



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**MODUL PRUŽNOSTI PROVZDUŠNĚNÝCH
A NEPROVZDUŠNĚNÝCH BETONŮ**

THE MODULUS OF ELASTICITY OF AIR-ENTRAINED AND NON-AIR-ENTRAINED CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleš Tichý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Aleš Tichý
Název	Modul pružnosti provzdušněných a neprovzdušněných betonů
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

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

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

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

Collepari, M.: Moderní beton.

Aïtcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.

Neville, A.M.: Properties of concrete.

Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Odborné tuzemské i zahraniční články pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206, ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN ISO 1920-10, řada ČSN EN 12390 a ČSN EN 12350.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: Rešerše pramenů – beton a jeho návrh, zejména s přihlédnutím k principu a důvodu provzdušnění, poté vlastnosti betonu, především modul pružnosti betonu v tlaku a pevnost betonu v tlaku. Dále popsat aspekty, které ovlivňují výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu s přihlédnutím k vlivu provzdušňovací přísady v čerstvém betonu. Popis použitých metod zkoušení modulu pružnosti betonu.

Praktická část: Zpracování plánu experimentu – ověření míry vlivu provzdušňovací přísady v receptuře čerstvého betonu na jeho výslednou hodnotu modulu pružnosti, a to jak dynamického, tak statického. Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody a poté zjištění statického modulu pružnosti betonu, to vše na jádrových vývrtech z betonových bloků. Vyhodnocení výsledků zkoušek, tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek a sepsání vyplývajících závěrů.

Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá ověřením míry vlivu provzdušňovací přísady na modul pružnosti betonu. Pro tyto účely byl proveden experiment, v jehož rámci byly stanoveny hodnoty statických a dynamických modulů pružnosti na vývrtech z betonových bloků různých receptur. Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly určeny pomocí ultrazvukové impulzní a rezonanční metody. Zjištěné výsledky jsou shrnuty v tabelární a grafické podobě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, statický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti, provzdušňovací přísada, ultrazvuková impulzová metoda, rezonanční metoda

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the verification of the degree of influence of the air-entraining admixture on the modulus of elasticity of concrete. The experiment was carried out for these purposes. The values of static and dynamic modulus of elasticity were determined on drilled cores from concrete blocks of different mixtures. The magnitudes of dynamic modulus of elasticity were determined by using an ultrasonic pulse velocity method and a resonance method. The results are summarized in tabular and graphical form.

KEYWORDS

Concrete, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity, air-entraining admixture, ultrasonic pulse velocity method, resonance method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Aleš Tichý *Modul pružnosti provzdušněných a neprovzdušněných betonů*. Brno, 2017. 45 s., 7 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2017

Aleš Tichý
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2017

Aleš Tichý
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Daliborovi Kocábovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných materiálů, důležitých rad, pomoci a především jeho času. Dále rodičům, že mi umožnili studium vysoké školy a po celou dobu mě podporovali.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle Práce.....	10
3	Teoretická část	11
3.1	Charakteristika betonu	11
3.2	Provzdušněný beton	17
3.3	Modul pružnosti	18
3.4	Stanovení modulu pružnosti.....	19
4	Experimentální část.....	28
4.1	Popis a cíl experimentu	28
4.2	Zkušební tělesa	28
4.3	Postup měření	31
4.4	Výsledky a jejich diskuze.....	34
5	Závěr.....	40
6	Bibliografie	41
7	Seznam obrázků	44
8	Seznam tabulek.....	45
9	Seznam grafů.....	45
10	Přílohy	46

1 Úvod

Beton v současnosti patří mezi nejrozšířenější stavební materiály, vděčí za to především dobré dostupnosti, mechanickým vlastnostem a relativně snadné zpracovatelnosti. Beton se ve své podstatě skládá ze dvou hlavních složek, kameniva a cementové matrice, která kamenivo obaluje a propůjčuje betonu právě ty klíčové vlastnosti, které jsou snadná tvárnost směsi a postupné tuhnutí a tvrdnutí, čímž se zaručí požadovaný tvar a pevnost konstrukce [1].

Beton za posledních několik let prošel velmi významným vývojem, jak co se týká složení, tak i výsledných vlastností. Díky množství různých příměsí a přísad, které do betonu můžeme přidat, jsme schopni ovlivnit výsledné vlastnosti betonu tak, aby vyhovovaly požadavkům pro danou konstrukci. Jednou z těchto přísad je provzdušňovací přísada, která vytvoří v betonu kulovité uzavřené póry, které pozitivně ovlivňují odolnost betonu vůči mrazu [2].

Pro navrhování betonových konstrukcí je klíčová hodnota charakteristické pevnosti betonu v tlaku, nicméně velmi důležitý je i statický modul pružnosti, který ovlivňuje na výsledné konstrukci průhyby, vznik a rozvoj trhlin, kmitání, dotvarování a další nezanedbatelné vlastnosti konstrukce [2], [3].

2 Cíle Práce

Cílem této práce je stanovit míru vlivu provzdušňovací přísady v receptuře čerstvého betonu na jeho výslednou hodnotu statického i dynamického modulu pružnosti. Stále častější je používání vysokohodnotných betonů, které dovoluje konstruktérům posouvat hranice železobetonových konstrukcí. Modul pružnosti roste úměrně s tlakovou pevností betonu [4]. Ovšem dle normy ČSN EN 1992-1-1 [3] by průměrná hodnota modulu pružnosti u betonu s krychelnou pevností v tlaku 20 MPa měla být přibližně 28 GPa, u betonu s $f_{ck,cube} = 100$ MPa je to ale pouze 43 GPa. Na tomto příkladu lze vidět, že nárůst modulu pružnosti oproti pevnosti v tlaku je mnohem pozvolnější. Proto je důležité u návrhu konstrukcí z vysokohodnotného betonu stanovit nejen pevnostní třídu, ale i hodnotu modulu pružnosti, kterou lze zlepšit složením čerstvého betonu. Především použitým druhem kameniva, jeho křivkou zrnitosti, cementem, vodním součinitelem, ale i již zmíněnou pórovitostí.

Proto se tato práce bude věnovat modulu pružnosti provzdušněných a neprovzdušněných betonů.

3 Teoretická část

3.1 Charakteristika betonu

Beton je kompozitní materiál, který se skládá ze dvou hlavních složek, kameniva a cementové matrice. Cementovou maticí se rozumí směs cementu a vody, která plní funkci pojiva tím, že obaluje jednotlivá zrna kameniva. Díky vzájemné chemické reakci přestává být po zhruba hodině tvárná, přičemž tento stav se nazývá tuhnutí, následuje další fáze, nazývaná ztvrdnutí, při které cementová matrice získává texturu přírodního kamene [2]. Kamenivo se rozděluje podle velikosti zrn na drobné a hrubé kamenivo, v betonu má funkci plniva, snižuje cenu betonu a vylepšuje jeho objemovou stálost, trvanlivost a má vliv i na další vlastnosti betonu [2], [5]. Kromě těchto dvou složek betonu můžeme jeho vlastnosti výrazně ovlivnit přidáním příměsí a přísad do betonu.

Cement je stěžejní složkou betonu, bez které nelze klasický beton vyrobit. Vzniká výpalem přírodních surovin a následným mletím s přídavkem sádrovce nebo anhydritu, který slouží jako regulátor tuhnutí, bez něj by po smíchání s vodou nastalo okamžité tuhnutí a nebylo by možné směs dále zpracovat. Takto vzniká portlandský cement. Je-li při mletí přidáván další materiál, je výsledný produkt nazýván jako směsný portlandský cement, vysokopecní cement, nebo směsný cement, podle toho, jaké množství které přísady bylo přimleto [2]. Použitím těchto příměsí lze dosáhnout snížení hydratačního tepla, ale i například zvýšení pevnosti, nebo odolnosti vůči chemickým látkám, síranům a mořské vodě. Jak již bylo výše zmíněno, cement při smíchání s vodou chemicky reaguje, tato reakce se nazývá hydratace cementu a umožňuje betonu ztvrdnout a získat texturu i vlastnosti podobné přírodnímu kamenu. Potřebné množství vody k úplné hydrataci cementu je přibližně 20-25 % hmotnosti z cementu. Tento poměr vody k hmotnosti cementu, je označován jako vodní součinitel [6]:

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

kde w je vodní součinitel [-]

v je množství vody v čerstvém betonu [kg]

c je množství cementu v čerstvém betonu [kg]

Vodní součinitel má velmi významný vliv na výsledné parametry, jak čerstvého, tak i ztvrdlého betonu. Pro výpočet vodního součinitele je třeba zohlednit i vlhkost kameniva

použitého do čerstvého betonu. U čerstvého betonu ovlivňuje jeho zpracovatelnost, tzn. že čím vyšší hodnota vodního součinitele, tím řidší výsledná směs a lepší zpracovatelnost, ale to je v nesouladu s požadavky na ztvrdlý beton, který vykazuje lepší vlastnosti při snižování vodního součinitele. Snižováním vodního součinitele lze dosáhnout vyšší pevnosti, modulu pružnosti, trvanlivosti a rychlejšímu vývoji pevností u betonu. Proto je zapotřebí při návrhu betonové směsi dbát na stanovení takové hodnoty vodního součinitele, aby beton splnil požadavky na trvanlivost, ale zároveň i na zpracovatelnost. Jednou z možností je pro zlepšení zpracovatelnosti přidat vodu i cement v takovém množství, aby zůstal zachován vodní součinitel, nebo lze použít produkt zvaný plastifikátor, resp. superplastifikátor. Tyto přísady se dávají v jednotkách procent hmotnosti cementu, ale i při takto nízké koncentraci dokáží velmi výrazně zlepšit zpracovatelnost betonu, nebo snížit jeho vodní součinitel, a tím zlepšit pevnost a další vlastnosti. Díky použití těchto chemických látek lze vyrobit vysokopevnostní beton, vysokohodnotný beton (HPC) a ultravysokohodnotný beton (UHPC). Proto je používání těchto látek označováno jako největší pokrok za posledních 40 let v oblasti technologie betonů [2].

V průběhu míchání betonu se mohou přidávat i další přísady, které zlepšují některé vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Zpravidla jsou přísady kapalné látky, na rozdíl od příměsí, které bývají v práškové podobě a aplikují se ve větších množstvích, než přísady. Přísady se aplikují v množství jednotek procent hmotnosti cementu. Přísady se mohou rozdělovat do kategorií, podle funkce, kterou plní, následovně [2]:

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

Kamenivo tvoří dvě třetiny až tři čtvrtiny celkového objemu betonu. Jelikož je většinou levnější než cement, tak znatelně snižuje cenu betonu. Díky velkému podílu v betonu, má významný vliv na jeho vlastnosti. Kamenivo se rozděluje podle [5]:

