



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ**  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**PROBLEMATIKA ZJIŠŤOVÁNÍ  
STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI  
BETONU V KONSTRUKCÍCH**

THE ISSUE OF DETERMINATION OF THE STATIC MODULUS OF ELASTICITY  
OF CONCRETE IN STRUCTURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA THESIS

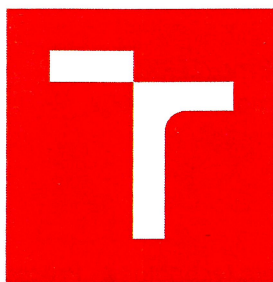
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. Romana Halamová

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2017



# 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
PRACOVISŤE	Ústav stavebního zkušebnictví

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Romana Halamová
NÁZEV	Problematika zjišťování statického modulu pružnosti betonu v konstrukcích
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Dalibor Kocáb
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
Vedoucí ústavu



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

## PODKLADY A LITERATURA

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

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

Colleparidi, M.: Moderní beton.

Aïtcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.

Pytlík, P.: Technologie betonu.

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.

Odborné články pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206, ČSN EN 1990, ČSN ISO 13822, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN EN 1992-1, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.


## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Teoretická část: Rešerše pramenů – beton a jeho vlastnosti, především modul pružnosti v tlaku/tahu. Vlivy na výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu, problematika zjišťování modulu pružnosti betonu ve stávajících konstrukcích, uváděné hodnoty modulu pružnosti v normativních předpisech (průměrná hodnota, směrná hodnota, charakteristická hodnota apod.). Popis různých metod zkoušení modulu pružnosti betonu. Praktická část: Zpracování plánu experimentu – sledování vlivu zvyšující se dávky cementu a plastifikační, případně provzdušňovací, přísady v receptuře betonu na jeho výslednou hodnotu modulu pružnosti, to vše na jádrových vývrtech získaných z větších zkušebních bloků. Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové a rezonanční metody pro zjištění dynamických modulů pružnosti a poté stanovení statického modulu pružnosti betonu. Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek, statistické vyhodnocení výsledků zkoušek, se zaměřením především na charakteristickou hodnotu modulu pružnosti betonu. Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

**VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:**

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



Ing. Dalibor Kocáb

Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá měřením modulu pružnosti betonu ve stávajících konstrukcích a možností aplikovatelnosti vztahů pro výpočet charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku na jeho modul pružnosti. Modul pružnosti je zjišťován dynamickými i statickými metodami na vzorcích odebraných z betonových bloků, jejichž složení se liší vodním součinitelem a množstvím přísad. Na závěr jsou naměřené výsledky porovnány a z naměřených hodnot je určena charakteristická hodnota modulu pružnosti.

**Klíčová slova:**

Beton, pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti betonu v tlaku, dynamický modul pružnosti, statický modul pružnosti, ultrazvuková impulzová metoda, rezonanční metoda, vodní součinitel, ČSN EN 1992-1-1, charakteristická hodnota

**Abstract:**

The thesis deals with the measurement of the elastic modulus of concrete in existing structures and possibilities of applicability of equations for the calculation of characteristic values of concrete compressive strength on the modulus of elasticity. The modulus of elasticity is determined by dynamic and static methods on specimens taken from the concrete blocks, whose composition varies by a water cement ratio and varying amounts of admixtures. In conclusion, the results of the measurements are compared and the characteristic values of the modulus of elasticity is determined.

**Keywords:**

Concrete, compressive strength of concrete, modulus of elasticity in compression, dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, ultrasonic pulse velocity test, resonance method, water cement ratio, ČSN EN 1992-1-1, characteristic value



**Bibliografická citace:**

HALAMOVÁ, Romana. *Problematika zjišťování statického modulu pružnosti betonu v konstrukcích*. Brno, 2017. 109 s., 31 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

Podpis autora

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že se elektronická verze diplomové práce shoduje s tištěnou verzí.

V Brně dne

.....

Podpis autora

**Poděkování:**

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Daliboru Kocábovi Ph.D. za poskytnutí materiálů a za důležité připomínky, názory a rady a za to, že si vždy našel čas, když jsem potřebovala. Dále chci poděkovat svým rodičům za jejich podporu při studiu.

Experimentální část byla zpracována v rámci projektu GAČR 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“.

---

## Obsah

1.	Úvod .....	10
2.	Cíle práce .....	11
3.	Teoretická část .....	12
3.1.	Beton jako stavební materiál .....	12
3.2.	Složení betonu .....	12
3.3.	Vlastnosti betonu .....	14
3.3.1.	Pevnost betonu .....	14
3.3.2.	Faktory ovlivňující pevnost betonu v tlaku .....	15
3.3.3.	Měření pevnosti betonu v tlaku .....	17
3.4.	Modul pružnosti betonu v tlaku .....	18
3.5.	Faktory ovlivňující modul pružnosti v tlaku .....	21
3.5.1.	Kamenivo .....	21
3.5.2.	Vodní součinitel .....	22
3.5.3.	Vliv použitých přísad .....	23
3.5.4.	Stáří betonu .....	25
3.5.5.	Způsob ošetřování .....	25
3.6.	Měření modulu pružnosti .....	27
3.6.1.	Měření statického modulu pružnosti ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem .....	27
3.6.2.	Měření modulu pružnosti ze zkoušky v tlaku .....	28
3.6.3.	Měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou .....	33
3.6.4.	Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou .....	35
3.7.	Kritéria shody .....	39

---

3.8.	Možnosti určování charakteristické hodnoty podle různých norem.....	40
3.9.1.	Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN EN 1990 [45].....	41
3.9.2.	Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN ISO 13822 [46].....	42
3.9.3.	Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN EN 13791 [48].....	43
4.	Experimentální část .....	44
4.1.	Cíle experimentu .....	44
4.2.	Postup experimentu .....	44
4.2.1.	Složení betonu .....	44
4.2.2.	Vlastnosti čerstvého betonu.....	46
4.2.3.	Zkušební tělesa .....	47
4.2.4.	Zkoušky provedené na betonových kvádrech .....	48
4.2.5.	Pevnost betonu.....	49
4.2.6.	Měření statického modulu pružnosti .....	52
4.2.7.	Měření dynamického modulu pružnosti .....	53
4.3.	Výsledky měření modulu pružnosti.....	54
4.3.1.	Výsledky statického modulu pružnosti.....	54
4.3.2.	Výsledky dynamického modulu pružnosti.....	55
4.4.	Možnosti aplikace zavedených postupů pro určení charakteristické hodnoty pevnosti betonu na modul pružnosti.....	59
5.	Závěr .....	66
6.	Seznam literatury.....	67
7.	Seznam obrázků:.....	72
8.	Seznam tabulek.....	75
9.	Seznam zkratk .....	76
10.	Přílohy .....	78

## 1. Úvod

Beton je v dnešní době jeden z nejpoužívanějších materiálů, a to díky svým vlastnostem, jako je pevnost, zpracovatelnost a možnost vytvářet libovolné tvary.

Převážnou část dvacátého století byla základní charakteristikou betonu pevnost v tlaku. V devadesátých letech se vlivem vývoje navrhování a změn v technologii výstavby a výroby betonu staly dominantní požadavky na trvanlivost betonu a definované přetvárné charakteristiky [1]. Modul pružnosti je dnes velmi projednávané téma, a to proto, že je kladen čím dál tím větší důraz na průhyby konstrukce, kmitání, vznik trhlin, dotvarování a podobně. Díky tomu je nutné přesněji určit hodnotu modulu pružnosti, než tomu bylo dříve. Norma ČSN EN 1992-1-1 [2] totiž udává pouze střední hodnotu modulu pružnosti, která je pouze orientační a naměřené skutečné hodnoty se mohou výrazně lišit [3].

Velké rozdíly vznikají i díky novým technologiím při výrobě betonu. V dnešní době už beton není jen cement s kamenivem a vodou. Do čerstvého betonu jsou přidávány přísady a příměsi, a tím vzniká nepřeberné množství betonů různých vlastností. A hlavně složení betonu ovlivňuje výslednou hodnotu modulu pružnosti.

V některých případech u speciálních konstrukcí, například hodně štíhlých nebo předpjatých, je proto nutné zjistit hodnotu modulu pružnosti přesně [1]. Tato práce se zaměřuje na určení hodnoty modulu pružnosti a snaží se poukázat na potřebu definovat charakteristickou hodnotu modulu pružnosti v alespoň jednom normativním předpisu.



## 2. Cíle práce

Hlavním cílem této práce bylo v praktické části určit modul pružnosti betonu různého složení a porovnat hodnoty modulu pružnosti v závislosti na měnící se dávce cementu, plastifikační a provzdušňovací přísady, a to na jádrových vývrtech získaných z větších bloků. Byl zjišťován jak statický modul pružnosti pomocí zatěžování v lisu a měření poměrného přetvoření, tak dynamický modul pružnosti, a to ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou. Dále byla měřena pevnost betonu v tlaku.

Součástí této práce byla důkladná rešerše odborné literatury týkající se zjišťování modulu pružnosti betonu v tlaku, aspektů ovlivňujících hodnotu modulu pružnosti a normativních předpisů týkajících se této charakteristiky betonu.

Získané výsledky sloužily nejen k porovnání s informacemi získanými z odborné literatury, ale také k vytvoření vlastních závěrů. Podstatným výstupem byla zjištěná závislost vodního součinitele na výslednou hodnotu pevnosti betonu v tlaku a modulu pružnosti. Výsledky také poukázaly na skutečnost, že se reálné hodnoty modulu pružnosti mohou významně lišit od směrných hodnot udávaných v normě [2] a dále na chybějící charakteristickou hodnotu modulu pružnosti v normách.

Závěrem diplomové práce byla provedena základní statistická analýza experimentálně stanovených výsledků, jejíž součástí bylo stanovení charakteristické hodnoty modulu pružnosti použitých betonů dle různých předpisů.

## 3. Teoretická část

### 3.1. Beton jako stavební materiál

Beton s hydraulickým pojivem byl objeven už ve Starověkém Římě [3]. Moderní beton, jak ho známe dnes, ale vznikl mnohem později. Během 19. a 20. století se beton stal asi nejpoužívanějším stavebním materiálem, a to díky svým vlastnostem a také díky tomu, že z něj dnes můžeme stavět konstrukce téměř neomezených tvarů. Největším převratem při provádění betonových konstrukcí byl vynález vyztuženého betonu a později i předpjatého betonu.

Dnešní moderní beton je kompozitní materiál skládající se z pojiva, plniva, vody, případně z příměsí a přísad. Smícháním těchto složek vznikne čerstvý beton [3]. Důležitou vlastností čerstvého betonu je jeho zpracovatelnost. Zpracovatelnost je ovlivňována konzistencí betonu. Existuje několik metod zkoušení konzistence čerstvého betonu, nejčastější z nich je metoda sednutí kužele [4]. Čerstvý beton se zpracovává, ukládá do bednění a hutní. Beton tuhne a tvrdne pomocí tzv. hydratace cementu. To je děj, při kterém chemickou reakcí dochází k přechodu z plastické hmoty na pevnou látku podobnou hornině. Tvrdnutím získává beton pevnost a jiné mechanické vlastnosti [3].

### 3.2. Složení betonu

Složení betonu v dnešní době může být velice rozmanité. Jako pojivo se nejčastěji používá cement. Ten je vyráběn pálením přírodních materiálů, následně mletím a přidáním sádrovce nebo anhydritu, který slouží jako regulátor tuhnutí. Regulátor tuhnutí prodlužuje dobu tuhnutí, a díky tomu je možné zpracování betonu na stavbě [3]. Hlavní surovinou pro výrobu cementu je nízkoprocentní vápenec. Pouze ten ale neodpovídá konečným požadavkům pro výpal kvalitního slinku, proto se k němu přidávají další komponenty [5]. K portlandskému cementu je možno přimíchávat příměsi, díky kterým vzniká cement portlandský směsný, vysokopecní cement, nebo směsný cement, podle toho, jaké množství které příměsi bylo ke slinku přimleto [3] [4]. Tyto příměsi ovlivňují vlastnosti betonu, jako je rychlost nárůstu pevnosti, doba tuhnutí a tvrdnutí, odolnost proti agresivnímu prostředí, nižší hydratační teplo a jiné. Jako

příměsí do cementu se používají například pucolány, struska, elektrárenský popílek apod.

Další podstatnou složkou betonu je kamenivo, které tvoří tzv. skelet betonu. Kamenivo zaujímá až 80 % objemu betonu. Kamenivo je podle velikosti zrna rozděleno do frakcí, které jsou při míchání betonu přidávány v přesném poměru tak, aby byla dosažena co nejmenší mezerovitost betonu. Zrna kameniva by měla mít vhodný tvar, tzn. co nejvíce rovnoosý, tedy kulovitý, kostkovitý. Poměr os kameniva by neměl být větší než 1:3 [6].

Kamenivo do betonu dělíme na přírodní a umělé [3] [7]. Dalším druhem kameniva může být například kamenivo lehké, tím může být například liapor nebo perlit.

Poslední hlavní složkou betonu je voda. Ta se dá rozdělit na vodu hydratační a reologickou [8]. Hydratační voda je takové množství vody, díky kterému může probíhat hydratace cementu. Bez další přidané vody by ale beton neměl dobrou zpracovatelnost, a proto se do betonu přidává voda, která zpracovatelnost zlepšuje, tzv. reologická [7]. Množství vody se do betonu přidává na základě vodního součinitele, což je hmotnostní poměr vody k cementu. [3]

$$w = v/c \quad (1)$$

kde  $v$  je hmotnost vody v kg,

$c$  je hmotnost cementu v kg.

Vodní součinitel významně ovlivňuje mechanické vlastnosti betonu. Čím větší je vodní součinitel, tím horší je kvalita betonu. Dále se voda může dělit na záměsovou a ošetřovací. Záměsová voda musí splňovat požadavky normy ČSN EN 1008 [9]. Těmto požadavkům vyhovuje voda pitná, je možná i voda užitková, pokud neobsahuje nepřijatelné množství solí a látky organického původu [10].

Do betonu je dále možné přidávat přísady a příměsí, aby se ovlivnily některé jeho vlastnosti. Příměs je většinou sypká látka, která se přidává do betonu, jako částečná náhrada cementu. Mohou to být například pucolány, což je přírodní látka nebo průmyslové odpady. Výhodou použití pucolánových příměsí je především snížení ceny

betonů, snížení emisí CO<sub>2</sub>, zlepšení mechanických vlastností, snížení smrštění, úprava vlastností čerstvé cementové pasty a zvýšení odolnosti vůči chemikáliím [11].

Další látka, která je používána jako příměs do betonu, je křemičitý úlet. Díky tomu, že jeho zrna jsou asi stokrát menší než zrna cementu, dochází k lepšímu vyplnění prostoru mezi hrubšími zrny. Díky tomu je beton hutnější a má větší pevnost [11].

Pokud je nutné zvýšit odolnost proti teplotě, přidává se do betonu struska. Příměsí lze i snížit hydratační teplo betonu. K tomu se používá popílek [11].

Přísady jsou na rozdíl od příměsí většinou tekuté látky, kterých se do betonu přidává do 5 % hmotnosti cementu. Přísady obvykle upravují vlastnosti čerstvého betonu, jako je zpracovatelnost, doba tuhnutí, množství vzduchových pórů atd. [7]. Mezi jednu z nejpoužívanějších přísad bezpochyby patří plastifikátor. Ten umožňuje snížit množství záměsové vody, a tím i vodní součinitel při zachování dobré zpracovatelnosti a čerpatelnosti betonu. Při delších převozech betonu v autodomíchávacích je nutné oddálit dobu tuhnutí. Proto se do betonu přidávají zpomalovače tuhnutí. Další přísadou může být např. provzdušňovač, nebo urychlovač tuhnutí.

### **3.3. Vlastnosti betonu**

#### **3.3.1. Pevnost betonu**

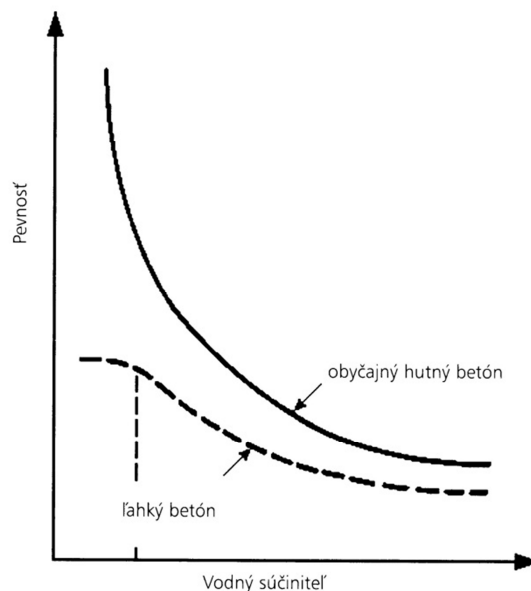
Jak je obecně známo, beton má velmi malou pevnost v tahu, ale velkou pevnost v tlaku. Proto mezi nejdůležitější vlastnosti betonu patří bezpochyby právě pevnost v tlaku. Pevnost betonu vyjadřuje odpor betonu proti změně jeho tvaru a proti jeho porušení působením vnějšího zatížení [3] [12] [13].

V praxi bývá měřena zejména tlaková pevnost  $f_c$ , někdy i pevnost v tahu ohybem  $f_f$  a pevnost v příčném tahu  $f_{ct}$ . Měřit pevnost v prostém tahu je v případě betonu poměrně technicky i finančně náročné. Proto se pevnosti v prostém tahu  $f_t$  často odvozují z hodnoty pevnosti v tlaku nebo pevnosti v tahu ohybem [3] [4]. Pevnost betonu v tlaku je klasifikována pomocí pevnostních tříd betonu, které odpovídají charakteristické válcové pevnosti betonu  $f_{ck}$  nebo krychelné pevnosti  $f_{ck,cube}$  podle ČSN EN 206 [2] [13]. Charakteristická pevnost je hodnota pevnosti, pro kterou platí, že

s pravděpodobností 95 % bude naměřená hodnota při zkoušce pevnosti ( $f_{ci}$ ) vyšší než charakteristická pevnost  $f_{ck}$  [3] [4].

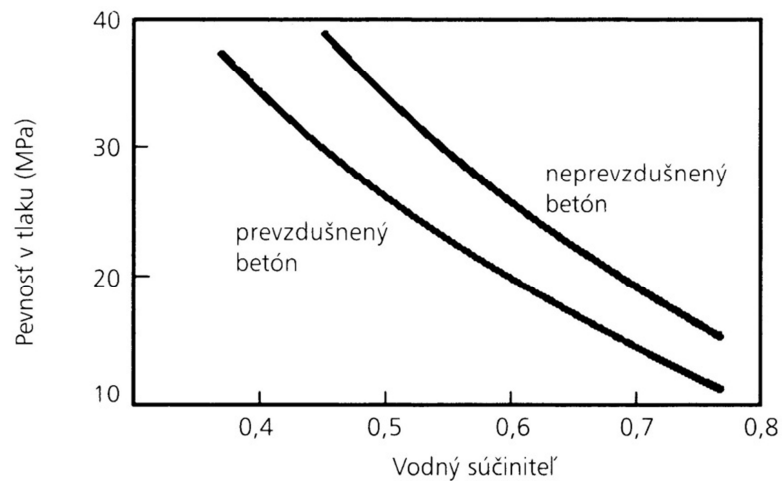
### 3.3.2. Faktory ovlivňující pevnost betonu v tlaku

Beton je nehomogenní materiál, a proto je jeho pevnost ovlivňována mnoha faktory. Jedním z hlavních faktorů je vodní součinitel betonu. K řádnému procesu hydratace stačí vodní součinitel 0,23 až 0,25. Takový beton je ale velmi těžko zhutnitelný a pro dokonalé zpracování je tedy nutné vodní součinitel zvýšit na 0,3 a výše, podle způsobu zhutňování. Pevnost betonu závisí na vodním součiniteli, ale zároveň i na stupni zhutnění betonu [14]. Čím je beton hutnější, tím má větší pevnost v tlaku, ale zároveň čím má vyšší vodní součinitel, tím je jeho pevnost v tlaku menší. Největších pevností v tlaku se docílí při co nejmenším vodním součiniteli, při kterém je ovšem možné beton řádně zpracovat, tj. při vodním součiniteli 0,3 až 0,5. Zlepšení zpracovatelnosti a tím i zhutnitelnosti při nízkém vodním součiniteli lze dosáhnout přidáním plastifikátoru do čerstvého betonu [14]. Závislost pevnosti betonu v tlaku na vodním součiniteli je zobrazena na obrázku 1.



Obr. 1 Závislost pevnosti betonu v tlaku na vodním součiniteli [10]

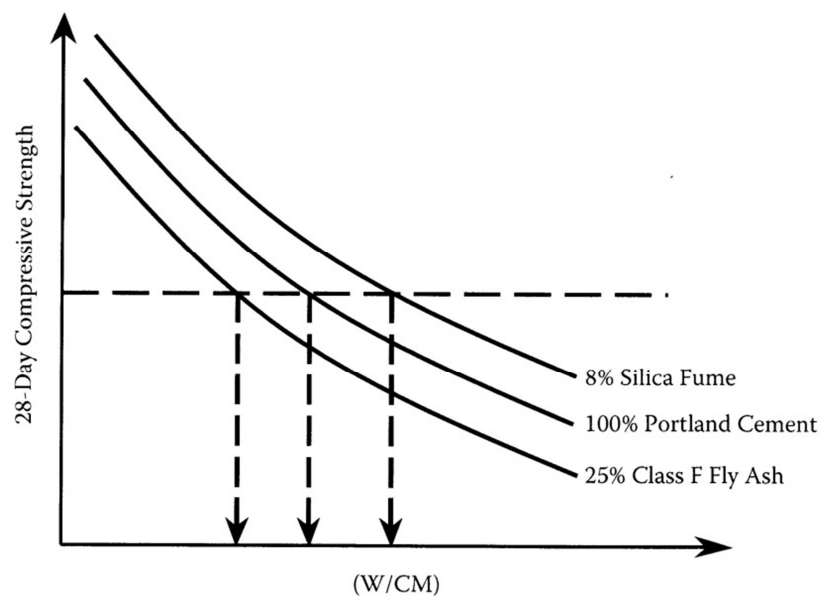
Jak už bylo řečeno výše, pevnost betonu se snižuje s rostoucím množstvím pórů v betonu. Proto i při použití provzdušňující přísady klesá pevnost betonu. Na obrázku 2 je vidět jaká je pevnost v tlaku u provzdušněného betonu oproti obyčejnému betonu.



Obr. 2 Pevnosť provzdušněného a neprovzdušněného betonu v tlaku [10]

Pevnosť betonu je ďalej ovplyvnená aktivitou cementu. Aktivita cementu je dána jeho mineralogickým složením. To určuje rýchlosť rústu pevnosti a také jej veľkosť [6].

Použitím príměsí do cementu je také ovplyvňovaná pevnosť betonu v tlaku. Na obrázku 3 je vidieť, jak se mění pevnosť při použití cementu bez príměsí a s různým druhem príměsí. Porovnávan je betón s portlandským cementem, cementem s pridaným popílkem a cementem s křemičitým úletem.



Obr. 3 Pevnosť betonu s různými príměsí v závislosti na vodním součiniteli [15]

Dalšími faktory ovlivňující pevnost betonu je pevnost a granulometrické zastoupení kameniva v čerstvém betonu, pevnost cementové pasty a soudržnost cementu s kamenivem. Důležitou roli hraje i teplota, vlhkost a způsob ošetřování při tvrdnutí betonu, stáří betonu a spousta dalších faktorů.

### 3.3.3. Měření pevnosti betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku se měří na zkušebních tělesech tvaru válce, hranolu nebo krychle. Pokud chceme zjistit pevnost betonu v konstrukci, zkušební vzorky se odeberou pomocí jádrového vrtání a následně se upraví dle ČSN EN 12504-1 [16] [3].

Pevnost betonu v tlaku se měří destruktivně ve zkušebním lisu. Je možné i nedestruktivní zkoušení, například pomocí Schmidtova tvrdoměru nebo ultrazvuku, v tom případě je ale výsledek pouze orientační a je nutné ho ověřit pomocí destruktivní zkoušky [3]. Při destruktivním měření pevnosti v tlaku se vzorek zatěžuje konstantní rychlostí až do porušení. Pevnost betonu se určí pomocí vztahu

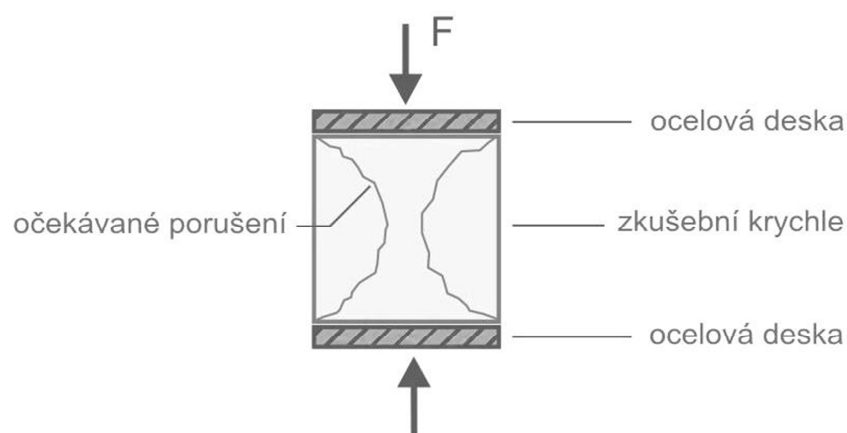
$$f_c = \frac{N}{A} \quad (2)$$

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

$N$  je síla na mezi porušení v N,

$A$  je zatěžovaná plocha v  $\text{mm}^2$ .

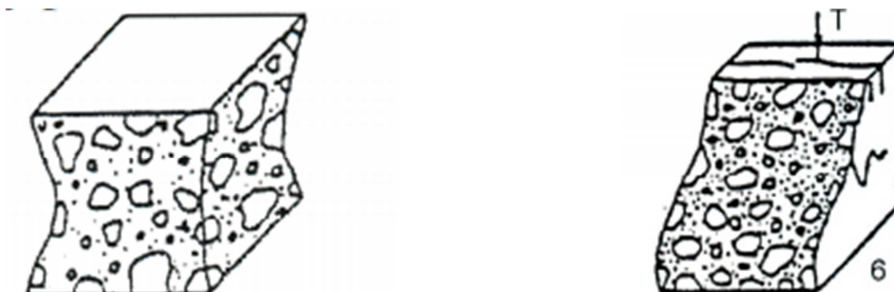
Schéma zatěžování je vidět na obrázku 4.



Obr. 4 Zkoušení pevnosti betonu v tlaku [17] [3]



Při měření pevnosti betonu v tlaku je nutné posoudit správné porušení vzorku. Poruší-li se vzorek nesprávně, je nutné zkoušku opakovat. Na obrázku 5 a) je vidět požadované porušení vzorku.



Obr. 5 a) Příklad správného porušení vzorku; b) příklad špatného porušení vzorku [16]

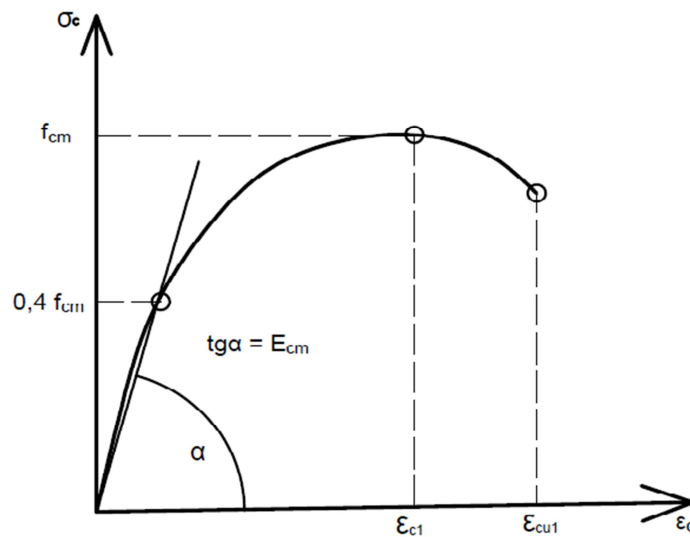
Porušený vzorek by měl být ve tvaru dvou jehlanů směřujících proti sobě. Charakteristické porušení vlivem tlaku vzniká proto, že při zatěžování vznikají ve vzorku příčné tahy, vlivem kterých se vzorek poruší. Pokud nastane jiné porušení, jako je například u obrázku 5 b), nemůže se výsledek počítat, protože k porušení došlo vlivem smyku.

