



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV VÍCENÁSOBNÉHO CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA HODNOTU STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU V KONSTRUKCÍCH

INFLUENCE OF MULTIPLE CYCLIC LOADING ON THE VALUE OF MODULUS OF ELASTICITY
OF CONCRETE AT THE CONSTRUCTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAELA POTOČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR MISÁK, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Michaela Potočková
Název	Vliv vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu statického modulu pružnosti betonu v tlaku v konstrukcích
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Misák, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- [1] ČSN ISO 6784. Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Praha: Vydavatelství norem, 1992.
- [2] ČSN EN 1992-1-1. Navrhování Betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla pravidla pro pozemní stavby. Praha: Vydavatelství norem, 2002.
- [3] ČSN EN 12390-13 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku, 2014.
- [4] ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, 2014.
- [5] HUŇKA, P.; KOLÍSKO, J.; ŘEHÁČEK, S.; VOKÁČ, M. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu – rekapitulace. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, roč. 2012, č. 4, s. 62 - 67. ISSN 12133116.

Zásady pro vypracování

Student vypracuje rešerši současného stavu řešené problematiky statického modulu pružnosti betonu v konstrukcích. Dále student navrhne experiment, jehož cílem bude ověřit předpoklad změny statického modulu pružnosti na konstrukčních betonech. Dosažené výsledky poté student aplikuje při analýze modelu skutečné konstrukce.

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).
- 3.

.....
Ing. Petr Misák, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá závislostí statického modulu pružnosti betonu v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů. Pomocí odporových tenzometrů byly měřeny deformace zkušebních těles v průběhu vícenásobného cyklického zatěžování. Bylo provedeno až 1600 zatěžovacích cyklů. Z naměřených deformací byl stanoven statický modul pružnosti v tlaku. Cílem práce je posouzení změny hodnot statického modulu pružnosti v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů.

ABSTRACT

This thesis deals with the dependence of static modulus of elasticity of concrete in compression on number of load cycles. The deformation of test specimens during multiple cyclic loading was measured with resistive strain gages. Up to 1600 load cycles was conducted. Static modulus of elasticity in compression was determined from measured deformations. The aim of this thesis is assessment changes in the values of static modulus of elasticity depending on the number of load cycles.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, modul pružnosti, vícenásobné cyklické zatěžování

KEY WORDS

Concrete, modulus of elasticity, multiple cyclic loading

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Michaela Potočková *Vliv vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu statického modulu pružnosti betonu v tlaku v konstrukcích*. Brno, 2016. 52 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Misák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 13. 1. 2016

.....

podpis autora

Bc. Michaela Potočková

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Petru Misákovi, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost, cenné rady a čas, který mi věnoval při zpracování mé diplomové práce. Ráda bych také poděkovala Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. za pomoc při měření experimentální části. Dále děkuji své rodině, že mi umožnila studium a po celou dobu mě podporovala.

Příspěvek vznikl za podpory GAČR 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Současný stav řešené problematiky	10
2.1	Beton a jeho vlastnosti	10
2.2	Pevnost betonu	10
2.3	Modul pružnosti betonu.....	12
2.3.1	Hodnoty modulu pružnosti	13
2.3.2	Dynamický modul pružnosti betonu.....	15
2.3.3	Statický modul pružnosti betonu	19
2.3.4	Statický vs. dynamický.....	20
2.4	Statický modul pružnosti betonu v tlaku.....	21
2.5	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	22
2.5.1	ČSN ISO 1920-10.....	22
2.5.2	ČSN ISO 6784.....	24
2.5.3	ČSN EN 12390-13	26
2.5.4	Porovnání norem.....	30
3	Experimentální část	31
3.1	Popis experimentu.....	31
3.1.1	Výroba zkušebních těles.....	31
3.1.2	Příprava zkušebních těles.....	33
3.1.3	Měření dynamického modulu pružnosti v tlaku	34
3.1.4	Průběh zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku	36
3.2	Výsledky vícenásobné cyklické zatěžovací zkoušky.....	40

3.3 Shrnutí výsledků	42
4 Závěr	46
Seznam použité literatury	47
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	51
Seznam příloh.....	52

1 ÚVOD

V současné době je nejpoužívanějším stavebním materiálem beton. Jeho předností je především pevnost a možnost dát betonové konstrukci téměř libovolný tvar. Stejně tak by měl být ale vnímán i modul pružnosti, jakožto jedna ze základních pevnostně-deformačních charakteristik betonu.

Při navrhování konstrukcí je nyní moderní myslet více na vzhled konstrukce a ne pouze na její únosnost a stabilitu. Jsou tedy navrhovány konstrukce štíhlejší s většími rozpětími. Tyto konstrukce jsou pak často citlivější na přetvoření či deformace. Jednou z variant, jak možná přetvoření ovlivnit, je klást větší důraz na modul pružnosti. I když se nyní čerstvý beton vyrábí v betonárnách, které zajišťují lepší rovnoměrnost betonu, určí se většinou pouze třída betonu. Trend uvést bližší specifikace, konkrétně požadovaný modul pružnosti, při výrobě čerstvého betonu však ještě u veřejnosti úplně zažitý není [11].

Projektanti by si však měli uvědomit, že v rámci pevnostní třídy je možné dosáhnout různých hodnot modulu pružnosti. Zadá-li se při výrobě betonu požadavek pouze na pevnostní třídu betonu, je možné, že hodnota modulu pružnosti bude menší, než jak je uvedeno v Eurokódu 2 [8]. Zadáním požadavku na konkrétní hodnotu modulu pružnosti betonu je tak možné předejít problémům s průhyby, které jsou po realizaci konstrukce větší, než vypočtené na základě hodnot uváděných v Eurokódu 2 [8], [11].

V současnosti se však problematika modulů pružnosti dostává čím dál více do popředí. Skutečnost, že hodnota modulu pružnosti není závislá pouze na pevnostní třídě, je již známa. Na hodnotu modulu pružnosti má vliv spousta faktorů, některé již prozkoumány byly, jiné ne. Tato práce se zabývá jedním z možných vlivů, kterým doposud nebylo věnováno příliš pozornosti. Je zde zkoumán možný vliv vícenásobného cyklického zatěžování na statický modul pružnosti betonu v tlaku. Parametry zkoušení se opírají o normu ČSN EN 12390-13 [26], konkrétně pak o metodu B této normy. Bylo provedeno až 1600 zatěžovacích cyklů, jejichž trvání přesáhlo i 24 hodin. Vzhledem k časové náročnosti zkoušení byly dle metody B nastaveny parametry tak, aby výrazně zkrátily dobu trvání jednoho cyklu. Cílem je tedy stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku při vícenásobném cyklickém zatěžování, jeho porovnání s hodnotami uváděnými v Eurokódu 2 [8] pro jednotlivé pevnostní třídy a posouzení vlivu vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu statického modulu pružnosti betonu v tlaku.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Beton a jeho vlastnosti

Beton je umělý stavební materiál vyráběný ze směsi drobného a hrubého kameniva, cementu a vody s případným přidáním přísad a příměsí zlepšujících některé jeho vlastnosti [1]. V současné době je beton nejpoužívanějším materiálem využívaným ve všech stavebních oborech. Jeho přednostmi jsou především snadná dostupnost surovin, jednoduchost výroby, snadná zpracovatelnost čerstvé hmoty, dosažení požadovaných tvarů a technických parametrů výrobků. Prostý beton je používán zejména na konstrukce namáhané tlakem (základy, sloupy, stěny). Působí-li na konstrukce tah, smyk či ohyb, vkládá se do tažených oblastí betonu ocelová výztuž, jedná se o tzv. železobeton [2].

Vlastnosti betonu jsou ovlivňovány jejich jednotlivými složkami, způsobem výroby, zpracováním a ošetřováním tvrdnoucího betonu. K těmto vlastnostem se řadí vodotěsnost, mrazuvzdornost, trvanlivost a tepelné vlastnosti [2].

Nejdůležitějšími vlastnostmi konstrukčních betonů jsou mechanické vlastnosti, mezi které se řadí pevnost a modul pružnosti betonu [2].

2.2 Pevnost betonu

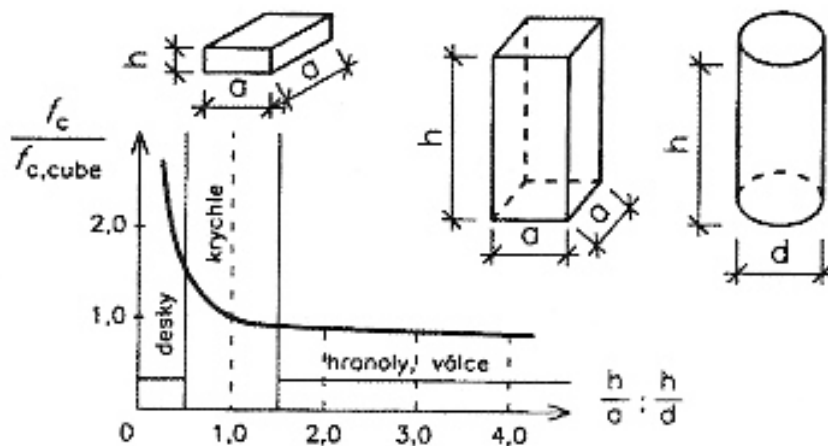
Pevnost je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností betonu. Vyjadřuje mezní hodnotu napětí, která vznikají působením vnějších sil, resp. odpor betonu proti změně jeho tvaru a proti porušení vlivem vnějšího působení. Pevnost ztvrdlého betonu je výsledkem pevnosti cementového tmelu, kameniva a jejich soudržností. Pevnost cementového tmelu je dána druhem a třídou cementu, jeho poměrem vzhledem k množství kameniva, množstvím záměsové vody a její kvalitou a také způsobem ošetřování tvrdnoucího betonu a prostředím. Zajímavý je vliv množství záměsové vody. Pro každou recepturu je jiné optimální množství záměsové vody. Při vyšší dávce je čerstvý beton dobře zpracovatelný, ale výsledná pevnost nižší. Při menším množství je beton naopak hůře hutnitelný, ale v důsledku je pevnost rovněž nižší. Samotným kamenivem je pak výsledná pevnost ovlivňována především tvarem a povrchem zrn, jejich čistotou a zrnitostí [2].

Nárůst pevnosti ztvrdlého betonu je závislý na čase, nejstrmější je v prvních 28 dnech. Dále pak pokračuje pozvolna, což může trvat i několik let. Rychlost narůstání je různá, např. podle druhu použitého cementu nebo v závislosti na vlhkosti prostředí [2].

Vzhledem k tomu, že je pevnost vyjadřována jako mezní hodnota působícího napětí, vždy je potřeba stanovit, o jaké napětí se jedná a jakým způsobem se jeho velikost určí. U betonu je rozeznávána podle způsobu namáhání pevnost v tlaku, pevnost v tlaku za ohybu, pevnost v tahu prostém, pevnost v tahu ohybem, popř. pevnost v tahu příčném. Stejně tak je možné rozeznávat pevnost podle tvaru zkušebních těles. Takto rozeznáváme pevnost krychelnou $f_{c,cube}$, válcovou $f_{c,cyl}$ a hranolovou $f_{c,prism}$. Označení válcové pevnosti je často zkracováno na f_c , ve vztahu ke krychelné pevnosti je možné uvažovat vztah [3]:

$$f_c = (0,80 \text{ až } 0,85)f_{c,cube}. \quad (1)$$

Pevností v tlaku se rozumí hodnota, kterou má zkušební těleso v okamžiku porušení při zatížení ve zkušebním stroji. Pevnost betonu v tlaku je možné ovlivnit štíhlostí zkušebního vzorku (poměr výšky h k průměru základny d , popř. hraně základny a). Z Obr. 1 je patrné, že čím více se výška zkušebního tělesa v poměru k jeho základně zvětšuje, tím víc se eliminuje účinek tření ve styku tlačené plochy lisu s tělesem [3].



Obr. 1 Poměr pevnosti betonu v tlaku k pevnosti krychelné v závislosti na štíhlosti zkušebního tělesa [3]

Podle zkušebního tělesa je rozlišována pevnost krychelná, válcová, hranolová [3]. Stanovení těchto pevností se řídí normou ČSN EN 12390-3 [4], přičemž zkušební tělesa jsou vyráběna a ošetřována dle normy ČSN EN 12390-2 [5], jejichž tvar a rozměry odpovídají normě ČSN EN 12390-1 [6].

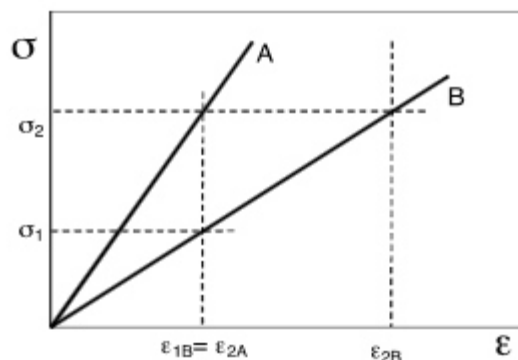
Pevnost betonu v tlaku je klasifikována pomocí pevnostních tříd, které odpovídají charakteristické válcové pevnosti $f_{ck,cyl}$ nebo krychelné pevnosti $f_{ck,cube}$ podle evropské normy ČSN EN 206 [7]. Podle normy ČSN EN 12390-1 [6] je válcová pevnost určována na zkušebních tělesech tvaru válce průměru 150 mm a výšky 300 mm a krychelná pevnost na zkušebních tělesech tvaru krychle o délce hrany 150 mm. Pevnostní třídy vycházejí z charakteristické válcové pevnosti betonu stanovené ve stáří 28 dní. Jsou označovány písmenem C a zlomkem, který vyjadřuje hodnotu charakteristické válcové pevnosti $f_{ck,cyl}$ v čitateli a krychelné pevnosti $f_{ck,cube}$ ve jmenovateli. Jednotlivé třídy a jim odpovídající válcová a krychelná pevnost jsou zobrazeny v Tabulka 1 [2], [8].

Tabulka 1 Pevnostní třídy betonu [8]

Třída	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
$f_{ck,cyl}$ [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105

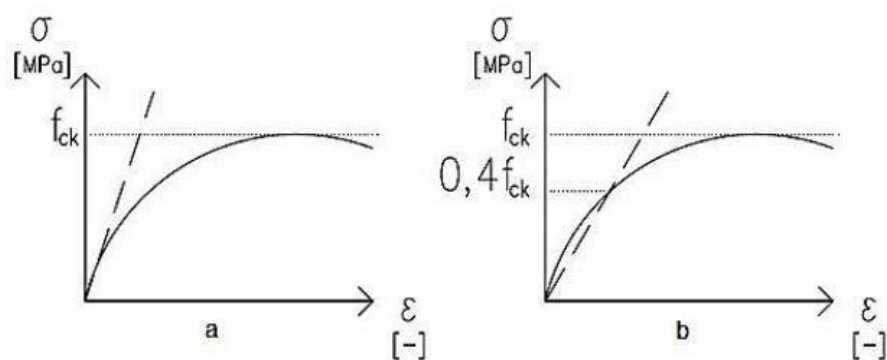
2.3 Modul pružnosti betonu

Modul pružnosti je řazen mezi základní materiálové charakteristiky betonu. Vyjadřuje schopnost materiálu přetvářet se, a proto se využívá při výpočtu deformací (průhybů, smrštění, dotvarování) betonových prvků a konstrukcí. Obecně platí, že čím je hodnota modulu pružnosti větší, tím menší jsou deformace. Působí-li stejně velké napětí na materiály s různými moduly pružnosti, vznikne větší deformace u materiálu s menší hodnotou modulu pružnosti. To je znázorněno na Obr. 2, kde při působení stejného napětí materiál „A“ dosahuje menších deformací než materiál „B“. Materiál „A“ má tedy vyšší hodnotu modulu pružnosti [9], [10].



Obr. 2 Diagram σ - ϵ dvou pružných materiálů s rozdílným modulem pružnosti [10]

Modul pružnosti se podle způsobu měření dělí na statický a dynamický a podle odečtení z deformačního diagramu na tečnový (viz. Obr. 3a) a sečnový (viz. Obr. 3b) [10]. Statický a dynamický modul pružnosti včetně deformačního diagramu budou podrobněji popsány níže v dalších kapitolách.



Obr. 3 Deformační diagram - znázornění tečnového a sečnového modulu pružnosti betonu [10]

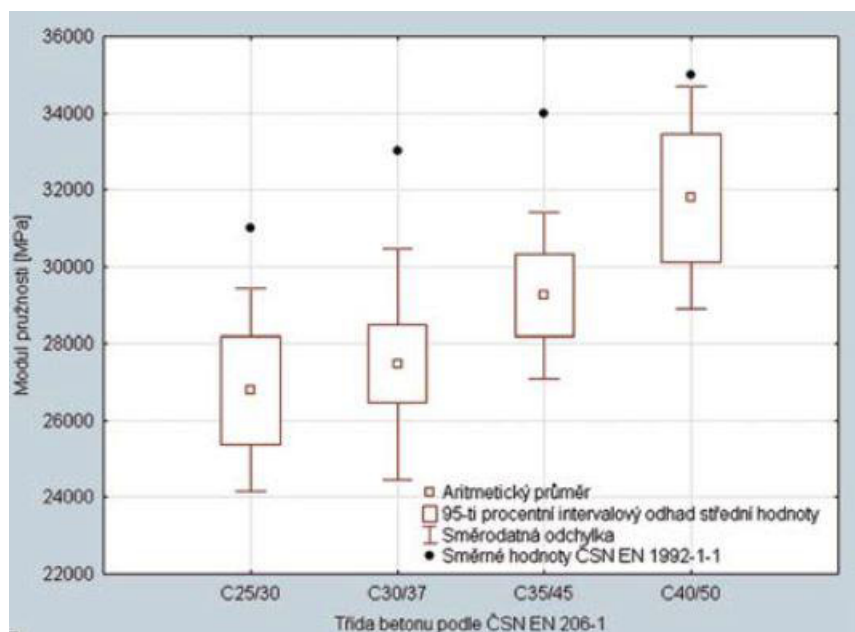
2.3.1 Hodnoty modulu pružnosti

Pro navrhování betonových konstrukcí se často hodnoty modulu pružnosti uvažují na základě pevnostních tříd podle ČSN EN 1992-1-1 [8]. Pružné deformace betonu velkou měrou závisí na jeho složení, proto hodnoty uvedené v Tabulka 2 se mají považovat za směrné. A jak říká norma [8], v případě, že je konstrukce citlivá na odchylky od obecných hodnot, mají se hodnoty modulu pružnosti stanovit přesněji [8].