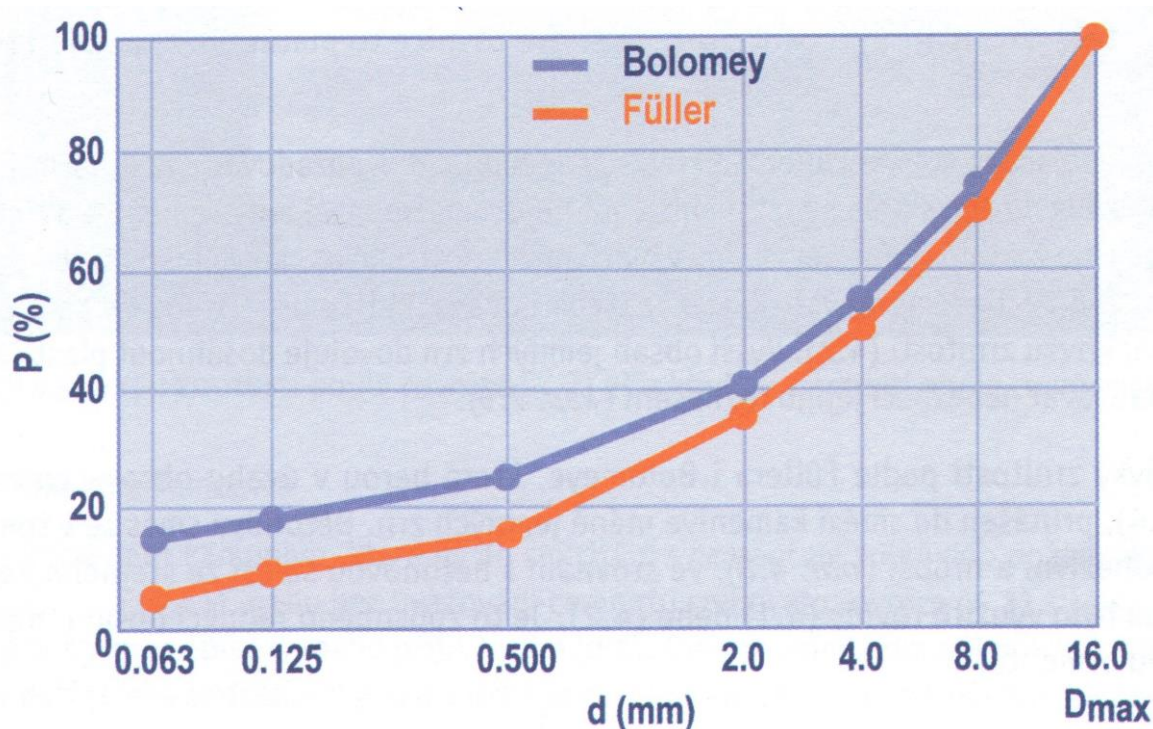
- Objemové hmotnosti:
 - Pórovité: $< 2\ 000\ \text{kg/m}^3$
 - Hutné: $2\ 000 - 3\ 000\ \text{kg/m}^3$
 - Těžké: $> 3\ 000\ \text{kg/m}^3$
- Původu:
 - Přírodní: těžené nebo drcené
 - Umělé: druhotná surovina, např. struska, keramzit
 - Recyklované: již dříve použité kamenivo v konstrukcích
- Druhu vzniku:
 - Těžené
 - Těžené předrcené [1] (předdrcené [5])
 - Drcené
- Velikosti zrn:
 - Jemné částice: $< 0,063\ \text{mm}$
 - Drobné kamenivo: $0,063 - 2\ \text{mm}$
 - Hrubé kamenivo: $2 - 45\ \text{mm}$

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

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

kde P je propad sítem o velikosti otvoru d

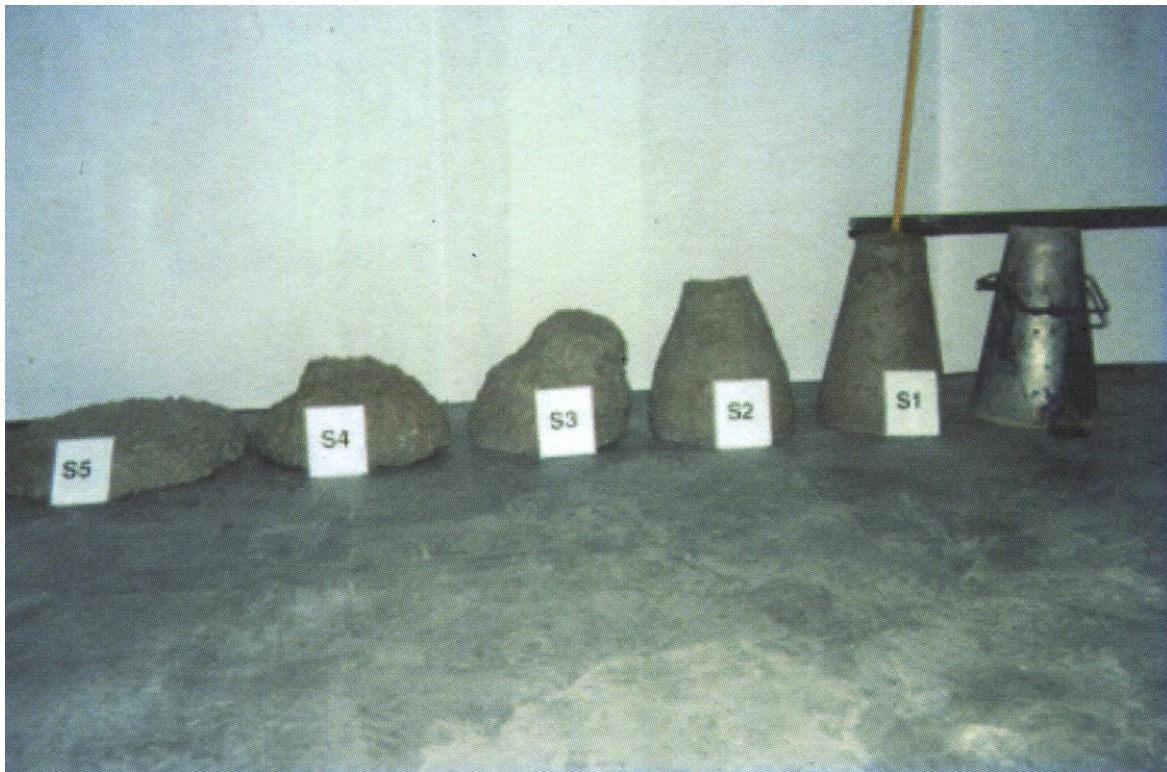
D_{max} je velikost maximálního zrna kameniva



Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Füllerovy rovnice pro $D_{max} = 16 \text{ mm}$ [2]

Při použití vztahu (2) lze dosáhnout větších hodnot pevnosti a modulu pružnosti betonu. Na druhou stranu se zhoršuje zpracovatelnost čerstvého betonu z důvodu dosažení maximální hutnosti [7]. Proto se v praxi využívá spíše modifikovaná rovnice podle Bolomeye, která zvyšuje podíl menších frakcí, a tím zlepšuje zpracovatelnost. Dále má vliv na vlastnosti betonu především pevnost a modul pružnosti samotného kameniva, pórovitost a řada dalších věcí, jako jsou nečistoty na kamenivu, tvarový index zrn, obsah chloridů, síranů atd. [2], [4].

Zpracovatelnost je vlastnost čerstvého betonu se pohybovat a být zhutňován. Proto je potřeba při návrhu konstrukce specifikovat míru zpracovatelnosti tak, aby bylo možno čerstvý beton do bednění uložit a následně zhutnit (při silném vyztužení nebo složitých tvarech to může být docela obtížné). Pokud to zpracovatelnost betonu nedovolí, může se zásadně zhoršit spolupůsobení betonu s výztuží, pevnost v tlaku a celková trvanlivost betonu. Pro měření zpracovatelnosti existuje více metod, avšak nejpoužívanější je sednutí kužele dle normy ČSN EN 12350-2 [8]. Zkouška spočívá v naplnění formy, zvané Abramsův kužel, čerstvým betonem a následnému změření poklesu výšky vzorku (po odebrání formy).



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

Pevnost je u betonu nejsledovanější mechanickou vlastností. Udává maximální hodnotu napětí, kterou je schopen přenést do okamžiku porušení. Prostý beton velmi dobře snáší tlakové namáhání, ale při ohybovém a tahovém namáhání je velmi slabý. Proto se pro prvky, které jsou namáhané ohybem nebo tahem, vyztužuje ocelovou výztuží, která tato namáhání přebere. Použití betonu a oceli společně je umožněno téměř stejným koeficientem teplotní roztažnosti obou materiálů [9]. Pevnost v tlaku se stanovuje podle normy ČSN EN 12390-3 [10], pevnost v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5 [11] a pevnost v příčném tahu podle ČSN EN 12390-6 [12] na zkušebních tělesech o rozměrech daných normou ČSN EN 12390-1 [13] a vyrobených a ošetřených podle normy ČSN EN 12390-2 [14]. U betonu se stanovují tyto čtyři druhy pevností:

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

Vzhledem k provedení pouze zkoušky pevnosti v tlaku v experimentální části práce, bude uveden jen tento postup. Stanovuje se krychelná nebo válcová pevnost, podle tvaru zkušebního tělesa. Standardní válce o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm vykazují

nižší naměřené hodnoty pevnosti (přibližně 80 %) než krychle o hraně 150 mm. To je ovlivněno rozdílným poměrem výška/příčný rozměr, což ovlivňuje způsob porušení [2]. Pevnost se může stanovit i na vzorcích odebraných přímo z konstrukce pomocí vrtné soupravy. Rozměry těchto vzorků závisí na použité vrtné soupravě a hloubce vrtání, proto je nutné naměřenou pevnost upravit dle doporučených vztahů.

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

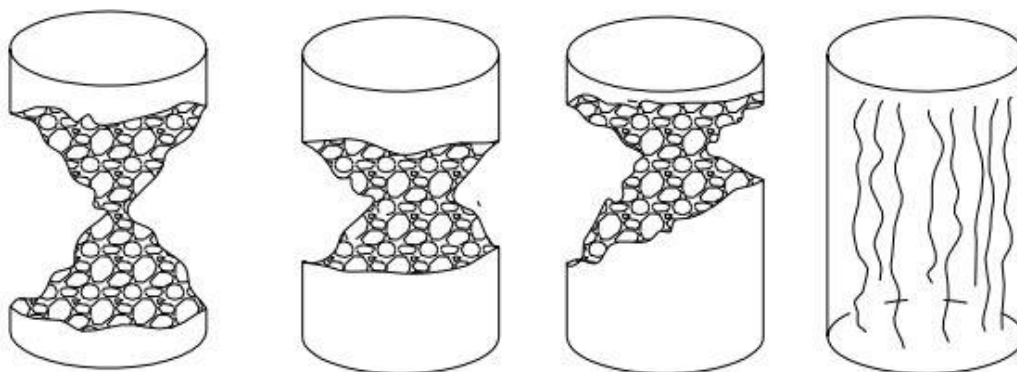
$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \quad (3)$$

kde f_c je pevnost v tlaku [MPa]

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

A je zatěžovaná plocha vzorku [mm²]

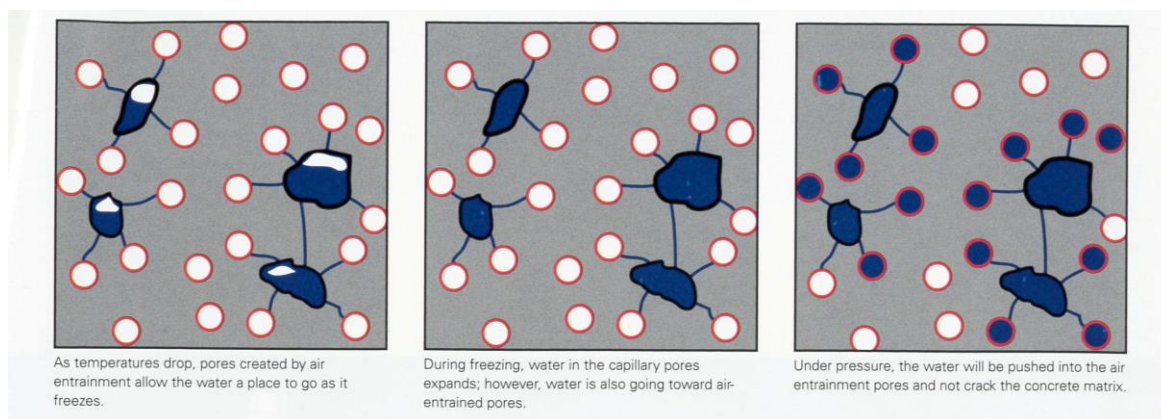
Správné porušení má tvar proti sobě směřujících komolých kuželů, či jehlanů (podle tvaru vzorku), které je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3 Vyhovující porušení zkušebních válců [36]

