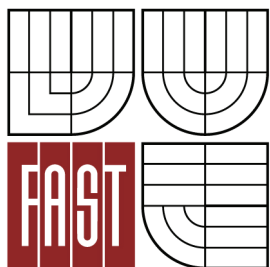




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# POSOUZENÍ VLIVU CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA PŘETVÁRNÉ CHARAKTERISTIKY ZTVRDLÉHO BETONU

THE EFFECT OF CYCLIC LOADING ASSESSMENT ON THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF  
HARDENED CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAELA POTOČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR MISÁK

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

|                                             |                                                                                        |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Student</b>                              | Michaela Potočková                                                                     |
| <b>Název</b>                                | Posouzení vlivu cyklického zatěžování na<br>přetvárné charakteristiky ztvrdlého betonu |
| <b>Vedoucí bakalářské práce</b>             | Ing. Petr Misák                                                                        |
| <b>Datum zadání<br/>bakalářské práce</b>    | 30. 11. 2013                                                                           |
| <b>Datum odevzdání<br/>bakalářské práce</b> | 30. 5. 2014                                                                            |
| V Brně dne 30. 11. 2013                     |                                                                                        |

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

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

## **Podklady a literatura**

ČSN ISO 6784 - Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

HUŇKA, P.; KOLÍSKO, J.; ŘEHÁČEK, S.; VOKÁČ, M. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti - rekapitulace. Beton TKS 4/2012.

COLLEPARDI M. Moderní beton. ČKAIT. 2009.

## **Zásady pro vypracování**

Bakalářská práce se zabývá sledováním vlivu vícenásobného cyklického zatěžování na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu. Zkušební tělesa budou cyklicky zatěžována tlakovým napětím v pružné oblasti pracovního diagramu. Cílem práce je srovnání hodnot modulu pružnosti a pevnosti v tlaku na tělesech ovlivněných a neovlivněných vícenásobným cyklickým namáháním.

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Petr Misák  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlivem mnohonásobného cyklického zatěžování na přetvárné charakteristiky ztvrdlého betonu, konkrétně byl zkoumán vliv na statický modul pružnosti v tlaku. Byly měřeny deformace během mnohonásobné cyklické zatěžovací zkoušky, ze kterých byl následně stanovován statický modul pružnosti v tlaku. Výstupem je grafické a procentuální vyjádření poklesu hodnot statického modulu pružnosti v tlaku s rostoucím počtem cyklů.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the influence of multiple cyclic loading on the deformation characteristics of hardened concrete. The influence on static modulus of elasticity in compression was studied. In this thesis deformation during multiple cyclic loading test was measured. Afterwards, from the test results the static modulus of elasticity in pressure was defined. The main output of this research is grafical and percentual representation of decrease of static modulus of elasticity values in compression in dependence of increasing number of cycles.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Beton, modul pružnosti, cyklické zatěžování

## **KEY WORDS**

Concrete, modulus of elasticity, cyclic loading

Michaela Potočková *Posouzení vlivu cyklického zatěžování na přetvárné charakteristiky ztvrdlého betonu*. Brno, 2014. 44 s., 10 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Misák.

## PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. 5. 2014

.....

podpis autora

Michaela Potočková

*Tímto bych ráda poděkovala Ing. Petru Misákovi za vstřícnost a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině, že mi umožnila studium.*

## OBSAH

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Úvod.....                                                                          | 7  |
| 2     | Současný stav řešené problematiky .....                                            | 8  |
| 2.1   | Beton a jeho výroba .....                                                          | 8  |
| 2.2   | Charakteristiky betonu .....                                                       | 9  |
| 2.2.1 | Složky betonu .....                                                                | 9  |
| 2.2.2 | Druhy betonu .....                                                                 | 10 |
| 2.2.3 | Třídy betonu .....                                                                 | 11 |
| 2.2.4 | Základní vlastnosti betonu .....                                                   | 11 |
| 2.3   | Pevnost betonu .....                                                               | 12 |
| 2.4   | Statický modul pružnosti .....                                                     | 15 |
| 2.4.1 | Deformace a Hookův zákon .....                                                     | 15 |
| 2.4.2 | Statický modul pružnosti v tlaku .....                                             | 17 |
| 2.4.3 | Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku .....                         | 17 |
| 2.4.4 | Vztah pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu a statického modulu pružnosti v tlaku..... | 19 |
| 2.5   | Vlivy na statický modul pružnosti.....                                             | 20 |
| 2.5.1 | Vliv složení a receptur betonu .....                                               | 21 |
| 2.5.2 | Vliv tvaru a velikosti zkušebního tělesa .....                                     | 21 |
| 2.5.3 | Vliv způsobu zakoncování tlačných ploch .....                                      | 22 |
| 2.5.4 | Vliv horní zatěžovací úrovně .....                                                 | 22 |
| 2.5.5 | Vliv způsobu ošetřování betonu .....                                               | 23 |
| 2.5.6 | Závislost na stáří.....                                                            | 23 |
| 2.5.7 | Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování .....                                    | 24 |
| 3     | Experimentální část .....                                                          | 26 |
| 3.1   | Popis experimentu.....                                                             | 26 |
| 3.1.1 | Výroba zkušebních těles.....                                                       | 26 |
| 3.1.2 | Příprava zkušebních těles.....                                                     | 29 |
| 3.1.3 | Průběh zkoušení.....                                                               | 30 |

|       |                                                |    |
|-------|------------------------------------------------|----|
| 3.2   | Výsledky zkoušek .....                         | 33 |
| 3.2.1 | Vlastnosti čerstvého betonu .....              | 33 |
| 3.2.2 | Vlastnosti ztvrdlého betonu .....              | 33 |
| 3.2.3 | Zkušební tělesa .....                          | 34 |
| 3.2.4 | Mnohonásobná cyklická zatěžovací zkouška ..... | 34 |
| 3.3   | Shrnutí výsledků .....                         | 36 |
| 4     | Závěr .....                                    | 38 |
|       | Seznam použité literatury .....                | 39 |
|       | Seznam obrázků .....                           | 42 |
|       | Seznam tabulek .....                           | 43 |
|       | Seznam příloh .....                            | 44 |

## 1 ÚVOD

Modul pružnosti je jedna ze základních pevnostně-deformačních charakteristik betonu, která výrazně ovlivňuje jeho deformační vlastnosti, z čehož vyplývá, že má vliv i na deformace konstrukcí, např. průhyby, posuny, přetvoření. Obecně platí, že čím je hodnota modulu pružnosti větší, tím menší jsou deformace. Význam modulu pružnosti tedy roste se statickou náročností a důležitostmi konstrukce.

Dosud byla modulu pružnosti věnovaná minimální pozornost, v současné době se ale dostává čím dál více do popředí. Při navrhování nových konstrukcí se uvažuje většinou s tabulkovými hodnotami přiřazovanými dle pevnostní třídy betonu. Skutečné hodnoty jsou ale odlišné, hlavním důvodem této skutečnosti je vliv složení betonu. Stejně pevnostní třídy se dá totiž dosáhnout pomocí různých receptur betonu, které ovlivňují jeho pružné deformace. Nejpřesnějších hodnot pro konkrétní beton lze dosáhnout pouze zkouškami na tělesech vyrobených pro daný experiment, či odebraných z řešené konstrukce. I tyto zkoušky jsou ale ovlivňovány mnoha faktory. Jedná se o tvar a velikost zkušebních těles a zakoncování jejich tlačných ploch, zatěžovací úroveň, ošetřování betonu, vodní součinitel, nízké teploty, kterým je beton v zimním období vystaven a jiné. Jedním z vlivů, který dosud nebyl podrobně prozkoumán, je mnohonásobné cyklické zatěžování.

Konstrukce se v průběhu své životnosti střídavě nachází ve stavech zatížených a odlehčených. Je-li stav, kdy je konstrukce zatěžována a následně odlehčována vnějšími vlivy, označen za cyklus, je poté možné konstrukci označit za mnohonásobně cyklicky zatěžovanou. Tyto cykly nejsou pravidelné a v průběhu životnosti konstrukce se neomezeně opakují v závislosti na jejím významu a využití.

Tato práce se zabývá závislostí hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů. Předpokladem je snižování hodnoty statického modulu pružnosti s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů. Zkoušení je realizováno jako pravidelné stonásobné zatěžování zkušebních těles na základě normy ČSN ISO 6784. Cílem je poukázat na tuto skutečnost, která se běžně vyskytuje, ale není brána v potaz jako faktor, který ovlivňuje deformační vlastnosti betonu.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Beton a jeho výroba

Beton (cementový) je umělý stavební materiál vyráběný ze směsi drobného a hrubého kameniva, cementu a vody s případným přidáním přísad zlepšujících některé jeho vlastnosti.

Podle druhu použitého pojiva je vyráběn beton cementový, vápenný, sádrový, asphaltový, makromolekulární aj. Beton cementový je pro své mechanické vlastnosti nejpoužívanějším, proto se termínem beton rozumí obvykle beton cementový [1].

Je třeba rozlišovat:

- **Čerstvý beton** – promíchaná směs cementu, kameniva, vody, popř. přísad a příměsí v ještě nezatvrdlém stavu, která je zhutnitelná běžnými způsoby.
- **Zhutněný beton** – zhutněný čerstvý beton uložený v konstrukci, který je ve stádiu tuhnutí.
- **Ztvrdlý beton** – ztvrdlý beton, který dosáhl určité pevnosti.

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.

Výroba betonu je prováděna dle technologického předpisu. Technologický předpis zahrnuje:

- **Složení čerstvého betonu** – poměr jednotlivých složek na základě jejich kvality, každému novému návrhu předchází průkazná zkouška.
- **Výrobu čerstvého betonu** – z důvodu dokonalého promísení je upřednostňována strojní výroba v míchačkách, výjimečně je používáno ruční míchání na přípravu velmi malého množství do podřadných konstrukcí.
- **Dopravu čerstvého betonu** – primární doprava z betonárny pomocí autodomíchávačů, sekundární přeprava přímo na staveništi, včetně uložení do bednění. Dále je doprava rozdělována na svislou a vodorovnou.

- **Zpracování čerstvého betonu** – odstranění vzduchových pórů z čerstvého betonu pomocí hutnění strojního nebo ručního.
- **Ošetřování betonu** – chránění betonu před povětrnostními vlivy a účinky mrazu, kropení pro udržení betonu ve vlhkém stavu.
- **Bednění a odformování** – bednění zajišťuje tvar konstrukce, používá se buď systémové, které umožňuje vícenásobné použití, nebo ztracené bednění, které je součástí konstrukce. Odformování je prováděno až po dostatečném zatvrdnutí betonu [2].

## 2.2 Charakteristiky betonu

### 2.2.1 Složky betonu

**Cement** – tvoří nejdůležitější složku betonu, tzv. pojivovou. K výrobě betonu jsou využívány všechny druhy i třídy cementů. Volba druhu cementu je řízena účelem konstrukce, prostředím během zpracování čerstvého betonu, ale i prostředím, ve kterém se bude nacházet hotová konstrukce. Volba třídy cementu je ovlivňována požadavky na výsledné vlastnosti betonů, především pevností v tlaku, pevností v tahu za ohybu, ale i vlastnostmi z hlediska trvanlivosti. Vyšší pevnost ztvrdlého betonu je možné zajistit použitím cementů vyšších tříd, nebo vyšší dávky cementů stejné třídy [2], [3].

**Kamenivo** – do betonu je používáno původu přírodního nebo umělého. Nosná kostra betonu je tvořena kamenivem, proto je velmi důležité jeho složení, kterým jsou ovlivňovány vlastnosti betonu. Důležitá je zrnitost kameniva zajišťující dobrou soudržnost. Pro konstrukční betony je vhodné použít nejméně tři až čtyři frakce, jejichž poměr je důležitý z hlediska pevnosti, nadměrného smršťování a dalších vlastností [2].

**Voda** – je nezbytnou složkou nejen pro výrobu, ale je významná i pro následné ošetřování hotového betonu. Záměsová voda musí být čistá, neutrální, málo tvrdá, příslušné teploty a nesmí obsahovat kyseliny ani organické látky. Odpařováním záměsové vody jsou tvořeny trhliny, které snižují pevnost betonu. Proto se musí beton při zrání ošetřovat vodou, tzv. ošetřovací vodou, pro kterou nejsou stanoveny parametry, ale je doporučováno dodržovat stejné požadavky jako pro vodu záměsovou. Všechny požadavky splňuje voda pitná [3].

**Příspěvky a přísady** – jsou přidávány do betonu za účelem zlepšit některé vlastnosti čerstvé betonové směsi i ztvrdlého betonu nebo snížit spotřebu cementu [2], [3].

### 2.2.2 Druhy betonu

Betony můžeme dělit dle následujících kritérií:

- **Podle objemové hmotnosti** (závisí na druhu kameniva) [2]:
  - Lehký beton – s objemovou hmotností pod  $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .
  - Obyčejný beton – s objemovou hmotností  $2000\text{-}2800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .
  - Těžký beton – s objemovou hmotností nad  $2800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .
- **Podle způsobu a místa uložení do konstrukce** [3]:
  - Monolitický – čerstvá betonová směs uložená do bednění je zhutněna, zatvrdne, ošetřuje se, odbední a plní svoji funkci.
  - Prefabrikovaný – betonový prvek je vyráběn předem ve výrobě nebo přímo na staveništi, odformován, uložen k dozrání, ošetřován a hotový dopraven a montován do konstrukce.
- **Podle způsobu využití vlastností v konstrukci** [3]:
  - Tepelně izolační.
  - Nenosný, výplňový.
  - Nosný – prostý, vyztužený, předpjatý.
- **Podle zvláštních požadavků na funkci** [2]:
  - Trvanlivé – odolávající vlivu povětrnosti a prostředí.
  - Mrazuvzdorné – odolávající střídavým účinkům mrazu a vody.
  - Vodotěsné, vodovzdorné – odolávající působení a tlakům vody.
  - Žáruvzdorné – odolávající působení ohně a žáru.
  - Koroziuvzdorné – odolávající účinkům agresivního prostředí.
  - Tepelně izolační – odolávající účinkům extrémních teplot.
  - Pohledové – mající upravený povrch.
  - Silniční – zvláštní požadavky na pevnost v tahu a ohybu.

- **Podle způsobu zpracování [3]:**

- lité,
- stříkané,
- vibrované,
- dusané,
- válcované,
- vibrolisované,
- vakuované,
- odstředované,
- provzdušněné.

### 2.2.3 Třídy betonu

Třídou betonu je vyjadřována jakost betonu z hlediska pevnosti. Podle evropské normy ČSN EN 206-1 [4] jsou označovány písmenem C a zlomkem, který vyjadřuje hodnotu zaručené 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. Podle normy ČSN EN 12390-1 [5] je válcová pevnost určována na zkušebních tělesech tvaru válců průměru 150 mm a výšky 300mm [2].

**Tabulka 1** Pevnosti třídy betonu [2]

| Třída               | C12/15 | C16/20 | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{ck,cyl}$ [Mpa]  | 12     | 16     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| $f_{ck,cube}$ [Mpa] | 15     | 20     | 25     | 30     | 37     | 45     | 50     | 55     | 60     |

### 2.2.4 Základní vlastnosti betonu

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].

Dalšími a zároveň nejdůležitějšími charakteristikami jsou pevnost a modul pružnosti betonu. Jelikož úzce souvisí s tématem této práce, budou jejich definice, hodnoty a měření popsány v dalších kapitolách.