Tabulka 2 Směrné hodnoty sečnového modulu pružnosti betonu v tlaku podle pevnostních tříd [8]

Třída	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Je třeba si ale uvědomit, že modul pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy může dosahovat různých hodnot, čímž se zabývali autoři článku [11]. V experimentu, který článek popisuje, byla vyrobena zkušební tělesa různých receptur, podle krychelné pevnosti byla tělesa zatříděna do pevnostních tříd a následně byly stanoveny hodnoty modulu pružnosti. Výsledky tohoto experimentu zobrazuje graf na Obr. 4, který znázorňuje porovnání směrných hodnot uvedených v normě ČSN EN 1992-1-1 [8] s výsledky měření [11].



Obr. 4 Krabicový graf hodnot modulu pružnosti ve vybraných pevnostních třídách [11]

Z výše zmíněného experimentu je tedy zřejmé, že v rámci jedné pevnostní třídy dochází k velké variabilitě hodnot modulu pružnosti a že směrné hodnoty modulu pružnosti uvedené v normě ČSN EN 1992-1-1 jsou nadhodnocené pro všechny pevnostní třídy. Modul pružnosti tedy nezávisí pouze na pevnosti betonu v tlaku, ale může být ovlivněn mnoha dalšími vlivy. Je možné je rozdělit na vlivy technologické a zkušební. Mezi technologické

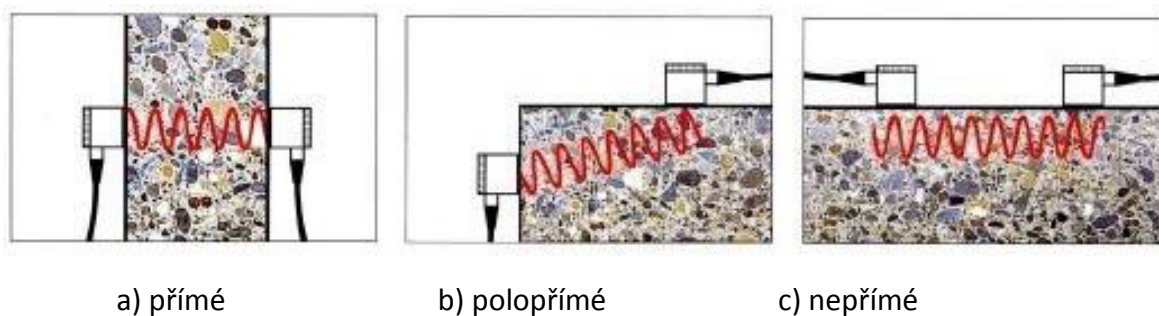
vlivy primárně patří složení betonu včetně druhu, množství a velikosti kameniva, typu a množství cementu, příměsí a přísad, vodní součinitel a provzdušnění. Dalšími technologickými vlivy jsou míra zhutnění, teplota a vlhkost při ošetřování, a jiné. Jako zkušební vlivy je možné označovat volbu zkušební metody (destruktivní x nedestruktivní), zatěžovací úroveň, velikost, tvar a stáří zkušebních těles, nastavitelné parametry při zkoušení a jiné [12].

V současné době, kdy se při návrhu konstrukcí nemyslí pouze na jejich únosnost, ale i vzhled a jsou navrhovány konstrukce štíhlejší s většími rozpětími, je potřeba dát větší důraz na přetvárné charakteristiky. Při návrhu tedy nestačí myslet pouze na pevnostní třídu, ale i na požadovaný modul pružnosti, který má velký vliv na průhyb konstrukcí [11].

2.3.2 Dynamický modul pružnosti betonu

Při stanovení dynamického modulu pružnosti využíváme charakteristiky šíření vlnění, které jsou vázány na fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. Jedná se o tzv. nedestruktivní zkoušení, kdy nevznikají žádná napětí zapříčiňující vznik deformací. Nejčastěji používanými nedestruktivními metodami jsou ultrazvuková a rezonanční metoda [10].

Ultrazvuková impulzová metoda – je popsána normou ČSN 73 1371 [13]. Výhodou ultrazvukového (UZ) vlnění je, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu, je tedy možné ho využít k měření samostatných prvků, ale i konstrukcí in situ. Metoda je založena na opakovaném vysílání ultrazvukových impulzů do zkoušeného materiálu. Základem UZ měřicího přístroje jsou dvě sondy, jedna UZ vlnění vysílá (budič) a druhá, která toto vlnění přijímá (snímač). Na základě použitého přístroje a kmitočtu budiče, se volí vhodná velikost měřicí základny. Ve stavebnictví se používá UZ vlnění s kmitočty 20 kHz až 150 kHz. Podle přístupnosti zkoušeného objektu a možnosti umístění sond je zvolen způsob prozvučování (Obr. 5) [16].



Obr. 5 Typy prozvučování měřeného objektu [14]

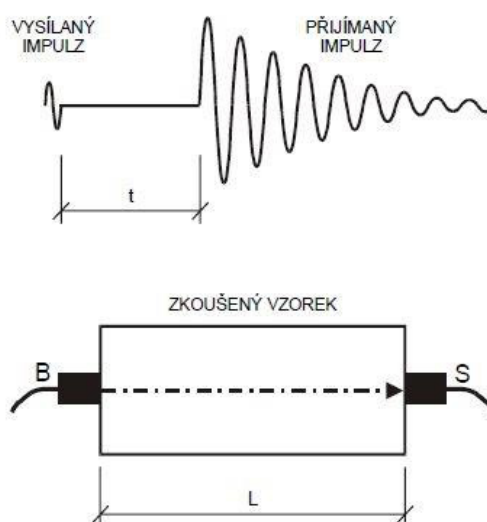
Podstatou této metody je rychlost šíření ultrazvukového vlnění v materiálu. Pomocí sond s akustickým vazebním prostředkem změříme dobu průchodu impulzu. Musí se brát v potaz i doba průchodu akustickým vazebním prostředkem a sondou. Tento tzv. „mrtvý čas“ si změříme pomocí etalonu, jehož časová charakteristika je přesně známá. Impulzovou rychlost šíření UZ vlnění spočítáme dle [16]:

$$v_L = \frac{L}{t - t_0}, \quad (2)$$

kde L – délka měřicí základny;

t – doba průchodu změřená přístrojem;

t_0 – mrtvý čas.



Obr. 6 Schéma měření doby průchodu impulzu UZ vlnění [16]

Samotný dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu} se vypočítá [15]:

$$E_{bu} = \frac{\rho \cdot v_L^2}{k^2}, \quad (3)$$

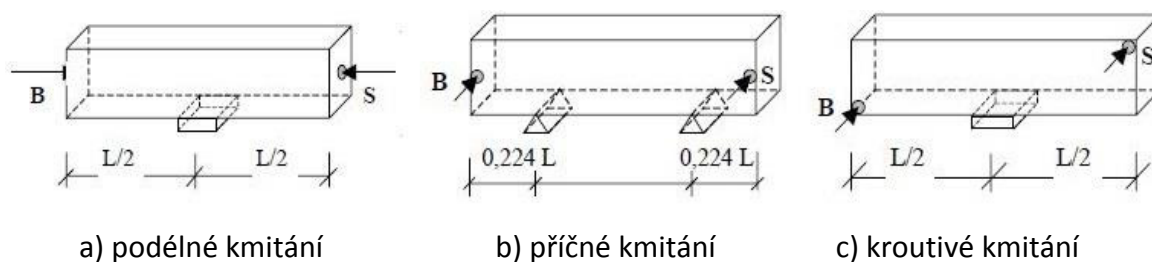
kde v_L – rychlost šíření impulzu UZ vlnění;

k – koeficient rozměrnosti.

Provádí-li se měření na stejném materiálu o různé rozměrnosti, rychlost šíření UZ vlnění je rozdílná. Vliv rozměrnosti je závislý na vztahu rozměrů měřeného objektu a délky vlny UZ vlnění. Prostředí může být jednorozměrné, dvojrozměrné, trojrozměrné nebo přechodové. Vliv rozměrnosti prostředí zastupuje ve výpočtu koeficient rozměrnosti k [15].

Rezonanční metoda – je popsána v normě ČSN 73 1372 [17]. Každý předmět z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Tato metoda je založena na měření vlastních kmitočtů podélného, kroutivého a příčného kmitání. Pomocí rezonanční metody je možné určit dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku, dynamický modul pružnosti ve smyku a dynamický Poissonův koeficient. Rezonanční metoda je vhodná pro nezabudované prvky [16].

Při měření rezonančních frekvencí dochází ke kmitání, při němž jsou známá místa, v nichž vnikají uzly a kmitny. Pro jednotlivá kmitání, jsou tato místa odlišná. Podle sledovaného kmitání je vhodné podepřít vzorek v místech uzlů a sondy přikládat v místě největších amplitud – kmiten, čímž podpoříme dané kmitání. Způsob podepření a umístění sond je znázorněn na Obr. 7 [16].



Obr. 7 Způsob podepření a umístění budiče a snímače [16]

Vzhledem k obtížnému určení hodnot vlastních frekvencí na rezonančním přístroji u neznámého objektu je vhodné si určit přibližnou hodnotu. Pro podélné kmitání se určí přibližná vlastní frekvence f'_L na základě měření ultrazvukem [15]:

$$f'_L = \frac{500}{t}, \quad (4)$$

kde t – doba průchodu ultrazvuku ve směru „L“.

Pro kroucení příčné a podélné se pak přibližné hodnoty vlastních frekvencí vypočítají z přibližných hodnot vlastních frekvencí kmitání podélného [15]:

$$f'_f = \beta \cdot f_L, \quad (5)$$

$$f'_t = \alpha \cdot f_L, \quad (6)$$

kde f'_L – přibližná frekvence příčného kmitání;

f'_L – přibližná frekvence krouživého kmitání;

α – koeficient ($\alpha = 0,59$);

β – koeficient závislý na rozměrech tělesa.

Výpočet dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku E_{brL} z podélné vlastní frekvence [15]:

$$E_{br} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho, \quad (7)$$

kde L – délka zkušebního tělesa;

f_L – naměřená vlastní frekvence podélného kmitání;

ρ – objemová hmotnost zkušebního tělesa.

Výpočet dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku E_{brf} z příčné vlastní frekvence [15]:

$$E_{brf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}, \quad (8)$$

kde c_1 – korekční součinitel zahrnující vliv smyku závislý na poměru poloměru setrvačnosti a délce zkušebního tělesa;

L – délka zkušebního tělesa;

f_f – naměřená vlastní frekvence příčného kmitání;

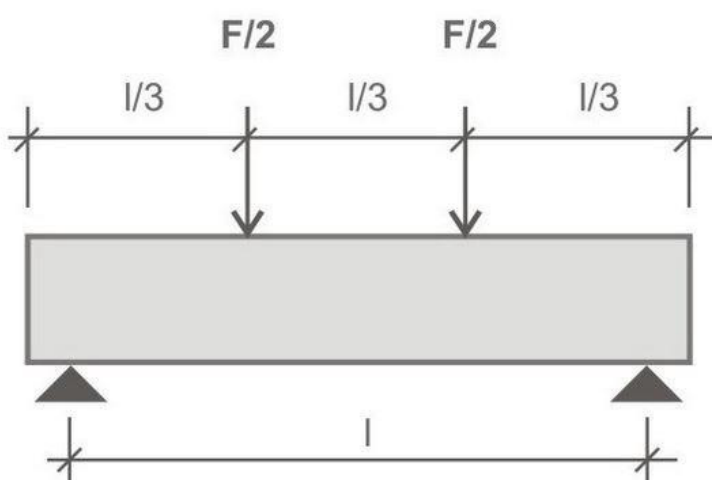
ρ – objemová hmotnost zkušebního tělesa;

i – poloměr setrvačnosti průřezu.

2.3.3 Statický modul pružnosti betonu

Při stanovení statického modulu pružnosti vyvozujeme reálné napětí a deformaci. Z těchto hodnot pak přímo vypočteme statický modul pružnosti. Jedná se o tzv. destruktivní zkoušení. Mezi destruktivní metody patří stanovení statického modulu pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem a stanovení statického modulu pružnosti v tlaku [10].

Statický modul pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem – zkouška v tahu ohybem se provádí dle ČSN 73 6174 [18]. Těleso je zatěžováno dvěma břemeny, tzv. čtyřbodovým ohybem (Obr. 8).



Obr. 8 Schéma uspořádání čtyřbodové zkoušky [19]

Zatěžuje se po stupních silami F_1 až F_n , kdy jeden stupeň je 10% předpokládané pevnosti v tahu ohybem. Po každém přitížení na F_n se měří celkový průhyb $f_{tot,n}$, poté se zatížení opět sníží na F_1 a měří se pružný průhyb $f_{e,n}$. Modul pružnosti E se pak určí dle vztahu [18]:

$$E = \frac{F \cdot l \cdot (0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46)}{f_e \cdot b \cdot h}, \quad (9)$$

kde f_e – pružný průhyb;

b – šířka trámce;

h – výška trámce;

l – rozpětí podpor;

F – zatěžovací síla.

Výhodou této metody je možnost stanovit modul pro každý zatěžovací stupeň zvlášť a znázornit tak pokles modulu při vzrůstajícím napětí. Je-li požadována pouze jedna hodnota jako směrodatný údaj, bere se hodnota při napětí odpovídajícím 2/3 zjištěné pevnosti v tahu ohybem [18].

Statický modul pružnosti betonu v tlaku – podrobně rozebrán v kapitole 2.4.

2.3.4 Statický vs. dynamický

Pro zjištění statického modulu pružnosti betonu v existující konstrukci je potřeba provést odběr jádrového vývrtu. V mnoha případech to představuje značný zásah do konstrukce, který není vždy možný. Aby se do konstrukce nemuselo zasahovat, je možné stanovit dynamický modul pružnosti betonu z ultrazvukového měření in situ a poté z něj určit modul statický [21].

Hodnoty statických modulů vycházejí vždy nižší než hodnoty modulů dynamických. V normě ČSN 73 2011 [20] se uvádí orientační hodnoty zmenšovacích součinitelů pro ultrazvuk κ_u pro rezonanci κ_r (viz. Tabulka 3). Tyto hodnoty byly stanoveny pro betony vyráběné odlišným způsobem než dnešní moderní betony, pro ně hodnoty zmenšovacích součinitelů vycházejí nižší. Poměr mezi statickými a dynamickými moduly pružnosti nezávisí pouze na pevnostní třídě betonu, ale i dalších vlivech [21].

Experimentálně bylo zjištěno, že hodnota zmenšovacích součinitelů roste se vzrůstající dobou zrání. Naopak vliv vodního součinitele nemá téměř žádný vliv, se snižováním vodního součinitele dochází k nárůstu statických i dynamických modulů, avšak ve stejném poměru. Rozdílné hodnoty zmenšovacích součinitelů je možné dosáhnout i při použití různých typů kameniva [21].

Tabulka 3 Hodnoty zmenšovacích součinitelů pro přepočítání dynamických modulů pružnosti na moduly statické [20]

Třída	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
κ_u	0,62	0,71	0,76	0,81	0,83	0,86	0,88	0,90
κ_r	0,81	0,86	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95

2.4 Statický modul pružnosti betonu v tlaku

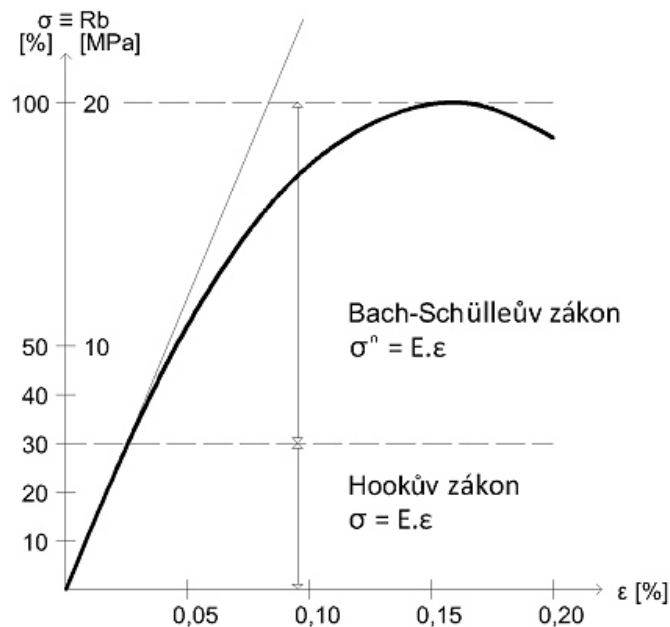
Statický modul pružnosti v tlaku ztvrdlého betonu vyjadřuje závislost mezi přetvořením a napětím, kterým daný prvek či konstrukci namáháme [23]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (10)$$

kde σ – napětí v tlaku;

ε – poměrné přetvoření.

Beton se vlivem vnějších sil může deformovat trvale (nepružně), nebo dočasně (pružně). Rozdělení na oblast pružnou a plastickou je zřejmé z deformačního diagramu betonu v tlaku na Obr. 9. Statický modul pružnosti se určuje pouze v oboru pružných deformací, kde platí Hookův zákon [1].



