



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV STATICKÉHO CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA MODUL PRUŽNOSTI RŮZNÝCH DRUHŮ BETONU

INFLUENCE OF STATIC CYCLIC LOADING ON THE MODULUS OF ELASTICITY OF DIFFERENT
TYPES OF CONCRETE

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Alexa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

BRNO 2024

ABSTRAKT

Dizertační práce se zabývá změnou hodnot vybraných vlastností různých betonů vlivem násobného zatěžování. Pomocí odporových tenzometrů byly měřeny poměrné deformace zkušebních těles v průběhu statického cyklického zatěžování. Z naměřených hodnot zatížení a poměrných deformací byly stanoveny dynamické i statické hodnoty modulů pružnosti v tlaku i ve smyku a také Poissonova čísla. Cílem práce je posouzení případné změny hodnot modulu pružnosti, pevnosti v tlaku a Poissonova čísla v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů, jejichž celkový počet se pohyboval v tisících, a také na úrovni zatěžování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, lehký beton, provzdušněný beton, pevnost v tlaku, modul pružnosti, násobné cyklické zatěžování, Poissonovo číslo, rezonanční metoda, ultrazvuková impulzová metoda

ABSTRACT

The doctoral thesis deals with the value changes of selected properties of various concrete types due to cyclic loading. The strain of the test specimens during static cyclic loading was measured using linear strain gauges. The static Young's modulus and shear modulus as well as the Poisson's ratio were determined from the measured values of loads and relative deformations. The doctoral thesis aims to assess the eventual value changes of dynamic and static modulus of elasticity, compressive strength, and Poisson's ratio depending on the number of load cycles and the loading level. The total number of static loading cycles is in the thousands.

KEYWORDS

Concrete, lightweight concrete, air-entrained concrete, compressive strength, modulus of elasticity, multiple cyclic loading, Poisson's ratio, resonance method, ultrasonic pulse velocity test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

ALEXA, Martin. *Vliv statického cyklického zatěžování na modul pružnosti různých druhů betonu*. Brno, 2024. 160 s., 26 s. příl. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/161649>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Dalibor Kocáb.



PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem *Vliv statického cyklického zatěžování na modul pružnosti různých druhů betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23. 5. 2024

Ing. Martin Alexa

autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Vliv statického cyklického zatěžování na modul pružnosti různých druhů betonu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2024

Ing. Martin Alexa

autor

PODĚKOVÁNÍ

Nejen prostřednictvím této stránky bych rád poděkoval především svému školiteli Ing. Daliboru Kocábovi, PhD. za jeho spolupráci v průběhu navazujícího studia, které si velice vážím. Dále také projev vděku náleží těmto osobám, kteří mi nějakým způsobem pomohli a mají také podíl na cestě, která vedla k dokončení této práce. Jmenovitě to jsou: Ing. Petr Daněk, Ph.D., Ing. Dominik Lizstwan, Ing. Petr Misák, PhD., prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc., Ing. Oldřich Žalud a tým BETOTECHu, s.r.o. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině a nejbližšímu okolí, kteří mě motivovali a podporovali mou snahu dizertační práci dokončit.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíle práce.....	10
3. Teoretická část.....	11
3.1. Udržitelnost a trvanlivost.....	11
3.1.1. Udržitelnost betonu	11
3.1.2. Trvanlivost betonu.....	14
3.2. Životnost a únava betonových konstrukcí	15
3.2.1. Životnost betonových konstrukcí	15
3.2.2. Únava betonových konstrukcí	17
3.3. Mechanické Cyklické zatížení	20
3.3.1. Cyklické Zatížení dle způsobu Mechanického namáhání.....	21
3.3.2. Cyklické Zatížení dle rychlosti zatěžování	22
3.3.3. Cyklické zatížení dle intenzity zatěžování	23
3.3.4. Cyklické Zatížení dle zatěžovacího schématu.....	24
3.4. Současný výzkum	26
4. Experimentální část.....	29
4.1. Popis experimentu	29
4.2. Výroba zkušebních těles	31
4.2.1. Výroba zkušebních těles LB1	33
4.2.2. Výroba zkušebních těles LB2	35
4.2.3. Výroba zkušebních těles OB1	37
4.2.4. Výroba zkušebních těles OB2	38
4.2.5. Výroba zkušebních těles PB1	39
4.2.6. Výroba zkušebních těles PB2.....	41
4.3. Měření a vyhodnocení	42
4.3.1. Pevnost betonu v tlaku.....	43
4.3.2. Statický modul pružnosti	44
4.3.3. Dynamický modul pružnosti.....	56
4.3.4. Poissonovo Číslo.....	60
4.4. Výsledky Měření	61
4.4.1. Pevnost v tlaku.....	61

4.4.2. Dynamické moduly pružnosti.....	69
4.4.3. Statický modul pružnosti v tlaku	85
4.4.4. Poissonovo číslo.....	117
5. Závěr	138
Seznam použité literatury	140
Seznam obrázků.....	150
Seznam tabulek.....	156
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	157
Přílohy	160

1. ÚVOD

Beton je díky svým vlastnostem klíčový a strategický stavební materiál, který umožňuje rozvoj celé společnosti prostřednictvím konstrukcí z něj budovaných. Betonové stavby, nebo prvky ve stavbách obsažené, mají významnou roli v každodenním životě naší společnosti a především díky svým vlastnostem jako pevnost a trvanlivost poskytují spolehlivý základ pro její prosperitu a ekonomický rozvoj. Využitelnost tohoto materiálu a technologický pokrok měl za následek, že je používán napříč stavebními obory a umožňuje výstavbu od budov pro bydlení přes budovy občanské vybavenosti až po stavby dopravní a technické infrastruktury, jako jsou mosty, silnice, tunely, vodohospodářské stavby v podobě přehrad, kanalizací a vodojemů, ale také v energetickém sektoru od jaderných až po větrné elektrárny. Tím, že betonové konstrukce poskytují pevné základy pro mnoho aspektů každodenního života a hospodářství, umožňují společnosti růst a prosperovat [1] [2] [3].

Betonové stavby během své životnosti čelí mnohým výzvám, ať už těm, které se dají předpokládat, a díky pečlivému návrhu lze eliminovat jejich negativní vliv, tak i mimořádným, které mohou mít často fatální vliv na jejich životnost. Stavební mechanika, o kterou jsou návrhy stavebních konstrukcí opřeny, rozděluje zatížení na statické a dynamické. Statické zatížení je typické svou stálou nebo pomalu měnící se intenzitou. Je vyvoláno vlastní vahou konstrukce, užitným zatížením, které je vyvoláno typem a využitím dané konstrukce, nebo zatížením zeminou, pokud na konstrukci působí tlak zeminy a vody. Dynamické zatížení a jeho účinky se na konstrukci aplikují rychle a jejich velikost se mění v čase. Tato zatížení mohou konstrukci vystavit vibracím a cyklickým zatěžovacím režimům. Mezi dynamické zatížení řadíme působení větru, dopravy, zemětřesení nebo i extrémní dynamické zatížení způsobené nárazy a výbuchy [4] [5] [6] [7].

Existují nevyplněná místa ve vědeckých poznatcích ohledně dlouhodobého chování betonu pod různými zatěžovacími režimy, jako jsou mechanismy poškození betonu od opakovaného statického zatěžování, vliv různých faktorů prostředí a chemických vlivů na odolnost betonu vůči únavě, a interakce mezi mechanickými a fyzikálně-chemickými procesy v betonu. Řada odborníků a výzkumníků se zabývá vlivem

cyklického zatěžování na mechanické parametry betonu již řadu let. První experimentální studie byla publikována již v roce 1964 [8] a mnoho dalších, zabývajících se tímto fenoménem, vznikají dodnes. Většina výzkumů však studuje cyklické mnohonásobné namáhání dynamické, které je méně časově náročné než statické. Experiment, který je náplní této práce, se zabývá statickým namáháním betonu v tlaku, přičemž počet provedených zatěžovacích cyklů se pohybuje v řádech tisíců. Experiment tedy nemá ambice přímo pro oblast studia únavy betonu, přestože do jisté míry by bylo při vyšších úrovních namáhání únavu z výsledků predikovat. Důležité je, že například z hlediska laboratorního testování je provedený počet zatěžovacích cyklů dostatečně velký a může poukázat například na to, že měření modulu pružnosti v tlaku může být prováděno opakovaně na stejném zkušebním tělese bez vlivu na výslednou hodnotu, či při jakém počtu cyklů se vliv stává významným. Výzkum, který popisuje tato práce, by také mohl přispět k lepšímu porozumění některých jevů při namáhání betonu, což by mohlo umožnit vyvinout přesnější prediktivní modely pro odhad životnosti betonových konstrukcí a lepší materiálové formulace pro zvýšení jejich celkové odolnosti.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části této dizertační práce je po provedení rešerše současného výzkumu v oblasti statického cyklického zatěžování betonu zevrubně popsat a definovat problematiku cyklického zatěžování betonu včetně souvislostí s únavou, trvanlivostí, životností a udržitelností betonových konstrukcí. Cílem experimentální práce je analyzovat, pozorovat a vyhodnotit změny vybraných mechanických vlastností různých druhů betonu při násobném cyklickém zatěžování.

Konkrétně se experiment zaměřil na sledování změn modulu pružnosti v tlaku. Cílem bylo analyzovat, jak se mění dynamický modul pružnosti zkušebních betonových těles po jejich cyklickém zatěžování v porovnání s hodnotami zjištěnými před zatěžováním. Dále sledovat změny statického modulu pružnosti v tlaku a smyku betonu v průběhu cyklického statického zatěžování a identifikovat rozdíly mezi vývojem dynamických parametrů a statických modulů pružnosti s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů.

Dalšími cíli dizertační práce bylo popsat vliv cyklického zatěžování na pevnost betonu v tlaku, zkoumat změny statického Poissonova čísla betonu při cyklickém zatěžování a porovnat změny Poissonova čísla mezi jednotlivými druhy betonů a vyhodnotit jejich citlivost na opakované zatěžování. Vyhodnotit, jak různé úrovně zatěžování (úroveň vneseného napětí při cyklickém zatěžování vzhledem k pevnosti zkoušeného betonu v tlaku) ovlivňují mechanické vlastnosti betonu. Zjistit, zda vyšší úrovně zatěžování vedou k rychlejším nebo výraznějším změnám ve sledovaných vlastnostech.

3. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část této dizertační práce pojednává o souvislostech, kterých se dotýká její obsah, popisuje a rozděluje cyklické zatěžování na základě různých parametrů a také čtenáře seznamuje se současným poznáním v tématu cyklického zatěžování a jeho vlivu na beton.

3.1. UDRŽITELNOST A TRVANLIVOST

Beton, jako jeden z nejrozšířenějších stavebních materiálů na světě, hraje klíčovou roli v moderní infrastruktuře. Jeho všestrannost, pevnost a nákladová efektivita jsou nezpochybnitelné, avšak rostoucí důraz na environmentální udržitelnost a energetickou efektivitu staví před výrobce betonu nové výzvy. Kapitola "Udržitelnost a trvanlivost betonu" se zaměřuje na tyto dva propojené, ale často rozporuplné cíle: maximalizaci trvanlivosti betonových konstrukcí a minimalizaci jejich ekologického dopadu, a má za úkol čtenáře obecně seznámit s touto problematikou, která nepřímo souvisí s touto prací [9] [10].

3.1.1. UDRŽITELNOST BETONU

Udržitelnost v kontextu klimatických změn a dopadů lidské činnosti na životní prostředí je velmi diskutované téma, studované a současné výzkumy se snaží lidský pokrok směřovat právě v souladu s tímto trendem. I výzkum, který je součástí této dizertační práce, a náplň mohou přispět k lepšímu a šetrnějšímu hospodaření ve stavebnictví, a proto je vhodné téma udržitelnosti betonu obecně zmínit.

Udržitelnost betonu je koncept, který se zaměřuje na minimalizaci negativních dopadů výroby a používání betonu na životní prostředí, zatímco se snaží zajistit jeho funkčnost a životnost pro stavební konstrukce [11]. Tento přístup se stává stále důležitějším s rostoucím důrazem na ekologické požadavky ve stavitelství a udržitelný rozvoj. Udržitelnost betonu začíná již při návrhu receptury a výběru vstupních surovin. Inovace, jako je použití recyklovaného materiálu nebo alternativních pojiv, které snižují spotřebu přírodních zdrojů a produkci skleníkových plynů, ale také například využití umělé inteligence ve stavebnictví [12], jsou na vzestupu.

Udržitelnost v souvislosti s betonem ve stavitelství zahrnuje několik klíčových aspektů:

- a. Snížení emisí skleníkových plynů: Výroba cementu, který je hlavní složkou betonu, produkuje významné množství oxidu uhličitého. Inovace v recepturách betonu, jako je použití alternativních pojiv nebo recyklovaného materiálu, může pomoci snížit tyto emise [13] [14] [15] [16].
- b. Recyklace: Beton může být recyklován a znovu použit, což snižuje potřebu nových materiálů a omezuje skládkování odpadů [17] [18].
- c. Efektivní využití zdrojů: Optimalizace množství materiálů použitých v betonových směsích bez snížení jejich kvality nebo pevnosti [19] [20].
- d. Dlouhodobá životnost: Vytváření betonových směsí, které jsou odolnější vůči povětrnostním vlivům a mechanickému opotřebení, prodlužuje životnost konstrukcí a snižuje potřebu častých oprav nebo rekonstrukcí [21].

Udržitelné stavitelství má několik přínosů:

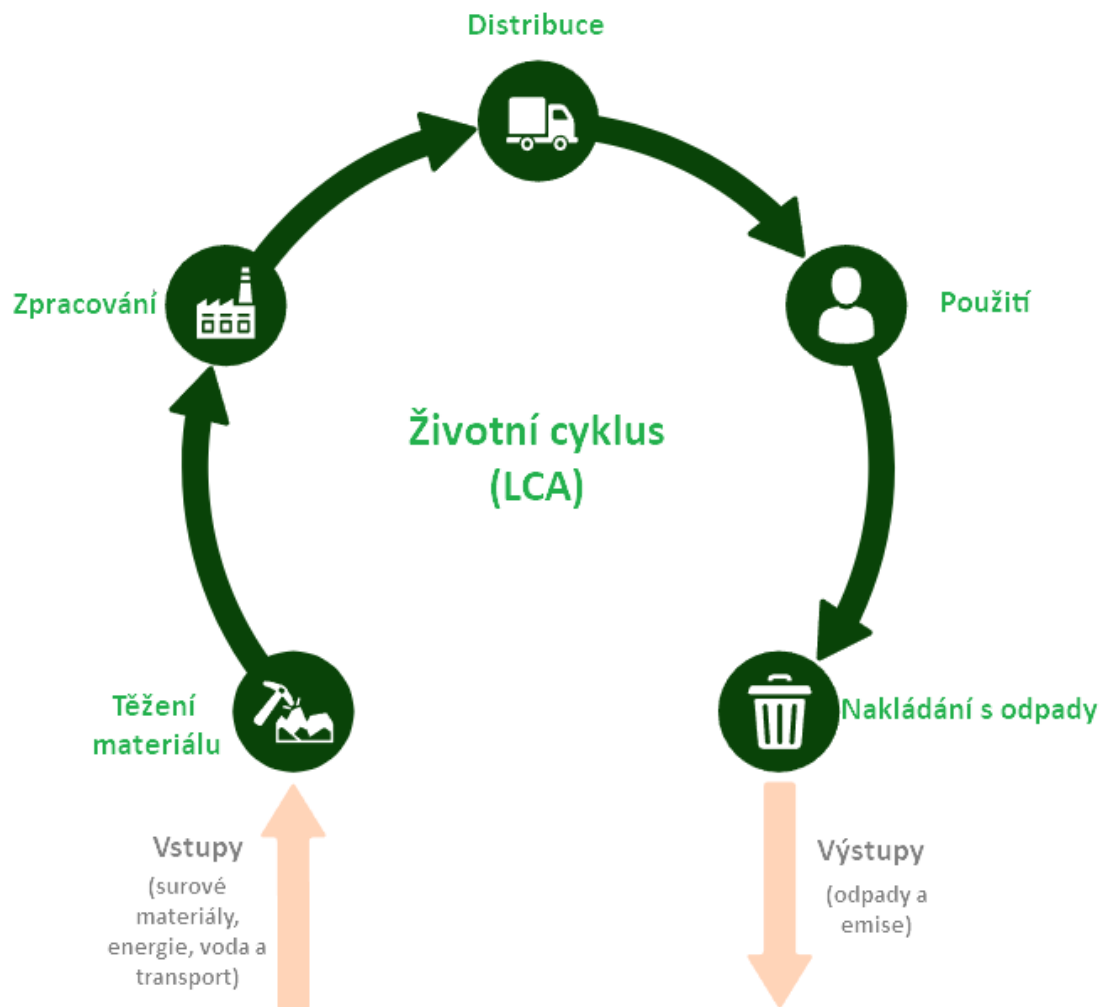
- a. Zlepšení životního prostředí: Snížením emisí a zvýšením recyklace pomáhá beton udržitelnějšího charakteru chránit životní prostředí [22].
- b. Ekonomická efektivnost: Dlouhodobější a odolnější konstrukce snižují celkové náklady na údržbu a opravy [23].
- c. Sociální přínosy: Stavby z udržitelných materiálů mohou nepřímo zlepšit kvalitu života a zdraví obyvatelstva [24].

Hodnocení udržitelnosti betonu může zahrnovat:

- a. Posuzování životního cyklu (LCA): Komplexní analýza vlivů betonu na životní prostředí po celou dobu jeho životního cyklu, od těžby surovin až po likvidaci, viz Obr.1 [25] [26].

- b. Certifikace a normy: Existují různé certifikace, jako je LEED nebo BREEAM, které hodnotí udržitelnost budov a použitých materiálů, včetně betonu [27] [28].
- c. Inovace a výzkum: Vývoj nových způsobů hodnocení udržitelnosti betonu, ztvárnění nových norem.

Tato témata jsou stále více důležitá jak pro stavební inženýry, tak pro architekty a urbanisty, kteří se snaží o ekologicky odpovědné plánování a výstavbu. Udržitelnost ve stavebnictví je komplexní téma, které je nutné opřít a podložit také o experimentální výzkumy, které vyvozují závěry umožňující pokrok v udržitelném rozvoji [29] [30] [31] [32].



Obr. 1 Životní cyklus - LCA [33]

3.1.2. TRVANLIVOST BETONU

Paralelně s udržitelností je trvanlivost betonu rovněž klíčovým faktorem, který určuje jeho životnost a ekonomickou výhodnost použití. Trvanlivost betonu je měřítko jeho schopnosti odolávat různým formám zatížení v průběhu času při zachování svých požadovaných mechanických a estetických vlastností. Tato schopnost je klíčová pro udržení funkčnosti a bezpečnosti betonových konstrukcí v různých provozech. Trvanlivost je ovlivněna faktory, jako jsou změny teploty, působení chemických látek nebo mechanické zatížení. Zlepšení trvanlivosti přispívá k delší životnosti stavebních konstrukcí a snižuje potřebu jejich častých oprav a údržby [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40].

Stanovení trvanlivosti betonu zahrnuje několik metod a testů, které hodnotí jeho schopnost odolávat specifickým degradačním procesům:

- a. Fyzikální testy: Tyto testy zahrnují hodnocení odolnosti betonu proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům, průniku vody, a schopnosti odolávat opotřebení a abrazi [35] [41] [42] [43].
- b. Chemické testy: Zkoumají reakce betonu na chemické látky, jako jsou kyseliny a soli, které mohou způsobit korozní poškození betonu a především ocelové výztuže [44] [45] [46].
- c. Mikrostrukturální analýzy: Používají se pro studium vnitřní struktury betonu na mikroskopické úrovni, včetně porozity a distribuce cementové pasty a kameniva, včetně pórů (např. u provzdušněných betonů), které jsou klíčové pro jeho trvanlivost [47] [48] [49].
- d. Longitudinální studie a monitoring: Dlouhodobé sledování betonových konstrukcí v terénu umožňuje získat reálná data o jejich chování a trvanlivosti v praxi [50] [51] [52].
- e. Normy a standardy: Existují různé mezinárodní a národní normy, které definují požadavky na trvanlivost betonu a způsoby jejího testování, například normy ASTM a EN [53] [54].

Trvanlivost betonu je tedy komplexní vlastnost, která zahrnuje mnoho různých aspektů a je nezbytná pro zajištění bezpečnosti a funkčnosti betonových konstrukcí v průběhu jejich životního cyklu.

3.2. ŽIVOTNOST A ÚNAVA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Tato kapitola se věnuje aspektům životnosti a únavového chování betonových konstrukcí, které jsou základem pro jejich návrh, konstrukci a údržbu. Schopnost betonu odolávat různým zatížením a povětrnostním podmínkám bez významného poškození je časově omezená a může být ovlivněna mnoha faktory.

Životnost betonových konstrukcí je ovlivněna komplexní interakcí materiálových vlastností, kvality provedení, konstrukčního návrhu a externích expozičních podmínek, včetně působení chemických látek, cyklů zmrazování a rozmrazování vlivem změny počasí, a mechanického opotřebení [55] [56].

Únava betonu je další klíčovou oblastí, která vyžaduje pozornost a souvisí s životností betonových konstrukcí. Opakované zatížení, které může být méně intenzivní než maximální únosnost, může vést k postupnému poškození materiálu, což nakonec vede k únavovému selhání. V praxi to znamená, že mosty, silnice, přehrady a další infrastrukturní prvky vyžadují detailní analýzy únavy, aby bylo možné předpovědět jejich životnost a plánovat jejich údržbu nebo obnovu [57] [58].

3.2.1. ŽIVOTNOST BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Životnost betonových konstrukcí se vztahuje k odhadovanému období, po které může konstrukce efektivně sloužit svému účelu bez významného poškození nebo potřeby rozsáhlých oprav. Tento odhad je založen na předpokladech o normálním stárnutí materiálů, očekávaném zatížení a expozici prostředí, ve kterém se konstrukce nachází. Cílem je zajistit, aby konstrukce vydržela po dobu své plánované životnosti bez zásadních bezpečnostních nebo funkčních kompromisů [59] [60].

Plánování životnosti konstrukce je zásadní pro zajištění, že bude spolehlivě plnit všechny požadované funkce po dobu její návrhové životnosti, zatímco současně dochází k optimalizaci celkových nákladů. Odhad životnosti je nezbytný pro správné rozhodování,

příčemž je klíčové zohlednit nejen počáteční podmínky, ale také postupnou degradaci materiálů, komponent a celého systému v průběhu času, vliv okolního prostředí a nezbytnost pravidelné údržby a oprav. Takový přístup umožňuje objektivnější hodnocení a porovnání různých řešení s cílem minimalizace potenciálních rizik [61] [62].

Všechny konstrukce a konstrukční prvky musí splňovat po celou dobu své životnosti určitou spolehlivost, která je posuzována pomocí dvou mezních stavů – mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Metody mezních stavů porovnávají účinky zatížení a schopnost konstrukce těmto účinkům odolávat. Do výpočtů mezních stavů vstupuje velké množství parametrů, které zásadně ovlivňují výsledek. Veškeré parametry jsou uváděny v normách, které se revidují a neustále vyvíjí také na základě experimentálních výzkumů [63].

Způsoby stanovení životnosti betonových konstrukcí:

a. Teoretické modelování:

- I. Teoretické modely vychází z poznatků o materiálových vlastnostech betonu, jeho chování pod zatížením a vlivu vnějších podmínek. Modely mohou zahrnovat výpočty difuze chloridů, karbonatace betonu, koroze výztuže, a další degradační procesy, které ovlivňují životnost [56] [64] [65] [66]
- II. Numerické simulace mohou pomocí konečných prvků modelovat složité interakce mezi materiály a zatížením a predikovat trvanlivost konstrukcí [67] [68] [69].

b. Experimentální metody:

- I. Provádění zkušebních testů na betonových vzorcích za různých podmínek, aby se zjistilo, jak rychle materiál degraduje. Tyto testy mohou zahrnovat expozici vzorků chemikáliím, změnám teploty, zatížení a dalším faktorům [70] [71].

- II. Akcelerované stárnutí v laboratorních podmínkách umožňuje sledovat rychlost degradace v komprimovaném časovém rámci [72] [73].

c. Monitorování stavu existujících konstrukcí

- I. Použití senzorů a pravidelných inspekcí k měření různých parametrů, jako jsou napětí, deformace, praskliny, a další indikátory poškození [74].
- II. Sběr dat z dlouhodobě monitorovaných konstrukcí může poskytnout cenné informace o tom, jak reálné podmínky ovlivňují životnost konstrukce [75].

d. Porovnání s normami a předpisy

Použití stavebních norem, které poskytují směrnice pro návrh a výstavbu betonových konstrukcí, včetně odhadů na minimální životnost na základě zkušeností s podobnými konstrukcemi.

e. Zahrnutí faktoru bezpečnosti a údržby

Plánování pravidelné údržby a oprav jako součást životního cyklu konstrukce může významně prodloužit její životnost. Životnost se také odhaduje s přihlédnutím k faktoru bezpečnosti, který zohledňuje nejistoty v materiálových vlastnostech a zatíženích.