3.2 Provzdušněný beton

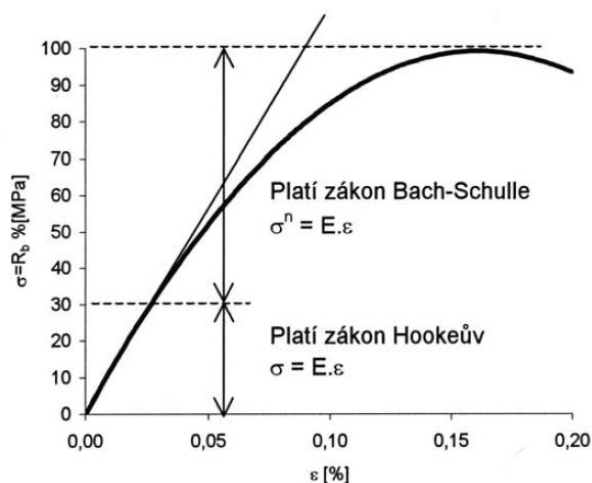
Provzdušněný beton je schopen velmi dobře odolávat působení mrazu a rozmrazovacích solí. Ukázalo se, že provzdušněný beton je mrazuvzdorný i po 350 - 400 zmrazovacích cyklech, kdežto referenční neprovzdušněný beton vydržel pouze 60 cyklů [2]. Této zvýšené odolnosti je dosaženo obsaženými mikropóry v provzdušněném betonu. Póry mají sférický tvar a velikost mezi 25 - 300 μm , jsou uzavřené a jejich vzájemná vzdálenost L má být menší jak 0,25 mm. Jsou-li tato kritéria splněna, tak tyto póry přerušují kapilární síť a jsou expanzním prostorem pro zvětšující se objem zamrzající vody. Při absenci těchto mikropórů způsobují zvětšující se krystalky ledu a solí pnutí a tah ve struktuře betonu. To má za následek vznik trhlin, čímž se zhoršují mechanické vlastnosti betonu [15]. Provzdušnění by se mělo pohybovat mezi 4,0 až 7,0 %. Toho lze dosáhnout použitím provzdušňovací přísady (AEA), která se dávkuje ve velmi malém množství (0,05 – 1,0 % hmotnosti cementu). Druhotnými příznivými účinky AEA jsou snížení spotřeby záměsové vody, snížení segregace a odměšování vody v čerstvém betonu [16]. Výroba provzdušněných betonů je nelehkým úkolem, protože míra provzdušnění je ovlivněna například mísením čerstvého betonu, jemností cementových zrn, obsahem popílku, hutněním a dalšími faktory. Provzdušněné betony se pro svoje vlastnosti používají ve vodním, silničním a mostním stavitelství [6].



Obr. 4 Princip expanze mrznoucí vody do mikropórů vytvořených AEA přísadou [38]

3.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti E je základní charakteristikou betonu. Popisuje pružné chování materiálu při působení napětí. Závislost napětí na přetvoření je u betonu lineární přibližně do 30 % pevnosti betonu, po překročení tohoto napětí začínají v betonu vznikat trhlinky a projevují se trvalé deformace. Průběh napětí a deformací se znázorňuje deformačními a pracovními diagramy betonu [6].



Obr. 5 Deformační diagram betonu v tlaku [6]

Na Obr. 5 je deformační diagram betonu v tlaku. V jeho lineární (pružné) oblasti platí Hookův zákon, který je definován jako:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

kde ε je poměrné přetvoření [-]

σ je napětí [MPa]

E je modul pružnosti [GPa]

Modul pružnosti víceméně vyjadřuje tuhost materiálu, platí že čím vyšší modul pružnosti, tím menší deformační změny. Pro ověřování deformací, dotvarování, smršťování, rozdělení vnitřních sil na staticky neurčitých konstrukcích atd. je nutné znát jeho hodnotu. Stanovení správné hodnoty modulu pružnosti je pro navrhování konstrukcí z betonu velmi důležité. Dle normy ČSN EN 1992-1-1 [3] lze podle vztahu (5) stanovit hodnotu modulu pružnosti v závislosti na pevnostní třídě betonu.

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (5)$$

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

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

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

Tímto vztahem lze získat pouze orientační hodnota, protože modul pružnosti ovlivňuje mnohem více aspektů než samotná pevnost betonu v tlaku. Modul pružnosti úměrně roste s pevností betonu, kterou určuje především vodní součinitel, ale významnější vliv má použité kamenivo. Kamenivo tvoří většinou část objemu betonu, proto mají jeho parametry zásadní vliv na modul pružnosti. Výsledný modul pružnosti do značné míry závisí na modulu pružnosti kameniva. Podle ČSN EN 1992-1-1 [3] se má hodnota E_{cm} pro vápencové či pískovcové kamenivo snížit o 10 %, resp. 30 % oproti běžnému silikátovému kamenivu. Pro čedičové kamenivo naopak zvýšit o 20 %. Moduly pružnosti betonů stejných pevností mohou tedy nabývat až nebývalých rozdílů v závislosti na použitém kamenivu [4]. Mezi další aspekty, které mohou ovlivňovat hodnotu modulu pružnosti, patří vlastnosti cementu, tvarový index kameniva, křivka zrnitosti, míra zhutnění a pórovitosti a způsob ošetřování a stáří betonu. Proto se stanovuje přesný statický modul pružnosti z vyrobených či odebraných těles, nebo dynamický modul pružnosti přímo z konstrukce.

Modul pružnosti je hlavní parametr pro stanovení deformací betonových konstrukcí. Vliv modulu pružnosti na deformace konstrukcí je významnější u předpjatých konstrukcí než u železobetonových. A to především z důvodu působení, téměř vždy celého betonového průřezu při mezním stavu použitelnosti na rozdíl od železobetonových konstrukcí, u kterých průřez zásadně ovlivňují trhliny. Stanovení správného modulu pružnosti pro předpjaté konstrukce je proto zcela stěžejní [17].

3.4 Stanovení modulu pružnosti

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

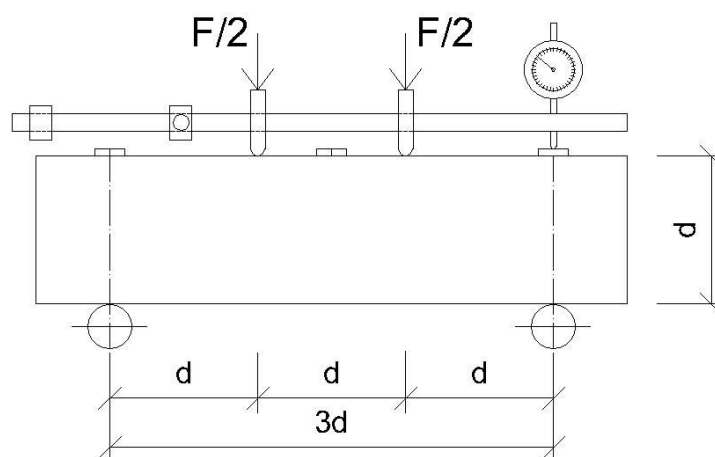
- Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahu ohybem dle ČSN 73 6174 [18]

- Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-13 [19]
- Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku dle ISO 1920-10 [20]
- a další, bez opory v platných normách (např. z lomových testů)

Nedestruktivní metody jsou:

- Stanovení modulu pružnosti rezonanční metodou dle ČSN 73 1372 [21]
- Stanovení modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou dle ČSN 73 1371 [22]
- a další, bez opory v platných normách (např. pomocí metody impact-echo)

Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahu ohybem podléhá metodice uvedené v normě ČSN 73 6174 [18]. Metoda spočívá v zatížení zkušební tělesa tzv. čtyřbodovým ohybem a měřením průhybu tělesa, schéma zkoušky na Obr. 6.



Obr. 6 Schéma měření modulu pružnosti zkouškou v tahu ohybem [18]

Zkušební těleso se osadí měřícím rámečkem s digitálním úchylkoměrem. Následně se zatěžuje silou F_1 , která vyvozuje napětí v tahu ohybem σ_1 o hodnotě $0,1 R_j$ (pevnosti v tahu ohybem) a stanoví se celkový průhyb $s_{tot,1}$. V dalším kroku se těleso zatíží silou F_2 , která je rovná $2 \times F_1$ a určí se celkový průhyb $s_{tot,2}$. Poté se zatížení sníží na F_1 a určí se pružný průhyb $s_{t,2}$. Tento postup se opakuje se silami F_3 až F_n , které jsou obvykle násobky síly F_1 . Při zatěžování se vždy měří celkový průhyb a při odtěžování pružný průhyb. Modul pružnosti se stanoví ze vztahu [18]:

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

kde E je statický modul pružnosti [Pa]

F je zatížení vzorku [N]

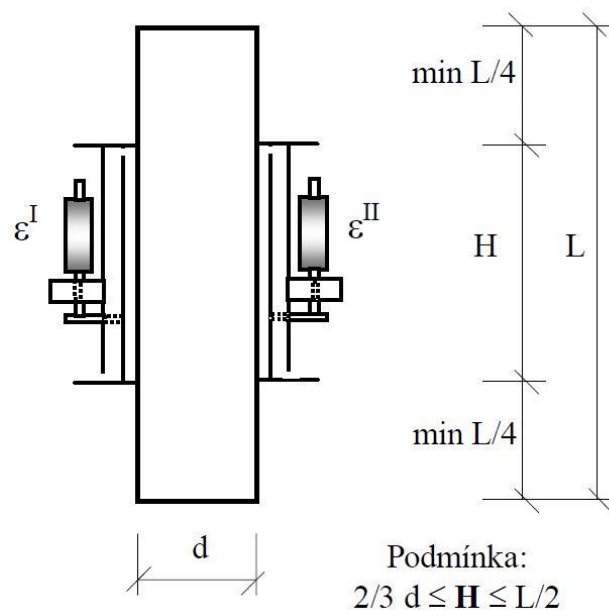
f_e je celkový pružný průhyb tělesa [m]

b, h jsou příčné rozměry tělesa [m]

l je vzdálenost podpor [m]

Tato metoda se v praxi již příliš nepoužívá, zejména kvůli složitému postupu zkoušky a nadhodnoceným výsledkům zkoušky. To je způsobeno vstupem Poissonova součinitele s hodnotou 0,15 do výpočtu. Tato hodnota neodpovídá moderním betonům a nelze ji ve výpočtu upravit [23].

Používanější metodou je stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku podle normy ČSN EN 12390-13 [19]. Zkouška spočívá v měření hodnot poměrného přetvoření zkušební tělesa při zatěžování v jeho pružné oblasti. Zkušební tělesa mohou být válce, krychle nebo jádrové vývrty splňující požadavky normy ČSN EN 12390-1 [13] nebo ČSN EN 12504-1 [24]. Poměr délky L ku příčnému rozměru d by měl být v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$ a příčný rozměr d by měl být minimálně 3,5 krát větší než maximální velikost zrna kameniva D_{max} . Obvykle se používají válcová zkušební tělesa o průměru 150 mm a délce 300 mm. Pevnost v tlaku f_c se stanoví na srovnávacích tělesech, nejlépe stejných rozměrů jako mají tělesa pro stanovení sečnového modulu pružnosti, v souladu s normou ČSN EN 12390-3 [10]. Z pevnosti v tlaku se určí horní hodnota napětí rovna $f_c/3$ používaná pro stanovení modulu pružnosti. Zatěžování se provádí na lisech

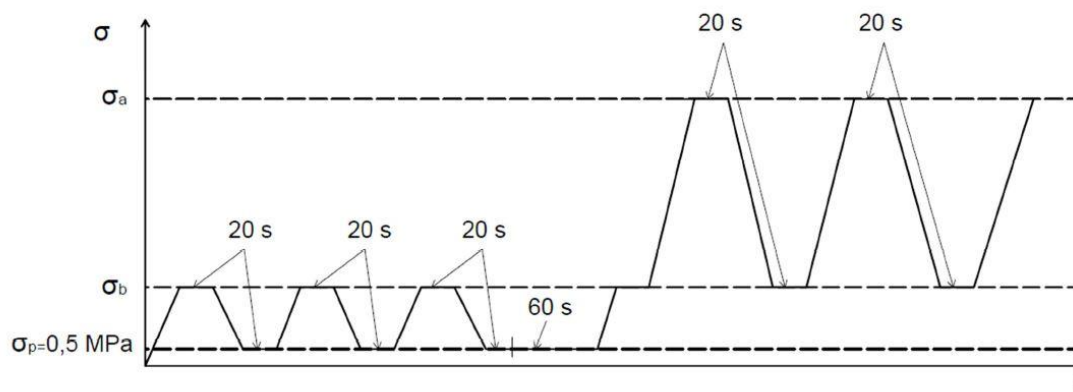


Obr. 7 Umístění měřícího zařízení na zkušebním tělese [34]

vyhovujících ČSN EN 12390-4 [25] a na tělesech opatřených přístroji měřícími přetvoření tělesa. Přístroje pro měření délkových změn musí mít délku měřící základny H větší než $2/3 d$ a menší než $L/2$. Vzdálenost od čel tělesa musí být nejméně $L/4$.