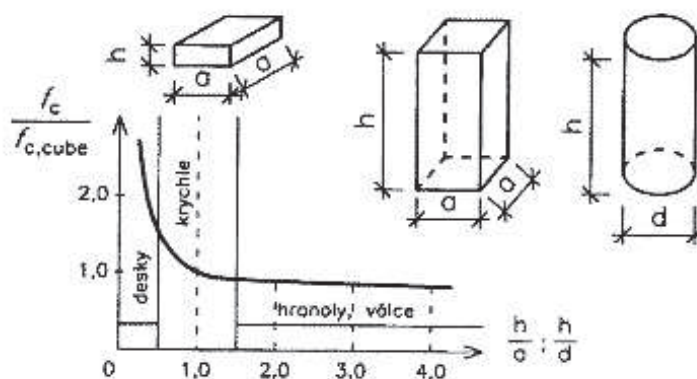
## 2.3 Pevnost betonu

Pevnost je nejdůležitější mechanická vlastnost 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 za ohybu, popř. pevnost v tahu příčném. Při zkoušení pevnosti se musí vždy uvést přesné rozměry zkušebního tělesa, způsob výroby a ošetřování, stáří betonu v době zkoušky (minimální stáří pro zkoušení je 28 dní), uspořádání zkoušky, její časový průběh a způsob vyhodnocení [6].

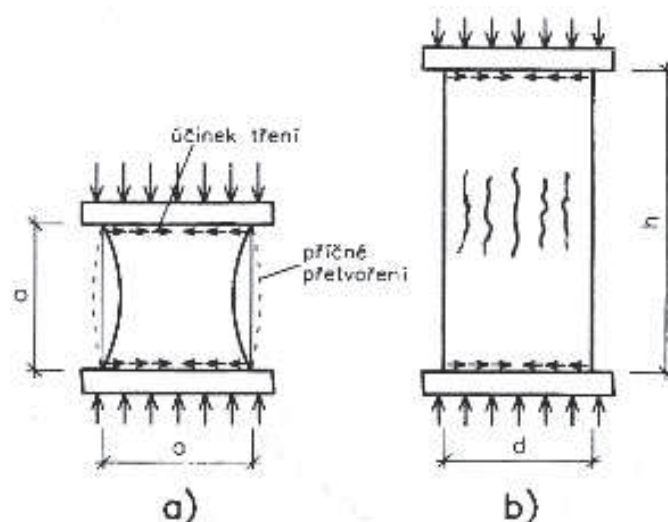
Pevností v tlaku se rozumí hodnota, kterou má zkušební těleso v okamžiku porušení při zatížení ve zkušebním stroji. Pevnost betonu v tlaku je možné ovlivnit štíhlostí zkušebního vzorku (poměr výšky  $h$  k průměru základny  $d$ , popř. hraně základny  $a$ ). Z Obr. 1 je patrné, že čím více se výška zkušebního tělesa v poměru k jeho základně zvětšuje, tím víc se eliminuje účinek tření ve styku tlačené plochy lisu s tělesem [6].



**Obr. 1** Poměr pevnosti betonu v tlaku k pevnosti krychelné v závislosti na štíhlosti zkušebního tělesa [6]

Dle pevností v tlaku je beton rozdělen na třídy, viz kapitola 2.2.3. Podle zkušebního tělesa je rozlišována pevnost krychelná, válcová, hranolová [6]. Stanovení těchto pevností se řídí normou ČSN EN 12390-3 [7], přičemž zkušební tělesa jsou vyráběna a ošetřována dle normy ČSN EN 12390-2 [8], jejichž tvar a rozměry odpovídají normě ČSN EN 12390-1 [5].

**Krychelná pevnost  $f_{c,cube}$**  – pro stanovení jsou používána základní tělesa ve tvaru krychle s hranou 150 mm. Krychle je vložena mezi tlačené plochy lisu, předpokládá se rovnoměrné rozdělení napětí po celé tlačené ploše tělesa. Na styku krychle s tlačnými plochami lisu dochází ke tření, které brání příčnému roztahování stlačovaného betonu. Tím vznikají v betonu příčná tlaková napětí, která způsobují vzrůst jeho pevnosti. Důsledkem toho je porušení krychle podél smykových ploch (viz Obr. 2). Pevnost je pak stanovena z maximální síly odpovídající hodnotě při porušení tělesa a ze zatěžované plochy tělesa. Takto zjištěná krychelná pevnost je větší než pevnost v konstrukci namáhané prostým tlakem [6].



**Obr. 2** Zkouška pevnosti tlaku: a) porušení krychle, b) porušení válce (hranolu) [6]

**Válcová pevnost  $f_{c,cyl}$**  – je zjišťována na zkušebních tělesech tvaru válce, o rozměrech v poměru výška k průměru – 1 : 1 nebo 2 : 1, přičemž základním tělesem je válec o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Stejně jako u krychelné pevnosti je uvažováno rovnoměrné rozdělení napětí po celé tlačené ploše tělesa. Je důležité, aby zkušební těleso mělo tlačená čela vzájemně rovnoběžná a zároveň kolmá k povrchovým přímkám. Pokud je toto dodrženo, těleso je porušeno svislými trhlinami vznikajícími přibližně uprostřed jeho výšky, pokud kolmost není dodržena, těleso je porušeno smykem (vznikem diagonálních trhlin). Z výsledku pak nelze stanovit válcová pevnost. Označení válcové pevnosti je často zkracováno na  $f_c$ , ve vztahu ke krychelné pevnosti je možné uvažovat vztah [6]:

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

**Hranolová pevnost  $f_{c,prism}$**  – je zkoušena na tělesech ve tvaru hranolu se čtvercovou základnou, o rozměrech v poměru výška k šířce základny 3 : 1 nebo 4 : 1. Zkoušení je prováděno obdobně jako u válcové pevnosti [6].

## 2.4 Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti je řazen mezi základní charakteristiky betonu. Výrazně ovlivňuje deformační vlastnosti betonu, z čehož vyplývá, že má vliv i na deformace konstrukcí, např. průhyby, posuny, zkrácení. Jeho význam roste se statickou náročností a důležitostí konstrukce. Obecně platí, že čím větší je hodnota modulu pružnosti, tím menší jsou deformace betonu a naopak [9].

Statický modul pružnosti  $E$  v GPa je definován jako poměr napětí  $\sigma$  v MPa a poměrného přetvoření  $\varepsilon$  v mm/m:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Beton se vlivem vnějších sil může deformovat trvale (nepružně), nebo dočasně (pružně). Statický modul pružnosti se stanovuje v oboru pružných deformací, kde platí Hookův zákon [9].

### 2.4.1 Deformace a Hookův zákon

Každé těleso, na které působí vnější zatížení, změní vlivem těchto sil svůj tvar. Změna tvaru, resp. deformace, závisí na charakteru zatížení a napětí, které ji způsobuje. Při tlakovém napětí dochází ke zmenšení rozměrů tělesa ve směru působící síly (stlačení materiálu). Při tahovém napětí dochází naopak ke zvětšení rozměru ve směru působení (natažení materiálu). Vymizí-li deformace po skončení působení zatížení, jedná se o deformaci pružnou. Zůstane-li těleso i po odlehčení ve stavu plně či částečně deformovaném, jedná se o deformaci nepružnou, tzv. plastickou. Velikost deformace je nejčastěji vyjadřována formou poměrného přetvoření pomocí vztahu:

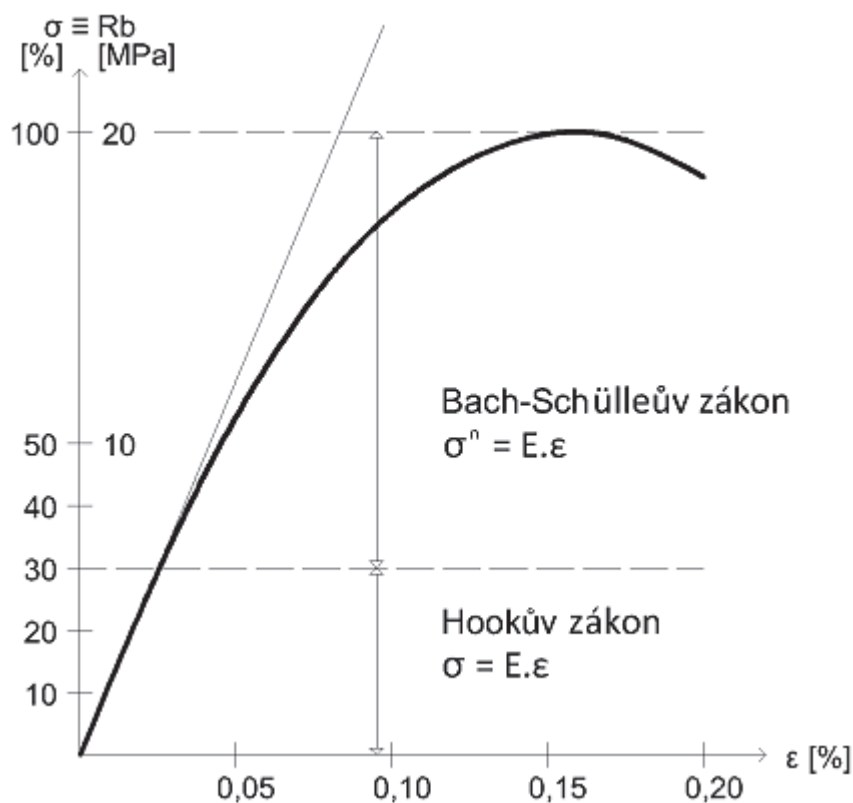
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3)$$

kde  $\varepsilon$  – poměrné přetvoření;

$\Delta l$  – změna délky v mm;

$l_0$  – původní délka tělesa v mm.

Velikost poměrné deformace je závislá na napětí, které ji způsobuje. Je vyjadřována  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramem, tzv. deformačním diagramem [9].



**Obr. 3** Deformační diagram betonu v tlaku [3]

Na Obr. 3 je znázorněn deformační diagram betonu v tlaku, ze kterého je zřejmé rozdělení na pružnou a plastickou oblast. V pružné oblasti platí Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (4)$$

V oblasti plastické platí zákon Bach-Schülleův, který se vyjadřuje obecnějším vztahem:

$$\varepsilon = k \cdot \sigma^n, \quad (5)$$

kde  $k = 1/E_0$ ;

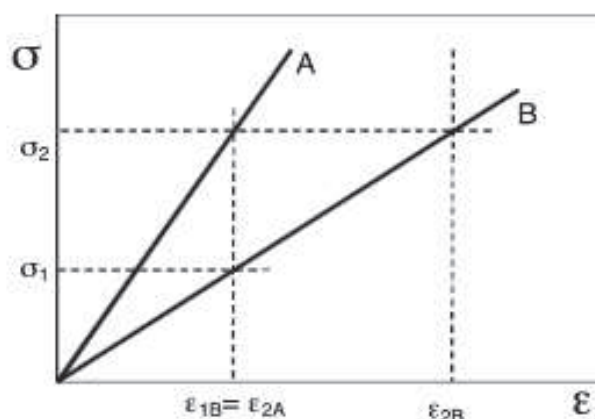
$E_0$  – směrnice tečny ke křivce vedené počátkem diagramu;

$n = 2$  a více.

Je-li hodnota  $n = 1$ ,  $E_0 = E$ , přejde Bach-Schülleův zákon v zákon Hookův. Pružné chování pevných látek v oblasti Hookova zákona je charakterizováno konstantami pružnosti, mezi které patří i statický modul pružnosti v tlaku [1], [10].

### 2.4.2 Statický modul pružnosti v tlaku

Modul pružnosti, který je stanoven ze závislosti mezi napětím a poměrným přetvořením, se označuje jako statický modul pružnosti v tlaku. Vyšší hodnotu modulu pružnosti mají materiály, u kterých musíme dosáhnout vyšší hladiny napětí pro dané přetvoření. Materiály s větším modulem pružnosti mají tedy menší deformace. Na Obr. 4 je zřejmé, že při dosažení stejného napětí mají materiály s rozdílným modulem pružnosti i rozdílné deformace. Materiál „A“ má podstatně menší deformaci, z čehož vyplývá, že má i větší hodnotu modulu pružnosti, než materiál „B“ [9].



**Obr. 4** Diagram  $\sigma$ - $\epsilon$  dvou pružných materiálů s rozdílným modulem pružnosti [9]

### 2.4.3 Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku ztvrdlého betonu se určuje dle normy ČSN ISO 6784 [11].

**Zkušební tělesa** – mohou být vyrobena nebo odebrána přímo z konstrukce. Jsou používány válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Je možné použít i jiná zkušební tělesa vyhovující požadavkům ČSN EN 12390-1 [5], za dodržení poměru délky  $L$  k průměru  $d$  v rozmezí  $2 \leq L/d \leq 4$  a průměr  $d$  je nejméně čtyřnásobek velikosti největšího zrna kameniva v betonu.

Zkušební tělesa musí být vyrobena a uložena podle ČSN EN 12390-2 [8]. Rozměry a objemová hmotnost se stanovují dle postupů uvedených v ČSN EN 12390-3 [7].

Není-li u těles odebíraných z konstrukce jakýkoli z těchto požadavků dodržen, musí se tato skutečnost uvést do zprávy o zkoušce [11].

**Zkušební zařízení** – sestává ze zkušebního lisu vyhovujícího ČSN EN 12390-3 [7]. Musí umožnit vyvození požadované hodnoty zatížení a její udržení.

Přístroje pro měření deformací nesmí mít měřicí základnu menší než  $2/3 d$  a musí být připevněny tak, aby byly měřené body stejně vzdálené od obou konců zkušebního tělesa a zároveň ve vzdálenosti od jeho konců alespoň  $L/4$ .

Přetvoření se musí měřit nejméně na dvou protilehlých stranách zkušebního tělesa. U zkušebních těles zhotovených ve vodorovné poloze se měřicí základny umísťují na svislých výrobních plochách. Přesnost přístroje musí být  $\pm 5 \times 10^{-6}$  [-] [11].

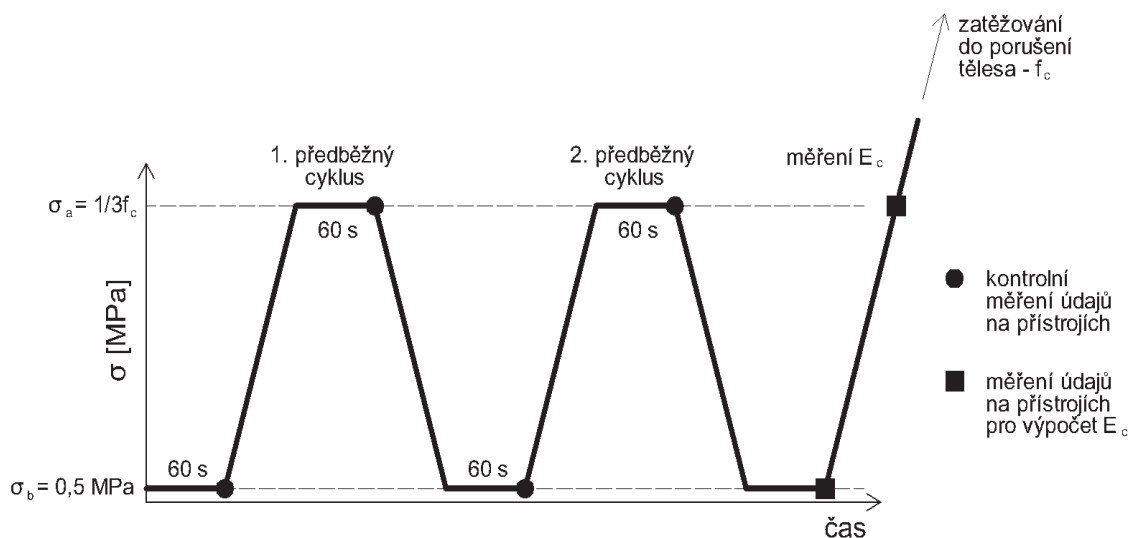
**Postup** – nejdříve je stanovena pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [7] na třech srovnávacích zkušebních tělesech. Tato tělesa jsou shodná velikostí i tvarem jako tělesa, která se použijí pro stanovení statického modulu pružnosti. Stejně tak způsob výroby a ošetřování musí být za stejných podmínek. Z průměrné hodnoty pevnosti v tlaku  $f_c$  je určeno napětí použité ke stanovení statického modulu pružnosti.