Obr. 9 Deformační diagram betonu v tlaku [22]

V oblasti plastické platí zákon Bach-Schülleův, který se vyjadřuje obecným vztahem [1]:

$$\varepsilon = k \cdot \sigma^n, \quad (11)$$

kde ε – poměrné přetvoření;

$$k = 1/E_0;$$

E_0 – směrnice tečny ke křivce vedené počátkem diagramu;

σ – napětí v tlaku;

$n = 1$ a více.

Je-li hodnota $n = 1$, $E_0 = E$, přejde Bach-Schülleův zákon v zákon Hookův, který platí pouze v oblasti pružné [1]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (12)$$

2.5 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku je možné dle ČSN ISO 1920-10 [24], ČSN ISO 6784 [25] nebo ČSN EN 12390-13 [26]. Tyto normy jsou aktuálně používané, nebo krátce zrušené. Norma ČSN ISO 6784 [25] byla platná od února 1993 do ledna 2015, kdy byla nahrazena normou ČSN ISO 1920-10 [24]. Od března 2014 je taktéž v platnosti norma ČSN EN 12390-13 [26]. Zvláštností je, že se norma ČSN ISO 1920-10 [24] platná pro Českou republiku odkazuje na ISO normy, které ale nejsou zavedeny v Českém normalizačním systému [26], [27].

Níže jsou popsány postupy dle jednotlivých norem. Podle ČSN EN 12390-13 [26] je měřena praktická část této práce, proto je popsána podrobněji. Principem všech zmíněných norem je osově zatěžování zkušebních těles, která mohou být vyrobena ukládáním do forem nebo odebrána z konstrukce. Statický modul pružnosti v tlaku E se pak spočítá jako podíl rozdílu horního a spodního zatěžovacího napětí a rozdílu odpovídajících poměrných přetvoření [24], [25], [26]:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (13)$$

kde σ – rozdíl napětí horní a spodní zatěžovací úrovně;

$\Delta\varepsilon$ – rozdíl odpovídajících poměrných přetvoření.

2.5.1 ČSN ISO 1920-10

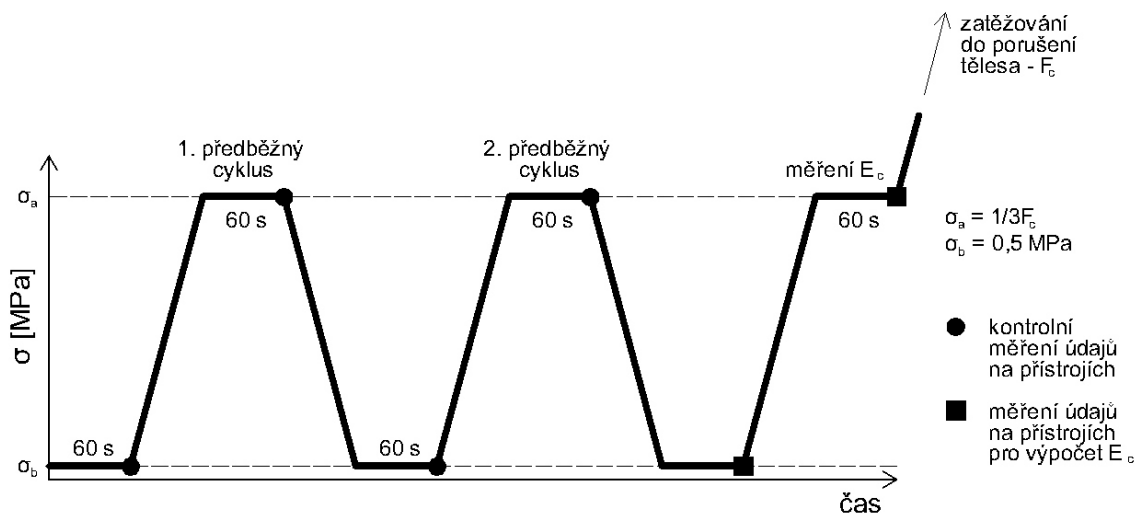
Zkouška musí být provedena na zkušebním lisu odpovídajícím ČSN EN 12390-4 [28], který umožňuje nastavení požadovaného zatížení, rychlost změny zatížení a udržování na požadované hodnotě napětí. Přístroje pro měření změn délky musí mít měřicí základnu v rozmezí $2/3 d$ až d , kde d je průměr zkušebního tělesa. Musí být připevněny tak, aby měřené body byly ve stejné vzdálenosti od konců zkušebního tělesa, a to nejméně ve vzdálenosti $L/4$, kde L je délka zkušebního tělesa [24].

Pro stanovení pevnosti betonu v tlaku se musí použít válce o poměru délky k průměru $L/d = 2$. Pro měření modulu pružnosti se přednostně používají válce o průměru 150 mm

a výšce 300 mm. Je možné použít i válce jiných rozměrů nebo tělesa čtvercového průřezu za dodržení podmínek uvedených v normě [24].

Při postupu podle referenční metody se nejdříve musí stanovit pevnost betonu v tlaku dle ISO 1920-4 [29] na třech zkušebních tělesech. Střední hodnota pevnosti v tlaku F_c je použita pro určení napětí $\sigma_a = F_c/3$ na horní úrovni zatěžování. Základní napětí je $\sigma_b = 0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Napětí se zvyšuje nebo snižují plynule konstantní rychlostí v rozmezí $0,20 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{s}$ až $0,60 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{s}$. Zkušební těleso osově osazené snímači deformací se vloží dostředně do zkušebního lisu. Vyvodí se základní napětí σ_b , udržuje se po dobu 60 s a zaznamenají se jednotlivá přetvoření. Poté se plynule zvyšuje napětí na horní hladinu σ_a , opět se udržuje po dobu 60 s a během následujících 30 s zaznamenají odpovídající přetvoření. Jestliže se jednotlivá přetvoření odpovídající σ_a liší o více než 20 % od své průměrné hodnoty, musí se těleso v lisu lépe vycentrovat a opakovat měření. Je-li centrace tělesa v lisu dostatečná, sníží se zatížení na základní hodnotu napětí σ_b . Provedou se alespoň dva předběžné zatěžovací cykly. Po dokončení posledního předběžného cyklu se udržuje 60 s základní napětí σ_b a během následujících 30 s se zaznamenají příslušná poměrná přetvoření ε_b . Následuje plynulý nárůst na horní úroveň napětí σ_a , podržení 60 s a během následujících 30 s zaznamenání poměrných přetvoření ε_a . Po dokončení všech měření se těleso plynule zatěžuje až do porušení, čímž se zjistí pevnost v tlaku zkoušeného tělesa. Liší-li se tato pevnost o více než 20 %, nemusí být výsledek spolehlivý. Na Obr. 10 je znázorněn průběh cyklů během zatěžovací zkoušky [24].

Není-li možné u těles odebraných z konstrukce určit pevnost v tlaku, je možná alternativní metoda. Pro zajištění dostatečného centrování tělesa se provedou předběžné zatěžovací cykly. Zatěžovací cyklus je pak odlišný tím, že jsou přetvoření a napětí měřeny průběžně. V zatěžování až do porušení se může pokračovat bez zastavení na horním zatěžovacím napětí, tím se zjistí pevnost v tlaku. Horní zatěžovací napětí je stanoveno jako jedna třetina zjištěné pevnosti v tlaku. Poměrné přetvoření se určí jako hodnota odpovídající příslušné hladině zatížení na základě nepřetržitého měření. Pokud se jednotlivá přetvoření liší o více než 20 % od své průměrné hodnoty, uvede se to v závěrečné zprávě [24].



Obr. 10 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN ISO 1920-10 [24]

Statický modul pružnosti v tlaku E_C je dán vztahem [24]:

$$E_C = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}, \quad (14)$$

kde σ_a – horní zatěžovací napětí ($\sigma_a = f_c/3$);

σ_b – základní napětí ($\sigma_b = 0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$);

ε_a – průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí;

ε_b – průměrné přetvoření při základním napětí.

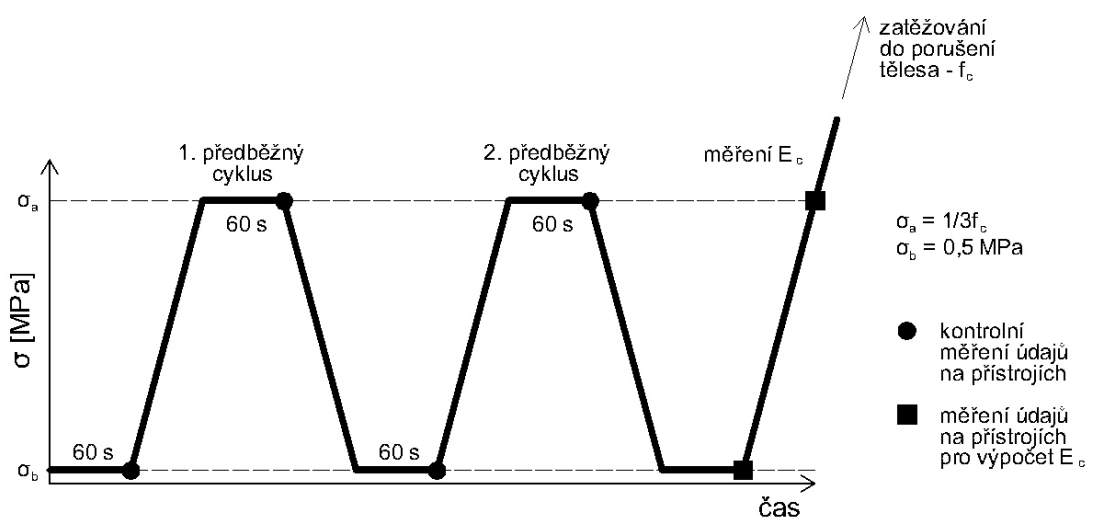
Výsledek se vyjádří v GPa zaokrouhlen na tři platné číslice. Uvedou se hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku pro jednotlivá tělesa a jeho průměrná hodnota [24].

2.5.2 ČSN ISO 6784

Zkušební zařízení sestává ze zkušebního lisu vyhovujícího ČSN EN 12390-3 [4], který musí umožnit vyvození požadované hodnoty zatížení a její udržení. Přístroje pro měření deformací nesmí mít měřící základnu menší než dvě třetiny průměru zkušebního tělesa ($2/3 d$). Přístroje musí být umístěny tak, aby vzdálenost měřených bodu od konců zkušebního tělesa byla stejná. Tato vzdálenost se rovná minimálně jedné čtvrtině délky zkušebního tělesa ($L/4$) [25].

Jako zkušební tělesa jsou přednostně používány válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Je možné použít i jiná zkušební tělesa vyhovující ČSN EN 12390-1 [6] a za dodržení požadavků uvedených v normě [25].

Na třech srovnávacích tělesech se stanoví pevnost betonu v tlaku dle postupu uvedeném v ČSN EN 12390-3 [4]. Z průměrné hodnoty pevnosti v tlaku f_c se určí napětí σ_a použité ke stanovení modulu pružnosti. Při zatěžovacích cyklech se vyvozuje základní napětí $\sigma_b = 0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a horní zatěžovací napětí $\sigma_a = f_c/3$, mezi kterými dochází ke změně plynule s časovým nárůstem tlaku $(0,6 \pm 0,4) \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ za sekundu. Do zkušebního lisu je centricky vloženo těleso osově osazené přístroji, je zatíženo základním napětím σ_b a zaznamenají se jednotlivá přetvoření. Poté se plynule zatížení zvýší na úroveň σ_a , udržuje se po dobu 60 s a v následujících 30 s se zaznamenají odpovídající přetvoření. Jestliže se jednotlivá přetvoření liší v rozmezí $\pm 20 \%$, je centrování dostatečně přesné, v opačném případě se výsledek zkoušky nesmí uvažovat. Následuje snížení napětí na základní hodnotu σ_b . Tento předběžný cyklus je opakován nejméně dvakrát. Po dokončení posledního předběžného cyklu se vyčká 60 s na základním napětí σ_b a během následujících 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření ε_b . Poté se plynule zatížení zvýší na horní zatěžovací napětí σ_a , během 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření ε_a a zatěžuje se až do porušení. Zjištěná pevnost v tlaku se nesmí lišit o více než 20 % od průměrné hodnoty zjištěné na srovnávacích tělesech, v opačném případě se tato skutečnost musí uvést do zprávy o zkoušce. Průběh cyklů je znázorněn na Obr. 11 [25].



Obr. 11 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN ISO 6784 [25]

Statický modul pružnosti v tlaku E_C je dán vztahem [25]:

$$E_C = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}, \quad (15)$$

kde σ_a – horní zatěžovací napětí ($\sigma_a = f_c/3$);

σ_b – základní napětí ($\sigma_b = 0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$);

ε_a – průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí;

ε_b – průměrné přetvoření při základním napětí.

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších $500 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ při hodnotách nad $10\,000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, na nejbližších $100 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ při hodnotách pod $10\,000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ [25].

2.5.3 ČSN EN 12390-13

Metoda popisovaná touto normou umožňuje stanovit počáteční modul $E_{C,0}$ měřený v prvním zatěžovacím cyklu, ale i ustálený modul $E_{C,S}$ měřený po třech zatěžovacích cyklech. Jsou zde možné dvě metody. Metoda A umožňuje stanovit oba moduly – počáteční i ustálený. Metoda B umožňuje určení pouze ustáleného modulu pružnosti [26].

Zkušební lis musí vyhovovat normě ČSN EN 12390-4 [27]. Musí umožňovat naprogramování zatěžovacích cyklů, zvýšení a snížení zatížení konstantní rychlostí s určitou přesností a udržování zvolené hladiny zatížení s maximální odchylkou $\pm 5\%$. Přístroje na snímání deformací musí odpovídat normě ČSN EN ISO 9513 [30] a musí být na těleso osazeny tak, že měřené body jsou ve stejné vzdálenosti od konce zkušebního tělesa. Poměrná deformace ε je měřená přímo nebo vypočtená na základě naměřených délkových změn [26]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (16)$$

kde ΔL – změna délky zkušebního tělesa;

L_0 – původní délka zkušebního tělesa.

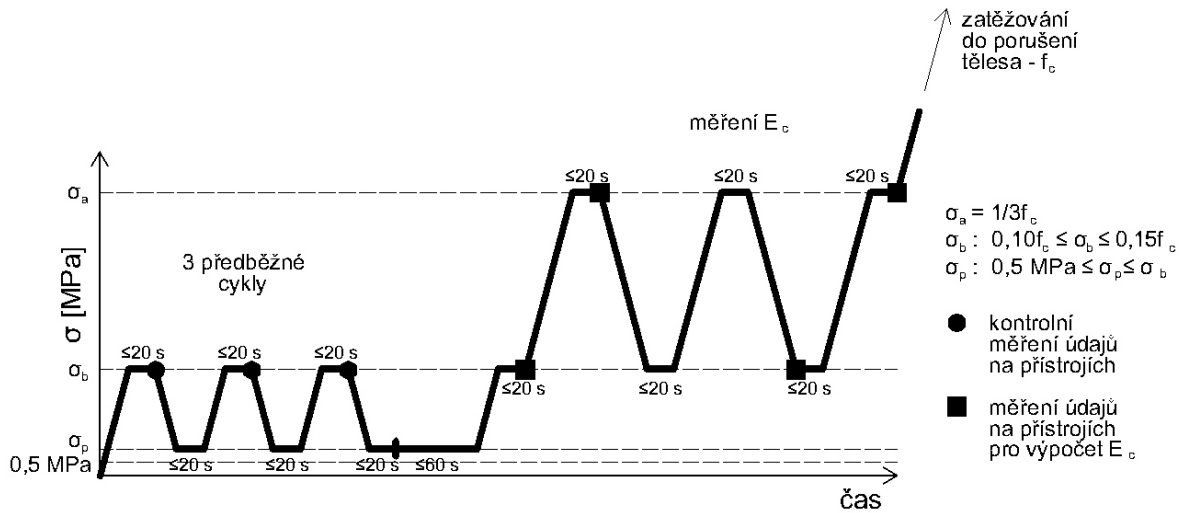
Základna měřicího zařízení musí být v rozmezí mezi $2/3 d$ a $1/2 L$, ale ne menší než $3D_{max}$, kde L je délka zkušebního tělesa, d je průměr nebo délka strany průřezu zkušebního tělesa a D_{max} je největší rozměr max. zrna kameniva). Pro tělesa, kdy je poměr L/d mezi 3,5 a 4,0, se měřící základna může zvýšit až na dvě třetiny délky tělesa [26].

Jako zkušební tělesa se mohou používat válce i hranoly a tělesa odebrána z konstrukce, za dodržení předpokladů že průměr d musí být větší než $3,5D_{max}$, a že poměr mezi délkou L a průměrem d je v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$. Doporučují se válce o průměru 100 mm a výšce 300 mm. Možnou alternativou jsou i jiná zkušební tělesa vyhovující požadavkům uvedeným v ČSN EN 12390-1 [6] a zároveň výše uvedeným předpokladům. Srovnávací tělesa pro určení pevnosti v tlaku musí být vyrobena ze stejné záměsi, v případě jádrových vývrtů odebrány ze stejné oblasti konstrukce [26].

Pevnost v tlaku se stanoví dle ČSN EN 12390-3 [4] na srovnávacích tělesech. Pevnost v tlaku f_c se použije pro určení napětí při zatěžovacím cyklu. Není-li možné určit pevnost v tlaku pomocí destruktivního zkoušení, může se určit nedestruktivní metodou. Základní napětí σ_p je v rozmezí $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$, dolní napětí σ_b je v rozmezí $0,1f_c \leq \sigma_b \leq 0,15f_c$ a horní napětí $\sigma_a = f_c/3$. V průběhu zatěžovacích cyklů se změny napětí provádí plynule konstantní rychlostí $(0,6 \pm 0,2) \text{ MPa/s}$. Doba držení napětí na dané úrovni napětí je vždy taková, aby nepřesáhla 20 s [26].