Přístroje pro měření délkových změn musí být umístěny alespoň na dvou protilehlých stranách a před provedením samotné zkoušky je nutno zkontrolovat, jestli se naměřené deformace na jednotlivých přístrojích neliší o více jak 20 % od jejich průměru. Pokud ano, je nutno upravit polohu tělesa v lisu. V normě ČSN EN 12390-13 [19] jsou uvedeny dva postupy, podle kterých lze stanovit sečnový modul pružnosti. A to metodou A nebo metodou B.

Podle ČSN EN 12390-13 [19] se zkušební tělesa musí vždy zatěžovat a odtěžovat konstantní rychlostí ($0,6 \pm 0,2$) MPa/s. Podle metody A se touto rychlostí nejprve zkušební těleso zatíží na hodnotu σ_b , která je v rozmezí $0,1 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$, po dobu menší než 20 s. Poté se těleso odtíží na základní napětí σ_p , rovno 0,5 MPa, na kterém opět setrvává nejdéle 20 s. Po tomto cyklu se vynuluje měřící zařízení a následně se cyklus ještě dvakrát zopakuje. Při druhém a třetím zatěžovacím cyklu se při napětí σ_b zaznamená poměrná deformace ε_b . Po těchto třech cyklech se vzorek ponechá dalších 60 s při základním napětím σ_p , což slouží ke kontrole, zda není rozdíl změřených deformací druhého a třetího cyklu větší než 10 %. Pokud není, zkouška může dále pokračovat.



Obr. 8 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody A [19], [35]

Na Obr. 8 je postup zatěžování zkušebního tělesa. Následují tři zatěžovací cykly, ze kterých se stanoví sečnový modul pružnosti. Nejprve se konstantní rychlostí vzorek zatíží na hodnotu σ_b po dobu nejdéle 20 s a zaznamená se příslušná deformace $\varepsilon_{b,0}$. Poté se napětí zvýší na hodnotu σ_a , která se rovná $f_c/3$ po dobu menší než 20 s. Následně se těleso odtíží na napětí σ_b . Tento cyklus se opakuje ještě dvakrát, přičemž u prvního a třetího cyklu se při napětí σ_a

zaznamená hodnota přetvoření $\varepsilon_{a,1}$ a $\varepsilon_{a,3}$. Po druhém cyklu se při napětí σ_b stanoví hodnota deformace $\varepsilon_{b,2}$. Poté se vzorek zatěžuje až do porušení, pro stanovení pevnosti v tlaku. Ta by se neměla lišit o více než 20 % oproti zjištěné pevnosti f_c na srovnávacích tělesech. Modul pružnosti se určí ze vztahu:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (7)$$

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

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

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

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

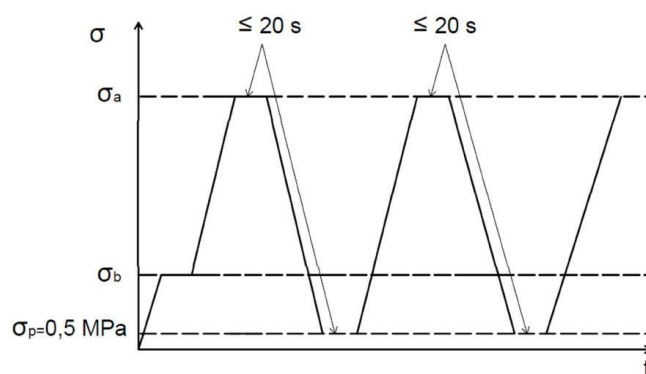
σ_b je zatěžovací hodnota napětí (odečtená z lisu) [MPa]

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

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

Metoda A je oproti metodě B složitější na provedení a výsledné hodnoty statického sečnového modulu pružnosti jsou nadhodnocené oproti metodě B i oproti původní normě ČSN ISO 6784 [26] (více na toto téma viz článek [23]).

Metoda B spočívá ve třech zatěžovacích cyklech. Nejprve se těleso zatíží konstantní rychlostí na základní napětí σ_p , rovno 0,5 MPa, na které setrvá po dobu menší než 20 s. Na konci této doby je nutno vynulovat měřící zařízení. Následně se vzorek zatíží na horní napětí



Obr. 9 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody B [19], [35]

σ_a , které se rovná $f_c/3$, po dobu nejvíce 20 s. Při tomto napětí se zaznamená deformace $\varepsilon_{a,1}$. Poté se těleso odtíží na napětí σ_p a zjistí se deformace $\varepsilon_{p,1}$.

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

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (8)$$

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

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

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

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

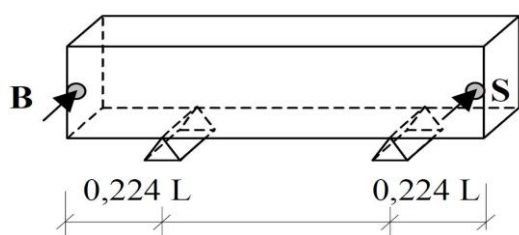
σ_p je zatěžovací hodnota základního napětí (odečtená z lisu) [MPa]

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

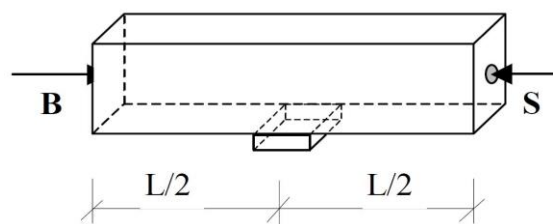
$\varepsilon_{p,2}$ je hodnota poměrného přetvoření při napětí σ_p po druhém cyklu [-]

Nejpoužívanější metodou je stanovení statického modulu pružnosti dle ISO 1920-10 [20]. V experimentální části bakalářské práce se postupovalo dle ČSN EN 12930-13 [19], proto je v téhle práci rozebrána podrobněji. Postup měření dle normy [20] je téměř totožný, jako dle normy [19] metody B, jen s rozdílem fixně stanovené doby zatěžování ve spodních a horních zatěžovacích mezích na 60 s. Dalším nepatrným rozdílem je mírně odlišná rychlost zatěžování a odtěžování, která je stanovena na (0,2 až 0,6) MPa/s. Měření deformací pro stanovení statického modulu pružnosti se provádí při třetím cyklu. Modul pružnosti se stanoví analogicky, jako v metodě B dle ČSN EN 12390-13 [19].

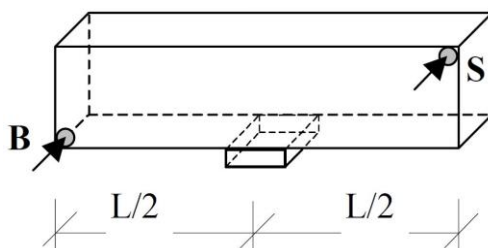
Rezonanční metoda popsaná v normě ČSN 73 1372 [21] spočívá v měření vlastních frekvencí kmitání zkušební tělesa. Zpravidla se používají tělesa ve tvaru hranolů nebo válců s délkou nejméně dvakrát větší než jejich příčný rozměr. Zkušební těleso se uloží na pružný podklad upravený tak, aby neomezoval pohyb vzorku při jeho kmitání a aby jeho vlastní kmitočty byl mimo rozsah kmitočtů vzorku. Následně se do zkušební tělesa vnese mechanický impulz a snímačem měřícího přístroje se v místech daných Obr. 10,11,12 změří vlastní frekvence tělesa. Podle poloh snímače a budiče frekvencí rozlišujeme naměřené kmitání na podélné, příčné a kroutivé.



Obr. 10 Poloha snímače a budiče pro příčné kmitání [34]



Obr. 11 Poloha snímače a budiče pro podélné kmitání [34]



Obr. 12 Poloha snímače a budiče pro kroutivé kmitání [34]

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

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (9)$$

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

L je délka zkoušeného tělesa [m]

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

ρ je objemová hmotnost betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

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

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \frac{1}{i^2} \quad (10)$$

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

c_1 je korekční součinitel podle tab. 2 v normě ČSN 73 1372 [21] [-]

L je délka zkušební tělesa [m]

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

ρ je objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

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

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

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (11)$$

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

k je součinitel charakterizující příčný tvar tělesa dle ČSN 73 1372 [21] [-]

L je délka zkušební tělesa [m]

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

ρ je objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Další možností, jak stanovit dynamický modul pružnosti, je zkoušením betonu ultrazvukovou impulzovou metodou dle normy ČSN 73 1371 [22]. Metoda se zakládá na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového (dále UZ) vlnění v betonu. Měří se doba průchodu UZ vlnění betonem, ze kterého se následně pomocí vztahu (12) stanoví rychlost šíření UZ vlnění v betonu. Přístroj pro stanovení doby průchodu UZ vlnění v betonu musí odpovídat požadavkům v normě ČSN EN 12504-4 [27]. Pracovní kmitočty přístroje se ve stavební praxi zpravidla pohybují mezi 20 – 150 kHz a sondami opatřenými akustickým vazebným prostředkem se změří doba průchodu UZ vlnění. S identickým nastavením přístrojem se stanoví doba průchodu UZ vlnění etalonem, pro zjištěný tzv. mrtvého času.

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (12)$$

kde v_L je rychlost impulzu [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]

L je délka měřící základny [mm]

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

$$tj. T = T_L \pm t_{kor} [\mu s]$$

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

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

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (13)$$

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

ρ je objemová hmotnost betonu [$kg \cdot m^{-3}$]

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

k je součinitel rozměrnosti prostředí viz ČSN 73 1371 [22]

Využití této metody, pro stanovení modulu pružnosti, je velmi výhodné u konstrukcí, u kterých nemůžeme vykonat destruktivní zásah. Ultrazvuková impulzová metoda je vhodná i pro sledování vývoje vlastností betonu v ranných fázích zrání, což je například velmi důležité pro určení doby, kdy je možno vnést předpětí do konstrukcí. Při vhodné kalibraci přístroje se odchylka naměřeného modulu pružnosti pohybuje do 2 GPa od skutečné hodnoty [28].

4 Experimentální část

4.1 Popis a cíl experimentu

Experiment spočíval ve sledování vlivu provzdušnění betonu na jeho modul pružnosti. Pro potřeby experimentu bylo vyrobeno dvanáct bloků o rozměrech 300 × 300 × 150 mm z betonů různých receptur. Vždy tři bloky jedné receptury. Receptury betonu pro experiment byly zvoleny tak, aby beton 2/2 odpovídal betonu P2/2 a beton 2/3 odpovídal betonu P2/3 s přidanou provzdušňovací přísadou. Na čerstvých betonech byly provedeny zkoušky pro stanovení jejich vlastností. Ze ztvrdlých bloků byly následně odebrány jádrové vývrty, na kterých byla provedena řada nedestruktivních i destruktivních zkoušek. Na vývrtech byla stanovena jejich pevnost v tlaku. Dále byl stanoven dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzní a rezonanční metodou a statický modul pružnosti v tlaku. Následně byly získané výsledky vyhodnoceny.

4.2 Zkušební tělesa

Pro účely experimentu bylo vyrobeno dvanáct bloků z betonů čtyř různých receptur. Jednotlivé receptury se lišily pouze v poměrech použitých surovin, případně použitím provzdušňovací přísady Sika LPS A 94. Pro beton byl použit písek Bratčice frakce 0 – 4 mm, Olbramovice frakce 4 – 8 mm a Olbramovice frakce 8 – 16 mm. Jako pojivo byl použit cement CEM I 42,5R Mokrý. Jako plastifikátor byl použit přípravek Sika ViscoCrete 4035. Navážené

Tab. 1 Receptura jednotlivých betonů

Materiál (naváženo)		Označení betonu			
		2/2	2/3	P2/2	P2/3
Cement CEM I 42,5 R (Mokrý)		338	386	335	393
Písek 0-4 mm (Bratčice)		905	854	850	816
Kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)		183	207	312	183
Kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)		667	671	526	694
Voda	záměsová	163	168	151	158
	v kamenivu	13	13	13	13
	celková	176	181	164	171
Sika ViscoCrete 4035		1,77	2,01	1,70	2,05
Sika LPS A 94		0,00	0,00	0,76	0,71

hmotnosti jednotlivých složek betonů jsou uvedeny v Tab. 1. Voda byla použita pitná a byl stanoven vodní součinitel, který je uveden v Tab. 2.