Stanovení životnosti betonové konstrukce je komplexní proces, který vyžaduje integraci teoretických, experimentálních a praktických znalostí. Tento multidisciplinární přístup pomáhá zajišťovat, že konstrukce bude bezpečně sloužit po dobu své plánované životnosti a často i déle.

3.2.2. ÚNAVA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Únava betonových konstrukcí odkazuje na postupné zhoršování materiálu v důsledku opakovaného zatížení, které je nižší než maximální únosnost materiálu. Při únavě dochází k mikroskopickým prasklinám, které se postupně rozšiřují a mohou vést k významnému poškození nebo dokonce selhání prvku nebo konstrukce. Beton je

vystaven únavovým jevům zejména v konstrukcích, jako jsou mosty, silnice nebo letištní dráhy, kde opakované zatížení vozidel způsobuje mikroskopické změny materiálu, které mají makroskopický dopad na konstrukční prvky a stavební konstrukce [76].

Únava materiálu se dá popsat také jako postupný vývoj trvalých změn ve struktuře materiálu způsobený opakovaným zatížením. U betonu se tyto změny projevují hlavně jako postupný růst mikrotrhlin, což vede k významnému nárůstu trvalé deformace. Tyto změny na úrovni mikrostruktury pak ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu na makroúrovni [77]

Únavové zatěžování lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, kterými jsou nízkocyklové a vysokocyklové zatížení [76]. Nízkocyklové zatížení zahrnuje několik zatěžovacích cyklů s vysokou úrovní namáhání, zatímco vysokocyklové zatížení charakterizuje mnoho cyklů při nižší úrovni napětí. Hsu [78] rozšiřuje vysokocyklové zatěžování také na supervysoké cyklové zatížení, které představuje extrémní formy únavového zatížení. Tyto třídy únavového zatížení jsou shrnuty v přehledové Tab. 1.

Tab. 1 Třídy únavového zatížení [78]

Nízkocyklová únava			Vysokocyklová únava				Super vysokocyklová únava		
1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹
Konstrukce postižené zemětřesením			Letištní dráhy a mosty		Dálniční a železniční mosty, betonové kryty dálnic		Konstrukce pro hromadnou dopravu		Mořské mola, majáky

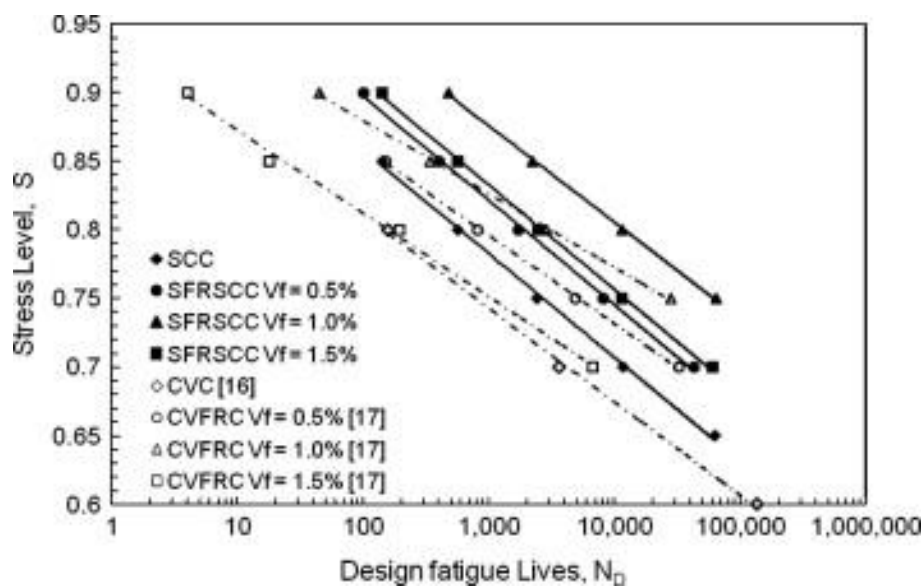
Výzkum únavy betonu je nejčastěji založen na zatěžování ohybem, méně často probíhá prostřednictvím tlakové únavové zkoušky. V poslední době vzrostl zájem o

studium únavových vlastností betonu pod tahovým zatížením, což je důsledek začlenění nelineární lomové mechaniky do analýzy betonu. Dále byl zkoumán vliv kombinovaného napětí na únavové chování betonu, kde bylo zjištěno, že únavová pevnost betonu je vyšší při dvouosém stlačení než při jednoosém [76].

Výzkum v oblasti únavy betonu zahrnuje několik metod, které se mohou lišit v závislosti na specifikacích projektu a dostupné technologii:

- a. Laboratorní testy: Nejčastěji se provádějí zkoušky na betonových vzorcích, kde se opakovaně aplikuje zatížení a sleduje se vývoj prasklin a jiné známky poškození. Tyto testy umožňují zjistit únavovou mez – maximální napětí, při kterém beton odolá specifikovanému počtu cyklů bez selhání [79] [80].
- b. Matematické modelování: Používají se různé numerické modely, které simulují chování betonu pod opakovaným zatížením. Tyto modely mohou zahrnovat komplexní aspekty, jako je viskoelastická materiálu, vliv teplotních změn a vlhkosti [81] [82].
- c. Monitorování existujících konstrukcí: Moderní senzorové technologie a metody monitorování zdraví konstrukcí (Structural Health Monitoring, SHM) umožňují sledovat stav konstrukcí v reálném čase a identifikovat případné příznaky únavového poškození [83].

Výsledkem únavových zkoušek jsou tzv. S-N křivky (někdy nazývané také Wöhlerova křivka), které udávají kolika cyklům je schopen materiál odolat při poměrné úrovni napětí nebo síly. Dosud není žádný standardizovaný postup pro provádění únavových zkoušek betonu a S-N křivky jsou vykreslovány pomocí hodnot pevnosti nebo napětí, které jsou bezrozměrné. Bezrozměrný výraz S částečně eliminuje vlivy, jako jsou tvar vzorku, receptura betonu, pevnost betonu, staří při zkoušení apod. [84] [85].



Obr. 2 Wöhlerova křivka [85]

Proces stanovení únavy konstrukce zahrnuje nejenom počáteční návrh a testování, ale i průběžné hodnocení stavu konstrukce během jejího provozu. Tím se zajišťuje, že jakékoli potenciální problémy mohou být identifikovány a řešeny dříve, než dojde ke kritickému selhání.

3.3. MECHANICKÉ CYKLICKÉ ZATÍŽENÍ

Cyklické zatížení je typ zatěžovacího režimu, kde se na materiál nebo konstrukci aplikují opakované zatěžovací a odlehčovací cykly. Tento proces zahrnuje střídavé zvyšování a snižování zatížení nebo napětí v čase, často ve formě sinusové, obdélníkové nebo pilovité vlny. Cyklické zatížení je běžné v mnoha průmyslových aplikacích a stavebnictví, kde materiály a konstrukční prvky podléhají dynamickým zatížením způsobeným například provozem strojů, dopravními prostředky, větrem nebo seizmickou aktivitou. Obecně lze říct, že všechny konstrukce v průběhu své životnosti jsou cyklicky zatěžovány, proto je zásadní tento jev důkladně prostudovat.

Opakované zatížení je klíčové pro testování a vývoj materiálů a návrh konstrukcí na únavu, jelikož mnoho selhání v praxi je způsobeno cyklickým zatížením, které může vést k postupnému hromadění poškození. Studium cyklického zatížení umožní lépe porozumět a predikovat chování materiálů a konstrukcí v reálných provozních podmínkách, což je zásadní pro návrh bezpečných a trvanlivých konstrukčních řešení.

Pro lepší pochopení problematiky cyklického zatěžování bude zatěžování rozděleno dle 3 níže pospaných kritérií.

3.3.1. CYKlickÉ ZATÍŽENÍ DLE ZPŮSOBU MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ

Beton, běžně používaný pro svou pevnost a odolnost, podléhá různým druhům mechanických namáhání, které mohou způsobit různé typy poškození. Tato kapitola popisuje jednotlivé typy zatížení.

a. Tlakové namáhání

- I. Jednoosé tlakové namáhání: Tato metoda zkoušení aplikuje opakované axiální tlakové zatížení a odlehčení na materiál v jednom směru. Tyto testy jsou základní a používají se k hodnocení, jak se materiál deformuje a jakou energii absorbuje nebo uvolňuje během střídavého zatížení [86].
- II. Trojosé tlakové namáhání: Trojosé testy jsou složitější, protože zahrnují aplikaci axiálního zatížení spolu s konstantním bočním tlakem, což lépe simuluje podmínky v hloubce země nebo pod vodou. Tento test umožňuje posouzení chování materiálů a používá se zejména pro horniny nebo geotechnické materiály pod víceosými napětovými stavy [87].

b. Tahové namáhání

Tyto testy zkoumají schopnost materiálů odolávat opakovanému tahovému zatížení. Materiál je střídavě natahován a uvolňován, což ukazuje jeho únavové chování a limitní tahovou pevnost při cyklickém zatížení. Cyklické tahové testy jsou zásadní pro pochopení, jak se materiály chovají při dynamických tahových zatíženích, která mohou nastat v průmyslových aplikacích nebo stavebnictví [88].

c. Smykové namáhání

Při cyklických smykových testech se aplikuje opakované smykové zatížení na materiál, aby se posoudilo, jaký vliv mají smykové síly na jeho strukturu a pevnost. Tento typ testování je důležitý pro studium

materiálů, jako jsou zeminy a stavební materiály, kde smykové napětí může vést k selhání konstrukce [89].

d. Ohybové namáhání

Tyto testy se zaměřují na ohybové chování materiálů pod opakovaným zatížením. Materiál je během testu opakovaně ohýbán, aby se zjistilo, jak se chová při ohybovém zatížení a jakou má únavovou pevnost. Tyto testy jsou klíčové pro inženýry při navrhování prvků, které budou vystaveny opakovaným ohybovým zatížením, jako jsou mosty nebo letadlové komponenty [90].

3.3.2. CYKlické ZATÍŽENÍ DLE RYCHLOSTI ZATĚŽOVÁNÍ

Protože různé vědecké práce popsaly vliv rychlosti zatížení na mechanické parametry betonu [91] [92], je nutné rozlišovat cyklické zatěžování dle rychlosti zatěžování. Obecně lze rozdělit rychlost zatěžování na „statické“ a dynamické. Norma ČSN EN 12390-13 [93] popisuje metodu stanovení sečnového modulu pružnosti, nazývaného také statický modul pružnosti. Předepsaná rychlost zatěžování je $0,6 \pm 0,2$ MPa/s a doporučuje měření sečnového modulu pružnosti na zkušebních tělesech ve tvaru válce s jmenovitým průměrem 150 mm a výškou 300 mm. Pro tato zkušební tělesa tedy platí, že rychlost zatěžování má být v intervalu přibližně 7,1 - 14,1 kN/s (v závislosti na přesných rozměrech zkušebního tělesa). Norma ČSN ISO 1920-10 [94], která také popisuje stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku, uvádí, že by rychlost zatěžování měla být během zkoušky v intervalu 0,2 - 0,6 MPa/s – pro válec s jmenovitým průměrem 150 mm a výškou 300 mm se jedná o nárůst síly v intervalu přibližně 3,5 - 10,6 kN/s. Vědecké práce, zabývající se rychlostí zatěžování, nepopisují rychlost zatěžování, ale uvádí rychlost poměrného přetvoření [8], viz Obr. 3. Podobně je na tom také např. americká norma zabývající se stanovením statického modulu pružnosti betonu v tlaku ASTM C469/C469M-10 [95]. Rychlost poměrného přetvoření je však přímo závislá na mechanických parametrech betonu, a proto se nedá stanovit jednotná rychlost zatěžování pro všechny betony.

Obecně lze tvrdit, že zatěžování je dynamické, pokud nelze zanedbat vliv setrvačné síly vyvolané zatěžováním, přičemž setrvačná síla vyvolaná zatěžováním závisí především na vlastnostech zkušebního tělesa, jako jsou jeho rozměry a hmotnost nebo parametry, jako jsou tuhost a útlum. Proto nelze jednoznačně určit obecnou rychlost zatěžování, která by byla statická nebo dynamická. Lze konstatovat, že postup, který je popsán v normě [93] a který byl využit v experimentální části, je zatěžování statické.



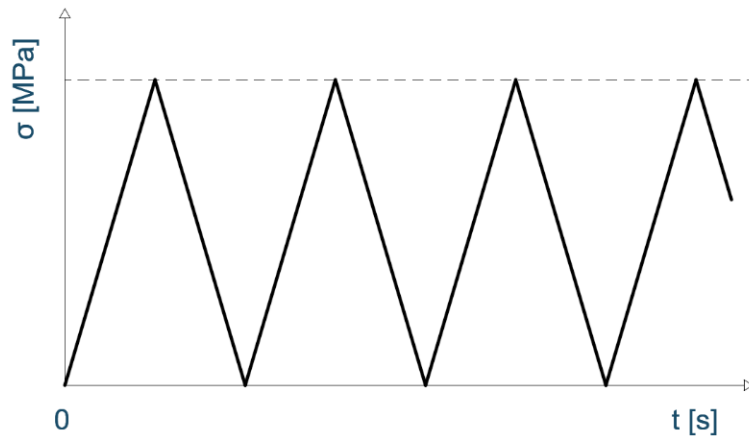
Obr. 3 Rychlost přetvoření dle [8]

- a. Statické [96]
- b. Dynamické [97]

3.3.3. CYKlickÉ ZATÍŽENÍ DLE INTENZITY ZATĚŽOVÁNÍ

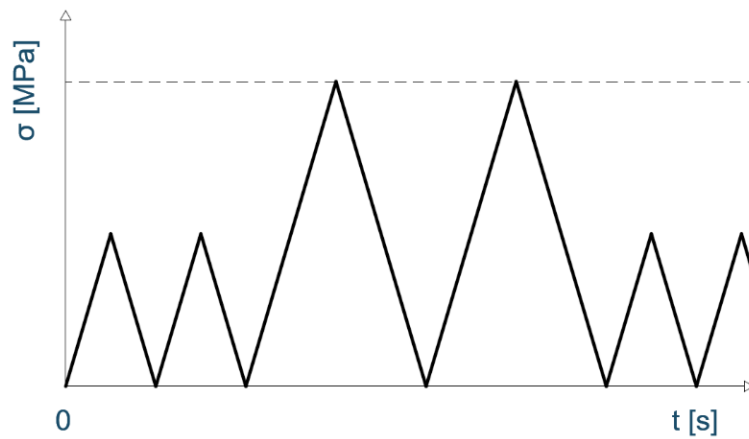
V experimentálních studiích se používají rozmanité způsoby zatěžování od jednotvárných, neměnicích svou intenzitu ve všech cyklech, po stoupající, klesající nebo oscilující intenzitu zatížení, nebo cyklování na různých hladinách zatížení na jednom vzorku.

- a. Jednotvárné zatěžování [98]



Obr. 4 Jednotvárné zatěžování

b. Různorodé [8]

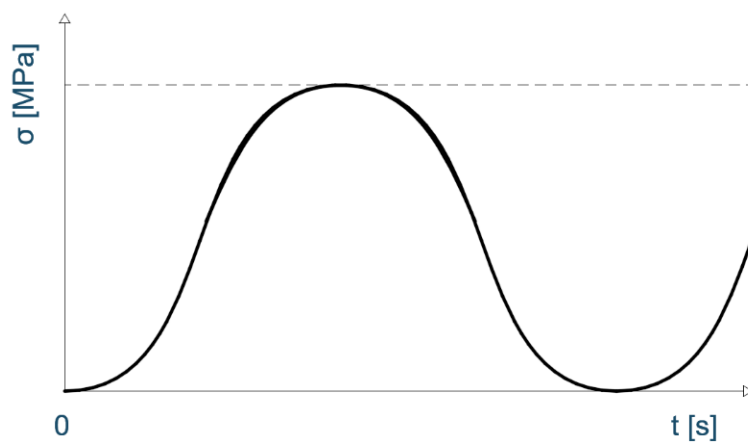


Obr. 5 Různorodé zatěžování

3.3.4. CYKlickÉ ZATÍŽENÍ DLE ZATĚŽOVACÍHO SCHÉMATU

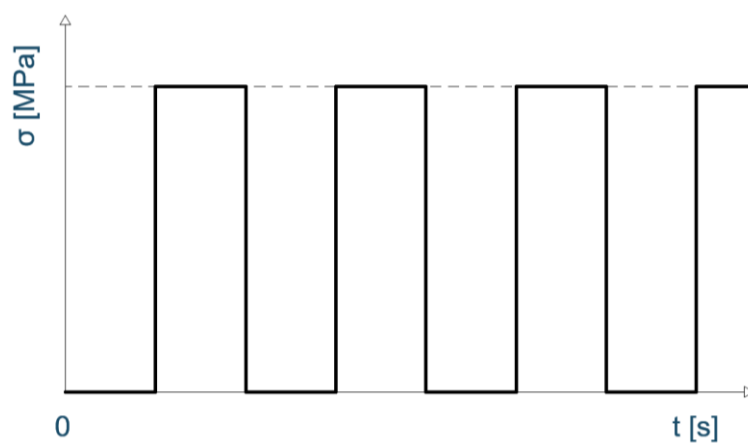
Cyklické zatížení a jeho schéma nebo vzor mohou mít různé podoby. Pomocí změny rychlostí a setrvávání na horních i dolních hladinách zatížení může „vykreslit“ různorodé cyklovací schémata, která mohou být popsána dle jejich tvaru.

a. Sinusové schéma



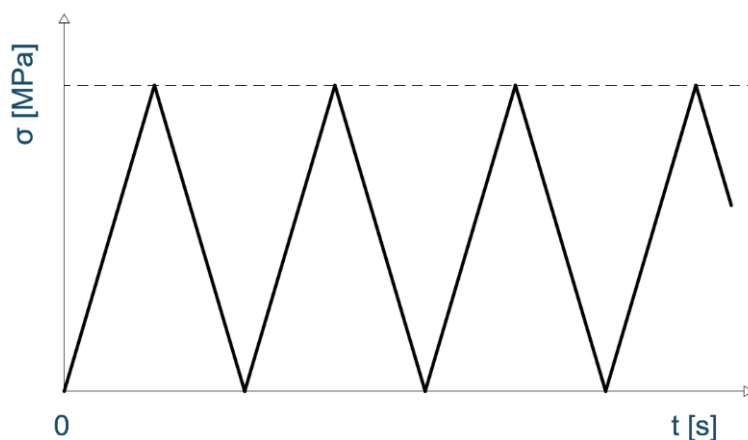
Obr. 6 Sinusové schéma zatěžování

b. Obdélníkové schéma



Obr. 7 Obdélníkové schéma zatěžování

c. Pilové schéma



Obr. 8 Pilové schéma zatěžování

Nejčastější sledované parametry při cyklických zatěžovacích zkouškách za současného záznamu síly a poměrných deformací jsou změny modulu pružnosti, maximálního poměrného přetvoření a také pevnosti v případě, že je stanovena na jiných tělesech stejné receptury, které nejsou podrobeny cyklickému zatížení. V experimentální části této práce díky současnému měření podélných i příčných deformací je zkoumán i vliv statického cyklického zatěžování na modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo.

3.4. SOUČASNÝ VÝZKUM

V poslední dekádách se vědecká obec soustředila především na vliv cyklického zatížení na horniny a v posledních letech se začalo také studovat jeho vliv na beton. Výsledky výzkumu hornin ukázaly, že faktory, které ovlivňují únavové charakteristiky, jsou frekvence zatížení, teplota, amplituda napětí a počet cyklů.

Současný výzkum v oblasti cyklického zatěžování betonu se zaměřuje na několik klíčových oblastí, které se snaží lépe pochopit a modelovat chování betonu pod opakovaným zatížením.

Experimentální studie [99] se zaměřila na vliv jednoosého cyklického zatížení na zkušební tělesa ve tvaru válce s jmenovitým průměrem 50 mm a jmenovitou výškou 100 mm. Zkušební vzorky byly z poloviny tvořeny betonem a z poloviny pískovcem, vznikly

jádrovými vývrty, které byly odebrány z pískovcového bloku, na něž byla položena vrstva betonu, ve stáří betonu 28 dní. Takto vyrobenými zkušebními tělesy byla snaha o věrnou simulaci betonových základů. Tlakovou zkouškou byla stanovena pevnost betonového tělesa na 30,52 MPa. Následně byla 4 zkušební tělesa cyklicky zatěžována, kdy spodní zatěžovací hladina byla jednotná – 6,11 MPa – a pro každé jednotlivé těleso byla stanovena jiná horní zatěžovací hladina – 12,18 MPa, 15,03 MPa, 18,28 MPa a 21,33 MPa, což odpovídalo 60 %, 70 %, 80 % a 90 % očekávané pevnosti v tlaku. Rychlost zatěžování byla 0,2 kN/s a počet cyklů byl 200. Zkušební těleso, které bylo namáháno horní hladinou 90 % očekávané pevnosti v tlaku bylo porušeno po 19 cyklech. Ze zaznamenaných dat byl zpracován grafický průběh zatížení a deformací, procentuální přetvoření v závislosti na cyklech a také byly stanoveny moduly pružnosti v jednotlivých cyklech. V souladu s experimentálními výsledky byly analyzovány deformační charakteristiky a disipace energie kompozitních vzorků při cyklickém zatěžování. Pro hodnocení vývoje poškození vzorku byla odvozena rovnice proměnného poškození. Modul pružnosti, stejně jako disipovaná energie, při různých hladinách napětí v prvních třech cyklech rychle klesaly. Následně se modul pružnosti postupně snižoval konstantní rychlostí. S nárůstem amplitudy napětí na 21,33 MPa vykazoval modul pružnosti rychle klesající trend, zatímco disipovaná energie vykazovala zrychlený nárůst před porušením vzorku.

Ve studii [98] byly zkoušeny 3 druhy vysokopevnostního betonu: nevyztužený, vyztužený ocelovými drátky a vyztužený polypropylenovými vlákny. Bylo vyrobeno 40 zkušebních těles ve tvaru válce s jmenovitým průměrem 100 mm a výškou 200 mm z každé receptury. Zrání zkušebních těles probíhalo 180 dní v laboratorních podmínkách a k samotnému zkoušení na únavu se přistoupilo ve stáří zkušebních těles 300 dní. Mimo zmíněná tělesa byla vytvořena také zkušební tělesa ve tvaru válce s jmenovitým průměrem 150 mm a výškou 300 mm pro stanovení pevnosti v tlaku, modulu pružnosti a maximálnímu přetvoření při tlakovém namáhání. 40 zkušebních těles bylo rozděleno na dvě série a z každé série byla vybrána 4 tělesa, na kterých byly stanoveny vyjmenované mechanické parametry před cyklickým zatěžováním. Jedna série byla zatěžována v rozmezí 35-50 % („L-Seires“) a druhá série v rozmezí 25-40 % („H-Series“) charakteristické pevnosti v tlaku. Každá série byla dále rozdělena do 4 sad, podle počtu provedených cyklů

- 2 000, 20 000, 200 000 a 2 000 000. Frekvence zatěžování byla 6 Hz. Žádné zkušební těleso během cyklického testování nebylo zničeno. Poté byly podrobeny statické zkoušce tlakem až do porušení a byla měřena pevnost v tlaku, modul pružnosti v tlaku a maximální deformace v tlaku. Kromě popsaného byly před zahájením cyklických zkoušek a po statických zkouškách všechny vzorky naskenovány počítačovou tomografií s vysokým rozlišením, aby bylo možné vizualizovat vnitřní poškození způsobené cyklickým zatížením. Výsledky neukázaly žádné relevantní mechanické poškození způsobené cyklickým zatěžováním. Navíc mechanické parametry betonových směsí nevykazovaly žádné výrazné snížení, v některých případech vykazovaly dokonce mírné zlepšení. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku se významně neměnila s počtem cyklů a v některých případech byl pozorován mírný nárůst. Podobné výsledky vykázal i modul pružnosti v tlaku. L-Series vykazovala mírné zvýšení, zatímco H-Series nevykazovala výraznou změnu hodnoty modulu pružnosti s počtem cyklů. Byl pozorován výrazný rozptyl hodnoty modulu pružnosti s počtem cyklů. Průměrná hodnota maximální tlakového poměrného přetvoření nevykazovala žádnou jasnou tendenci. V případě L-Series byl pozorován celkový pokles s počtem cyklů, zatímco v případě H-Series nastal celkový nárůst s počtem cyklů. Rozptyl opět vykazoval progresivní nárůst s počtem cyklů. Je možné poznamenat, že pro tři mechanické parametry studované v tomto článku výsledky odhalily, že rozptyl je parametr jasně závislý na počtu cyklů. Tato skutečnost byla pozorována ve všech případech, tj. u všech směsí a v obou sériích.

