550
StDev 665,6
N 6
AD 0,499
P-Value 0,122
JV100
Mean 21117
StDev 407,0

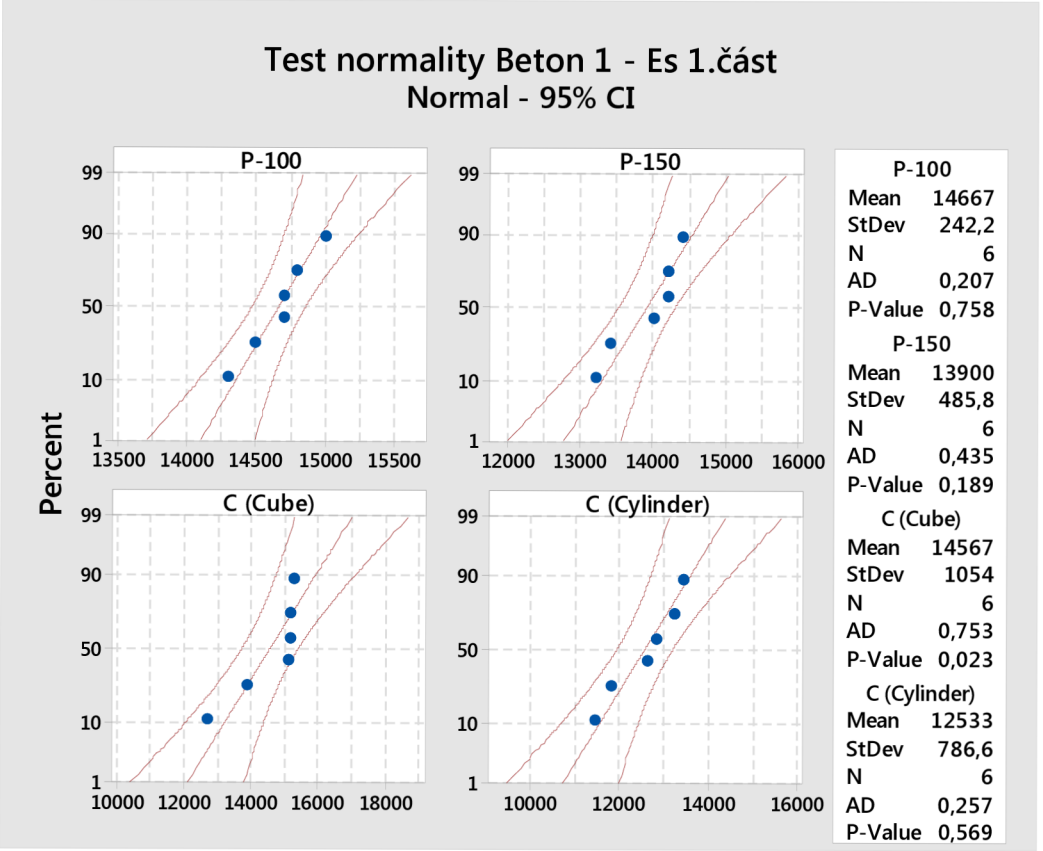

Test normality Beton 2 - Es 2.část
Normal - 95% CI
Percent
JV75
JV50A
JV50B
JV50AB
JV75AB
R-TR40
JV75
Mean 20917
StDev 354,5
N 6
AD 0,184
P-Value 0,838
JV50A
Mean 20100
StDev 715,5
N 6
AD 0,561
P-Value 0,082
JV50B
Mean 19800
StDev 829,5
N 6
AD 0,383
P-Value 0,268
JV50AB
Mean 20286
StDev 1342
N 7
AD 0,253
P-Value 0,607
JV75AB
Mean 22183
StDev 1518
N 6
AD 0,202
P-Value 0,778
R-TR40
Mean 18133
StDev 1069
N 6
AD 0,599
P-Value 0,063