Zkušební těleso s osově osazenými přístroji je vloženo dostředně do zkušebního lisu. Vyvodí se základní napětí  $\sigma_b = 0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a zaznamenají se údaje na všech přístrojích. Napětí se zvyšuje plynule s časovým nárůstem tlaku  $(0,6 \pm 0,4) \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  za sekundu do hodnoty napětí  $\sigma_a = f_c/3$ . Na této hladině je napětí udržováno 60 s a v průběhu následujících 30 s jsou opět odečteny údaje na všech přístrojích.

Jestliže se jednotlivá vypočtená přetvoření liší od své průměrné hodnoty o více než 20 %, výsledek zkoušky nelze uvažovat. Jestliže je prokázáno, že centrování je dostatečně přesné, sníží se zatížení na základní napětí  $\sigma_b$  stejnou rychlostí jako při zatěžování. Tento předběžný cyklus je nejméně dvakrát opakován se stejnou rychlostí zatěžování a odlehčování a s udržováním hladin napětí na odpovídajících hodnotách po dobu 60 s.

Po dokončení posledního předběžného cyklu se vyčká 60 s při napětí  $\sigma_b$  a během 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření  $\varepsilon_b$ . Zkušební těleso se znovu zatíží předepsanou rychlostí na hladinu napětí  $\sigma_a$  a během 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření  $\varepsilon_a$ . Průběh cyklů je znázorněn na Obr. 5.

Po dokončení měření je zatížení zkušebního tělesa zvětšováno až do porušení. Jestliže se pevnost zkušebního tělesa liší od  $f_c$  o více než 20 %, je nutné tuto okolnost uvést ve zprávě o zkoušce [11].



**Obr. 5** Průběh cyklů statické zatěžovací zkoušky [12]

**Vyhodnocení** – průměrná přetvoření  $\varepsilon_a$  a  $\varepsilon_b$  jsou vypočítána ze všech naměřených míst v měřeném zatěžovacím cyklu (následujícím po centrování a vykonání nejméně dvou předběžných zatěžovacích cyklů).

Statický modul pružnosti v tlaku  $E_c$  v  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  je dán vzorcem:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}, \quad (6)$$

kde  $\sigma_a$  – horní zatěžovací napětí v  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  ( $\sigma_a = f_c/3$ );

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

$\varepsilon_a$  – průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí;

$\varepsilon_b$  – průměrné přetvoření při základním napětí.

Výsledek je zaokrouhlen 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  $10\,000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  [11].

#### 2.4.4 Vztah pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu a statického modulu pružnosti v tlaku

Všeobecně je uváděno, že statický modul pružnosti v tlaku roste s jeho pevností v tlaku. Tato závislost však není lineární. Jsou uváděny empirické vztahy pro vyjádření vztahu mezi statickým modulem pružnosti v tlaku a pevností. Pro tradiční betony je uváděn vztah:

$$E_c = 4,73(f_c)^{0,5}, \quad (7)$$

kde  $E_c$  – modul pružnosti betonu v GPa;

$f_c$  – válcová pevnost v tlaku betonu v MPa.

Tradičním betonem je myšlen beton, který obsahuje klasické složky (cement, kamenivo, voda) bez masivního užití přísad a příměsí. Tyto empirické vztahy však mohou platit pouze pro betony s podobným složením. V případě větších rozdílů v použitých složkách betonu může být tato závislost podstatně odlišná. Závislost mezi modulem pružnosti a pevností betonu je uváděna i v evropské normě ČSN EN 1922-1-1 [13], i zde je ale doporučeno uvedené hodnoty redukovat, ale pouze v závislosti na použitém kamenivu. Není zde brán v potaz druh či množství přísad a příměsí, vodní součinitel, apod. [9].

## 2.5 Vlivy na statický modul pružnosti

Hodnota statického modulu pružnosti je primárně ovlivněna složením betonu, výsledná hodnota je však závislá na celé řadě dalších vlivů, obecně je možné je rozdělit na technologické a zkušební vlivy [14].

Mezi technologické vlivy je řazeno složení čerstvého betonu (druh, množství a velikost kameniva; typ a množství cementu, příměsí a přísad; provzdušnění; vodní součinitel), technologie výroby a zpracování čerstvého betonu (míra zhutnění; teplota, vlhkost a doba ošetřování) a kvalita tranzitní zóny [14].

Za zkušební vlivy je považována použitá zkušební metoda (určování statického x dynamického modulu pružnosti), použitý výpočetní vztah, zatěžovací úroveň, tvar a velikost zkušebního tělesa (válce, trámce, poměr rozměrů, směr hutnění x směr zatěžování), způsob získání zkušebního tělesa (tělesa odebrána z konstrukcí x vyrobená pro experiment), stáří zkušebního tělesa, prostředí během zkoušky (teplota, vlhkost), použitý snímač deformací a lis, excentricita tělesa, rychlost zatěžování, cyklické zatěžování, způsob zakoncování tlačných ploch vzorku (materiál, rovinnost, pevnost) a kvalita použitých forem [14].

To vše jsou faktory, které mohou značně ovlivnit výsledky zkoušení. V následujících kapitolách budou některé z vlivů podrobněji rozebrány na základě již provedených experimentů.

### **2.5.1 Vliv složení a receptur betonu**

Statický modul pružnosti je ovlivňován kvalitou složek a jejich poměrem v betonové směsi. Výsledný statický modul pružnosti betonu se pohybuje v rozmezí modulu pružnosti zatvrdlé cementové kaše a modulu pružnosti kameniva. Statický modul pružnosti přírodního kameniva je vždy vyšší, než u zatvrdlé cementové kaše, jejíž hodnotu ovlivňuje především pórovitost. S rostoucí pórovitostí statický modul pružnosti klesá. Pórovitost je způsobena vodním součinitelem. Čím je vodní součinitel vyšší, tím se zvyšuje obsah volné vody a v důsledku toho se zvyšuje i pórovitost. Stejně tak narůstá pórovitost i s obsahem vzduchu. Pro dosažení vysokých hodnot modulu pružnosti je potřeba navrhnout beton s nízkým vodním součinitelem a zároveň čerstvý beton dostatečně zhutnit, čímž se odstraní přebytečný vzduch [9].

V článku [15] je popsán experiment, kde je potvrzen vliv receptury na hodnoty výsledného modulu pružnosti. V rámci jedné pevnostní třídy podle ČSN EN 206-1 [4] vycházejí různé výsledky v závislosti na receptuře. Dokonce se zde prokázalo, že i v rámci jedné receptury, která byla vyráběna opakovaně s delším časovým odstupem, bylo dosaženo různých výsledků. Je to dáno proměnlivostí jednotlivých složek dané receptury v čase. Složky jsou označovány stále stejně, odpovídají normovým požadavkům, ale nejsou dokonale totožné, a proto jsou výsledné hodnoty zkoušek odlišné.

### **2.5.2 Vliv tvaru a velikosti zkušebního tělesa**

V experimentu zmiňovaném v článku [14] je zjišťována závislost hodnoty modulu pružnosti na tvaru a velikosti zkušebního tělesa. Zkoušení bylo prováděno až po delší době zrání betonu, aby se tak předešlo možným rozdílům ve vlastnostech betonu, které jsou časově závislé. Pro daný typ zkoušky a tělesa byly použity vždy tři vzorky vyhovující požadavkům ČSN ISO 6784 [11].

Z provedených měření je možné si všimnout, že tělesa ze stejného betonu a stejně ošetřovaná s větším štíhlostním poměrem mají vyšší hodnoty statického modulu pružnosti. Z rozdílného štíhlostního poměru vychází i rozdílný stav napjatosti po délce vzorku, kdy u tělesa s větším štíhlostním poměrem dochází k menším deformacím v měřené oblasti, která odpovídá namáhání prostým tlakem. Dalším ovlivňujícím faktorem v tomto případě může být to, že byly použity válce i trámce. Přičemž válce jsou hutnější

svisle a trámce naležato. Což poukazuje na vliv rozdílného způsobu výroby a tím i možného rozdílného uspořádání kostry kameniva [14].

V rámci jedné zkušební receptury byly zjištěny rozdílné výsledky pro tělesa vyrobená z forem a tělesa vyřezaná z bloků. Uplatňuje se zde jak vliv rozdílného způsobu zrání, tak vliv řezu. Tělesa vyřezaná z bloků vykazovala nižší hodnoty modulu pružnosti.

Byla zde potvrzena i skutečnost, že v rámci jedné pevnostní třídy vycházejí rozdílné hodnoty modulů pružnosti v řádu několika GPa [14].

### **2.5.3 Vliv způsobu zakoncování tlačných ploch**

V rámci téhož experimentu v článku [14] se autoři zabývali i vlivem zakoncování zkušebních těles na statický modul pružnosti v tlaku. Byly vyrobeny dvě série zkušebních vzorků, přičemž jedna reprezentovala běžně používaný beton a druhá vysokopevnostní beton. K zakoncování byla použita sirná malta, cement, rychle tuhnoucí sádra, neoprenové podložky, hobrové podložky, dále pak byla tělesa zakoncována zařízením pilou a ručně hlazená. Pro každý typ zakoncování a danou sérii byla vyrobena 4 tělesa.

U série z tradičního betonu dosáhlo největší hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku zakoncování hobrovými podložkami, resp. neoprenovými. Nejnížší hodnoty naopak plocha hlazená. Zajímavostí je, že hobra má stejně jako plocha hlazená nejmenší pevnost v tlaku. Největší pevnost v tlaku byla naměřena u koncování pomocí sirné malty, která ale dosáhla lehce podprůměrné hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku [14].

U série zastupující vysokopevnostní beton byla naměřena nejvyšší hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a zároveň nejvyšší pevnosti v tlaku u neoprenových podložek. Nejnížší hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku dosáhla sádra, navzdory tomu, že u ní byla naměřená druhá nejvyšší pevnost v tlaku. Ostatní způsoby z této série měly hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku shodné [14].

Na základě těchto informací lze konstatovat, že i menší rozdílnost ve zkušebním postupu vede k rozdílným výsledkům. Nejvyšších hodnot můžeme dosáhnout pomocí neoprenových podložek. Nevhodné je pak vzhledem k nejnižším výsledkům pevnosti v tlaku použití hobrových podložek a hlazeného povrchu [16].

### **2.5.4 Vliv horní zatěžovací úrovně**

Jaký dopad má horní zatěžovací úroveň na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku je obsaženo ve článku [16]. Pro tuto zkoušku bylo vyrobeno třicet trámců, které

byly rozděleny do skupin po třech vzorcích. Na první trojici byla stanovena průměrná pevnost v tlaku  $f_c$ , ze které se vypočítaly zatěžovací hladiny 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 a 0,8 násobek  $f_c$ . Stejně tak byl stanoven modul pružnosti dle normy ČSN ISO 6784 [11] s horní zatěžovací hladinou rovnou  $1/3 f_c$ .

V tomto experimentu bylo potvrzeno, že výše horní zatěžovací úrovně má nezanedbatelný vliv na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku. Statický modul pružnosti v tlaku se snižuje se zvyšující zatěžovací hladinou. Proto je vždy nutné uvést, za jakých podmínek se zkouška provádí [16].

Mimo jiné tato zkouška potvrzuje i Bach-Schülleův zákon a jeho formu Hookova zákona pro 20 - 30 % pevnostní namáhání [16].

#### **2.5.5 Vliv způsobu ošetřování betonu**

V článku [17] je popsán vliv míry nasycení betonu na vývoj dynamického a statického modulu pružnosti v tlaku. Autoři tohoto článku prováděli zkoušení v rámci betonáže opěry nového mostu, kde bylo vyrobeno 14 hranolů a 12 krychlí, které následně byly rozděleny na dvě skupiny. První byla uložena do vody, druhá byla v normálním laboratorním prostředí bez ošetřování vodou. Moduly pružnosti byly stanoveny v době stáří betonu 28 a 90 dní na vzorcích nasycených i suchých.

Z experimentu je jednoznačné, že u betonu ošetřovaného, uloženého ve vodě, modul pružnosti roste i po 90 dnech stáří. U betonu neošetřovaného dochází k mírnému růstu modulu pružnosti pouze z počátku, mezi 28 a 90 dnem stáří se nárůst zastavuje a modul pružností začíná naopak klesat [17].

V rámci experimentu, který trval 9 let, bylo však poukázáno na skutečnost, že po devíti letech byly u měřených směsí rozdíly minimální. Očekávání, že vodní uložení podporující hydrataci umožní dosáhnout lepších mechanicko-fyzikálních vlastností, nebyla vyvrácena, ale tento vliv se projevuje především v počátečních fázích tuhnutí betonu [18].

#### **2.5.6 Závislost na stáří**

V článku [19] je poukazováno na vliv mleté granulované vysokopecní strusky. V tomto experimentu byla zkoumána časová závislost statického modulu pružnosti v tlaku prostého betonu a betonu obsahujícího mletou granulovanou vysokopecní strusku, kterou byl nahrazen cement v 20–60 %. Bylo připraveno dvanáct záměsů obou betonů, na nichž byl statický modul pružnosti v tlaku zkoušen ve stáří 3, 7, 28, 56, 90, 150 a 180 dní.

Experimentálně zjištěné hodnoty byly porovnávány s hodnotami stanovenými dle vztahů pro časovou závislost modulu pružnosti betonu v tlaku:

$$\text{B3} \quad E_{ct} = 4734 \sqrt{\frac{f_{ct}}{4+0,85t}} \text{ [GPa]}, \quad (8)$$

$$\text{GL2000} \quad E_{ct} = 3500 + 4300 \sqrt{\frac{f_{ct}^{0,75}}{2,8+0,77t^{0,75}}} \text{ [GPa]}, \quad (9)$$

$$\text{ACI-209} \quad E_{ct} = 0,043 \sqrt{\frac{\rho^3 f_{ct}}{4+0,85t}} \text{ [GPa]}, \quad (10)$$

$$\text{CEB-FIP} \quad E_{ct} = 21500 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3} \sqrt{\exp\left(\frac{1}{4} - \sqrt{\frac{7}{4t}}\right)} \text{ [GPa]}, \quad (11)$$

$$\text{BS-8110} \quad E_{ct} = (20 + 0,25f_c) \left(0,4 + 0,6 \frac{f_{ct}}{f_c}\right) \text{ [GPa]}, \quad (12)$$

kde  $t$  – stáří ve dnech;

$f_c$  – 28 denní válcová pevnost v tlaku v Mpa;

$f_{ct}$  – válcová pevnost v tlaku určená v čase  $t$  v MPa;

$\rho$  – hustota betonu v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku betonu s mletou granulovanou vysokopecní struskou vycházely pro všechny záměsi menší než u prostého betonu, a to ve všech zjišťovaných časech. Průměrný nárůst v rozmezí od 28 do 180 dní byl pro prostý beton 15,5 %, pro beton se struskou o obsahu 20 %, 40 % a 60 % byl průměrný nárůst hodnot 18,9 %, 22,3 % a 27,8 %. Pro všechny záměsi vztah CEB-FIP předpokládal hodnoty vyšší, zatímco vztah B3 hodnoty nižší. B3 se blížil experimentálním hodnotám ve větším stáří. Všechny vztahy vykazují prudký nárůst hlavně z počátku stáří betonu, výjimkou je BS-8110 [19].