V tomto [8] experimentálním výzkumu byly studovány účinky cyklického zatěžování při různých rychlostech zatěžování na samozhutnitelný beton. Bylo testováno 108 standardních válcových zkušebních těles a 120 zkušebních těles ve tvaru krychle. Zkušební tělesa měla pevnost v tlaku přibližně 25 MPa, 35 MPa a 45 MPa. Rychlost zatěžování byla v rozsahu 0,05–250 kN/s. Výsledky ukázaly, že rychlost zatěžování ovlivňuje pevnost v tlaku a v tahu, modul pružnosti a deformaci samozhutnitelného betonu. Rozsah tohoto účinku je zesílen při cyklickém zatěžování. Vzorky betonu s vysokou pevností jsou citlivější na změny způsobené vysokorychlostním cyklickým zatěžováním. Celkové změny v každé fázi zatížení způsobují mnoho rozdílů v deformačním diagramu.

Naprostá většina vědeckých publikací, zaměřujících se na vliv cyklického zatěžování, zkoumá především množství cyklů, kterým jsou zkušební tělesa schopné odolávat a výzkumy jsou zaměřené především na cyklickou únavu [79] [81]. Méně prací je zaměřeno na vliv cyklického zatěžování na mechanické parametry jako je například pevnost betonu v tlaku, nebo modul pružnosti. Minoritní část prací se zabývá vlivem cyklického statického zatěžování na mechanické parametry betonu [8] [96] [100].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. POPIS EXPERIMENTU

Téma udržitelnosti je velmi aktuální a mnoho současných vědeckých výzkumů napříč všemi obory se ubírá i tímto směrem, především v kontextu klimatických změn a vidinou negativního dopadu na společnost. Ve stavitelství je udržitelnost mimo jiné definována životností konstrukcí a materiály těchto konstrukcí na bázi cementových kompozitů vyměřují životnost svou trvanlivostí. Únava materiálu vyvolaná opakovaným zatěžováním může zásadně ovlivnit zmíněnou trvanlivost betonu, a proto je vhodné tento jev podrobit výzkumu.

Modul pružnosti je charakteristika, která se v posledních desetiletích dostala do popředí zájmu, především kvůli dynamickému rozvoji konstrukcí z železobetonu. Jeho hodnota má zásadní vliv na chování konstrukce, a to zejména tam, kde je využita technologie předpjatého betonu. Hodnoty deformací a jejich velikost, která je přímo úměrná modulu pružnosti, nelze opomenout a popisovaný experiment prostřednictvím opakovaného zatěžování se snažil podrobněji popsat chování výše zmíněné charakteristiky betonu.

V první fázi experimentu byla důkladně prozkoumána problematika týkající se modulu pružnosti betonu a byl proveden průzkum a rešerše výstupů výzkumu ostatních odborných pracovišť a závěrů odborníků na dané téma, a to jak tuzemských, tak zahraničních. Následně bylo potřeba vytvořit plán celého experimentu, který popisoval výrobu zkušebních vzorků, měření potřebných dat, zpracování výsledků a jejich publikování.

Výroba zkušebních vzorků probíhala v průběhu 5 let. Celkově bylo vyrobeno přes 90 zkušebních těles, a to ze dvou druhů lehkého betonu (s lehkým kamenivem Liapor), ze dvou druhů obyčejného hutného betonu a ze dvou druhů hutného provzdušněného betonu. Za výběrem různých receptur a druhů betonu stála snaha o získání lepší představy vlivu opakovaného zatěžování na zkoumané charakteristiky různých druhů betonu. Pro experiment byly vyráběny především zkušební tělesa ve tvaru válce s jmenovitým průměrem 150 mm a výškou 300 mm, na kterých byl měřen modul pružnosti. Dále byly vyrobeny také krychle o hraně 150 mm, které byly využity pro stanovení informativních pevností v tlaku a příčném tahu.

Na všech zkušebních tělesech ve tvaru válce byly měřeny základní vlastnosti – průměr, délka a hmotnost, ze které se určila objemová hmotnost. Byly také měřeny dynamické parametry betonu, konkrétně čas průchodu ultrazvukového impulzu a první vlastní frekvence zkušebních těles všech tří základních způsobů kmitání (podélného, příčného a kroutivého) – tyto parametry byly měřeny před a také po cyklickém zatěžování. Pro stanovení horní zatěžovací hladiny byly měřeny maximální tlakové síly na zkušebních válcích nebo krychlích. Během opakovaného tlakového zatěžování v hydraulických i mechanických lisech byla pro potřeby experimentu měřena podélná a příčná přetvoření prostřednictvím odporových lineárních tenzometrů s jednou měřicí mřížkou při současném zaznamenávání aktuální působící síly. Před zahájením měření proběhlo podrobné seznámení s obsluhou přístrojů. Měření a sběr všech potřebných dat bylo velmi časově náročné a probíhalo v průběhu více než 3 let.

Výsledkem záznamu deformací a síly v průběhu opakovaného zatěžování bylo nashromážděné velké množství dat, které nebylo možné zpracovat prostřednictvím běžných kancelářských programů. Proto byl vytvořen algoritmus, který zpracuje záznam do takového formátu, aby vyhodnocení výsledků bylo uživatelsky dostupné a bylo možné z nich názorně stanovit vyvozené závěry. Podrobněji bude celý experiment popsán v následujících kapitolách.

4.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

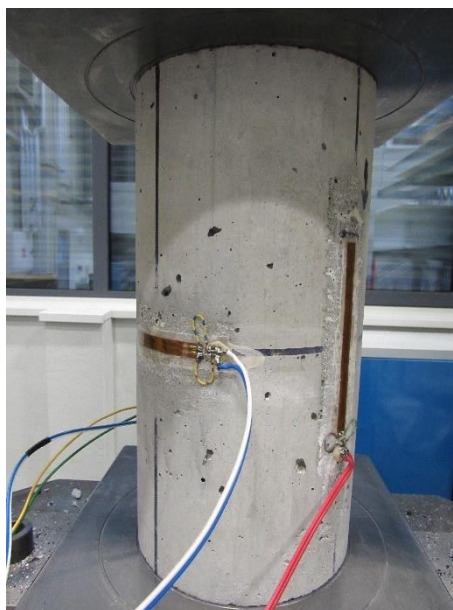
Výroba zkušebních těles probíhala v průběhu několika let. Nejstarší zkušební tělesa použitá pro tento experiment byla vyrobena v létě roku 2014, druhá nejstarší sada zkušebních těles na podzim téhož roku a třetí nejstarší sada zkušebních těles na jaře 2015. Tyto tři betonáže probíhaly bez přítomnosti autora této dizertační práce, neboť na doktorské studium nastoupil začátkem roku 2018. Na výrobě zkušebních těles těchto zmíněných zkušebních sad se podílel pouze školitel. Pro potřeby experimentu bylo vyrobeno dohromady téměř 100 zkušebních těles v průběhu několika let, a to s jedinou výjimkou v komerční betonárně pod dozorem zkušených technologů a ve spolupráci zaměstnanců betonárny a akademiků z FAST VUT. Jak míchání, tak i ukládání čerstvého betonu do forem bylo prováděno pečlivě, v průběhu betonáže byly pořizovány snímky pro podrobnou dokumentaci celého procesu výroby zkušebních těles. Vzorky, ve tvaru válce nebo krychle, byly vyrobeny podle normových postupů ze dvou druhů lehkého betonu (s lehkým kamenivem Liapor), ze dvou druhů obyčejného hutného betonu a ze dvou druhů provzdušněného betonu. Označení betonů, pro jednodušší orientaci v experimentu a lepší znázornění výsledků, je LB1 a LB2 pro lehký beton, OB1 a OB2 pro obyčejný hutný beton a PB1 a PB2 pro provzdušněný beton. Výrobní postupy čerstvého betonu probíhaly obdobně u všech druhů betonu a byla snaha o co největší konzistentnost v průběhu celého experimentu, proto podrobnější popis samotné výroby zkušebních těles je uveden v kapitole 4.2.1. V dalších kapitolách nebylo nutné znovu popisovat stejnou technologii výroby, jsou v nich proto uvedeny pouze případné odchylky, jako je např. místo výroby. Všechna tělesa byla po betonáži ponechána tři dny v přikrytých formách ve standardních laboratorních podmínkách a po odformování byla uložena do vodní lázně po dobu 28 dní. Následně byla z vodní lázně vyjmuta a byla dále skladována v laboratorních podmínkách tak, aby mohla přirozeně vysychat ze všech stran. Samotné zkoušení modulu pružnosti probíhalo na vzorcích starších alespoň 180 dnů, většinou však ve stáří 1 rok a více. Důvodem je velká časová náročnost násobného cyklického zatěžování jednotlivých těles – v závislosti na pevnosti betonu a zvolené úrovni zatěžování trvala zkouška jednoho zkušebního válce několik desítek hodin (maximálně téměř 6 dní). Než byla odzkoušena jedna sada zkušebních těles, uplynulo vždy několik týdnů. To by v případě, že by bylo zkoušení zahájeno ve stáří betonu 28 dní, mělo vliv na získané hodnoty, neboť tělesa, která

by byla zkoušena na konec, měla stáří i několik měsíců – a během té doby by beton ještě vyzrál.

Samotná zkouška byla vždy zahájena zakončováním válců. Válce z lehkého betonu byly broušeny ručně na rovinné kovové desce za použití korundového prášku (viz Obr. 9). Válce z obyčejného a provzdušněného betonu byly broušeny strojně. Po zabroušení tlačených ploch byly pečlivě změřeny všechny potřebné rozměry a tělesa byla zvážena. Bylo provedeno nedestruktivní měření pomocí rezonanční a ultrazvukové impulzové metody. Na základě získaných výsledků byla vybrána tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku, jejich počet byl většinou 2 až 3. Ostatní zkušební válce byly určeny k statickému cyklickému zatěžování. Pomocí rychletuhnoucího dvousložkového epoxidového lepidla byly na jejich povrch nalepeny odporové tenzometry. Dva podélné a dva příčné (viz Obr. 10). Použité podélné tenzometry jsou 1-LY41-100/120 a příčné 1-LY41-50/120.



Obr. 9 Zakoncování tlačených ploch zkušebních válců



Obr. 10 Osazení příčných a podélných tenzometrů na zkušebním tělese

4.2.1. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES LB1

Výroba zkušebních těles z lehkého betonu (označení „LB1“) proběhla 26. května 2017 v betonárně BETOTECH, s. r. o. v Brně – Bosonohách za osobní účasti autora této práce. Receptura LB1 je v následující tabulce.

Tab. 2 Receptura lehkého betonu LB1

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement CEM II/B-S 32,5 R	450
Drobné kamenivo 0/4 Bratčice	776
Drobné kamenivo 1/4 Liapor	52
Hrubé kamenivo 4/8 Liapor	198
Pří sada VZ 10 – zpomalovač	0,68
Plastifikační pří sada Sika stabilizer 4R	0,45
Voda	208
Vodní součinitel	0,46

Pro výrobu čerstvého betonu byly všechny vstupní složky zváženy a míchání probíhalo ve stavební laboratorní míchačce. Navážka lehkého kameniva Liapor pro čerstvý beton byla předvlhčena 24 hodin před mícháním. Nejen pro potřeby tohoto experimentu bylo vyrobeno celkem 413 l betonu. Toto množství čerstvého betonu se neobešlo bez nutnosti namíchat 6 laboratorních míchaček, které byly rovnoměrně

rozděleny do dvou nádob. Průběžným promícháváním v obou nádobách a po smíchání cílového objemu čerstvého betonu byl beton opět rovnoměrně přesunut do míchačky, kde došlo k opětovnému promíchání. Tímto postupem bylo dosaženo vyrobení všech zkušebních těles z betonu, který byl rovnoměrný. Míchání probíhalo 1 hodinu a 40 minut a samotná výroba zkušebních těles, tedy ukládání betonu do forem, během kterého probíhalo také hutnění, si vyžádalo dalších 35 minut. Postup výroby zkušebních těles, stejně jako ukládání čerstvého betonu do forem, se řídil dle normy ČSN EN 12350-1 [101] tak, aby výsledná tělesa splňovala podmínky normy ČSN EN 12390-1 [102].

V průběhu výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 [103] a také se stanovila objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104]. Výsledky zkoušek čerstvého betonu jsou:

- rozlití: 500 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 1620 kg/ m³.

Formy pro zkušební tělesa byly překryty polyetylenovou fólií, aby bylo zabráněno uniku vlhkosti a díky tomu bylo zaručeno kvalitní zrání betonu. Takto uložená zkušební tělesa při standardních laboratorních podmínkách byla skladována v prostorech betonárny po 72 hodin. Dne 29. května 2017 byla testovací tělesa převezena ve formách, tak aby nedošlo k jejich porušení, a proběhlo odformování všech vyrobených zkušebních těles ve stáří 3 dnů v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT. Tělesa vybraná pro tento experiment byla pečlivě označena a uložena do vodní lázně s teplotou vody 20 °C.



Obr. 11 Výroba čerstvého betonu

4.2.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES LB2

Pro potřeby popisovaného experimentu bylo dne 18. června 2019 vyrobeno 23 zkušebních těles ve tvaru válce z lehkého betonu (označení „LB2“). Výroba zkušebních těles opět probíhala ve výše zmíněné betonárně ve spolupráci se zaměstnanci společnosti. Receptura LB2 je v následující tabulce.

Tab. 3 Receptura lehkého betonu LB2

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement CEM II/B-S 32,5 R	270
Drobné kamenivo 0/4 Bratčice	900
Popílek Opatovice	70
Hrubé kamenivo 4/8 Liapor	198
Přísada VZ 10 – zpomalovač	0,68
Plastifikační přísada Sikaplas 501 W	2,7
Voda	189
Vodní součinitel	0,70

Výroba zkušebních těles ukládáním čerstvého betonu do forem probíhala dle výše uvedených norem v části 4.2.1. Veškeré vstupní materiály byly pečlivě zváženy a postup výroby byl shodný jako u betonu LB1, s rozdílem v tom, že během míchání čerstvý beton

nebyl rovnoměrně rozdělován do dvou nádob, ale do čtyř. Míchání čerstvého betonu i jeho ukládání do forem včetně hutnění trvalo 1 hodinu a 50 minut.

Během výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 [103] a také se stanovila objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104]:

- rozlití: 490 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 1680 kg/ m³.



Obr. 12 Výroba čerstvého betonu

4.2.3. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES OB1

Čerstvý beton byl vyroben v betonárně BETOTECH, s. r. o. v Brně – Bosonohách dne 23. 7. 2014. Receptura betonu je v tabulce níže. Dávka betonu byla v tomto případě natolik velká (bylo vyrobeno mnoho dalších zkušebních těles pro jiné experimenty), že beton byl dodán v autodomíchači. Výroba zkušebních těles proběhla v nejkratším možném čase a následné ošetřování zkušebních těles proběhlo již dříve popsaným způsobem.

Tab. 4 Receptura hutného betonu OB1

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement CEM I 42,5 R	350
Drobné kamenivo 0/4 Bratčice	875
Hrubé kamenivo 4/8 Olbramovice	185
Hrubé kamenivo 8/16 Olbramovice	695
Plastifikátor Sika ViscoCrete 4035	1,75
Voda	174
Vodní součinitel	0,46

Během výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 [105], zkouška konzistence rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 a také se stanovila objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104]:

- sednutí: 70 mm,
- rozlití: 340 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 2270 kg/ m³.



Obr. 13 Transport čerstvého betonu

4.2.4. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES OB2

Výroba a ukládání čerstvého betonu s označení OB2 proběhla dne 4. 11. 2014. Anonymizovaná receptura (požadavek výrobce betonu) je v následující tabulce.

Tab. 5 Receptura hutného betonu OB2

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement	285
Popílek	100
Drobné kamenivo 0/4	845
Hrubé kamenivo 4/8	182
Hrubé kamenivo 8/16	734
Superplastifikátor	1,63
Voda	190
Vodní součinitel	0,49

Postup výroby zkušebních těles probíhal obdobně jako je popsán v části 4.2.1. Betonáž také proběhla v betonárně BETOTECH, s. r. o. v Brně – Bosonohách, v tomto

případě s tím rozdílem, že hutné kamenivo nebylo nutné předvlhčovat a dávka betonu byla vyrobena pomocí dvou míchaček a celý objem čerstvého betonu byl zhomogenizován v jedné nádobě.

Během výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 [105] a také se stanovila objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104]:

- sednutí: 190 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 2340 kg/ m³.

Vyrobená zkušební tělesa byla převezena do laboratoře SZK, odformována i skladována stejně, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.



Obr. 14 Ukládání čerstvého betonu do forem

4.2.5. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PB1

Čerstvý beton s označením PB1 byl vyroben zcela stejně jako beton v kapitole 4.2.4. (betonárna v Brně – Bosonohách, čerstvý beton dopraven autodomíchačem). Rozdíl spočíval v tom, že receptura betonu PB1 obsahovala provzdušňovací přísadu. V následující tabulce je zaznamenána jeho receptura.

Tab. 6 Receptura provzdušněného betonu PB1

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement CEM I 42,5 R	400
Drobné kamenivo 0/4 Bratčice	825
Hrubé kamenivo 4/8 Olbramovice	185
Hrubé kamenivo 8/16 Olbramovice	695
Palstifikátor Sika ViscoCrete 4035	2,00
Provzdušňovací přísada Sika LPS A 94	0,75
Voda	164
Vodní součinitel	0,38

Během výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 [105] a zkouška konzistence rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5. Byla také stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104] a obsah vzduchu v čerstvém betonu dle normy ČSN EN 12350-7 [106]:

- sednutí: 50 mm,
- rozlití: 320 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 2260 kg/ m³,
- obsah vzduchu: 5,7 %.



Obr. 15 Přeprava čerstvého betonu

4.2.6. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PB2

Čerstvý beton s označením PB1 byl vyroben dne 12. 6. 2019. Jeho receptura je znázorněna v tabulce. Betonáž probíhala v rámci rozsáhlého experimentu, pro který bylo nutné vyrobit velké množství zkušebních těles. Beton byl proto dopraven pomocí autodomíchávače do areálu FAST VUT, samotná výroba zkušebních těles proběhla v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví. Následné uložení a ošetřování zkušebních těles bylo stejné, jako u všech ostatních betonů vyrobených v rámci experimentu popisovaného v této práci.

Tab. 7 Receptura provzdušněného betonu PB2

Materiál	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement CEM I 42,5 R	390
Drobné kamenivo 0/4 Bratčice	810
Hrubé kamenivo 4/8 Olbramovice	160
Hrubé kamenivo 8/16 Olbramovice	760
Plastifikační přísada	1,00
Provzdušňovací přísada	0,55
Stabilizační přísada	1,60
Voda	178
Vodní součinitel	0,43

Během výroby se prováděly zkoušky čerstvého betonu – byla stanovena zkouška konzistence sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 [105] a zkouška konzistence rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 [103]. Byla také stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [104] a obsah vzduchu v čerstvém betonu dle normy ČSN EN 12350-7 [106]:

- sednutí: 150 mm,
- rozlití: 430 mm,
- objemová hmotnost čerstvého betonu: 2270 kg/ m³,
- obsah vzduchu: 4,3 – 5,0 %.



Obr. 16 Ukládání čerstvého betonu do forem

4.3. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

V této kapitole jsou popsány postupy, jakým způsobem byly měřeny veličiny sloužící pro stanovení vybraných charakteristik vyrobených betonů. Veškeré procesy probíhaly podle příslušných norem a byly prováděny takovým způsobem, aby výsledky přesně popisovaly dané vlastnosti zkoušeného materiálu.

4.3.1. PEVNOST BETONU V TLAKU

Popisovaný experiment vyžadoval stanovit pevnost betonu v tlaku, a to jednak pro určení horní zatěžovací hladiny při opakovaném zatěžování zkušebních těles a také pro následné posouzení, zda je tato vlastnost statickým cyklickým zatěžováním ovlivněna. Proto byla pevnost v tlaku stanovena také na tělesech, která byla opakovanému zatěžování podrobena. Pro stanovení pevnosti bylo nutné všechna zkušební tělesa pečlivě změřit, aby bylo možné vypočítat plochu, na kterou bylo vyvozeno tlakovou silou napětí. Jednotlivá zkušební tělesa byla vložena do laboratorního lisu, kde bylo předepsanou rychlostí tlakovou silou vyvozeno takové napětí, aby došlo k porušení daného tělesa. Pro každé zkušební těleso tímto postupem byla maximální naměřená tlaková síla zaznamenána a sloužila k výpočtu pevnosti zkoušeného materiálu v tlaku. Dva zkušební lisy, které umožnily tento parametr ztvrdlého betonu stanovit, byly pro potřeby této práce využity. Byl to hydraulický lis ALPHA 3-3000 S od firmy FORM + TEST Seidner&Co. GmbH s rozsahem 3000 kN. Další byl vysokokapacitní elektromechanický lis LabTech 6.1000 od firmy LaborTech s rozsahem 1000 kN. Při procesu měření proběhlo také vážení těles, aby bylo možné z rozměrů vypočítat objemovou hmotnost. Pevnost v tlaku byla stanovena postupem popsáním v normě ČSN EN 12390-3 [107], a samotné vyhodnocení pevnosti v tlaku f_c vycházelo ze vztahu:

$$f_c = \frac{F_c}{A}, \quad (1)$$

kde f_c – pevnost betonu v tlaku v MPa,

F_c – naměřená maximální tlaková síla v N,

A – tlačená plocha zkušebního tělesa v mm².



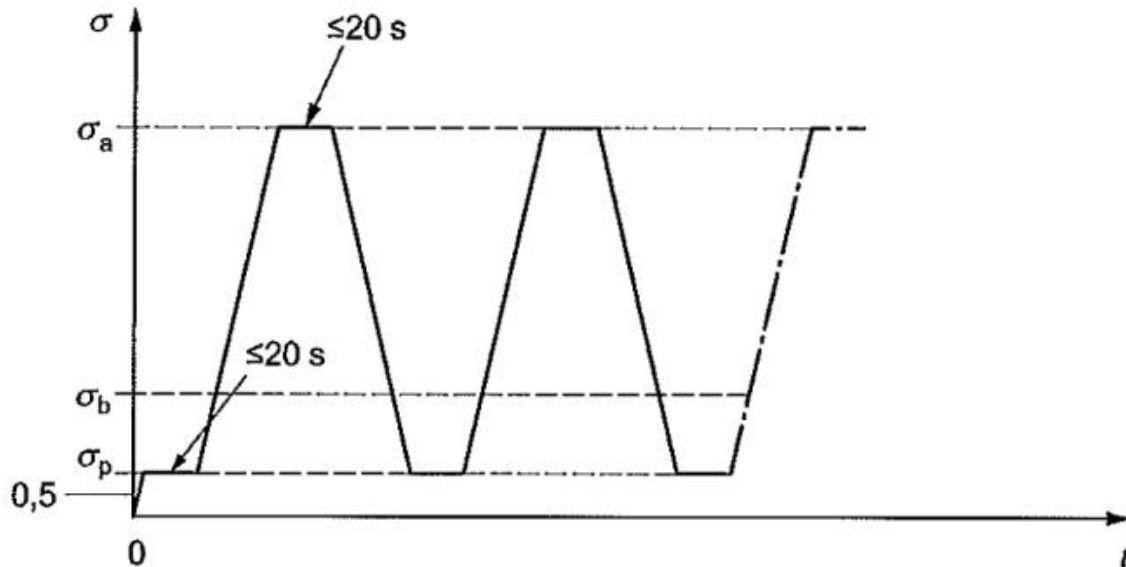
Obr. 17 Stanovení pevnosti v tlaku

4.3.2. STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Hodnota statického modulu pružnosti lze vyčíslit pomocí různých metod – lze ji stanovit pomocí zkoušky v tlaku stejně jako ze zkoušky v tahu ohybem. Pro tento experiment nebyla vybrána metoda, která je používána nejběžněji (postup podle normy ČSN ISO 1920-10 [94]), ale metoda, která se jí velmi podobá a která vykazuje srovnatelné výsledky, viz [108]. Jedná se o metodu B popsanou v normě ČSN EN 12390-13 [93]. Od postupu normy ČSN ISO 1920-10 [94] se liší pouze v době držení horního a spodního napětí během zkoušky. Zatímco norma [94] udává dobu držení limitních napětí 60 sekund, metoda B normy [93] uvádí, že tato doba by měla být maximálně 20 sekund. Vzhledem k velmi velké časové náročnosti plánovaných zkoušek byla doba držení spodního a horního napětí v zatěžovacích cyklech zvolena jako 3 sekundy. Současně norma [93] popisuje tři úrovně zatížení:

- horní (v originále „upper“), které odpovídá $1/3$ předpokládané pevnosti betonu v tlaku (což koresponduje s horní hladinou zatížení dle ČSN ISO 1920-10 [94]),

- dolní (v originále „preload“), které je minimálně 0,5 MPa (což opět odpovídá spodnímu napětí popsanému v normě ČSN ISO 1920-10 [94], kde je ovšem hodnota přesně 0,5 MPa),
- prostřední (v originále „lower“), které je v rozmezí 10-15 % předpokládané pevnosti v tlaku.



Obr. 18 Idealizovaný průběh zatěžování při zkoušce sečnového modulu pružnosti – Metoda B [93]

Důležitá poznámka v normě – pro tento experiment – je, že spodní napětí je sice minimálně 0,5 MPa, ovšem maximálně je prostřední napětí. Jeho hodnota tedy teoreticky může být až 15 % z předpokládané pevnosti v tlaku betonu.