### 3.4. Modul pružnosti betonu v tlaku

Jednou z hlavních přetvárných charakteristik je modul pružnosti  $E$ , který popisuje schopnost betonu chovat se pod určitým zatížením do jisté míry pružně a určuje, jak moc se bude daný beton (materiál) pod zatížením deformovat [18] [3].

Modul pružnosti je velmi důležitou charakteristikou při ověřování deformací, smršťování, dotvarování, při výpočtu kmitání atd. [3]. Nejsou to jen deformace, kde rozhoduje modul pružnosti, ale jeho hodnota vstupuje i do výpočtu vnitřních sil u staticky neurčitých konstrukcí [19].

Definice modulu pružnosti vychází z Hookova zákona. Platí, že modul pružnosti je tangenta úhlu, kterou svírá pružná část deformačního diagramu s vodorovnou osou, jak je vidět na obrázku 6.



Obr. 6 Deformační diagram betonu [2] [3]

Z deformačního diagramu můžeme tedy napsat, že

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v MPa,

$\sigma$  je napětí v tlaku v MPa,

$\varepsilon$  je poměrné přetvoření, které je bezrozměrné.

Podle obrázku 6 je modul pružnosti definován mezi napětím 0 MPa a  $0,4 f_{cm}$ . V této oblasti definuje modul pružnosti norma ČSN EN 1992-1-1 [2]. Tomuto modulu pružnosti se říká statický, neboli sečnový. Norma [2] udává hodnoty sečnového modulu pružnosti v závislosti na pevnostní třídě betonu. Tato hodnota je však pouze přibližná a je možné jí použít pouze u konstrukcí, u kterých nemá modul pružnosti zásadní vliv [3]. Hodnoty modulu pružnosti betonu v tlaku, které udává norma [2], jsou odvozeny ze vztahu

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (4)$$

kde  $E_{cm}$  je střední hodnota modulu pružnosti v GPa,

$f_{cm}$  je střední hodnota pevnosti v tlaku v MPa.

Jenže v dnešní době, kdy jsou konstrukce čím dál tím subtilnější a náročnější, se dostávají přetvárné charakteristiky do popředí. Proto se zvyšuje potřeba znát přesnější hodnoty modulu pružnosti betonu [1].

Při výpočtech mezních stavů únosnosti se počítá s charakteristickou hodnotou pevnosti betonu, což je hodnota pětiprocentního kvantilu. Znamená to, že jsou z 95 % očekávány vyšší hodnoty skutečné pevnosti, než se kterou se počítá. Charakteristická hodnota je ve výpočtech dále dělena součinitelem spolehlivosti materiálu, který má obvykle hodnotu 1,5 (pro trvalé nebo dočasné zatížení; při zjištění variačního součinitele pevnosti betonu < 10 % se povoluje uvažovat hodnotu součinitele sníženou na 1,4). Je tedy vidět, že se předpokládá dosti značný rozptyl pevností [19].

Pro modul pružnosti však norma návrhovou hodnotu nespecifikuje – uvádí pro pevnostní třídy jen přibližné/směrné hodnoty s možností jejich úpravy dle druhu kameniva [19]. Přitom modul pružnosti nezávisí jen na pevnostní třídě betonu. Jak už bylo řečeno výše, dnešní moderní beton může mít různé složení, které významně ovlivňuje modul pružnosti. Už jen tím, že jsou do betonu přidávány přísady a příměsi, se může hodnota modulu pružnosti velmi lišit [3].

Proto v případech, kdy mají průhyby rozhodující význam, je třeba provést zkoušky betonu vyrobeného z kameniva, kterého se použije v konstrukci, a ověřit skutečnou hodnotu statického modulu pružnosti [1].

Kromě statického (sečnového) modulu pružnosti určujeme ještě dynamický modul pružnosti. Dynamický modul pružnosti betonu nabývá oproti statickému modulu pružnosti hodnot vyšších, udává se rozmezí 30 000 až 50 000 MPa pro běžný beton. Při určování dynamické hodnoty se pohybujeme na úplném začátku deformačního diagramu, protože do zkoušených těles nevnášíme v podstatě žádná napětí. Dynamický modul pružnosti tedy můžeme uvažovat jako tečnový.

Během statických zkoušek se totiž vlivem zatěžování a odtěžování redukuje následné dotvarování betonu, což způsobuje změnu sklonu křivky deformačního diagramu [20].

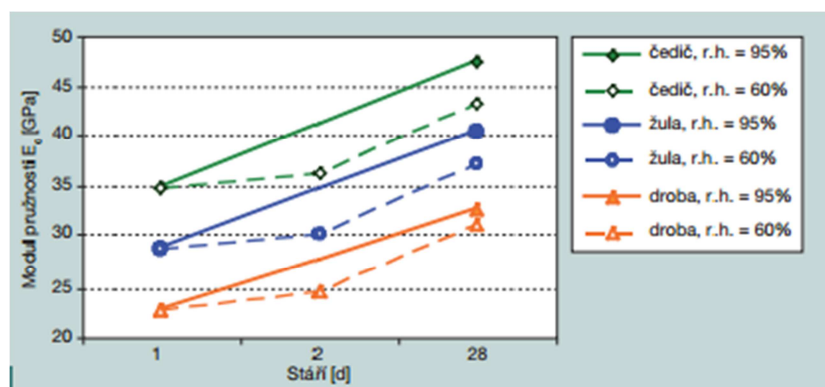
### 3.5. Faktory ovlivňující modul pružnosti v tlaku

Vlivy na výslednou hodnotu modulu pružnosti lze v zásadě rozdělit do dvou hlavních skupin, byť některé vlivy jsou na jejich rozhraní. Jednu skupinu tvoří vlivy technologické, druhou vlivy zkušební. Mezi vlivy technologické patří například složení čerstvého betonu a technologie výroby. Mezi zkušební vlivy můžeme zařadit například typ zkušební metody, způsob zakoncování tlačných ploch, rychlost zatěžování a jiné [21]. Některé základní vlivy jsou rozebrány dále.

#### 3.5.1. Kamenivo

Kamenivo je jeden z hlavních faktorů ovlivňující modul pružnosti betonu. Výsledná hodnota modulu pružnosti je ovlivněna zejména typem, frakcí a množstvím použitého hrubého kameniva, přičemž rozhodující bývá také poměr hrubého kameniva k celkovému objemu cementového tmelu. Protože kamenivo tvoří kostru betonu, hodnota modulu pružnosti betonu závisí na modulu pružnosti kameniva. Míra ovlivnění je závislá na celkovém podílu objemu kameniva k objemu betonu. Tento podíl závisí na obsahu vody, což souvisí s konzistencí čerstvého betonu, s vodním součinitelem a se způsobem zhutňování [14].

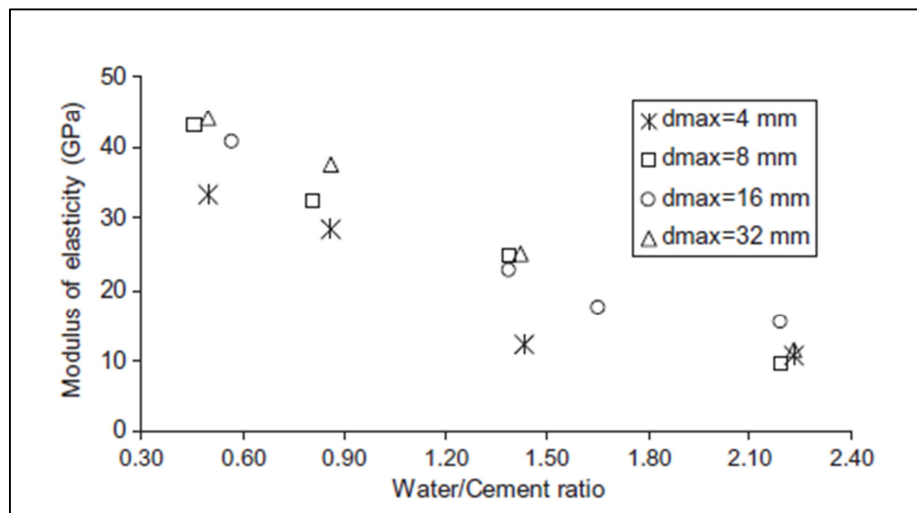
I Eurokód 2 [2] umožňuje částečné upravení hodnot podle použitého kameniva. Pro vápencové kamenivo se mají udávané přibližné hodnoty snížit o 10 % a pro pískovcové kamenivo o 30 %. Při použití čedičového kameniva se mají hodnoty navýšit. Na obrázku 7 je vidět, jak je modul pružnosti betonu ovlivňován druhem použitého kameniva.



Obr. 7 Modul pružnosti v tlaku v závislosti na druhu použitého kameniva [22]

Dalším faktorem, kterým kamenivo ovlivňuje hodnotu modulu pružnosti betonu, je velikost největší použité frakce kameniva. Snížením velikosti použitého kameniva se sníží hodnota modulu pružnosti betonu. Může za to větší plocha na rozhraní cementového tmelu a kameniva, což je nejslabší článek betonu [8]. Modul pružnosti také závisí na objemu hrubého kameniva v betonu. Snížením jeho objemu by mělo dojít ke snížení modulu pružnosti.

Na obrázku 8 je znázorněno, jak se mění modul pružnosti v závislosti na velikosti největších zrn kameniva a v závislosti na vodním součiniteli. U kameniva s maximální velikostí zrna 32, 16 a 8 mm nebyl rozdíl patrný, ale u kameniva s velikostí zrna 4 mm už byl zaznamenán větší pokles modulu pružnosti [8].



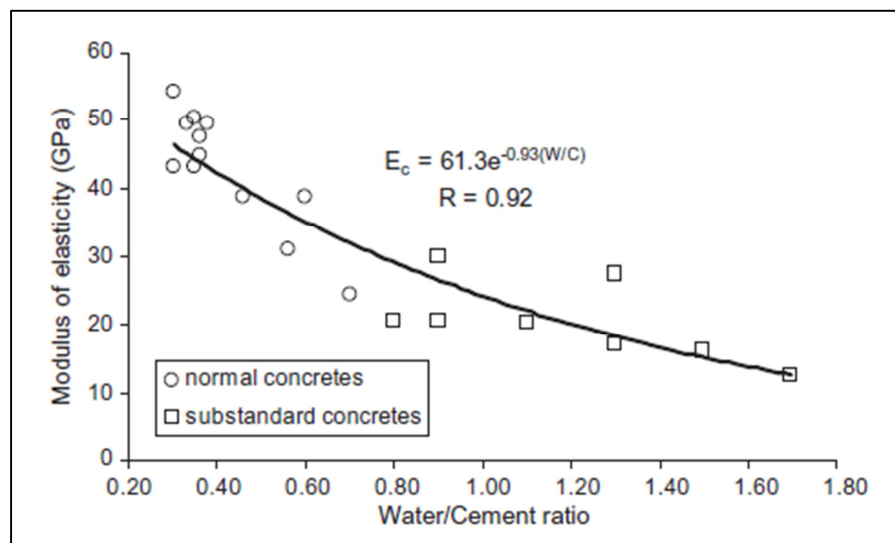
Obr. 8 Modul pružnosti v závislosti na vodním součiniteli a velikosti největšího zrna kameniva [23]

### 3.5.2. Vodní součinitel

Vodní součinitel má bezpochyby velký vliv na hodnotu modulu pružnosti. Snížením vodního součinitele stoupne hodnota některých vlastností, jako je pevnost a právě i modul pružnosti. Současně však se snížením modulu pružnosti na minimum se mohou objevovat určité negativní jevy. O nich se dříve také vědělo, ale více se o nich začalo diskutovat až právě s hojným používáním superplastifikátorů [24].

Při velmi nízkém vodním součiniteli roste význam autogenního smrštění betonu. A právě mikrotrhliny negativně ovlivňují některé mechanické vlastnosti betonu a také

jeho trvanlivost [24] [25]. Vznik mikrotrhlin ovšem není jen důsledkem smrštění samotné cementové pasty, ale také jejího spolupůsobení se zrny kameniva. Při použití hrubšího kameniva ( $d_{\max} \approx 32$  mm) do betonů s velmi nízkým vodním součinitelem (cca pod 0,35) dochází vlivem smrštění k popraskání pasty kolem hrubých zrn kameniva a řada mechanických vlastností během prvního roku výrazně klesá [22]. Závislost modulu pružnosti na vodním součiniteli je vidět na obrázku 9.

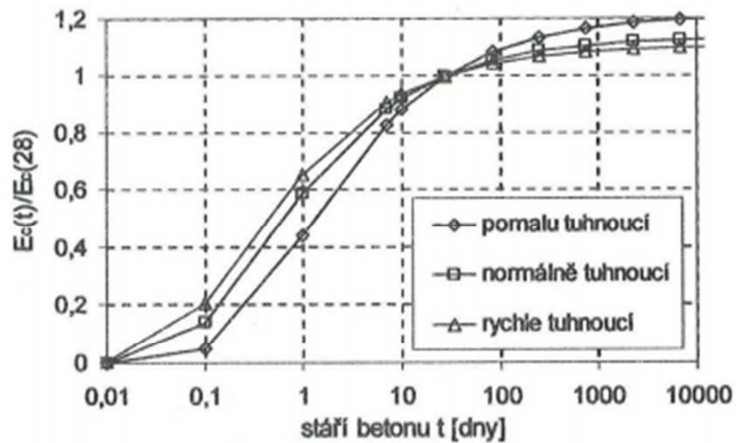


Obr. 9 Závislost modulu pružnosti na vodním součiniteli [23]

### 3.5.3. Vliv použitých přísad

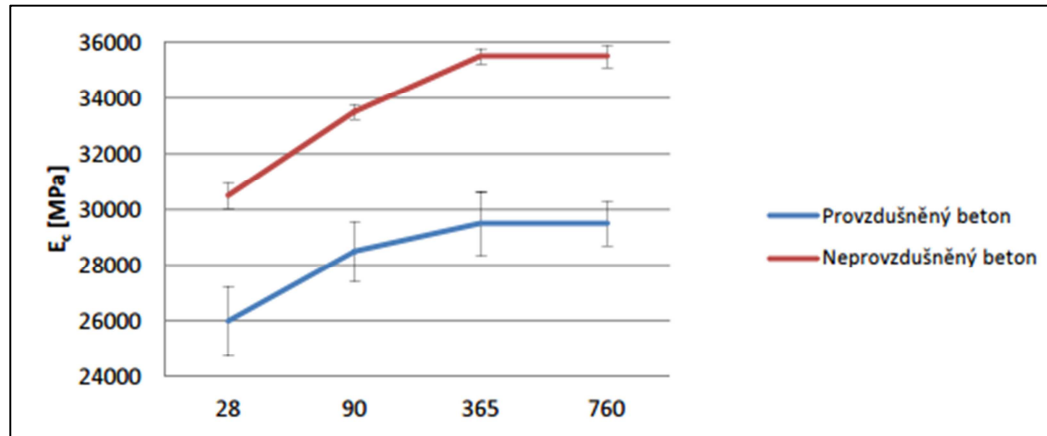
Na modul pružnosti má výrazný vliv i použití přísad v betonu. Výše už byly zmíněny plastifikátory a superplastifikátory, které snižují vodní součinitel a přitom zlepšují zpracovatelnost betonu [14].

Dalšími přísadami přidávanými do betonu jsou zpomalovače a urychlovače tuhnutí. Ty by však teoreticky neměli mít na výsledný modul pružnosti výrazný vliv. Předpis Model Code 1990 [26] však uvádí časový vývoj modulu pružnosti betonu v závislosti na rychlosti hydratace. Závislost modulu pružnosti u rychle tuhnoucího, pomalu tuhnoucího a normálního betonu je možné vidět na obrázku 10 [24].



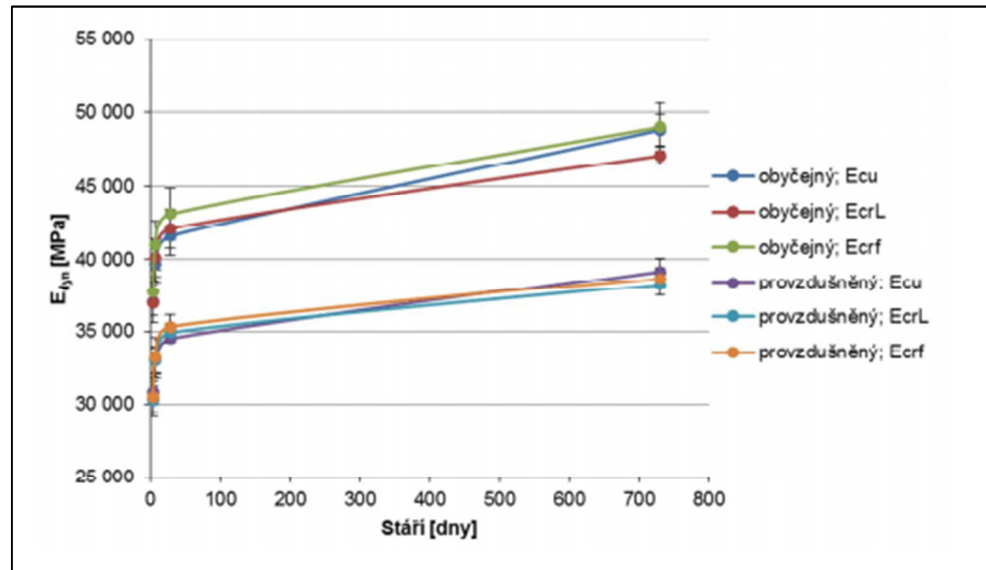
Obr. 10 Vývoj modulu pružnosti v čase dle Model Code 1990 [26] [24]

Významný vliv na modul pružnosti byl však prokázán při použití provzdušňovacích přísad. Vytvořením pórů v betonu se obvykle snižuje i modul pružnosti betonu v tlaku. [4]. Tento fakt dokládají i experimenty prováděné autory prací [14] a [24]. Výsledky těchto experimentů jsou vidět na obr. 11 a 12.



Obr. 11 Hodnoty statického modulu pružnosti provzdušněného a neprovzdušněného betonu v závislosti na čase. Na vodorovné ose je stáří betonu ve dnech [14]





Obr. 12 Hodnoty dynamického modulu pružnosti provzdušněného a neprovzdušněného betonu v závislosti na čase [24]

#### 3.5.4. Stáří betonu

Stáří zkušební tělesa při zkoušení modulů pružnosti betonu má obdobný vliv jako u zkoušení pevnosti betonu v tlaku. S rostoucím stářím se pevnost i modul pružnosti zvyšuje, což je způsobeno zvyšujícím se stupněm hydratace. Zvyšování modulu pružnosti není vždy přímo úměrné zvyšování pevnosti betonu v tlaku a probíhá po dobu několika let v závislosti na způsobu ošetřování [27]. Růst hodnoty modulu pružnosti vlivem stáří betonu je mimo jiné vidět i na obrázcích 11 a 12.

I Eurokód 2 [2] umožňuje upravit hodnotu modulu pružnosti  $E_{cm}$  dle stáří betonu. Změna hodnoty modulu pružnosti v čase je v něm zaváděna pomocí vzorce

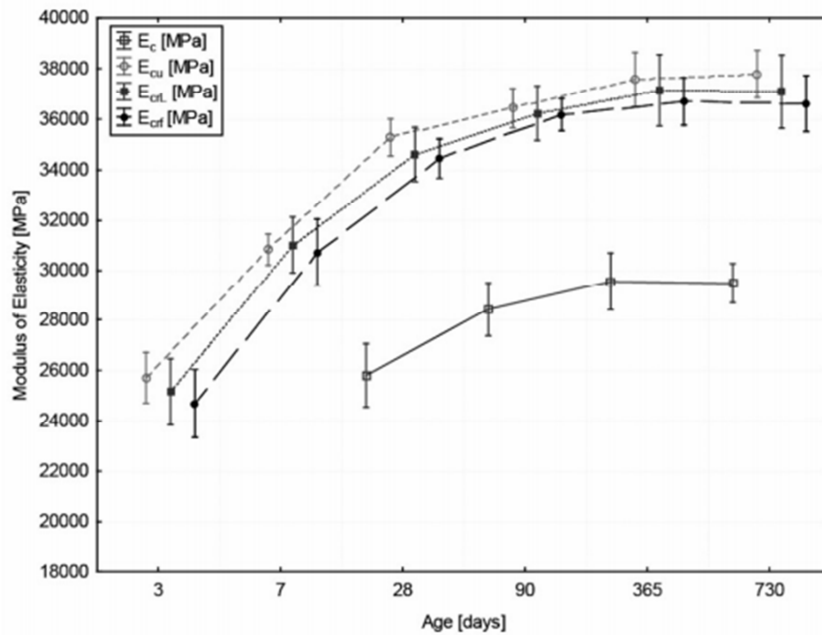
$$E_{cm}(t) = \left[ \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right]^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (5)$$

kde  $E_{cm}$  je střední hodnota modulu pružnosti v MPa,  
 $f_{cm}$  je střední válcová hodnota pevnosti v tlaku.

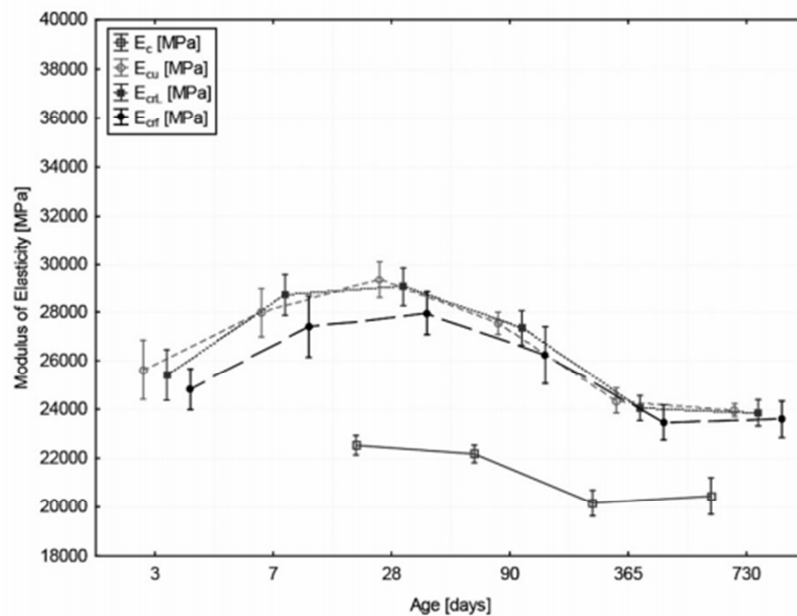
#### 3.5.5. Způsob ošetřování

Velmi významným vlivem, kterým je ovlivňována hodnota modulu pružnosti, je i způsob a délka ošetřování. Zejména během prvních několika dnů je nutné beton důkladně ošetřovat, a to hlavně při betonáži za vyšších teplot, kdy dochází k odpařování vody, což způsobuje vznik mikrotřlin, které ovlivňují vnitřní strukturu

betonu, a tím i jeho fyzikálně mechanické vlastnosti, jako je například pevnost a modul pružnosti [28] [29]. Pro správnou hydrataci je tedy nutné betonu dodávat vysychající vodu. Na výsledné vlastnosti betonu, a to zejména na pevnost a modul pružnosti, má významný vliv i délka ošetřování betonu. Vliv ošetřování betonu je patrný z grafů na obrázku 13 a 14.



Obr. 13 Modul pružnosti betonu ošetřovaného pod vodou [29]



Obr. 14 Modul pružnosti neošetřovaného betonu [29]

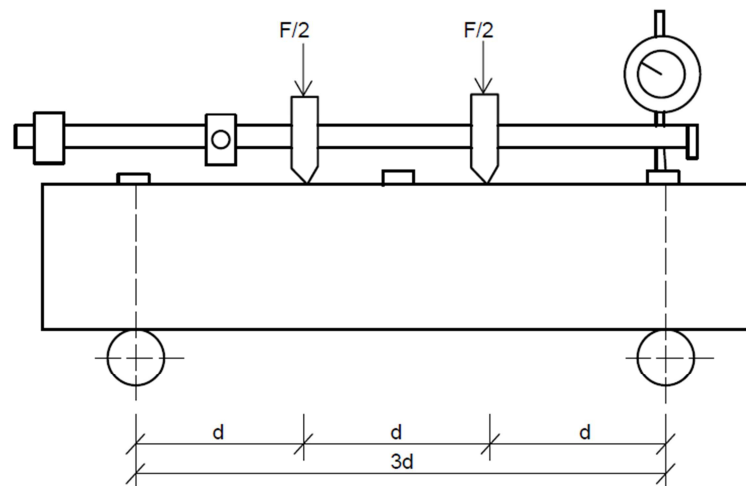
Z grafů je patrné, že u betonu, který byl uložen pod vodou, byl naměřen plynulý nárůst modulu pružnosti. U betonu, který tvrdnul na vzduchu, nejprve modul pružnosti narůstá, ale později vlivem vysychání a vzniku mikrotrhlin jeho hodnota klesá.

### 3.6. Měření modulu pružnosti

Při měření modulu pružnosti rozlišujeme dva typy zkoušek - statické a dynamické. Jednotlivé metody budou popsány v kapitolách níže.

#### 3.6.1. Měření statického modulu pružnosti ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem

Modul pružnosti lze měřit pomocí zkoušky v tahu ohybem podle normy ČSN 73 6174 [30]. Principem postupu je stanovení modulu pružnosti a modulu přetvárnosti betonu namáhaného napětím v tahu ohybem pomocí výpočtu z naměřeného průhybu trámce, který je zatěžován tzv. čtyřbodovým ohybem (dvě břemena ve třetinách rozpětí) [24]. Těleso se ve zkušebním lisu zatěžuje podle obrázku 15 a pomocí průhyboměru se měří průhyby zkušební tělesa [3].



Obr. 15 Schéma zkoušky betonu v tahu ohybem [3] [31]

Zkušební těleso se zatěžuje silou  $F_1$ , která vyvodí napětí v tahu ohybem  $s_1$  o hodnotě  $0,1 R_j$  (očekávaná pevnosti betonu v tahu ohybem) a určí se celkový průhyb  $s_{tot,1}$ . Zatížení se zvýší na  $F_2$  rovnému  $2 \times F_1$  a určí se celkový průhyb  $s_{tot,2}$ . Pak se zatížení

sníží na  $F_1$  a určí se pružný průhyb  $s_{t,2}$  [31]. Postup zatěžování zkušebního vzorku se opakuje i se silami  $F_3$  až  $F_n$ , které jsou obvykle násobkem  $F_1$ . Při zatěžování se měří celkové průhyby a při odtížení se vždy změří pružný průhyb [3] [31].

Modul pružnosti  $E$  se vypočte ze vztahu

$$E = \frac{F \cdot l}{f_e \cdot b \cdot h} (0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46) \quad (6)$$

kde  $F$  je zatížení vzorku v N,

$l$  je vzdálenost podpor v mm,

$b$  je šířka trámce v mm,

$h$  je výška trámce v mm,

$f_e$  je pružný průhyb v mm.

Modul pružnosti a přetvárnosti se zpravidla určuje pro napětí rovné 2/3 pevnosti v tahu ohybem. Doporučuje se určovat i hodnoty pro jednotlivé zatěžovací stupně.

Tato metoda se v dnešní době příliš neprovádí z důvodu, že její postup je příliš složitý. Dále je u této metody problém, že do výpočtu vstupuje hodnota Poissonova součinitele 0,15, která dnes již pro většinu betonů neplatí a není možné ji ve výpočtu upravit. Výsledky jsou o několik jednotek až desítek procent nadhodnoceny [3] [32].

### 3.6.2. Měření modulu pružnosti ze zkoušky v tlaku

Podstata měření statického modulu pružnosti je v měření pružných deformací zkušebního vzorku při určitém napětí a vychází z Hookova zákona.

Měřením modulu pružnosti se zabývají v současné době dvě normy, a to ČSN EN 12390-13 [33] a ČSN ISO 1920-10 [34], přičemž postup měření v obou se trochu liší, i když princip měření zůstává stejný. V obou případech se měří poměrné přetvoření při cyklickém zatěžování. Práce se zabývá postupem měření dle ČSN EN 12390-13 [33], protože podle ní byl měřen statický modul pružnosti v experimentální části [3].