Tab. 2 Hodnoty vodního součinitele

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Vodní součinitel [-]	0,48	0,44	0,45	0,40

Na čerstvých betonech byly provedeny zkoušky pro stanovení jejich vlastností. Konkrétně zkouška rozlití dle ČSN EN 12350-5 [29], zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [8], objemová hmotnost v souladu s ČSN EN 12350-6 [30] a byl stanoven obsah vzduchu v čerstvém zhuštěném betonu tlakoměrnou metodou dle ČSN EN 12350-7 [31]. Stupeň konzistence podle rozlití byl u všech vzorků určen jako F1 a podle sednutí jako S2. Betonové bloky byly po vybetonování a po vyjmutí z formy uloženy a ošetřovány dle norem [14], [32].

Tab. 3 Vlastnosti čerstvého betonu

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Obj. hm. čerstvého betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2 270	2 300	2 190	2 260
rozlití [mm]	340	330	330	320
sednutí [mm]	65	50	55	50
obsah vzduchu [%]	4,5	3,0	6,2	5,7

Po vytvrdnutí betonu a po následném provedení nedestruktivních zkoušek na blocích v rámci projektu GAČR 13-18870S byly z bloků jádrovým vrtáním (Obr. 13) odebrány vzorky pro měření pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Z každého bloku byly odebrány dva vývrty průměru 75 mm a jeden vývrt průměru 100 mm, které byly následně upraveny kotoučovým řezáním. Pro každý beton bylo tedy vyrobeno 6 těles o průměru a výšce 75 mm a 6 těles o průměru a výšce 100 mm pro měření pevnosti v tlaku a 6 těles průměru 75 mm a výšce 200 mm pro měření statického a dynamického modulu pružnosti (Obr. 14).



Obr. 13 Průběh jádrového vrtání



Obr. 14 Jádrové vývrty získané z betonu P2/3

U takto nařezaných těles bylo třeba upravit rovinnost jejich čel zbrúšením pomocí korundového prášku, viz Obr. 15.



Obr. 15 Úprava dosedacích ploch

4.3 Postup měření

Na zkušebních tělesech byla provedena zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [10], viz Obr. 16. Zkoušelo se na tělesech o průměru a výšce 100 mm a na tělesech o průměru a výšce 75 mm, ze kterých byly později stanoveny zatěžovací meze pro měření statického modulu pružnosti.

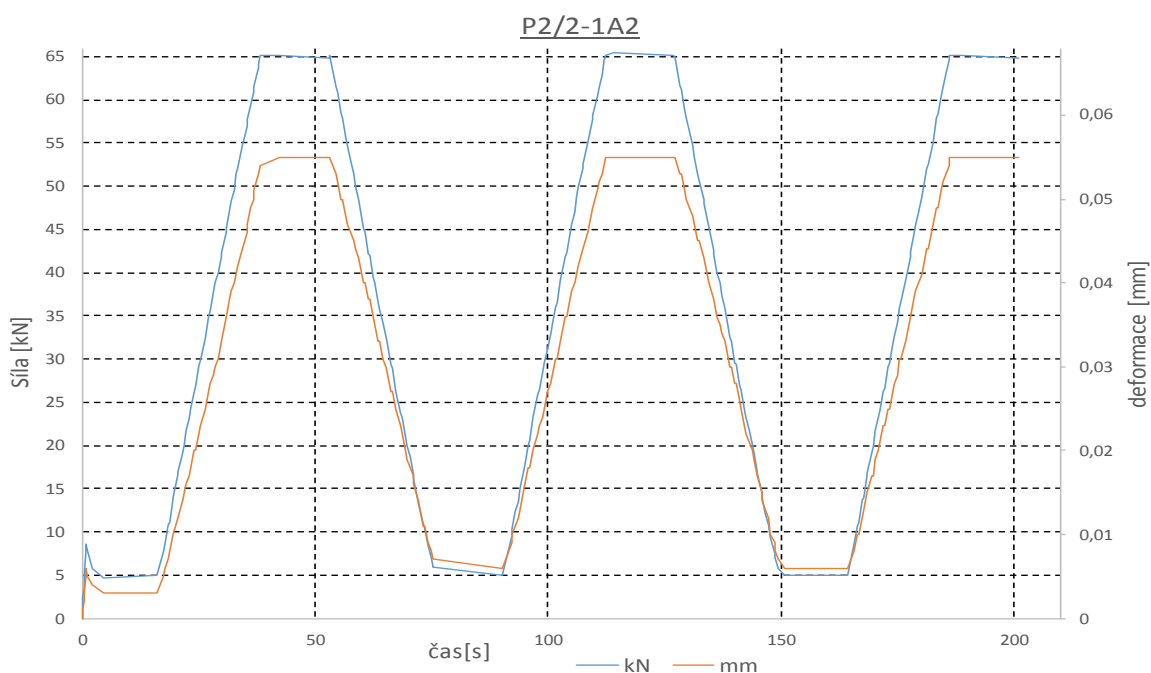


Obr. 16 Ukázka porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku

Pro stanovení statického modulu pružnosti byla použita metoda B dle ČSN EN 12390-13 [19]. Zkušební tělesa byla opatřena měřicí soupravou tvořenou dvěma tenzometry. Po zadání hodnot zatěžovacích mezí, délky měřicí základny a průměru tělesa do ovládacího SW lisu probíhá zkouška automaticky. Zkouška byla provedena na tělesech o průměru 75 mm a výšce 200 mm, viz Obr. 17 a Graf 1.



Obr. 17 Vzorek betonu P2/2 osazený měřicím zařízením (tenzometry), které je součástí lisu FORM+TEST 3-3000 ALPHA



Graf 1 Průběh zatěžování a deformací vzorku z Obr. 17

Vzorky byly před stanovením statického modulu pružnosti rovněž zkoušeny nedestruktivními dynamickými metodami. První z nich byla rezonanční metoda dle ČSN 73 1372 [21]. Byla zvolena metoda s vnesením mechanického impulzu úderem kovového kladívka do zkušebního tělesa. Tělesa byla opatřena snímačem akustické emise a pomocí softwaru v počítači, který je příslušenství osciloskopu Handyscope H54, byly zjištěny jejich vlastní frekvence. U každého vzorku byla zjištěna vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání.



Obr. 18 Ukázka měření vlastní příčné frekvence tělesa

Další metoda pro stanovení dynamického modulu pružnosti, která byla použita, je ultrazvuková impulzová metoda dle ČSN 73 1371 [22]. Byl použit přístroj TICO od švýcarské firmy Proceq. Úlohu akustického vazebního prostředku plnila plastelína. Po změření každého vzorku se měřila doba průchodu etalonem pro zjištění tzv. mrtvého času. U všech zkušebních těles se měřily tři doby průchodu UZ vlnění. Měření je znázorněno na Obr. 19.



Obr. 19 Měření dynamického modulu pružnosti impulzovou UZ metodou

4.4 Výsledky a jejich diskuze

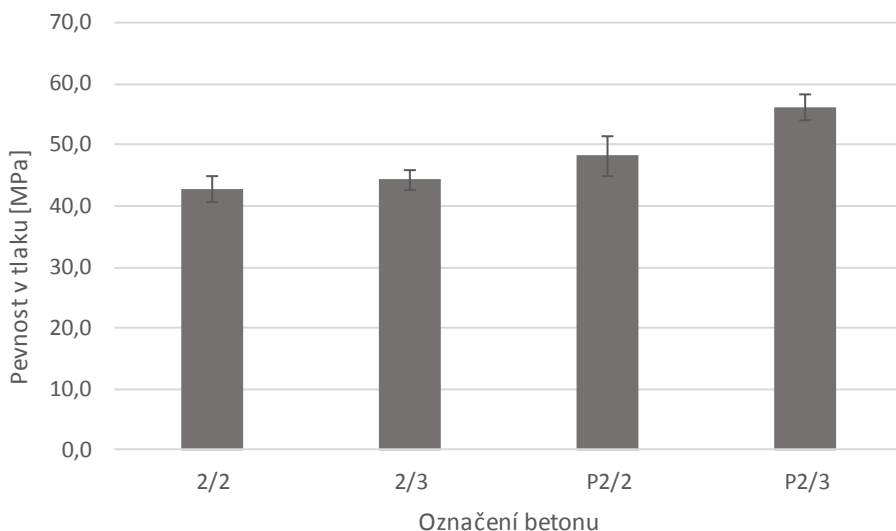
Na naměřených hodnotách, ze všech zkoušek, byly provedeny testy normality na hladině významnosti 0,05, přičemž nedošlo k zamítnutí hypotézy, že data mají normální rozdělení (viz přílohy).

Výsledky průměrných pevností v tlaku a směrodatné odchytky výběrové jednotlivých betonů jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Průměrné pevnosti v tlaku stanovené na vývrtech

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Pevnost v tlaku zjištěná na vývrtech \varnothing 100 mm [MPa]	42,7	44,3	48,3	56,2
Výběrová směrodatná odchyška [MPa]	2,17	1,67	3,31	2,26
Pevnost v tlaku zjištěná na vývrtech \varnothing 75 mm [MPa]	45,5	52,7	48,9	59,4
Výběrová směrodatná odchyška [MPa]	3,03	1,47	3,92	3,40

Jak je patrné z grafu 2, tak pevnost v tlaku u provzdušněných betonů nabývá větších hodnot než u betonů neprovzdušněných. To je zajímavé zjištění, protože trend je běžně zcela opačného charakteru. Tento jev je nejspíš způsoben nižším vodním součinitelem u provzdušněných betonů a nižším podílem jemnozrné frakce kameniva.

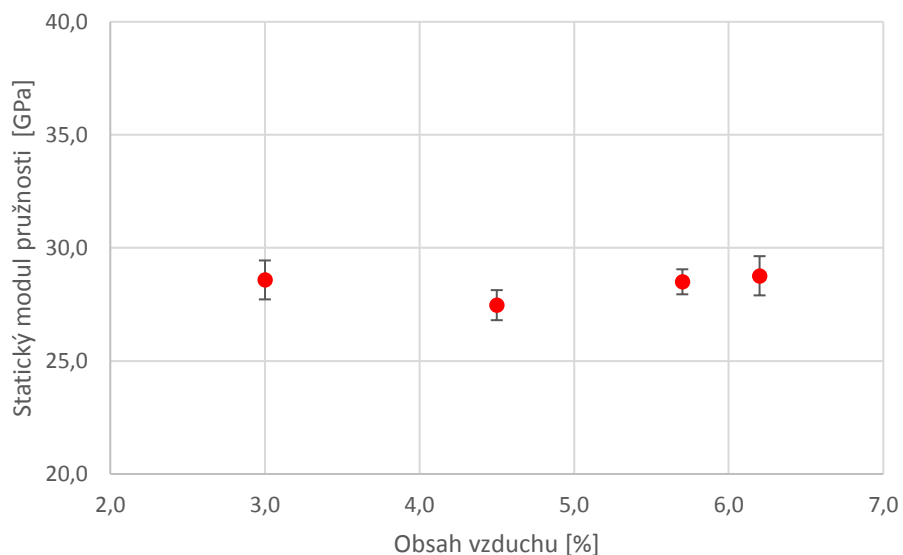


Graf 2 Průměrná pevnost v tlaku stanovená na vývrtech průměru 100 mm

Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti včetně výběrových směrodatných odchylek jsou uvedeny v Tab. 5. Dále je v grafu 3 znázorněna závislost modulu pružnosti na obsahu vzduchu v betonu. Opět lze u tohoto grafu sledovat opačný trend, než jaký je běžný. Podobné hodnoty statického modulu pružnosti u provzdušněných a neprovzdušněných betonech jsou nejspíš způsobeny vyšší pevností v tlaku u provzdušněných betonů.