Jak již bylo zmíněno výše pro experiment byly použity tři druhy betonu (lehký, obyčejný a provzdušněný) a celkem 6 různých receptur (dvě od každého druhu betonu). Pokus byl navržen tak, že zkušební tělesa jedné receptury jednoho druhu betonu (LB1, OB1 a PB1) byla zatěžována horní zatěžovací hladinou $\sigma_a = 1/3 \cdot f_c$, tedy přesně v souladu s postupy norem [93] i [94]. Během zkoušení bylo rozhodnuto experiment rozšířit o více hladin zatížení. Proto byla zkušební tělesa z druhých receptur stejného druhu betonu rozdělena do 2 až 3 sad, kdy horní zatěžovací hladina byla zvýšena až na $\sigma_a = 1/2 \cdot f_c$, respektive $\sigma_a = 2/3 \cdot f_c$. Pevnost f_c byla předem stanovena na 3 až 5 (v jediném případě

pouze na 2) zkušebních tělesech z každé receptury. Dolní zatěžovací hladina byl pro každý beton stanovena ve výše uvedeném intervalu: $0,15 \cdot f_c \geq \sigma_b \geq 0,1 \cdot f_c$. Kompletní rozpis způsobu zatěžování zkušebních válců jednotlivých sad všech 6 betonů je uveden v Tab. 8. Na horní i dolní úrovni zatěžování se vždy setrvalo po dobu 3 sekund.

Tab. 8 Přehled zatěžovacích úrovní všech sad zkušebních těles

Beton	Zkušební tělesa	Horní napětí σ_a	Plánovaný počet cyklů	Cyklování mezi silami [kN]
LB1	1-12 (12 ks)	$1/3 \cdot f_c$	4000	20 - 120
	13-15 (3 ks)	$- (f_c)$	-	-
LB2	1-5 (5 ks)	$1/3 \cdot f_c$	5000	20 - 108
	6-10 (5 ks)	$1/2 \cdot f_c$	5000	20 - 162
	11-15 (5 ks)	$2/3 \cdot f_c$	5000	20 - 210
	16-20 (5 ks)	$- (f_c)$	-	-
OB1	1-9 (9 ks)	$1/3 \cdot f_c$	3000	100 - 350
	10-12 (3 ks)	$- (f_c)$	-	-
OB2	1-5 (5 ks)	$1/3 \cdot f_c$	5000	80 - 285
	6-10 (5 ks)	$1/2 \cdot f_c$	5000	80 - 430
	11-12 (2 ks)	$- (f_c)$	-	-
PB1	1-9 (9 ks)	$1/3 \cdot f_c$	5000	20 - 380
	10-12 (3 ks)	$- (f_c)$	-	-
PB2	1-4 (4 ks)	$1/3 \cdot f_c$	5000	20 - 340
	5-8 (4 ks)	$1/2 \cdot f_c$	5000	20 - 510
	9-12 (4 ks)	$2/3 \cdot f_c$	5000	20 - 680
	13-15 (3 ks)	$- (f_c)$	-	-

Další volený parametr byl počet cyklů, který ovlivnil především délku tohoto experimentu. Požadovaný počet cyklů byl řádově jednotky tisíc, u těles LB1 to bylo 3000, u těles OB1 to bylo 4000 a u všech ostatních sad zkušebních těles to bylo 5000. Rozdíl v délce zkoušení jednoho tělesa způsobovala zejména zvolená horní zatěžovací hladina. Při rychlosti zatěžování 0,8 MPa/s (pro lehký beton nebo pro obyčejný beton) činil rozdíl v délce zatěžování jednoho tělesa až několik dní. Veškerá nasbíraná data v textových souborech (frekvence ukládání dat byla zvolena 5 Hz) si vyžádala kapacitu paměti 3,38 GB. Na betonech, které vykazovaly nejvyšší pevnost v tlaku, trval jeden jediný záznam téměř 500 000 sekund, což je přibližně 5,5 dní. Pokud by požadovaný počet cyklů byl např. 2 miliony (běžný počet při únavových zkouškách), což by mělo významný přínos pro výzkum

v oboru únavy betonu vlivem statického namáhání, trvalo by testování jednoho jediného zkušební tělesa při stejných vstupních parametrech více než 6 let, nepřetržitého měření. Samotné cyklování probíhalo na dvou výše zmíněných lisech a také na hydraulickém lisu DELTA 6-300 (se zatěžovací hlavou pro tlakové namáhání) FORM + TEST Seidner&Co. GmbH s rozsahem 300 kN – zkušební válce betonu LB2. Pro sběr dat byly použity tři typy datových ústředen, a to vzhledem k jejich aktuální dostupnosti pro takto časově náročné měření. Jednalo se o ústřednu EMS DV 803 od společnosti TWSCON s.r.o. a dále o ústředny QautumX a Spider8 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

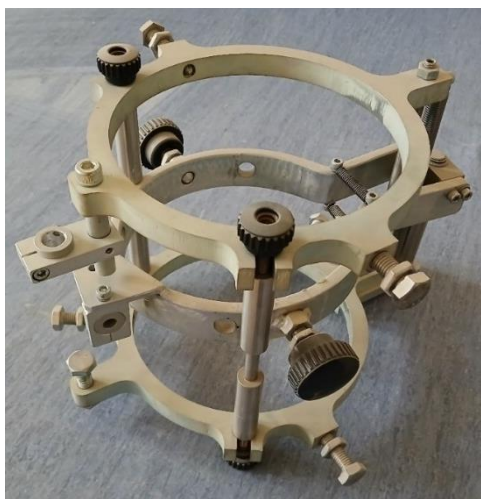


Obr. 19 Zkušební sestava během cyklování

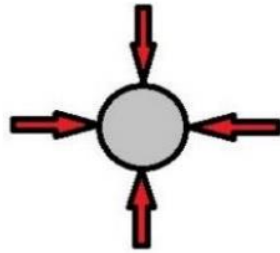
Postup zatěžování a měření deformací zkušebních válců je pro sady zkušebních těles jednotlivých druhů betonu podrobněji rozepsán v následujících odrážkách:

- jako první byla zkoušena tělesa betonu **OB1** – jednalo se v podstatě o pilotní měření v rámci popisovaného experimentu, které probíhalo v první polovině roku 2018, tedy ještě před nástupem autora této práce do doktorského studijního programu (ale již za jeho přítomnosti s vědomím, že výstupy tohoto měření mohou být součástí autorovy dizertační práce). Podélné deformace byly měřeny pomocí odporových tenzometrů 1-LY41-100/120 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, jak již bylo

uvedeno dříve. Příčné deformace v tomto případě ovšem nebyly měřeny pomocí odporových tenzometrů. Pro tento účel byl použit kompresometr/extenzometr od firmy MATEST, určený k měření modulu pružnosti podle americké normy C469/C469M-10, viz Obr. 20. Většina výrobců či dodavatelů tohoto přípravku jej v originále nazývá Compressometer/Extensiometer, v této práci bude dále označován pouze jako extenzometr. Samotné deformace extenzometru – lze měřit podélné i příčné deformace válce – byly měřeny pomocí indukčnostních snímačů dráhy WA-T s rozsahem 0-10 mm od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Protože se jednalo o první použití extenzometru pro měření v rámci všech aktivit Ústavu stavebního zkušebnictví, byly příčné deformace měřeny navíc pomocí dalších 4 indukčnostních snímačů dráhy WA-T s rozsahem 0-10 mm, které byly umístěny kolmo k povrchu válce uprostřed jeho výšky, viz Obr. 21. Celkový pohled na takto osazený válec je na Obr. 22. Samotné zatěžování bylo prováděno v mechanickém lisu LabTech 6.1000, data byla snímána ústřednou Quantum a tělesa byla zatěžována rychlostí 14 kN/s do 1/3 předpokládané pevnosti. Celkový počet zatěžovacích cyklů byl naplánován na 3000. Při kontrole dat se ukázalo, že soubory se záznamy zatěžování prvních dvou válců jsou uloženy v nevhodném formátu, proto vyhodnocení těchto válců chybí.



*Obr. 20 Extenzometr použitý pro stanovení příčných i podélných deformací zkušebních válců
OB1*



Obr. 21 Umístění 4 indukčních snímačů dráhy WA-T (půdorysné zobrazení)



Obr. 22 Zkušební sestava pro měření deformací zkušebních válců OB1 během cyklování

- Jako druhá byla zkoušena tělesa betonu **LB1**, a to na přelomu let 2018 a 2019. Po ne příliš dobrých zkušenostech s extenzometrem a indukčními snímači WA-T (naměřená data nebylo možné v podstatě vyhodnotit, záznamy neodpovídaly zatěžovacím cyklům, některé snímače dokonce ukazovaly příčné zkrácení válce) byly pro stanovení poměrných deformací použity v podélném i příčném směru odporové tenzometry. Samotné zatěžování bylo prováděno opět v mechanickém lisu LabTech 6.1000, data byla snímána ústřednami EMS DV 803 a tělesa byla zatěžována rychlostí 14 kN/s do 1/3 předpokládané pevnosti. Celkový počet zatěžovacích cyklů byl naplánován již na 4000. Prvních 10 zkušebních válců bylo odzkoušeno na podzim 2018 a poslední dva byly odzkoušeny až po

určité časové prodlevě (nebyly k dispozici ústředny a lis byl obsazen jinými výzkumnými aktivitami) na jaře 2019. Ačkoliv bylo vše provedeno stejně, záznamy posledních dvou válců vykazují anomálie, a proto byly z finálního hodnocení vyřazeny, jak je uvedeno v příloze práce.

- Jako třetí byla zkoušena tělesa betonu **PB1**, a to na přelomu let 2020 a 2021. Samotné zatěžování bylo prováděno opět v mechanickém lisu LabTech 6.1000, data byla snímána ústřednou Spider8 a tělesa byla zatěžována rychlostí 14 kN/s do 1/3 předpokládané pevnosti. Celkový počet zatěžovacích cyklů byl naplánován již na 5000, přičemž tento počet cyklů byl již ponechán pro všechny tělesa ze zbývajících (větší) části experimentu. Při přenášení dat z notebooku, ke kterému byla připojena ústředna, na počítač autora došlo k nevratnému poškození dvou souborů dat na flash disku, což bylo naneštěstí zjištěno až po delší době. Soubory již byly mezitím smazány i z měřicího notebooku, proto vyhodnocení cyklování dvou válců chybí.
- Jako čtvrtá byla zkoušena tělesa betonu **OB2**, a to v letních měsících roku 2021. Samotné zatěžování bylo prováděno opět v mechanickém lisu LabTech 6.1000, data byla snímána ústřednou Spider8 a tělesa již byla poprvé rozdělena do dvou skupin. První skupina těles byla zatěžována rychlostí 14 kN/s do 1/3 předpokládané pevnosti a druhá skupina těles byla zatěžována stejnou rychlostí do 1/2 předpokládané pevnosti. Celkový počet zatěžovacích cyklů již zůstal na plánované hodnotě 5000. U druhého válce druhé skupiny zůstal mechanický lis po přibližně polovině plánovaných cyklů stát – zatížení bylo 142 kN, a to přes celý víkend, tedy tři dny. Z toho důvodu nebylo těleso zatěžováno dalšími cykly a počet změřených cyklů zůstal přibližně poloviční. U posledního tělesa betonu OB2 došlo při zatěžování k přetržení jednoho ze šroubů, kterými je příčník připevněn ke svislým vodícím šroubovicím. Poté došlo ke kolapsu i ostatních šroubů na jedné straně příčníku, ten se ze šroubovice utrhl a ovládání lisu začalo nekontrolovaně zatěžovat pouze jednou stranou příčníku. Výsledkem byl poškozený lis a zničené zkušební těleso. Proto není u posledního

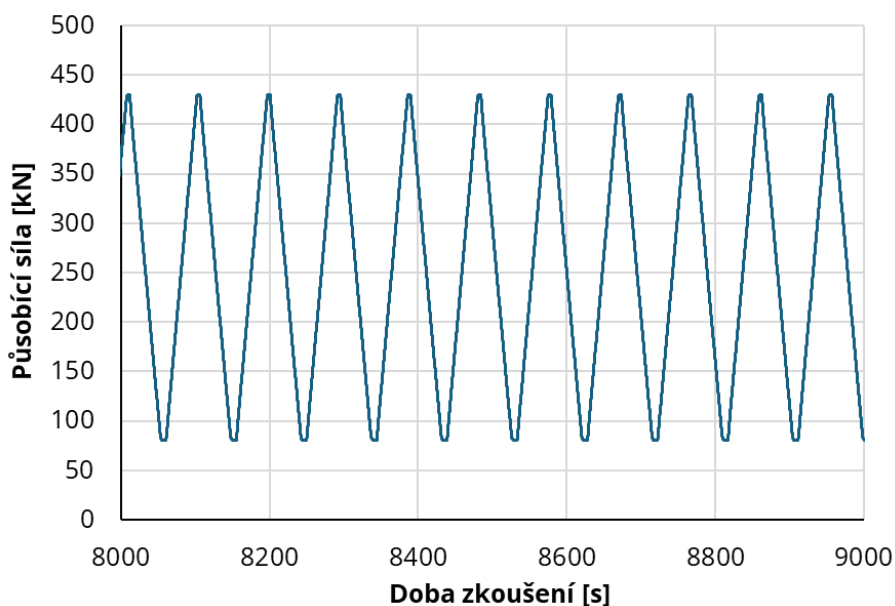
zkušebního válce naměřeno 5000 cyklů a především dynamické parametry po zatěžování.

- Jako pátá byla zkoušena tělesa betonu **LB2**, a to na podzim roku 2021. Samotné zatěžování bylo prováděno – po neradostné zkušenosti s lisem LabTech 6.1000 – v hydraulickém lisu DELTA 6-300. Data byla snímána ústřednou Spider8 a tělesa byla tentokrát rozdělena do tří skupin. Všechna tělesa byla zatěžována rychlostí 14 kN/s, přičemž první skupina do 1/3, druhá do 1/2 a třetí do 2/3 předpokládané pevnosti. Třetí skupina byla původně plánována zatěžovat do 3/4 předpokládané pevnosti, ovšem pevnost zkušebních těles vykazovala relativně velký rozptyl, a proto nebylo snadné pevnost jednotlivých válců přesně odhadnout. První zkušební válec třetí skupiny, zatěžovaný do 3/4 očekávané pevnosti), praskl ve třetím zatěžovacím cyklu. Z toho důvodu byla horní hladina zatěžování snížena na 2/3 očekávané pevnosti. I tak došlo k destrukci druhého válce během cyklování (po přibližně 1300 cyklech). Zbývající tři tělesa však cyklování přečkala bez destrukce. Ve vyhodnocení tedy chybí dynamické parametry dvou válců třetí skupiny.
- Jako poslední byla zkoušena tělesa betonu **PB2**, a to v první polovině roku 2022 – konkrétně od ledna do června. Samotné zatěžování bylo prováděno v hydraulickém lisu ALPHA 3-3000 S s využitím ústředny Spider8. Tělesa byla opět rozdělena do tří skupin zatěžovaných do 1/3, 1/2 a 2/3 předpokládané pevnosti. Jediné, co se mírně lišilo, byla rychlost zatěžování. Vzhledem k vysokým pevnostem byla rychlost zatěžování zvýšena na 20 kN/s (a i tak trvalo, vzhledem k vytížení lisu i jinými experimenty, veškeré cyklování půl roku).

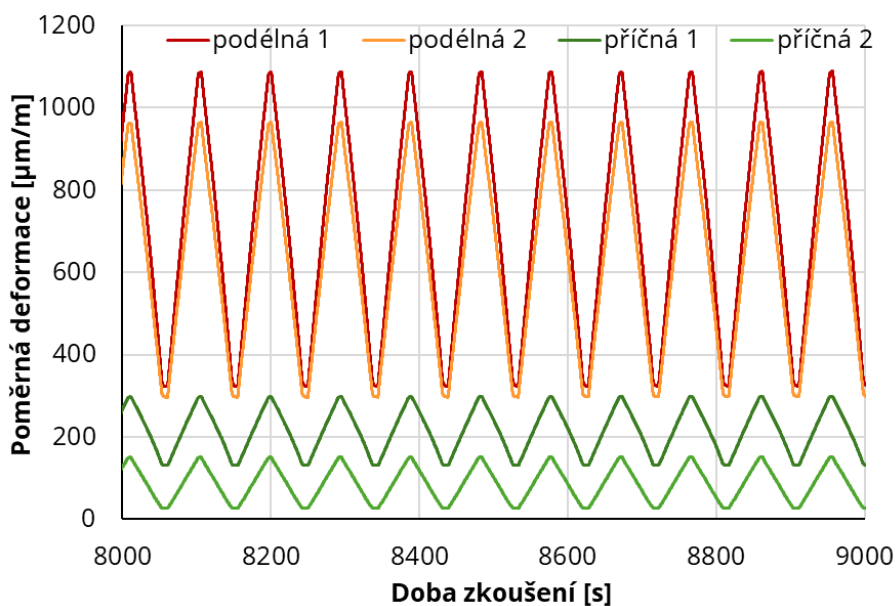
Během zkoušení všech válců obsahovala zkušební sestava také tzv. kompenzační díl, což bylo zkušební těleso, které bylo také osazeno odporovými tenzometry a na kterém také probíhalo měření deformací, ale nebylo zatěžováno. Automatickým odečítáním byla eliminována chyba měření vlivem změny teploty. I přesto je vliv střídání teplého dne a

studenějších nocí u některých výsledků patrné. Kompenzační válec byl umístěn na zemi ihned u zkušebního lisu, zatímco zkoušený válec byl pochopitelně umístěn ve zkušebním lisu. A ačkoliv byly v laboratoři zataženy okenní rolety, k určitému (byť částečnému) ovlivnění teplotou došlo, zvláště u zkušebních těles zkoušených v letních měsících.

Získaná data byla vzhledem k jejich velkému objemu zpracována v dostupném programovacím jazyku Matlab. Při vzorkovací frekvenci 5 Hz a rychlosti zatěžování, kdy jeden cyklus mohl trvat téměř 100 s, se jedná při 5000 cyklech o $5 \cdot 10^3 \times 100 \times 5$, tj. $2,5 \cdot 10^6$ řádků hodnot pro jedno zkušební těleso, přičemž jeden řádek obsahuje většinou 6 čísel (čas, síla, 4 poměrné deformace). Nejdůležitějším krokem bylo nalezení nejvhodnějšího algoritmu, jak získat hodnoty síly a poměrných deformací při aktuálním působení nejnižší a nejvyšší hladiny zatížení v průběhu každého zatěžovacího cyklu. Ukázka časového výřezu (délky 1000 sekund) působící síly během zatěžování zkušebního tělesa OB2.7 je uvedena na Obr. 23 a poměrných deformací ze stejného časového úseku na Obr. 24.

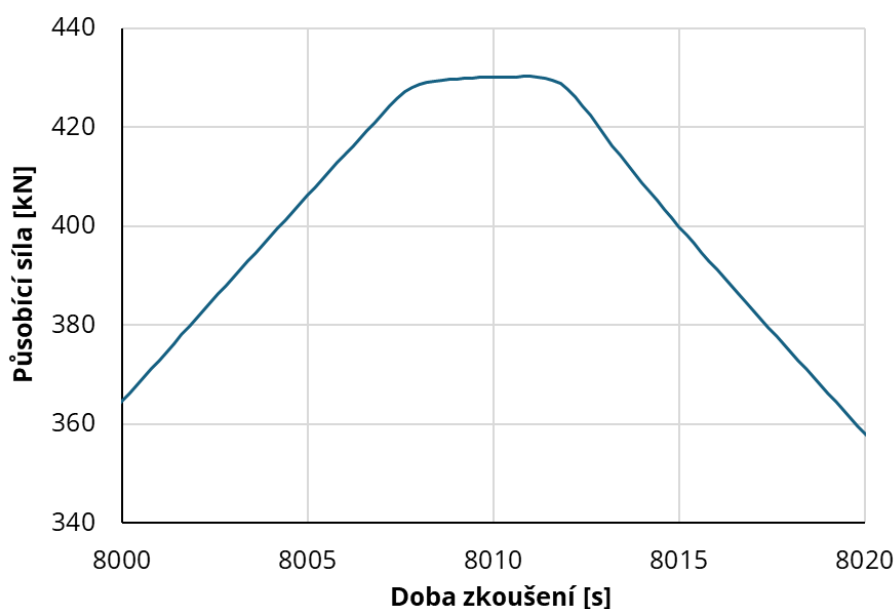


Obr. 23 Ukázka záznamu působící tlakové síly v časovém úseku 8000 až 9000 sekund zkoušení válce OB2.7

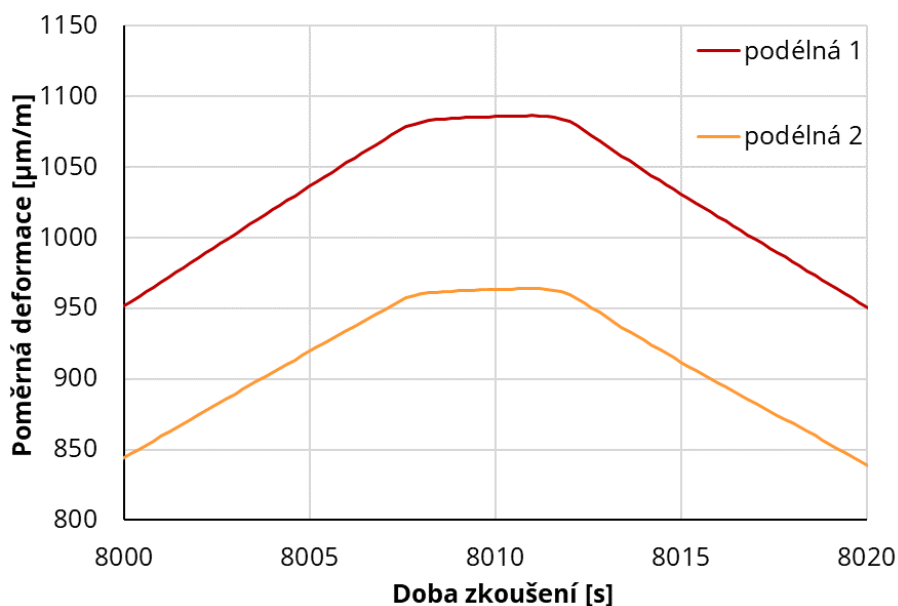


Obr. 24 Ukázka záznamu poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 9000 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace v podélném i příčném směru jsou v grafu znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné

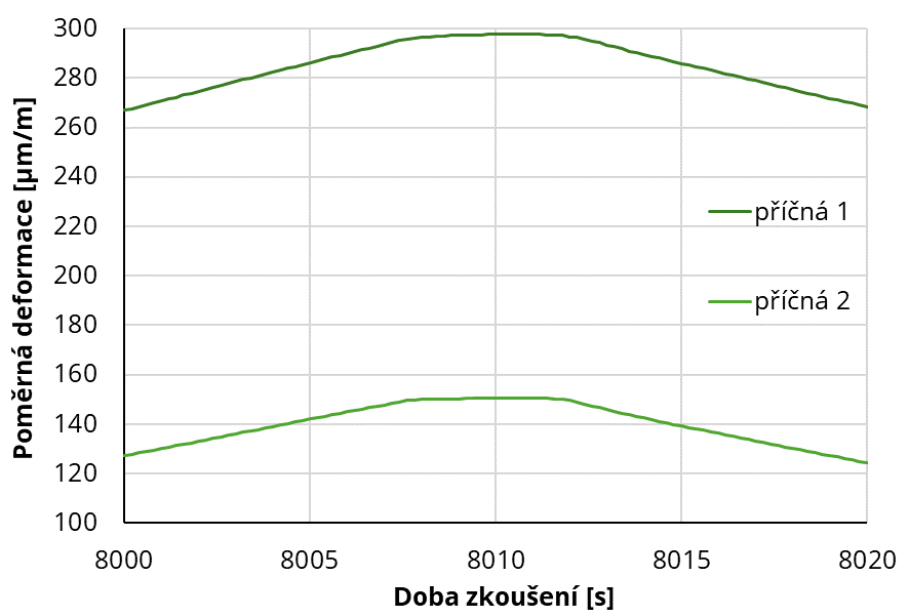
Detail záznamu působící tlakové síly v oblasti horního zatěžovacího napětí v jednom cyklu je uveden na Obr. 25, podélné poměrné deformace, získané pomocí tenzometrů 1-LY41-100/120, na Obr. 26 a příčné poměrné deformace, získané pomocí tenzometrů 1-LY41-50/120, na Obr. 27.