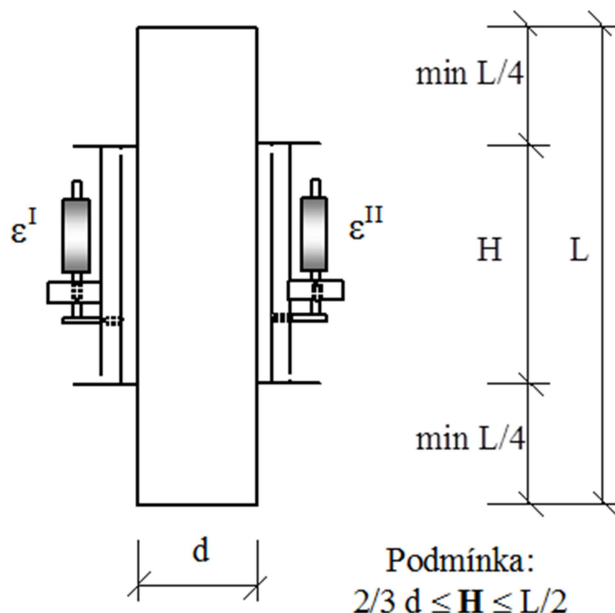
Norma ČSN EN 12390-13 [33] rozeznává dvě metody zkoušení, metodu A a metodu B. Metoda A umožňuje, kromě stanovení klasického statického modulu pružnosti (kompletně je označen jako ustálený sečnový statický modul pružnosti  $E_{c,s}$ ),

určit také počáteční sečnový modul pružnosti betonu v tlaku  $E_{c,0}$ . Metoda B uvádí pouze upravený postup metody, kterou udává norma ČSN ISO 1920-10 [34] [24].

Statický modul pružnosti se zkouší na zkušebních tělesech, obvykle válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Pokud je nutné zjistit statický modul pružnosti z konstrukce, je možné ho měřit na tělesech odebraných pomocí jádrových vývrtů z konstrukce. Poměr délky k průměru by měl být v rozmezí  $2 \leq L/d \leq 4$  a průměr  $d$  musí být nejméně tři a půl násobek velikosti největšího zrna kameniva [3] [33].

Měření statického modulu pevnosti se provádí ve zkušebním lisu, jak je znázorněno na obrázku 18, který musí odpovídat požadavkům ČSN EN 12390-4 [35]. Je nutné, aby bylo možné nastavit zatěžovací cykly o předepsané rychlosti zatěžování a aby bylo možné mezi zatěžováním a odlehčováním vzorku podržet zatížení na určité hodnotě po určitý čas.

Zařízení na měření délkových změn musí mít délku měřené základny minimálně  $2/3$  průměru (délky strany) vzorku a dále musí být umístěn tak, aby měřené body byly ve stejné vzdálenosti od obou okrajů vzorku, která není menší než  $1/4$  výšky vzorku [36] [3]. Umístění tenzometrů je vidět na obr. 16 a 17.



Obr. 16 Umístění tenzometrů na vzorek [37]



Obr. 17 Vzorek s tenzometry [38]

Hodnota poměrného přetvoření je aritmetický průměr ze dvou hodnot naměřených dvěma tenzometry.

$$\overline{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon^I + \Delta\varepsilon^{II}}{2} \quad (7)$$

kde  $\varepsilon^I$  a  $\varepsilon^{II}$  jsou jednotlivé hodnoty poměrných přetvoření na tenzometru I a tenzometru II.

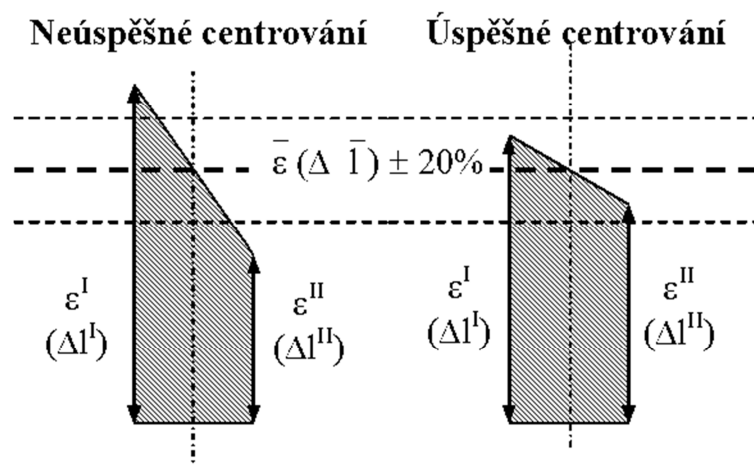
Jak už bylo zmíněno výše, lze statický modul pružnosti dle ČSN EN 12390-13 [33] měřit dvěma metodami.

Metoda A spočívá v tom, že se zkušební vzorek, který je umístěn dostředně ve zkušebním lisu, zatěžuje konstantní rychlostí ( $0,6 \pm 0,2$  MPa/s) na hodnotu  $\sigma_b$ ,  $\sigma_b$  je hodnota ležící mezi  $0,1 f_c$  a  $0,15 f_c$ . Takto se vzorek nechá zatížený po dobu maximálně 20 s, poté se napětí sníží na základní hodnotu  $\sigma_p$ , pro kterou platí, že  $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$ . Na této hodnotě se napětí podrží opět po dobu maximálně 20 s. Tento cyklus se provádí 3x za sebou. Ve druhém a třetím cyklu se zaznamenává poměrné přetvoření  $\varepsilon_b$ , které vznikne při zatížení vzorku na hodnotu  $\sigma_b$ . Po dokončení třech cyklů se během 60 s provede kontrola rozdílu přetvoření. Rozdíl mezi poměrnými přetvořeními v druhém a třetím cyklu nesmí být větší než 10 %, jinak by se měření muselo opakovat. Dále se ověří centrace tělesa ve zkušebním lisu. To znamená, že se nesmí jednotlivé

hodnoty  $\varepsilon_b$  ve třetím cyklu lišit od své průměrné o více než 20 % [33] [3]. Umístění vzorku ve zkušebním lisu a kontrola centrace je přehledně znázorněna na obrázcích 19.



Obr. 18 Měření statického modulu pružnosti betonu v tlaku ve zkušebním lisu [39]



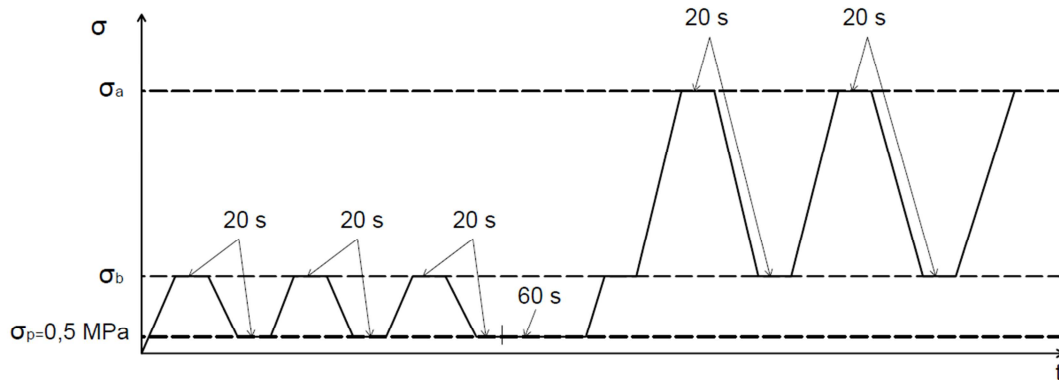
Obr. 19 Ověření centrace zkušebního vzorku [37]

Následují cykly, ze kterých se bude určovat statický modul pružnosti. Vzorek konstantní rychlostí zatížíme na hodnotu napětí  $\sigma_b$ , zde během 20 s odečteme poměrné přetvoření  $\varepsilon_{b,0}$ . Napětí se zvyšuje na hodnotu  $\sigma_a$ , která se rovná jedné třetině pevnosti v tlaku  $f_c$ , zde se opět podrží po dobu 20 s. Zároveň se odečte poměrné přetvoření  $\varepsilon_{a,1}$ . Cyklus se 3x opakuje a pokaždé se zapíše hodnoty  $\varepsilon_a$  a  $\varepsilon_b$ . Na závěr se vzorek zatěže až do porušení a vypočítá se jeho pevnost v tlaku. Ta by se neměla lišit



o více než 20 % od pevnosti, která byla zjištěna na srovnávacích vzorcích. Do výpočtu vstupují hodnoty z posledního zatěžovacího cyklu. [3] [33]

Pro lepší pochopení je postup znázorněn na obr. 20.



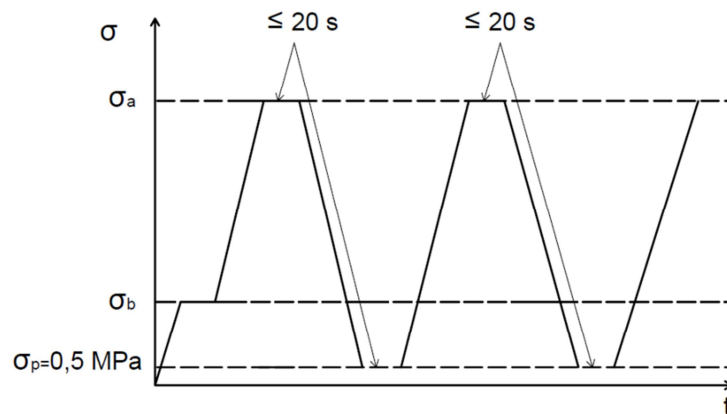
Obr. 20 Postup zkoušky- metoda A [3] [33]

Metoda B má podobný postup, liší se však tím, že jsou vynechány cykly, při kterých se zatěhuje jen na dolní zatěžovací mez  $\sigma_b$ .

V prvním cyklu se vzorek zatěhuje konstantní rychlostí ( $0,6 \pm 0,2$  MPa/s) až na hodnotu  $\sigma_b$ , takto se vzorek nechá zatížený po dobu maximálně 20 s. Poté se napětí zvyšuje stejnou konstantní rychlostí až na horní hodnotu  $\sigma_a$ , která se rovná jedné třetině pevnosti v tlaku  $f_c$ . Zatížení se opět podrží na této hodnotě po dobu menší než 20 s. Následuje odtěžování vzorku zpět na hodnotu  $\sigma_p$ , které probíhá v čase maximálně 20 s. Při zvyšování i snižování napětí se měří poměrné deformace vzorku. Ve druhém cyklu se postup opakuje. Po ukončení druhého cyklu se provede kontrola správné centrace vzorku ve zkušebním lisu.

Cykly opakujeme potřetí. Hodnoty přetvoření, které vzniklo při zatěžování ve druhém a třetím cyklu, se od sebe nesmí lišit o více než 10 %. Na závěr se vzorek zatěhuje až do jeho porušení a tím je možné spočítat pevnost v tlaku vzorku. Pevnost v tlaku vzorku by se neměla lišit o více než 20 % od pevnosti vzorků, na kterých byla pevnost v tlaku zkoušena. [33] [3]

Postup je znázorněn na obrázku 21.



Obr. 21 Postup zkoušky- metoda B [3] [33]

Statický modul pružnosti se vypočítá podle Hookova zákona podle vzorce

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,3}} \quad (8)$$

kde  $E_{c,s}$  je statický modul pružnosti v MPa,

$\sigma_a$  je horní hranice napětí, která je rovna  $f_c/3$ ,

$\sigma_p$  je základní napětí, které je rovno hodnotě ležící mezi 0,5 MPa a  $\sigma_b$  v MPa,

$\sigma_b$  je dolní hranice napětí, která je rovna hodnotě  $0,1 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$  v MPa,

$\varepsilon_{a,3}$  je poměrné přetvoření při zatěžování ve třetím cyklu,

$\varepsilon_{p,2}$  je poměrné přetvoření při snižování napětí v druhém cyklu.

### 3.6.3. Měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Ultrazvuková metoda spočívá v měření času průchodu ultrazvukové vlny vzorkem nebo částí konstrukce. Zkoušením betonu pomocí ultrazvuku se zabývá norma ČSN 73 1371 [40]. Přístroj pro stanovení doby průchodu ultrazvukové vlny musí odpovídat normě ČSN EN 12504-4 [41].

Ve stavebnictví se používá ultrazvukové vlnění s frekvencí v rozmezí od 20 do 150 kHz, výjimečně do 500 kHz. Pracovní kmitočet sondy se volí v závislosti na nejmenším bočním rozměru tělesa, na délce měřicí základny a pevnosti betonu [3]. Výhodou UZ vlnění je, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu, kde se např. slyšitelné vlnění rychle utlumí. [42]

V praxi můžeme rozeznávat metodu průchodovou a odrazovou, přičemž ve stavebnictví je více používaná metoda průchodová. Metoda odrazová je používána zřídka.

Přesnost měření rychlosti šíření ultrazvuku se ověřuje pomocí etalonu, u kterého je známa přesná rychlost šíření ultrazvukové vlny. Rozdíl mezi naměřeným časem průchodu etalonem a deklarovaným časem průchodu etalonem je tzv. mrtvý čas, který je nutné při měření odečítat od naměřeného času. [3] Na obr. 22 je vidět ultrazvukový přístroj TICO od firmy Proceq.

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu se vypočítá ze vztahu

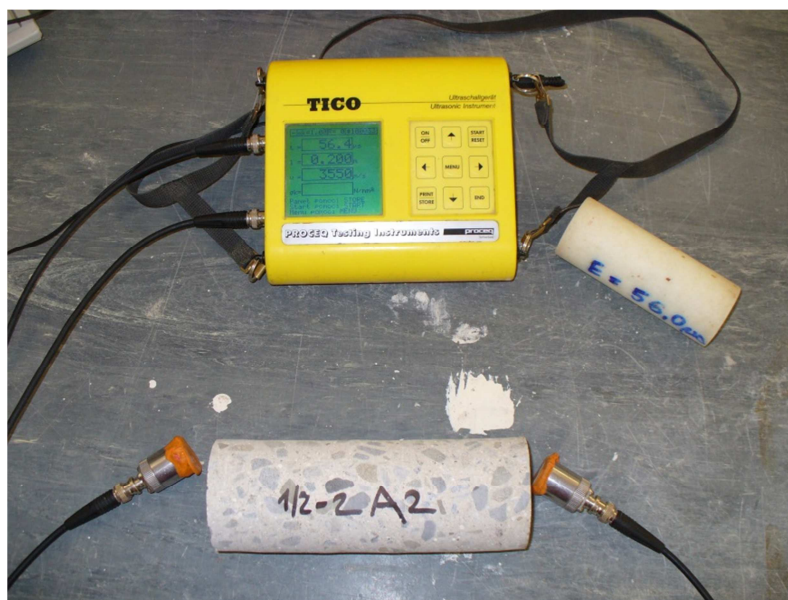
$$v_L = \frac{L}{t} \quad (9)$$

kde  $v_L$  je rychlost šíření impulsu

$L$  je délka základny v m

$t$  je čas průchodu impulsu v s, kde  $T = T_L \pm T_{kor}$

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



Obr. 22 Ultrazvukový přístroj TICO od firmy Proceq [3]

Pomocí rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se vypočítá dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu  $E_{cu}$  ze vztahu

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (10)$$

kde  $E_{cu}$  je dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku v MPa,  
 $\rho$  je objemová hmotnost betonu v  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $v_L$  je rychlost šíření ultrazvukového impulsu v m/s,  
 $k$  je součinitel rozměrnosti.

Pokud se stanovují rychlosti impulsu v prostředích různé rozměrnosti, použijí se součinitele  $k$  pro přepočet stanovené rychlosti v dvojrozměrném a jednorozměrném prostředí. Vztahy pro výpočet součinitele rozměrnosti jsou uvedené v normě ČSN 73 1371 [40] [3].

Z impulsové rychlosti lze také stanovit: rovnoměrnost betonu, materiálové charakteristiky, zejména modul pružnosti a pevnost v tlaku, změny těchto vlastností v čase (např. během zrání, anebo při degradaci), přítomnost trhlin či větších dutin v betonu.

Výhodou ultrazvukové metody je, že jí v některých případech lze použít i pro zkoušky v laboratoři i in situ [3].

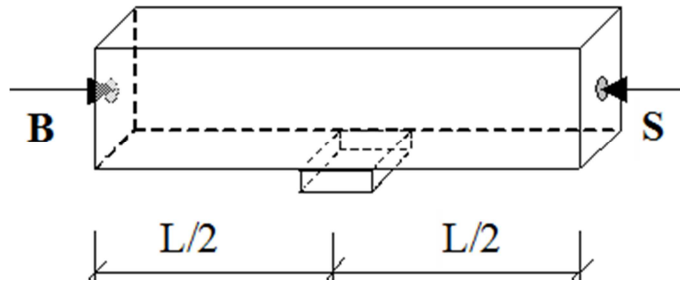
#### **3.6.4. Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou**

Rezonanční metoda spočívá ve zjišťování vlastní frekvence zkušebního tělesa. Vlastní frekvence je taková frekvence, kdy při vynuceném kmitání vzniká největší amplituda. To nastane ve chvíli, kdy je budící frekvence shodná s vlastní frekvencí tělesa.

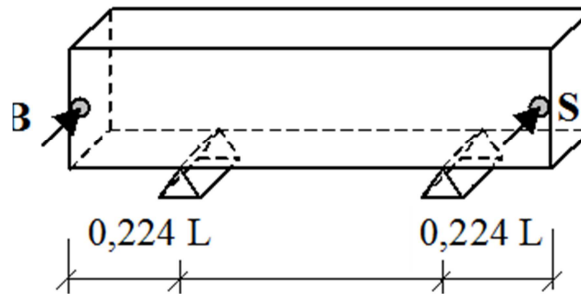
Rezonanční metoda se provádí dle ČSN 73 1372 [43]. Rezonanční metodou je možné zjišťovat dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku, dynamický modul pružnosti ve smyku, Poissonův koeficient betonu a další vlastnosti betonu, jako je degradace betonu, změny pevnosti s časem, trhliny ve zkušebních tělesech a jiné [3] [43].

Rezonanční metodu lze provádět dvěma způsoby. V obou případech se těleso uloží na pružný podklad, aby nebylo bráněno volnému kmitání vzorku. Na vzorek se upevní zařízení pro snímání rezonančních kmitočtů mechanického kmitání. Podle

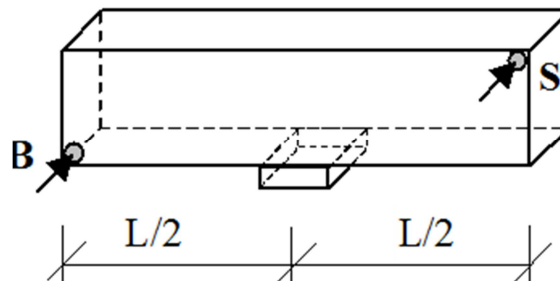
polohy sondy se měří kmitání podélné, příčné a kroutivé. Poloha sondy pro jednotlivé kmitání je znázorněno na obrázcích 23, 24 a 25.



Obr. 23 Poloha sondy a budiče pro měření podélné vlastní frekvence [31]



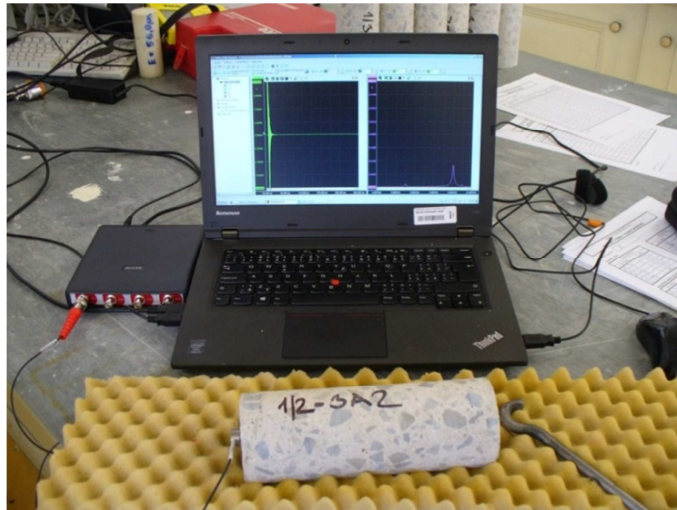
Obr. 24 Poloha sondy a budiče pro měření příčné vlastní frekvence [31]



Obr. 25 Poloha sondy a budiče pro měření vlastní frekvence kroutivého kmitání [31]

Z obrázků je patrné i podepření vzorku. U podélného a kroutivého kmitání je vzorek podepřen uprostřed, neboť uzlový bod s nulovou amplitudou je v polovině délky vzorku. U příčného kmitání se uzlové body nacházejí zhruba ve třetině rozpětí [3].

V první metodě se těleso úderem rozkmitá a na monitoru počítače, ke kterému je připojen osciloskop, který měří frekvenci kmitání vzorku, se odečte frekvence, která má největší amplitudu. Tato frekvence je vlastní frekvence tělesa. Tato metoda se nazývá impulsní metoda [3].



Obr. 26 Měření vlastní frekvence zkušebního vzorku impulsní metodou

Druhá metoda se nazývá kontinuální (spojitá) rezonanční metoda. Tato metoda spočívá v tom, že se na těleso připevní budič a sonda pro snímání kmitočtů. Těleso se uvede do požadovaného kmitání postupnou změnou kmitočtu budícího oscilátoru v oblasti očekávané rezonance, současně se na indikačním zařízení sleduje amplituda kmitání zkušebního tělesa. Maximální amplituda znamená, že došlo ke shodě kmitočtu s vlastní frekvencí zkušebního tělesa. [41] Tato metoda se dnes již nevyužívá kvůli složitému postupu. [3] Zařízení pro měření vlastní frekvence spojitou metodou je zobrazeno na obr. 27.



Obr. 27 Zařízení pro měření kontinuální rezonanční metodou [37]

Hodnoty naměřených modulů pružnosti se z podélného kmitání vypočítají podle vzorce

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f^2 \cdot \rho \quad (11)$$

kde  $E_{crL}$  je dynamický modul pružnosti v tlaku v MPa,  
 $L$  je délka vzorku v m,  
 $f$  je vlastní podélná frekvence v kHz,  
 $\rho$  je objemová hmotnost betonu  $\text{kg/m}^3$ .

Pomocí příčné vlastní frekvence se dynamický modul pružnosti betonu v tlaku určí ze vztahu

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^4 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (12)$$

kde  $E_{crf}$  je dynamický modul pružnosti zjištěný z příčného kmitání v MPa,  
 $c_1$  je korekční součinitel, který závisí na poměru poloměru setrvačnosti,  
 $k$  délce zkušební tělesa, viz tabulka 2 v normě ČSN 73 1372 [43],  
 $L$  je délka zkušební tělesa v m,  
 $f_f$  je příčná vlastní frekvence kHz,  
 $\rho$  je objemová hmotnost zkušební tělesa v  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $i$  je poloměr setrvačnosti,  $i = \frac{a}{\sqrt{12}}$  pro hranol a  $i = \frac{d}{4}$  pro válec v m.

Modul pružnosti vypočtený z podélného i příčného kmitání u homogenního materiálu by měl být shodný. Rozdíl mezi modulem pružnosti vypočtený z příčného kmitání lišící se od modulu pružnosti vypočteného z podélného kmitání o více než 10 % indikuje nehomogenní materiál (u betonu indikuje nerovnoměrnost) [43].

Pomocí rezonanční metody je dále možné kromě dynamického modulu pružnosti v tlaku vypočítat i dynamický modul pružnosti ve smyku. Ten se podle normy [43] vypočítá ze vztahu

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (13)$$

kde  $G_{cr}$  je dynamický modul ve smyku v MPa,  
 $k$  je součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa dle ČSN 73 1372 [43],  
 $L$  je délka vzorku v m,

$F_t$  je vlastní frekvence tělesa v kroucení v kHz,

$\rho$  je objemová hmotnost zkušební tělesa v  $\text{kg/m}^3$ .

Výsledky zkoušek provedených rezonanční metodou se používají k posouzení změn kvality betonu v závislosti na čase podle měnících se hodnot dynamických modulů pružnosti betonu vlivem hydratace, změny teploty a vlhkosti, dále se posuzují změny kvality betonu vlivem působení mrazu, agresivního prostředí nebo jiných vnějších vlivů [41] [3].

### 3.7. Kritéria shody

V roce 2016 vyšlo nové TP, ve kterém jsou definovány kritéria shody pro přijetí průkazných zkoušek betonu. Ty mají prokázat, že beton vyhoví specifikovaným požadavkům a provádějí se pro konkrétně navržené složení betonu, u kterého se musí zkoušet alespoň dvě záměsi, z nichž od každé musí být vyzkoušeny minimálně tři zkušební tělesa, nebo pro modelové složení betonu. U zkoušení modelového složení betonu se provádějí alespoň tři modelové záměsi, u kterých nesmí být rozdíl množství pojiva mezi jednotlivými záměsemi víc než  $50 \text{ kg/m}^3$  betonu. Složení těchto záměsí musí být kvalitativně shodné a nesmí se lišit v konzistenci. Pro beton s jiným obsahem pojiva se prokázaný modul pružnosti získá interpolací nebo extrapolací. [27]

Kritéria shody jsou:

1) Průměrná hodnota naměřených modulů pružnosti musí být větší než  $E_{cm}+1$ .

$$E_{cap} > E_{cm} + 1 \text{ [GPa]} \quad (14)$$

2) Jednotlivá hodnota modulu pružnosti nesmí být nižší o více než 3 GPa od požadované střední hodnoty.

$$E_{ci} > E_{cm} - 3 \text{ [GPa]} \quad (15)$$

Dále jsou charakterizovány kritéria shody pro kontrolní zkoušky. Ty mají prokázat, že beton v průběhu výroby splňuje specifikované požadavky na modul pružnosti.



Kritéria jsou:

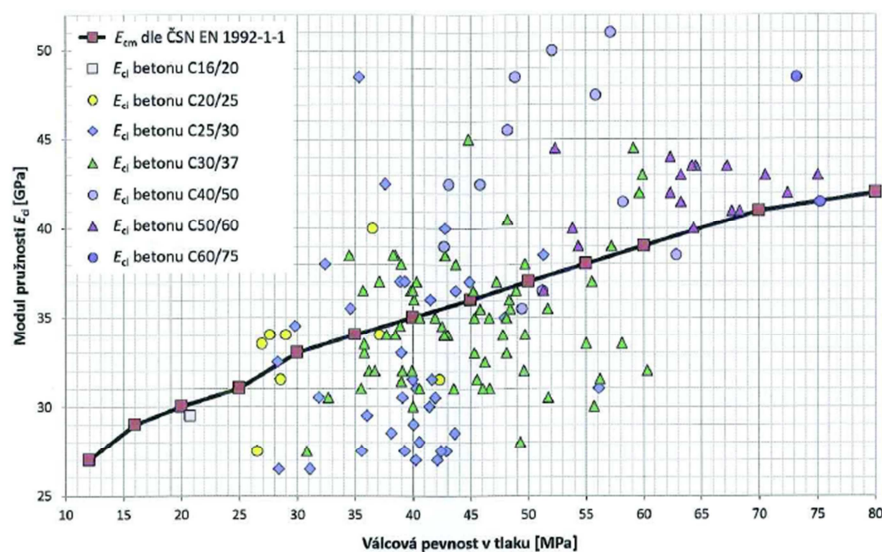
$$E_{cai} \geq E_{cm} \text{ [GPa]} \quad (16)$$

$$E_{ci} \geq E_{cm} - 4 \text{ [GPa]} \quad (17)$$

### 3.8. Možnosti určování charakteristické hodnoty podle různých norem

Charakteristická hodnota byla zatím určována pouze u pevnosti betonu. U modulu pružnosti však norma ČSN EN 1992-1-1 [2] udává pro navrhování konstrukcí jen hodnotu střední. Ta však může být v případě modulu pružnosti velmi nepřesná. Značný rozptyl skutečně naměřených hodnot je vidět i na grafu, který je vidět na obr. 28.

Na něm je vidět hodnota modulu pružnosti v závislosti na válcové pevnosti, kterou udává norma a skutečné hodnoty různých pevnostních tříd betonu.



Obr. 28 Porovnání hodnot modulu pružnosti dle EC 2 a skutečných hodnot [27]

Je tedy vidět, že lze očekávat i hodnoty menší, než které udává Eurokód 2 [2]. V dnešní době, kdy se stále více používá předpjatý beton a konstrukce jsou subtilnější, by ale měla být hodnota modulu pružnosti přesnější. Proto by se měla začít používat i charakteristická hodnota, jako je tomu i u pevnosti.