Tab. 5 Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Statický modul pružnosti [GPa]	27,5	28,6	28,8	28,5
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]	0,66	0,86	0,87	0,55
Obsah vzduchu [%]	4,5	3,0	6,2	5,7

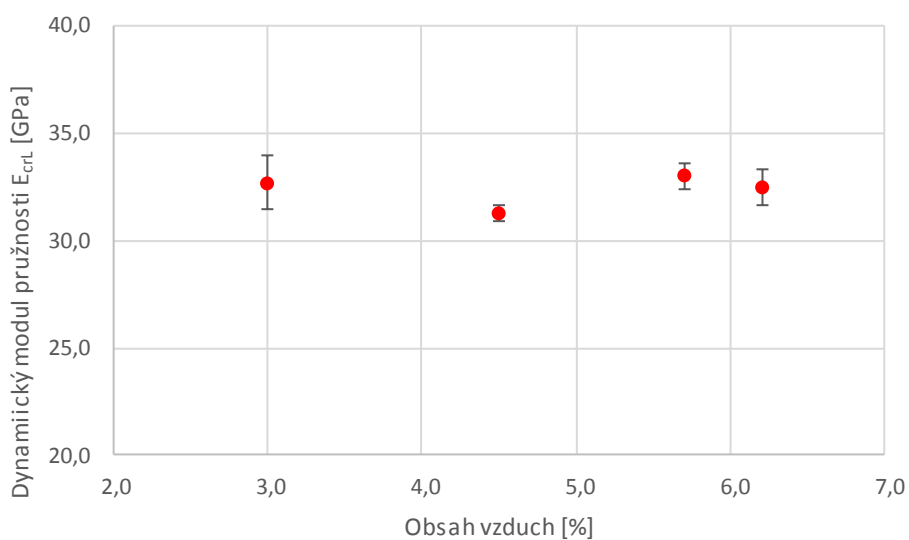


Graf 3 Průměrný statický modul pružnosti v závislosti na obsahu vzduchu v betonech

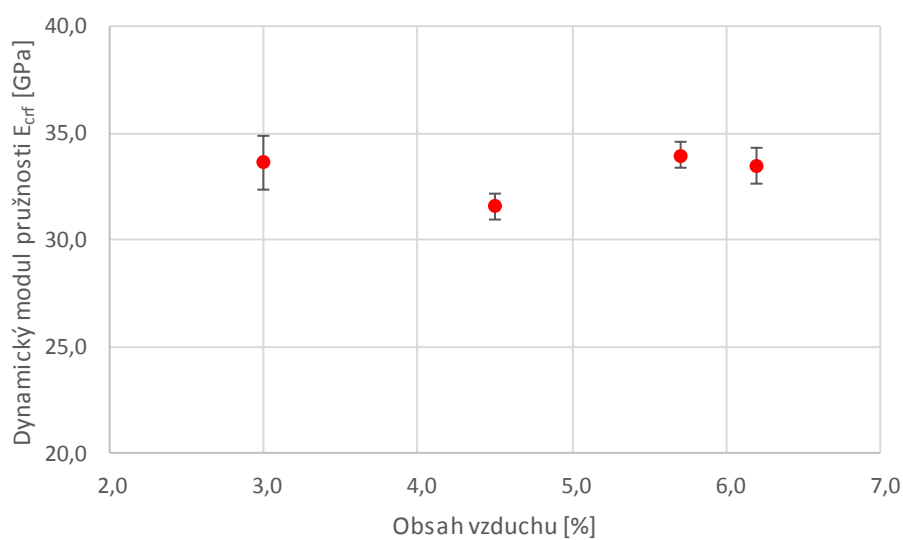
Výsledky stanovené pomocí rezonanční metody jsou uvedeny v Tab. 6. V grafech 4 a 5 je znázorněna závislost dynamického modulu pružnosti na obsahu vzduchu v betonu. Rovněž je patrný stejný jev, jako v případě statického modulu pružnosti. Hodnoty dynamického modulu pružnosti zjištěné z vlastních frekvencí příčného kmitání jsou přibližně o 3 % větší než z vlastních frekvencí podélného kmitání.

Tab. 6 Naměřené dynamické moduly pružnosti

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Dynamický modul pružnosti E_{crL} [GPa]	31,3	32,7	32,5	33,0
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]	0,38	1,26	0,82	0,63
Dynamický modul pružnosti E_{crf} [GPa]	31,6	33,6	33,5	34,0
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]	0,63	1,28	0,83	0,63
Obsah vzduchu [%]	4,5	3,0	6,2	5,7



Graf 4 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{crL} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech

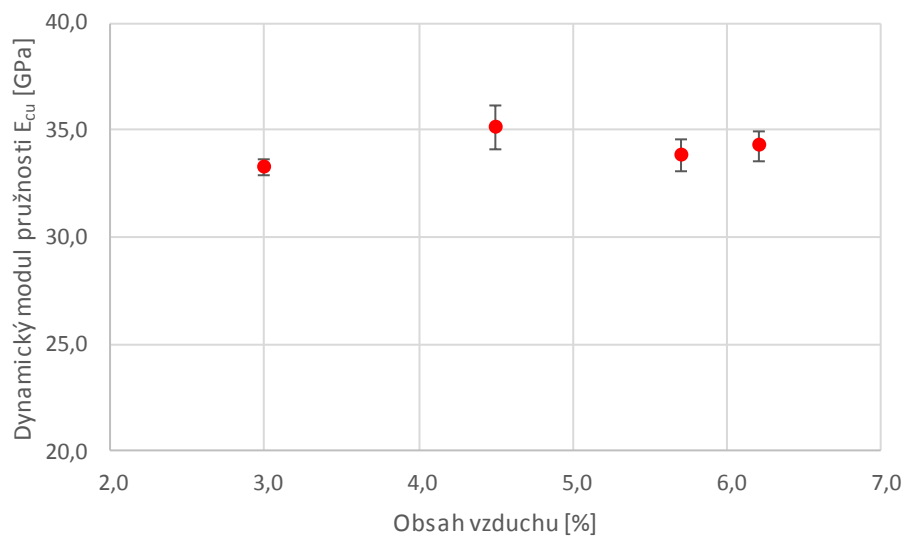


Graf 5 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{crF} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech

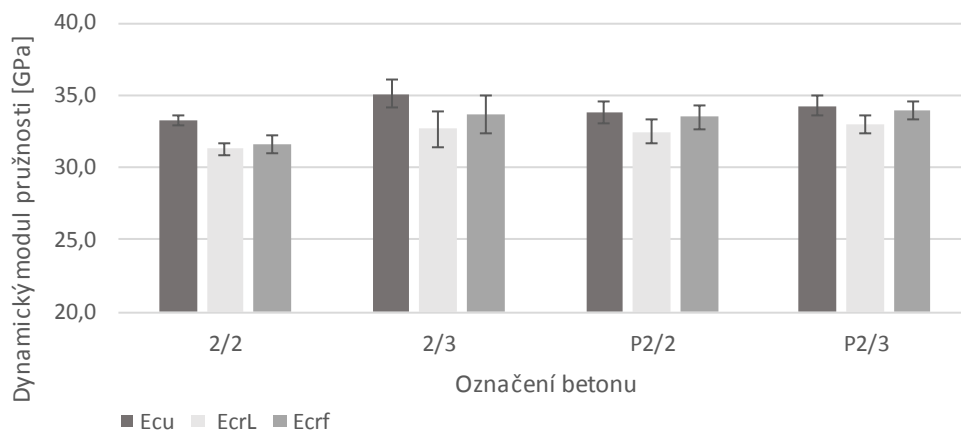
Dynamické moduly pružnosti získané ultrazvukovou impulzovou metodou jsou uvedeny v Tab. 7. V grafu 6 je znázorněna závislost modulu pružnosti na obsahu vzduchu v betonu. Dynamické moduly pružnosti betonu zjištěné touto metodou byly nepatrně vyšší, než z metody rezonanční, porovnání je v grafu 7.

Tab. 7 Naměřené dynamické moduly pružnosti

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Dynamický modul pružnosti E_{cu} [GPa]	33,3	35,1	33,8	34,3
Výběrová směrodatná odchylka [GPa]	0,36	1,02	0,75	0,69
Obsah vzduchu [%]	4,5	3,0	6,2	5,7



Graf 6 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{cu} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech



Graf 7 Porovnání dynamických modulů pružnosti

V Tab. 8 je srovnání statických modulů pružnosti naměřených a vypočtených dle vztahu (5) z ČSN EN 1992-1-1 [3]. Pevnostní třída betonu u válců výšky 100 mm a průměru 100 mm byla klasifikována dle ČSN EN 13791 [33]. Pro výpočet modulu pružnosti v Tab. 8 byla ale použita průměrná válcová pevnost betonu naměřená na vývrtech výšky 200 mm a průměru 75 mm. Postup byl odvozen z normy [33], poměrná štíhlost těchto těles je 2,66, tedy na stranu bezpečnou. Z tabulky je jasně patrné, že skutečné hodnoty modulu pružnosti jsou výrazně nižší, než hodnoty udávané normou. To by mohlo způsobit značné problémy u konstrukcí citlivých na deformace, proto je vhodné u těchto konstrukcí vždy stanovit přesný modul pružnosti.

Tab. 8 Porovnání statických modulů pružnosti

Označení betonu	2/2	2/3	P2/2	P2/3
Statický modul pružnosti [GPa]	27,5	28,6	28,8	28,5
Statický modul pružnosti dle ČSN EN 1992-1-1 [GPa]	34,2	35,0	34,0	36,0
Rozdíl [%]	19,6	18,4	15,5	20,7

5 Závěr

Cílem této práce bylo ověřit míru vlivu provzdušňovací přísady v receptuře čerstvého betonu na jeho výslednou hodnotu modulu pružnosti. Negativní vliv provzdušňovací přísady na modul pružnosti nemohl být z naměřených výsledku potvrzen. Zjištěný trend je opačný než je běžné. Příčinou pravděpodobně bude nižší vodní součinitel u provzdušňovaných betonů a z toho plynoucí jejich větší pevnost v tlaku. Svoji roli mohl sehrát i menší objem jemnozrnné frakce kameniva v provzdušňovaných betonech a tedy rozdílná křivka zrnitosti betonů. Záměrem bylo vyrobit pro experiment srovnatelné dvojice betonů 2/2 s P2/2 a 2/3 s P2/3, jen s rozdílem přidané provzdušňovací přísady. Toho bohužel nebylo docíleno z důvodu nedostatečné citlivosti dávkovacích zařízení jednotlivých složek betonu v betonárně.

Z naměřených hodnot statického modulu pružnosti je patrné, že se skutečné hodnoty modulu pružnosti mohou výrazně lišit od hodnot uvedených v ČSN EN 1992-1-1 [3]. To je způsobeno tím, že modul pružnosti betonu je ovlivňován i jinými parametry, než jakými je ovlivňována pevnost betonu. Proto je vhodné u předpjatých a na deformace citlivých konstrukcí stanovit přesnou hodnotu modulu pružnosti a předcházet tak nečekaným problémům.

6 Bibliografie

- [1] SVOBODA, . *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6007-1.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] ČSN EN 1992-1-1: *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 1. Praha: ČNI, 2011.
- [4] CIKRLE, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení. *Beton TKS*. 2010, **2010**(5), 40-44.
- [5] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Maltoviny a kamenivo*. Brno, 2004.
- [6] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Beton*. Brno, 2004.
- [7] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu. *SGS 2011*. 2011, **2011**(1), 18. Dostupné také z:
http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_priprav_a_HSC_a_UHSC.pdf
- [8] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 1. Praha: ČNI, 2009.
- [9] ČSN EN 206: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 1. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [10] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [11] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [12] ČSN EN 12390-6: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 1. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [13] ČSN EN 12390-1: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 1. Praha: ÚNMH, 2013.
- [14] ČSN EN 12390-2: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. 1. 2009: ÚNMZ, 2009.
- [15] HELA, Rudolf. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul M01: Technologie betonu*. Brno, 2005.