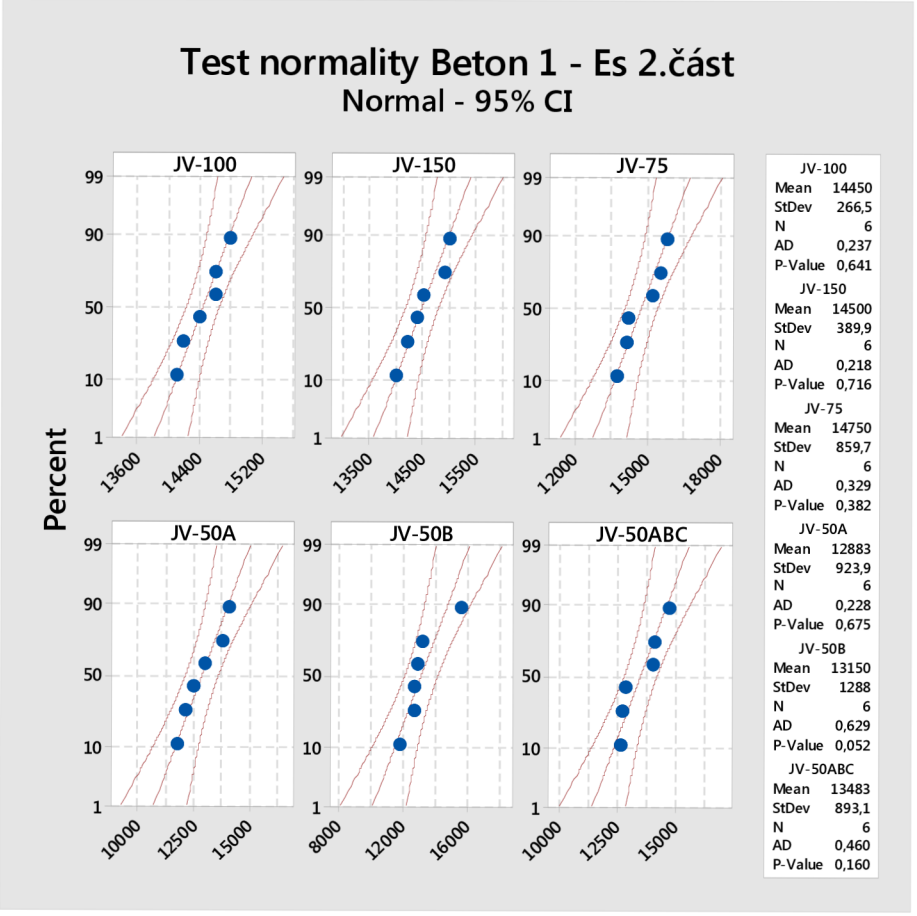

Test normality Beton 2 - Es 3.část
Normal - 95% CI
Percent
R75/100
R75/200
R75/300
R50/100
R50/200
R50/300
R75/100
Mean 19100
StDev 892,2
N 6
AD 0,216
P-Value 0,724
R75/200
Mean 20233
StDev 388,2
N 6
AD 0,130
P-Value 0,957
R75/300
Mean 20150
StDev 532,0
N 6
AD 0,165
P-Value 0,890
R50/100
Mean 20167
StDev 857,1
N 6
AD 0,186
P-Value 0,834
R50/200
Mean 21200
StDev 189,7
N 6
AD 0,303
P-Value 0,449
R50/300
Mean 21083
StDev 604,7
N 6
AD 0,337
P-Value 0,361