Při určování charakteristické hodnoty lze použít klasický statistický postup pouze v případech, že je vyhodnocováno velké množství výsledků. To ale ve většině

případů není možné, protože je k dispozici jen omezené množství dat. Odhad charakteristické hodnoty klasickým postupem by mohl být nepřesný. [44]

Určováním charakteristické hodnoty se zabývá zároveň několik norem. Obecné postupy hodnocení a navrhování konstrukcí z libovolného materiálu na základě zkoušek uvádí příloha D normy ČSN EN 1990 [45], která je v souladu s dokumenty ČSN ISO 13822 [46] a ISO 2394 [47]. Postupy pro stanovení charakteristické hodnoty pevnosti betonu v konstrukcích na základě zkoušek uvádí nový evropský dokument EN 13791 [48], který navazuje na ČSN EN 206 [13] pro specifikaci vlastností betonu na základě zkoušek (kontrola shody). Postupy podle ČSN EN 1990 [45] a EN 13791 [48] se však navzájem liší a mohou vést k rozdílným odhadům charakteristické hodnoty. [49]

### 3.9.1. Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN EN 1990 [45]

Příloha D v normě ČSN EN 1990 [45] poskytuje obecné pokyny pro hodnocení jedné nezávislé vlastnosti  $X$ , která může představovat:

- 1) odolnost výrobku;
- 2) vlastnost, která přispívá k odolnosti výrobku [49].

Podle této normy se charakteristická hodnota veličiny  $X$  vypočítá jako:

1. Normální rozdělení:

$$X_k = m_x(1 - k_n \cdot V_x) \quad (18)$$

kde  $m_x$  je střední hodnota

$V_x$  je variační koeficient

$k_n$  je součinitel

Podle normy ČSN EN 1990 [45] se má použít variační koeficient  $V_x$  známý, jestliže je on nebo jeho reálná horní hranice apriorně známa. V opačném případě se má použít  $V_x$  neznámý, pokud hodnota variačního koeficientu  $V_x$  není apriorně známa, je potřeba ho odhadnout z náhodného výběru jako:

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (19)$$

kde  $m_x$  je střední hodnota,

$V_x$  je variační koeficient,

$s_x$  je směrodatná odchylka.

Odhad směrodatné odchylky se vypočítá jako druhá odmocnina rozptylu, tzn. podle vztahu

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} \quad (20)$$

2. Pro log-normální rozdělení se charakteristická hodnota vypočítá jako

$$X_{k(n)} = \exp(m_y - k_n \cdot S_y), \quad (21)$$

kde  $m_y$  se vypočítá jako

$$m_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i), \quad (22)$$

směrodatná odchylka při známém variačním koeficientu  $V_x$  se vypočítá jako

$$S_y = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \approx V_x \quad (23)$$

a směrodatná odchylka, pokud je variační koeficient  $V_x$  neznámý, se vypočítá jako

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - m_y]^2}. \quad (24)$$

Hodnota  $k_n$  se určí z tabulky 1. Pro neznámé  $V_x$  se nemá uvažovat jeho hodnota menší, než 0,1. [45]

Tab. 1 Hodnoty  $k_n$  u známého a neznámého  $V_x$  [45]

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ známý	2,31	2,01	1,89	1,83	1,8	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_x$ neznámý	—	—	3,37	2,63	2,33	2,18	2	1,92	1,76	1,73	1,64

### 3.9.2. Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN ISO 13822 [46]

Stanovení charakteristické hodnoty  $x_k$  pro normální rozdělení je možné provést dle vzorce

$$x_x = \mu(1 - kV) \quad (25)$$

kde  $\mu$  je střední hodnota,  
 $V$  je variační koeficient,  
 $k$  je součinitel.

Pro log-normální rozdělení se charakteristická hodnota stanoví podle vztahu

$$x_k = \mu \exp(-k\sigma - 0,5\sigma^2) \quad (26)$$

kde

$$\sigma^2 = \ln(1 + V^2) \quad (27)$$

Hodnota  $k$  je obvykle rovna 1,64.

### 3.9.3. Stanovení charakteristické hodnoty dle ČSN EN 13791 [48]

Norma [48] rozeznává dvě metody určení charakteristické hodnoty. Metoda A se používá, pokud je provedeno 15 a více zkoušek. Metoda B se používá pro 3 a více zkoušek.

Metoda A:

Odhad charakteristické hodnoty je menší z hodnot:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k_2 \cdot s, \quad (28)$$

$$f_{ck,is} = f_{is,nejmenší} + 4 \text{ MPa} \quad (29)$$

kde  $s$  je směrodatná odchylka výsledků zkoušek, která ale nesmí být menší, než 2,0 N/mm<sup>2</sup>. Hodnota koeficientu  $k_2$  není uvedena v národních předpisech a je uvažována jako 1,48. [48]

Metoda B:

Odhad charakteristické hodnoty je menší z hodnot:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k \quad (30)$$

$$f_{ck,is} = f_{is,nejmenší} + 4 \text{ MPa} \quad (31)$$

kde součinitel  $k$  závisí na počtu  $n$  výsledků zkoušek. Jeho hodnota se určí z tabulky 2.

Tab. 2 Hodnoty součinitele  $k$  [49]

n	k
10 - 14	5
7 - 9	6
3 - 6	7

## 4. Experimentální část

### 4.1. Cíle experimentu

Protože je beton materiál, jehož vlastnosti jsou ovlivňovány vlastnostmi jednotlivých složek, ze kterých je vyroben, a poměrem těchto složek, zaměřil se tento experiment na to, jak složení betonu ovlivňuje výsledný modul pružnosti v tlaku. Cílem experimentu bylo vyrobit větší zkušební tělesa z různých druhů betonu, ze kterých se později odebraly jádrové vývrty, na kterých se několika metodami určil modul pružnosti ztvrdlého betonu. Výsledek měl ukazovat to, jak množství cementu a obsah plastifikačních a popřípadě provzdušňujících přísad ovlivňuje výsledné hodnoty modulu pružnosti. Dalším cílem bylo zjistit, zda je možné aplikovat metody na určení charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku i na určení charakteristické hodnoty modulu pružnosti, která v normách zatím není definována.

Experimentální část diplomové práce přímo navazuje na experiment popisovaný v mé bakalářské práci [3]. Je jen významně rozšířený o další druhy betonu a o výpočet charakteristické hodnoty modulu pružnosti.

### 4.2. Postup experimentu

#### 4.2.1. Složení betonu

Na začátku experimentu bylo namícháno několik typů čerstvého betonu dle ČSN EN 206 [13]. Jednotlivé receptury se od sebe lišily množstvím cementu. Celkem bylo vyrobeno jedenáct druhů betonu různých receptur. Tyto betony byly rozděleny do čtyř skupin. Betony s označením R, 0/1, 0/2 a 0/3 byly namíchány bez přísad a příměsí, tedy pouze z cementu, kameniva a vody. Jejich složení se lišilo pouze množstvím cementu, ostatní složky byly stejné. Vodní součinitel je zaznamenán v tabulce 6. Dále byly namíchány betony s různým obsahem cementu, které dále obsahovaly i různé množství plastifikátoru. Ty měly označení 1/1, 1/2, 1/3, 2/2 a 2/3. Druhy betonů s označením 1/1, 1/2 a 1/3 obsahovaly 0,25 % plastifikátoru z hmotnosti cementu a betony s označením 2/2 a 2/3 obsahovaly 0,5 % plastifikátoru z hmotnosti cementu. Jako plastifikátor byla použita přísada Sika ViscoCrete 4035. Poslední skupinou betonů,

které byly namíchány, byly betonové směsi, ve kterých byla přidána provzdušňující přísada Sika LPS A 94. Tyto betony nesly označení P2/2 a P2/3.

Jako pojivo byl do všech druhů betonu použit cement portlandský 42,5 R, jako plnivo pak kamenivo Olbramovice frakce 4-8 a 8-16 mm a dále pak písek z Bratčic frakce 0-4 mm. Předpokládané teoretické dávky cementu byly 250 kg, 300 kg, 350 kg a 400 kg na 1 m<sup>3</sup> čerstvého betonu, při míchání však vznikly drobné nuance díky míchání ve věžové betonárně. Podrobné složení a množství jednotlivých složek je zaznamenáno v tabulkách 3, 4 a 5.

Tab. 3 Složení betonu bez přísad

Materiál (naváženo)		R	0/1	0/2	0/3
Cement CEM I 42,5 R (Mokrá)		248	308	357	392
Písek 0-4 mm (Bratčice)		953	925	889	826
Kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)		173	182	174	195
Kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)		675	696	693	669
Voda	záměsová	187	189	188	195
	v kamenivu	14	14	13	13
	celková	201	203	201	208

Tab. 4 Složení betonu s plastifikační přísadou

Materiál (naváženo)		1/1	1/2	1/3	2/2	2/3
Cement CEM I 42,5 R (Mokrá)		295	349	394	338	386
Písek 0-4 mm (Bratčice)		927	897	846	905	854
Kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)		185	185	192	183	207
Kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)		689	693	684	667	671
Voda	záměsová	163	162	170	163	168
	v kamenivu	14	13	13	13	13
	celková	177	175	183	176	181
Sika ViscoCrete 4035		0,71	0,91	0,95	1,77	2,01

Tab. 5 Složení betonu s plastifikační a provzdušňující přísadou

Materiál (naváženo)		P2/2	P2/3
Cement CEM I 42,5 R (Mokrý)		335	393
Písek 0-4 mm (Bratčice)		850	816
Kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)		312	183
Kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)		526	694
Voda	záměsová	151	158
	v kamenivu	13	13
	celková	164	171
Sika ViscoCrete 4035		1,70	2,05
Sika LPS A 94		0,76	0,71

Tab. 6 Vodní součinitel

Označení betonu	Vodní součinitel
R	0,75
0/1	0,61
0/2	0,53
0/3	0,5
1/1	0,55
1/2	0,46
1/3	0,43
2/2	0,48
2/3	0,44
P2/2	0,45

#### 4.2.2. Vlastnosti čerstvého betonu

Na jednotlivých směsích byly provedeny zkoušky konzistence. Jednalo se o zkoušku rozlití dle ČSN EN 12350-2 [50] a zkoušku sednutí kužele dle ČSN EN 12350-5 [51]. Byla provedena také zkouška, při které se zjistil obsah vzduchu v čerstvém betonu. Na obr. 29 je znázorněna zkouška rozlití. V tabulce 7 jsou zaznamenány výsledky ze zkoušení čerstvého betonu.



Obr. 29 Zkouška rozlití [3]

Tab. 7 Vlastnosti čerstvého betonu

Označení betonu	R	0/1	0/2	0/3	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2 250	2 320	2 320	2 290	2 280	2 300	2 300	2 270	2 300	2 190	2 260
rozlití [mm]	440	410	390	420	360	350	370	340	330	330	320
sednutí [mm]	110	60	60	110	60	50	60	70	50	60	50
obsah vzduchu [%]	2,8	2,7	2,5	2,5	3,6	2,8	3,2	4,5	3,0	6,2	5,7

Pomocí zkoušek konzistence se zjistilo, že namíchaný čerstvý beton měl konzistenci S2 – S3.

#### 4.2.3. Zkušební tělesa

Z jednotlivých druhů betonu bylo vyrobeno větší množství betonových bloků, které měly tvar kvádra o rozměrech 300 x 300 x 150 mm. Z těchto bloků byly po provedení zkoušek na kvádrech (viz kapitola 4.2.4) odebrány jádrové vývrty pro potřeby zkoušení pevnosti betonu v tlaku a měření modulu pružnosti v tlaku. Jádrové vývrty měly průměr 100 mm a 75 mm. Zkušební tělesa měla různou délku pro potřeby měření pevnosti v tlaku a měření modulu pružnosti. Délky těles byly 75 mm, 100 mm a 200 mm.





Obr. 30 a) Výroba betonových bloků; b) odběr jádrových vývrtů [3]



Obr. 30 Odebrané jádrové vývrty

#### 4.2.4. Zkoušky provedené na betonových kvádrech

V rámci projektu GAČR byly na betonových blocích provedeny zkoušky, které měly ukázat závislost různých vlastností na velikosti vodního součinitele. Dále se sledoval vliv plastifikačních a provzdušňujících přísad betonu na tyto vlastnosti. Provedeny byly například zkoušky průsaku metodou TORRENT, GWT a ISAT. Tyto zkoušky prokázaly, že vyšší množství cementu snižuje propustnost betonu pro vodu i vzduch, a tím se zvyšuje trvanlivost betonu [3] [52].

Dále byl na betonové dlaždice nakreslen rastr o rozměrech 30 x 50 mm, v jehož uzlových bodech byla určována pomocí ultrazvukového přístroje TICO doba průchodu ultrazvukového vlnění dle ČSN 73 1371 [40]. Z doby průchodu byla vypočítána rychlost šíření ultrazvukového vlnění [53].

Další nedestruktivní zkouškou provedenou na blocích bylo tvrdoměrné zkoušení pomocí Schmidtova tvrdoměru dle normy ČSN 73 1373 [54]. Měření probíhalo pomocí tvrdoměrů Schmidt N, SilverSchmidt N a SilverSchmidt L. Na každé dlaždici bylo provedeno 10 úderů každým druhem tvrdoměru (po pěti na dvou protilehlých stranách). Při zkoušení byla dlaždice upevněna ve zkušebním lisu a zatížena přibližně 1/10 předpokládané pevnosti betonu v tlaku [53].

Měření je vidět na obr. 32.



Obr. 31 a) Měření Schmidtovým tvrdoměrem typu N; b) Měření pomocí tvrdoměru Silver Schmidt [53]

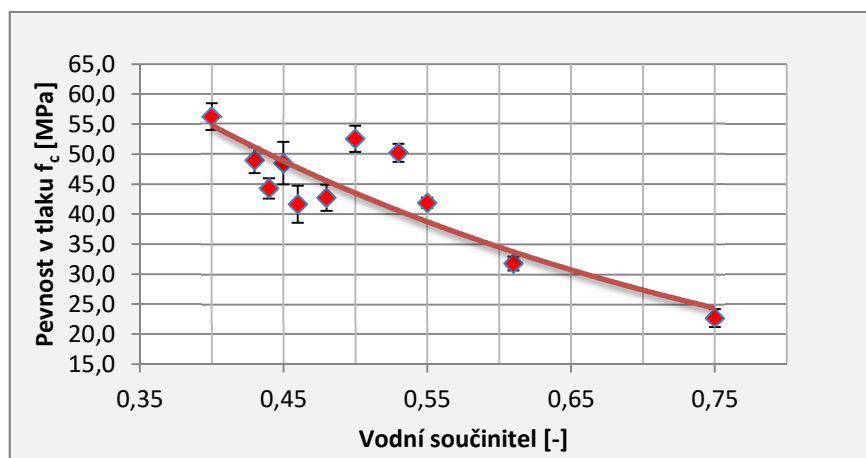
Z výsledků nedestruktivních měření na dlaždicích byly vytvořeny závislosti na vodním součiniteli a na pevnosti betonu. Experiment ukázal, že je možné jednoduše vytvořit kalibrační vztahy pro určení pevnosti betonu pomocí nedestruktivního zkoušení [53].

#### 4.2.5. Pevnost betonu

Pevnost betonu v tlaku byla zjišťována na tělesech, které byly vyvrtány z betonových bloků. Od každého druhu betonu bylo odebráno šest vývrtů pro účel měření pevnosti v tlaku. Průměr vývrtů byl 100 mm. Výška zkušebních těles byla také přibližně 100 mm. Přesné rozměry zkušebních těles jsou zaznamenány v tabulkách v příloze diplomové práce. Pevnost byla zkoušena destruktivně v lisu dle normy ČSN EN 12390-3 [55]. Naměřené pevnosti betonu jsou zaznamenány v tabulce 8. Na grafu na obrázku 32 je možné vidět závislost pevnosti betonu v tlaku na vodním součiniteli.

Tab. 8 Výsledné pevnosti na tělesech o průměru 100 mm

Označení betonu	Naměřená pevnost [MPa]	Výběrová směrodatná odchylka [MPa]
R	22,7	1,52
0/1	31,8	1,14
0/2	50,2	1,47
0/3	52,5	2,16
1/1	41,9	0,86
1/2	41,7	3,06
1/3	48,9	2,14
2/2	42,7	2,18
2/3	44,3	1,68
P2/2	48,4	3,52
P2/3	56,2	2,28



Obr. 32 Závislost pevnosti betonu v tlaku (zjištěná na vývrtech průměru 100 mm) na vodním součiniteli; chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku

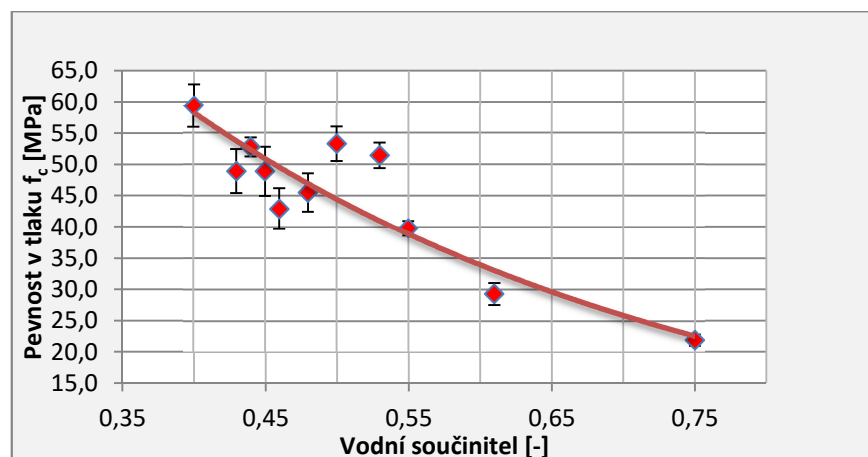
Z výsledků zkoušek pevnosti betonu je možné pozorovat změnu pevnosti v tlaku při změně vodního součinitele. Nejnížší pevnost v tlaku měl beton s označením R, který měl největší vodní součinitel. Tento beton měl pevnost v tlaku 22,7 MPa. U dalších druhů betonu se vodní součinitel snižoval, a to se projevilo zvýšením jejich pevnosti v tlaku. Trochu neobvykle vyšly zkoušky u betonu s označením 0/2 a 0/3. U těch byla pevnost navzdory většímu vodnímu součiniteli větší, než u druhů betonu s plastifikátorem, které měly menší vodní součinitel. Vysoké pevnosti dosáhly i betony s přidanou provzdušňující přísadou. Ty měly pevnost 48,5 MPa a 56,2 MPa. Graf je pro

představu proložen exponenciální křivkou, která znázorňuje přibližný vztah mezi pevností betonu v tlaku a vodním součinitelem. Koeficient vícenásobné korelace  $R = 0,8933$  a koeficient determinace  $R^2 = 0,7981$  popisují, do jaké míry se podařilo lineárním modelem popsat variabilitu experimentálních dat [24].

Pro účel určené horní zatěžovací meze pro měření statického modulu pružnosti byla pevnost dále měřena na tělesech o průměru 75 mm, což je stejný průměr, jako měla tělesa pro měření modulu pružnosti. Tato tělesa měla výšku 75 mm. Pevnosti v tlaku, ze kterých byly určeny zatěžovací meze, jsou zapsány v tabulce 9. Závislost zjištěné pevnosti na těchto tělesech je znázorněna na obrázku 33.

Tab. 9 Pevnost betonu měřená na vzorcích o průměru 75 mm

Označení betonu	Naměřená pevnost [MPa]	Výběrová směrodatná odchylka [MPa]
R	22,0	0,89
0/1	29,3	1,74
0/2	51,4	2,01
0/3	53,3	2,74
1/1	39,8	1,19
1/2	42,9	3,28
1/3	48,9	3,47
2/2	45,5	3,03
2/3	52,7	1,50
P2/2	48,9	3,90
P2/3	59,3	3,42



Obr. 33 Závislost pevnosti betonu v tlaku naměřené na vzorkách o průměru 75 mm na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku

U vzorků o průměru 75 mm byl součinitel vícenásobné korelace  $R=0,9203$  a koeficient determinace  $R^2 = 0,8471$ .

#### 4.2.6. Měření statického modulu pružnosti

Statický modul pružnosti byl měřený na tělesech o průměru 75 mm. Vzorky pro měření statického modulu pružnosti měly délku přibližně 200 mm, kromě vzorků z betonu 0/2 a 0/3. Ty kvůli interní chybě v komunikaci pracovníků SZK měly délku přibližně 150 mm. Z důvodu této chyby se v této práci neuvažuje s těmito druhy betonu, protože jejich výsledný modul pružnosti by byl touto chybou zkreslen.

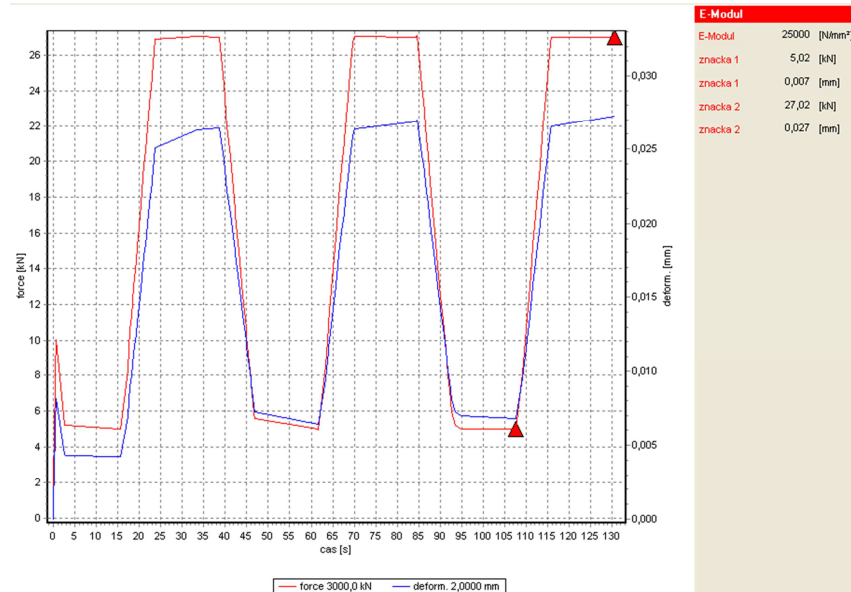
Měření probíhalo ve zkušebním lisu FORM+TEST ALPHA 3-3000 dle normy ČSN EN 12390-13 [33], jak je možné vidět na obrázku 34. Tato norma rozeznává dvě varianty zkoušení. V tomto experimentu byla použita metoda B. Dolní zatěžovací mez byla pro všechny druhy betonu stejná, a to 5 kN. Horní zatěžovací mez byla rovna jedné třetině pevnosti betonu v tlaku určené na tělesech o průměru 75 mm, viz výše.



*Obr. 34 Zatěžování vzorku v hydraulickém lisu při měření statického modulu pružnosti v tlaku*

Na obr. 35 je vidět průběh zatěžování vzorku při měření statického modulu pružnosti. Červenou čarou je zaznamenána síla při zatěžování a modrou čarou je zaznamenáno přetvoření vzorku [3].





Obr. 35 Průběh zatěžování vzorku R-2B2

#### 4.2.7. Měření dynamického modulu pružnosti

Dynamický modul pružnosti byl měřen dvěma metodami, a to ultrazvukovou a rezonanční metodou. Pro ultrazvukovou metodu byl použit přístroj TICO od Švýcarské firmy Proceq. Mrtvý čas byl zjišťován pomocí etalonu a následně odečítán z naměřených časů. Na každém vzorku byl čas průchodu ultrazvukového signálu měřen třikrát. Přesný postup měření je popsán v kapitole 3.6.3.



Obr. 36 Měření modulu pružnosti ultrazvukovou metodou

Další metodou byla rezonanční impulsová metoda. Těleso bylo úderem rozkmitáno a pomocí osciloskopu se měřila jeho vlastní frekvence. U každého vzorku se měřila podélná, příčná a krouťivá frekvence. Přesný postup metody je popsán v kapitole 3.6.4. Na obr. 37 je vidět měření vlastní frekvence rezonanční metodou.



Obr. 37 Rezonanční metoda

### 4.3. Výsledky měření modulu pružnosti

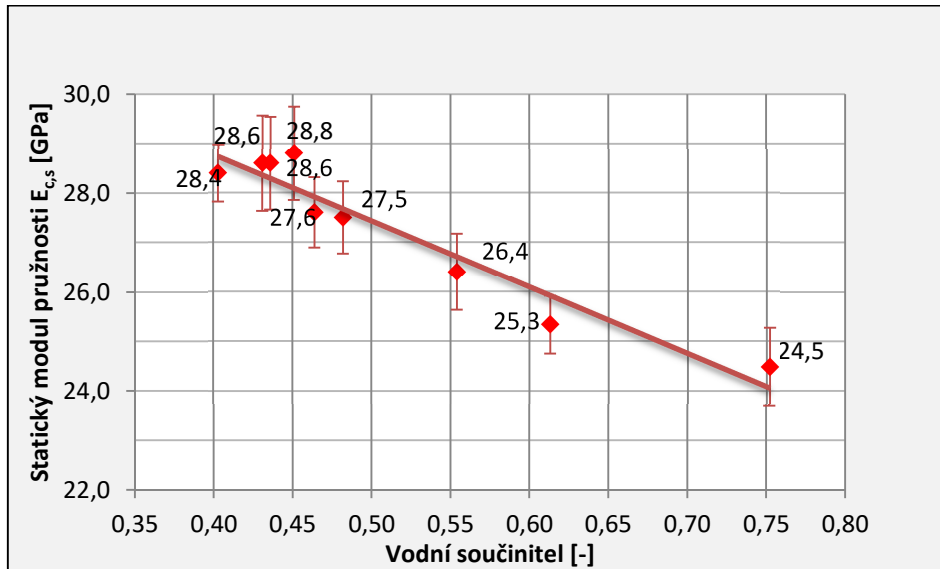
Výsledky modulů pružnosti jsou rozděleny do následujících dvou kapitol, a to podle způsobu jejich stanovení.

#### 4.3.1. Výsledky statického modulu pružnosti

Výsledné hodnoty statického modulu pružnosti jsou zaznamenány v tabulce 10.

Tab. 10 Výsledné hodnoty statického modulu pružnosti

Označení betonu	R	0/1	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Vodní součinitel (skutečný):	0,75	0,61	0,55	0,46	0,43	0,48	0,44	0,45	0,40
Statický modul pružnosti $E_{c,s}$ [GPa]	24,5	25,3	26,4	27,6	28,6	27,5	28,6	28,8	28,4
Výběr. sm. odch. [GPa]	0,78	0,58	0,77	0,71	0,97	0,73	0,94	0,95	0,58
Variační koeficient [%]	3,2	2,3	2,9	2,6	3,4	2,7	3,3	3,3	2,0



Obr. 38 Závislost statického modulu pružnosti na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku

Na obr. 38 je vidět závislost statického modulu pružnosti na vodním součiniteli. Graf je pro názornost proložen přímkou, která přibližně ukazuje závislost mezi statickým modulem pružnosti v tlaku a vodním součinitelem. Součinitel vícenásobné korelace  $R$  má hodnotu 0,9604 a koeficient determinace  $R^2$  má hodnotu 0,9223.

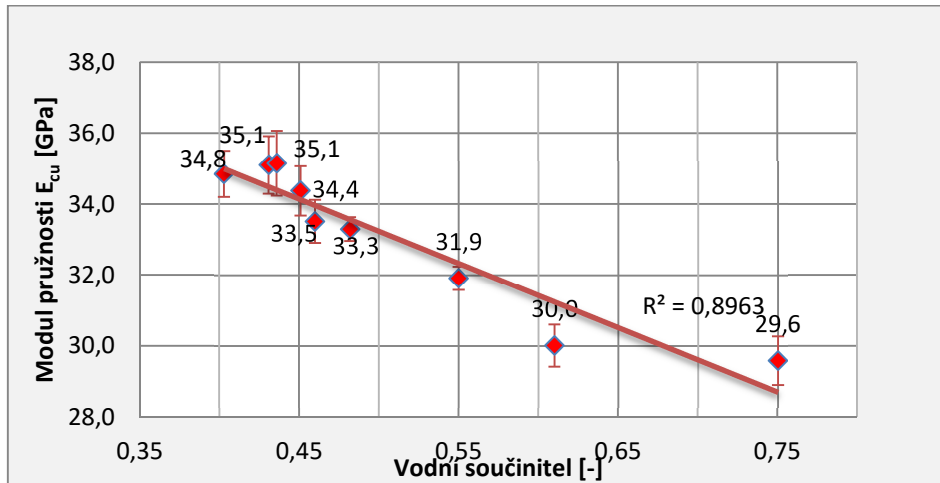
#### 4.3.2. Výsledky dynamického modulu pružnosti

Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou zaznamenány v tabulkách 11 až 13. Na obrázcích 39 – 41 jsou vidět závislosti těchto modulů na vodním součiniteli.