Obr. 25 Ukázka záznamu působící tlakové síly v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 (detail horního zatěžovacího napětí)



Obr. 26 Ukázka záznamu podélných poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné (detail horního zatěžovacího napětí)



Obr. 27 Ukázka záznamu příčných poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné (detail horního zatěžovacího napětí)

Z grafů na Obr. 25 až Obr. 27 lze vidět, že během 3 sekund, během kterých maximální síla na těleso působila, nedošlo k ustálení ani hodnot poměrných deformací, ani hodnot samotné působící síly – křivky v grafech jsou v této části mírně zaoblené. Postupně byly vyzkoušeny tyto postupy vyhodnocení:

1. na křivce byly hledány v jednom zatěžovacím cyklu tři přímky, u nichž byl koeficient korelace s křivkou nejvyšší – první přímka měla kladnou směrnici (definovala růst hodnot), druhá měla přibližně nulovou směrnici (definovala ustálení) a třetí měla zápornou směrnici (definovala pokles hodnot). Průsečíky přímek poté definovaly interval hledání maxima (či minima) na téměř vodorovné přímce – tyto hodnoty odpovídaly hledaným údajům,
2. křivky byly proloženy (aproximovány) vhodnou sinusoidou, jejíž minima a maxima odpovídala hledaným hodnotám,
3. pro aproximaci byl místo sinusoidy použit kubický spline, resp. polynom třetího řádu, přičemž hledání minim a maxim byl shodný s 2. postupem,
4. přímo na křivkách byla nalezena lokální minima a maxima, která odpovídala hledaným hodnotám.

Jako nejvhodnější se nakonec ukázal poslední zmíněný přístup – nalezení lokálních minim a maxim. Při aplikaci prvních tří postupů vyhodnocení relativně často docházelo k problémům – u některých záznamů se objevovaly chybové hlášky, které nebylo snadné řešit. Je vhodné podotknout, že hodnocení bylo prováděno na velkém kvantu reálně změřených dat, kdy experimentálně získaná data občas vykazují „neočekávané“ hodnoty. V úvahu je také nutné vzít přesnost měření a záznamu. To vše proces vyhodnocení ztěžuje. U záznamů, které bylo možné vyhodnotit všemi čtyřmi způsoby, bylo navíc zjištěno, že výstupy jednotlivých algoritmů se nijak zásadně neliší – rozdílly se pohybovaly většinou do 0,3 až 0,5 %, což je např. při modulu pružnosti v tlaku 30 GPa pouze 0,1 až 0,15 GPa. Proto byl u všech zkušebních těles použit 4. postup vyhodnocení.

Pro názornou ukázkou změny hodnot statického modulu pružnosti v tlaku a smyku byly vypočítány relativní statické moduly. Tento procentuální poměr vyjadřuje změnu hodnoty statických parametrů vlivem cyklického zatěžování a je to poměr statického modulu pružnosti v tlaku/smyku naměřeného v posledním cyklu zatěžování a stejné veličiny naměřené v prvním zatěžovacím cyklu.

$$RSMT = \frac{E_{c,po}}{E_{c,před}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

kde $RSMT$ – relativní statický modul pružnosti v tlaku v %,

$E_{c,po}$ – statický modul pružnosti v tlaku z posledního cyklu v GPa,

$E_{c,před}$ – statický modul pružnosti v tlaku z prvního cyklu v GPa.

$$RSMS = \frac{G_{c,po}}{G_{c,před}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

kde $RSMS$ – relativní statický modul pružnosti ve smyku v %,

$G_{c,po}$ – statický modul pružnosti ve smyku z posledního cyklu v GPa,

$G_{c,před}$ – statický modul pružnosti ve smyku z prvního cyklu v GPa.

4.3.3. DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Na všech zkušebních tělesech se stanovily hodnoty dynamického modulu pružnosti pomocí dvou zkušebních metod. První byla ultrazvuková impulzová metoda, při níž je ze stanovené doby průchodu ultrazvukového impulzu zkušebním tělesem vypočtena rychlost šíření ultrazvukového vlnění betonem, což je jeden ze vstupních parametrů vztahu pro výpočet dynamického modulu pružnosti E_{cu} . Druhou použitou metodou byla rezonanční metoda, kdy je modul pružnosti možné vypočítat na základě stanovených prvních vlastních frekvencí testovaných vzorků při podélném, příčném a kroutivém kmitání. Dynamické moduly pružnosti byly stanoveny podle postupů uvedeného v normách ČSN 73 1371 [109] a ČSN 73 1372 [110].

Před a po procesu cyklování byly určeny hodnoty dynamického modulu pružnosti. K tomuto účelu byla využita ultrazvuková impulzová metoda, která spočívá ve vysílání ultrazvukových impulzů do materiálu a měření času potřebného k průchodu těchto impulzů materiálem. Z měřeného průchodového času T byla dále vypočítána rychlost ultrazvukových vln ve zkoumaném materiálu v_L . Měření probíhalo vždy ve 3 nebo 5 měřicích liniích v podélné ose zkušebních válců. Výpočet dynamického modulu pružnosti byl proveden podle ČSN 73 1371 [109] následujícím způsobem:

$$E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot k^{-2}, \quad (4)$$

kde E_{cu} – dynamický modul pružnosti v MPa,

D – objemová hmotnost zkoušeného materiálu v kg/m^3 ,

v_L – rychlost šíření ultrazvuku v km/s ,

k – koeficient rozměrnosti prostředí.



Obr. 28 Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění pomocí ultrazvukové metody

Koeficient k nabývá hodnoty 1 pro jednorozměrné prostředí, zatímco pro vícerozměrné prostředí závisí na Poissonově čísle μ , které bylo určeno rezonanční metodou. Pro trojrozměrné prostředí, které v případě použití sond s pracovní frekvencí 150 kHz bylo stanoveno pro všechny zkušební válce, se koeficient rozměrnosti prostředí určí ze vztahu:

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \mu_{cu}}{(1 + \mu_{cu}) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_{cu})}}, \quad (5)$$

kde k_3 – koeficient pro trojrozměrné prostředí,

μ_{cu} – Poissonovo číslo.

Zařízení Pundit PL-200 od švýcarské společnosti Proceq bylo použito k určení dynamického modulu pružnosti. Časy průchodu impulzu T byly měřeny na každém vzorku

alespoň třikrát, s následným výpočtem průměrné rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v_L .

Dynamický modul pružnosti byl rovněž určen rezonanční metodou, pro kterou je zásadní vyvolání kmitání vzorku na pružné podložce pomocí mechanického impulsu. První vlastní frekvence podélného f_L , příčného f_f a torzního f_t kmitání byly určeny osciloskopem Handyscope HS4 se snímačem akustické emise IDK14, s využitím softwaru, který naměřené signály zpracovává na základě rychlé Fourierovy transformace. Podle ČSN 73 1372 [110] byl z těchto frekvencí vypočítán dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho, \quad (6)$$

kde E_{crL} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu v MPa,

L – délka zkoušeného tělesa v m,

f_L – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa v kHz,

ρ – objemová hmotnost betonu v kg/m^3 .

Modul pružnosti z příčného kmitání E_{crf} byl spočten takto:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot c_1 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}, \quad (7)$$

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

L – délka zkoušeného tělesa v m,

c_1 – korekční součinitel, bezrozměrný,

f_f – první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa v kHz,

ρ – objemová hmotnost betonu v kg/m^3

i – poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa v m.



Obr. 29 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušební tělesa pomocí rezonanční metody

Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} byl určen z následujícího vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho, \quad (8)$$

kde G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku v MPa,

k – součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa, bezrozměrný,

L – délka zkoušeného tělesa v m,

f_t – první vlastní frekvence krouživého kmitání zkoušeného tělesa v kHz,

ρ – objemová hmotnost betonu v kg/m^3 .

Dále byl také vypočítán relativní dynamický modul pružnosti, což je poměr dynamického modulu pružnosti naměřeného na zkušebním tělese po cyklickém zatěžování a dynamického modulu pružnosti před zatěžováním. Tento procentuální poměr vyjadřuje změnu hodnoty (většinou pokles) dynamických parametrů betonu vlivem jakéhokoliv degradačního či zatěžovacího procesu, v tomto případě cyklického zatěžování.

$$RDM_{xx} = \frac{X_{xx}}{Y_{yy}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

kde RDM_{xx} – relativní dynamický modul pro E_{cu} ; E_{crL} ; E_{crf} ; G_{cr} v %,

X_{xx} – dynamický modul pružnosti E_{cu} ; E_{crL} ; E_{crf} ; G_{cr} po zatěžování v GPa,

Y_{yy} – dynamický modul pružnosti E_{cu} ; E_{crL} ; E_{crf} ; G_{cr} před zatěžováním v GPa.

4.3.4. POISSONOVO ČÍSLO

Při zatěžování zkušebních těles byly při současném záznamu síly měřeny prostřednictvím čtyř odporových tenzometrů na každém tělese podélné a příčné deformace. Pro měření podélných přetvoření byly nalepeny na povrch zkušebních těles uprostřed výšky rovnoběžně s podélnou osou procházející středy podstav ve tvaru kruhu naproti sobě dva odporové tenzometry délky 100 mm. Pro měření příčných deformací byly nalepeny na povrch tělesa uprostřed výšky, kolmo na podélnou osu válce, dva odporové tenzometry délky 50 mm.

Z naměřených hodnot poměrných přetvoření je možné vypočítat Poissonovo číslo ze vztahu:

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_l}, \quad (10)$$

kde ν – Poissonovo číslo bezrozměrné,

ϵ_t – příčná poměrná deformace v $\mu\text{m}/\text{m}$,

ϵ_l – podélná poměrná deformace v $\mu\text{m}/\text{m}$.

Poissonovo číslo bylo také stanoveno pomocí rezonanční metody dle normy [109] z hodnot dynamických modulů pružnosti, které byly vypočteny z naměřených vlastních kmitočtů podélného a kroutivého kmitání zkušebního tělesa.

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{crL}}{G_{cr}} - 1 \right), \quad (11)$$

kde ν_{cr} – dynamické Poissonovo číslo bezrozměrné,

E_{crL} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu v MPa,

G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku v MPa.

Stejně jako byl vypočítán relativní dynamický modul pružnosti, podobně bylo vyhodnoceno relativní Poissonovo číslo z hodnot stanovených rezonanční metodou a také z výsledků měření poměrných přetvoření během cyklického zatěžování. Tento

procentuální poměr vyjadřuje změnu hodnoty Poissonova čísla vlivem cyklického zatěžování.

$$RP\check{C}D = \frac{v_{cr,X}}{v_{cr,0}} \cdot 100 \%, \quad (12)$$

kde $RP\check{C}D$ – relativní Poissonovo číslo dynamické v %,

$v_{cr,X}$ – dynamické Poissonovo číslo po zatěžování X cykly; bezrozměrné,

$v_{cr,0}$ – dynamické Poissonovo číslo před zatěžováním; bezrozměrné.

$$RP\check{C}S = \frac{v_{c,po}}{v_{c,před}} \cdot 100 \%, \quad (13)$$

kde $RP\check{C}S$ – relativní Poissonovo číslo statické v %,

$v_{c,před}$ – statické Poissonovo číslo vypočtené z poměrných deformací během prvního cyklu; bezrozměrné,

$v_{c,po}$ – statické Poissonovo číslo vypočtené z poměrných deformací během posledního cyklu; bezrozměrné.

4.4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V této kapitole jsou vyhodnocená data, nasbíraná postupy, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole. Pro lepší přehlednost a orientaci ve vyhodnocených datech budou hodnoty stanovené na zkušebních tělesech, která byla vystavena cyklickému zatěžování horní zatěžovací hladinou rovnající se předpokládané 1/3 pevnosti betonu v tlaku, označena dolním indexem 1/3 (tedy $XXY.Y_{1/3}$) a podbarvena zeleně. Tělesa, vystavena cyklickému zatěžování horní zatěžovací hladinou rovnající se 1/2 pevnosti betonu v tlaku, budou označena dolním indexem 1/2 (tedy $XXY.Y_{1/2}$) a podbarvena oranžově, a tělesa, cyklicky zatěžována do 2/3 pevnosti betonu v tlaku, budou označena dolním indexem 2/3 (tedy $XXY.Y_{2/3}$) a podbarvena modře. Zkušební tělesa, na kterých byla stanovena pouze pevnost betonu v tlaku, jsou označena $XXY.Y_{fc}$ a podbarvena šedou barvou.

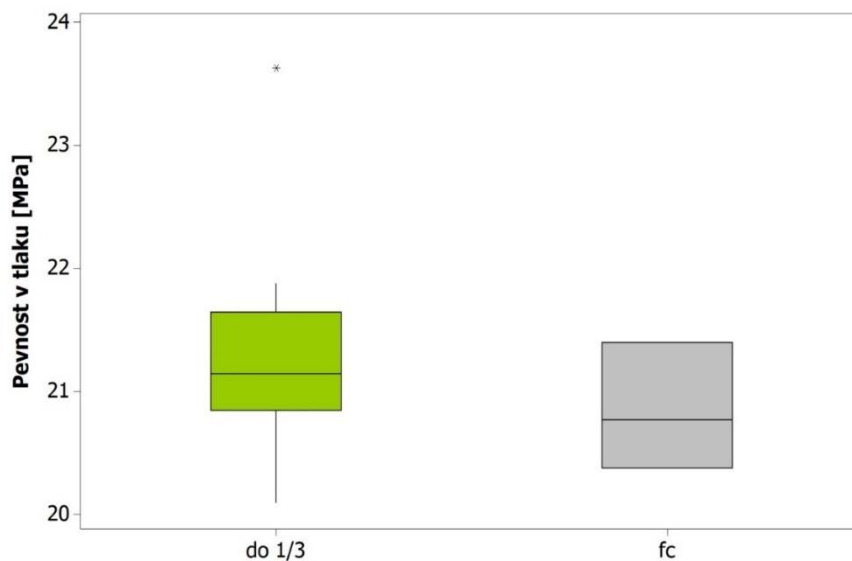
4.4.1. PEVNOST V TLAKU

Vyhodnocené pevnosti zkušebních válců v tlaku jsou v Tabulkách č. 9 až 14. V tabulkách jsou vypočítány průměrné hodnoty pevností v tlaku a směrodatná výběrová

odchylka pro jednotlivé sady zkušebních těles rozdělených podle horní zatěžovací hladiny během cyklování.

LB1

Aby bylo možné zjistit, zda statické cyklické zatěžování má významný vliv na pevnost betonu v tlaku, byla provedena podrobnější statistická analýza. U všech souborů hodnot byla nejdříve ověřena normalita na hladině významnosti 0,05 (pomocí testu Anderson-Darling). U LB1 byl následně použit dvouvýběrový t-test. Statistický test byl nastaven takovým způsobem, aby bylo možné posoudit rovnost středních hodnot výsledků zkoušek. V případě zamítnutí hypotézy lze považovat sady výsledků za statisticky významně odlišné (p -hodnota je nižší než 0,05). Výsledkem provedené statistické analýzy je závěr, že se oba soubory dat (tzn. pevnosti v tlaku zatěžovaných a pevnosti v tlaku nezatěžovaných těles) statisticky neliší na hladině významnosti 0,05 (p -hodnota = 0,30). Na Obr. 30 je uveden krabicový graf výsledků pevnosti v tlaku betonu LB1.



Obr. 30 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu LB1

Tab. 9 Pevnost betonu LB1 v tlaku

Označení	f_c [MPa]
LB1.1 _{1/3}	21,58
LB1.2 _{1/3}	21,66
LB1.3 _{1/3}	21,00
LB1.4 _{1/3}	20,92
LB1.5 _{1/3}	23,63
LB1.6 _{1/3}	21,14
LB1.7 _{1/3}	20,40
LB1.8 _{1/3}	21,31
LB1.9 _{1/3}	21,14
LB1.10 _{1/3}	21,87
LB1.11 _{1/3}	20,09
LB1.12 _{1/3}	20,82
Průměrná hodnota	21,3
Směr.výběrová odchylka	0,89
LB1.13 _{fc}	21,39
LB1.14 _{fc}	20,37
LB1.15 _{fc}	20,77
Průměrná hodnota	20,8
Směr.výběrová odchylka	0,51

Tab. 10 Pevnost betonu LB2 v tlaku

Označení	f_c [MPa]
LB2.1 _{1/3}	17,81
LB2.2 _{1/3}	19,79
LB2.3 _{1/3}	19,10
LB2.4 _{1/3}	17,03
LB2.5 _{1/3}	14,47
Průměrná hodnota	17,6
Směr.výběrová odchylka	2,07
LB2.6 _{1/2}	13,75
LB2.7 _{1/2}	14,19
LB2.8 _{1/2}	19,39
LB2.9 _{1/2}	16,68
LB2.10 _{1/2}	12,98
Průměrná hodnota	15,4
Směr.výběrová odchylka	2,63
LB2.11 _{2/3}	-
LB2.12 _{2/3}	-
LB2.13 _{2/3}	19,20
LB2.14 _{2/3}	19,15
LB2.15 _{2/3}	19,39
Průměrná hodnota	19,2
Směr.výběrová odchylka	0,13
LB2.16 _{fc}	19,62
LB2.17 _{fc}	18,53
LB2.18 _{fc}	20,02
LB2.19 _{fc}	15,78
LB2.20 _{fc}	18,28
Průměrná hodnota	18,4
Směr.výběrová odchylka	1,66

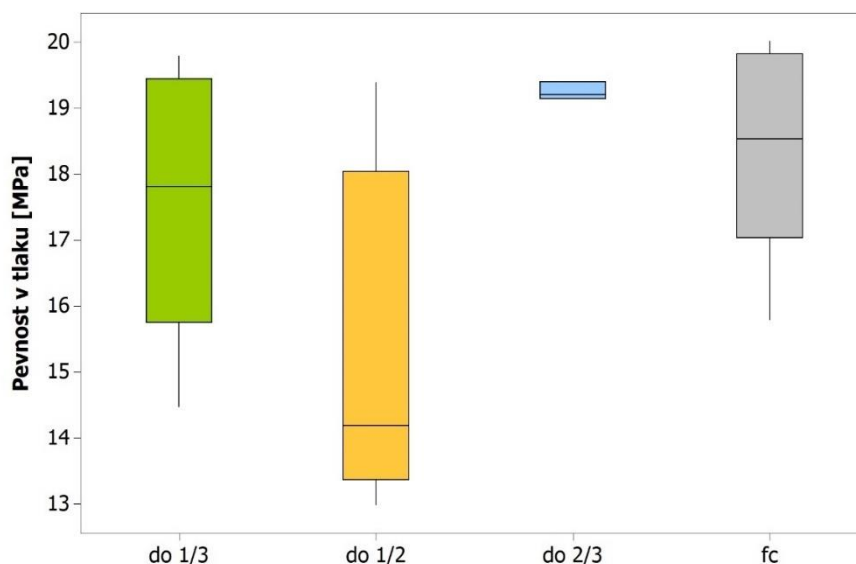
LB2

Jak bylo popsáno výše, zkušební těleso LB2.11 bylo cyklicky zatěžováno do 3/4 očekávané pevnosti, což byl původní plán, a došlo k jeho poškození po 3 cyklech. Zkušební těleso s označením LB2.12 bylo vystaveno cyklickému zatěžování horní zatěžovací

hladinou odpovídající 2/3 očekávané pevnosti, ovšem i v tomto případě došlo k jeho porušení, tentokrát po několika hodinách, přibližně po 1 300 cyklech. Proto tato dvě tělesa nefigurují v hodnocení – v Tabulce 10 je u těchto těles pomlčka.

U betonu LB2, u kterého byly porovnávány 4 soubory dat, byla použita jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA), neboť pro porovnání 4 souborů dat dohromady dvouvýběrový t-test použít nelze. Statistický test ANOVA byl opět nastaven takovým způsobem, aby bylo možné posoudit rovnost středních hodnot výsledků zkoušek. V případě zamítnutí hypotézy lze považovat sady výsledků za statisticky významně odlišné (p-hodnota je nižší než 0,05). I v tomto případě nebyla hypotéza o rovnosti středních hodnot zamítnuta (p-hodnota = 0,07), tzn. pevnost v tlaku jednotlivých souborů dat se statisticky významně neliší. Na Obr. 31 je uveden krabicový graf výsledků pevnosti v tlaku betonu LB2.

Ze stanovených hodnot pevnosti v tlaku betonů LB1 i LB2 tedy nelze vliv cyklického zatěžování na pevnost betonu v tlaku charakterizovat jako významný.

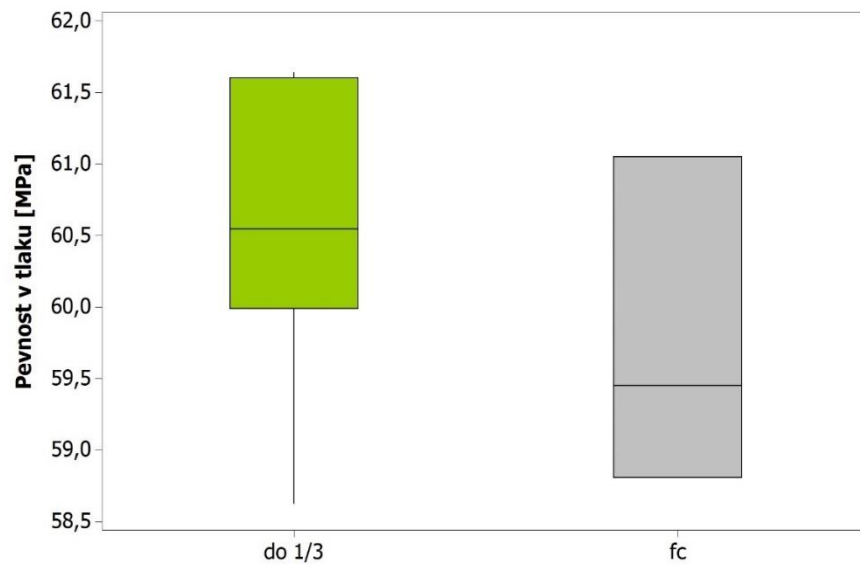


Obr. 31 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu LB2

OB1

U betonu OB1 byly pouze dva soubory dat – tělesa staticky zatěžovaná do 1/3 předpokládané pevnosti a tělesa cyklicky nezatěžovaná – proto byl za účelem porovnání

výsledků pevností v tlaku použit dvouvýběrový t-test. Nastavení testu bylo stejné jako u betonu LB1. Na základě výsledku analýzy (p -hodnota = 0,35) je možné konstatovat, že cyklické zatěžování nemá na pevnost v tlaku betonu OB1 vliv na hladině významnosti 0,05. Krabicový graf výsledků pevnosti v tlaku je uveden na Obr. 32.



Obr. 32 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu OB1

Tab. 11 Pevnost betonu OB1 v tlaku

Označení	f_c [MPa]
OB1.1 _{1/3}	61,05
OB1.2 _{1/3}	60,55
OB1.3 _{1/3}	61,58
OB1.4 _{1/3}	61,63
OB1.5 _{1/3}	60,27
OB1.6 _{1/3}	59,71
OB1.7 _{1/3}	58,62
OB1.8 _{1/3}	61,64
OB1.9 _{1/3}	60,27
Průměrná hodnota	60,6
Směr.výběrová odchylka	1,01
OB1.10 _{fc}	61,05
OB1.11 _{fc}	59,45
OB1.12 _{fc}	58,81
Průměrná hodnota	59,8
Směr.výběrová odchylka	1,16

Tab. 12 Pevnost betonu OB2 v tlaku

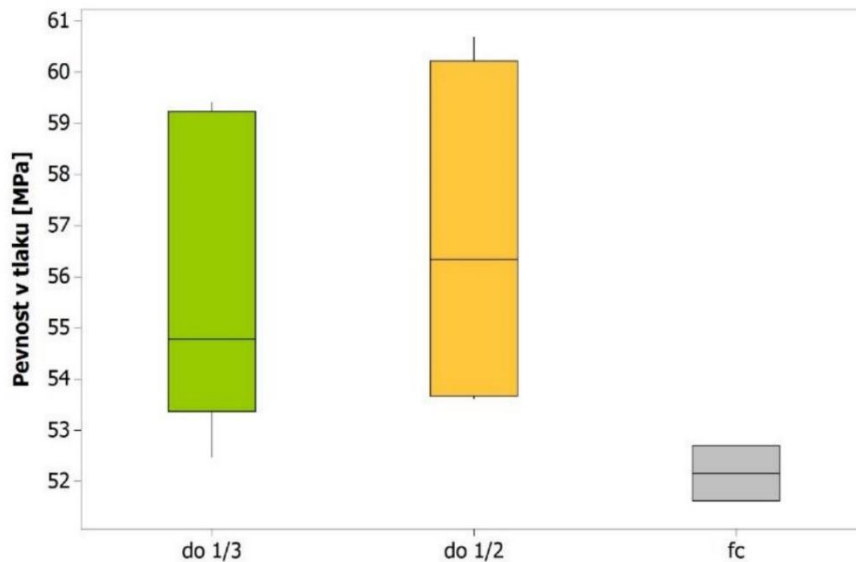
Označení	f_c [MPa]
OB2.1 _{1/3}	54,27
OB2.2 _{1/3}	52,46
OB2.3 _{1/3}	59,03
OB2.4 _{1/3}	54,78
OB2.5 _{1/3}	59,41
Průměrná hodnota	56,0
Směr.výběrová odchylka	3,07
OB2.6 _{1/2}	53,60
OB2.7 _{1/2}	53,85
OB2.8 _{1/2}	58,80
OB2.9 _{1/2}	60,68
OB2.10 _{1/2}	-
Průměrná hodnota	57,7
Směr.výběrová odchylka	3,56
OB2.11 _{fc}	51,61
OB2.12 _{fc}	52,69
Průměrná hodnota	52,2
Směr.výběrová odchylka	0,76

OB2

Jak bylo popsáno výše, zkušební těleso OB2.7 nebylo podrobeno naplánovanému počtu cyklů, neboť během odtěžování zůstal příčník zablokovaný při působící tlakové síle 142 kN. K této události došlo v pátek odpoledne, a proto síla 142 kN na zkušební těleso působila celý víkend až do pondělí, kdy byla zkouška plánovaně ukončena. Těleso OB2.7 tedy sice nebylo zatěžováno požadovaným počtem zatěžovacích cyklů, ovšem vzhledem k několikadennímu konstantnímu tlakovému zatížení o velikosti přibližně 8 MPa, a také z důvodu nevybočujících výsledků nedestruktivního testování z celé sady zkušebních těles, hodnota pevnosti v tlaku nebyla ze souboru vyřazena.