Postup podle metody A je takový, že těleso osazené snímači deformací je uloženo osově do lisu. Nejprve jsou provedeny tři předběžné cykly pro kontrolu centrace zkušební tělesa. Při prvním předběžném cyklu se zkušební těleso zatíží hodnotou odpovídající dolnímu napětí σ_b , během doby, kdy se tato hladina napětí drží, se zaznamená napětí σ_b^m . Poté se zatížení sníží na hodnotu odpovídající základnímu napětí σ_p a opět se drží po dobu nepřesahující 20 s. Tento cyklus se opakuje celkem třikrát. Při druhém a třetím cyklu se zaznamená poměrné přetvoření ε_b odpovídající zatížení σ_b . Po dokončení třetího cyklu se během 60 s, kdy se stále udržuje hladina napětí na hodnotě σ_p , zkontroluje, jestli se jednotlivá poměrná přetvoření ε_b ve druhém a třetím cyklu vzájemně neliší o více než 10 %. Druhou kontrolou je ověření, že se přetvoření ε_b neliší o více než 20 % od průměrné hodnoty poměrného přetvoření ε_b ze všech cyklů. Pokud se tyto podmínky nesplní, musí se zkušební těleso znovu vycentrovat a měření začít znovu od začátku. Pokud není možné těleso lépe vycentrovat, zkouška nemůže být provedena. Konstantní rychlostí se zvýší napětí na hodnotu σ_b , kdy se během doby držení hladiny napětí zaznamená odpovídající poměrné přetvoření $\varepsilon_{b,0}$. Následují tři zatěžovací cykly, ze kterých bude určen modul pružnosti v tlaku. Zkušební těleso se zatíží na horní hladinu napětí σ_a a v této úrovni napětí drží ne více než 20 s, poté se napětí sníží na hodnotu σ_b a opět se podrží po dobu nepřesahující 20 s. Pro danou hladinu napětí se zaznamenají následující poměrná

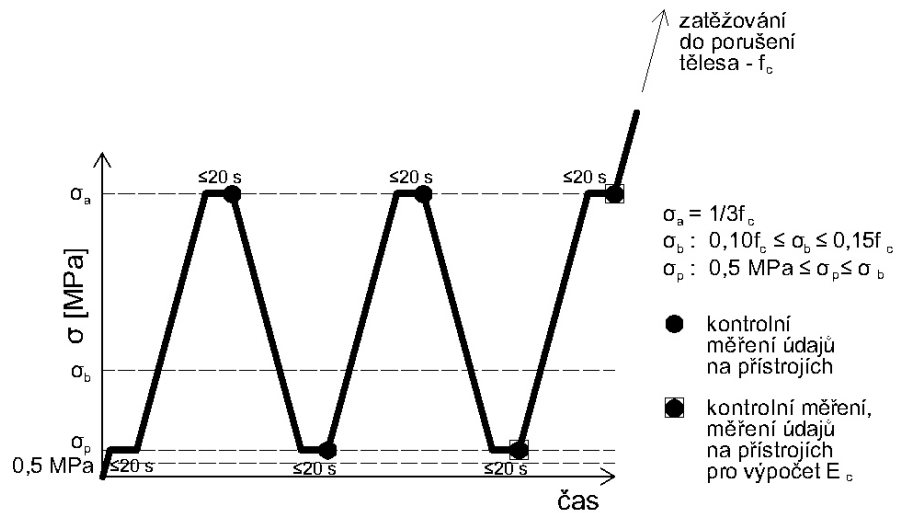
přetvoření – v prvním a třetím cyklu $\varepsilon_{a,1}$ a $\varepsilon_{a,3}$, v druhém cyklu $\varepsilon_{b,2}$. Po dokončení třetího zatěžovacího cyklu se zkušební těleso zatěžuje do porušení pro zjištění pevnosti v tlaku. Pokud se tato hodnota liší o více než 20 % od průměrné hodnoty stanovené na srovnávacích tělesech, uvede se to do závěrečné zprávy o zkoušce [26].



Obr. 12 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 – metoda A [26]

Podle metody B se těleso osazené snímači deformací centricky vloží do zkušebního lisu a zatíží základním napětím σ_p na dobu nepřesahující 20 s. První cyklus spočívá v tom, že se plynule zvýší zatížení na horní úroveň napětí σ_a , na této úrovni se vyčká potřebnou dobu a zaznamená se poměrné přetvoření $\varepsilon_{a,1}$. Poté se napětí sníží na základní napětí σ_p , během doby držení se zaznamená poměrné přetvoření $\varepsilon_{p,1}$. První cyklus se opakuje a zaznamenají se poměrná přetvoření $\varepsilon_{a,2}$ a $\varepsilon_{p,2}$. Jednotlivá poměrná přetvoření ε_a v druhém cyklu se nesmí lišit o více než 20 % d průměrné hodnoty $\varepsilon_{a,1}$. Pokud tato podmínka není splněna, těleso se musí znovu vycentrovat a měření provést znovu od začátku. Pokud se ani po další centraci nesníží rozdíl pod 20 %, pak se měření musí ukončit. Ve třetím cyklu se zatížení opět zvýší na σ_a , tato hladina se udržuje po dobu nepřesahující 20 s a zaznamená se poměrné přetvoření $\varepsilon_{a,3}$. Následuje kontrola, kdy se jednotlivá poměrná přetvoření ε_a v druhém a třetím cyklu nesmí lišit o více než 10 %. Jestliže tato podmínka není splněna, těleso musí být znovu vycentrováno a měření se musí uskutečnit do začátku. Nejde-li centrace zpřesnit, pak se musí měření na tomto tělese ukončit. Nakonec se těleso zatěžuje až do porušení. Takto zjištěná pevnost v tlaku se nesmí lišit o více než 20 % od průměrné hodnoty zjištěné

na srovnávacích tělesech, v opačném případě se to uvede do závěrečné zprávy o zkoušce [26].



Obr. 13 Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 – metoda B [26]

Statický modul pružnosti betonu v tlaku $E_{c,s}$ se pak spočítá dle vztahu [26]:

$$\text{Metoda A: } E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}}, \quad (17)$$

$$\text{Metoda B: } E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}, \quad (18)$$

kde σ_a – horní napětí ($\sigma_a = f_c/3$);

σ_b – dolní napětí ($0,1f_c \leq \sigma_b \leq 0,15f_c$);

σ_p – základní napětí ($0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$);

$\varepsilon_{a,3}$ – průměrné přetvoření při horním napětí;

$\varepsilon_{b,2}$ – průměrné přetvoření při dolním napětí;

$\varepsilon_{p,2}$ – průměrné přetvoření při základním napětí.

Výsledná hodnota se uvádí v GPa zaokrouhlena na nejbližší desetinné místo [26].

2.5.4 Porovnání norem

Přestože je princip norem stejný, nastavitelné parametry zkoušení jsou různé, v některých případech více, v jiných méně. Pro přehledné porovnání norem je uvedena Tabulka 4.

Tabulka 4 Porovnání parametrů zkoušek jednotlivých norem [24], [25], [26]

	ČSN ISO 1920-10	ČSN ISO 6784	ČSN EN 12390-13	
Délka měřicí základny	v rozmezí $2/3d$ až d	minimálně $2/3d$	v rozmezí $2/3d$ až $L/2$, větší než $3D_{max}$	
Měřené body (vzdálenost od kraje zkušební tělesa)	vzdálené stejně daleko, alespoň $L/4$	vzdálené stejně daleko, alespoň $L/4$	vzdálené stejně daleko	
Zkušební tělesa - doporučená	válce $d = 150 \text{ mm}$; $v = 300 \text{ mm}$	válce $d = 150 \text{ mm}$; $v = 300 \text{ mm}$	válce i hranoly $d = 150 \text{ mm}$; $v = 300 \text{ mm}$	
Zkušební tělesa - alternativní	$2 \leq L/d \leq 4$ $d \geq 4D_{max}$ (odlévaná do forem) $d \geq 3D_{max}$ (odebraná z kce)	$2 \leq L/d \leq 4$ $d \geq 4D_{max}$	$2 \leq L/d \leq 4$ $d \geq 3,5D_{max}$	
Počet předběžných cyklů	alespoň 2	alespoň 2	metoda A: 3	metoda B: 2
Počet zatěžovacích cyklů	1	1	3	1
Doba držení úrovně napětí	60 s	60 s	$\leq 20 \text{ s}$	
Rychlost změny napětí	0,20 až 0,60 MPa/s	$(0,60 \pm 0,40) \text{ MPa/s}$	$(0,60 \pm 0,20) \text{ MPa/s}$	
Horní napětí	$\sigma_a = f_c/3$	$\sigma_a = f_c/3$	$\sigma_a = f_c/3$	
Dolní napětí	xxx	xxx	$0,1f_c \leq \sigma_b \leq 0,15f_c$	
Základní napětí	$\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$	$\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$	$0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$	
Doba držení úrovně napětí po posledním cyklu	60 s	0 s	$\leq 20 \text{ s}$	
Výsledky	zaokrouhlit na tři platné číslice v GPa	hodnoty $> 10000 \text{ MPa}$ zaokrouhlit na nejbližších 500 MPa hodnoty $< 10000 \text{ MPa}$ zaokrouhlit na nejbližších 100 MPa	zaokrouhlit na jedno desetinné místo v GPa	

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Popis experimentu

V současné době se problematika modulu pružnosti dostává stále více do povědomí. Jsou zkoumány různé faktory ovlivňující hodnoty modulu pružnosti. Vícenásobnému cyklickému zatěžování a jeho vlivu dosud nebylo věnováno příliš mnoho pozornosti, proto je předmětem této práce.

Hlavní podstatou praktické části je stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku a zkoumání jeho závislosti na počtu zatěžovacích cyklů. Výroba čerstvého betonu byla provedena tak, aby kvalita zkušebních těles co nejméně ovlivnila výstupy prováděného experimentu. Čerstvý beton byl vyroben s dostatečným předstihem v míchačce o objemu cca 1 m³ na betonárně. Tento způsob výroby byl zvolen proto, aby byla zajištěna co nejlepší rovnoměrnost betonu a byl potlačen možný vliv dozrávání betonu. Jako zkušební tělesa byly použity válce stejných rozměrů o průměru 150 mm a výšce 300 mm a třech různých receptur betonu. Byla snaha odstranit více možných vlivů na výsledky zkoušek, jako např. volbou zakoncování těles, jejich výběrem pro zkoušení anebo volbou tenzometrů.

Protože mnohonásobná cyklická zatěžovací zkouška, včetně měření deformací v průběhu zkoušení, je velmi náročná časově i finančně, byl počet těles pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku omezen na dvě tělesa z každé receptury. Aby tělesa vybraná pro mnohonásobnou cyklickou zatěžovací zkoušku nebyla zvolena zcela náhodně, byl předem stanoven dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku všech zkušebních těles. Výběr byl tedy proveden tak, že se vybrala zkušební tělesa na základě jejich kvality a pružnostních charakteristik.

3.1.1 Výroba zkušebních těles

Jako zkušební tělesa byly použity válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Zkušební tělesa byla vyrobena podle normy ČSN EN 12390-1 [6] ukládáním do forem. Pro mnohonásobnou cyklickou zatěžovací zkoušku byly připraveny tři receptury betonu (viz Tabulka 5). Výroba čerstvého betonu receptury 1/3 proběhla v betonárně BETOTECH, s. r. o. v Olbramovicích 12. 5. 2014, receptura 2/3 byla připravena 13. 10. 2014 v betonárně BETOTECH s. r. o. v Brně a receptura P2/2 byla připravena 8. 12. 2014 taktéž v Brně. Pro tento experiment bylo připraveno z každé receptury šest zkušebních těles ve tvaru válce.

Tabulka 5 Receptura čerstvého betonu

Označení receptury	1/3	2/3	P2/2
Materiál	Množství na 1 m³ čerstvého betonu [kg]		
CEM I 42,5 R	394	386	335
Bratčice 0-4	846	854	850
Olbramovice 4-8	192	207	312
Olbramovice 8-16	684	671	526
Voda	183	181	164
Sika ViscoCrete 4035	0,95	2,01	1,70
Sika LPS A 94	0	0	0,76
Vodní součinitel [-]	0,43	0,44	0,45

Pro všechny receptury byly provedeny zkoušky čerstvého betonu, a těmi jsou sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [30], rozlití dle ČSN EN 12350-5 [32], obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7 [33], a dále byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [34]. Výsledky zkoušek čerstvého betonu jsou uvedeny v Tabulka 6. Poté byla tělesa ve formách uložena. Po odformování byla uložena ve vodním prostředí při laboratorní teplotě dle ČSN EN 12390-2 [5]. Na Obr. 14 je zaznamenána výroba čerstvého betonu a zkoušky čerstvého betonu.

Tabulka 6 Zkoušky čerstvého betonu

	1/3	2/3	P2/2
Sednutí kužele [mm]	60	50	55
Rozlití [mm]	370	330	330
Objemová hmotnost [kg·m⁻³]	2300	2300	2190
Obsah vzduchu [%]	3,2	3,0	6,2



Obr. 14 Výroba čerstvého betonu, zkoušky čerstvého betonu

3.1.2 Příprava zkušebních těles

U ztvrdlého betonu byla stanovena 28denní krychelná pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [4] a 28denní pevnost v tahu ohybem dle ČSN 73 6174 [18]. Hodnoty 28denních pevností ztvrdlého betonu jsou uvedeny v Tabulka 7. Před zkoušením byla tělesa zakoncována zařízutím pilou a následně dobroušena pomocí korundového prášku.

Tabulka 7 Hodnoty 28denní pevnosti ztvrdlého betonu

	1/3	2/3	P2/2
28denní krychelná pevnost v tlaku [MPa]	56,4	57,2	53,7
28denní pevnost v tahu ohybem [MPa]	5,6	5,7	5,3

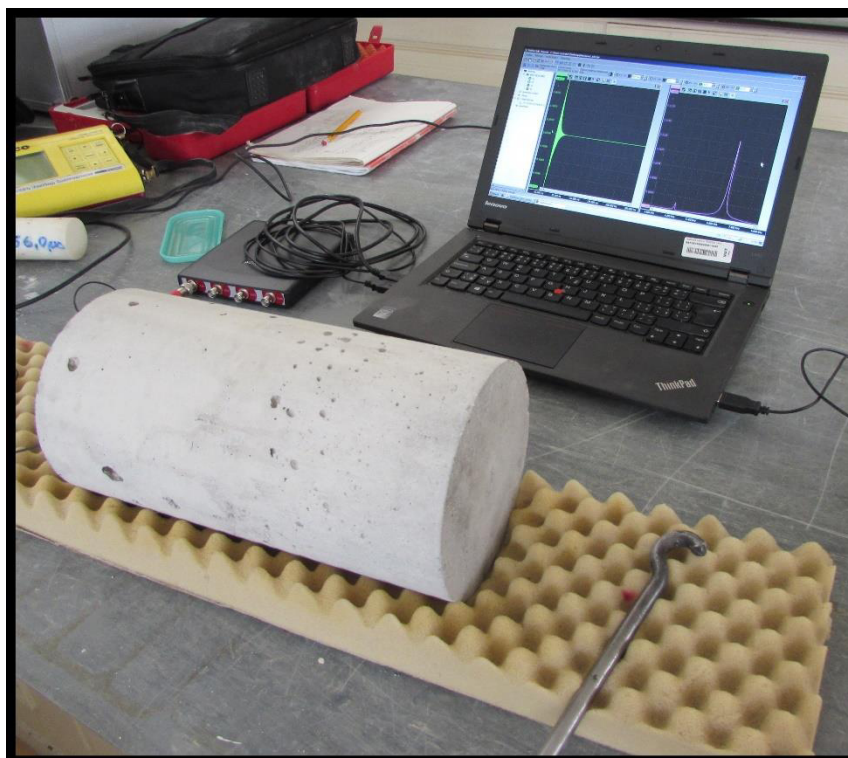
Dále byly změřeny rozměry a hmotnost všech těles a z nich stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 [35]. Pro přehlednost jsou naměřené hodnoty jednotlivých těles všech receptur uvedeny v Tabulka 8.

Tabulka 8 Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost zkušebních těles všech receptur betonu

1/3	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	\bar{d} [mm]	v [mm]	m [kg]	D [kg·m ⁻³]
1	149,09	149,07	149,08	149,13	149,09	289,97	11,732	2320
2	149,16	149,19	149,13	149,10	149,15	290,63	11,746	2310
3	149,22	149,20	149,17	149,17	149,19	288,99	11,650	2310
4	149,08	149,06	149,09	148,97	149,05	289,32	11,699	2320
5	149,13	149,18	149,06	149,10	149,12	286,67	11,577	2310
6	149,08	149,11	149,08	148,97	149,06	290,87	11,769	2320
2/3	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	\bar{d} [mm]	v [mm]	m [kg]	D [kg·m ⁻³]
1	149,23	149,22	149,25	149,28	149,25	290,31	11,889	2340
2	149,32	149,33	149,29	149,27	149,30	290,60	11,865	2330
3	149,40	149,33	149,27	149,30	149,33	290,56	11,853	2330
4	149,31	149,22	149,31	149,31	149,29	290,83	11,848	2330
5	149,32	149,29	149,28	149,28	149,27	290,54	11,824	2330
6	149,28	149,25	149,21	149,27	149,25	290,32	11,826	2330
P2/2	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	\bar{d} [mm]	v [mm]	m [kg]	D [kg·m ⁻³]
1	149,37	149,24	149,23	149,38	149,31	290,86	11,519	2260
2	149,25	149,35	149,20	149,21	149,25	290,16	11,471	2260
3	149,40	149,48	149,25	149,33	149,37	288,10	11,350	2250
4	149,19	149,31	149,19	149,17	149,22	292,83	11,498	2250
5	149,31	149,33	149,27	149,30	149,30	290,52	11,550	2270
6	149,28	149,36	149,30	149,33	149,32	290,16	11,441	2250

3.1.3 Měření dynamického modulu pružnosti v tlaku

Zkušební tělesa pro vícenásobnou cyklickou zatěžovací zkoušku byla vybrána na základě jejich měření rezonanční metodou, byla však brána v úvahu i jejich kvalita zpracování (rozměrová přesnost). Rezonanční zkouška všech těles každé receptury byla provedena a vyhodnocena před začátkem cyklického zatěžování. Těleso bylo rozkmitáno mechanickým úderem a pomocí PC a osciloskopu Handyscope HS4 byly určeny vlastní frekvence příčného a podélného kmitání (Obr. 15). Z podélných vlastních frekvencí byl stanoven dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku dle ČSN 73 1372 [17]. Na základě těchto výsledků byla vybrána čtyři tělesa – dvě srovnávací tělesa na stanovení pevnosti v tlaku a dvě zkušební tělesa na stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Hodnoty dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku jednotlivých těles jsou uvedeny v Tabulka 9.