Tab. 11 Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného ultrazvukovou metodou

Označení betonu	R	0/1	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Vodní součinitel	0,75	0,61	0,55	0,46	0,43	0,48	0,44	0,45	0,40
Dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ [GPa]	29,6	30,0	31,9	33,5	35,1	33,3	35,1	34,4	34,8
Výběr. sm. odch. [GPa]	0,68	0,59	0,33	0,61	0,81	0,33	0,91	0,69	0,64
Variační koeficient [%]	2,3	2,0	1,0	1,8	2,3	1,0	2,6	2,0	1,9

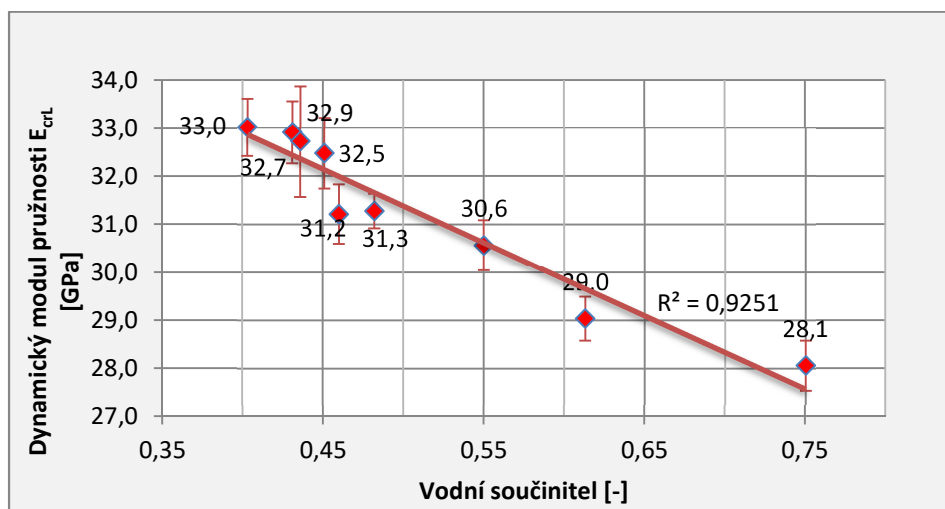




Obr. 39 Závislost dynamického modulu pružnosti zjištěného ultrazvukovou metodou na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku

Tab. 12 Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z podélného kmitání

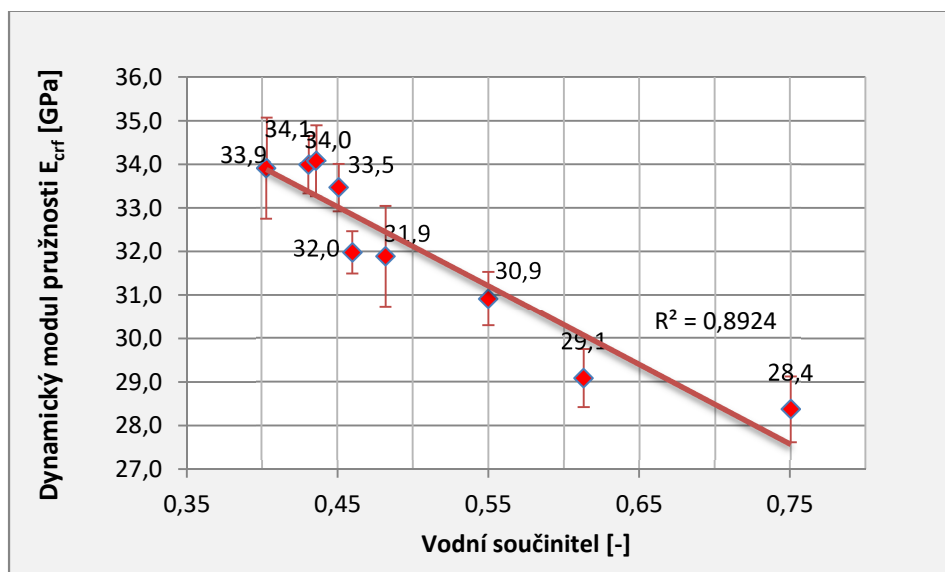
Označení betonu	R	0/1	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Vodní součinitel	0,75	0,61	0,55	0,46	0,43	0,48	0,44	0,45	0,40
Dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ [GPa]	28,1	29,0	30,6	31,2	32,9	31,3	32,7	32,5	33,0
Výběr. sm. odch. [GPa]	0,52	0,46	0,52	0,61	0,65	0,35	1,15	0,73	0,60
Variační koeficient [%]	1,9	1,6	1,7	2,0	2,0	1,1	3,5	2,3	1,8



Obr. 40 Závislost dynamického modulu pružnosti v tlaku zjištěného rezonanční metodou  $E_{crL}$  na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.

Tab. 13 Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z příčného kmitání

Označení betonu	R	0/1	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Vodní součinitel	0,75	0,61	0,55	0,46	0,43	0,48	0,44	0,45	0,40
Dynamický modul pružnosti $E_{crf}$ [GPa]	28,4	29,1	30,9	32,0	34,0	31,9	34,1	33,5	33,9
Výběr. sm. Odch. [GPa]	0,75	0,66	0,66	1,16	0,82	0,54	1,16	0,69	0,57
Variační koeficient [%]	2,6	2,3	2,1	3,6	2,4	1,7	3,4	2,1	1,7

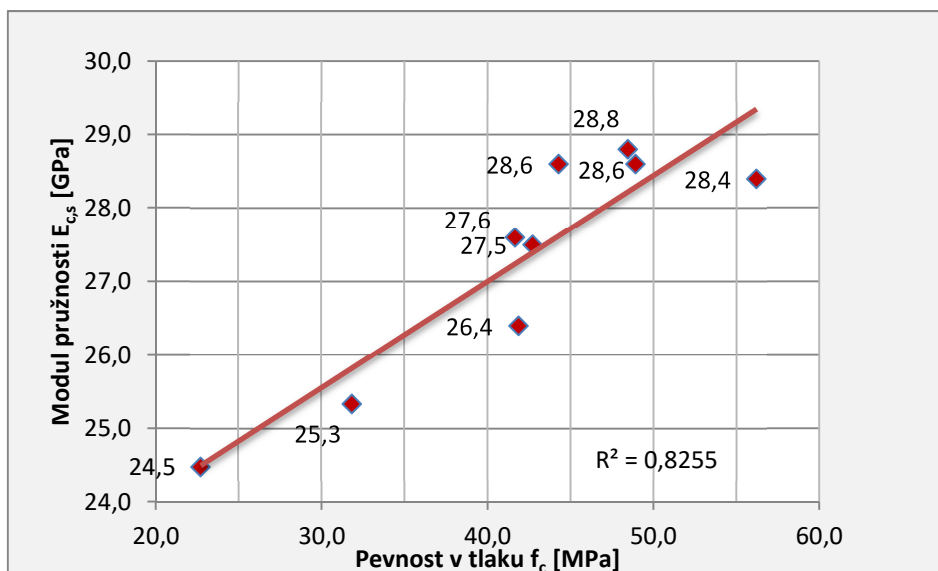


Obr. 41 Závislost dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z příčného kmitání  $E_{crf}$  na vodním součiniteli. Chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.

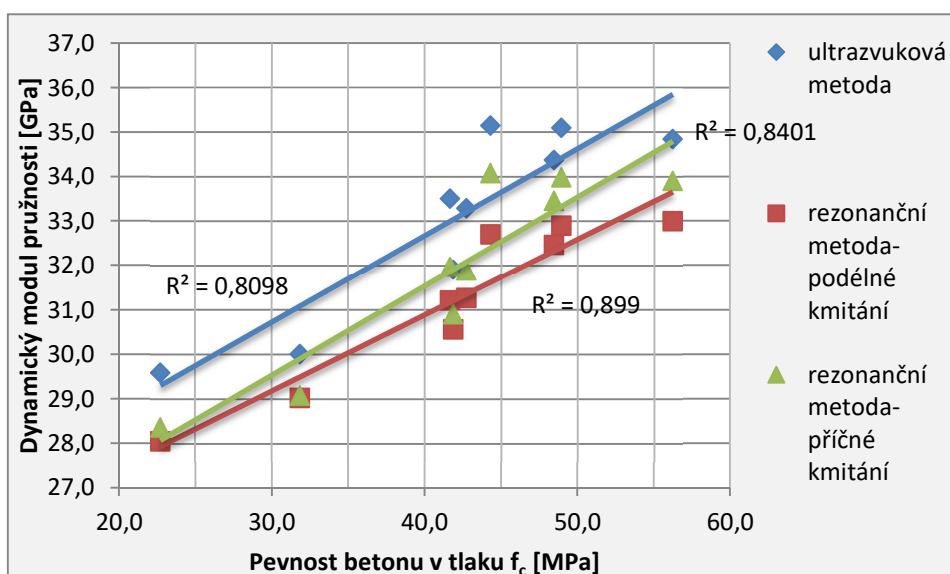
Grafy ukazující výsledky dynamických modulů pružnosti byly proloženy přímkou, která přibližně ukazuje závislost dynamického modulu pružnosti na vodním součiniteli. Z výsledků je patrné, že vodní součinitel významně ovlivňuje hodnotu modulu pružnosti betonu. Dále je z výsledků vidět, že hodnoty dynamických modulů pružnosti naměřené ultrazvukovou metodou vycházejí vyšší než hodnoty, které byly naměřeny metodou rezonanční.

Jak je vidět, čím nižší je hodnota vodního součinitele, tím vyšší je pevnost betonu i modul pružnosti v tlaku. Je tedy pravděpodobné, že i mezi modulem pružnosti a pevností existuje jistá závislost. Ta ale není přesně definována. I přes to ale norma

ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2) [2] udává směrné hodnoty modulu pružnosti na základě pevnostní třídy betonu. Na obrázku 42 a 43 je znázorněna závislost mezi pevností a modulem pružnosti v tlaku u betonů, které byly porovnávány v tomto experimentu.



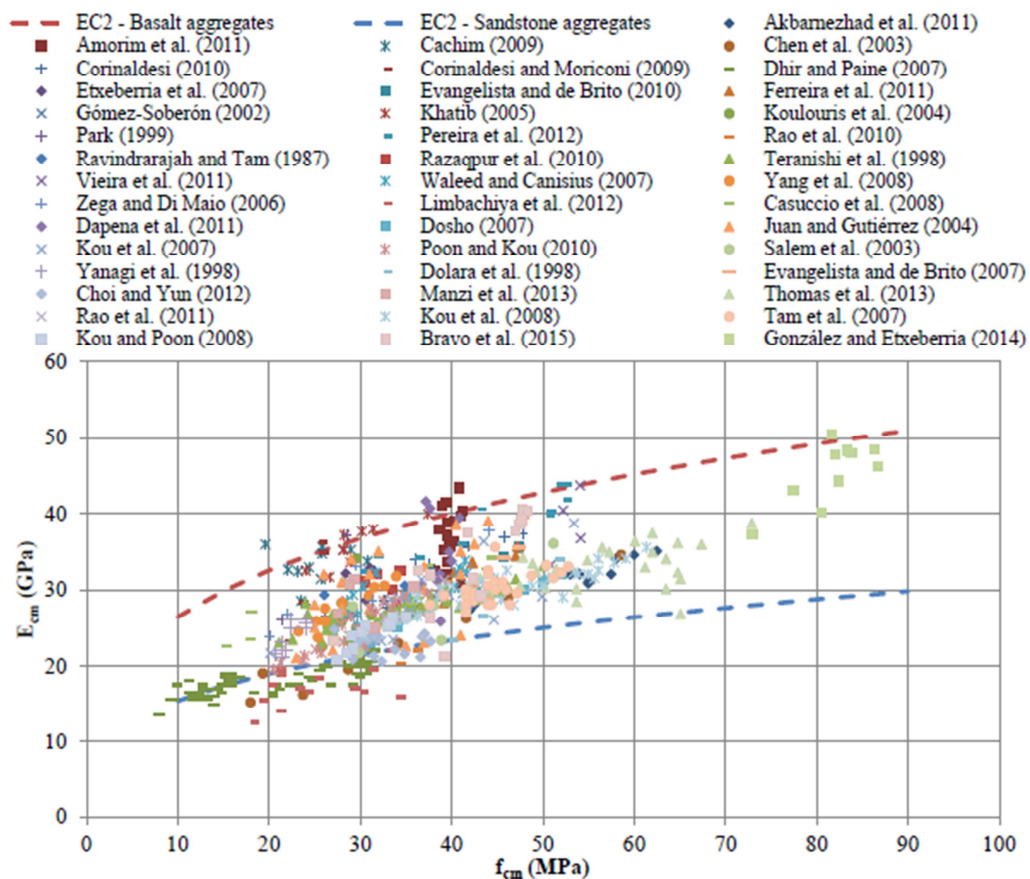
Obr. 42 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku naměřené na tělesech o průměru 100 mm



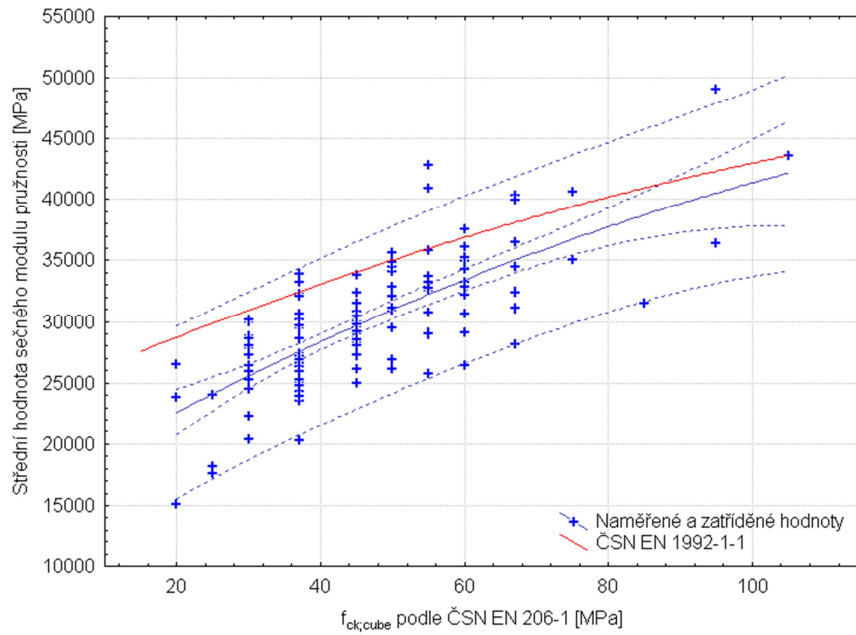
Obr. 43 Závislost dynamických modulů pružnosti v tlaku na pevnosti v tlaku naměřené na tělesech o průměru 100 mm

#### 4.4. Možnosti aplikace zavedených postupů pro určení charakteristické hodnoty pevnosti betonu na modul pružnosti

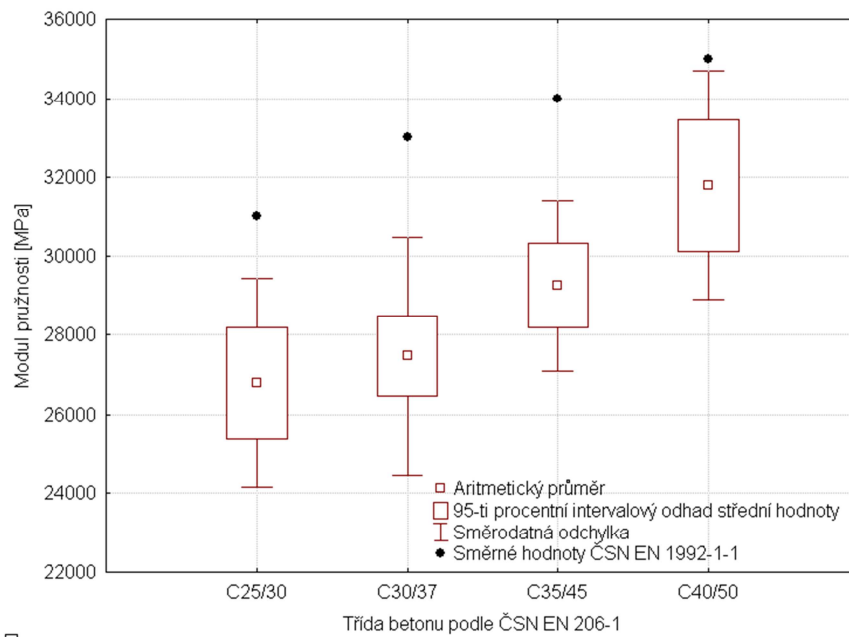
Práce se zaměřila mimo jiné i na dosud neurčovanou a nepředepsanou charakteristickou hodnotu modulu pružnosti. Normy zatím specifikují pouze charakteristickou hodnotu pevnosti betonu, charakteristická hodnota modulu pružnosti nebyla doposud v žádném normativním předpisu určována, přitom hodnota modulu pružnosti, která je udávána v Eurokódu 2 [2], bývá mnohdy nadhodnocena. Na to poukazuje i graf na obrázku 44, kde jsou zaznamenány skutečné naměřené hodnoty modulu pružnosti a hodnoty, které udává norma [2]. Jedná se o zahraniční příspěvek s hodnotami modulu pružnosti betonu, které byly zjištěny také v zahraničí. Ovšem i odborníci v ČR mají podobné zkušenosti, což dokládají dva grafy na obrázcích 45 a 46.



Obr. 44 Závislost modulu pružnosti  $E_{cm}$  na pevnosti v tlaku  $f_{cm}$  skutečných hodnot a hodnot, které udává Eurokód 2 [2] [56]



Obr. 45 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku [57]



Obr. 46 Modul pružnosti podle tříd betonu a hodnoty udávané v normě [2] [57]

Tento fakt je zřejmý i v experimentu, který je popisován v této práci. V tabulce 14 je porovnána hodnota modulu pružnosti udávaná v normě [2] a hodnota, která byla skutečně naměřená. Betony byly orientačně zatříděny do pevnostních tříd.

Tab. 14 Porovnání hodnot naměřeného modulu pružnosti s normou ČSN EN 1992-1-1[2]

Ozn.	R	0/1	1/1	1/2	1/3	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Třída betonu	C12/15	C20/25	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C45/55
$E_{cm}$ dle normy [2] [GPa]	27	30	33	33	34	33	33	34	36
$E_{c,s}$ (skut.) [GPa]	24,5	25,3	26,4	27,6	28,6	27,5	28,6	28,8	28,4
rozdíl [GPa]	2,5	4,7	6,6	5,4	5,4	5,5	4,4	5,2	7,6

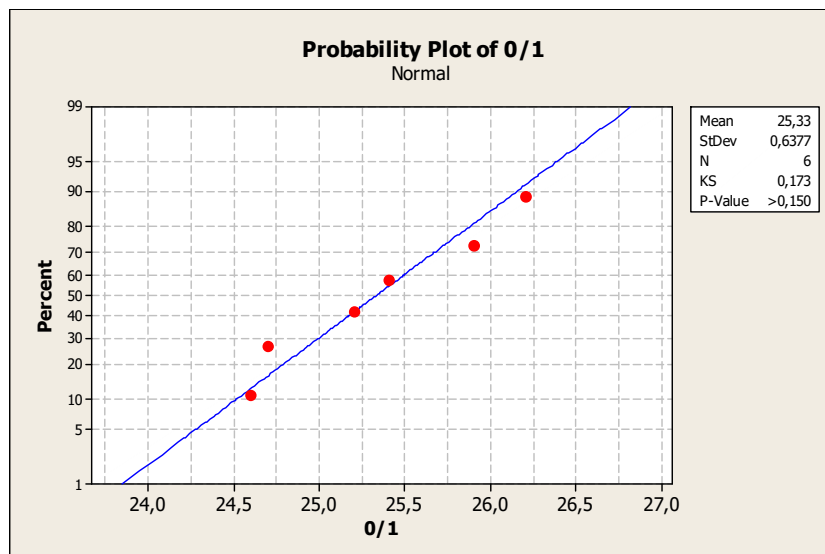
Z výsledků je vidět, že naměřené hodnoty jsou výrazně menší než hodnoty udávané v normě [2]. Kromě betonu R, kde je rozdíl „pouze“ 2,5 GPa, nedosahují rozdíly u ostatních betonů nižších hodnot než 4,4 GPa. U betonu P2/3 činí rozdíl mezi reálně zjištěným modulem pružnosti a směrnou hodnotou  $E_{cm}$  dle [2] závratných 7,6 GPa. To je zřejmý důvod, proč by se měla v alespoň jedné normě uvádět charakteristická hodnota modulu pružnosti.

Obecným postupem pro výpočet charakteristické hodnoty se zabývají normy výše zmíněné už v teoretické části práce. Jednotlivé postupy podle různých norem byly v praktické části práce aplikovány i na modul pružnosti.

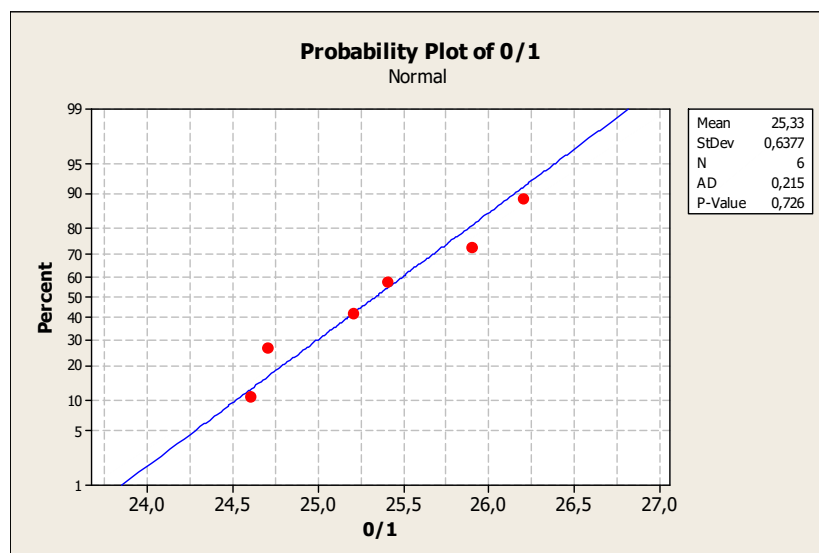
Norma ČSN EN 1990 (Eurokód 1) [45] rozeznává u normálního i log-normálního rozdělení dva postupy – pro  $V_x$  známý a  $V_x$  neznámý.  $V_x$  známý se použije v případě, že je variační koeficient plně znám,  $V_x$  neznámý v případě, že neexistuje apriorní závislost variačního koeficientu. Ve skutečnosti bývá často výhodnější použít „ $V_x$  známý“ spolu s konzervativním odhadem variačního koeficientu, než aplikovat pravidla pro „ $V_x$  neznámý“ [49]. V práci jsou proto uvedeny pro porovnání oba postupy.

V případě normy ČSN EN 13791 [48] jsou také uváděny dva postupy. Metoda A se v případě určování charakteristické pevnosti používá, pokud je nejméně 15 zkušebních těles, postup B se používá při malém souboru těles, tj. 3 až 14 těles. Ačkoli se v experimentu zjišťoval modul pružnosti na šesti tělesech, pro srovnání je uveden i výsledek z metody A.

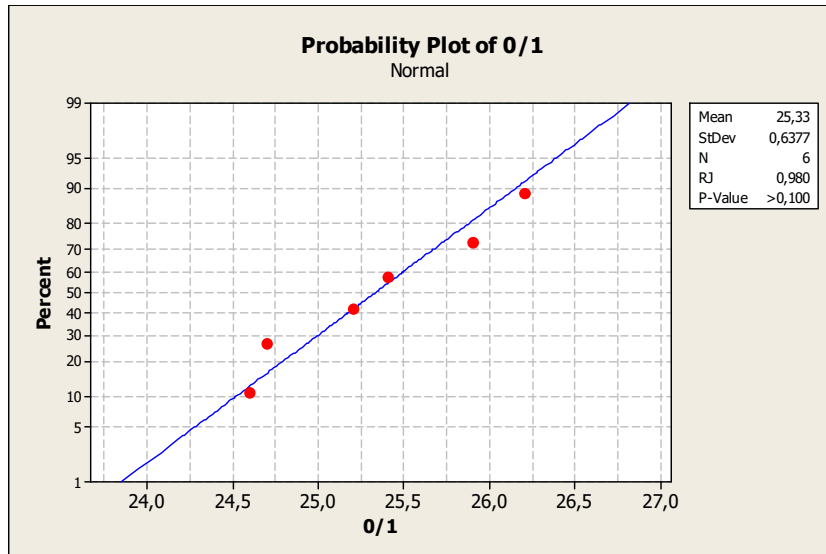
Na všech betonech byly nejprve provedeny testy normality podle tří postupů, tzn. podle postupů Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling a Ryan-Joiner. V žádném případě nedošlo k zamítnutí hypotézy, že soubor dat má normální rozdělení. Pro ukázkou slouží beton 0/1. Testy probíhaly na hladině významnosti 0,05. Výsledky testů jsou graficky znázorněny na obrázcích 47 – 49. Testy byly prováděny v softwaru Minitab.



Obr. 47 Výsledek testu normality podle postupu dle Kolmogorov-Smirnova

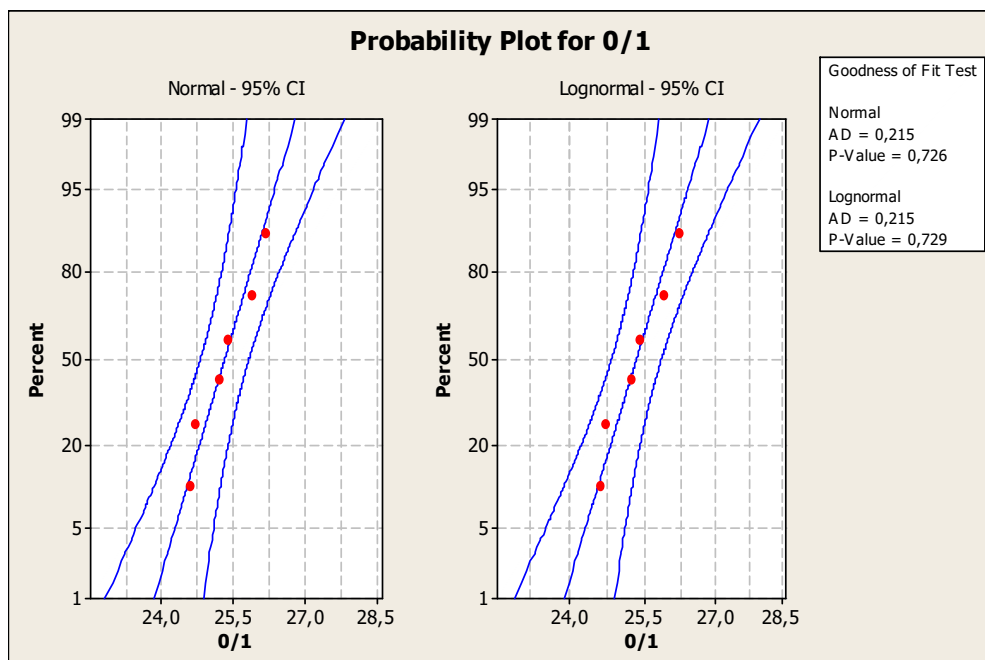


Obr. 48 Výsledek testu normality podle postupu dle Anderson-Darlinga



Obr. 49 Výsledek testu normality podle postupu dle Ryan-Joinera

Dále byl proveden test logaritmicko-normálního rozdělení souboru dat, opět na hadině významnosti 0,05. Ani v žádném z těchto případů nedošlo k zamítnutí hypotézy. Na obrázku 50 je výsledek testu logaritmicko-normálního rozdělení u betonu 0/1. Výsledky testu u ostatních betonů jsou zaznamenány v příloze.



Obr. 50 Výsledek testu logaritmicko-normálního rozdělení u betonu 0/1



Vzhledem k tomu, že nebyla zamítnuta ani hypotéza, že mají betony normální rozdělení, ani hypotéza, že mají log-normální rozdělení, je charakteristická hodnota počítána pro oba případy. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 15.