- [16] KLAUDOVÁ, Dana. *Možnosti testování a zlepšování trvanlivosti provzdušněných betonů*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT-Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [17] *Technologie 2017: 14. Konference*. 1. Jihlava: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906097-9-2.
- [18] ČSN 73 6174: *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. 1. Praha: ČNI, 1994.
- [19] ČSN EN 12390-13: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. 1. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [20] *ISO 1920-10: Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression*. 1st. Switzerland: International standard, 2010.
- [21] ČSN 73 1372: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. 1. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [22] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 1. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [23] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Petr CIKRLÉ, Tereza KOMÁRKOVÁ a Bronislava MORAVCOVÁ. *Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. Beton TKS*. 2014, **2014**(3), 74-79.
- [24] ČSN EN 12504-1: *Zkoušení betonu v konstrukcích: Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [25] ČSN EN 12390-4: *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. 1. Praha: ČNI, 2001.
- [26] ČSN ISO 6784: *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 1. Praha: ČNI, 1993.
- [27] ČSN EN 12504-4: *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 1. Praha: ČNIČ, 2005.
- [28] CIKRLÉ, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL. *Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. Beton TKS*. 2013, **2013**(3), 74-79.
- [29] ČSN EN 12350-5: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. 1. Praha: ČNI, 2000.
- [30] ČSN EN 12350-6: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 1. Praha: ČNI, 2000.
- [31] ČSN EN 12350-7: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. 1. Praha: ÚNMZ, 2009.

- [32] ČSN EN 12350-1: Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků. 1. Praha: ČNI, 2009.
- [33] ČSN EN 13791: Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích. 1. Praha: ČNI, 2007.
- [34] ANTON, Ondřej. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI02: Zkušebnictví a technologie*. Brno, 2005.
- [35] HALAMOVÁ, Romana. *Ověřování modulu pružnosti na konstrukcích*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT - Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb PhD.
- [36] KURKOVÁ, Zuzana a Libor ŽÍDEK. *Návody do cvičení z laboratoří stavebních hmot: Vysoká škola Báňská, fakulta stavební*. Ostrava, 2005.
- [37] ČSN EN 73 2011: *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. 1. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [38] Air Entrainment versus Air Entrapment. *Precast* [online]. Leed: Claude Goguen, 2012 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://precast.org/2012/12/air-entrainment-versus-air-entrapment/>

7 Seznam obrázků

Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Fülleroovy rovnice pro $D_{\max} = 16$ mm [2]	14
Obr. 2 Sednutí kužele betonu s různou třídou konzistence (od S5 k S1) [2].....	15
Obr. 3 Vyhovující porušení zkušebních válců [36]	16
Obr. 4 Princip expanze mrznoucí vody do mikropórů vytvořených AEA přísadou [38].....	17
Obr. 5 Deformační diagram betonu v tlaku [6]	18
Obr. 6 Schéma měření modulu pružnosti zkouškou v tahu ohybem [18]	20
Obr. 7 Umístění měřicího zařízení na zkušebním tělese [34].....	21
Obr. 8 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody A [19], [35]	22
Obr. 9 Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa u metody B [19], [35]	23
Obr. 10 Poloha snímače a budiče pro příčné kmitání [34].....	25
Obr. 11 Poloha snímače a budiče pro podélné kmitání [34].....	25
Obr. 12 Poloha snímače a budiče pro kroutivé kmitání [34]	25
Obr. 13 Průběh jádrového vrtání	30
Obr. 14 Jádrové vývrty získané z betonu P2/3	30
Obr. 15 Úprava dosedacích ploch	31
Obr. 16 Ukázka porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku.....	31
Obr. 17 Vzorek betonu P2/2 osazený měřicím zařízením (tenzometry), které je součástí lisu FORM+TEST 3-3000 ALPHA	32
Obr. 18 Ukázka měření vlastní příčné frekvence tělesa.....	33
Obr. 19 Měření dynamického modulu pružnosti impulzovou UZ metodou	34

8 Seznam tabulek

Tab. 1 Receptura jednotlivých betonů	28
Tab. 2 Hodnoty vodního součinitele	29
Tab. 3 Vlastnosti čerstvého betonu.....	29
Tab. 4 Průměrné pevnosti v tlaku stanovené na vývrtech.....	34
Tab. 5 Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti	35
Tab. 6 Naměřené dynamické moduly pružnosti	36
Tab. 7 Naměřené dynamické moduly pružnosti	38
Tab. 8 Porovnání statických modulů pružnosti	39

9 Seznam grafů

Graf 1 Průběh zatěžování a deformací vzorku z Obr. 17.....	32
Graf 2 Průměrná pevnost v tlaku stanovená na vývrtech průměru 100 mm	35
Graf 3 Průměrný statický modul pružnosti v závislosti na obsahu vzduchu v betonech.....	36
Graf 4 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{crL} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech	37
Graf 5 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{crf} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech.....	37
Graf 6 Průměrný dyn. modul pružnosti E_{cu} v závislosti na obsahu vzduchu v betonech.....	38
Graf 7 Porovnání dynamických modulů pružnosti	38

10 Přílohy

Rozměry, hmotnosti a objemové hmotnosti

Beton 2/2				
Vzorek	d [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]
2/2-1A	99,7	99,7	1753,6	2254
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	1752,2	2258
2/2-1A1	73,9	76,6	742,2	2260
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
Beton 2/3				
Vzorek	d [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]
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	74,0	202,3	1970,4	2265
2/3-3B2	73,8	200,9	1944,5	2260

Beton P2/2				
Vzorek	d [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]
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	198,7	1945,0	2266
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
Beton P2/3				
Vzorek	d [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]
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	1889,6	2264
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

Statický modul pružnosti $E_{c,s}$ a zmenšovací součinitelé

Ozn. Vzorku	$E_{c,s}$ [GPa]	K_u	K_{rL}	K_{rf}
2/2-1A2	27,6	0,82	0,88	0,88
2/2-1B2	26,1	0,79	0,83	0,81
2/2-2A2	28,0	0,84	0,90	0,89
2/2-2B2	28,1	0,86	0,90	0,92
2/2-3A2	27,7	0,82	0,87	0,86
2/2-3B2	27,3	0,82	0,89	0,86
Průměr	27,5	0,82	0,88	0,87
Zmenšovací souč. dle [37]		0,83	0,91	0,91
Výběrová směrodatná odchylka	0,66			
2/3-1A2	29,7	0,82	0,86	0,84
2/3-1B2	29,8	0,82	0,88	0,85
2/3-2A2	27,9	0,79	0,87	0,85
2/3-2B2	27,7	0,82	0,87	0,83
2/3-3A2	28,5	0,83	0,88	0,86
2/3-3B2	27,9	0,81	0,89	0,87
Průměr	28,6	0,81	0,87	0,85
Zmenšovací souč. dle [37]		0,83	0,91	0,91
Výběrová směrodatná odchylka	0,86			
P2/2-1A2	27,9	0,82	0,88	0,86
P2/2-1B2	27,9	0,86	0,89	0,85
P2/2-2A2	30,0	0,87	0,90	0,87
P2/2-2B2	28,5	0,83	0,86	0,83
P2/2-3A2	29,9	0,87	0,91	0,90
P2/2-3B2	28,4	0,84	0,87	0,85
Průměr	28,8	0,85	0,89	0,86
Zmenšovací souč. dle [37]		0,86	0,93	0,93
Výběrová směrodatná odchylka	0,87			
P2/3-1A2	28,4	0,81	0,85	0,83
P2/3-1B2	29,1	0,84	0,86	0,83
P2/3-2A2	29,0	0,84	0,89	0,84
P2/3-2B2	28,9	0,87	0,88	0,86
P2/3-3A2	27,6	0,82	0,85	0,83
P2/3-3B2	28,0	0,81	0,86	0,83
Průměr	28,5	0,83	0,86	0,84
Zmenšovací souč. dle [37]		0,9	0,95	0,95
Výběrová směrodatná odchylka	0,55			

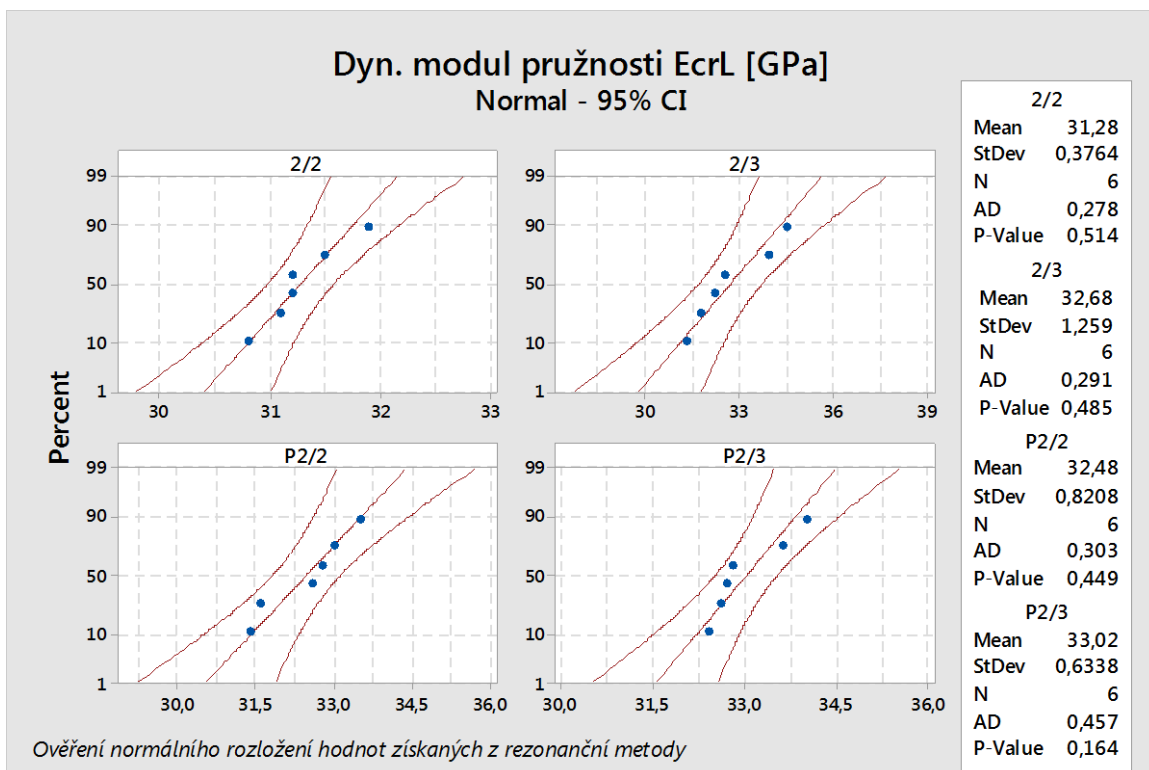
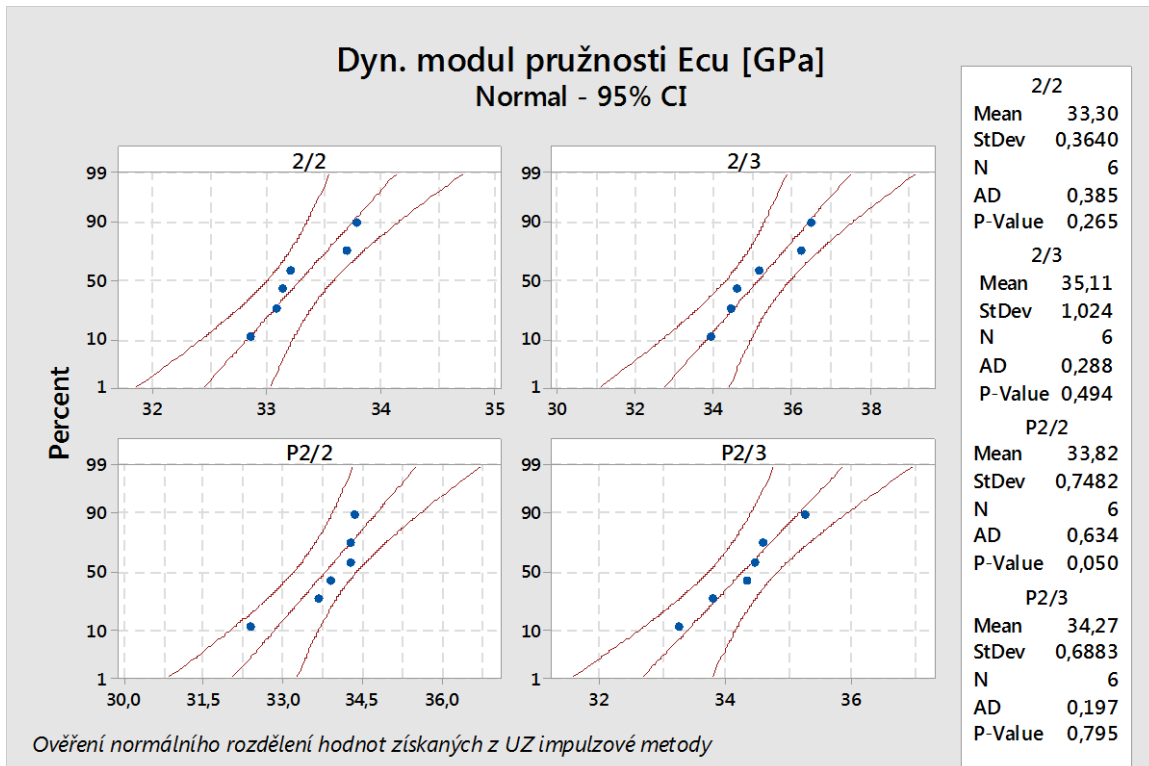
Dynamický modul pružnosti z UZ impulzové metody