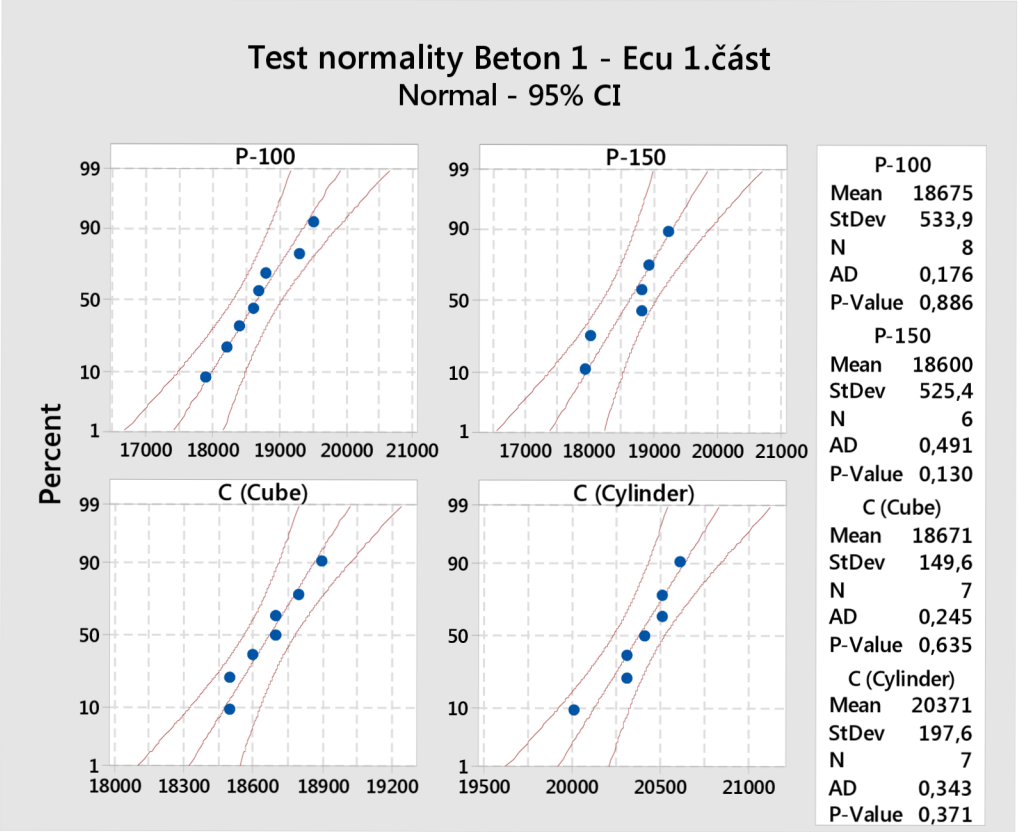

Test normality Beton 2 - Ecu 1.část
Normal - 95% CI
Percent
T100
T150
T40
K
V
JV100
T100
Mean 24886
StDev 481,1
N 7
AD 0,297
P-Value 0,492
T150
Mean 25867
StDev 388,2
N 6
AD 0,922
P-Value 0,007
T40
Mean 24189
StDev 534,9
N 9
AD 0,259
P-Value 0,619
K
Mean 25671
StDev 621,1
N 7
AD 0,460
P-Value 0,175
V
Mean 26300
StDev 331,7
N 7
AD 0,355
P-Value 0,346
JV100
Mean 26800
StDev 521,5