Obr. 15 Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou

Tabulka 9 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku pro všechny receptury betonu

1/3	d [mm]	L [mm]	m [g]	D [kg·m ⁻³]	podélný f _L [Hz]	E _{cr,L} [GPa]
1	149,09	289,97	11732	2320	7012	38,3
2	149,15	290,63	11746	2310	6935	37,6
3	149,19	288,99	11650	2310	7033	38,1
4	149,05	289,32	11699	2320	6985	37,9
5	149,12	286,67	11577	2310	7075	38,0
6	149,06	290,87	11769	2320	7021	38,7
2/3	d [mm]	L [mm]	m [g]	D [kg·m ⁻³]	podélný f _L [Hz]	E _{cr,L} [GPa]
1	149,25	290,31	11889	2340	7081	39,6
2	149,30	290,60	11865	2330	7018	38,8
3	149,33	290,56	11853	2330	7024	38,8
4	149,29	290,83	11848	2330	7004	38,6
5	149,27	290,54	11824	2330	7004	38,5
6	149,25	290,32	11826	2330	6968	38,1
P2/2	d [mm]	L [mm]	m [g]	D [kg·m ⁻³]	podélný f _L [Hz]	E _{cr,L} [GPa]
1	149,31	290,86	11519	2260	6962	37,1
2	149,25	290,16	11471	2260	6956	36,8
3	149,37	288,10	11350	2250	6902	35,6
4	149,22	292,83	11498	2250	6768	35,3
5	149,30	290,52	11550	2270	7007	37,6
6	149,32	290,16	11441	2250	6911	36,2

3.1.4 Průběh zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku

Měření probíhalo v laboratoři FAST VUT v Brně a v centru AdMaS v Brně. Byla vyřazena tělesa odštípnutá, popř. s křivou tlačnou plochou, a pro zkoušení pak byla vybrána tělesa kvalitnější s podobnými pružnostními charakteristikami. Pro každou recepturu byl postup stejný. Nejdříve se dvě zkušební tělesa použila na stanovení pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [4], další dvě byla vícenásobně cyklicky zatěžována. Na Obr. 16 jsou porušená zkušební tělesa po zkoušce pevnosti v tlaku. Pro měření statického modulu pružnosti v tlaku byla zvolena metoda B normy ČSN EN 12390-13 [26], podle které byly stanoveny parametry pro mnohonásobnou cyklickou zatěžovací zkoušku.



Obr. 16 Tělesa porušená po zkoušce pevnosti v tlaku

Pro určení statického modulu pružnosti byla vybrána metoda B, protože umožňuje větší rozpětí při volbě parametrů zkoušení. Volba všech parametrů byla stanovena tak, aby bylo možné stihnout co nejvíce cyklů v daném čase. Horní zatěžovací hladina je dána pevně na $\sigma_a = f_c/3$. Základní napětí σ_p se má pohybovat v rozpětí $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$, přičemž σ_b je dolní hladina napětí, která má být stanovena v rozsahu $0,1f_c \leq \sigma_b \leq 0,15f_c$. Volba dolního napětí pro tento experiment byla nejvyšší možná $\sigma_b = 0,15f_c$ z toho důvodu, aby rozpětí mezi zatěžovacími hladinami bylo co nejmenší a tím pádem i přechod mezi nimi časově co nejkratší. Ze stejného důvodu byla zvolena i nejvyšší možná rychlost změny napětí $0,80 \text{ MPa/s}$ a doba držení úrovně napětí 2 s .

Zkoušení začalo na hydraulickém lisu FORM+TEST (Obr. 17) v laboratoři FAST VUT v Brně. Měření deformací při zatěžovací zkoušce probíhalo tak, že na těleso byly připevněny odporové a elektronické tenzometry (Obr. 18). Byly použity elektronické tenzometry, které jsou vybaveny snímači prodloužení na bázi tenzometrického plného mostu. Měřicí základna elektronických tenzometrů byla nastavena na 150 mm. Pomocí softwaru catmanEasy byl zaznamenáván průběh deformací a napětí v závislosti na čase. Zkušební lis byl nastaven podle výše popsaných parametrů.

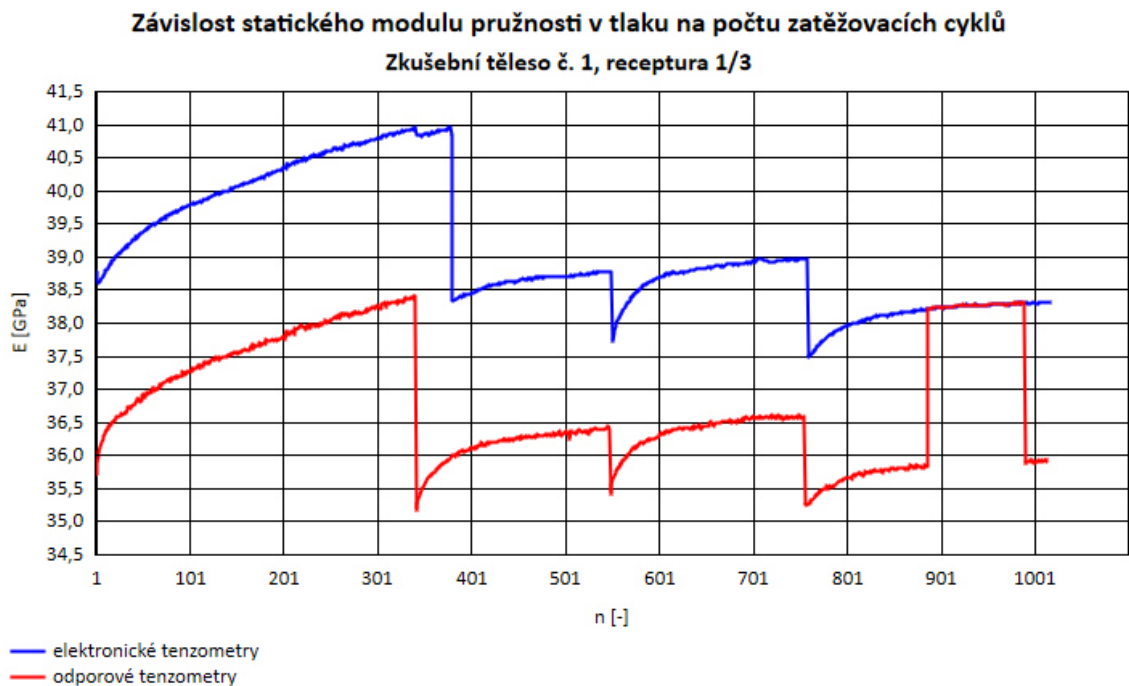


Obr. 17 Hydraulický lis FORM+TEST



Obr. 18 Detail odporových a elektronických tenzometrů

Po provedení vícenásobné cyklické zatěžovací zkoušky receptury 1/3 a následném vyhodnocení bylo zjištěno, že výsledky nejsou takové, jako se očekávaly. Byly zjištěny výrazné systematické vlivy na výsledky zkoušek, výsledná data nebyla plynulá, místy došlo ke skokům až v řádech GPa. Tuto skutečnost dokazuje graf zpracovaný z výsledných dat na Obr. 19. Zavádějící je i to, že naměřená data na odporových a elektronických tenzometrech se vzájemně liší cca o 3 GPa.



Obr. 19 Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů měřená na hydraulickém lisu FORM+TEST

S ohledem na vyhodnocená data vznikla pochybnost o vhodnosti hydraulického lisu pro tento typ zkoušení. Standardně je tento hydraulický lis používán pro krátkodobé zkoušky, pro které je i konstruován. Dlouhodobým zkoušením je zahříván olej. Při zahřívání oleje dochází k jeho znečišťování, což může ovlivnit správný chod lisu.

Vzhledem k této skutečnosti se rozhodlo o tom, že se provedou kontrolní měření v centru AdMaS v Brně, kde byl použit mechanický lis LaborTech (Obr. 20). Parametry odpovídající požadavkům normy ČSN EN 12390-13 [26] pro nastavení tohoto lisu byly stejné jako pro lis hydraulický, vyjma zadávání nárůstu síly v jednotkách kN, nikoliv napětím. Měření na mechanickém lisu v centru AdMaS bylo úspěšně, vyhodnocená data neobsahovala žádné systematické chyby, data byla plynulá a nedošlo k žádným výrazným skokům. Prvotní měření na lisu hydraulickém se tedy vyřadilo a při vyhodnocování nebylo bráno v úvahu. Všechna zkušební tělesa byla tedy zkoušena v centru AdMaS na mechanickém lisu. Zde již byly deformace měřeny pouze pomocí připevněných odporových tenzometrů.

Při měření deformací na zkušebním tělese mnohonásobně cyklicky zatěžovaném se současně měřily i deformace na druhém tělese stejné receptury betonu, které v daný čas zatěžované nebylo. Druhé těleso sloužilo k měření deformací, které vznikaly vlivem změny teplot. Deformace naměřené od cyklického zatěžování pak byly opraveny o deformace způsobené změnami teplot. Tímto bylo dosaženo přesnějšího stanovení deformací, které jsou podstatné pro tuto práci. Na Obr. 20 jsou vidět obě tělesa, těleso cyklicky zatěžované i tzv. kompenzační díl.



Obr. 20 Mechanický lis LaborTech

3.2 Výsledky vícenásobné cyklické zatěžovací zkoušky

Nejdříve byla vybrána dvě tělesa pro určení pevnosti v tlaku. Z průměrné hodnoty pevnosti v tlaku byly určeny zatěžovací hladiny pro cyklickou zatěžovací zkoušku. Spodní zatěžovací hladina σ_b byla vypočtena jako $0,15f_c$ a horní σ_a jako $f_c/3$. Pro přehlednost jsou naměřené hodnoty, jejich průměry a z nich stanovené zatěžovací hladiny uvedeny v Tabulka 10.

Tabulka 10 Pevnost v tlaku, zatěžovací hladiny všech receptur betonu

1/3	F _c [kN]	f _c [MPa]	2/3	F _c [kN]	f _c [MPa]	P2/2	F _c [kN]	f _c [MPa]
4	1087,5	62,3	3	1104,3	63,1	4	807,4	46,2
5	1129,0	64,6	4	1127,9	64,4	6	982,2	56,1
průměr	1108,3	63,5	průměr	1116,1	63,8	průměr	894,8	51,2
σ _b	160	9,5	σ _b	169	9,6	σ _b	135	7,7
σ _a	360	21,2	σ _a	375	21,3	σ _a	300	17,1

Doba držení dané zatěžovací hladiny byla nastavena na 2 s. Rychlost změny zatížení byla nastavena na 14 kN/s, což pro tato zkušební tělesa odpovídá 0,8 MPa. Pro zatěžovací hladiny 160 kN a 360 kN by při této rychlosti měl přechod mezi hladinami trvat cca 14,3 s. Přechod mezi těmito hladinami ve skutečnosti trval déle, proto byla rychlost změny zatížení upravena na 25 kN/s. Předem plánovaný počet cyklů byl 1000. Prvním zkoušeným tělesem bylo těleso č. 1 receptury 1/3, u kterého byl proveden menší počet cyklů. Důvodem byla změna lisu a s tím související nastavování všech parametrů zkoušky a jejich případné upravování, což zapříčinilo zkrácení času možného pro provedení zkoušky. Po odstranění dílčích nedokonalostí a zautomatizování zadávání všech parametrů potřebných pro nastavení lisu se již počet cyklů mohl zvýšit na 1500. Vzhledem k časové náročnosti bylo ale nereálné dodržet přesný počet cyklů, proto skutečný počet cyklů spíše odpovídal časovým možnostem. Pro lepší přehlednost jsou parametry mnohonásobné cyklické zatěžovací zkoušky jednotlivých těles uvedeny v Tabulka 11.

Tabulka 11 Nastavené parametry mechanického lisu

1/3	n [-]	σ _b [MPa]	σ _a [MPa]	t [s]	v [kN/s]
1	688	160	360	2	25
3	1525	160	360	2	25
2/3	n [-]	σ _b [MPa]	σ _a [MPa]	t [s]	v [kN/s]
2	1492	169	375	2	25
5	1659	169	375	2	25
P2/2	n [-]	σ _b [MPa]	σ _a [MPa]	t [s]	v [kN/s]
1	1425	135	300	2	25
2	1494	135	300	2	25

n = počet provedených zatěžovacích cyklů

t = doba držení dané hladiny zatížení

v = rychlost změny zatížení

Pro zpracování naměřených dat byl vytvořen program v softwaru Matlab. Program vyhodnotil ze zaznamenaných dat pro každý cyklus vždy minimální hodnotu deformace odpovídající spodní zatěžovací hladině a maximální hodnotu deformace odpovídající horní zatěžovací hladině. Z těchto hodnot následně spočítal statický modul pružnosti v tlaku. Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku v závislosti na počtu provedených zatěžovacích cyklů byly graficky zpracovány v programu STATISTICA. Grafy závislosti statického modulu pružnosti na počtu zatěžovacích cyklů pro jednotlivá zkušební tělesa jsou v Příloha I.

Po dokončení mnohonásobné cyklické zatěžovací zkoušky všech zkušebních těles se provedla zkouška pevnosti betonu v tlaku každého tělesa. Během této zkoušky byly zaznamenávány deformace po celou dobu zatěžování až do porušení. Z těchto záznamů byly následně v programu STATISTICA zpracovány deformační diagramy. Deformační diagramy jednotlivých zkušebních těles jsou v Příloha II. Na základě naměřených pevností v tlaku byla tělesa zatříděna do pevnostních tříd dle ČSN EN 13791 [36], zatřídění je uvedeno v Tabulka 12.

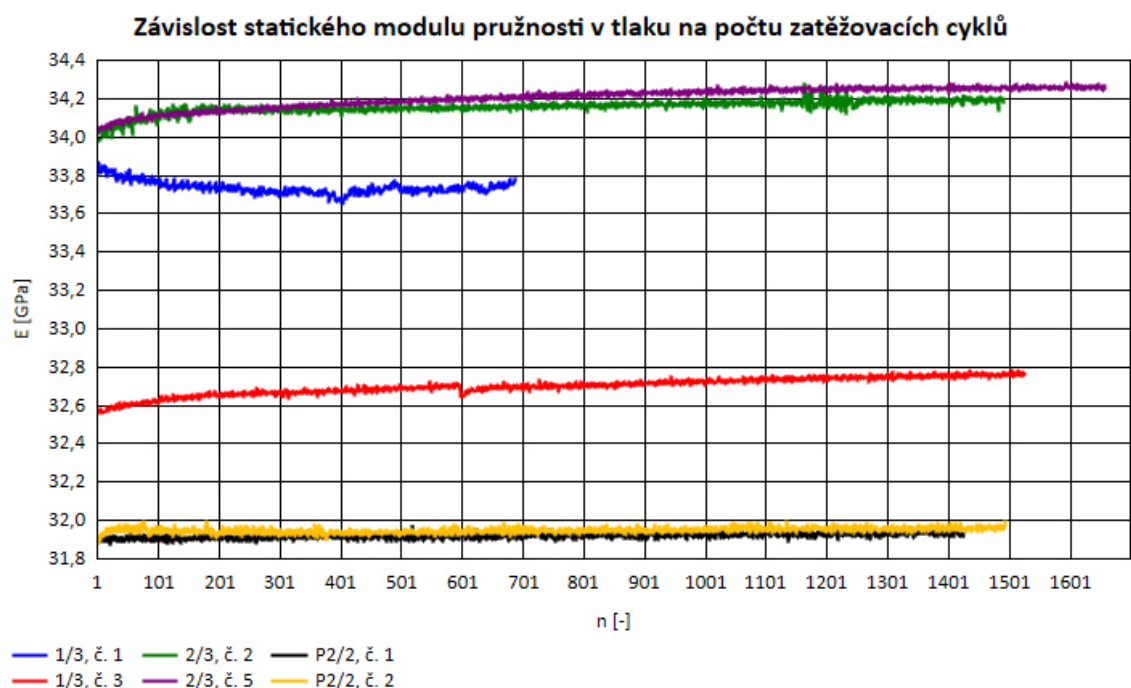
Tabulka 12 Zatřídění do pevnostních tříd

1/3	F _c [kN]	f _c [MPa]	2/3	F _c [kN]	f _c [MPa]	P2/2	F _c [kN]	f _c [MPa]
1	990,4	56,7	2	1171,5	66,9	1	956,7	54,6
3	1046,0	59,8	3	1104,3	63,1	2	914,3	52,3
4	1087,5	62,3	4	1127,9	64,4	4	807,4	46,2
5	1129,0	64,6	5	1105,5	63,2	6	982,2	56,1
f _{c,prům} [MPa]		60,9	f _{c,prům} [MPa]		64,4	f _{c,prům} [MPa]		52,3
f _{ck,is} = f _{c,prům} - 7 [MPa]		53,9	f _{ck,is} = f _{c,prům} - 7 [MPa]		57,4	f _{ck,is} = f _{c,prům} - 7 [MPa]		45,3
f _{c,min} [MPa]		56,7	f _{c,min} [MPa]		63,1	f _{c,min} [MPa]		46,2
f _{ck,is} = f _{c,min} + 4 [MPa]		60,7	f _{ck,is} = f _{c,min} + 4 [MPa]		67,1	f _{ck,is} = f _{c,min} + 4 [MPa]		50,2
C 60/75			C 60/75			C 50/60		