Během cyklického zatěžování zkušebního tělesa OB2.10 došlo k závadě na zkušebním lisu a rozdrčení zkušebního tělesa, proto hodnota pevnosti chybí, viz Tab. 12. Za účelem porovnání středních hodnot výsledků pevnosti jednotlivých souborů dat byla u

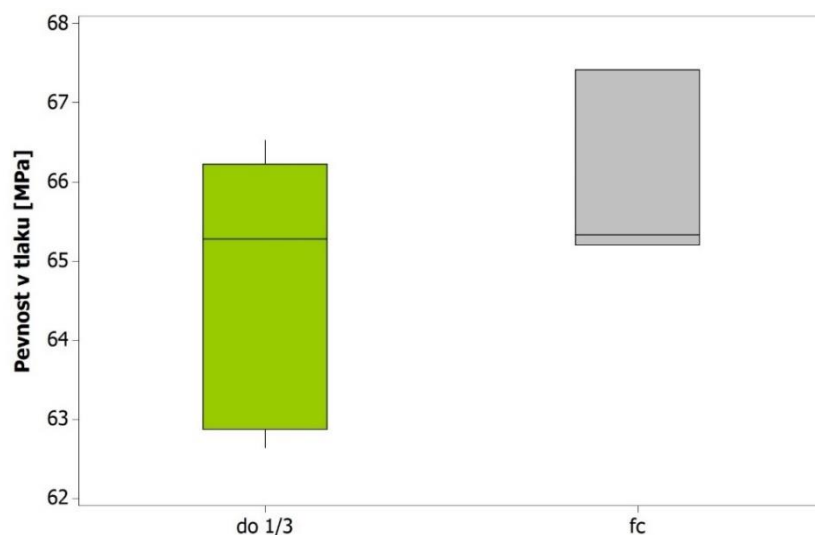
betonu OB1 provedena jednofaktorová analýza rozptylu se stejným nastavením jako u betonu LB2. Lze konstatovat, že cyklické zatěžování nemá na pevnost v tlaku betonu OB2 vliv na hladině významnosti 0,05 (p-hodnota = 0,27), a to ani při zatěžování do 1/2 očekávané pevnosti v tlaku. Na Obr. 33 je uveden krabicový graf výsledků pevnosti v tlaku betonu OB2.



Obr. 33 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu OB2

PB1

Výsledky pevnosti v tlaku zkušebních válců betonu PB1 jsou uvedeny v Tab. 13 Po provedení statistické analýzy pomocí dvouvýběrového t-testu se stejným nastavením jako u LB1 lze konstatovat, že pevnosti v tlaku zkušebních těles po cyklickém zatěžování a pevnosti v tlaku nezatěžovaných zkušebních těles se statisticky významně neliší na hladině významnosti 0,05 (p-hodnota = 0,25). Krabicový graf s pevnostmi v tlaku těles PB1 je uveden na Obr. 34.



Obr. 34 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu PB1

Tab. 13 Pevnost betonu PB1 v tlaku

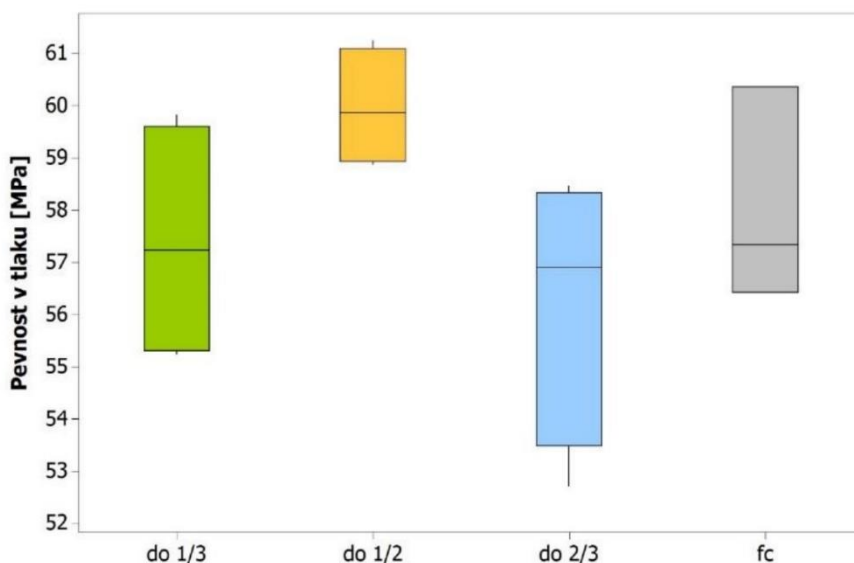
Označení	f_c [MPa]
PB1.1 _{1/3}	63,16
PB1.2 _{1/3}	62,64
PB1.3 _{1/3}	65,82
PB1.4 _{1/3}	66,52
PB1.5 _{1/3}	66,35
PB1.6 _{1/3}	62,78
PB1.7 _{1/3}	65,04
PB1.9 _{1/3}	65,51
Průměrná hodnota	64,7
Směr.výběrová odchylka	1,62
PB1.10 _{fc}	65,20
PB1.11 _{fc}	67,41
PB1.12 _{fc}	65,32
Průměrná hodnota	66,0
Směr.výběrová odchylka	1,24

Tab. 14 Pevnost betonu PB2 v tlaku

Označení	f_c [MPa]
PB2.1 _{1/3}	58,93
PB2.2 _{1/3}	55,52
PB2.3 _{1/3}	55,23
PB2.4 _{1/3}	59,82
Průměrná hodnota	57,4
Směr.výběrová odchylka	2,34
PB2.5 _{1/2}	59,11
PB2.6 _{1/2}	61,25
PB2.7 _{1/2}	58,87
PB2.8 _{1/2}	60,60
Průměrná hodnota	60,0
Směr.výběrová odchylka	1,15
PB2.9 _{2/3}	58,46
PB2.10 _{2/3}	52,69
PB2.11 _{2/3}	55,85
PB2.12 _{2/3}	57,93
Průměrná hodnota	56,2
Směr.výběrová odchylka	2,62
PB2.13 _{fc}	57,33
PB2.14 _{fc}	60,36
PB2.15 _{fc}	56,42
Průměrná hodnota	58,0
Směr.výběrová odchylka	2,06

PB2

Hodnoty pevnosti v tlaku zkušebních těles PB2, která byla podrobena 5 000 zatěžovacím cyklům na různých hladinách zatížení, jsou v Tab. 14. Pevnosti v tlaku zatěžovaných těles se významně neliší od hodnot pevností v tlaku stanovených na zkušebních tělesech, která opakovaně zatěžována nebyla, neboť výsledek jednofaktorové analýzy rozptylu je p-hodnota 0,15. Na Obr. 35 je zobrazen krabicový graf pevností v tlaku jednotlivých souborů dat betonu PB2.



Obr. 35 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu PB2

Na základě provedených zkoušek a následně provedených statistických analýz je možné říci, že statické cyklické zatěžování (v řádu jednotek tisíc cyklů) betonu v tlaku nemá statisticky významný vliv na jeho pevnost v tlaku. To platí pro všechny tři typy použitých betonů (lehký, obyčejný a provzdušněný) i pro všechny úrovně zatěžování (do 1/3, 1/2 a dokonce i do 2/3 očekávané pevnosti v tlaku).

4.4.2. DYNAMICKÉ MODULY PRUŽNOSTI

Tabulky v této kapitole, které obsahují dynamické vlastnosti betonů stanovené pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody, jsou vždy rozděleny na dvě části. Vlevo jsou uvedeny dynamické moduly pružnosti v tlaku a smyku před zatěžováním vpravo po zatěžování zkušebních těles. V tabulkách, které vždy následují, jsou uvedeny

stanovené relativní dynamické moduly vyjadřující změnu hodnoty dynamického modulu pružnosti vlivem cyklického zatěžování. Tabulky jsou doplněny o průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti i relativních dynamických modulů a také o směrodatnou výběrovou odchylku.

LB1

Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti v tlaku a smyku, stanovených na zkušebních tělesech LB1, jsou uvedeny v Tab. 15 a na první pohled nevykazují nijak zásadní změnu vlivem statického cyklického zatěžování. Po provedení statistické analýzy je však situace odlišná. U všech souborů dat byla nejdříve ověřena jejich normalita na hladině významnosti 0,05. Poté byl proveden dvouvýběrový t-test se stejným nastavením, jako je popsáno výše u pevnosti v tlaku betonu LB1. Byly porovnávány vždy střední hodnoty konkrétního dynamického parametru před a po cyklickém zatěžování zkušebních těles. Výsledkem provedených statistických testů je, že na hladině významnosti 0,05 se:

- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{cu} **liší** (p-hodnota = 0,004),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{crL} **liší** (p-hodnota = 0,006),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{crf} **liší** (p-hodnota = 0,001),
- dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} **neliší** (p-hodnota = 0,112).

S těmito závěry přesně korespondují vypočtené relativní dynamické moduly pružnosti, viz Tab. 16, které u modulů pružnosti v tahu/tlaku dosahují hodnot 94-95 % (tzn. vykazují pokles o 5 až 6 %), zatímco u modulu pružnosti ve smyku dosahují hodnot přibližně 97 % (tzn. vykazují pokles o 3 %).

Tab. 15 Dynamické moduly pružnosti betonu LB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

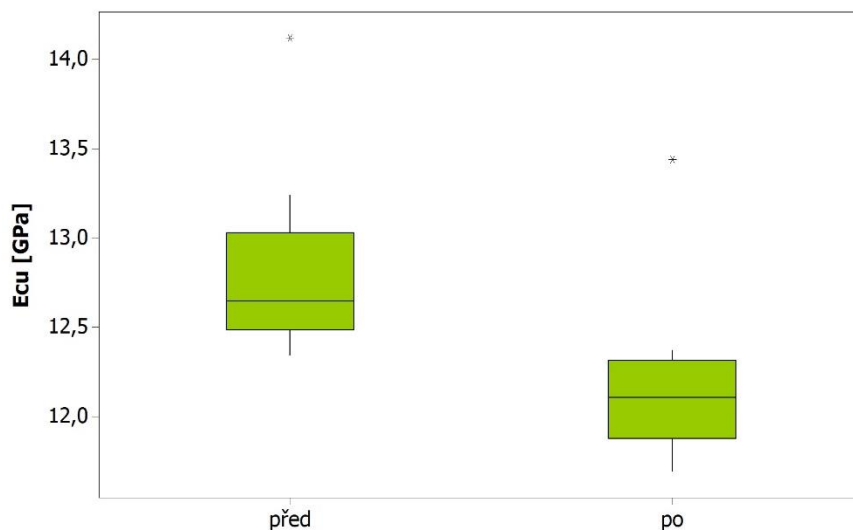
Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
LB1.1 _{1/3}	12,52	10,85	11,36	4,77
LB1.2 _{1/3}	12,93	10,73	11,15	4,71
LB1.3 _{1/3}	12,80	10,44	10,97	4,60
LB1.4 _{1/3}	12,65	10,50	10,86	4,65
LB1.5 _{1/3}	14,12	12,05	12,35	5,33
LB1.6 _{1/3}	13,06	10,80	10,99	4,69
LB1.7 _{1/3}	12,47	10,55	11,08	4,70
LB1.8 _{1/3}	12,64	10,70	11,22	4,74
LB1.9 _{1/3}	12,34	10,53	10,99	4,67
LB1.10 _{1/3}	13,24	10,95	11,54	4,82
LB1.11 _{1/3}	12,55	10,65	11,16	4,76
LB1.12 _{1/3}	12,40	10,41	10,94	4,66
Průměrná hodnota	12,8	10,8	11,2	4,8
Směr.výběrová odchylka	0,49	0,44	0,40	0,19
LB1.13 _{fc}	12,4	10,4	11,0	4,6
LB1.14 _{fc}	12,4	10,6	11,1	4,7
LB1.15 _{fc}	12,6	10,5	11,0	4,7
Průměrná hodnota	12,5	10,5	11,0	4,7
Směr.výběrová odchylka	0,1	0,1	0,1	0,0

E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
12,05	10,31	10,59	4,67
12,29	10,23	10,58	4,58
12,16	9,95	10,24	4,54
11,95	10,07	10,37	4,55
13,44	11,56	11,96	5,21
12,37	10,33	10,65	4,61
11,83	9,97	10,36	4,56
11,85	10,05	10,40	4,54
11,69	9,93	10,16	4,52
12,32	10,27	10,53	4,63
12,24	10,04	10,48	4,63
12,02	9,75	10,06	4,52
12,2	10,2	10,5	4,6
0,45	0,46	0,48	0,19

Tab. 16 Relativní dynamický modul pružnosti betonu LB1

Označení	RDM _{cu} [%]	RDM _{crL} [%]	RDM _{crf} [%]	RDM _{Gcr} [%]
LB1.1 _{1/3}	96,25	95,02	93,22	97,90
LB1.2 _{1/3}	95,05	95,34	94,89	97,24
LB1.3 _{1/3}	95,00	95,31	93,35	98,70
LB1.4 _{1/3}	94,47	95,90	95,49	97,85
LB1.5 _{1/3}	95,18	95,93	96,84	97,75
LB1.6 _{1/3}	94,72	95,65	96,91	98,29
LB1.7 _{1/3}	94,87	94,50	93,50	97,02
LB1.8 _{1/3}	93,75	93,93	92,69	95,78
LB1.9 _{1/3}	94,73	94,30	92,45	96,79
LB1.10 _{1/3}	93,05	93,79	91,25	96,06
LB1.11 _{1/3}	97,53	94,27	93,91	97,27
LB1.12 _{1/3}	96,94	93,66	91,96	97,00
Průměrná hodnota	95,1	94,8	93,9	97,3
Směr.výběrová odchyłka	1,26	0,83	1,82	0,86

Na Obr. 36 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 36 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu LB1 během statického cyklického zatěžování

LB2

Dynamické moduly pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování jsou uvedeny v Tab. 17 a relativní dynamické moduly pružnosti v Tab. 18.

Tab. 17 Dynamické moduly pružnosti betonu LB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
LB2.1 _{1/3}	16,22	13,83	13,12	5,14	14,92	12,55	11,78	4,81
LB2.2 _{1/3}	16,66	13,85	13,87	5,17	14,81	12,68	12,89	4,86
LB2.3 _{1/3}	16,22	14,01	14,23	5,37	14,56	12,91	12,57	5,04
LB2.4 _{1/3}	15,89	13,54	13,00	5,04	14,89	12,24	11,81	4,69
LB2.5 _{1/3}	16,37	14,09	13,44	5,18	15,13	12,78	12,35	4,90
Průměrná hodnota	16,3	13,9	13,5	5,2	14,9	12,6	12,3	4,9
Směr.výběrová odchylka	0,28	0,21	0,52	0,12	0,21	0,26	0,48	0,13
LB2.6 _{1/2}	16,01	13,88	13,28	5,30	14,76	12,13	11,64	4,61
LB2.7 _{1/2}	16,06	14,10	13,78	5,29	13,96	11,69	11,19	4,53
LB2.8 _{1/2}	16,30	13,83	13,75	5,26	14,61	12,25	11,39	4,68
LB2.9 _{1/2}	16,99	13,73	13,09	5,35	15,01	12,48	12,23	4,72
LB2.10 _{1/2}	16,40	13,75	13,13	5,27	14,49	11,99	11,28	4,62
Průměrná hodnota	16,4	13,9	13,4	5,3	14,6	12,1	11,5	4,6
Směr.výběrová odchylka	0,39	0,15	0,34	0,04	0,39	0,29	0,42	0,07
LB2.11 _{2/3}	15,48	14,66	14,02	5,67	-	-	-	-
LB2.12 _{2/3}	16,53	13,87	13,58	5,24	-	-	-	-
LB2.13 _{2/3}	16,80	13,61	13,29	5,15	13,65	11,54	11,11	4,32
LB2.14 _{2/3}	16,63	13,36	12,98	4,99	14,06	11,65	11,05	4,49
LB2.15 _{2/3}	16,10	13,82	13,19	5,42	14,60	12,22	11,51	4,30
Průměrná hodnota	16,3	13,9	13,4	5,3	14,1	11,8	11,2	4,4
Směr.výběrová odchylka	0,53	0,49	0,40	0,26	0,48	0,37	0,25	0,10
LB2.16 _{fc}	16,27	14,12	13,46	5,30				
LB2.17 _{fc}	15,89	12,86	11,89	4,87				
LB2.18 _{fc}	16,54	13,87	13,68	5,09				
LB2.19 _{fc}	16,85	13,48	13,23	5,10				
LB2.20 _{fc}	16,18	13,73	13,08	5,06				
Průměrná hodnota	16,3	13,6	13,1	5,1				
Směr.výběrová odchylka	0,37	0,48	0,70	0,15				

Tab. 18 Relativní dynamický modul pružnosti betonu LB2

Označení	RDM _{cu} [%]	RDM _{crL} [%]	RDM _{crf} [%]	RDM _{Gcr} [%]
LB2.1 _{1/3}	91,99	90,74	89,79	93,58
LB2.2 _{1/3}	88,90	91,55	92,93	94,00
LB2.3 _{1/3}	89,77	92,15	88,33	93,85
LB2.4 _{1/3}	93,71	90,40	90,85	93,06
LB2.5 _{1/3}	92,43	90,70	91,89	94,59
Průměrná hodnota	91,4	91,1	90,8	93,8
Směr.výběrová odchylka	1,98	0,72	1,79	0,57
LB2.6 _{1/2}	92,19	87,39	87,65	86,98
LB2.7 _{1/2}	86,92	82,91	81,20	85,63
LB2.8 _{1/2}	89,63	88,58	82,84	88,97
LB2.9 _{1/2}	88,35	90,90	93,43	88,22
LB2.10 _{1/2}	88,35	87,20	85,91	87,67
Průměrná hodnota	89,1	87,4	86,2	87,5
Směr.výběrová odchylka	1,98	2,91	4,76	1,27
LB2.11 _{2/3}	-	-	-	-
LB2.12 _{2/3}	-	-	-	-
LB2.13 _{2/3}	81,25	84,79	83,60	83,88
LB2.14 _{2/3}	84,55	87,20	85,13	89,98
LB2.15 _{2/3}	90,68	88,42	87,26	79,34
Průměrná hodnota	85,5	86,8	85,3	84,4
Směr.výběrová odchylka	4,79	1,85	1,84	5,34

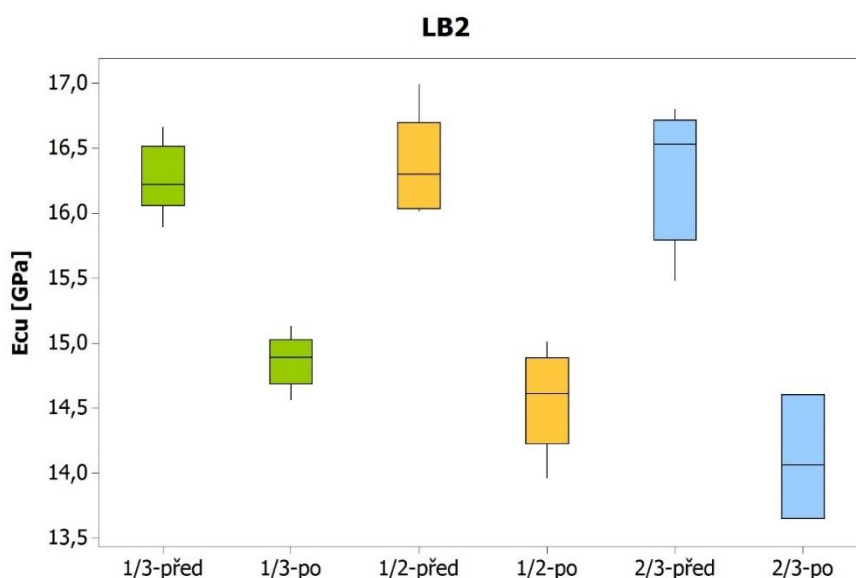
Z výsledků je patrné, že u betonu LB2 došlo k většímu poklesu sledovaných dynamických vlastností než u betonu LB1, a to i při zatěžování do 1/3 očekávané pevnosti v tlaku. RDM vykazují průměrné hodnoty 91-94 % u těles zatěžovaných do 1/3 pevnosti v tlaku, hodnoty 86-89 % u těles zatěžovaných do 1/2 pevnosti v tlaku a hodnoty přibližně 85 % u těles zatěžovaných do 2/3 pevnosti v tlaku, což značí pokles o 15 %.

I u dynamických modulů pružnosti betonu LB2 byla provedena statistická analýza. Po ověření normality souborů dat na hladině významnosti 0,05 byl opět proveden dvouvýběrový t-test, a to pro všechny úrovně zatížení. Vypočtené p-hodnoty jsou uvedeny v Tab. 19. Z výsledků je vidět, že všechny dynamické moduly pružnosti všech tří různě zatěžovaných sad zkušebních těles LB2 během statického zatěžování statisticky významně snížily.

Tab. 19 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	E_{cu}	E_{crL}	E_{crf}	G_{cr}
LB2 _{1/3}	0,000	0,000	0,005	0,005
LB2 _{1/2}	0,000	0,000	0,000	0,000
LB2 _{2/3}	0,004	0,005	0,000	0,001

Na Obr. 37 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Z grafu lze velmi dobře vidět, že čím vyšší byla hladina horního napětí při cyklickém zatěžování, tím významnější byl pokles modulu pružnosti. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 37 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu LB2 během statického cyklického zatěžování

OB1

Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti v tlaku a smyku, stanovených na zkušebních tělesech OB1, jsou uvedeny v Tab. 20. Při provedení statistické analýzy u všech souborů dat byla nejdříve ověřena jejich normalita na hladině významnosti 0,05. Poté byl proveden dvouvýběrový t-test se stejným nastavením, jako je popsáno výše. Výsledkem provedených statistických testů je, že na hladině významnosti 0,05 se:

- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{cu} **liší** (p-hodnota = 0,000),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{crL} **liší** (p-hodnota = 0,000),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{crf} **liší** (p-hodnota = 0,000),
- dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} **liší** (p-hodnota = 0,000).

S těmito závěry korespondují vypočtené relativní dynamické moduly pružnosti, viz Tab. 21, které u modulů pružnosti v tahu/tlaku dosahují hodnot 93-96 %.

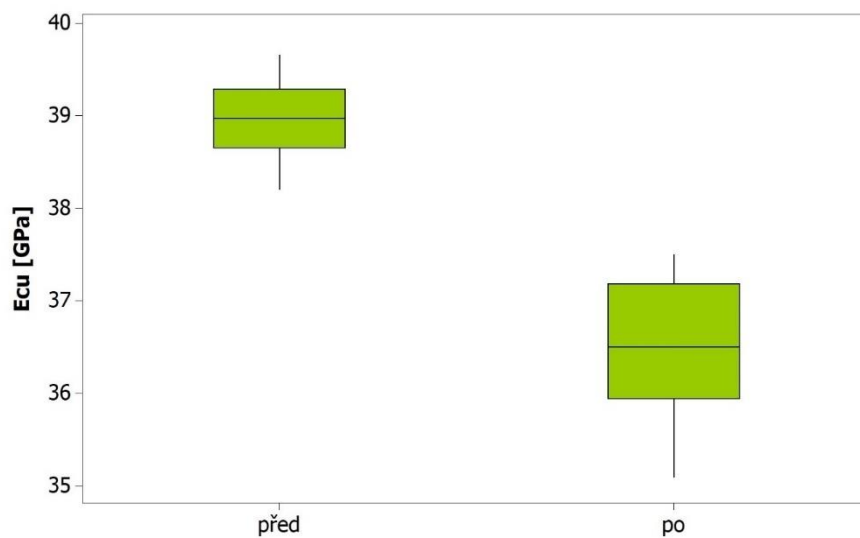
Tab. 20 Dynamické moduly pružnosti betonu OB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
OB1.1 _{1/3}	38,78	36,12	37,65	15,63	36,50	34,12	35,29	15,07
OB1.2 _{1/3}	38,52	35,55	37,20	15,38	36,23	33,43	34,32	14,80
OB1.3 _{1/3}	39,66	36,55	38,10	15,70	37,01	34,25	35,26	14,99
OB1.4 _{1/3}	39,04	36,62	37,78	15,80	37,50	34,63	36,18	15,21
OB1.5 _{1/3}	38,97	36,26	37,94	15,68	35,09	34,29	35,35	15,21
OB1.6 _{1/3}	38,82	35,93	37,65	15,46	36,20	33,84	34,83	14,89
OB1.7 _{1/3}	38,20	35,47	36,68	15,20	35,68	33,30	33,97	14,66
OB1.8 _{1/3}	39,12	36,69	38,27	15,87	36,81	34,58	35,71	15,28
OB1.9 _{1/3}	39,45	36,68	38,57	15,75	37,35	34,57	35,97	15,31
Průměrná hodnota	39,0	36,2	37,8	15,6	36,5	34,1	35,2	15,0
Směr.výběrová odchylka	0,45	0,48	0,57	0,22	0,78	0,49	0,73	0,23
OB1.10 _{fc}	38,98	36,04	37,55	15,56				
OB1.11 _{fc}	39,64	36,26	38,00	15,48				
OB1.12 _{fc}	38,63	36,09	37,24	15,50				
Průměrná hodnota	39,1	36,1	37,6	15,5				
Směr.výběrová odchylka	0,51	0,12	0,38	0,04				

Tab. 21 Relativní dynamický modul pružnosti betonu OB1

Označení	RDM _{cu} [%]	RDM _{crL} [%]	RDM _{crf} [%]	RDM _{Gcr} [%]
OB1.1 _{1/3}	94,12	94,46	93,73	96,42
OB1.2 _{1/3}	94,06	94,04	92,26	96,23
OB1.3 _{1/3}	93,32	93,71	92,55	95,48
OB1.4 _{1/3}	96,06	94,57	95,76	96,27
OB1.5 _{1/3}	90,04	94,57	93,17	97,00
OB1.6 _{1/3}	93,25	94,18	92,51	96,31
OB1.7 _{1/3}	93,40	93,88	92,61	96,45
OB1.8 _{1/3}	94,10	94,25	93,31	96,28
OB1.9 _{1/3}	94,68	94,25	93,26	97,21
Průměrná hodnota	93,7	94,2	93,2	96,4
Směr.výběrová odchylka	1,61	0,30	1,06	0,49

Na Obr. 38 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 38 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu OB1 během statického cyklického zatěžování

OB2

Dynamické moduly pružnosti stanovené pomocí ultrazvukové a rezonanční metody jsou vyhodnoceny v Tab. 22. Rozdíly mezi hodnotami dynamických modulů před a po cyklickým zatěžováním jsou výraznější při působení vyšší zatěžovací hladiny.