### 2.5.7 Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování

Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování nebyl doposud zcela prostudován. Předpokládá se, že s počtem zatěžovacích cyklů bude hodnota statického modulu pružnosti v tlaku klesat. V článku [20] není rozebrán přímo tento vliv, ale týká se tématu podobného. Je zde popisováno odvozování číselných vztahů z dostupných experimentálních dat. Přičemž se vychází z kombinací tří typů zatížení. V tomto případě se

vychází z působení na železobetonovou přímo pojížděnou desku mostů, která se využívá kvůli cenové dostupnosti. Jedná se o vliv počasí (rozmrazovací a zmrazovací cykly), dopravy (mnohonásobné cyklické zatěžování) a chemických látek (chloridy).

Více a podrobněji o vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování v experimentální části této práce, viz kapitola 3.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Popis experimentu

V tomto experimentu je zkoumána závislost hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů. Rozsah zkoušení je kvůli časové náročnosti malý, jedná se spíše o poukázání na skutečnost, která se v praxi běžně vyskytuje, ale nebere se v potaz jako faktor ovlivňující deformační vlastnosti betonu.

Byla provedena měření na zkušebních tělesech jedné receptury, tvaru i rozměrů. Jelikož se pravděpodobně jedná o první experiment týkající se této problematiky, parametry zkoušky byly nastaveny dle teoretických předpokladů a v případě potřeby v průběhu zkoušení upravovány.

##### 3.1.1 Výroba zkušebních těles

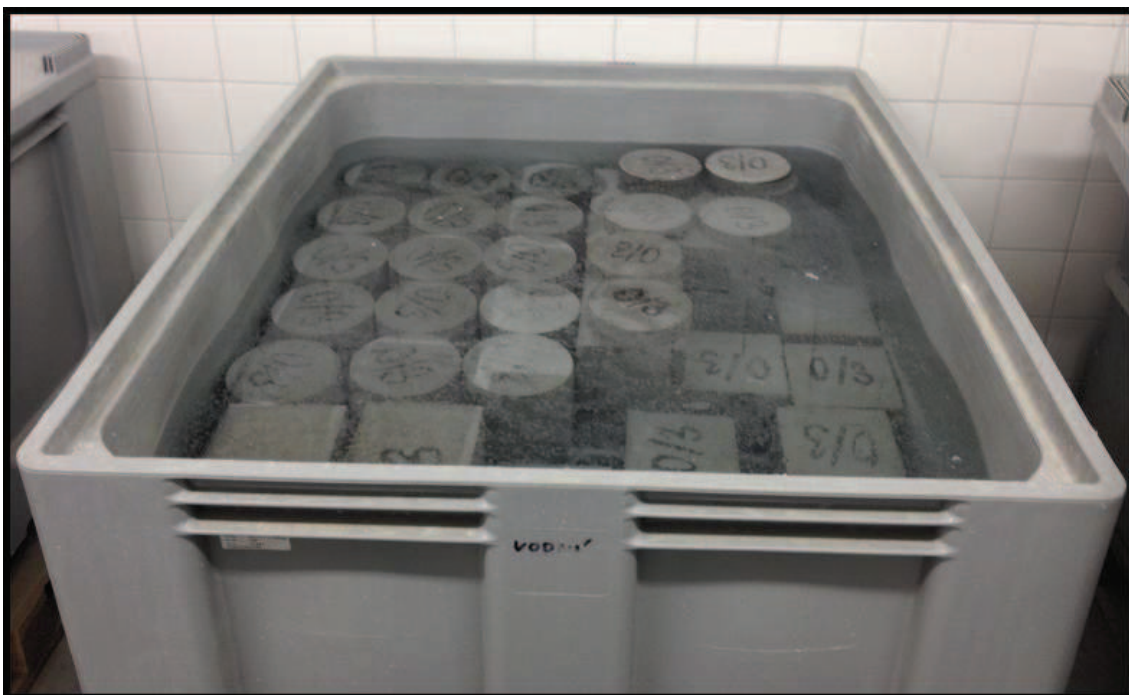
V rámci tohoto experimentu proběhla 6. 11. 2013 za teploty vzduchu 10 °C betonáž v betonárně BETOTECH, s. r. o. v Olbramovicích. Bylo vyrobeno 15 válců o průměru 150 mm a výšce 300 mm pro mnohonásobnou cyklickou zatěžovací zkoušku, krychle o hraně 150 mm pro stanovení vlastností ztvrdlého betonu. Zkušební tělesa byla vyhotovena dle normy ČSN EN 12390-1 [5]. Všechna zkušební tělesa byla vyrobena z jedné záměsi čerstvého betonu (viz Tabulka 2), byl použit stejný typ forem a stejné uložení. Záměrem bylo získat co nejvíce homogenní výsledky zkoušek a zajistit odstranění systematických vlivů.

**Tabulka 2** Receptura čerstvého betonu

| Receptura čerstvého betonu, množství 1 m <sup>3</sup> |                                     |                                   |              |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Materiál                                              | Teoretické množství s vlhkostí [kg] | Navážené množství s vlhkostí [kg] | Odchylka [%] |
| CEM I 42.5 R                                          | 405                                 | 402                               | -0,7         |
| 0-4 Bratčice – prané                                  | 886                                 | 888                               | +0,2         |
| Kamenivo 4-8 B                                        | 184                                 | 202                               | +9,9         |
| Kamenivo 8-16 B                                       | 697                                 | 692                               | -0,7         |
| Voda čistá                                            | 149                                 | 162                               | +0,5         |
| Voda kalová                                           | 0                                   | 0                                 | 0,0          |

|                       |      |       |
|-----------------------|------|-------|
| Celková hmotnost [kg] | 2321 | 2 346 |
| Vodní součinitel [-]  | 0,49 | 0,50  |

Zhutněný čerstvý beton ve formách pomocí vibračního stolku byl uložen v laboratorních podmínkách. Odformování proběhlo 24 hodin po betonáži, poté byla zkušební tělesa vložena do vodního uložení (Obr. 6).



**Obr. 6** Odformovaná tělesa ve vodním uložení

V rámci betonáže byly provedeny zkoušky čerstvého betonu. Konkrétně se jedná o objemovou hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [21], obsah vzduchu v čerstvém betonu (Obr. 7) dle ČSN EN 12350-7 [22], sednutí kužele (Obr. 8) dle ČSN EN 12350-2 [23] a rozlití (Obr. 9) dle ČSN EN 12350-5 [24].

Po 28 dnech byla zjišťována objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle normy ČSN EN 12390-7 [25] a pevnost ztvrdlého betonu v tlaku na krychlích o hraně 150 mm dle ČSN EN 12390-3 [7].



**Obr. 7** Zkoušky čerstvého betonu – obsah vzduchu



**Obr. 8** Zkoušky čerstvého betonu – sednutí kužele



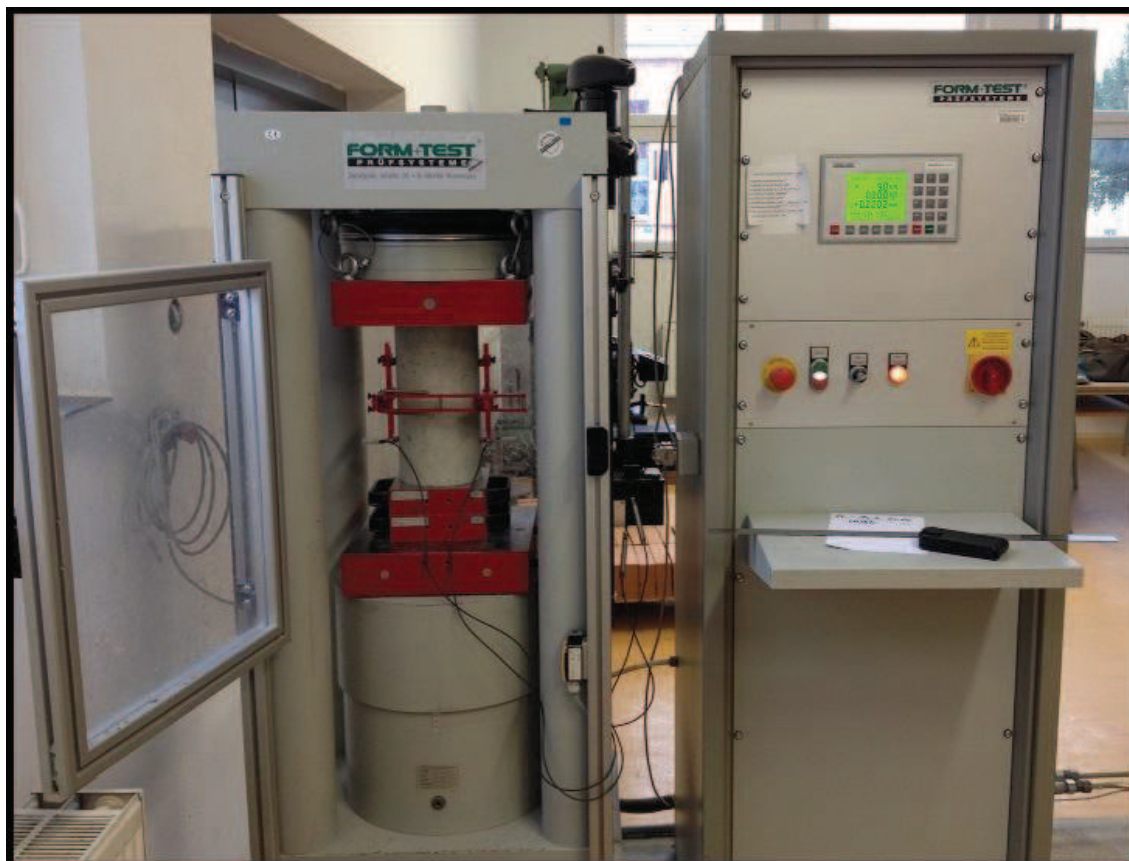
**Obr. 9** Zkoušky čerstvého betonu – rozlití

### **3.1.2 Příprava zkušebních těles**

Tělesa byla vytažena z vodní lázně 7. 1. 2014, kdy začalo i samotné měření. Zakoncování tlačných ploch všech válců bylo provedeno broušením pomocí korundového prášku. Následně byla zvážena zkušební tělesa a změřeny jejich rozměry.

### 3.1.3 Průběh zkoušení

Měření probíhalo v laboratoři FAST VUT v Brně na automatickém zkušebním lisu FORM+TEST (Obr. 10).



**Obr. 10** Zkušební zatěžovací lis FORM+TEST

Na třech tělesech byla dle normy ČSN EN 12390-3 [7] stanovena pevnost v tlaku (Obr. 11), ze které byla podle normy ČSN ISO 6784 [11] určena horní zatěžovací hladina pro cyklickou zatěžovací zkoušku. Horní zatěžovací hladiny byly pro čtyři zkušební tělesa stanoveny jako  $1/3 f_c$ , pro tři tělesa jako  $0,4 f_c$  a pro dvě tělesa jako  $0,5 f_c$ . Vyšší zatěžovací hladiny byly stanoveny kvůli předpokladu lepšího projevu vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování na statický modul pružnosti v tlaku. Dolní zatěžovací hladina je dle normy ČSN ISO 6784 [11] stanovena na 0,5 MPa.

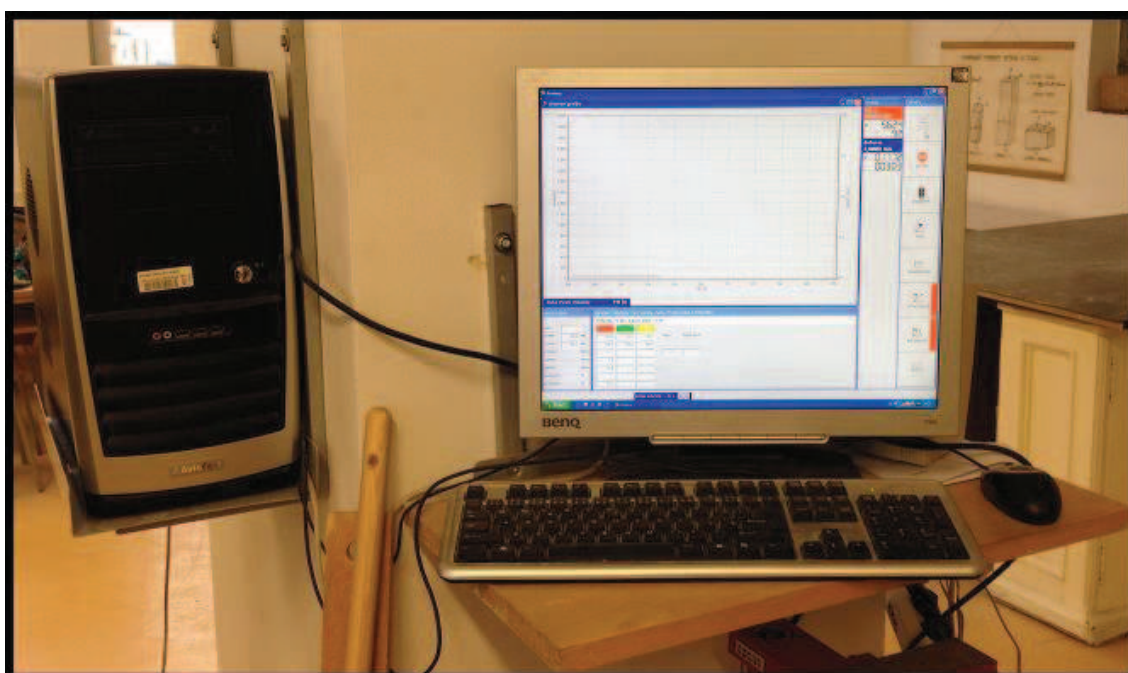


**Obr. 11** Porušené těleso po zkoušce pevnosti v tlaku

Při mnohonásobné cyklické zatěžovací zkoušce byly na zkušební těleso vždy osazeny snímače deformací s měřicí základnou  $H = 150$  mm. Detail osazení je zobrazen na Obr. 12. Tyto snímače jsou propojeny s počítačem (Obr. 13), který je schopen pomocí softwaru Proteus zaznamenávat průběh zatěžování a deformací v závislosti na čase.



**Obr. 12** Zkušební těleso s osazenými snímači deformací



**Obr. 13** Měřicí jednotka, software Proteus

Průběh cyklického zatěžování byl naprogramován pomocí počtu cyklů, rychlosti zatěžování, zatěžovacích hladin a rozměrů zkušební tělesa. Rychlost zatěžování ve všech případech byla  $0,6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ . Výchozí rozměry byly dány formou, průměr 150 mm, výška 300 mm. Zatěžovací hladiny musí být pro software Proteus přepočítány na sílu v závislosti na zatěžované ploše zkoušeného tělesa.