Vzorek	T ₁ [μs]	T ₂ [μs]	T ₃ [μs]	v ₁ [m/s]	v ₂ [m/s]	v ₃ [m/s]	v _L [m/s]	E _{cu} [GPa]
2/2-1A2	48,9	49,3	49,2	4103	4070	4078	4084	33,7
2/2-1B2	49,8	49,9	50,1	4054	4046	4030	4043	33,1
2/2-2A2	49,3	49,4	49,3	4060	4052	4060	4057	33,2
2/2-2B2	50,3	50,1	49,9	4015	4031	4047	4031	32,9
2/2-3A2	49,2	49,2	48,8	4065	4065	4098	4076	33,8
2/2-3B2	49,4	50,1	50	4083	4026	4034	4047	33,1
Průměr								33,3
Výběrová směrodatná odchylka								0,36
Vzorek	T ₁ [μs]	T ₂ [μs]	T ₃ [μs]	v ₁ [m/s]	v ₂ [m/s]	v ₃ [m/s]	v _L [m/s]	E _{cu} [GPa]
2/3-1A2	48,4	47,7	48,4	4171	4232	4171	4191	36,2
2/3-1B2	47,6	47,8	47,3	4214	4197	4241	4218	36,5
2/3-2A2	48,3	48,8	48,4	4170	4127	4161	4153	35,1
2/3-2B2	49,1	49,1	49,3	4092	4092	4076	4087	33,9
2/3-3A2	49,1	49,2	49,4	4121	4113	4096	4110	34,4
2/3-3B2	48,8	48,6	48,8	4116	4133	4116	4122	34,6
Průměr								35,1
Výběrová směrodatná odchylka								1,02
Vzorek	T ₁ [μs]	T ₂ [μs]	T ₃ [μs]	v ₁ [m/s]	v ₂ [m/s]	v ₃ [m/s]	v _L [m/s]	E _{cu} [GPa]
P2/2-1A2	48,3	48,2	48,3	4128	4137	4128	4131	33,9
P2/2-1B2	49,3	49,3	49,4	4049	4049	4041	4047	32,4
P2/2-2A2	48,5	48,6	48,3	4098	4089	4115	4100	34,3
P2/2-2B2	48,2	48,3	48,5	4133	4124	4107	4122	34,4
P2/2-3A2	48,3	48,2	48,4	4127	4136	4119	4127	34,3
P2/2-3B2	48,9	49,4	48,7	4102	4061	4119	4094	33,7
Průměr								33,8
Výběrová směrodatná odchylka								0,75
Vzorek	T ₁ [μs]	T ₂ [μs]	T ₃ [μs]	v ₁ [m/s]	v ₂ [m/s]	v ₃ [m/s]	v _L [m/s]	E _{cu} [GPa]
P2/3-1A2	48,3	47,3	47,9	4121	4208	4155	4161	35,2
P2/3-1B2	48,1	48,3	48,4	4124	4107	4098	4109	34,6
P2/3-2A2	48,5	48,5	48,5	4108	4108	4108	4108	34,3
P2/3-2B2	49,4	49,3	49,4	4035	4043	4035	4037	33,2
P2/3-3A2	48,6	49,1	49,1	4102	4060	4060	4074	33,8
P2/3-3B2	48,1	48,3	47,7	4113	4096	4147	4118	34,5
Průměr								34,3
Výběrová směrodatná odchylka								0,69

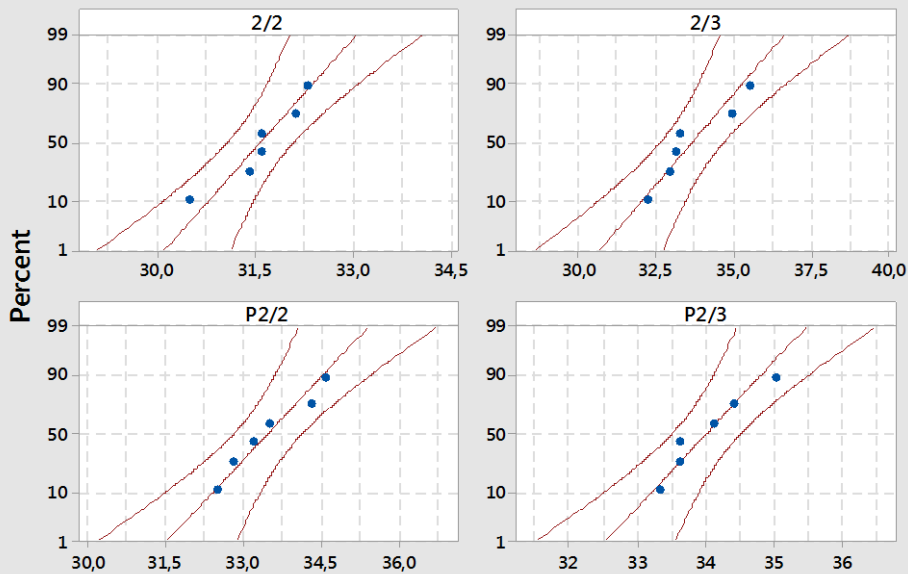
Dynamické moduly pružnosti z rezonanční metody

Vzorek	f_L [kHz]	f_t [kHz]	f_f [kHz]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
2/2-1A2	9,289	6,029	4,721	31,2	31,4	13,1
2/2-1B2	9,274	6,023	4,724	31,5	32,1	13,3
2/2-2A2	9,319	6,026	4,756	31,2	31,6	13
2/2-2B2	9,209	5,975	4,604	31,1	30,5	13,1
2/2-3A2	9,391	6,089	4,792	31,9	32,3	13,4
2/2-3B2	9,17	5,963	4,688	30,8	31,6	13
Průměr				31,3	31,6	13,2
Výběrová směrodatná odchylka				0,38	0,63	0,16
Vzorek	f_L [kHz]	f_t [kHz]	f_f [kHz]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
2/3-1A2	9,614	6,288	4,917	34,5	35,5	14,8
2/3-1B2	9,617	6,247	4,944	33,9	34,9	14,3
2/3-2A2	9,358	6,059	4,783	32,2	32,9	13,5
2/3-2B2	9,334	6,083	4,837	31,7	33,2	13,5
2/3-3A2	9,364	6,032	4,765	32,5	33,1	13,5
2/3-3B2	9,26	6,023	4,753	31,3	32,2	13,2
Průměr				32,7	33,6	13,8
Výběrová směrodatná odchylka				1,26	1,28	0,61
Vzorek	f_L [kHz]	f_t [kHz]	f_f [kHz]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
P2/2-1A2	9,489	6,153	4,906	31,6	32,5	13,3
P2/2-1B2	9,47	6,189	4,925	31,4	32,8	13,4
P2/2-2A2	9,672	6,318	5,016	33,5	34,6	14,3
P2/2-2B2	9,617	6,263	4,998	33	34,3	14
P2/2-3A2	9,599	6,226	4,925	32,8	33,2	13,8
P2/2-3B2	9,525	6,226	4,906	32,6	33,5	13,9
Průměr				32,5	33,5	13,8
Výběrová směrodatná odchylka				0,82	0,83	0,38
Vzorek	f_L [kHz]	f_t [kHz]	f_f [kHz]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
P2/3-1A2	9,69	6,281	4,98	33,6	34,1	14,1
P2/3-1B2	9,745	6,318	5,053	34	35	14,3
P2/3-2A2	9,544	6,244	4,998	32,7	34,4	14
P2/3-2B2	9,544	6,226	4,925	32,8	33,6	14
P2/3-3A2	9,489	6,189	4,906	32,4	33,3	13,8
P2/3-3B2	9,599	6,263	4,998	32,6	33,6	13,9
Průměr				33,0	34,0	14,0
Výběrová směrodatná odchylka				0,63	0,63	0,17

Testy normality



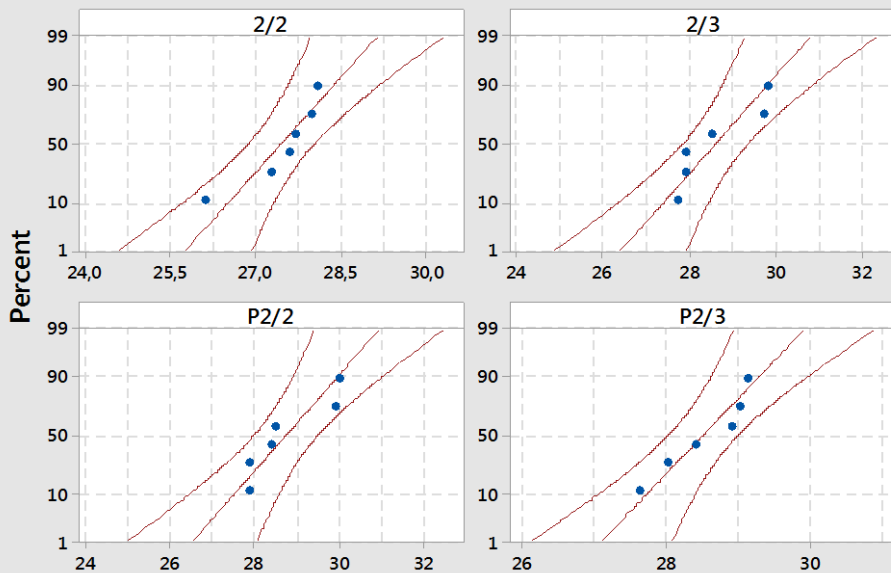
Dyn. modul pružnosti Ecrf [GPa] Normal - 95% CI



Ověření normálního rozložení hodnot získaných z rezonanční metody

2/2	
Mean	31,58
StDev	0,6306
N	6
AD	0,315
P-Value	0,416
2/3	
Mean	33,63
StDev	1,277
N	6
AD	0,414
P-Value	0,219
P2/2	
Mean	33,48
StDev	0,8280
N	6
AD	0,222
P-Value	0,698
P2/3	
Mean	34
StDev	0,6293
N	6
AD	0,265
P-Value	0,545

Stat. modul pružnosti Ec,s [GPa] Normal - 95% CI



Ověření normálního rozložení hodnot statického modulu pružnosti v tlaku

2/2	
Mean	27,47
StDev	0,7285
N	6
AD	0,491
P-Value	0,129
2/3	
Mean	28,58
StDev	0,9432
N	6
AD	0,537
P-Value	0,097
P2/2	
Mean	28,77
StDev	0,9501
N	6
AD	0,531
P-Value	0,101
P2/3	
Mean	28,5
StDev	0,6066
N	6
AD	0,319
P-Value	0,407