Tab. 22 Dynamické moduly pružnosti betonu OB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
OB2.1 _{1/3}	36,06	32,33	32,52	13,49
OB2.2 _{1/3}	38,26	33,80	34,58	13,91
OB2.3 _{1/3}	39,71	35,09	35,44	14,33
OB2.4 _{1/3}	38,58	34,37	35,14	14,15
OB2.5 _{1/3}	39,75	35,49	35,99	14,71
Průměrná hodnota	38,5	34,2	34,7	14,1
Směr.výběrová odchylka	1,50	1,24	1,34	0,46
OB2.6 _{1/2}	37,73	33,33	33,41	13,81
OB2.7 _{1/2}	37,97	33,49	34,16	13,77
OB2.8 _{1/2}	39,15	35,01	35,43	14,44
OB2.9 _{1/2}	40,51	36,12	37,02	14,96
OB2.10 _{1/2}	40,01	35,90	36,67	14,82
Průměrná hodnota	39,1	34,8	35,3	14,4
Směr.výběrová odchylka	1,22	1,31	1,56	0,55
OB2.11 _{fc}	36,17	32,65	33,39	13,75
OB2.12 _{fc}	37,26	32,75	32,56	13,75
Průměrná hodnota	36,7	32,7	33,0	13,8
Směr.výběrová odchylka	0,77	0,07	0,59	0,00

E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
34,92	30,49	30,34	12,93
36,75	32,32	32,67	13,45
38,59	33,67	33,62	14,00
37,13	33,12	34,00	13,71
38,82	34,21	34,58	14,37
37,2	32,8	33,0	13,7
1,58	1,45	1,66	0,55
34,53	30,16	29,61	12,86
34,78	30,69	30,89	13,04
36,87	32,49	32,14	13,71
37,99	33,69	34,38	14,32
-	-	-	-
36,0	31,8	31,8	13,5
1,67	1,63	2,03	0,67

Tab. 23 Relativní dynamický modul pružnosti betonu OB2

Označení	RDM _{cu} [%]	RDM _{crL} [%]	RDM _{crf} [%]	RDM _{Gcr} [%]
OB2.1 _{1/3}	96,84	94,31	93,30	95,85
OB2.2 _{1/3}	96,05	95,62	94,48	96,69
OB2.3 _{1/3}	97,18	95,95	94,86	97,70
OB2.4 _{1/3}	96,24	96,36	96,76	96,89
OB2.5 _{1/3}	97,66	96,39	96,08	97,69
Průměrná hodnota	96,8	95,7	95,1	97,0
Směr.výběrová odchylka	0,66	0,85	1,36	0,77
OB2.6 _{1/2}	91,52	90,49	88,63	93,12
OB2.7 _{1/2}	91,60	91,64	90,43	94,70
OB2.8 _{1/2}	94,18	92,80	90,71	94,94
OB2.9 _{1/2}	93,78	93,27	92,87	95,72
OB2.10 _{1/2}				
Průměrná hodnota	92,8	92,1	90,7	94,6
Směr.výběrová odchylka	1,41	1,25	1,74	1,09

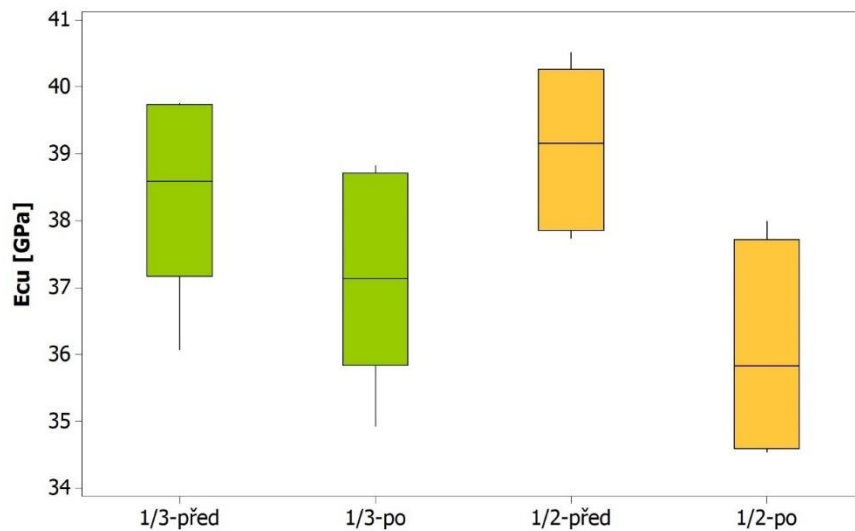
Z výsledků je patrné, že u betonu OB2 došlo k menšímu poklesu sledovaných dynamických vlastností než u betonu OB1 při zatěžování do 1/3 očekávané pevnosti v tlaku. RDM vykazují průměrné hodnoty 95-97 % u těles zatěžovaných do 1/3 pevnosti v tlaku a hodnoty 91-95 % u těles zatěžovaných do 1/2 pevnosti v tlaku.

Také u dynamických modulů pružnosti betonu OB2 byla provedena statistická analýza. Po ověření normality souborů dat na hladině významnosti 0,05 byl opět proveden dvouvýběrový t-test, a to pro obě úrovně zatížení. Vypočtené p-hodnoty jsou uvedeny v Tab. 24. Z výsledků je vidět, že dynamické moduly pružnosti sady zatěžované na hladině 1/3 očekávané pevnosti se statisticky významně nesnížily a sada zatěžována hladinou 1/2 očekávané pevnosti vykazuje snížení pouze u dvou dynamických modulu pružnosti ze čtyř, konkrétně u modulů pružnosti v tlaku E_{cu} a E_{crL} .

Tab. 24 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu OB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	E_{cu}	E_{crL}	E_{crf}	G_{cr}
OB2 _{1/3}	0,247	0,132	0,120	0,223
OB2 _{1/2}	0,029	0,030	0,160	0,089

Na Obr. 39 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Z grafu lze velmi dobře vidět, že vyšší hladina horního napětí při cyklickém zatěžování způsobila významnější pokles modulu pružnosti. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 39 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu OB2 během statického cyklického zatěžování

PB1

Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti v tlaku a smyku, stanovených na zkušebních tělesech PB1, jsou uvedeny v Tab. 25. Při provedení statistické analýzy u všech souborů dat byla nejdříve ověřena jejich normalita na hladině významnosti 0,05. Poté byl proveden dvouvýběrový t-test se stejným nastavením, jako je popsáno výše. Byly porovnávány vždy střední hodnoty konkrétního dynamického parametru před a po cyklickém zatěžování zkušebních těles. Výsledkem provedených statistických testů je, že na hladině významnosti 0,05 se:

- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{cu} **liší** (p-hodnota = 0,000),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{ctl} **liší** (p-hodnota = 0,000),
- dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku E_{crf} **liší** (p-hodnota = 0,046),

- dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} liší (p-hodnota = 0,006).

Tyto závěry potvrzují také relativní dynamické moduly pružnosti, viz Tab. 26, které u modulů pružnosti v tahu/tlaku dosahují hodnot 93-96 %.

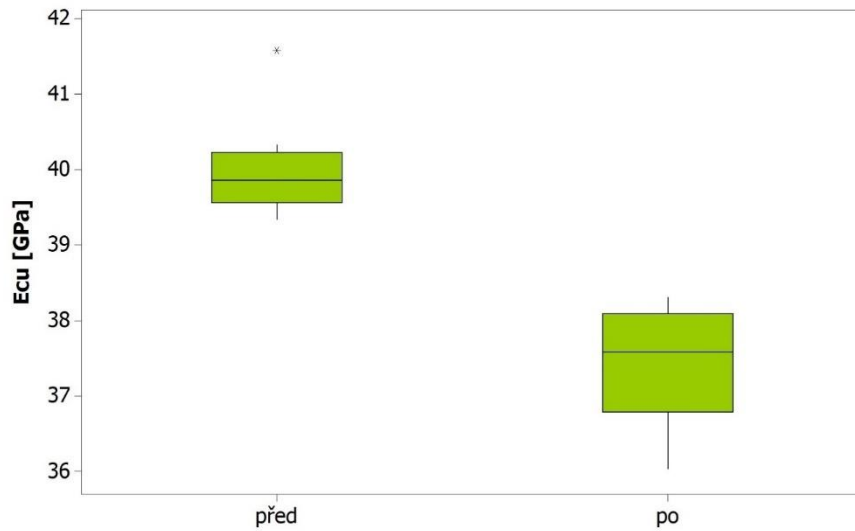
Tab. 25 Dynamické moduly pružnosti betonu PB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
PB1.1 _{1/3}	39,82	35,03	36,43	15,07	36,57	31,93	33,33	14,34
PB1.2 _{1/3}	40,33	35,60	37,18	15,12	36,03	31,46	32,56	13,69
PB1.3 _{1/3}	41,58	35,62	37,13	15,21	37,66	33,89	35,04	14,86
PB1.4 _{1/3}	39,74	36,10	37,72	15,52	38,31	34,48	35,61	15,16
PB1.5 _{1/3}	39,89	35,58	37,09	15,35	38,23	33,88	35,26	14,82
PB1.6 _{1/3}	39,33	34,94	36,57	14,97	37,42	33,22	34,28	14,55
PB1.7 _{1/3}	39,90	35,22	36,82	15,16	37,61	33,41	34,86	14,78
PB1.9 _{1/3}	39,50	35,46	36,74	15,32	37,55	33,61	35,14	14,73
Průměrná hodnota	40,0	35,4	37,0	15,2	37,4	33,2	34,5	14,6
Směr.výběrová odchylka	0,70	0,37	0,41	0,18	0,78	1,03	1,06	0,44
PB1.10 _{fc}	40,07	35,62	37,39	15,10				
PB1.11 _{fc}	40,32	36,33	37,69	15,53				
PB1.12 _{fc}	39,37	35,09	36,17	15,14				
Průměrná hodnota	39,9	35,7	37,1	15,3				
Směr.výběrová odchylka	0,49	0,62	0,81	0,24				

Tab. 26 Relativní dynamický modul pružnosti betonu PB1

Označení	RDM_{cu} [%]	RDM_{crL} [%]	RDM_{crf} [%]	RDM_{Gcr} [%]
PB1.1 _{1/3}	91,84	91,15	91,49	95,16
PB1.2 _{1/3}	89,34	88,37	87,57	90,54
PB1.3 _{1/3}	90,57	95,14	94,37	97,70
PB1.4 _{1/3}	96,40	95,51	94,41	97,68
PB1.5 _{1/3}	95,84	95,22	95,07	96,55
PB1.6 _{1/3}	95,14	95,08	93,74	97,19
PB1.7 _{1/3}	94,26	94,86	94,68	97,49
PB1.9 _{1/3}	95,06	94,78	95,65	96,15
Průměrná hodnota	93,6	93,8	93,4	96,1
Směr.výběrová odchylka	2,63	2,59	2,65	2,40

Na Obr. 40 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 40 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu PB1 během statického cyklického zatěžování

PB2

Dynamické moduly pružnosti betonu PB2 před a po zatěžování jsou uvedeny v Tab. 27 a relativní dynamické moduly pružnosti v Tab. 28.

Tab. 27 Dynamické moduly pružnosti betonu PB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo)

Označení	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
PB2.1 _{1/3}	40,91	37,16	38,06	15,78	37,38	33,56	34,22	14,61
PB2.2 _{1/3}	40,81	36,95	38,38	15,79	36,96	33,44	34,14	14,67
PB2.3 _{1/3}	39,37	37,73	38,72	16,28	37,54	33,89	34,11	14,99
PB2.4 _{1/3}	40,96	37,76	38,99	16,24	37,91	33,98	34,39	15,09
Průměrná hodnota	40,5	37,4	38,5	16,0	37,4	33,7	34,2	14,8
Směr.výběrová odchylka	0,76	0,41	0,40	0,27	0,39	0,26	0,13	0,24
PB2.5 _{1/2}	40,78	37,22	38,13	15,95	33,26	32,34	33,10	14,17
PB2.6 _{1/2}	41,34	37,70	38,50	16,16	33,59	32,58	33,41	14,42
PB2.7 _{1/2}	40,15	36,48	37,37	15,59	33,04	31,56	31,88	13,78
PB2.8 _{1/2}	40,50	38,57	39,80	16,73	34,60	33,25	34,41	14,94
Průměrná hodnota	40,7	37,5	38,5	16,1	33,6	32,4	33,2	14,3
Směr.výběrová odchylka	0,50	0,88	1,02	0,48	0,69	0,70	1,04	0,49
PB2.9 _{2/3}	40,59	37,46	38,42	15,88	29,87	29,12	30,72	12,37
PB2.10 _{2/3}	41,89	38,19	38,82	16,56	31,19	28,46	30,96	11,63
PB2.11 _{2/3}	40,10	37,09	37,80	15,98	31,58	28,79	31,14	11,72
PB2.12 _{2/3}	39,60	37,20	38,11	16,08	31,79	29,27	31,08	12,13
Průměrná hodnota	40,5	37,5	38,3	16,1	31,1	28,9	31,0	12,0
Směr.výběrová odchylka	0,98	0,49	0,44	0,30	0,86	0,36	0,19	0,35
PB2.13 _{fc}	39,15	36,44	37,43	15,78				
PB2.14 _{fc}	41,64	38,69	39,82	16,66				
PB2.15 _{fc}	40,36	37,05	38,53	15,88				
Průměrná hodnota	40,4	37,4	38,6	16,1				
Směr.výběrová odchylka	1,25	1,16	1,20	0,48				

Tab. 28 Relativní dynamický modul pružnosti betonu PB2

Označení	RDM _{cu} [%]	RDM _{crL} [%]	RDM _{crf} [%]	RDM _{Gcr} [%]
PB2.1 _{1/3}	91,37	90,31	89,91	92,59
PB2.2 _{1/3}	90,57	90,50	88,95	92,91
PB2.3 _{1/3}	95,35	89,82	88,09	92,08
PB2.4 _{1/3}	92,55	89,99	88,20	92,92
Průměrná hodnota	92,5	90,2	88,8	92,6
Směr.výběrová odchylka	2,09	0,31	0,84	0,40
PB2.5 _{1/2}	81,56	86,89	86,81	88,84
PB2.6 _{1/2}	81,25	86,42	86,78	89,23
PB2.7 _{1/2}	82,29	86,51	85,31	88,39
PB2.8 _{1/2}	85,43	86,21	86,46	89,30
Průměrná hodnota	82,6	86,5	86,3	88,9
Směr.výběrová odchylka	1,92	0,28	0,70	0,42
PB2.9 _{2/3}	73,59	77,74	79,96	77,90
PB2.10 _{2/3}	74,46	74,52	79,75	70,23
PB2.11 _{2/3}	78,75	77,62	82,38	73,34
PB2.12 _{2/3}	80,28	78,68	81,55	75,44
Průměrná hodnota	76,8	77,1	80,9	74,2
Směr.výběrová odchylka	3,25	1,81	1,27	3,25

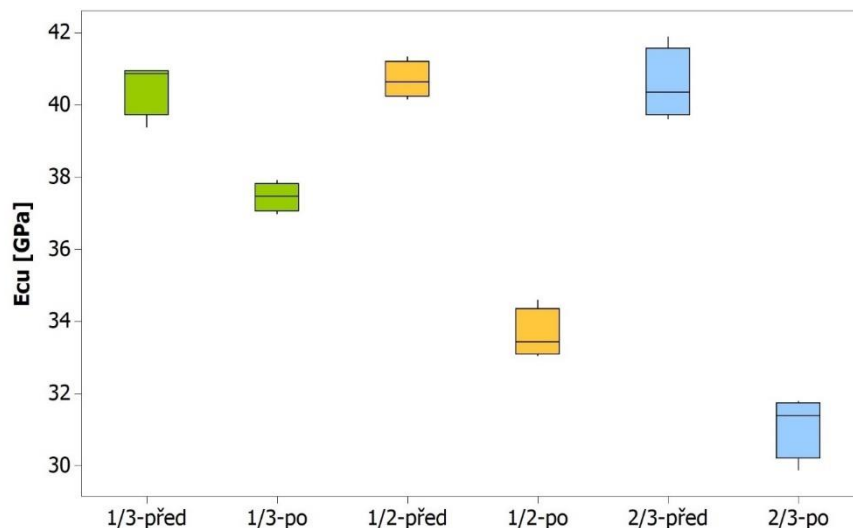
Z výsledků je patrné, že u betonu PB2 došlo k většímu poklesu sledovaných dynamických vlastností než u betonu PB1, a to i při zatěžování do 1/3 očekávané pevnosti v tlaku. RDM vykazují průměrné hodnoty 89-93 % u těles zatěžovaných do 1/3 pevnosti v tlaku, hodnoty 83-89 % u těles zatěžovaných do 1/2 pevnosti v tlaku a hodnoty (pouze) 74-81 % u těles zatěžovaných do 2/3 pevnosti v tlaku, což značí pokles o více jak 20 %.

I u dynamických modulů pružnosti betonu PB2 byla provedena statistická analýza. Po ověření normality souborů dat na hladině významnosti 0,05 byl opět proveden dvouvýběrový t-test, a to pro všechny úrovně zatížení. Vypočtené p-hodnoty jsou uvedeny v Tab. 29. Z výsledků je vidět, že všechny dynamické moduly pružnosti všech tří různě zatěžovaných sad zkušebních těles PB2 během statického zatěžování statisticky významně snížily.

Tab. 29 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu PB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	E_{cu}	E_{crL}	E_{crf}	G_{cr}
PB2 _{1/3}	0,002	0,000	0,000	0,001
PB2 _{1/2}	0,000	0,000	0,010	0,030
PB2 _{2/3}	0,000	0,000	0,000	0,000

Na Obr. 41 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cu} před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Z grafu lze velmi dobře vidět, že čím vyšší byla hladina horního napětí při cyklickém zatěžování, tím významnější byl pokles modulu pružnosti. Krabicové grafy ostatních dynamických modulů pružnosti jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 41 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu PB2 během statického cyklického zatěžování

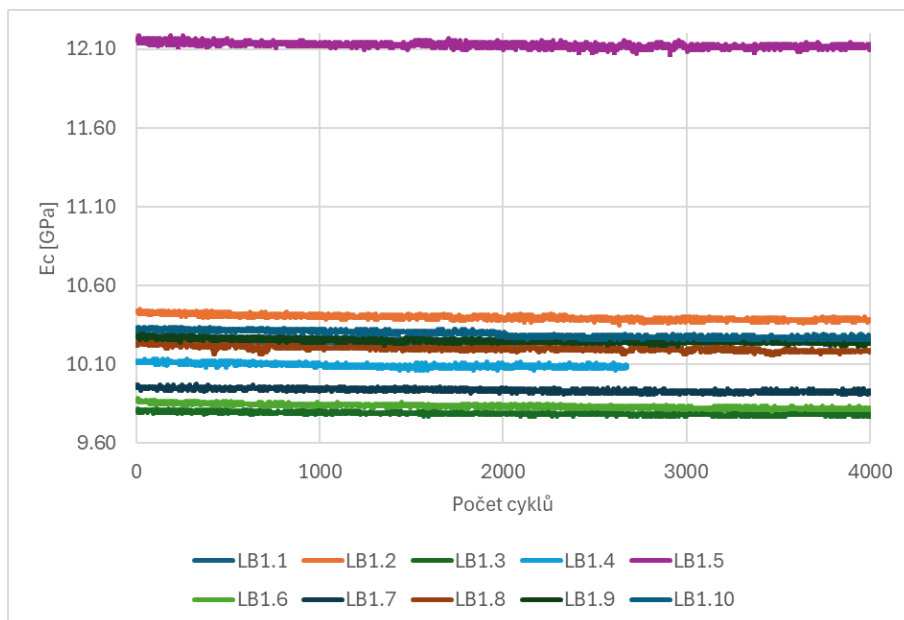
4.4.3. STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI V TLAKU

Statické moduly pružnosti v tlaku vyhodnocené z každého zatěžovacího cyklu pro jednotlivé druhy betonů jsou v grafech na následujících stranách. V grafech jsou také vyneseny hodnoty statického modulu pružnosti ve smyku pro jednotlivé druhy betonu. Dále jsou v této kapitole zobrazeny průběhy hodnot statických modulů během prvních 30 cyklů, kdy v některých případech docházelo ke změnám hodnot těchto parametrů.

LB1

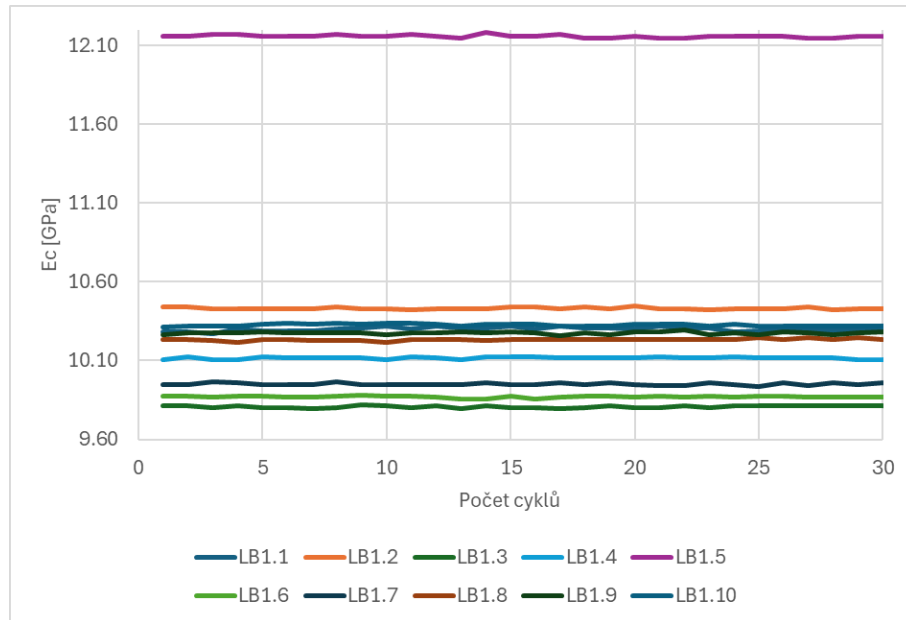
Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku v průběhu cyklování jsou v Obr. 42. Z grafu je patrné, že těleso LB1.4 bylo podrobena necelým 3000 cyklům a zbytek měření z důvodu chybného záznamu měření nebylo možné zpracovat. Zbylá zkušební tělesa byla podrobena 4000 cyklům a lze říci, že stanovené hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku jsou konstantní a nedochází k výrazné změně vlivem cyklického zatěžování. Dále je zřetelná výrazně vyšší hodnota statického modulu pružnosti v tlaku zkušební tělesa LB1.5, které vykazovalo i vyšší hodnoty dynamických modulů pružnosti i objemové hmotnosti a tento jev je pravděpodobně způsoben větší mírou zhutnění (ačkoliv všechna tělesa byla hutněna jedním člověkem a stejným způsobem).