Jelikož je zkušební lis používán běžně na pár cyklů, probíhala měření pod dohledem zodpovědné osoby. Ze stejného důvodu bylo při prvním měření nastaveno 30 cyklů, čímž se ověřilo, že tento lis je schopen provést i více zatěžovacích cyklů, než je běžné.

S vyšší zatěžovací hladinou při konstantní rychlosti zatěžování rostla i doba trvání zkoušky. Jedna zkouška trvala cca 5 hodin. Vzhledem k časové náročnosti zkoušení jednoho tělesa a k vytíženosti laboratoře, bylo poslední těleso zkoušeno až 14. 2. 2014, tj. měsíc po zahájení měření. S ohledem na tuto skutečnost je pravděpodobné, že vlivem dozrávání dochází ke změnám vlastností ztvrdlého betonu, např. pevnost v tlaku.

## 3.2 Výsledky zkoušek

### 3.2.1 Vlastnosti čerstvého betonu

Na čerstvém betonu byly měřeny charakteristiky, jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 3.

**Tabulka 3** Zkoušky čerstvého betonu

| Čerstvý beton     |                                     |
|-------------------|-------------------------------------|
| Objemová hmotnost | $2290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Obsah vzduchu     | 2,5 %                               |
| Sednutí kužele    | 110 mm                              |
| Rozlití           | 410/420 mm                          |

### 3.2.2 Vlastnosti ztvrdlého betonu

Hodnoty charakteristik ve stáří betonu 28 dní jsou uvedeny v Tabulka 4.

**Tabulka 4** Vlastnosti ztvrdlého betonu

| Ztvrdlý beton     |                                     |
|-------------------|-------------------------------------|
| Objemová hmotnost | $2335 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Pevnost v tlaku   | 55,6 MPa                            |

### 3.2.3 Zkušební tělesa

Pro stanovení objemové hmotnosti byla tělesa změřena a zvážena, jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 5.

**Tabulka 5** Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost zkušebních těles

| Zkušební těleso | $\varnothing$ [mm] | $v_1$ [mm] | $v_2$ [mm] | $\bar{v}$ [mm] | $m$ [kg] | $D$ [kg·m <sup>-3</sup> ] |
|-----------------|--------------------|------------|------------|----------------|----------|---------------------------|
| 1               | 149,3              | 299,9      | 300,0      | 300,0          | 12,113   | 2310                      |
| 2               | 149,4              | 299,5      | 300,9      | 300,2          | 12,155   | 2310                      |
| 3               | 149,3              | 298,3      | 298,7      | 298,5          | 12,062   | 2310                      |
| 4               | 149,5              | 299,6      | 299,1      | 299,4          | 12,057   | 2290                      |
| 5               | 149,4              | 298,8      | 298,7      | 298,8          | 12,130   | 2320                      |
| 6               | 149,4              | 298,4      | 298,6      | 298,5          | 12,075   | 2310                      |
| 7               | 149,4              | 298,2      | 298,3      | 298,3          | 12,130   | 2320                      |
| 8               | 149,3              | 298,2      | 298,2      | 298,2          | 12,039   | 2310                      |
| 9               | 149,4              | 298,6      | 298,6      | 298,6          | 12,096   | 2310                      |
| 10              | 149,5              | 298,2      | 298,4      | 298,3          | 12,110   | 2310                      |
| 11              | 149,3              | 298,1      | 298,0      | 298,1          | 12,006   | 2300                      |
| 12              | 149,3              | 298,6      | 298,7      | 298,7          | 12,046   | 2300                      |
| 13              | 149,2              | 298,7      | 298,7      | 298,7          | 12,091   | 2320                      |
| 14              | 149,3              | 298,5      | 298,9      | 298,7          | 12,029   | 2300                      |
| 15              | 149,4              | 298,7      | 298,4      | 298,6          | 12,109   | 2310                      |

### 3.2.4 Mnohonásobná cyklická zatěžovací zkouška

Na třech tělesech č. 1, č. 2 a č. 3 se stanovila pevnost v tlaku  $f_c = 52,1$  MPa, ze které byla určena horní zatěžovací hladina pro cyklickou zatěžovací zkoušku  $\sigma_a = 1/3f_c = 17,4$  MPa, dolní hladina je pevně dána  $\sigma_b = 0,5$  MPa.

Uvažovaný počet cyklů 100 byl stanovený jako dostatečný pro předpokládaný projev poklesu statického modulu pružnosti v tlaku. V Tabulka 6 je možné si všimnout, že při měření vzorků č. 11 a č. 12 byl počet cyklů 54 a 92, což způsobila nepředvídaná chyba softwaru, která předčasně ukončila měření.

**Tabulka 6** Počet cyklů, pevnost v tlaku, zatěžovací hladiny

| Datum | Zkušební těleso | $F_{\max}$ [kN] | Počet cyklů | Zatěžovací hladina | Skutečná zatěžovací hladina [%] |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------------------------|
| 7.1.  | 15              | 954,5           | 30          | 305 kN = $1/3 f_c$ | 32,0                            |
| 10.1. | 4               | 952,9           | 100         | 305 kN = $1/3 f_c$ | 32,0                            |
| 14.1. | 5               | 881,6           | 100         | 305 kN = $1/3 f_c$ | 34,6                            |
| 22.1. | 6               | 1010,4          | 100         | 305 kN = $1/3 f_c$ | 30,2                            |
| 28.1. | 7               | 1124,9          | 100         | 365 kN = $0,4 f_c$ | 32,4                            |
| 29.1. | 8               | 1105,5          | 100         | 427 kN = $0,4 f_c$ | 38,6                            |
| 12.2. | 10              | 1114,9          | 100         | 451 kN = $0,4 f_c$ | 40,5                            |
| 13.2. | 11              | 1059,8          | 54          | 562 kN = $0,5 f_c$ | 53,0                            |
| 14.2. | 12              | 1083,0          | 92          | 562 kN = $0,5 f_c$ | 51,9                            |

Pomocí softwaru Proteus byla zaznamenávána v průběhu zatěžování změna deformace a zatížení v závislosti na čase. Z těchto záznamů se pomocí programu Matlab vygenerovala vždy minimální hodnota deformace při dolní zatěžovací hladině a maximální hodnota deformace pro horní zatěžovací hladinu pro každý cyklus zatěžovací zkoušky. Z deformací se dopočítaly hodnoty statického modulu pružnosti postupně pro každý cyklus, následně pak byly pro každé těleso graficky zpracovány v programu Statistica. Zpracovaná data vyjadřují závislost hodnoty modulu pružnosti na počtu zatěžovacích cyklů. Grafy jednotlivých zkušebních těles vyjadřující průběh hodnot statického modulu pružnosti v tlaku během cyklické zatěžovací zkoušky pro skutečný počet provedených cyklů jsou v Příloha I.

Bezprostředně po dokončení cyklické zatěžovací zkoušky bylo těleso zkoušeno i na pevnost v tlaku. V Tabulka 6 je možné si povšimnout, že během experimentu se projevil nárůst pevnosti v tlaku jednotlivých těles, což mělo za následek, že předem stanovené zatěžovací hladiny neodpovídaly zatěžovacím hladinám skutečným. V průběhu experimentu tedy došlo k upřesnění pevnosti v tlaku (Tabulka 7) pro stanovení nových zatěžovacích hladin.

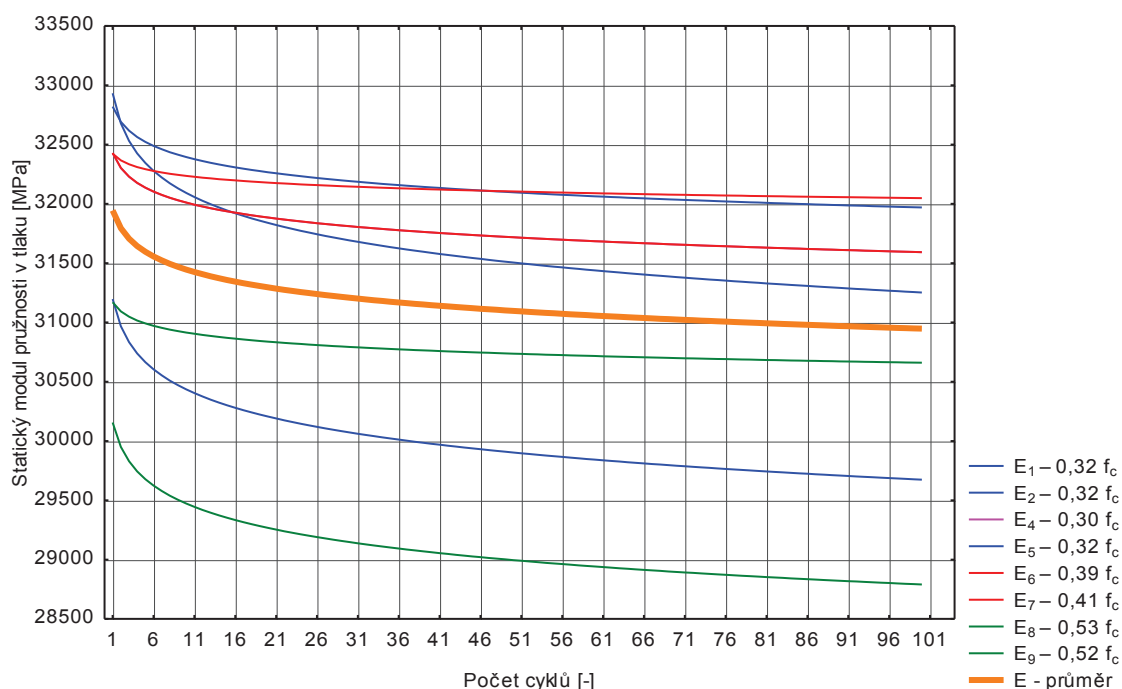
**Tabulka 7** Upřesnění pevnosti v tlaku v průběhu experimentu

| Datum | Zkušební těleso | Pevnost v tlaku | $f_c$ [Mpa] |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|
| 7.1.  | 1, 2, 3         | $f_{c1}$        | 52,1        |
| 29.1. | 9               | $f_{c2}$        | 64,2        |

### 3.3 Shrnutí výsledků

Na základě výsledků výše uvedeného měření se potvrzuje předpoklad, že s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů klesá hodnota statického modulu pružnosti v tlaku. Tato závislost je pro všechna zkušební tělesa jednotlivě graficky znázorněna v Příloha I. Grafy vyjadřují průběh statického modulu pružnosti pro skutečně provedený počet cyklů. Klesající trend se projevil u všech zkušebních těles, výjimkou bylo těleso č. 5 (Příloha I, Obr. 3). Opačný projev závislosti, tedy nárůst statického modulu pružnosti v tlaku, byl způsoben pravděpodobně chybou během měření. Tato chyba mohla být zapříčiněna posunem, či uvolněním snímačů deformací v průběhu měření, nebo vnitřním porušením zkušebního tělesa. Zkušební těleso č. 5 z těchto důvodů nebylo zahrnuto do zpracování dat experimentu.

K proložení průběhu statického modulu pružnosti v tlaku během cyklické zatěžovací zkoušky nejlépe odpovídala ve všech případech logaritmická závislost. Aby bylo možné souhrnně znázornit všechna tělesa (Obr. 14), i ta, u kterých nebylo provedeno 100 zatěžovacích cyklů, využilo se rovnic logaritmických závislostí. Z těchto rovnic se dopočítaly hodnoty statického modulu pružnosti pro 100 cyklů.



**Obr. 14** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna tělesa

Barevně jsou zde odlišeny skupiny dle výše horní zatěžovací hladiny. Předpoklad, že se se zvyšující zatěžovací hladinou více projeví pokles statického modulu pružnosti, nebyl naplněn. Časovou náročností zatěžovací zkoušky jednoho tělesa byl zapříčiněn poněkud malý rozsah experimentu ve smyslu počtu těles a počtu zatěžovacích cyklů. Proto je možná vhodnější přistoupit k vyhodnocení dat souhrnně a neodlišovat jednotlivé skupiny podle zatěžovací hladiny. Průměrná hodnota je pak zvýrazněna v grafu na Obr. 14.

Procentuální vyjádření poklesu hodnoty statického modulu pružnosti je vyjádřeno v Tabulka 8. Už v grafickém zobrazení je možné si všimnout, že k nejstrmějšímu poklesu dochází během prvních deseti cyklů. Potvrzuje to Tabulka 8, kde je možné si všimnout, že pokles po deseti cyklech dosahuje ve všech případech 50 % poklesu po sto cyklech.

**Tabulka 8** Dosažené poklesy hodnot statického modulu pružnosti v tlaku jednotlivých zkušebních těles při 100 zatěžovacích cyklech

| Zkušební těleso     | E [Mpa]<br>n = 1 | E [Mpa]<br>n = 10 | Pokles [%]<br>n = 10 | E [Mpa]<br>n = 100 | Pokles [%]<br>n = 100 |
|---------------------|------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 15 ( $E_1$ )        | 32 932           | 32 092            | -2.5                 | 31 253             | -5.1                  |
| 4 ( $E_2$ )         | 31 197           | 30 436            | -2.4                 | 29 674             | -4.9                  |
| 6 ( $E_4$ )         | 32 428           | 32 010            | -1.3                 | 31 593             | -2.6                  |
| 7 ( $E_5$ )         | 32 820           | 32 395            | -1.3                 | 31 970             | -2.6                  |
| 8 ( $E_6$ )         | 32 424           | 32 236            | -0.6                 | 32 048             | -1.2                  |
| 10 ( $E_7$ )        | 32 430           | 32 011            | -1.3                 | 31 593             | -2.6                  |
| 11 ( $E_8$ )        | 30 156           | 29 473            | -2.3                 | 28 791             | -4.5                  |
| 12 ( $E_9$ )        | 31 170           | 30 915            | -0.8                 | 30 660             | -1.6                  |
| $E_{\text{průměr}}$ | 31 945           | 31 446            | -1.6                 | 30 948             | -3.1                  |

n = počet zatěžovacích cyklů

## 4 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo poukázat na vlivy, které mají dopad na hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku, konkrétně pak na vliv mnohonásobného cyklického zatěžování. Provedeným experimentem byl potvrzen předpoklad, že se s rostoucím počtem cyklů snižuje hodnota statického modulu pružnosti.

Jelikož bylo zkoušení časově náročné, celý experiment se prováděl 5 týdnů, došlo v průběhu experimentu vlivem dozrávání betonu ke změnám jeho vlastností, což se projevilo nárůstem pevnosti. Nejnižší naměřená pevnost odpovídala síle 49,9 MPa, nejvyšší 63,7 MPa. Největší rozdíl byl tedy až 27,7 %.

Již z grafického zpracování dat je možné si všimnout, že nejstrmější pokles se projevil během prvních deseti zatěžovacích cyklů. Je to potvrzeno i procentuálním vyjádřením poklesů, kdy pokles po deseti cyklech dosahuje 50 % poklesu po sto zatěžovacích cyklech. Nejvyšší pokles po 100 cyklech byl o 5,1 % při horní zatěžovací hladině stanovené na  $0,32 f_c$ . Nejnižší pokles po 100 cyklech při horní zatěžovací hladině  $0,39 f_c$  pak dosahoval 1,2 %.