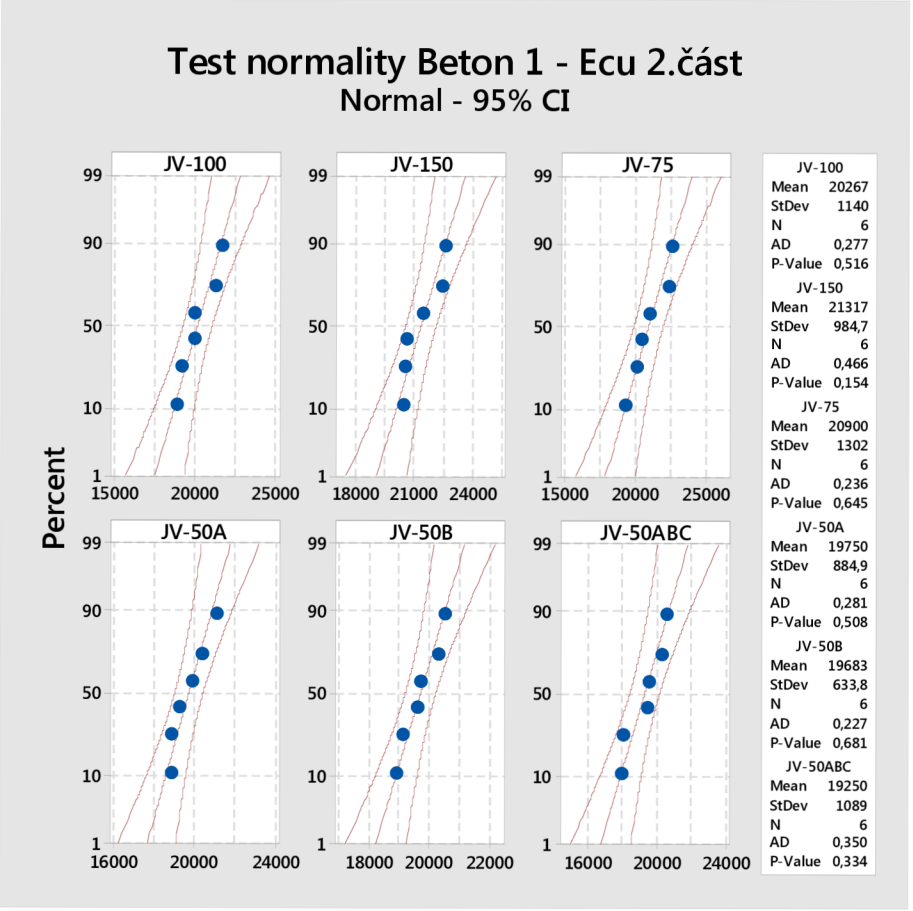

Test normality Beton 2 - Ecu 2.část
Normal - 95% CI
Percent
JV75
JV50A
JV50B
JV50AB
JV75AB
R-TR40
JV75
Mean 26133
StDev 367,0
N 6
AD 0,957
P-Value 0,006
JV50A
Mean 26833
StDev 913,6
N 6
AD 0,176
P-Value 0,864
JV50B
Mean 25983
StDev 788,5
N 6
AD 0,580
P-Value 0,072
JV50AB
Mean 27450
StDev 892,8
N 8
AD 0,443
P-Value 0,208
JV75AB
Mean 27100
StDev 409,9
N 6
AD 0,478
P-Value 0,141
R-TR40
Mean 23086
StDev 825,5
N 7
AD 0,380
P-Value 0,294


Test normality Beton 2 - Ecu 3.část
Normal - 95% CI
Percent
R75/100
R75/200
R75/300
R50/100
R50/200
R50/300
R75/100
Mean 27383
StDev 953,8
N 6
AD 1,043
P-Value <0,005
R75/200
Mean 26650
StDev 539,4
N 6
AD 0,374
P-Value 0,285
R75/300
Mean 26050
StDev 902,8
N 6
AD 0,631
P-Value 0,051
R50/100
Mean 27383
StDev 1151
N 6
AD 0,289
P-Value 0,491
R50/200
Mean 27900
StDev 525,4
N 6
AD 0,563
P-Value 0,081
R50/300
Mean 27433
StDev 265,8
N 6
AD 0,258
P-Value 0,565


Test normality Beton 1 - Es 1.část
Normal - 95% CI
Percent
P-100
P-150
C (Cube)
C (Cylinder)
P-100
Mean 14667
StDev 242,2
N 6
AD 0,207
P-Value 0,758
P-150
Mean 13900
StDev 485,8
N 6
AD 0,435
P-Value 0,189
C (Cube)
Mean 14567
StDev 1054
N 6
AD 0,753
P-Value 0,023
C (Cylinder)
Mean 12533
StDev 786,6
N 6
AD 0,257
P-Value 0,569


Test normality Beton 1 - Es 2.část
Normal - 95% CI
Percent
JV-100
JV-150
JV-75
JV-50A
JV-50B
JV-50ABC
JV-100
Mean 14450
StDev 266,5
N 6
AD 0,237
P-Value 0,641
JV-150
Mean 14500
StDev 389,9
N 6
AD 0,218
P-Value 0,716
JV-75
Mean 14750
StDev 859,7
N 6
AD 0,329
P-Value 0,382
JV-50A
Mean 12883
StDev 923,9
N 6
AD 0,228
P-Value 0,675
JV-50B
Mean 13150
StDev 1288
N 6
AD 0,629
P-Value 0,052
JV-50ABC
Mean 13483
StDev 893,1
N 6
AD 0,460
P-Value 0,160


Test normality Beton 1 - Ecu 1.část
Normal - 95% CI
Percent
P-100
P-150
C (Cube)
C (Cylinder)
P-100
Mean 18675
StDev 533,9
N 8
AD 0,176
P-Value 0,886
P-150
Mean 18600
StDev 525,4
N 6
AD 0,491
P-Value 0,130
C (Cube)
Mean 18671
StDev 149,6
N 7
AD 0,245
P-Value 0,635
C (Cylinder)
Mean 20371
StDev 197,6
N 7
AD 0,343
P-Value 0,371


Test normality Beton 1 - Ecu 2.část
Normal - 95% CI
Percent
JV-100
JV-150
JV-75
JV-50A
JV-50B
JV-50ABC
JV-100
Mean 20267
StDev 1140
N 6
AD 0,277
P-Value 0,516
JV-150
Mean 21317
StDev 984,7
N 6
AD 0,466
P-Value 0,154
JV-75
Mean 20900
StDev 1302
N 6
AD 0,236
P-Value 0,645
JV-50A
Mean 19750
StDev 884,9
N 6
AD 0,281
P-Value 0,508
JV-50B
Mean 19683
StDev 633,8
N 6
AD 0,227
P-Value 0,681
JV-50ABC
Mean 19250
StDev 1089
N 6
AD 0,350
P-Value 0,334