Tab. 15 Charakteristická hodnota modulu pružnosti podle různých norem

Ozn.	Prům. hod.	Charakteristická hodnota							
		ČSN EN 1990				ČSN ISO 13822		ČSN EN 13791	
		Normální rozdělení		Log-normální		Normální	Log-norm.	Metoda A	Metoda B
		V <sub>x</sub> známý	V <sub>x</sub> neznámý	V <sub>x</sub> známý	V <sub>x</sub> neznámý				
		1990-N <sub>zn</sub>	1990-N <sub>nez</sub>	1990-LN <sub>zn</sub>	1990-LN <sub>nez</sub>	13822-N	13822-L	13791-A	13791-B
R	24,5	23,0	19,1	23,0	22,6	23,1	23,1	18,5	17,5
0/1	25,3	24,2	19,8	24,2	24,0	24,3	24,3	20,9	18,3
1/1	26,4	25,0	20,7	25,1	24,8	25,1	25,2	21,0	19,4
1/2	27,6	26,4	21,6	26,4	26,1	26,5	26,5	22,7	20,6
1/3	28,6	26,8	22,3	26,9	26,5	27,0	27,0	22,7	21,6
2/2	27,5	26,2	21,5	26,2	25,9	26,3	26,3	22,4	20,5
2/3	28,6	26,9	22,4	27,0	26,6	27,0	27,1	22,0	21,6
P2/2	28,8	27,1	22,5	27,1	26,8	27,2	27,2	22,1	21,8
P2/3	28,4	27,4	22,2	27,4	27,2	27,5	27,5	24,4	21,4

Pro následné zhodnocení výsledků uvedených v tabulce 15 byly jednotlivé postupy označeny zkratkami, které následující text výrazně zjednoduší. Z tabulky 15 je vidět, že charakteristické hodnoty modulu pružnosti vypočtené podle postupů 1990-N<sub>zn</sub>, 1990-LN<sub>nez</sub>, 1990-LN<sub>zn</sub>, 13822-N a 13822-LN dosahují minimálních rozdílů. Průměrné rozdíly v charakteristické hodnotě modulu pružnosti výše uvedených postupů se pohybují od 0,1 do 0,3 GPa, což je z hlediska stavební praxe téměř zanedbatelné. Nižší hodnoty poté vycházely u postupů 1990-N<sub>nez</sub>, 13791-A a 13791-B. Rozdíly mezi výsledky těchto tří postupů a výše uvedených postupů 1990-N<sub>zn</sub>, 1990-LN<sub>nez</sub>, 13822-N a 13822-LN nabývají hodnot přibližně 4,0 až 5,5 GPa.

Při detailnějším zkoumání uváděných postupů výpočtu charakteristické hodnoty modulu pružnosti je možné konstatovat, že norma ČSN EN 1990 [45] a norma ČSN ISO 13822 [46] uvádí obecný postup určování charakteristické hodnoty, kdežto norma ČSN EN 13791 [48] uvádí postup pouze pro určení charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku, čemuž odpovídají hodnoty ve vztazích. Aby se tento postup dal aplikovat i na modul pružnosti, či jinou charakteristiku, bylo by pravděpodobně nutné

vztahy na základě statistického výpočtu na dostatečně reprezentativní sadě vzorků modifikovat, aby vyhovovaly požadované charakteristice.

U postupu 1990- $N_{nez}$  dochází pravděpodobně ke zkreslení výsledku, protože norma udává, že variační koeficient nemá být menší než 0,1 [45]. O tomto problému pojednává článek [49], rozhodně by však bylo pro definitivní soudy potřeba provedení rozsáhlých experimentů s kvalitní statistickou analýzou.

Diplomová práce se zabývala charakteristickou hodnotou modulu pružnosti, a to zejména její absencí v normativních předpisech, pouze v teoretické rovině. V praktické části byla poté vypočtena charakteristická hodnota modulu pružnosti pro použité betony, jednalo se však pouze o malé soubory dat. Z provedených rešerší plyne, že je nesmysl přiřazovat k pevnostní třídě betonu jakoukoliv hodnotu modulu pružnosti – nejen tedy průměrnou směrnou hodnotu  $E_{cm}$ , ale také případnou hodnotu charakteristickou, která by mohla být značena  $E_{ck}$ .

Správným způsobem se s touto skutečností vypořádali autoři předpisu TP ČBS 05 [27], kteří navrhli k označení betonu (pevnostní třída, stupeň vlivu prostředí, konzistence atd.) doplnit hodnotu modulu pružnosti, která není vázaná s Eurokódem 2 [2]. Bohužel se ale dopustili poměrně závažné chyby v logice označování a popisu této hodnoty modulu pružnosti. Modul pružnosti je zde předepsán střední (průměrnou) hodnotou  $E_{cm}$ , což by nevadilo do okamžiku, kdy si čtenář nalistuje kapitolu 6.1 „Průkazní zkoušky modulu pružnosti“. Uváděná kritéria shody požadují dodržet mimo jiné vztah (14), který je ze statistického hlediska naprostým nesmyslem. Mnohem lepší by bylo nahradit udávanou hodnotu  $E_{cm}$  charakteristickou hodnotou  $E_c$ . Dalším drobným faktorem, který publikaci ubližuje, jsou uvedené meze kritérií shody, které jsou evidentně zvolené bez průkazných statistických podkladů. Je obrovská škoda, že si autoři předpisu [27] tyto aspekty nepohlídali, neboť vhodně definovaná kritéria shody jsou velmi potřebná a doteď citelně chyběla.

## 5. Závěr

Předložená diplomová práce potvrdila, že vlivem složení betonu, zejména vlivem měnícího se vodního součinitele, je ovlivňována hodnota modulu pružnosti betonu. Při zvyšování vodního součinitele klesá kvalita betonu a dochází ke snižování nejen pevnosti v tlaku, ale i modulu pružnosti v tlaku.

Ačkoli literatura uvádí, že vlivem provzdušnění se snižuje pevnost betonu v tlaku i modul pružnosti betonu v tlaku, v tomto experimentu se toto pravidlo nepotvrdilo. Může to být způsobeno tím, že beton je nehomogenní materiál a jak již bylo řečeno výše, na jeho vlastnosti má vliv spousta činitelů.

Dále práce zhodnotila, zda by bylo možné aplikovat již zavedené postupy pro určování charakteristické hodnoty nejen pevnosti betonu v tlaku, ale též na hodnotu modulu pružnosti. Postupy uváděné v normě ČSN EN 1990 [45] a ČSN ISO 13822 [46] by bylo možné použít i na modul pružnosti, avšak postup uvedený v normě ČSN EN 13791 [48] by bylo zřejmě nutné upravit.

Hodnoty vycházející z udávaných postupů, které uvádí tato práce, by bylo vhodné porovnat s klasickým statistickým výpočtem většího souboru výsledků. Podle autorky je však nejdůležitějším závěrem diplomové práce, že by při specifikaci betonu měla být možnost u každého betonu udávat i předepsanou charakteristickou hodnotu modulu pružnosti, s čímž by měla být nerozlučně spjata korektně definovaná kritéria shody. Předpis TP ČBS 05 [27], bez podkladů kvalitního vyhodnocení statisticky významného souboru dat, bohužel zůstal v tomto ohledu na půlce cesty.

---

## 6. Seznam literatury

- [1] VAŠKOVÁ, Jitka, Michal ŠTEVULA a Vladimír VESELÝ. Modul pružnosti automaticky?. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2007, 7(6), 57-59. ISSN 12133116.
- [2] *Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1 Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2011, 201 s.
- [3] HALAMOVÁ, Romana. *Ověřování modulu pružnosti v konstrukcích*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.
- [4] 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 9788087093757.
- [5] JIROUŠKOVÁ, Kateřina. Systém kontroly kvality při výrobě cementu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace: 72-75*. Praha: Beton TKS, 2012, (5). ISSN 12133116.
- [6] PAVLÍK, Adolf, Jaroslav DOLEŽEL a Karel FIEDLER. *Technologie betonu*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973.
- [7] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie: Modul B102-M01, Technologie betonu, stavební keramika*. Brno: CERM, 2005.
- [8] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 8080760071.
- [9] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu: Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: ČNI, 2003.
- [10] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 8080760322.
- [11] JEDLA, Pavel. *Přísady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů*. Zlín, 2010.

- Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Dagmar Měřínská Ph.D.
- [12] ADÁMEK, Jiří. *Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů*. Brno: CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021406097.
- [13] *Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ČNI, 2014, 88 s.
- [14] BARTULÍKOVÁ, Radka. *Vliv provzdušnění a ošetřování na vývoj modulu pružnosti betonu*. Brno, 2013, 105 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.
- [15] THOMAS, Michael. *Supplementary cementing materials in concrete*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 9781466572980.
- [16] *Zkoušení betonu v konstrukcích: Část 1: Vývrty-Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: ČNI, 2009, 12 s.
- [17] *Slovník pojmů: Pevnost betonu v tlaku- zkouška* [online]. b.r. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-vtlaku-zkouska>
- [18] HUŇKA, Petr. *Vliv způsobu zakoncování tlačných ploch zkušebního tělesa na statický modul pružnosti v tlaku*. Brno: Vysoké učení technické, 2011.
- [19] TEPLÝ, Břetislav. Ještě k modulu pružnosti. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2008, **8**(1), 74-75. ISSN 12133116.
- [20] NEVILLE, Adam a J. BROOKS. *Concrete technology*. 2nd ed. Harlow, England: Prentice Hall, 2010. ISBN 9780273732198.
- [21] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu- rekapitulace. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2012, (4), 62-67. ISSN 12133116.
- [22] CIKRLE, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2010, **10**(5), 40-44. ISSN 1213-3116.
- [23] ILDIRIN, Hasan a Ozkan SENGUL. Modulus of elasticity of substandard and normal concrete. *Construction and Building materials*. Istanbul, 2010, **25**(4), 1645-1652. ISSN 09500618.

- [24] KOCÁB, Dalibor. *Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod*. Brno, 2015, 177 s. Disertační práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle Ph.D.
- [25] ČSN 73 1380. *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*. Praha: ČNI, 2007.
- [26] *CEB-FIP model code 1990: design code*. London: T. Telford, 1993. ISBN 0727716964.
- [27] VÍTEK, Jan, Jiří KOLÍSKO, Robert COUFAL, Petr HUŇKA a Michal ŠTEVULA. *MTechnická pravidla ČBS 05: Modul pružnosti betonu*. 1. Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. ISBN 978-80-906097-5-4.
- [28] AL-GAHTANI, A.S.,. Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, **24**(3), 308-314 [cit. 2016-12-10]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.036. ISSN 09500618.
- [29] KOCÁB, Dalibor, Monika KRÁLÍKOVÁ, Petr CIKRLÉ, Petr MISÁK a Barbara KUCHARCZYKOVÁ. *Experimental analysis of the influence of concrete curing on the development of its elastic modulus over time*. Článek přijímán pro publikaci v žurnálu *Materiali v Tehnologije*. Slovinsko, 2017.
- [30] ČSN 73 6174. *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: ČNI, 1994, 8 s.
- [31] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788072048465.
- [32] KOCÁB, Dalibor, Petr CIKRLÉ, Jiří ADÁMEK a Ondřej POSPÍCHAL. Vliv provzdušnění na modul pružnosti mostního betonu. In: *Technologie betonu 2010: Sborník příspěvků u 9. Konference konané 29.dubna 2010 v aule Univerzity Pardubice*. Pardubice: ČBS Servis, 2010, s. 16-21. ISBN 978- 80-87158-23-41.
- [33] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 2014, 14 s.
- [34] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu: -Část10: Stanovení statického modulu*

- pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 2014, 16 s.
- [35] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 4- Pevnost v tlaku: Požadavky na zkušební lisy*. Praha: ČNI, 2001, 24 s.
- [36] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betonu* [online]. Trnava, 2008 [cit. 2015-05-20].
- [37] CIKRLE, Petr. *Dynamické a statické moduly pružnosti betonu: přednáška v předmětu B102 Zkušebnictví a technologie* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-12-19].
- [38] *Form+test: Prufsysteme* [online]. b.r. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://formtest.de/en/testingmachines/Building-Material-Test/elasticitymodul/>
- [39] KOCÁB, Dalibor. *Soukromý fotografický archiv*. Brno, 2016.
- [40] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2011, 9 s.
- [41] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu: Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: ČNI, 2005, 16 s.
- [42] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL. *Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2013, **13**(3), 74-79. ISSN 1213-3116.
- [43] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2012, 15 s.
- [44] HOLICKÝ, Milan. *Příručka pro hodnocení existujících konstrukcí: projekt CZ.04.3.07/4.2.01.1/0005 Inovace metod hodnocení existujících stavebních konstrukcí*. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2007. ISBN 9788001037904.
- [45] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: UNMZ, 2011, 112 s.
- [46] ČSN ISO 13822. *Zásady navrhování konstrukcí: Hodnocení existujících konstrukcí*. Praha: UNMZ, 2014, 44 s.
- [47] ČSN ISO 2394. *Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí*. Praha: UNMZ, 2016, 122 s.
- [48] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a*

- prefabrikovaných dílcích*. Praha: UNMZ, 2007, 27 s.
- [49] HOLICKÝ, Milan, Karel JUNG a Miroslav SÝKORA. Stanovení charakteristické pevnosti konstrukcí z betonu na základě zkoušek. *Stavebnictví* [online]. b.r. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/tisk.php?ID=2156>
- [50] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2- Zkouška sednutím*. Praha: ČNI, 2009, 12 s.
- [51] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 5- Zkouška rozlitím*. Praha: ČNI, 2009.
- [52] *Trvanlivost 2015: Sborník příspěvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2015, 170 s. ISBN 978-80-214-5245-9.
- [53] KOCÁB, Dalibor a Petr PÖSSL. Experimentální ověřování kvality betonu pomocí nedestruktivních zkušebních metod v rámci projektu GAČR 13-18870S. In: *Trvanlivost 2015: Sborník příspěvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2015, s. 21-31, 170 s. ISBN 978-80-214-5245-9.
- [54] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Tvrdoměrné metody zkoušení*. Praha: ČNI, 2011, 20 s.
- [55] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ČNI, 2009, 20 s.
- [56] SILVA, Rui Vasco, Jorge BRITO a Ravindra Kumar DHIR. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. In: *Cleaner Production* [online]. 2015 [cit. 2017-01-09].
- [57] MISÁK, Petr a Tomáš VYMAZAL. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2009, 9(2), 58-59. ISSN 12133116.



## 7. Seznam obrázků:

<i>Obr. 1 Závislost pevnosti betonu v tlaku na vodním součiniteli [10] .....</i>	15
<i>Obr. 2 Pevnost provzdušněného a neprovzdušněného betonu v tlaku [10] .....</i>	16
<i>Obr. 3 Pevnost betonu s různými příměsi v závislosti na vodním součiniteli [15] .....</i>	16
<i>Obr. 4 Zkoušení pevnosti betonu v tlaku [17] [3].....</i>	17
<i>Obr. 5 a) Příklad správného porušení vzorku; b) příklad špatného porušení vzorku [16] .....</i>	18
<i>Obr. 6 Deformační diagram betonu [2] [3].....</i>	19
<i>Obr. 7 Modul pružnosti v tlaku v závislosti na druhu použitého kameniva [22].....</i>	21
<i>Obr. 8 Modul pružnosti v závislosti na vodním součiniteli a velikosti největšího zrna kameniva [23] .....</i>	22
<i>Obr. 9 Závislost modulu pružnosti na vodním součiniteli [23].....</i>	23
<i>Obr. 10 Vývoj modulu pružnosti v čase dle Model Code 1990 [26] [24].....</i>	24
<i>Obr. 11 Hodnoty statického modulu pružnosti provzdušněného a neprovzdušněného betonu v závislosti na čase. Na vodorovné ose je stáří betonu ve dnech [14]....</i>	24
<i>Obr. 12 Hodnoty dynamického modulu pružnosti provzdušněného a neprovzdušněného betonu v závislosti na čase [24] .....</i>	25
<i>Obr. 13 Modul pružnosti betonu ošetřovaného pod vodou [29] .....</i>	26
<i>Obr. 14 Modul pružnosti neošetřovaného betonu [29] .....</i>	26
<i>Obr. 15 Schéma zkoušky betonu v tahu ohybem [3] [31].....</i>	27
<i>Obr. 16 Umístění tenzometrů na vzorek [37].....</i>	29
<i>Obr. 17 Vzorek s tenzometry [38] .....</i>	30
<i>Obr. 18 Měření statického modulu pružnosti betonu v tlaku ve zkušebním lisu [39].....</i>	31
<i>Obr. 19 Ověření centrace zkušební vzorku [37] .....</i>	31
<i>Obr. 20 Postup zkoušky- metoda A [3] [33] .....</i>	32
<i>Obr. 21 Postup zkoušky- metoda B [3] [33] .....</i>	33
<i>Obr. 22 Ultrazvukový přístroj TICO od firmy Proceq [3].....</i>	34
<i>Obr. 23 Poloha sondy a budiče pro měření podélné vlastní frekvence.....</i>	36
<i>Obr. 24 Poloha sondy a budiče pro měření příčné vlastní frekvence.....</i>	36
<i>Obr. 25 Poloha sondy a budiče pro měření vlastní frekvence kroutivého kmitání .....</i>	36

Obr. 26 Měření vlastní frekvence zkušebního vzorku impulsní metodou .....	37
Obr. 27 Zařízení pro měření kontinuální rezonanční metodou [37].....	37
Obr. 28 Porovnání hodnot modulu pružnosti dle EC 2 a skutečných hodnot [27].....	40
Obr. 29 Zkouška rozlití [3].....	47
Obr. 30 Odebrané jádrové vývrty.....	48
Obr. 31 a) Měření Schmidtovým tvrdoměrem typu N; b) Měření pomocí tvrdoměru Silver Schmidt [53] .....	49
Obr. 32 Závislost pevnosti betonu v tlaku (zjištěná na vývrtech průměru 100 mm) na vodním součiniteli; chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.....	50
Obr. 33 Závislost pevnosti betonu v tlaku naměřené na vzorkách o průměru 75 mm na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.....	51
Obr. 34 Zatěžování vzorku v hydraulickém lisu při měření statického modulu pružnosti v tlaku .....	52
Obr. 35 Průběh zatěžování vzorku R-2B2.....	53
Obr. 36 Měření modulu pružnosti ultrazvukovou metodou .....	53
Obr. 37 Rezanční metoda.....	54
Obr. 38 Závislost statického modulu pružnosti na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.....	55
Obr. 39 Závislost dynamického modulu pružnosti zjištěného ultrazvukovou metodou na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.....	56
Obr. 40 Závislost dynamického modulu pružnosti v tlaku zjištěného rezonanční metodou $E_{crL}$ na vodním součiniteli, chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku.....	56
Obr. 41 Závislost dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z příčného kmitání $E_{crf}$ na vodním součiniteli. Chybové úsečky znázorňují výběrovou směrodatnou odchylku. ....	57
Obr. 42 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku naměřené na tělesech o průměru 100 mm .....	58

---

<i>Obr. 43 Závislost dynamických modulů pružnosti v tlaku na pevnosti v tlaku naměřené na tělesech o průměru 100 mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44 Závislost modulu pružnosti <math>E_{cm}</math> na pevnosti v tlaku <math>f_{cm}</math> skutečných hodnot a hodnot, které udává Eurokód 2 [2] [56] .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku [57].....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 46 Modul pružnosti podle tříd betonu a hodnoty udávané v normě [2] [57].....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 47 Výsledek testu normality podle postupu dle Kolmogorov-Smirnova.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 48 Výsledek testu normality podle postupu dle Anderson-Darlinga .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 49 Výsledek testu normality podle postupu dle Ryan-Joinera .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 50 Výsledek testu logaritmicko-normálního rozdělení u betonu 0/1.....</i>	<i>63</i>

## 8. Seznam tabulek

<i>Tab. 1</i> Hodnoty $k_n$ u známého a neznámého $V_x$ [45].....	42
<i>Tab. 2</i> Hodnoty součinitele $k$ [49] .....	43
<i>Tab. 3</i> Složení betonu bez přísad.....	45
<i>Tab. 4</i> Složení betonu s plastifikační přísadou .....	45
<i>Tab. 5</i> Složení betonu s plastifikační a provzdušňující přísadou .....	46
<i>Tab. 6</i> Vodní součinitel.....	46
<i>Tab. 7</i> Vlastnosti čerstvého betonu.....	47
<i>Tab. 8</i> Výsledné pevnosti na tělesech o průměru 100 mm .....	50
<i>Tab. 9</i> Pevnost betonu měřená na vzorcích o průměru 75 mm.....	51
<i>Tab. 10</i> Výsledné hodnoty statického modulu pružnosti .....	54
<i>Tab. 11</i> Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného ultrazvukovou metodou .	55
<i>Tab. 12</i> Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z podélného kmitání.....	56
<i>Tab. 13</i> Výsledky dynamického modulu pružnosti zjištěného rezonanční metodou z příčného kmitání.....	57
<i>Tab. 14</i> Porovnání hodnot naměřeného modulu pružnosti s normou ČSN EN 1992-1-1[2] .....	61
<i>Tab. 15</i> Charakteristická hodnota modulu pružnosti podle různých norem.....	64

## 9. Seznam zkratk

ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
ISO	mezinárodní institut pro normalizaci
w	vodní součinitel
v	hmotnost vody v betonu
c	hmotnost cementu v betonu
$f_{ck,cube}$	krychelná pevnost v tlaku
$f_c$	pevnost betonu v tlaku
$f_{ck}$	charakteristická pevnost v tlaku
N	síla na mezi porušení
A	zatěžovaná plocha.
$\sigma_p$	základní napětí při měření statického modulu pružnosti
$\sigma_b$	dolní zatěžovací mez při měření statického modulu pružnosti
$\sigma$	horní zatěžovací mez při měření statického modulu pružnosti
$\varepsilon_b$	poměrné přetvoření při zatížení na dolní zatěžovací mez
$\varepsilon_a$	poměrné přetvoření při zatížení na horní zatěžovací mez
$E_{cm}$	střední hodnota statického modulu pružnosti v tlaku
$f_{cm}$	střední hodnota pevnosti v tlaku
E	modul pružnosti v tlaku
$\sigma$	napětí
$\varepsilon$	poměrné přetvoření
$d_{max}$	největší velikost zrna kameniva
$E_c$	statický modul pružnosti v tlaku
$E_{dyn}$	dynamický modul pružnosti
$E_{cu}$	dynamický modul pružnosti zjištěný ultrazvukovou metodou
$E_{crL}$	dynamický modul pružnosti zjištěný rezonanční metodou z podélného kmitání
$E_{crf}$	dynamický modul pružnosti zjištěný rezonanční metodou z příčného kmitání

---

$F_i$	působící síla
$S_{tot}$	celkový průhyb
$S_{ti}$	jednotlivý průhyb
$l$	délka vzorku
$d$	průměr vzorku
$H$	délka měřící základny
$\Delta\varepsilon^I, \Delta\varepsilon^{II}$	poměrné přetvoření na jednotlivých tenzometrech
$\Delta\bar{\varepsilon}$	průměrné poměrné přetvoření
UZ	ultrazvukový impuls
$v_L$	rychlost šíření UZ
$t$	čas šíření UZ
$t_{kor}$	mrtvý čas
$t_L$	čas průchodu UZ vč. $t_{kor}$
$\rho$	objemová hmotnost
$k$	součinitel rozměrnosti
$f_L$	vlastní kmitočet podélného kmitání zkušebního tělesa
$f_f$	vlastní kmitočet příčného kmitání zkušebního tělesa
$f_t$	vlastní kmitočet krouživého kmitání zkušebního tělesa
$i$	poloměr setrvačnosti
$a$	délka strany hranolu
$c_1$	korekční součinitel
$G_{cr}$	modul pružnosti ve smyku
$k$	součinitel tvaru zkušebního tělesa
$E_{c,s}$	statický modul pružnosti
$X_k$	charakteristická hodnota
$V_x$	variační koeficient
$m_x$	střední hodnota
$S_x$	směrodatná odchylka
$f_{m(n),is}$	průměrná pevnost
$f_{is,nejmenší}$	nejnižší naměřená pevnost

## 10. Přílohy

### Beton R

#### Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
R-1A	99,6	99,4	1715,9	2215
R-1B	99,8	100,0	1729,8	2212
R-2A	99,5	100,0	1730,5	2226
R-2B	99,6	100,7	1739,5	2219
R-3A	99,5	100,5	1734,4	2217
R-3B	99,5	100,0	1737,9	2233
R-1A1	74,2	74,5	725,4	2256
R-1B1	74,0	75,5	725,4	2230
R-2A1	74,1	75,4	729,2	2239
R-2B1	74,1	75,3	722,4	2226
R-3A1	74,1	75,3	724,0	2228
R-3B1	74,1	76,2	732,1	2232
R-1A2	74,1	203,9	1963,6	2232
R-1B2	74,1	203,3	1954,0	2229
R-2A2	74,1	203,2	1960,0	2236
R-2B2	74,2	203,5	1954,6	2224
R-3A2	74,0	204,1	1968,8	2240
R-3B2	74,1	203,1	1963,4	2239

#### Pevnost v tlaku

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
R-1A	174,3	22,4	R-1A1	91,2	21,1
R-1B	165,7	21,2	R-1B1	94,4	21,9
R-2A	188,3	24,2	R-2A1	89,1	20,6
R-2B	162,9	20,9	R-2B1	96,6	22,4
R-3A	191,6	24,6	R-3A1	100,6	23,3
R-3B	179,4	23,1	R-3B1	96,8	22,5
Průměr		22,7	Průměr		22,0
Výběrová sm. odchylka [GPa]		1,5	Výběrová sm. odchylka [GPa]		1,0
Var. koef. [%]		6,7	Var. koef. [%]		4,4

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
R1-A1	24,5	0,83	0,87	0,84
R1-B1	25,0	0,81	0,89	0,88
R2-A2	22,9	0,79	0,84	0,85
R2-B2	24,4	0,84	0,88	0,88
R3-A3	24,7	0,85	0,88	0,86
R3-B3	25,4	0,84	0,88	0,87
Průměr	24,5	0,83	0,87	0,86
Výb. sm. odch.	0,86			
Var. Koef. [%]	0,03			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
R-1A2	53,0	53,6	53,1	53,2	3848	3805	3840	3831	29,5
R-1B2	51,8	51,9	52,0	51,9	3924	3916	3909	3916	30,8
R-2A2	54,1	53,6	53,2	53,6	3756	3791	3819	3789	28,9
R-2B2	53,3	53,5	53,6	53,5	3818	3803	3796	3806	29,0
R-3A2	53,6	54,0	53,3	53,6	3808	3780	3830	3806	29,2
R-3B2	52,5	52,7	52,2	52,5	3868	3854	3891	3871	30,2
Průměr [GPa]									29,6
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,75
Variační koeficient [%]									2,5

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
R-1A2	8692	4448	5597	28,1	29,2	11,6
R-1B2	8751	4424	5631	28,2	28,5	11,7
R-2A2	8574	4307	5537	27,1	27,0	11,3
R-2B2	8697	4373	5624	27,9	27,8	11,7
R-3A2	8687	4383	5577	28,2	28,6	11,6
R-3B2	8845	4474	5706	28,9	29,1	12,0
Průměr [GPa]				28,1	28,4	11,7
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,57	0,82	0,23
Variační koeficient [%]				2,0	2,9	1,9



**Beton 0/1****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0/1-1A	99,6	100,1	1719,8	2205
0/1-1B	99,6	100,6	1734,6	2211
0/1-2A	99,7	100,0	1729,8	2217
0/1-2B	99,5	100,7	1737,2	2216
0/1-3A	99,6	100,2	1746,6	2238
0/1-3B	99,5	100,7	1735,1	2217
0/1-1A1	74,1	74,9	720,3	2227
0/1-1B1	74,2	76,4	734,9	2227
0/1-2A1	74,2	77,3	737,2	2209
0/1-2B1	74,2	75,5	726,1	2226
0/1-3A1	74,1	75,6	726,4	2225
0/1-3B1	74,2	75,6	724,0	2217
0/1-1A2	74,2	203,3	1957,0	2228
0/1-1B2	74,1	203,4	1965,1	2239
0/1-2A2	74,2	203,7	1958,3	2224
0/1-2B2	74,2	204,1	1961,2	2225
0/1-3A2	74,1	203,6	1946,9	2215
0/1-3B2	74,1	204,0	1967,6	2236