Předpoklad, že se zvyšující se hladinou se bude pokles hodnoty statického modulu pružnosti projevovat více, nebyl potvrzen. Přistoupí-li se tedy ke zkušebním tělesům jako k jedné skupině, průměrná hodnota poklesu statického modulu pružnosti po 100 zatěžovacích cyklech odpovídá 3,1 %.

S ohledem na časovou náročnost byl experiment proveden v malém rozsahu (počet těles, počet zatěžovacích cyklů). Klesající tendence statického modulu pružnosti v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů byla potvrzena, avšak bylo by žádoucí tento experiment zopakovat ve větším rozsahu pro určení přesnějších závislostí.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ADÁMEK, J. a kolektiv. *Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů*. Brno: 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] ADÁMEK, J.; NOVOTNÝ, B.; KOUKAL, J. *Stavební materiály*. 1. vyd. Brno: CERM, 1997, 205 s. ISBN 80-214-0631-3.
- [4] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Vydavatelství norem, 2001.
- [5] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Vydavatelství norem, 2001.
- [6] 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.
- [7] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Vydavatelství norem, 2002.
- [8] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Vydavatelství norem, 2002.
- [9] UNČÍK, S.; ŠEVČÍK, P. *Modul pružnosti betónu*. Trnava: Edícia BetónRacio, 2008. Dostupné z URL:  
<[http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul\\_pruznosti.pdf](http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul_pruznosti.pdf)>  
[cit. 5. 2. 2014]
- [10] 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.
- [11] ČSN ISO 6784. *Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Vydavatelství norem, 1992.
- [12] HEŘMÁNKOVÁ, V. a kolektiv. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 100 s. ISBN 978-80-7204-758-1.
- [13] ČSN EN 1992-1-1. *Navrhování Betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Vydavatelství norem, 2002.

- [14] 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.
- [15] HUŇKA, P.; KOLÁŘ, K.; KOLÍSKO, J. Porovnání výsledků statického modulu pružnosti v tlaku různých receptur s hodnotami uvedenými v ČSN 1922-1-1. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, roč. 2013, č. 6, s. 53 -55. ISSN 12133116.
- [16] HUŇKA, P.; KOLÁŘ, K.; BOUŠKA, P.; ŘEHÁČEK, S. Vliv způsobu zakoncování tlačných ploch zkušebního tělesa na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku. In *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2011*. Brno: VUT v Brně, 2011, p. 103 - 111. ISBN 978-80-214-3438-9.
- [17] KOCÁB, D.; CIKRLE, P.; ZAHRADA, J. Vliv ošetřování mostního betonu na modul pružnosti. In *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno: VUT v Brně, 2009, p. 141 - 148. ISBN 978-80-214-3951-1.
- [18] REITERMAN, P.; HUŇKA, P.; KOLÁŘ, K. Vliv způsobu ošetřování na dlouhodobý vývoj modulu pružnosti. In *17. Betonářské dny 2010*. Praha: ČBS Servis, 2010, p. 425 - 428. ISBN 978-80-87158-28-9.
- [19] SAQIR, M.; PRASAD, J.; ABBAS, H. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. *Construction and Building Materials*, roč. 2013, č. 41, p. 411 - 418. ISSN 0950-0618.
- [20] ŠTEMBERK, P.; DA SILVA, W.R.L.; SÝKOROVÁ, J.; BARTOVÁ, J. Fuzzy modeling of combined effect of winter road maintenance and cyclic loading on concrete slab bridge. *Advances in Engineering Software*, roč. 2013, č. 62-63, p. 97 - 108. ISSN 0965-9978.
- [21] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Vydavatelství norem, 2009
- [22] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: Vydavatelství norem, 2009.
- [23] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Vydavatelství norem, 2009.

- [24] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Vydavatelství norem, 2009.
- [25] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Vydavatelství norem, 2001.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

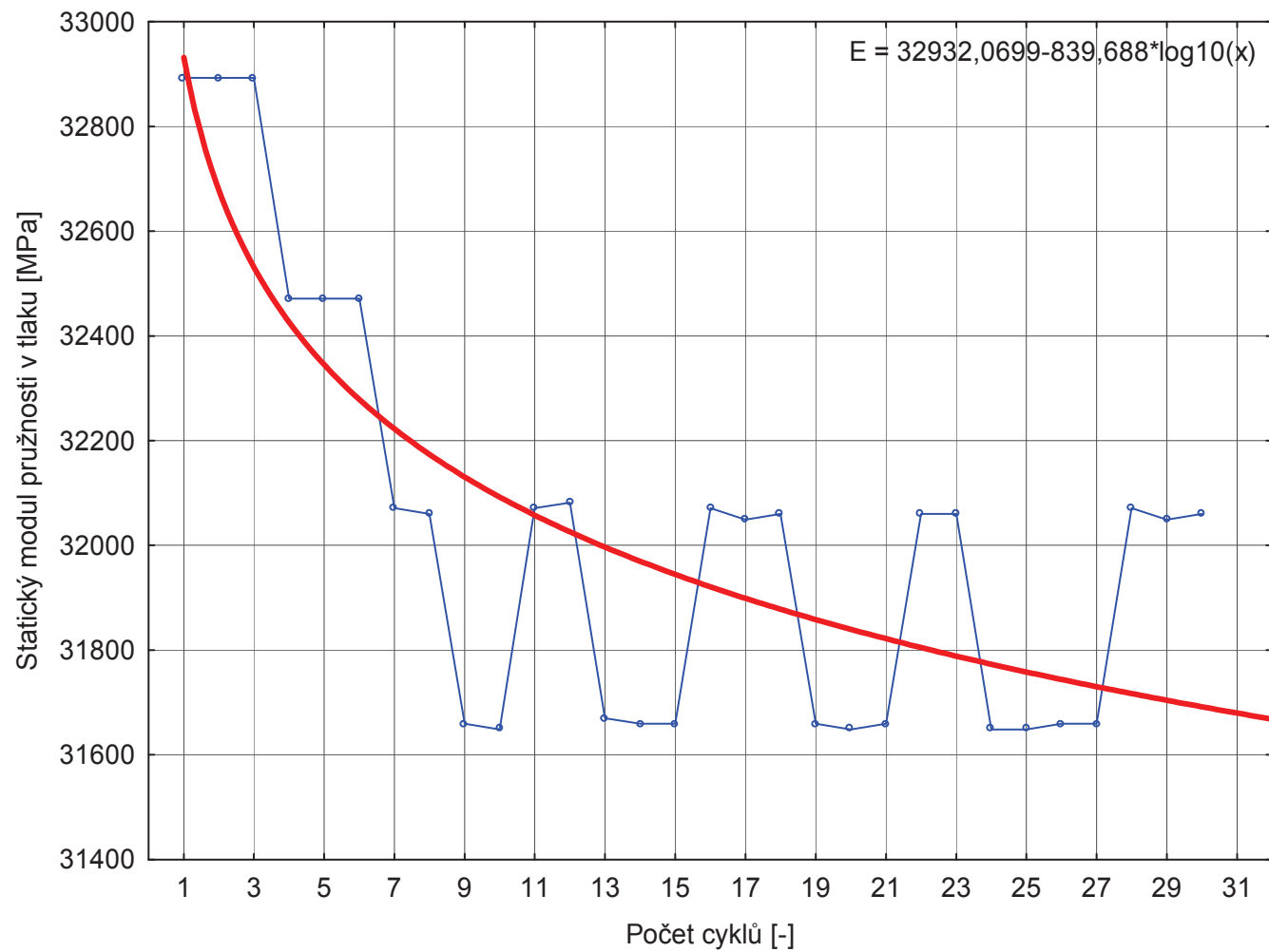
|                |                                                                                                          |    |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 1</b>  | Poměr pevnosti betonu v tlaku k pevnosti krychelné v závislosti na štíhlosti zkušebního tělesa [6] ..... | 13 |
| <b>Obr. 2</b>  | Zkouška pevnosti tlaku: a) porušení krychle, b) porušení válce (hranolu) [6] .....                       | 14 |
| <b>Obr. 3</b>  | Deformační diagram betonu v tlaku [3] .....                                                              | 16 |
| <b>Obr. 4</b>  | Diagram $\sigma$ - $\epsilon$ dvou pružných materiálů s rozdílným modulem pružnosti [9].....             | 17 |
| <b>Obr. 5</b>  | Průběh cyklů statické zatěžovací zkoušky [12] .....                                                      | 19 |
| <b>Obr. 6</b>  | Odformovaná tělesa ve vodním uložení.....                                                                | 27 |
| <b>Obr. 7</b>  | Zkoušky čerstvého betonu – obsah vzduchu.....                                                            | 28 |
| <b>Obr. 8</b>  | Zkoušky čerstvého betonu – sednutí kužele .....                                                          | 28 |
| <b>Obr. 9</b>  | Zkoušky čerstvého betonu – rozlití.....                                                                  | 29 |
| <b>Obr. 10</b> | Zkušební zatěžovací lis FORM+TEST .....                                                                  | 30 |
| <b>Obr. 11</b> | Porušené těleso po zkoušce pevnosti v tlaku.....                                                         | 31 |
| <b>Obr. 12</b> | Zkušební těleso s osazenými snímači deformací.....                                                       | 32 |
| <b>Obr. 13</b> | Měřicí jednotka, software Proteus .....                                                                  | 32 |
| <b>Obr. 14</b> | Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro všechna tělesa.....        | 36 |

## SEZNAM TABULEK

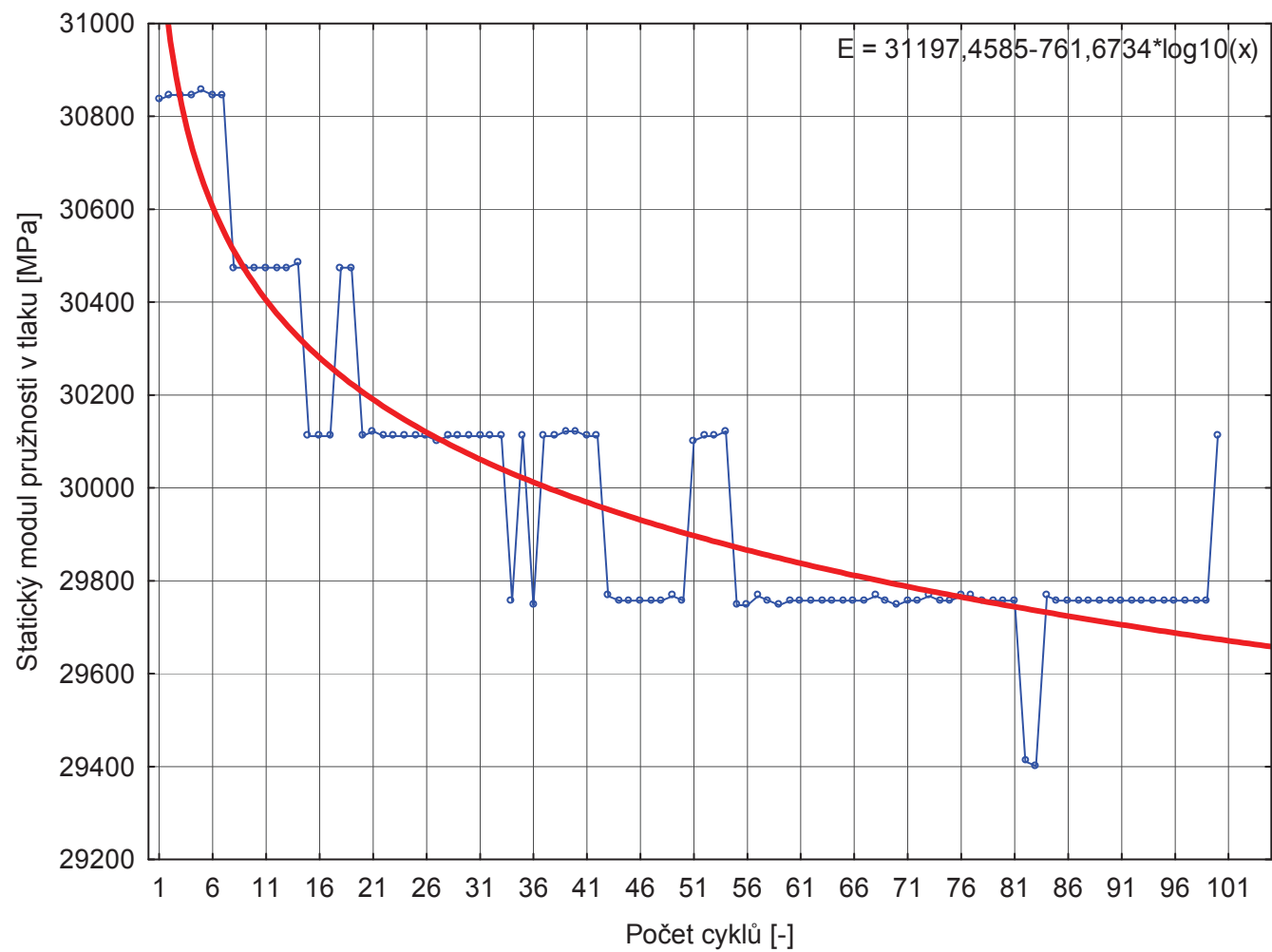
|                  |                                                                                                                              |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabulka 1</b> | Pevnostní třídy betonu [2].....                                                                                              | 11 |
| <b>Tabulka 2</b> | Receptura čerstvého betonu .....                                                                                             | 26 |
| <b>Tabulka 3</b> | Zkoušky čerstvého betonu.....                                                                                                | 33 |
| <b>Tabulka 4</b> | Vlastnosti ztvrdlého betonu .....                                                                                            | 33 |
| <b>Tabulka 5</b> | Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost zkušebních těles .....                                                                 | 34 |
| <b>Tabulka 6</b> | Počet cyklů, pevnost v tlaku, zatěžovací hladiny.....                                                                        | 35 |
| <b>Tabulka 7</b> | Upřesnění pevnosti v tlaku v průběhu experimentu.....                                                                        | 35 |
| <b>Tabulka 8</b> | Dosažené poklesy hodnot statického modulu pružnosti v tlaku jednotlivých zkušebních těles při 100 zatěžovacích cyklech ..... | 37 |