3.3 Shrnutí výsledků

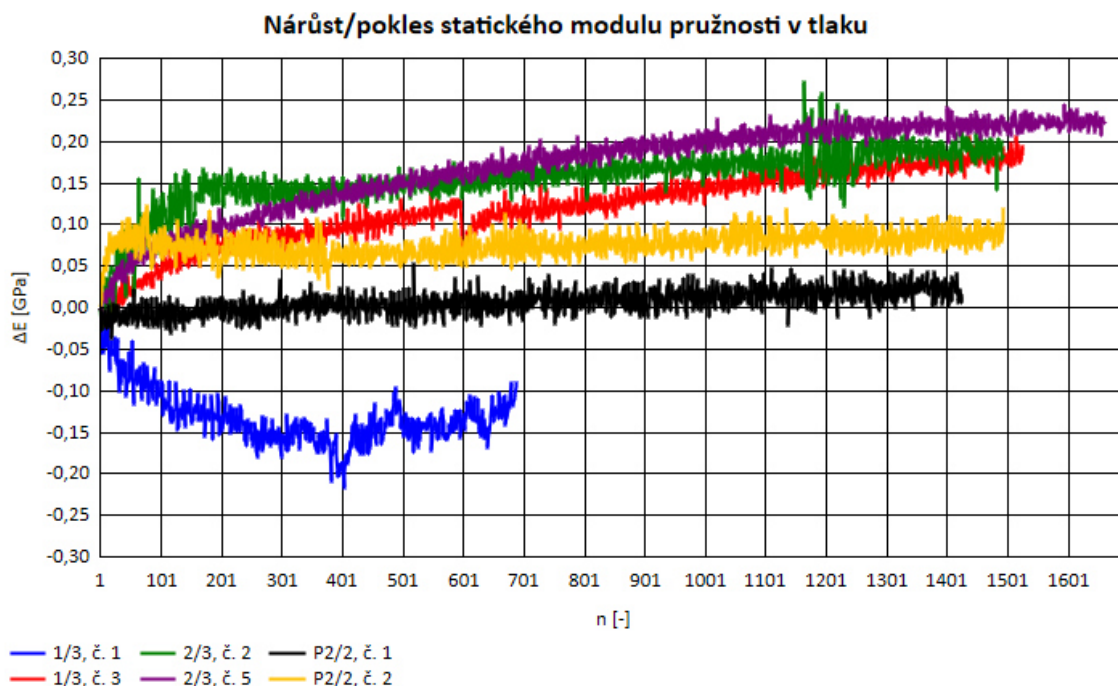
Předpoklad, že s rostoucím počtem cyklů bude výrazně klesat statický modul pružnosti v tlaku, se nepotvrdil. Vyjma jednoho případu došlo naopak k nárůstu hodnoty měřeného modulu pružnosti. Průběh změny hodnot statického modulu pružnosti během cyklické zatěžovací zkoušky všech zkušebních těles zobrazuje grafické zpracování naměřených hodnot (Obr. 21). Zkušební tělesa receptur 2/3 a P2/2 mají rostoucí trend a zároveň se

hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku vzájemně téměř neliší. Výjimkou jsou zkušební tělesa receptury 1/3, kdy zkušební těleso č. 1 má trend klesající a navíc je rozdíl hodnot statického modulu pružnosti v tlaku cca 1,2 GPa. Příčinou odlišných výsledků receptury 1/3 může být fakt, že byla tělesa cyklicky zatěžována nejprve na lisu hydraulickém a až poté na lisu mechanickém. Na hydraulickém lisu bylo provedeno 1000 zatěžovacích cyklů, během kterých mohlo dojít k poruše struktury tělesa a tím pádem i k ovlivnění dat při dalším měření na lisu mechanickém. Grafy závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na skutečně provedeném počtu zatěžovacích cyklů jsou uvedeny v Příloha I.



Obr. 21 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna zkušební tělesa

V grafu na Obr. 22 jsou zobrazeny změny hodnot statického modulu pružnosti v tlaku nezávisle na hodnotě statického modulu pružnosti. Z tohoto grafu je patrné, že dochází-li ke změnám, dochází k nim v počátku zatěžování, kdy je nárůst hodnot statického modulu pružnosti strmější. Tyto výsledky potvrzují, že provádění předběžných zatěžovacích cyklů, které vyžadují současné platné normativní předpisy, má svůj význam. Během předběžných cyklů dochází k usazení tělesa, což může zapříčinit změny hodnot modulu pružnosti. Je-li těleso v lisu usazeno, jsou hodnoty téměř konstantní.



Obr. 22 Spojnicový graf nárůstu/poklesu statického modulu pružnosti v tlaku pro všechna zatěžovací zkušební tělesa

Pro lepší přehlednost jsou hodnoty statických modulů pružnosti ve vybraných cyklech zaznamenány v Tabulka 13. Tato tabulka taktéž zachycuje nárůst hodnot modulu pružnosti. Jelikož maximální změna je pouhých 0,3 GPa, nejsou uvedené výsledky zaokrouhleny dle požadavků normy, ale na tři desetinná místa, aby jejich změna byla viditelná.

Tabulka 13 Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům

počet cyklů n [-]	Statický modul pružnosti v tlaku E [GPa]					
	1/3, č. 1	1/3, č. 3	2/3, č. 2	2/3, č. 5	P2/2, č. 1	P2/2, č. 2
1	33,869	32,581	34,002	34,035	31,913	31,873
10	33,845	32,565	34,032	34,041	31,895	31,918
100	33,767	32,616	34,110	34,103	31,892	31,947
500	33,733	32,694	34,144	34,190	31,908	31,927
1000	-	32,723	34,197	34,235	31,930	31,945
poslední	33,777	32,766	34,183	34,258	31,926	31,991

Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku zkušebních těles a hodnoty uvedené v ČSN EN 1992-1-1 [8] dle pevnostní třídy jsou pro porovnání uvedeny v Tabulka 14. Ani v jednom případě nebylo dosaženo hodnoty modulu pružnosti uváděné v normě, což poukazuje na skutečnost, že Eurokód 2 [8] nadhodnocuje. Jelikož je modul pružnosti jeden z faktorů, který ovlivňuje přetvoření konstrukcí, mohl by v tomto případě nastat problém. Spočítaná přetvoření na základě Eurokódu 2 [8] by byla menší, než v případě skutečně naměřených hodnot modulu pružnosti pro danou recepturu betonu.

Tabulka 14 Porovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku naměřených a hodnot uvedených v ČSN EN 1992-1-1 [8]

	1/3, č.1	1/3, č.3	2/3, č.2	2/3, č.5	P2/2, č.1	P2/2, č.2
Statický modul pružnosti v tlaku - měřený E [GPa]	33,8	32,8	34,2	34,3	31,9	32,0
Statický modul pružnosti v tlaku - ČSN EN 1992-1-1 E [GPa]	39,0	39,0	39,0	39,0	37,0	37,0

4 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo poukázat na vliv vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu statického modulu pružnosti betonu v tlaku. V této práci bylo prokázáno, že s narůstajícím počtem zatěžovacích cyklů se mění i hodnota modulu pružnosti, ovšem jen velmi mírně. Strmější nárůst modulu pružnosti byl v počátku zatěžování, poté byl průběh téměř konstantní. Tato skutečnost poukazuje na význam předběžných cyklů při stanovování statického modulu pružnosti uvedeného v normách pro usazení tělesa v lisu. Z naměřených dat je možné uvažovat, že při prvních cyklech zatížení nedochází pouze k usazování zkušebního tělesa, ale i ke stlačování dílčích nerovností. Zatížením se povrch srovnává a tím dochází k nárůstu hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku. Maximální nárůst, kterého bylo dosaženo, byl pouze 0,3 GPa.

Po vyhodnocení dat se projevil i vliv složení betonu, kdy u receptury 1/3 byl nárůst hodnoty modulu pružnosti se zvyšujícím se počtem cyklů zřetelnější, než u receptury provzdušněného betonu P2/2. V případě receptury P2/2 byl průběh hodnot téměř konstantní po celou dobu vícenásobného cyklického zatěžování.

Vzhledem ke skutečnosti, že se zkušební tělesa vícenásobně cyklicky zatěžovala pouze v oblasti pružných deformací a nedošlo k výrazné změně hodnoty statického modulu pružnosti, je možné opakovaně měřit statický modul pružnosti na jednom zkušebním tělese, aniž by to významněji ovlivnilo výsledek.

Při srovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku s hodnotami uvedenými v ČSN EN 1992-1-1 [8] bylo prokázáno, že normové hodnoty modulu pružnosti podle pevnostních tříd betonu jsou nadhodnocené. Je důležité tento fakt neopomenout v případě navrhování konstrukcí citlivých na přetvoření. Reálná přetvoření mohou být větší, než se kterými se počítá na základě hodnot dle ČSN EN 1992-1-1 [8].

Pro vyvození definitivních závěrů týkajících se problematiky vícenásobného cyklického zatěžování a jeho vlivu na statický modul pružnosti betonu v tlaku není možné vycházet pouze z výsledků tohoto experimentu. Pro potvrzení a další upřesnění by bylo žádoucí provést experiment rozsáhlejší, který bude mít vyšší vypovídací hodnotu. Možnou variantou je provedení experimentu s více zkušebními tělesy a různými hladinami horního zatěžovacího napětí (33% f_c , 40% f_c , 50% f_c).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ADÁMEK, J. a kolektiv. *Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1995, 96 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0609-7.
- [2] NOVÁK, J. a kolektiv. *Nauka o materiálech 10: Stavební materiály I*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 178 s. ISBN 80-010-1619-6.
- [3] PROCHÁZKA, J.; ŠTĚPÁNEK, P.; KRÁTKÝ, J.; KOHOUTKOVÁ, A.; VAŠKOVÁ, J. *Navrhování betonových konstrukcí 1: Prvky z prostého a železového betonu*. 3. vyd. Praha: ČBS Servis, 2009. ISBN 978-80-903807-5-2.
- [4] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ČNI, 2009.
- [5] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: ČNI, 2009.
- [6] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: ČNI, 2011.
- [7] ČSN EN 206. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ČNI, 2014.
- [8] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [9] *Slovník pojmů: Modul pružnosti. Ebeton* [online]. Dostupné z: <<http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>> [cit. 2015-12-2].
- [10] UNČÍK, S.; ŠEVČÍK, P. *Modul pružnosti betónu*. Trnava: Edícia BetónRacio, 2008. Dostupné z: <http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul_pruznosti.pdf> [cit. 2015-12-2].
- [11] MISÁK, P.; VYMAZAL, T. *Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, roč. 2009, č. 2, s. 24 - 25.
- [12] HUŇKA, P.; KOLÍSKO, J.; ŘEHÁČEK, S.; VOKÁČ, M. *Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu – rekapitulace. Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, roč. 2012, č. 4, s. 62 - 67. ISSN 12133116.

- [13] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2011.
- [14] MITRENGA, P. *Vliv kameniva na hodnoty modulů pružnosti betonu*. Brno, 2011. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta stavební.
- [15] HEŘMÁNKOVÁ, V. a kolektiv. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 100 s. ISBN 978-80-7204-758-1.
- [16] ANTON, O. a kolektiv. *Základy zkušebnictví - Návod do cvičení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 63 str. ISBN 80-214-2079-0
- [17] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2012.
- [18] ČSN 73 6174. *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: ČNI, 1994.
- [19] *Slovník pojmů: Pevnost betonu v tahu za ohybu - zkouška. Ebeton* [online]. Dostupné z: <<http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>> [cit. 2015-12-2].
- [20] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: ČNI, 2012.
- [21] CIKRLÉ, P.; KOCÁB, D. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. In *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno: VUT v Brně, 2013, p. 141 - 148.
- [22] ADÁMEK, J.; NOVOTNÝ, B.; KOUKAL, J. *Stavební materiály*. 1. vyd. Brno: CERM, 1997, 205 s. ISBN 80-214-0631-3.
- [23] MICHALKO, O.; MIKŠ, A.; SEMERÁK, P.; KLEČKA, T. *Fyzikální a mechanické zkoušení stavebních materiálů*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998, 138 s. ISBN 80-010-1736-2.
- [24] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 2014.
- [25] ČSN ISO 6784. *Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 1993.
- [26] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ČNI, 2014.
- [27] *Podrobné vyhledávání v normách. ČSN online* [online]. Dostupné z: <<https://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>> [cit. 2015-12-2].

- [28] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: ČNI, 2001.
- [29] ISO 1920-4. *Testing of concrete – Part 4: Strength of hardened concrete*. Switzerland: ISO, 2005.
- [30] ČSN EN ISO 9513. *Kovové materiály – Kalibrace průtahoměrových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením*. Praha: ČNI, 2013.
- [31] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ČNI, 2009.
- [32] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: ČNI, 2009.
- [33] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: ČNI, 2009.
- [34] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: ČNI, 2009
- [35] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ČNI, 2009.
- [36] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: ČNI, 2007.

SEZNAM OBRÁZKŮ

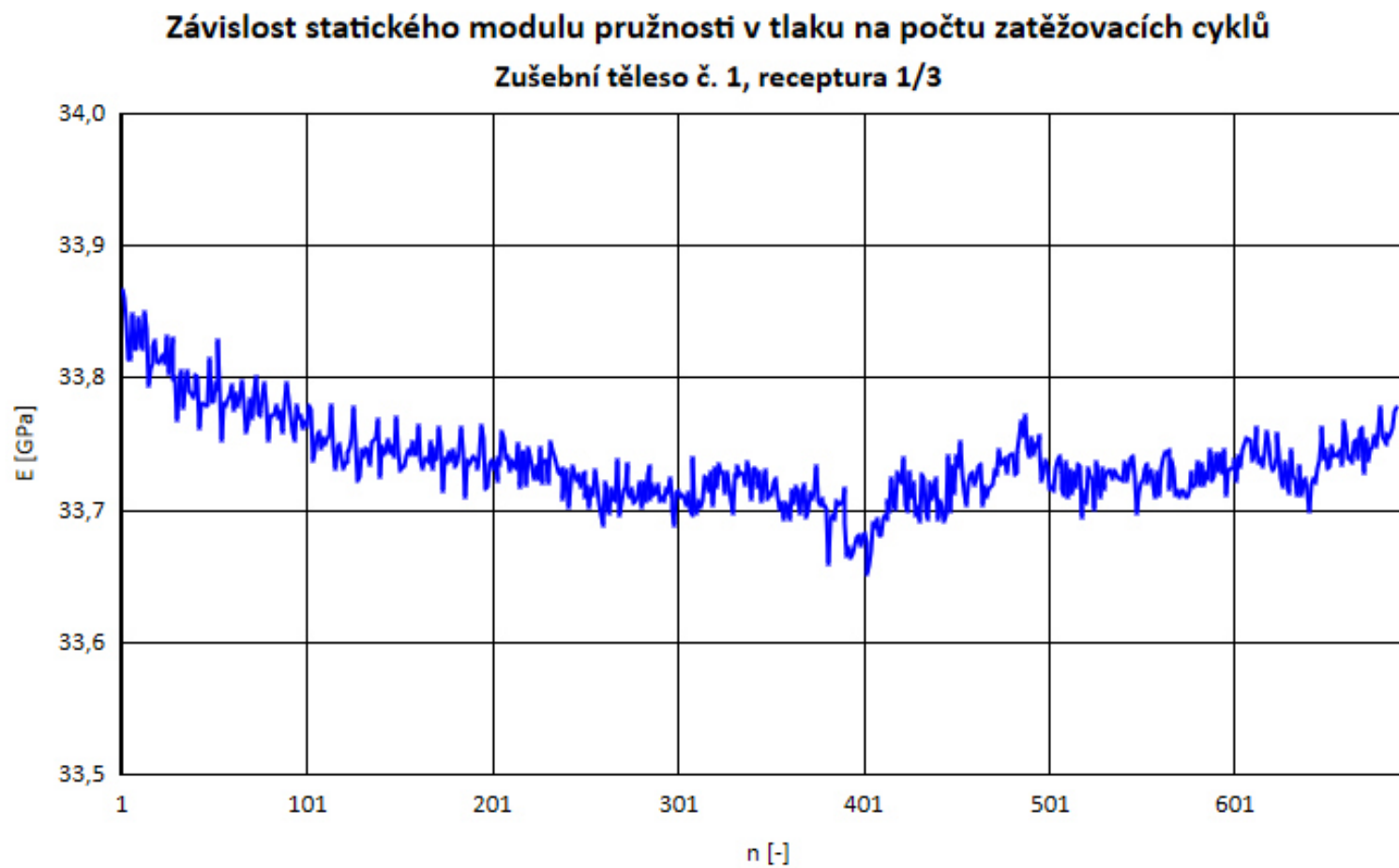
Obr. 1	Poměr pevnosti betonu v tlaku k pevnosti krychelné v závislosti na štíhlosti zkušební tělesa [3]	11
Obr. 2	Diagram σ - ϵ dvou pružných materiálů s rozdílným modulem pružnosti [10]	13
Obr. 3	Deformační diagram - znázornění tečnového a sečnového modulu pružnosti betonu [10]	13
Obr. 4	Krabicový graf hodnot modulu pružnosti ve vybraných pevnostních třídách [11].....	14
Obr. 5	Typy prozvučování měřeného objektu [14].....	16
Obr. 6	Schéma měření doby průchodu impulzu UZ vlnění [16]	16
Obr. 7	Způsob podepření a umístění budiče a snímače [16]	17
Obr. 8	Schéma uspořádání čtyřbodové zkoušky [19].....	19
Obr. 9	Deformační diagram betonu v tlaku [22]	21
Obr. 10	Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN ISO 1920-10 [24]	24
Obr. 11	Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN ISO 6784 [25].....	25
Obr. 12	Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 – metoda A [26]	28
Obr. 13	Schéma zatěžovacích cyklů dle ČSN EN 12390-13 – metoda B [26].....	29
Obr. 14	Výroba čerstvého betonu, zkoušky čerstvého betonu	33
Obr. 15	Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou.....	35
Obr. 16	Tělesa porušená po zkoušce pevnosti v tlaku	36
Obr. 17	Hydraulický lis FORM+TEST	37
Obr. 18	Detail odporových a elektronických tenzometrů	38
Obr. 19	Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů měřená na hydraulickém lisu FORM+TEST	39
Obr. 20	Mechanický lis LaborTech.....	40
Obr. 21	Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna zkušební tělesa	43
Obr. 22	Spojnicový graf nárůstu/poklesu statického modulu pružnosti v tlaku pro všechna zatěžovací zkušební tělesa	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Pevnostní třídy betonu [8].....	12
Tabulka 2	Směrné hodnoty sečnového modulu pružnosti betonu v tlaku podle pevnostních tříd [8].....	14
Tabulka 3	Hodnoty zmenšovacích součinitelů pro přepočet dynamických modulů pružnosti na moduly statické [20]	20
Tabulka 4	Porovnání parametrů zkoušek jednotlivých norem	30
Tabulka 5	Receptura čerstvého betonu	32
Tabulka 6	Zkoušky čerstvého betonu.....	32
Tabulka 7	Hodnoty 28denní pevnosti ztvrdlého betonu	33
Tabulka 8	Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost zkušebních těles všech receptur betonu.....	34
Tabulka 9	Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku pro všechny receptury betonu ..	35
Tabulka 10	Pevnost v tlaku, zatěžovací hladiny všech receptur betonu	41
Tabulka 11	Nastavené parametry mechanického lisu	41
Tabulka 12	Zatřídění do pevnostních tříd.....	42
Tabulka 13	Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku odpovídající vybraným zatěžovacím cyklům	44
Tabulka 14	Porovnání hodnot statického modulu pružnosti v tlaku naměřených a hodnot uvedených v ČSN EN 1992-1-1 [8]	45