**Pevnost v tlaku**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
0/1-1A	238,0	30,6	0/1-1A1	129,2	29,3
0/1-1B	255,1	32,7	0/1-1B1	123,0	26,9
0/1-2A	262,1	33,6	0/1-2A1	139,1	29,7
0/1-2B	247,9	31,9	0/1-2B1	127,5	28,5
0/1-3A	240,6	30,9	0/1-3A1	131,9	29,3
0/1-3B	244,5	31,5	0/1-3B1	144,6	32,2
Průměr		31,8	Průměr		29,3
Výb. sm. odch. [GPa]		1,1	Výb. sm. odch. [GPa]		1,7
Var. koef. [%]		3,6	Var. koef. [%]		6,0

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
0/1-1A2	25,2	0,86	0,87	0,88
0/1-1B2	24,7	0,82	0,85	0,85
0/1-2A2	26,2	0,86	0,88	0,89
0/1-2B2	25,9	0,86	0,90	0,89
0/1-3A2	24,6	0,84	0,87	0,87
0/1-3B2	25,4	0,82	0,87	0,84
Průměr	25,3	0,84	0,87	0,87
Výb. sm. odch.	0,64			
Var. koef. [%]	2,52			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
0/1-1A2	53,0	53,5	53,2	53,2	3837	3801	3822	3820	29,3
0/1-1B2	52,6	52,0	52,9	52,5	3868	3912	3846	3875	30,3
0/1-2A2	52,0	52,6	52,4	52,3	3917	3872	3887	3892	30,3
0/1-2B2	52,7	52,7	52,5	52,6	3873	3873	3887	3877	30,1
0/1-3A2	53,4	53,3	52,8	53,2	3813	3820	3856	3829	29,2
0/1-3B2	52,4	51,9	51,9	52,1	3893	3930	3930	3918	30,9
Průměr [GPa]									30,0
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,65
Variační koeficient [%]									2,2

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
0/1-1A2	8877	4431	5699	29,0	28,5	12,0
0/1-1B2	8845	4447	5672	29,0	29,0	11,9
0/1-2A2	8985	4490	5775	29,8	29,4	12,3
0/1-2B2	8803	4442	5734	28,7	29,1	12,2
0/1-3A2	8781	4404	5665	28,3	28,2	11,8
0/1-3B2	8877	4523	5768	29,3	30,3	12,4
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 0/2****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	M [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0/2-1A	99,6	102,8	1807,1	2255
0/2-1B	99,7	101,4	1804,0	2280
0/2-2A	99,7	101,6	1800,8	2268
0/2-2B	99,6	102,1	1800,9	2264
0/2-3A	99,7	101,0	1792,4	2272
0/2-3B	99,7	101,0	1776,6	2253
0/2-1A1	75,2	77,1	782,9	2285
0/2-1B1	75,2	76,8	780,1	2289
0/2-2A1	75,2	76,5	778,8	2291
0/2-2B1	72,7	76,5	779,2	2458
0/2-3A1	75,2	77,3	783,1	2280
0/2-3B1	75,0	77,2	780,5	2290
0/2-1A2	75,2	201,1	2079,9	2326
0/2-1B2	75,3	200,8	2075,2	2324
0/2-2A2	75,3	200,4	2065,8	2316
0/2-2B2	75,2	201,2	2094,9	2345
0/2-3A2	75,3	200,5	2091,5	2343
0/2-3B2	75,2	201,0	2065,5	2313
0/2-4	75,2	49,6	511,1	2318
0/2-1C	75,2	147,6	1495,6	2283
0/2-1D	75,2	147,6	1494,1	2280
0/2-2C	75,2	148,2	1490,5	2266
0/2-2D	75,2	147,7	1496,4	2280
0/2-3C	75,2	148,5	1491,7	2262
0/2-3D	75,2	147,9	1492,3	2270

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
0/2-1A	387,5	49,7	0/2-1A1	223,8	50,4
0/2-1B	396,3	50,8	0/2-1B1	228,4	51,5
0/2-2A	396,5	50,7	0/2-2A1	228,6	51,4
0/2-2B	403,5	51,8	0/2-2B1	228,5	55,1
0/2-3A	393,9	50,4	0/2-3A1	218,3	49,1
0/2-3B	370,7	47,5	0/2-3B1	224,3	50,8
Průměr		50,2	Průměr		51,4
Výb. sm. odch. [GPa]		1,5	Výb. sm. odch. [GPa]		2,0
Var. koef. [%]		2,9	Var. koef. [%]		3,9

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
0/2-1C	31,6	0,85	0,78	0,78
0/2-1D	30,5	0,84	0,74	0,73
0/2-2C	29,7	0,80	0,75	0,74
0/2-2D	31,3	0,85	0,76	0,76
0/2-3C	31,2	0,88	0,75	0,75
0/2-3D	27,9	0,78	0,71	0,71
Průměr	30,4	0,83	0,75	0,74
Výb. sm. odch.	1,39			
Var. koef. [%]	4,57			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
0/2-1C	34,7	34,7	34,7	34,7	4253	4253	4253	4253	37,2
0/2-1D	35,2	34,9	35,0	35,0	4193	4229	4217	4213	36,4
0/2-2C	34,9	34,9	34,7	34,8	4247	4247	4271	4255	36,9
0/2-2D	35,0	34,8	34,8	34,9	4221	4245	4245	4237	36,8
0/2-3C	35,1	35,8	35,7	35,5	4232	4149	4161	4181	35,6
0/2-3D	35,4	35,3	35,6	35,4	4179	4191	4156	4175	35,6
Průměr [GPa]									36,4
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,68
Variační koeficient [%]									1,9

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
0/2-1C	13327	8185	8711	35,3	35,6	15,1
0/2-1D	13247	8164	8591	34,9	35,3	14,7
0/2-2C	13099	8045	8488	34,2	34,7	14,3
0/2-2D	13293	8228	8636	35,2	36,0	14,8
0/2-3C	13110	8129	8517	34,3	35,7	14,5
0/2-3D	13008	8011	8503	33,6	34,2	14,4
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 0/3****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	M [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0/3-1A	99,7	101,7	1800,1	2266
0/3-1B	99,7	101,7	1807,0	2276
0/3-2A	99,7	100,9	1775,1	2255
0/3-2B	99,7	101,2	1779,1	2253
0/3-3A	99,7	101,7	1789,7	2253
0/3-3B	99,7	101,4	1786,7	2254
0/3-1A1	75,2	77,0	776,4	2271
0/3-1B1	75,2	77,0	774,3	2264
0/3-2A1	75,2	77,0	778,4	2274
0/3-2B1	75,3	77,1	777,9	2268
0/3-3A1	75,2	77,3	782,2	2276
0/3-3B1	75,2	77,2	780,5	2272
0/3-1A2	75,2	201,0	2087,9	2337
0/3-1B2	75,1	201,1	2071,7	2323
0/3-2A2	75,2	201,3	2068,7	2311
0/3-2B2	74,7	200,6	2005,2	2279
0/3-3A2	74,4	200,9	2003,9	2296
0/3-3B2	74,2	201,2	2022,0	2325
0/3-4	74,2	54,6	498,9	2114
0/3-1C	75,2	147,8	1491,6	2274
0/3-1D	75,1	148,2	1499,1	2281
0/3-2C	75,2	147,8	1488,0	2265
0/3-2D	75,3	147,6	1489,3	2266
0/3-3C	75,2	147,5	1496,4	2283
0/3-3D	75,4	148,5	1499,9	2263

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
0/3-1A	428,0	54,8	0/3-1A1	229,8	51,7
0/3-1B	421,3	54,0	0/3-1B1	232,4	52,3
0/3-2A	419,0	53,7	0/3-2A1	228,0	51,3
0/3-2B	386,5	49,5	0/3-2B1	225,8	50,7
0/3-3A	392,1	50,2	0/3-3A1	252,9	56,9
0/3-3B	410,0	52,5	0/3-3B1	251,4	56,5
Průměr		52,5	Průměr		53,3
Výb. sm. odch. [GPa]		2,2	Výb. sm. odch. [GPa]		2,7
Var. koef. [%]		4,1	Var. koef. [%]		5,1

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
0/3-1C	29,4	0,81	0,84	0,82
0/3-1D	31,3	0,86	0,90	0,87
0/3-2C	30	0,83	0,85	0,83
0/3-2D	31,5	0,86	0,90	0,87
0/3-3C	31,4	0,87	0,89	0,77
0/3-3D	31	0,85	0,90	0,87
Průměr	30,8	0,85	0,88	0,84
Výb. sm. odch.	0,86			
Var. Koef. [%]	2,81			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
0/3-1C	34,9	35,3	35,2	35,1	4236	4188	4200	4208	36,2
0/3-1D	35,2	35,1	35,5	35,3	4211	4223	4176	4204	36,3
0/3-2C	35,1	35,1	35,3	35,2	4211	4211	4187	4203	36,0
0/3-2D	34,8	35,0	34,8	34,9	4242	4218	4242	4234	36,6
0/3-3C	34,9	35,3	35,3	35,2	4227	4179	4179	4195	36,2
0/3-3D	35,2	35,2	35,0	35,1	4219	4219	4243	4227	36,4
Průměr [GPa]									36,3
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,20
Variační koeficient [%]									0,5

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
0/3-1C	13270	8228	8651	35,0	36,1	14,9
0/3-1D	13201	8178	8651	34,9	36,2	15,0
0/3-2C	13350	8242	8591	35,3	35,9	14,6
0/3-2D	13327	8278	8627	35,1	36,1	14,7
0/3-3C	13316	8778	8599	35,2	40,8	14,7
0/3-3D	13155	8143	8599	34,6	35,6	14,8
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 1/1****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1/1-1A	100,6	101,3	1832,9	2278
1/1-1B	100,8	101,3	1821,7	2256
1/1-2A	99,7	101,3	1802,9	2279
1/1-2B	99,6	102,0	1810,9	2280
1/1-3A	100,8	101,8	1846,6	2276
1/1-3B	100,8	102,4	1852,4	2269
1/1-1A1	75,2	77,2	778,9	2271
1/1-1B1	75,3	76,5	767,0	2250
1/1-2A1	75,2	76,1	769,9	2280
1/1-2B1	75,2	76,3	765,9	2262
1/1-3A1	75,1	76,2	766,0	2268
1/1-3B1	74,9	76,5	769,7	2286
1/1-1A2	75,1	202,3	2028,2	2262
1/1-1B2	75,1	202,2	2037,9	2273
1/1-2A2	75,1	202,3	2053,0	2289
1/1-2B2	75,1	201,7	2028,9	2269
1/1-3A2	75,2	202,2	2040,7	2276
1/1-3B2	75,2	201,9	2043,7	2279

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
1/1-1A	337,1	42,4	1/1-1A1	178,1	40,1
1/1-1B	325,8	40,9	1/1-1B1	171,9	38,6
1/1-2A	325,5	41,7	1/1-2A1	175,5	39,5
1/1-2B	318,5	40,9	1/1-2B1	181,5	40,9
1/1-3A	342,5	43,0	1/1-3A1	169,6	38,2
1/1-3B	337,5	42,3	1/1-3B1	181,1	41,1
Průměr		41,9	Průměr		39,8
Výb. sm. odch. [GPa]		0,9	Výb. sm. odch. [GPa]		1,2
Var. koef. [%]		2,0	Var. koef. [%]		3,0

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
1/1-1A2	25,4	0,80	0,85	0,84
1/1-1B2	26,5	0,83	0,87	0,86
1/1-2A2	27,4	0,84	0,87	0,85
1/1-2B2	27,2	0,86	0,89	0,88
1/1-3A2	25,9	0,81	0,85	0,85
1/1-3B2	26,1	0,83	0,86	0,85
Průměr	26,4	0,83	0,86	0,85
Výb. sm. odch.	0,77			
Var. Koef. [%]	2,93			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
1/1-1A2	51,2	51,4	51,2	51,3	3952	3936	3952	3946	31,7
1/1-1B2	51,3	51,1	51,2	51,2	3942	3957	3950	3950	31,9
1/1-2A2	51,0	50,9	50,8	50,9	3967	3974	3982	3974	32,5
1/1-2B2	51,3	51,2	50,9	51,1	3932	3940	3963	3945	31,8
1/1-3A2	51,0	51,1	51,3	51,1	3964	3957	3941	3954	32,0
1/1-3B2	51,4	51,4	51,8	51,5	3928	3928	3898	3918	31,5
Průměr [GPa]									31,9
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,36
Variační koeficient [%]									1,1

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
1/1-1A2	8986	4605	5850	29,9	30,4	12,7
1/1-1B2	9060	4626	5902	30,5	30,7	13,0
1/1-2A2	9180	4725	5957	31,6	32,3	13,3
1/1-2B2	9122	4669	5913	30,7	30,9	12,9
1/1-3A2	9034	4610	5862	30,4	30,5	12,8
1/1-3B2	9025	4630	5919	30,3	30,6	13,0
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8



**Beton 1/2****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1/2-1A	99,6	99,9	1799,9	2311
1/2-1B	99,8	100,1	1801,4	2301
1/2-2A	99,8	100,3	1802,4	2298
1/2-2B	99,7	100,3	1800,9	2298
1/2-3A	99,6	99,7	1784,1	2296
1/2-3B	99,7	99,7	1783,4	2290
1/2-1A1	73,9	76,5	753,2	2294
1/2-1B1	73,9	76,4	751,4	2293
1/2-2A1	73,8	76,5	750,7	2292
1/2-2B1	74,0	76,5	756,9	2303
1/2-3A1	73,9	76,2	754,9	2310
1/2-3B1	74,0	76,1	754,0	2305
1/2-1A2	73,9	200,9	1963,6	2278
1/2-1B2	73,9	200,4	1970,7	2292
1/2-2A2	74,0	201,1	1992,9	2303
1/2-2B2	73,9	201,4	1988,8	2304
1/2-3A2	73,9	200,9	1982,0	2301
1/2-3B2	73,9	202,8	1998,5	2299

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
1/2-1A	337,7	43,3	1/2-1A1	183,0	42,6
1/2-1B	339,4	43,4	1/2-1B1	205,0	47,8
1/2-2A	339,9	43,5	1/2-2A1	194,4	45,4
1/2-2B	313,8	40,2	1/2-2B1	165,6	38,5
1/2-3A	339,4	43,6	1/2-3A1	181,2	42,3
1/2-3B	281,1	36,0	1/2-3B1	175,4	40,8
Průměr		41,7	Průměr		42,9
Výb. sm. odch. [GPa]		3,1	Výb. sm. odch. [GPa]		3,3
Var. koef. [%]		7,4	Var. koef. [%]		7,7

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
1/2-1A2	27,8	0,85	0,90	0,86
1/2-1B2	27,7	0,83	0,88	0,83
1/2-2A2	27,4	0,79	0,86	0,84
1/2-2B2	26,5	0,80	0,88	0,89
1/2-3A2	27,7	0,82	0,87	0,84
1/2-3B2	28,7	0,86	0,91	0,91
Průměr	27,6	0,82	0,89	0,87
Výb. sm. odch.	0,71			
Var. koef. [%]	2,57			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
1/2-1A2	50,3	50,6	50,1	50,3	3994	3970	4010	3991	32,7
1/2-1B2	49,8	49,7	49,9	49,8	4024	4033	4016	4025	33,4
1/2-2A2	48,9	49,6	49,0	49,2	4113	4055	4105	4091	34,7
1/2-2B2	50,2	50,1	50,4	50,2	4012	4020	3996	4009	33,3
1/2-3A2	49,7	50,1	49,7	49,8	4043	4011	4043	4032	33,7
1/2-3B2	50,6	50,5	50,5	50,5	4007	4015	4015	4013	33,3
Průměr [GPa]									33,5
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,67
Variační koeficient [%]									2,0

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
1/2-1A2	9146	4715	5937	30,8	32,2	13,0
1/2-1B2	9230	4798	6029	31,4	33,2	13,4
1/2-2A2	9233	4709	6029	31,8	32,5	13,5
1/2-2B2	8970	4482	5847	30,1	29,7	12,8
1/2-3A2	9248	4733	6014	31,8	32,8	13,4
1/2-3B2	9128	4548	5993	31,5	31,4	13,6
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 1/3****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1/3-1A	99,8	99,6	1779,3	2283
1/3-1B	99,7	99,8	1782,9	2288
1/3-2A	99,9	100,4	1780,3	2264
1/3-2B	99,8	99,8	1775,8	2276
1/3-3A	99,8	99,7	1766,6	2265
1/3-3B	99,8	100,0	1763,6	2253
1/3-1A1	74,0	76,0	749,7	2293
1/3-1B1	73,9	76,4	753,0	2297
1/3-2A1	73,9	76,3	747,1	2286
1/3-2B1	73,8	76,3	742,8	2272
1/3-3A1	74,1	76,3	746,7	2271
1/3-3B1	74,0	76,5	748,9	2275
1/3-1A2	73,9	201,4	1971,2	2282
1/3-1B2	73,9	201,2	1965,8	2276
1/3-2A2	74,0	200,6	1963,8	2276
1/3-2B2	74,0	200,9	1967,9	2279
1/3-3A2	74,0	200,1	1951,0	2269
1/3-3B2	74,2	200,6	1950,0	2246

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
1/3-1A	395,0	50,5	1/3-1A1	195,2	45,4
1/3-1B	386,4	49,5	1/3-1B1	222,6	51,9
1/3-2A	371,6	47,4	1/3-2A1	197,6	46,1
1/3-2B	391,7	50,1	1/3-2B1	230,6	53,8
1/3-3A	397,3	50,8	1/3-3A1	199,9	46,4
1/3-3B	281,1	36,0	1/3-3B1	214,2	49,8
Průměr		47,4	Průměr		48,9
Výb. sm. odch. [GPa]		5,7	Výb. sm. odch. [GPa]		3,5
Var. koef. [%]		12,0	Var. koef. [%]		7,1

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
1/3-1A2	29,5	0,82	0,88	0,84
1/3-1B2	29,5	0,83	0,89	0,85
1/3-2A2	29,3	0,82	0,88	0,85
1/3-2B2	27,4	0,79	0,83	0,82
1/3-3A2	27,7	0,79	0,87	0,85
1/3-3B2	28	0,83	0,87	0,83
Průměr	28,6	0,81	0,87	0,84
Výb. sm. odch.	0,97			
Var. koef. [%]	3,4			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
1/3-1A2	48,1	48,2	48,1	48,1	4187	4179	4187	4184	36,0
1/3-1B2	48,3	48,5	48,3	48,4	4166	4149	4166	4161	35,5
1/3-2A2	48,1	48,2	47,4	47,9	4171	4162	4232	4189	35,9
1/3-2B2	49,2	48,9	48,8	49,0	4083	4108	4116	4102	34,5
1/3-3A2	48,6	48,2	48,1	48,3	4116	4151	4159	4142	35,0
1/3-3B2	49,2	48,8	49,4	49,1	4077	4111	4061	4083	33,7
Průměr [GPa]									35,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,88
Variační koeficient [%]									2,5

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
1/3-1A2	9540	4900	6175	33,7	35,2	14,1
1/3-1B2	9507	4873	6178	33,3	34,6	14,1
1/3-2A2	9546	4897	6172	33,4	34,4	14,0
1/3-2B2	9453	4810	6095	32,9	33,4	13,7
1/3-3A2	9370	4810	6059	31,9	32,7	13,3
1/3-3B2	9447	4888	6133	32,3	33,6	13,6
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 2/2****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
2/2-1A	99,7	99,7	1783,6	2292
2/2-1B	99,7	99,5	1752,6	2256
2/2-2A	99,7	99,7	1758,7	2262
2/2-2B	99,7	99,9	1762,6	2262
2/2-3A	99,5	100,2	1763,1	2264
2/2-3B	99,6	99,7	1752,5	2258
2/2-1A1	73,9	76,4	742,2	2264
2/2-1B1	73,9	76,5	748,2	2279
2/2-2A1	74,0	76,4	742,5	2261
2/2-2B1	73,9	76,1	746,1	2284
2/2-3A1	73,8	76,2	732,8	2249
2/2-3B1	73,8	75,4	730,8	2264
2/2-1A2	74,0	200,7	1935,7	2245
2/2-1B2	73,9	201,9	1946,7	2249
2/2-2A2	73,8	200,2	1921,1	2241
2/2-2B2	73,9	202,0	1944,4	2247
2/2-3A2	73,8	200,0	1933,5	2260
2/2-3B2	73,8	201,7	1942,0	2248

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
2/2-1A	358,4	45,9	2/2-1A1	197,4	46,0
2/2-1B	334,1	42,8	2/2-1B1	206,7	48,1
2/2-2A	340,1	43,6	2/2-2A1	181,5	42,2
2/2-2B	329,3	42,2	2/2-2B1	179,5	41,8
2/2-3A	331,1	42,6	2/2-3A1	194,2	45,4
2/2-3B	305,1	39,2	2/2-3B1	211,3	49,3
Průměr		42,7	Průměr		45,5
Výb. sm. odch. [GPa]		2,2	Výb. sm. odch. [GPa]		3,0
Var. koef. [%]		5,1	Var. koef. [%]		6,7

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
2/2-1A2	27,6	0,82	0,88	0,87
2/2-1B2	26,1	0,79	0,83	0,80
2/2-2A2	28	0,84	0,90	0,88
2/2-2B2	28,1	0,86	0,90	0,91
2/2-3A2	27,7	0,82	0,87	0,85
2/2-3B2	27,3	0,82	0,89	0,85
Průměr	27,5	0,82	0,88	0,86
Výb. sm. odch.	0,73			
Var. Koef. [%]	2,7			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
2/2-1A2	48,9	49,3	49,2	49,1	4103	4070	4078	4084	33,7
2/2-1B2	49,8	49,9	50,1	49,9	4054	4046	4030	4043	33,1
2/2-2A2	49,3	49,4	49,3	49,3	4060	4052	4060	4057	33,2
2/2-2B2	50,3	50,1	49,9	50,1	4015	4031	4047	4031	32,9
2/2-3A2	49,2	49,2	48,8	49,1	4065	4065	4098	4076	33,8
2/2-3B2	49,4	50,1	50,0	49,8	4083	4026	4034	4047	33,1
Průměr [GPa]									33,3
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,36
Variační koeficient [%]									1,1

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
2/2-1A2	9289	4721	6029	31,2	31,6	13,1
2/2-1B2	9274	4724	6023	31,5	32,6	13,3
2/2-2A2	9319	4756	6026	31,2	31,8	13,0
2/2-2B2	9209	4604	5975	31,1	31,0	13,1
2/2-3A2	9391	4792	6089	31,9	32,5	13,4
2/2-3B2	9170	4688	5963	30,8	31,9	13,0
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton 2/3****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
2/3-1A	99,6	99,9	1787,1	2298
2/3-1B	99,5	100,1	1786,8	2293
2/3-2A	99,8	100,5	1774,8	2259
2/3-2B	99,6	100,4	1772,6	2265
2/3-3A	100,8	100,5	1820,3	2272
2/3-3B	100,8	100,5	1827,2	2278
2/3-1A1	73,9	76,3	750,8	2291
2/3-1B1	74,0	76,4	750,0	2285
2/3-2A1	73,9	76,4	747,7	2283
2/3-2B1	74,0	76,4	740,7	2255
2/3-3A1	73,9	76,3	746,9	2282
2/3-3B1	73,9	76,3	740,6	2264
2/3-1A2	73,8	201,9	1976,8	2289
2/3-1B2	73,9	200,6	1960,4	2277
2/3-2A2	73,8	201,4	1950,1	2263
2/3-2B2	73,9	200,9	1945,5	2255
2/3-3A2	73,7	202,3	1970,4	2280
2/3-3B2	73,8	200,9	1944,5	2260

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
2/3-1A	323,7	41,6	2/3-1A1	236,7	55,1
2/3-1B	342,7	44,0	2/3-1B1	228,3	53,1
2/3-2A	348,8	44,6	2/3-2A1	224,3	52,3
2/3-2B	347,9	44,6	2/3-2B1	224,5	52,2
2/3-3A	350,8	44,0	2/3-3A1	227,6	53,0
2/3-3B	373,6	46,8	2/3-3B1	216,8	50,6
Průměr		44,3	Průměr		52,7
Výb. sm. odch. [GPa]		1,7	Výb. sm. odch. [GPa]		1,5
Var. koef. [%]		3,8	Var. koef. [%]		2,8

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
2/3-1A2	29,7	0,82	0,86	0,83
2/3-1B2	29,8	0,82	0,88	0,85
2/3-2A2	27,9	0,79	0,87	0,84
2/3-2B2	27,7	0,82	0,87	0,83
2/3-3A2	28,5	0,82	0,87	0,84
2/3-3B2	27,9	0,81	0,89	0,86
Průměr	28,6	0,81	0,87	0,84
Výb. sm. odch.	0,94			
Var. Koef. [%]	3,3			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
2/3-1A2	48,4	47,7	48,4	48,2	4171	4232	4171	4191	36,2
2/3-1B2	47,6	47,8	47,3	47,6	4214	4197	4241	4218	36,5
2/3-2A2	48,3	48,8	48,4	48,5	4170	4127	4161	4153	35,1
2/3-2B2	49,1	49,1	49,3	49,2	4092	4092	4076	4087	33,9
2/3-3A2	49,1	49,2	49,4	49,2	4121	4113	4096	4110	34,7
2/3-3B2	48,8	48,6	48,8	48,7	4116	4133	4116	4122	34,6
Průměr [GPa]									35,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									1,00
Variační koeficient [%]									2,8

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
2/3-1A2	9614	4917	6288	34,5	36,0	14,8
2/3-1B2	9617	4944	6247	33,9	35,2	14,3
2/3-2A2	9358	4783	6059	32,2	33,3	13,5
2/3-2B2	9334	4837	6083	31,7	33,5	13,5
2/3-3A2	9364	4765	6032	32,7	34,0	13,6
2/3-3B2	9260	4753	5990	31,3	32,5	13,1
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8



**Beton P 2/2****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P2/2-1A	103,1	99,6	1815,8	2181
P2/2-1B	103,2	99,6	1815,2	2178
P2/2-2A	103,3	100,2	1870,1	2227
P2/2-2B	103,3	98,7	1839,4	2223
P2/2-3A	103,3	100,2	1889,0	2252
P2/2-3B	103,3	99,8	1864,5	2229
P2/2-1A1	74,1	75,0	706,4	2185
P2/2-1B1	74,2	76,0	719,0	2188
P2/2-2A1	74,2	75,1	743,0	2288
P2/2-2B1	74,2	74,9	734,9	2269
P2/2-3A1	74,3	75,1	723,6	2223
P2/2-3B1	74,3	74,8	719,2	2219
P2/2-1A2	74,1	199,4	1897,6	2206
P2/2-1B2	74,2	199,6	1896,4	2198
P2/2-2A2	74,2	198,5	1945,0	2268
P2/2-2B2	74,2	199,2	1935,3	2248
P2/2-3A2	74,2	199,4	1930,1	2236
P2/2-3B2	74,2	200,6	1936,5	2232

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
P2/2-1A	400,0	47,9	P2/2-1A1	190,3	44,1
P2/2-1B	366,7	43,8	P2/2-1B1	190,6	44,0
P2/2-2A	393,9	47,0	P2/2-2A1	226,8	52,4
P2/2-2B	392,6	46,8	P2/2-2B1	225,7	52,2
P2/2-3A	447,2	53,4	P2/2-3A1	222,9	51,5
P2/2-3B	433,7	51,8	P2/2-3B1	212,2	49,0
Průměr		48,4	Průměr		48,9
Výb. sm. odch. [GPa]		3,5	Výb. sm. odch. [GPa]		3,9
Var. koef. [%]		7,3	Var. koef. [%]		8,0

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
P2/2-1A2	27,9	0,81	0,88	0,86
P2/2-1B2	27,9	0,85	0,89	0,85
P2/2-2A2	30	0,86	0,90	0,87
P2/2-2B2	28,5	0,82	0,86	0,83
P2/2-3A2	29,9	0,86	0,91	0,90
P2/2-3B2	28,4	0,83	0,87	0,84
Průměr	28,8	0,84	0,89	0,86
Výb. sm. odch.	0,95			
Var. koef. [%]	3,3			