## SEZNAM PŘÍLOH

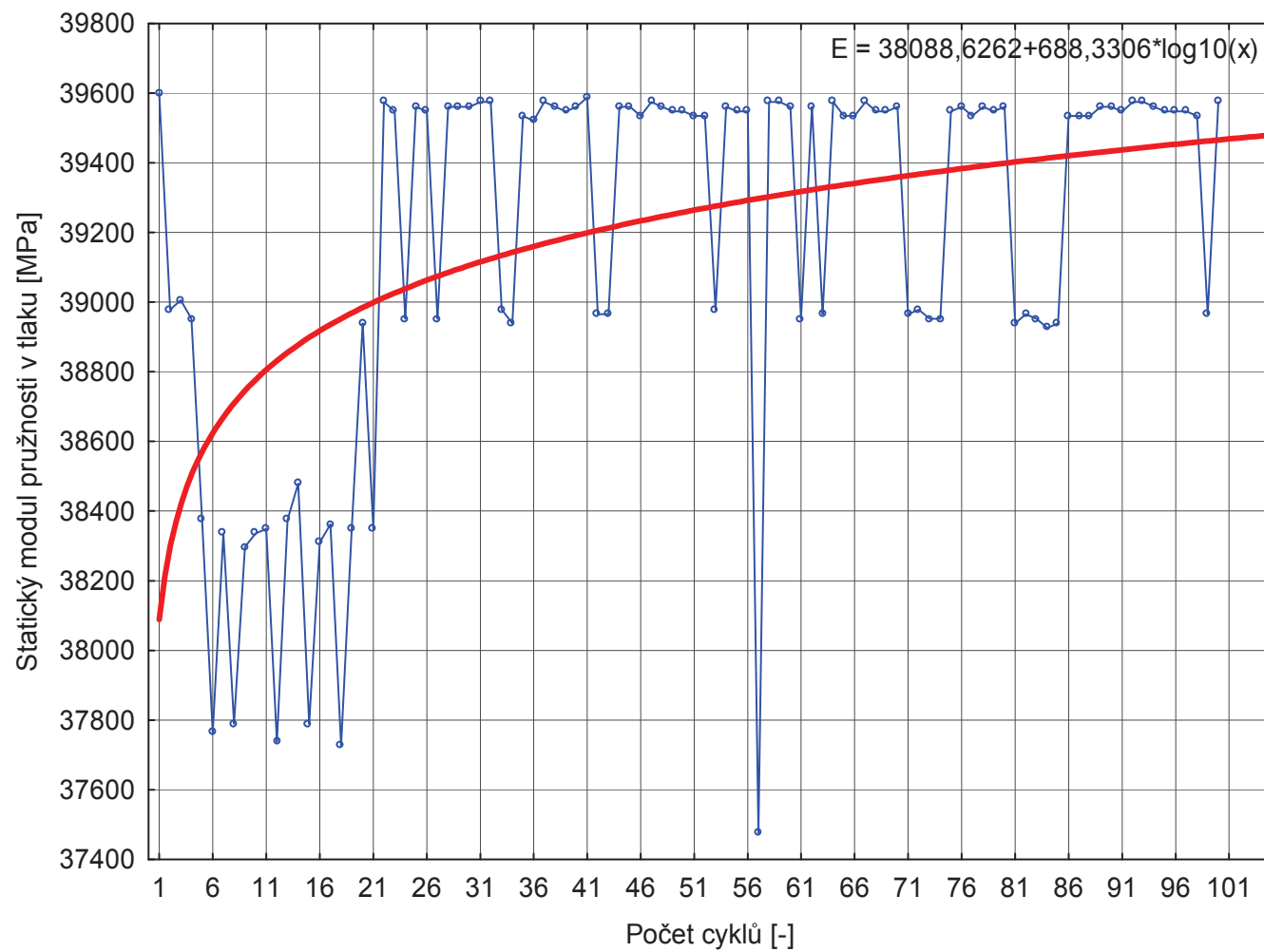
|                  |                                                                                                  |   |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Příloha I</b> | Grafy vyjadřující závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů..... | I |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---|



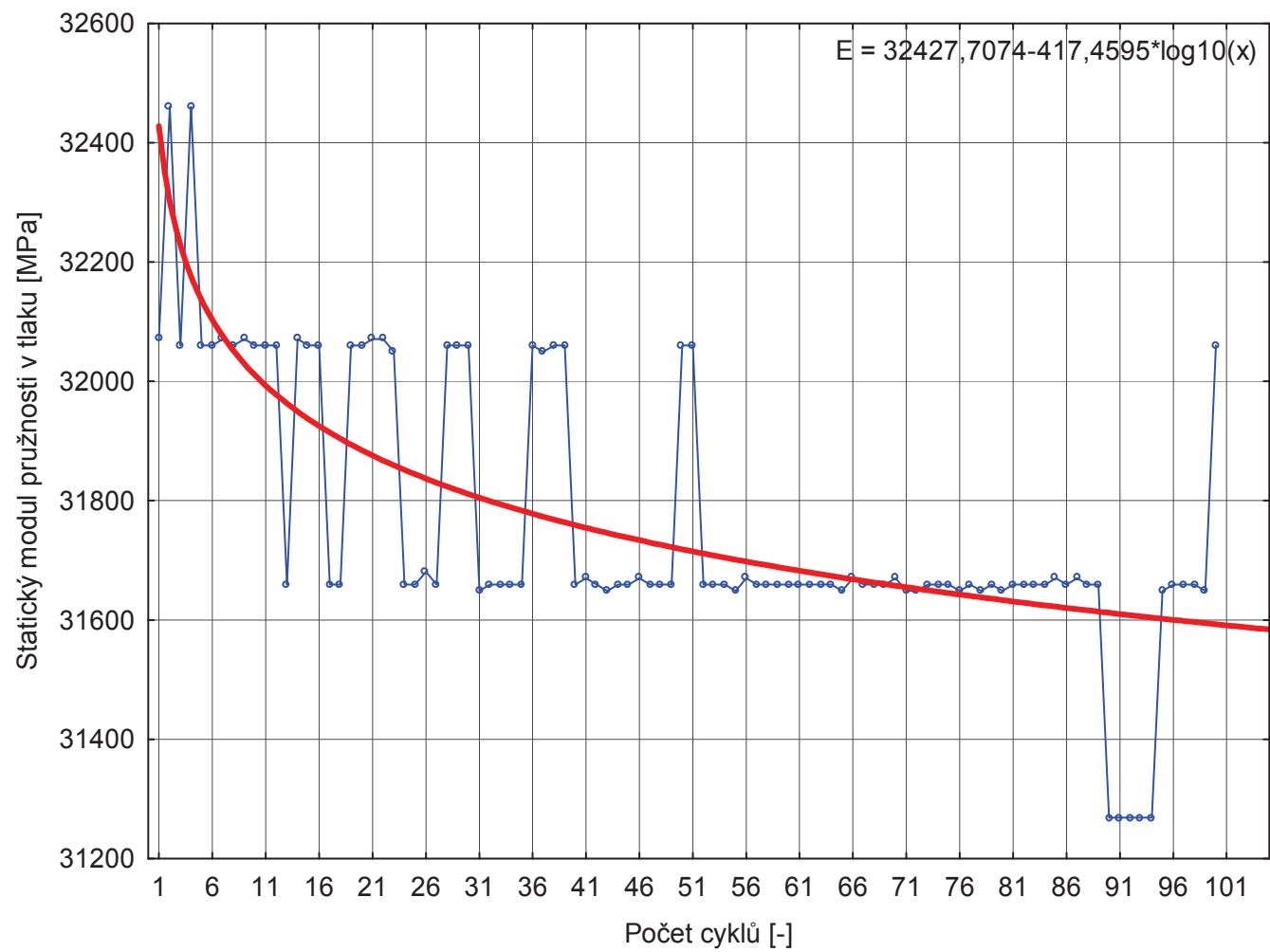
**Obr. 1** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 15; zatěžovací hladina 0,32  $f_c$ ; měřeno 7. 1. 2014



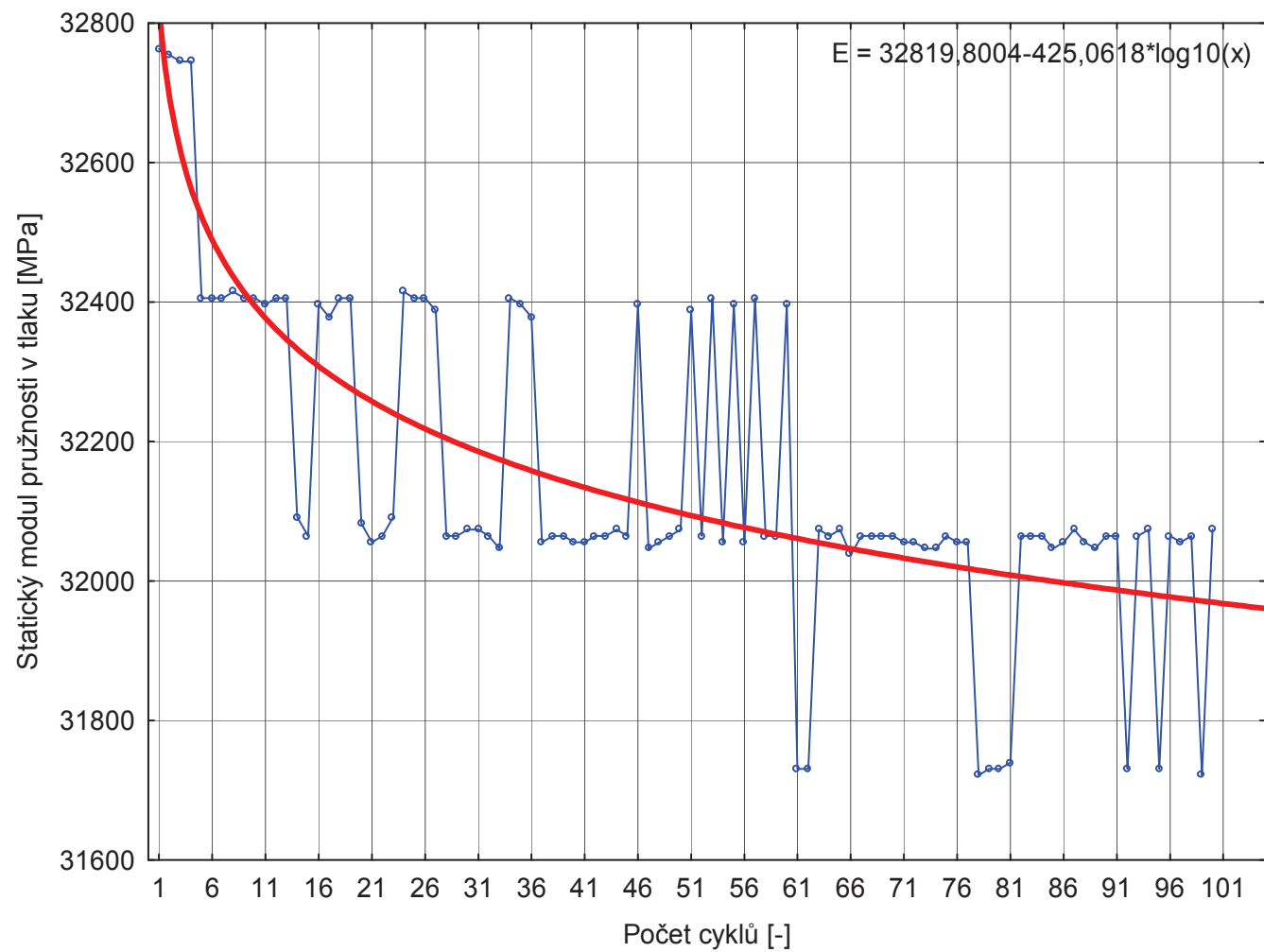
**Obr. 2** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 4; zatěžovací hladina 0,32  $f_c$ ; měřeno 10. 1. 2014



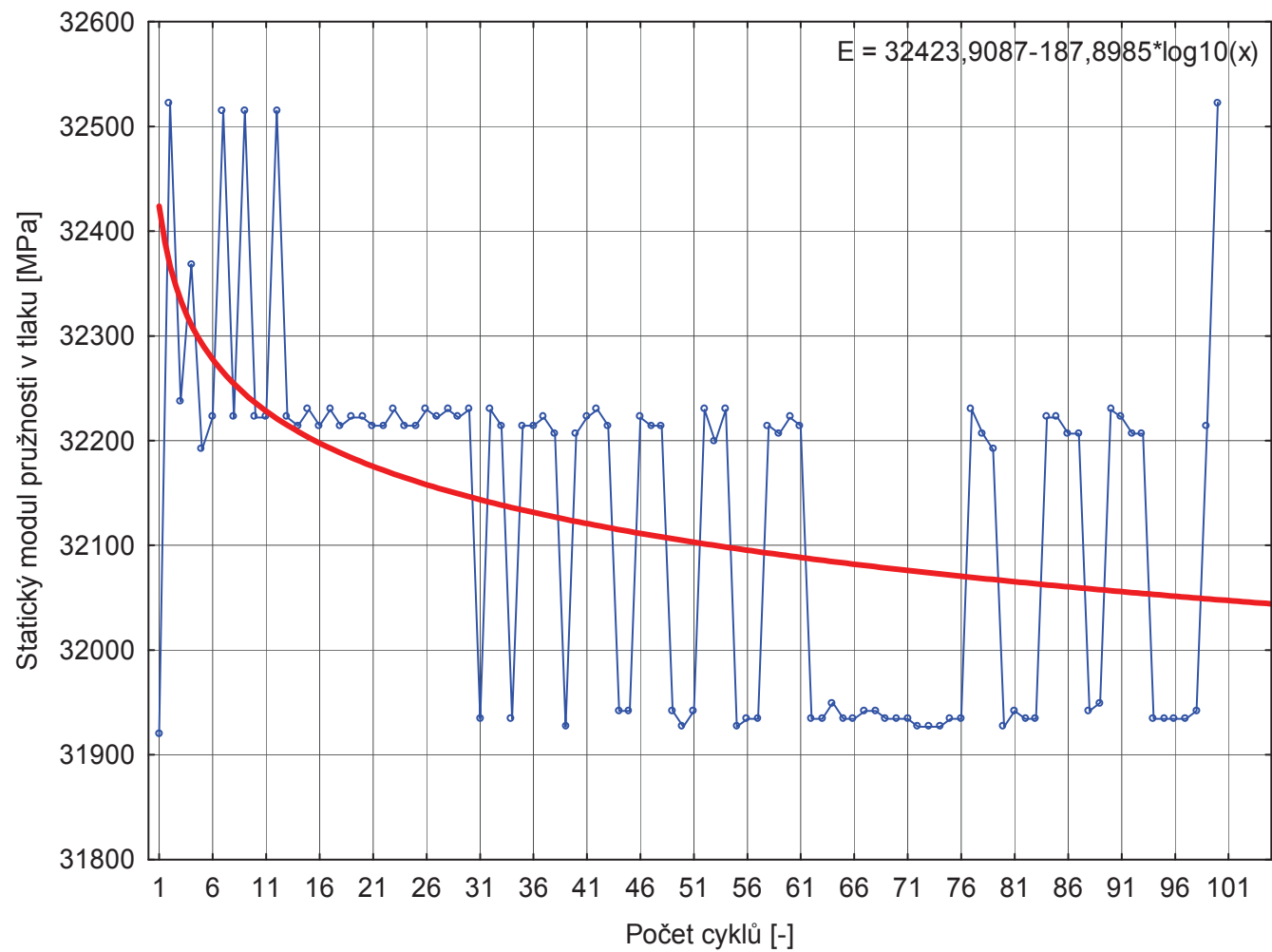
**Obr. 3** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 5; zatěžovací hladina 0,35  $f_c$ ; měřeno 14. 1. 2014