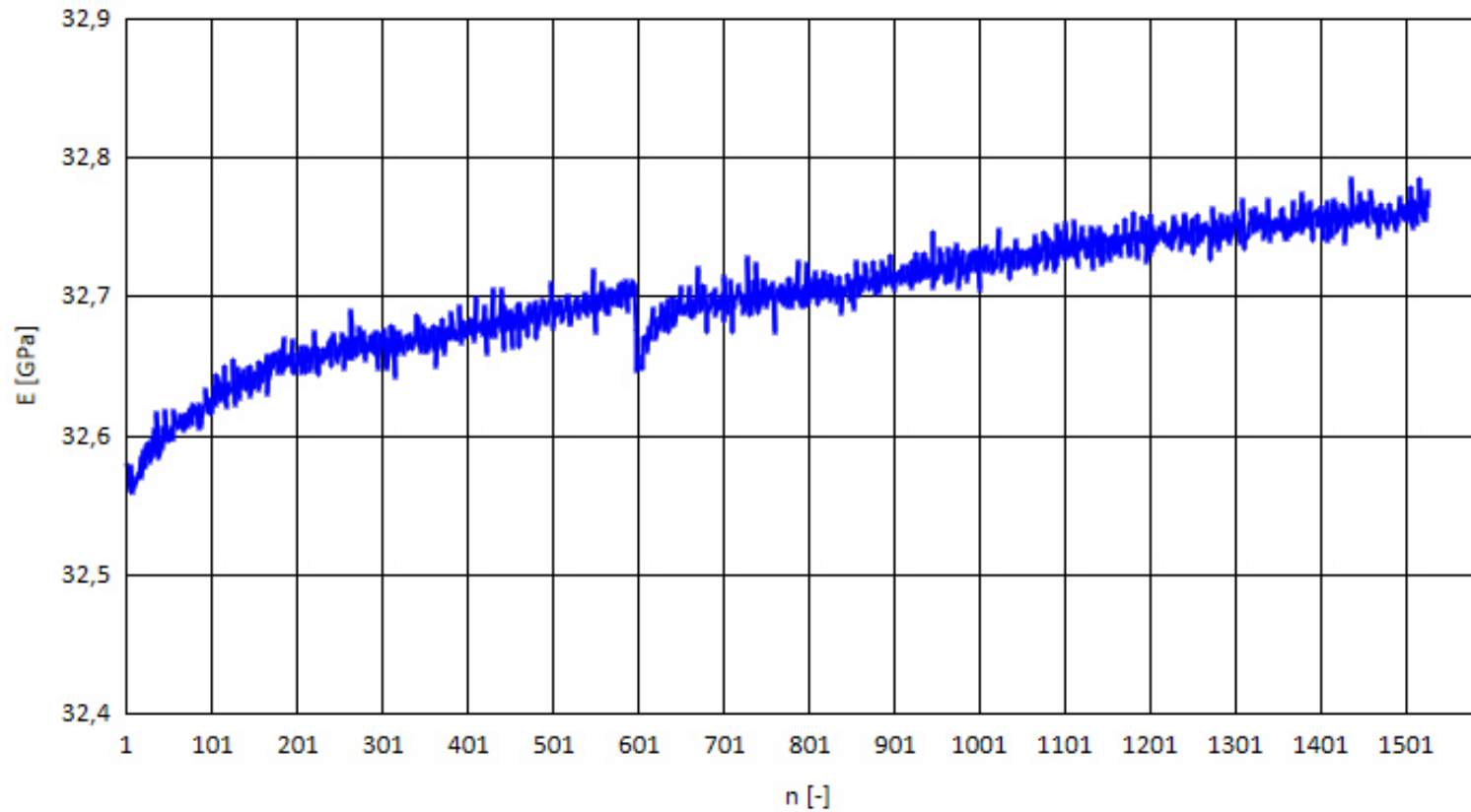
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I	Grafy závislosti statického modulu pružnosti betonu v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů.....	I
Příloha II	Deformační diagramy	VII



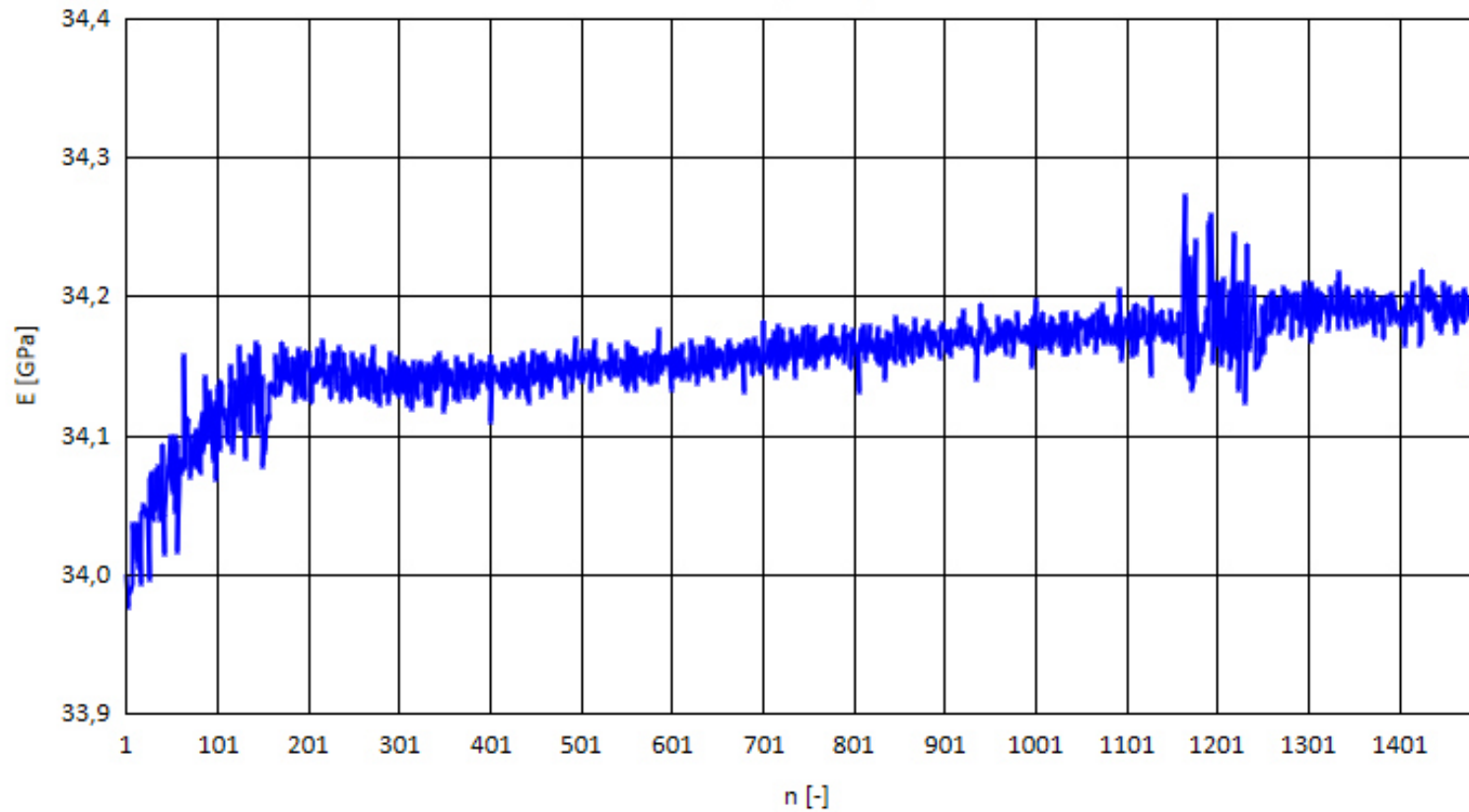
Obr. 1 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 1, receptura betonu 1/3

Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů
Zkušební těleso č. 3, receptura 1/3



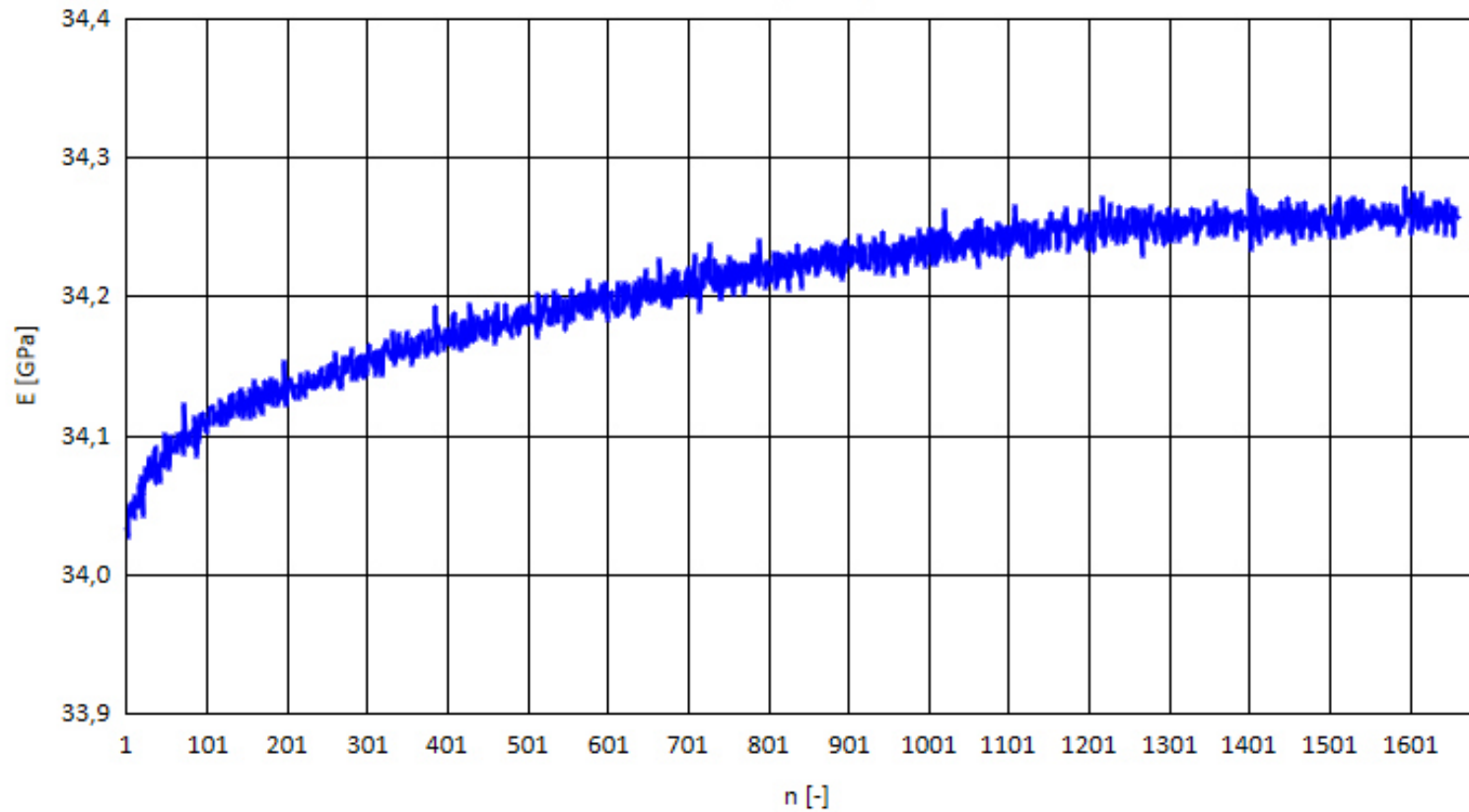
Obr. 2 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 3, receptura betonu 1/3

Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů
Zkušební těleso č. 2, receptura 2/3



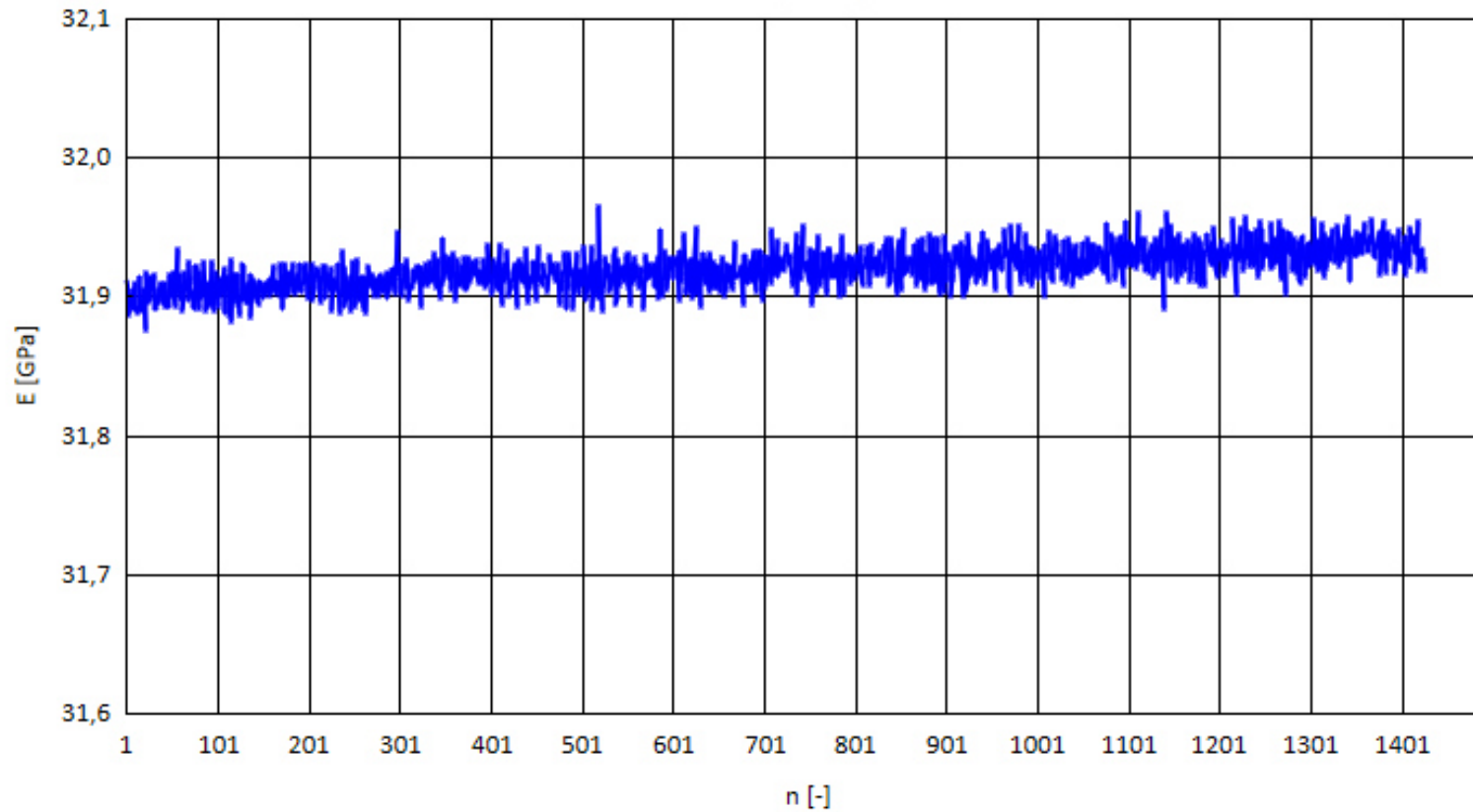
Obr. 3 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 2, receptura betonu 2/3

Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů
Zkušební těleso č. 5, receptura 2/3