**Ultrazvuková metoda**

Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
P2/2-1A2	47,9	47,8	47,9	47,9	4163	4171	4163	4166	34,5
P2/2-1B2	48,9	48,9	49,0	48,9	4083	4083	4074	4080	32,9
P2/2-2A2	48,1	48,2	47,9	48,1	4128	4119	4145	4130	34,8
P2/2-2B2	47,8	47,9	48,1	47,9	4167	4159	4141	4156	34,9
P2/2-3A2	47,9	47,8	48,0	47,9	4162	4171	4153	4162	34,9
P2/2-3B2	48,5	49,0	48,3	48,6	4136	4094	4153	4128	34,2
Průměr [GPa]									34,4
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,76
Variační koeficient [%]									2,2

**Rezonanční metoda**

Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
P2/2-1A2	9489	4906	6153	31,6	32,6	13,3
P2/2-1B2	9470	4925	6189	31,4	32,8	13,4
P2/2-2A2	9672	5016	6318	33,5	34,4	14,3
P2/2-2B2	9617	4998	6263	33,0	34,2	14,0
P2/2-3A2	9599	4925	6226	32,8	33,1	13,8
P2/2-3B2	9525	4906	6226	32,6	33,7	13,9
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

**Beton P2/3****Rozměry, hmotnost, objemová hmotnost**

Ozn.	$\phi d$ [mm]	$\phi L$ [mm]	m[g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
P2/3-1A	103,3	100,2	1898,4	2262
P2/3-1B	103,3	100,5	1901,7	2256
P2/3-2A	103,2	99,7	1889,7	2265
P2/3-2B	103,3	100,3	1900,0	2261
P2/3-3A	103,3	100,1	1888,4	2252
P2/3-3B	103,3	99,9	1894,0	2263
P2/3-1A1	74,2	74,9	734,3	2267
P2/3-1B1	74,2	75,1	735,5	2267
P2/3-2A1	74,2	75,4	740,4	2272
P2/3-2B1	74,2	74,9	739,6	2282
P2/3-3A1	74,3	74,9	731,7	2254
P2/3-3B1	74,2	75,3	735,6	2259
P2/3-1A2	74,2	199,0	1948,3	2261
P2/3-1B2	74,2	198,3	1950,6	2276
P2/3-2A2	74,2	199,2	1948,6	2260
P2/3-2B2	74,2	199,3	1954,0	2266
P2/3-3A2	74,2	199,4	1952,3	2262
P2/3-3B2	74,2	197,8	1931,3	2257

**Pevnost**

$\phi 100$ mm			$\phi 75$ mm		
Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]	Ozn.	$F_{max}$ [N]	$f_c$ [MPa]
P2/2-1A	508,8	60,7	P2/2-1A1	252,8	58,5
P2/2-1B	456,5	54,5	P2/2-1B1	276,7	64,0
P2/2-2A	464,1	55,4	P2/2-2A1	271,5	62,8
P2/2-2B	467,6	55,8	P2/2-2B1	254,5	58,8
P2/2-3A	465,4	55,5	P2/2-3A1	239,1	55,2
P2/2-3B	462,8	55,2	P2/2-3B1	245,9	56,8
Průměr		56,2	Průměr		59,3
Výb. sm. odch. [GPa]		2,3	Výb. sm. odch. [GPa]		3,4
Var. koef. [%]		4,0	Var. koef. [%]		5,8

**Statický modul pružnosti v tlaku**

Ozn.	$E_{c,s}$ [MPa]	$k_u$	$k_{rL}$	$k_{rf}$
P2/3-1A2	28,4	0,79	0,84	0,83
P2/3-1B2	29,1	0,83	0,86	0,84
P2/3-2A2	29	0,83	0,89	0,84
P2/3-2B2	28,3	0,84	0,86	0,84
P2/3-3A2	27,6	0,80	0,85	0,83
P2/3-3B2	28	0,80	0,86	0,84
Průměr	28,4	0,82	0,86	0,84
Výb. sm. odch.	0,58			
Var. koef. [%]	2,0			

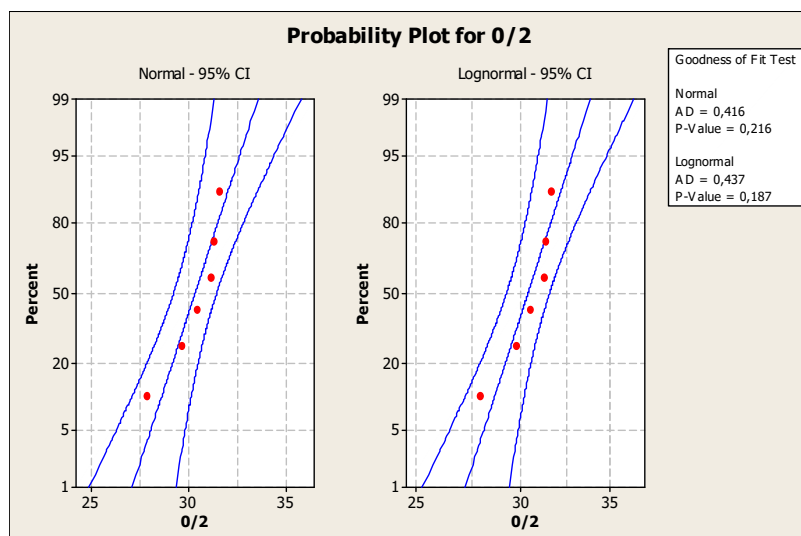
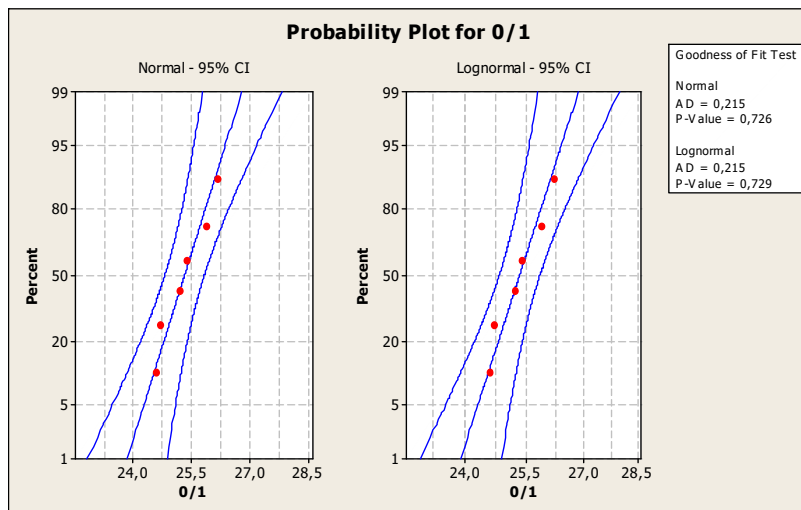
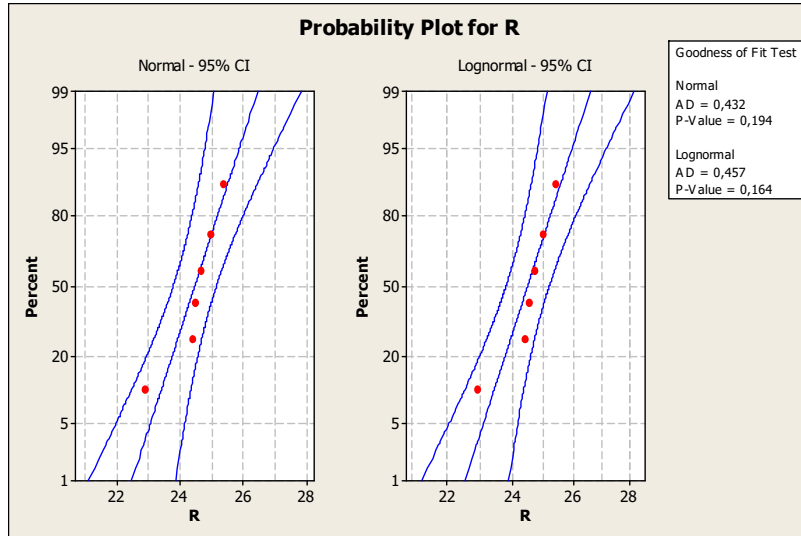
### Ultrazuková metoda

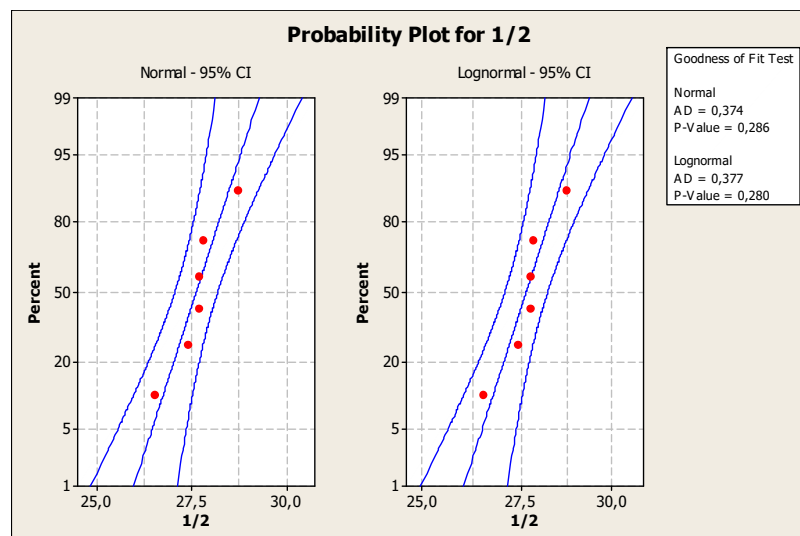
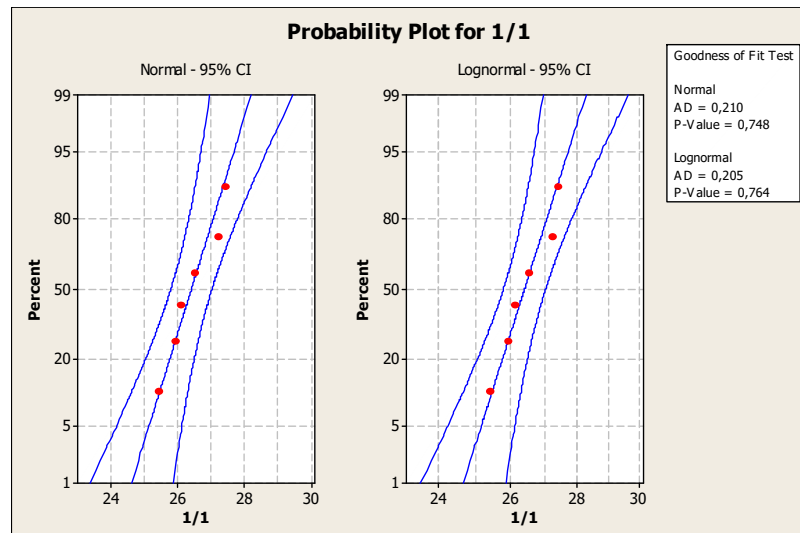
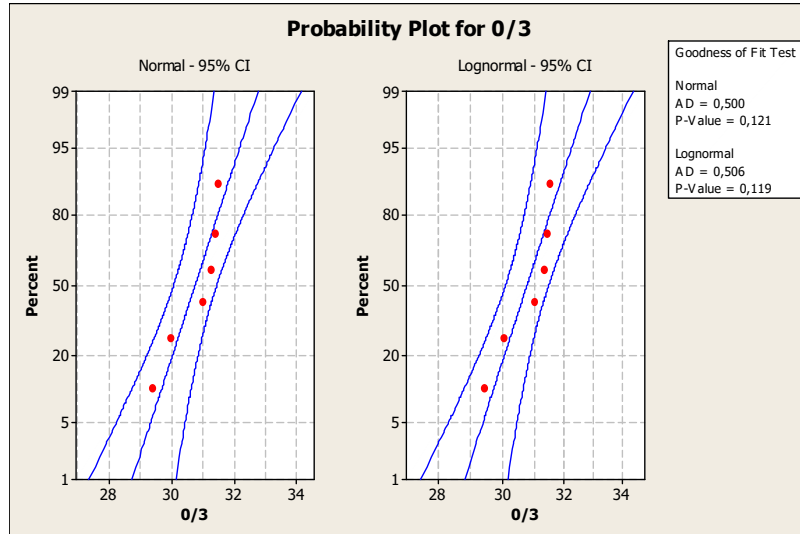
Ozn.	$T_1$ [ $\mu$ s]	$T_2$ [ $\mu$ s]	$T_3$ [ $\mu$ s]	$\phi T$ [ $\mu$ s]	$v_{L1}$ [m/s]	$v_{L2}$ [m/s]	$v_{L3}$ [m/s]	$\phi v_L$ [m/s]	$E_{cu}$ [GPa]
P2/3-1A2	47,9	46,9	47,5	47,4	4155	4244	4190	4196	35,8
P2/3-1B2	47,7	47,9	48,0	47,9	4158	4141	4132	4144	35,2
P2/3-2A2	48,1	48,1	48,1	48,1	4142	4142	4142	4142	34,9
P2/3-2B2	49,0	48,9	49,0	49,0	4068	4076	4068	4070	33,8
P2/3-3A2	48,2	48,7	48,7	48,5	4136	4094	4094	4108	34,3
P2/3-3B2	47,7	47,9	47,3	47,6	4147	4130	4182	4153	35,0
Průměr [GPa]									34,8
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]									0,71
Variační koeficient [%]									2,0

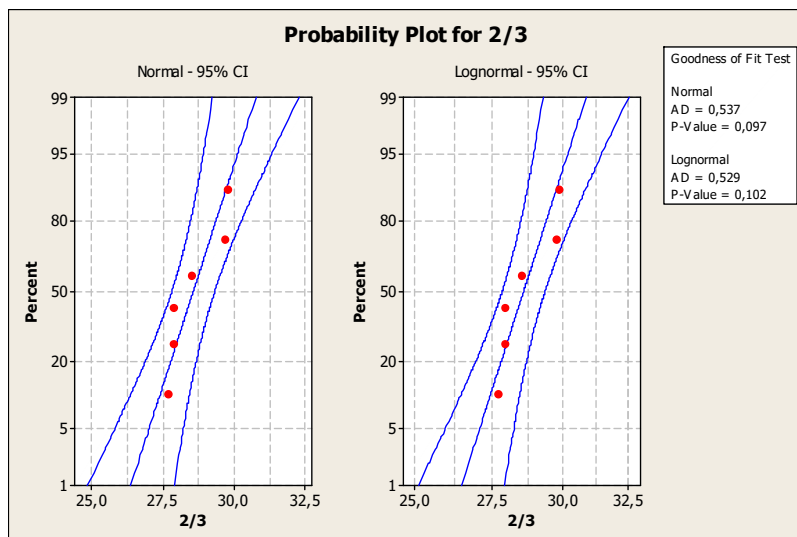
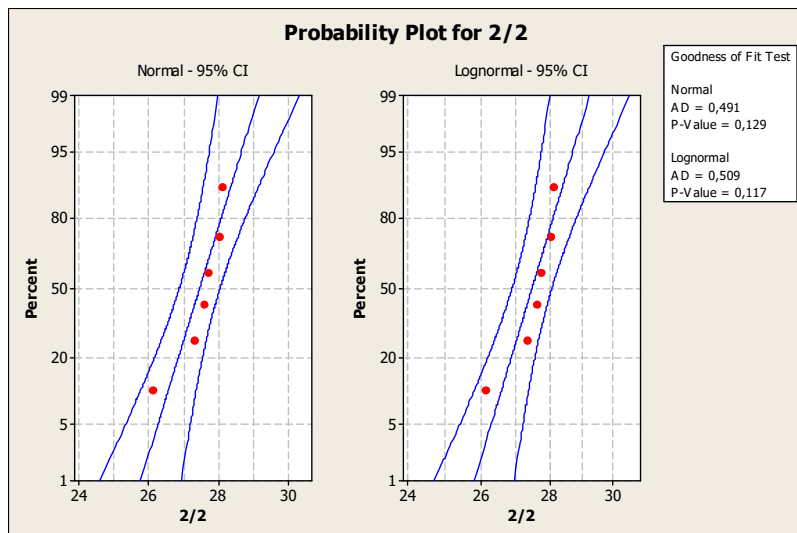
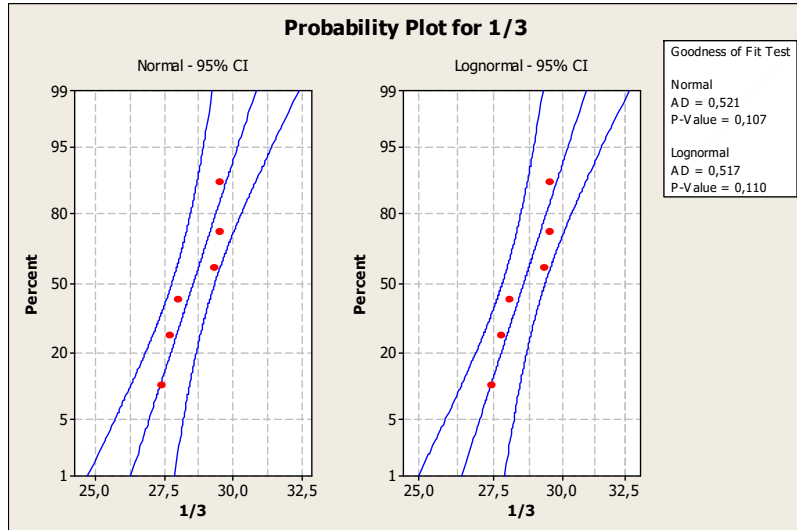
### Rezonanční metoda

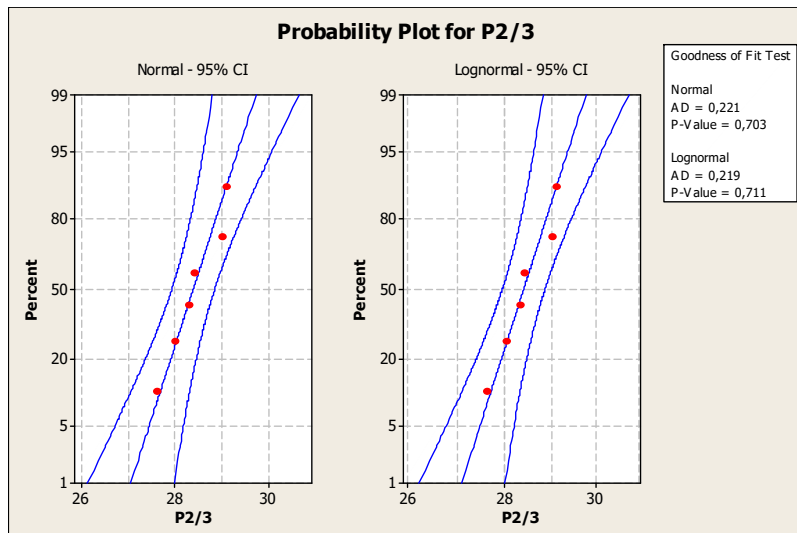
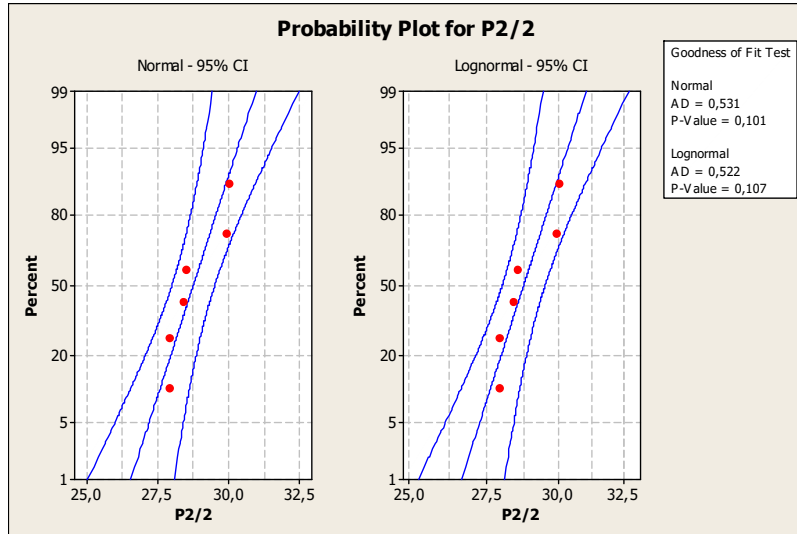
Ozn.	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G$ [GPa]
P2/3-1A2	9690	4980	6281	33,6	34,0	14,1
P2/3-1B2	9745	5053	6318	34,0	34,8	14,3
P2/3-2A2	9544	4998	6244	32,7	34,4	14,0
P2/3-2B2	9544	4925	6226	32,8	33,5	14,0
P2/3-3A2	9489	4906	6189	32,4	33,2	13,8
P2/3-3B2	9599	4998	6263	32,6	33,4	13,9
Průměr [GPa]				29,0	29,1	12,1
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]				0,46	0,66	0,21
Variační koeficient [%]				1,6	2,3	1,8

### Výsledky testů logaritmicko-normálního rozdělení











## Výpočet charakteristické hodnoty

### Beton R

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	24,5	24,5	$m_v$ [GPa]	10,1	10,1
$s_x$ [GPa]	0,86	0,86	$s_v$ [GPa]	0,04	0,04
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	23,0	19,1	$E_k$ [GPa]	23,0	22,6
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	24,5		$\mu$ [GPa]	24,5	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	23,1		$E_k$ [GPa]	23,1	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n),is}$ [GPa]	24,5		$E_{m(n),is}$ [GPa]	24,5	
$E_{c,is,neimenší}$ [GPa]	22,9		$E_{c,is,neimenší}$ [GPa]	22,9	
s [GPa]	0,86		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	18,5		$E_{k,1}$ [GPa]	17,5	
$E_{k,2}$ [GPa]	26,9		$E_{k,2}$ [GPa]	26,9	
$E_k$ [GPa]	18,5		$E_k$ [GPa]	17,5	

### Beton 0/1

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	25,3	25,3	$m_v$ [GPa]	10,1	10,1
$s_x$ [GPa]	0,64	0,64	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	24,2	19,8	$E_k$ [GPa]	24,2	24,0
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	25,3		$\mu$ [GPa]	25,3	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	24,3		$E_k$ [GPa]	24,3	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n),is}$ [GPa]	25,3		$E_{m(n),is}$ [GPa]	25,3	
$E_{c,is,neimenší}$ [GPa]	24,6		$E_{c,is,neimenší}$ [GPa]	24,6	
s [GPa]	0,64		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	20,9		$E_{k,1}$ [GPa]	18,3	
$E_{k,2}$ [GPa]	28,6		$E_{k,2}$ [GPa]	28,6	
$E_k$ [GPa]	20,9		$E_k$ [GPa]	18,3	

## Beton 1/1

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	26,4	26,4	$m_v$ [GPa]	3,3	3,3
$s_x$ [GPa]	0,77	0,77	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	25,0	0,0	$E_k$ [GPa]	25,1	24,8
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	26,4		$\mu$ [GPa]	26,4	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	25,1		$E_k$ [GPa]	25,2	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	26,4		$E_{m(n).is}$ [GPa]	26,4	
$E_{c.is.neimenší}$ [GPa]	25,40		$E_{c.is.neimenší}$ [GPa]	25,4	
s [GPa]	0,77		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	21,0		$E_{k,1}$ [GPa]	19,4	
$E_{k,2}$ [GPa]	29,4		$E_{k,2}$ [GPa]	29,4	
$E_k$ [GPa]	21,0		$E_k$ [GPa]	19,4	

## Beton 1/2

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	27,6	27,6	$m_v$ [GPa]	3,3	3,3
$s_x$ [GPa]	0,71	0,71	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	26,4	21,6	$E_k$ [GPa]	26,4	26,1
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	27,6		$\mu$ [GPa]	27,6	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	26,5		$E_k$ [GPa]	26,5	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	27,6		$E_{m(n).is}$ [GPa]	27,6	
$E_{c.is.neimenší}$ [GPa]	26,50		$E_{c.is.neimenší}$ [GPa]	26,5	
s [GPa]	0,71		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	22,7		$E_{k,1}$ [GPa]	20,6	
$E_{k,2}$ [GPa]	30,5		$E_{k,2}$ [GPa]	30,5	
$E_k$ [GPa]	22,7		$E_k$ [GPa]	20,6	

## Beton 1/3

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	28,6	28,6	$m_v$ [GPa]	3,4	3,4
$s_x$ [GPa]	0,97	0,97	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	26,8	22,3	$E_k$ [GPa]	26,9	26,5
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	28,6		$\mu$ [GPa]	28,6	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	27,0		$E_k$ [GPa]	27,0	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,6		$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,6	
$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,40		$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,4	
s [GPa]	0,97		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	21,8		$E_{k,1}$ [GPa]	21,6	
$E_{k,2}$ [GPa]	31,4		$E_{k,2}$ [GPa]	31,4	
$E_k$ [GPa]	21,8		$E_k$ [GPa]	21,6	

## Beton 2/2

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	27,5	27,5	$m_v$ [GPa]	3,3	3,3
$s_x$ [GPa]	0,73	0,73	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	26,2	21,5	$E_k$ [GPa]	26,2	25,9
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	27,5		$\mu$ [GPa]	27,5	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	26,3		$E_k$ [GPa]	26,3	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	27,5		$E_{m(n).is}$ [GPa]	27,5	
$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	26,10		$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	26,1	
s [GPa]	0,73		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	22,4		$E_{k,1}$ [GPa]	20,5	
$E_{k,2}$ [GPa]	30,1		$E_{k,2}$ [GPa]	30,1	
$E_k$ [GPa]	22,4		$E_k$ [GPa]	20,5	

## Beton 2/3

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	28,6	28,6	$m_v$ [GPa]	3,4	3,4
$s_x$ [GPa]	0,94	0,94	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	26,9	22,4	$E_k$ [GPa]	27,0	26,6
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	28,6		$\mu$ [GPa]	28,6	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	27,0		$E_k$ [GPa]	27,1	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,6		$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,6	
$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,70		$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,7	
s [GPa]	0,94		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	22,0		$E_{k,1}$ [GPa]	21,6	
$E_{k,2}$ [GPa]	31,7		$E_{k,2}$ [GPa]	31,7	
$E_k$ [GPa]	22,0		$E_k$ [GPa]	21,6	

## Beton P2/2

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	28,8	28,8	$m_v$ [GPa]	3,4	3,4
$s_x$ [GPa]	0,95	0,95	$s_v$ [GPa]	0,03	0,03
$V_x$ [%]	0,03	0,10	$V_v$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	27,1	22,5	$E_k$ [GPa]	27,1	26,8
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	28,8		$\mu$ [GPa]	28,8	
V [%]	0,03		V [%]	0,03	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	27,2		$E_k$ [GPa]	27,2	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,8		$E_{m(n).is}$ [GPa]	28,8	
$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,90		$E_{c.is.nejmenší}$ [GPa]	27,9	
s [GPa]	0,95		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	22,1		$E_{k,1}$ [GPa]	21,8	
$E_{k,2}$ [GPa]	31,9		$E_{k,2}$ [GPa]	31,9	
$E_k$ [GPa]	22,1		$E_k$ [GPa]	21,8	

## Beton P2/3

ČSN EN 1990					
Normální rozdělení			Log-normální		
	Vx známý	Vx neznámý		Vx známý	Vx neznámý
$m_x$ [GPa]	28,4	28,4	$m_y$ [GPa]	3,3	3,3
$s_x$ [GPa]	0,58	0,58	$s_y$ [GPa]	0,02	0,02
$V_x$ [%]	0,02	0,10	$V_y$ [%]		
kn	1,77	2,18	kn	1,77	2,18
$E_k$ [GPa]	27,4	22,2	$E_k$ [GPa]	27,4	27,2
ČSN ISO 13822					
$\mu$ [GPa]	28,4		$\mu$ [GPa]	28,4	
V [%]	0,02		V [%]	0,02	
k	1,64		k	1,64	
$E_k$ [GPa]	27,5		$E_k$ [GPa]	27,5	
ČSN EN 13791					
Metoda A			Metoda B		
$E_{m(n),is}$ [GPa]	28,4		$E_{m(n),is}$ [GPa]	28,4	
$E_{c,is,nejmenší}$ [GPa]	27,60		$E_{c,is,nejmenší}$ [GPa]	27,6	
s [GPa]	0,58		k	7	
$k_2$	1,48				
$E_{k,1}$ [GPa]	24,4		$E_{k,1}$ [GPa]	21,4	
$E_{k,2}$ [GPa]	31,6		$E_{k,2}$ [GPa]	31,6	
$E_k$ [GPa]	24,4		$E_k$ [GPa]	21,4	