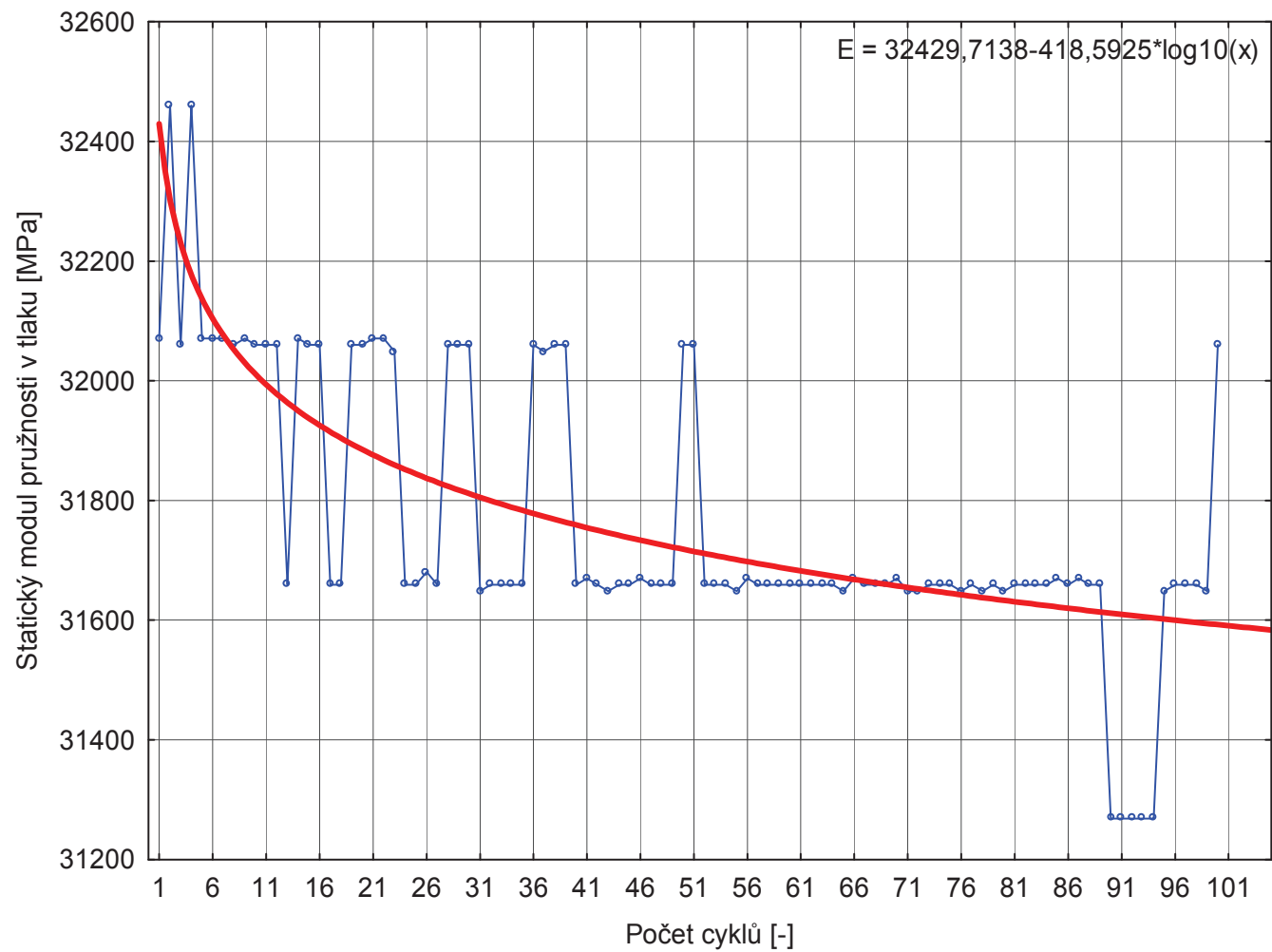
**Obr. 4** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 6; zatěžovací hladina 0,30  $f_c$ ; měřeno 22. 1. 2014



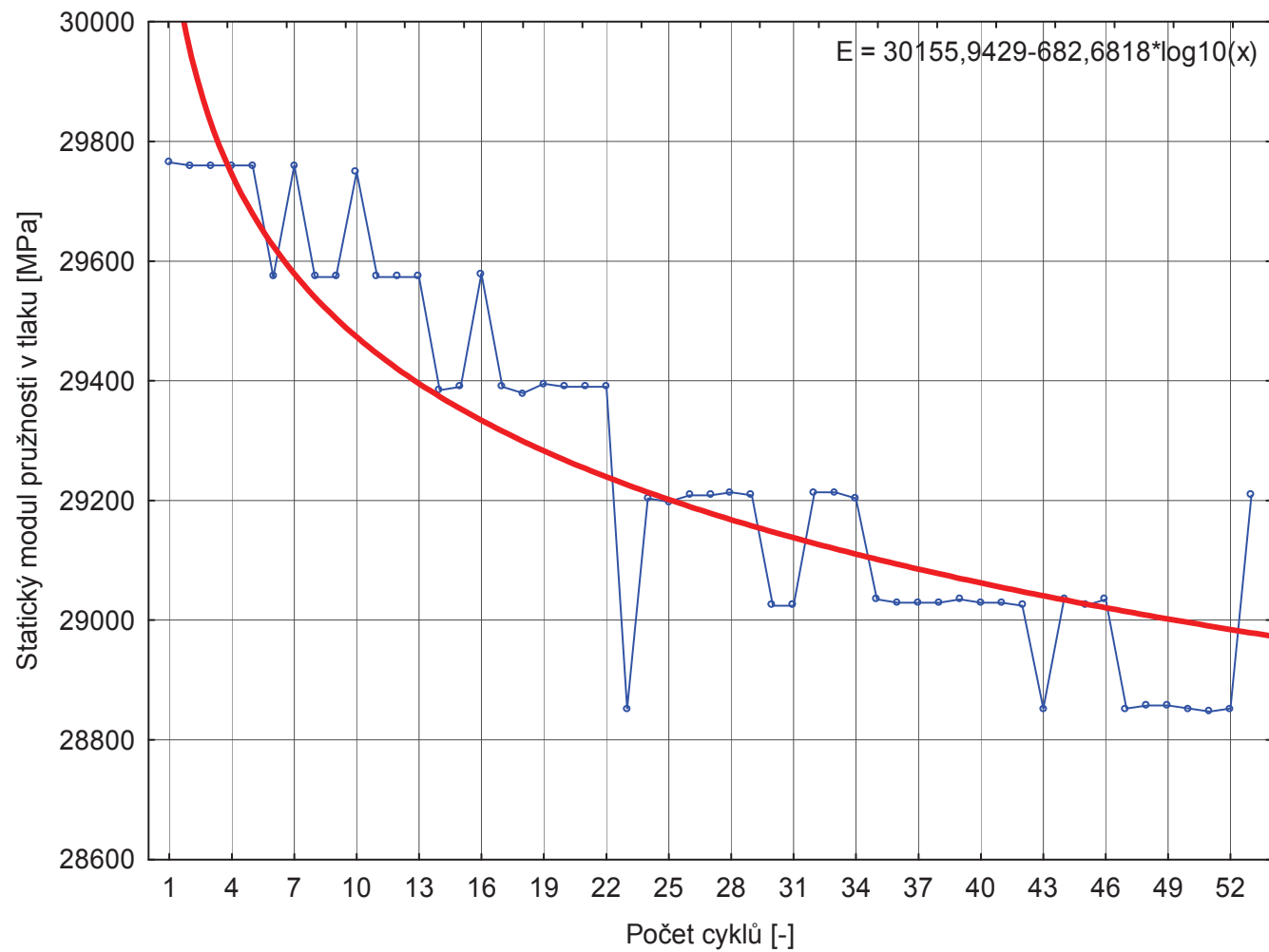
**Obr. 5** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 7; zatěžovací hladina 0,32  $f_c$ ; měřeno 28. 1. 2014



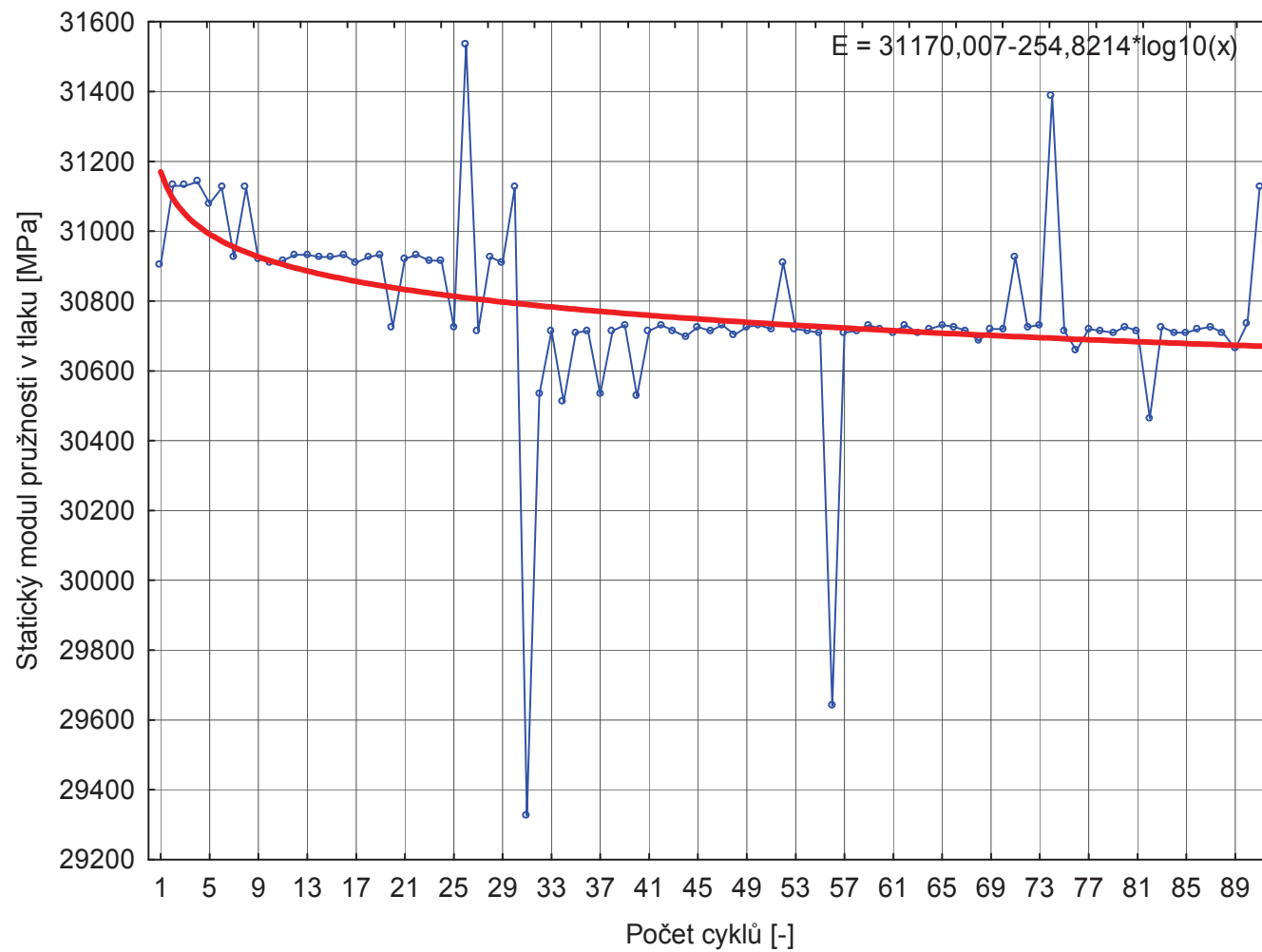
**Obr. 6** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 8; zatěžovací hladina  $0,39 f_c$ ; měřeno 29. 1. 2014



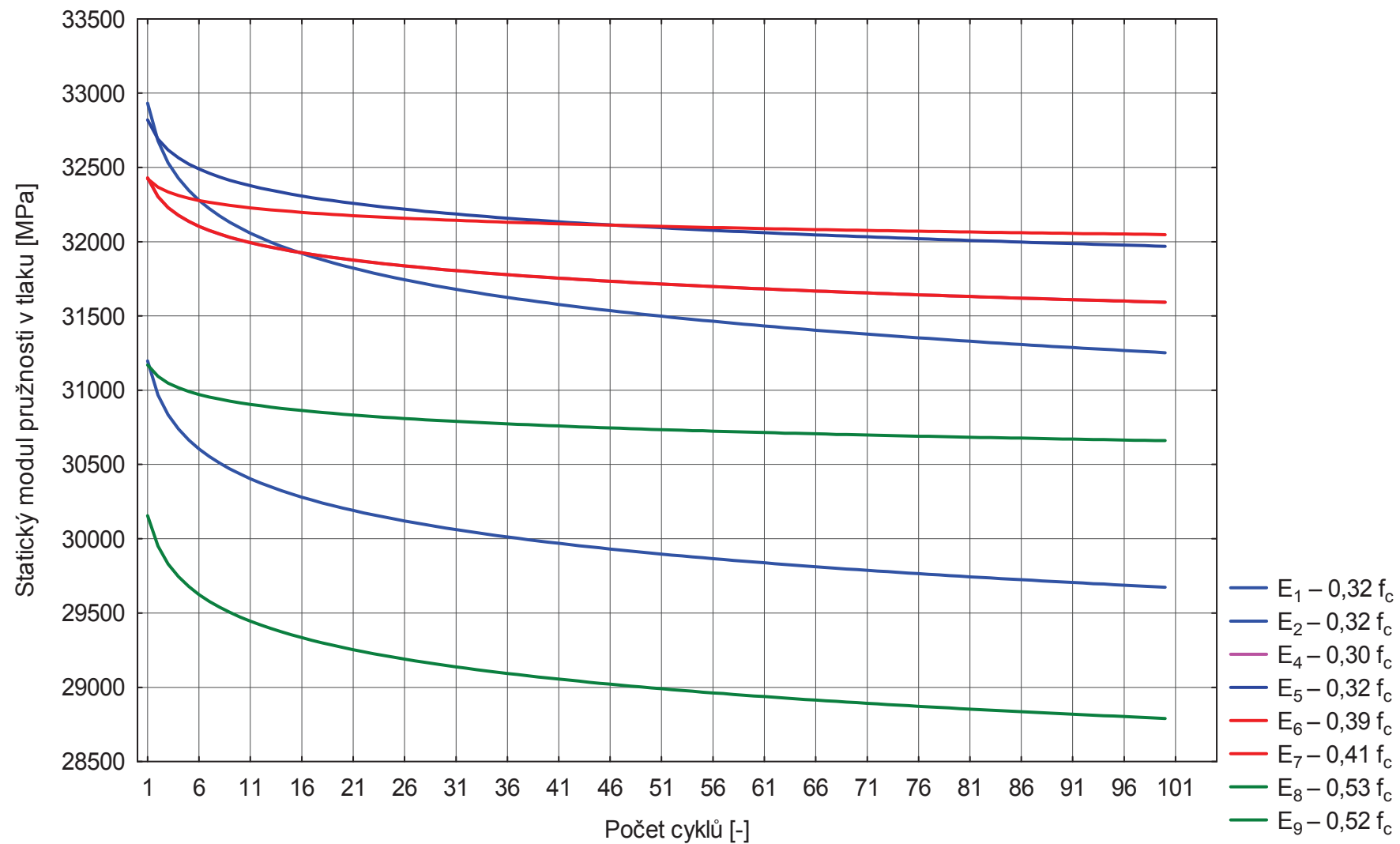
**Obr. 7** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 10; zatěžovací hladina 0,41  $f_c$ ; měřeno 12. 2. 2014



**Obr. 8** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 11; zatěžovací hladina 0,53  $f_c$ ; měřeno 13. 2. 2014



**Obr. 9** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů pro zkušební těleso č. 12; zatěžovací hladina 0,52  $f_c$ ; měřeno 14. 2. 2014



**Obr. 10** Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na počtu zatěžovacích cyklů; skutečné zatěžovací hladiny všech zkušebních těles