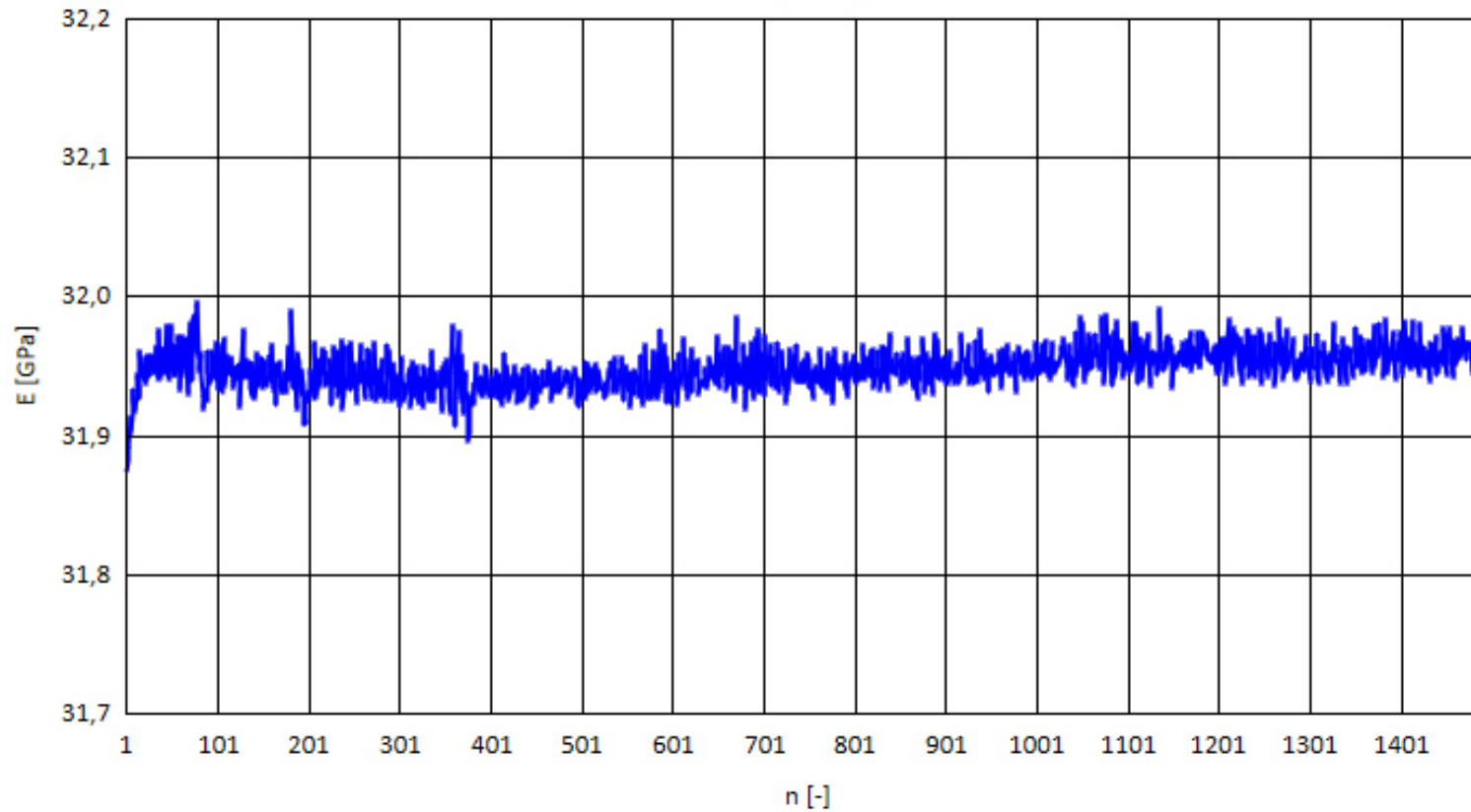
Obr. 4 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 5, receptura betonu 2/3

Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů
Zkušební těleso č. 1, receptura P2/2



Obr. 5 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 1, receptura betonu P2/2

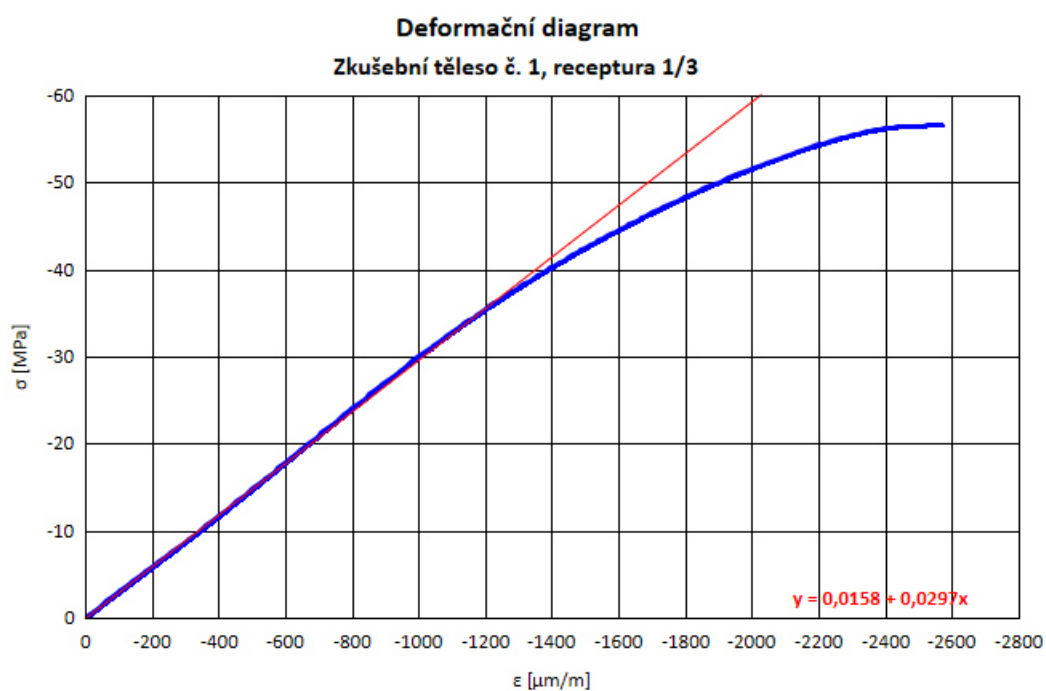
Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů
Zkušební těleso č. 2, receptura P2/2



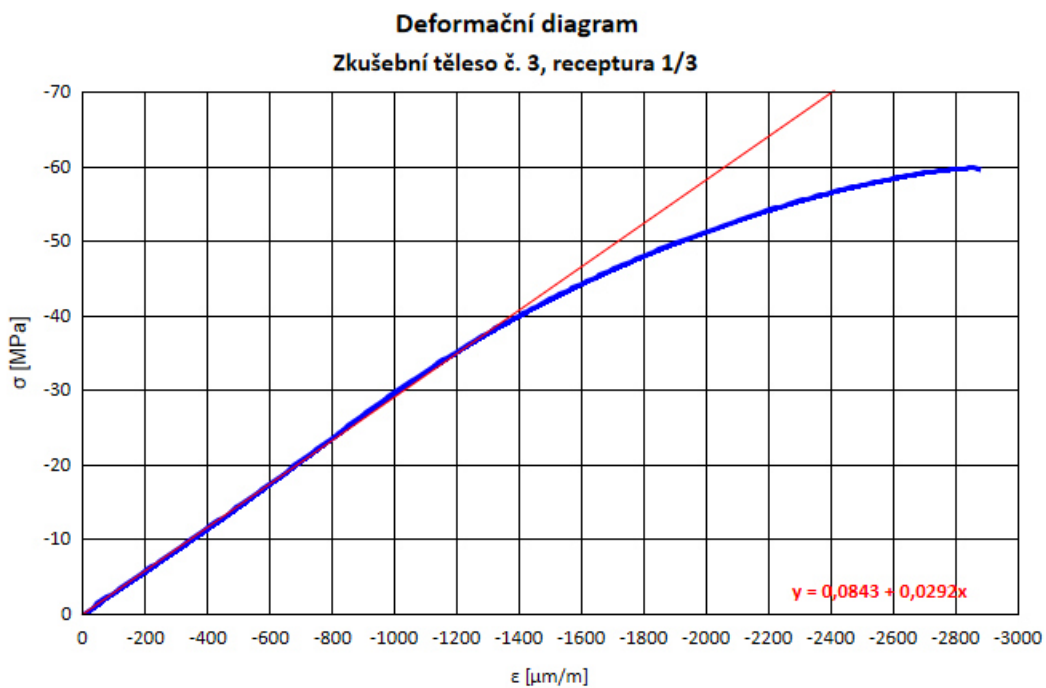
IV

Obr. 6 Spojnicový graf závislosti statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů;
zkušební těleso č. 2, receptura betonu P2/2

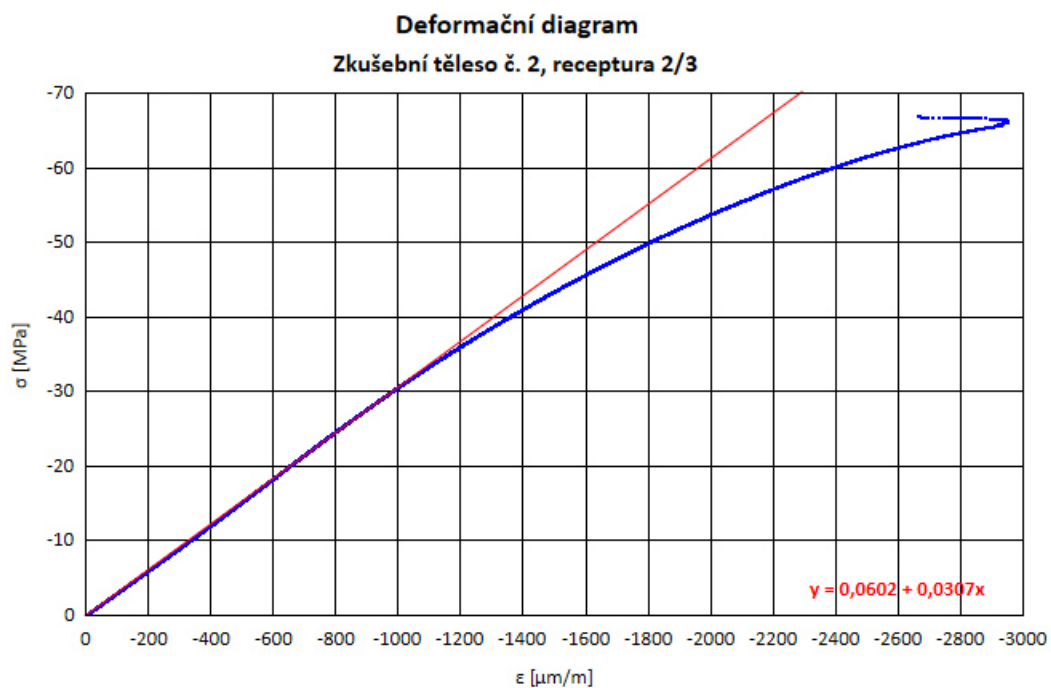
PŘÍLOHA II



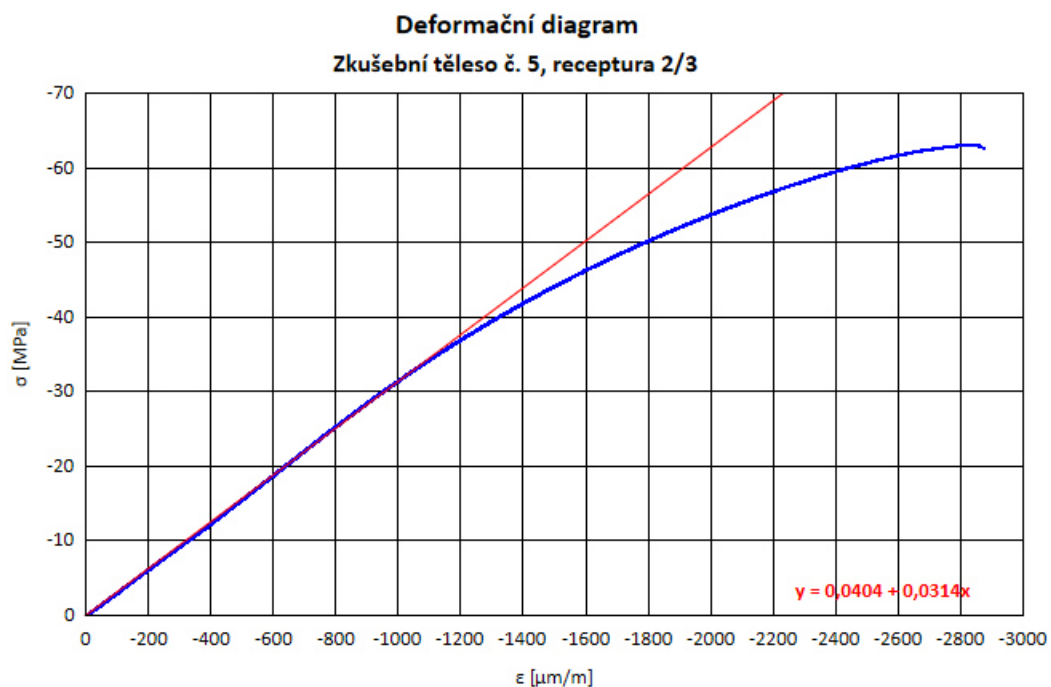
Obr. 7 Deformační diagram; zkušební těleso č. 1, receptura betonu 1/3



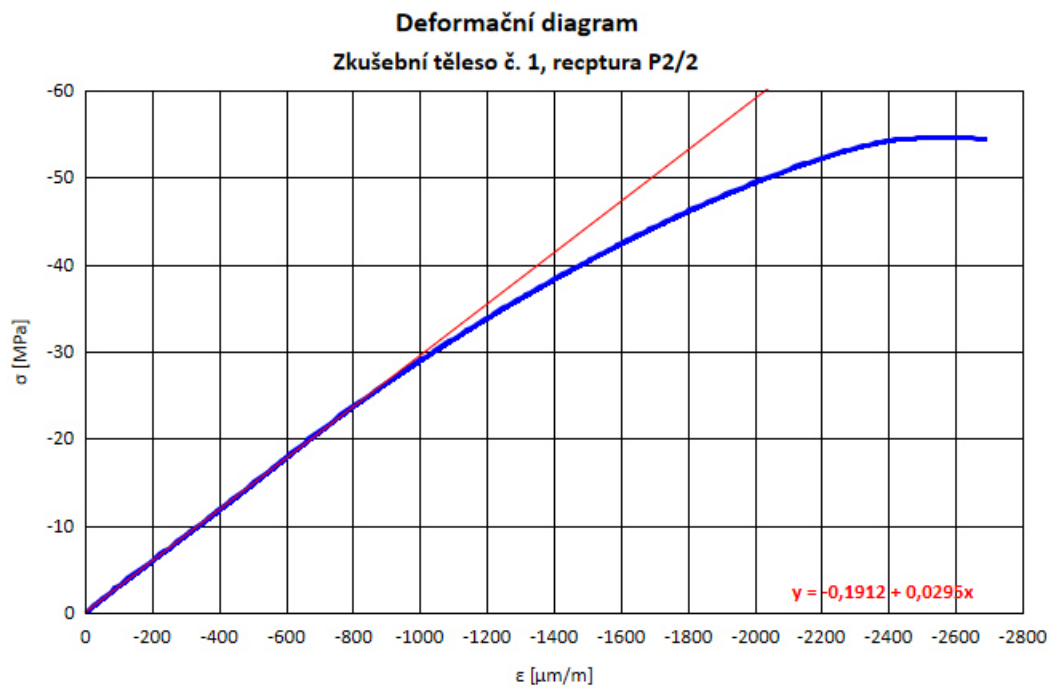
Obr. 8 Deformační diagram; zkušební těleso č. 3, receptura betonu 1/3



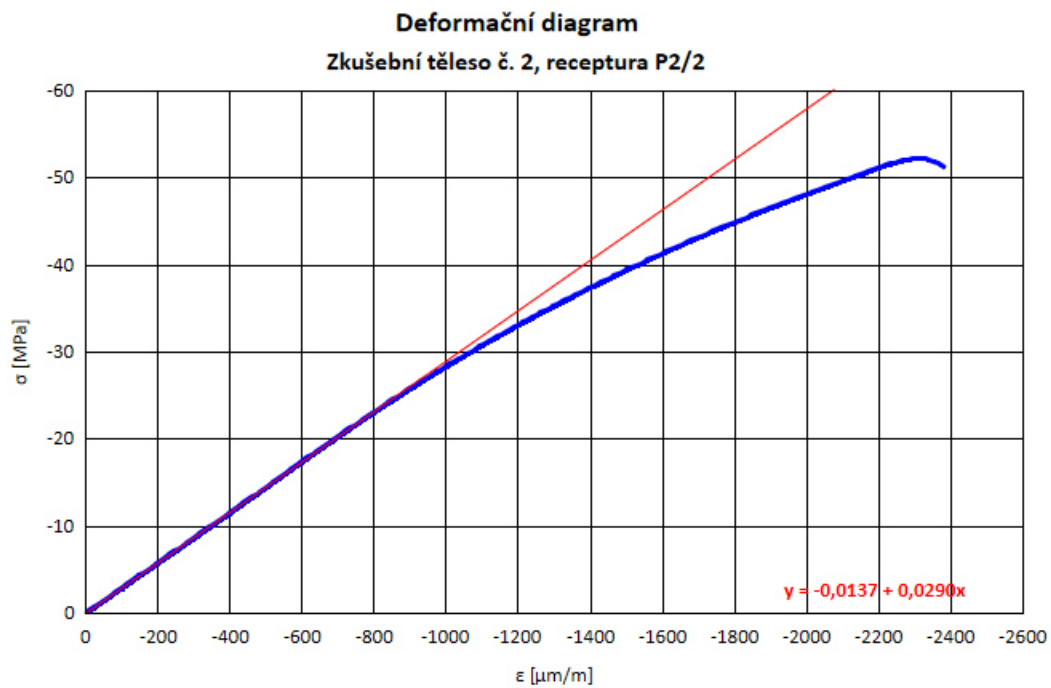
Obr. 9 Deformační diagram; zkušební těleso č. 2, receptura betonu 2/3



Obr. 10 Deformační diagram; zkušební těleso č. 5, receptura betonu 2/3



Obr. 11 Deformační diagram; zkušební těleso č. 1, receptura betonu P2/2



Obr. 12 Deformační diagram; zkušební těleso č. 2, receptura betonu P2/2