Jak bylo uvedeno dříve, zkušební tělesa LB1.11 a LB1.12 byla cyklicky zatěžována o dva až tři měsíce později než prvních deset zkušebních válců. Během zatěžování u těchto dvou válců postupně začalo docházet k zvyšování hodnot poměrných deformací při spodní hladině zatížení, aniž by došlo ke zvýšení hodnot poměrných deformací při horní hladině zatížení. Výsledkem byly zcela nereálné hodnoty dynamických modulů pružnosti, viz grafy v příloze práce, a proto nebyla tato dvě tělesa do hodnocení zahrnuta.



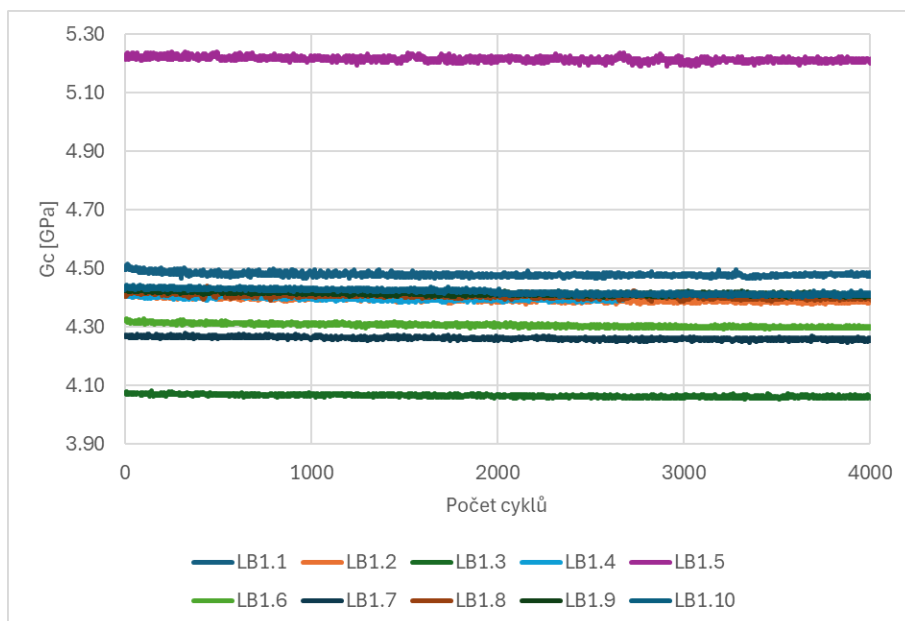
Obr. 42 Statický modul pružnosti v tlaku LB1

Obr. 43 vykresluje prvních 30 zatěžovacích cyklů, kde taktéž nelze pozorovat významnou změnu hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku zkušebních těles betonu LB1.



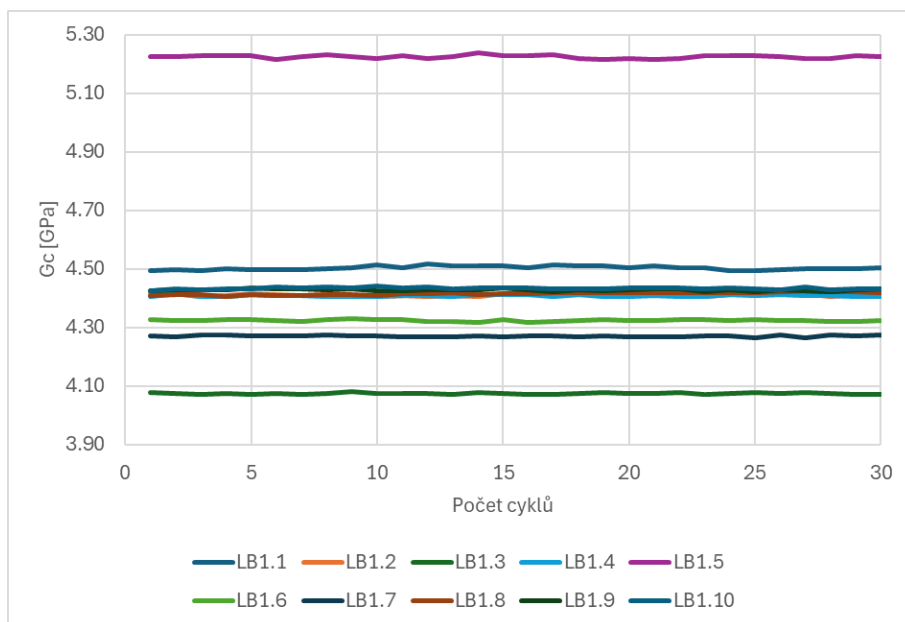
Obr. 43 Statický modul pružnosti v tlaku LB1

Hodnota statického modulu pružnosti betonu LB1 ve smyku během cyklického zatěžování je v Obr. 44. Stejně jako hodnoty modulu pružnosti v tlaku ani smykový modul pružnosti nevykazuje klesající nebo stoupající trend a tak lze říci, že statické zatěžování v dané hladině zatížení během 4000 cyklů nemělo na hodnotu modulu pružnosti ve smyku betonu LB1 významný vliv. To je potvrzeno i dále prezentovanou statistickou analýzou.



Obr. 44 Statický modul pružnosti ve smyku LB1

Hodnoty statického modulu pružnosti ve smyku betonu LB1 během prvních 30 zatěžovacích cyklů jsou vykresleny v Obr. 45. Z grafu lze pozorovat konstantní průběh hodnoty modulu pružnosti.



Obr. 45 Statický modul pružnosti ve smyku LB1 prvních 30 zatěžovacích cyklů

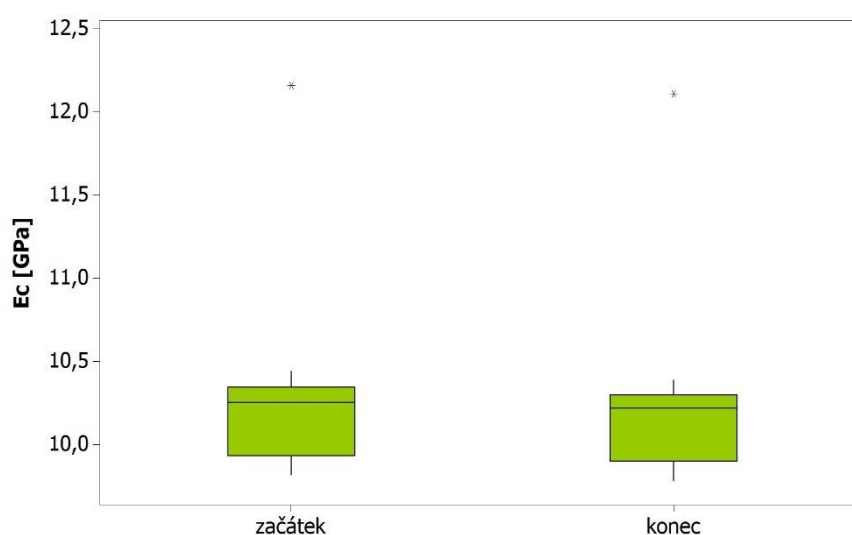
V Tab. 30 jsou vyhodnoceny relativní statické moduly pružnosti, které svou hodnotou nenaznačují významnou změnu statických modulů pružnosti v tlaku a smyku betonu LB1. Při provedení statistické analýzy u všech souborů dat byla nejdříve ověřena jejich normalita na hladině významnosti 0,05. Poté byl proveden dvouvýběrový t-test se stejným nastavením, jako je popsáno výše. Výsledkem provedených statistických testů je, že na hladině významnosti 0,05 se:

- statický modul pružnosti v tahu/tlaku E_c **neliší** (p-hodnota = 0,734),
- statický modul pružnosti ve smyku G_c **neliší** (p-hodnota = 0,795),

Tab. 30 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku v 1. a posledním cyklu, RSMT a RSMS betonu LB1

Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]	$G_{c,před}$ [GPa]	$G_{c,po}$ [GPa]	RSMS [%]
LB1.1 _{1/3}	10,28	10,25	99,65	4,49	4,48	99,62
LB1.2 _{1/3}	10,44	10,39	99,47	4,42	4,40	99,56
LB1.3 _{1/3}	9,81	9,78	99,67	4,08	4,06	99,52
LB1.4 _{1/3}	10,11	10,09	99,83	4,41	4,40	99,92
LB1.5 _{1/3}	12,16	12,11	99,59	5,22	5,20	99,56
LB1.6 _{1/3}	9,87	9,82	99,42	4,33	4,30	99,35
LB1.7 _{1/3}	9,95	9,93	99,75	4,27	4,26	99,64
LB1.8 _{1/3}	10,24	10,18	99,48	4,41	4,40	99,85
LB1.9 _{1/3}	10,27	10,25	99,83	4,43	4,42	99,78
LB1.10 _{1/3}	10,31	10,27	99,56	4,43	4,41	99,55
LB1.11 _{1/3}	-	-	-	-	-	-
LB1.12 _{1/3}	-	-	-	-	-	-
Průměrná hodnota	10,3	10,3	99,6	4,4	4,4	99,6
Směr.výběrová odchylka	0,67	0,67	0,15	0,30	0,30	0,17

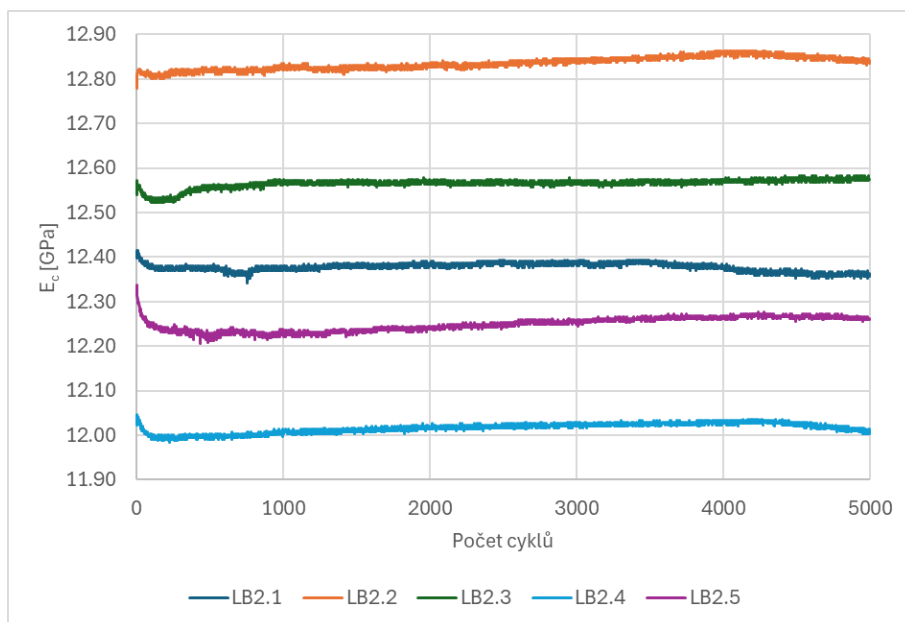
Na Obr. 46 je zobrazen krabicový graf hodnot statického modulu pružnosti E_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf statického modulu pružnosti ve smyku je v příloze této práce.



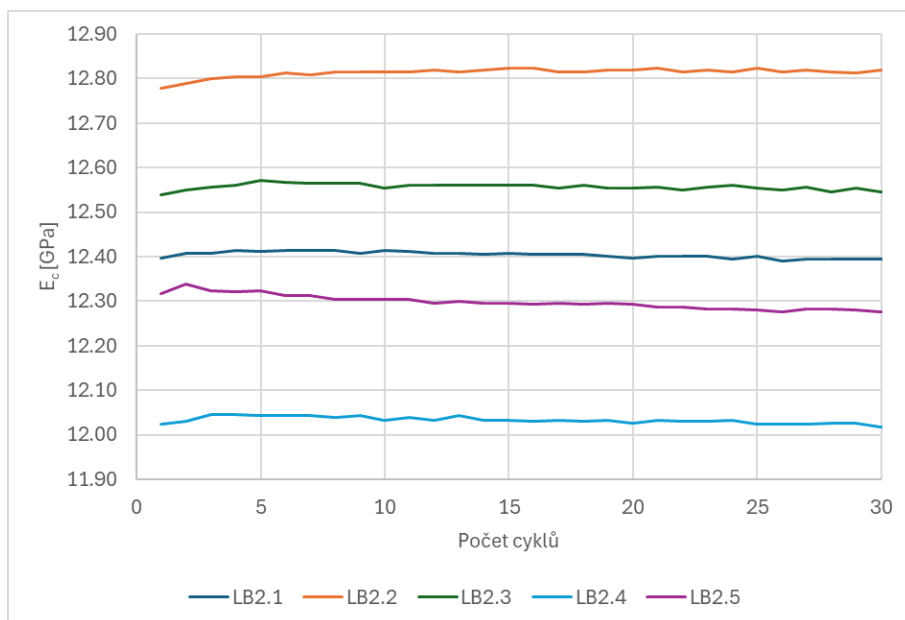
Obr. 46 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu LB1 během statického cyklického zatěžování

LB2

V Obr. 47-52 lze pozorovat vývoj hodnot statického modulu pružnosti v tlaku. Pro lepší názornost a přehlednost jsou grafy rozděleny podle horní hladiny zatížení.

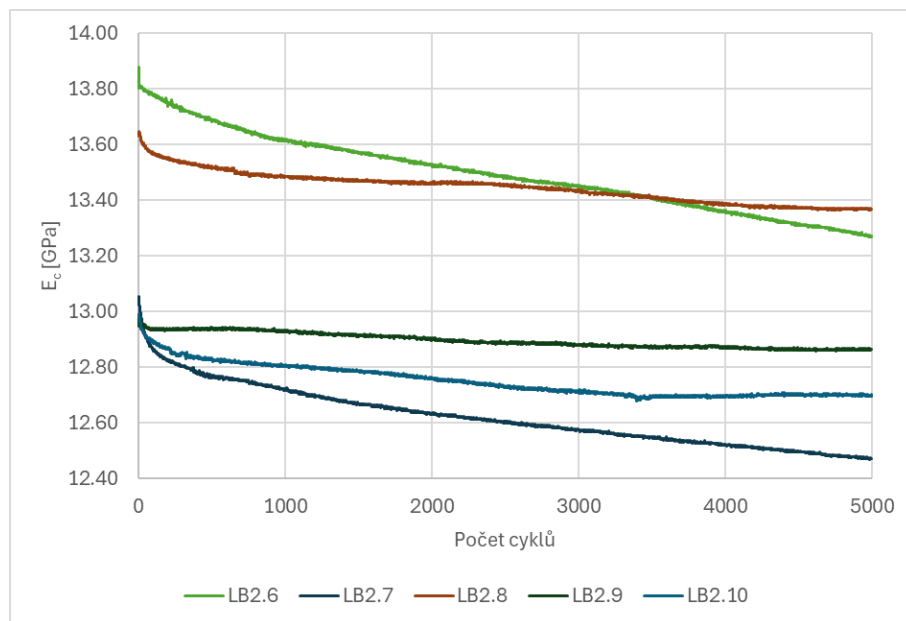


Obr. 47 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

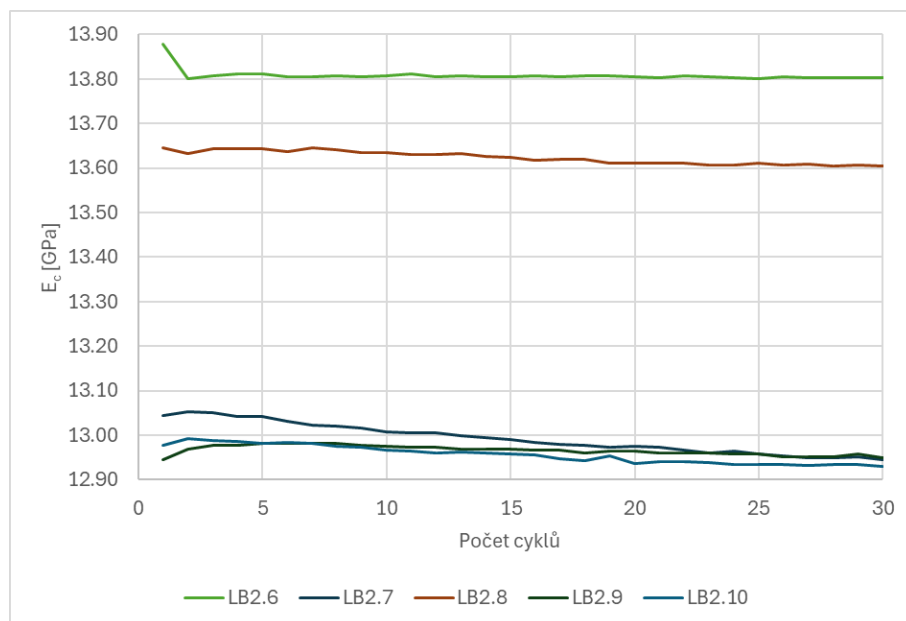


Obr. 48 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , 30 zatěžovacích cyklů

V Obr. 49 jsou statické moduly pružnosti s horní zatěžovací hladinou odpovídající 1/2 očekávané pevnosti betonu v tlaku.



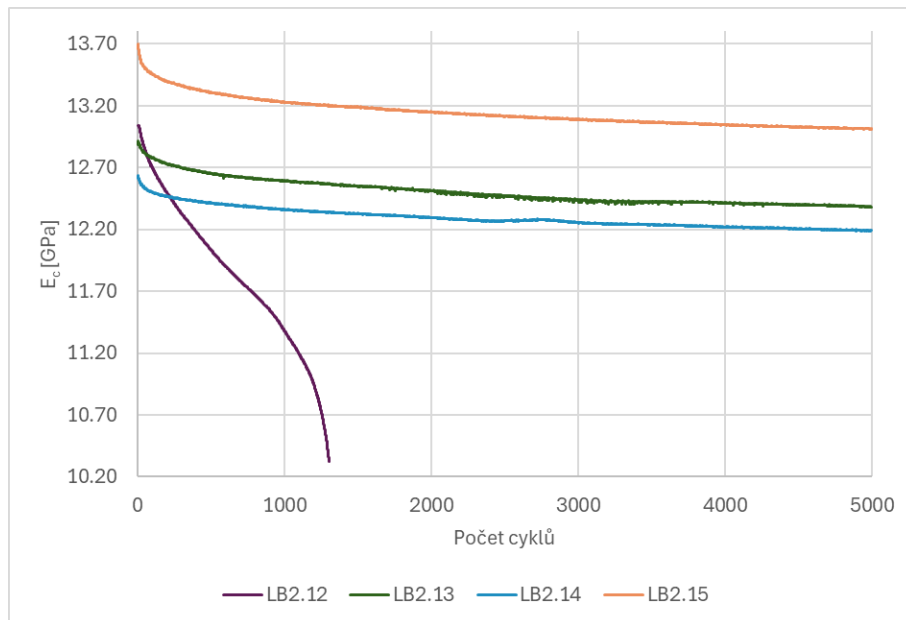
Obr. 49 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c



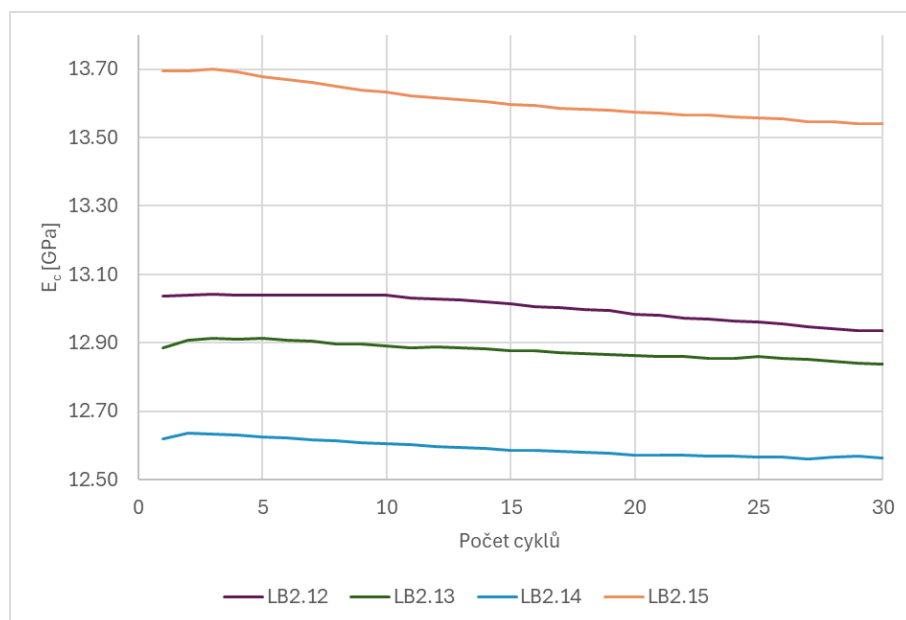
Obr. 50 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

V Obr. 51 je mimo jiné vykreslen průběh hodnoty modulu pružnosti zkušebního tělesa LB2.12, které vlivem cyklického zatěžování bylo během zkoušení zničeno. Jasný klesající trend během cyklů naznačuje, že horní zatěžovací hladina, která byla rovna 2/3

očekávané pevnosti betonu v tlaku, se blížila k maximálnímu tlakovému zatížení, kterému bylo zkušební těleso schopné odolat. Zkušební tělesa, která byla zatěžována hladinami s vyšší intenzitou, vykazují pokles prvních 500 cyklů a poté mírný klesající trend po zbytek cyklování.

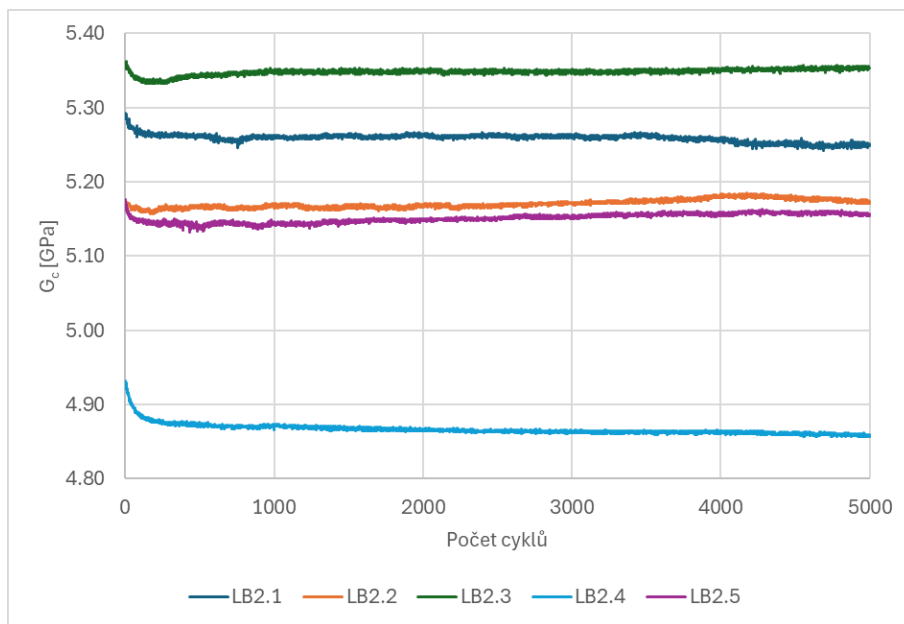


Obr. 51 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c

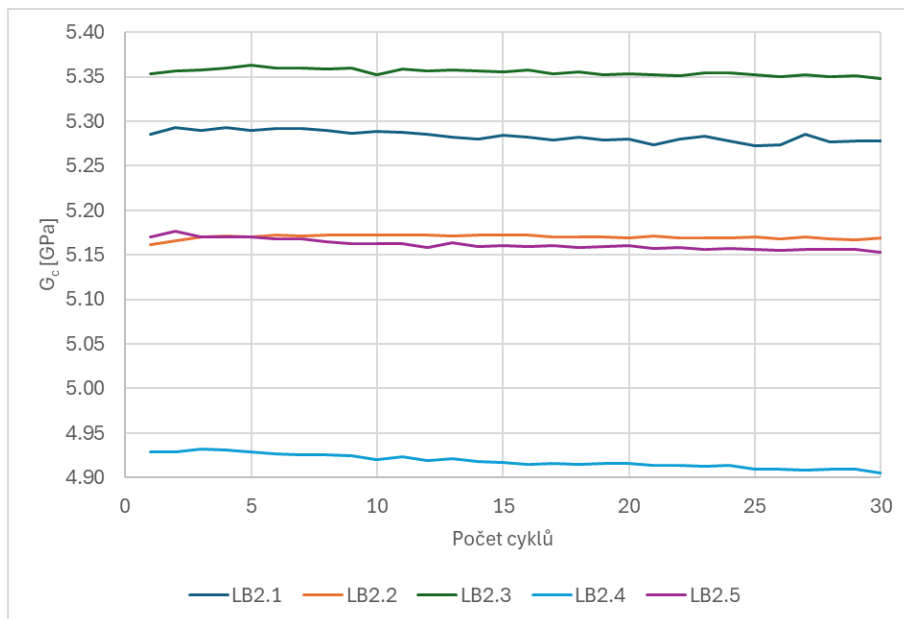


Obr. 52 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Grafy v Obr. 53-58 vykreslují pokles statického modulu pružnosti ve smyku v prvních stovkách cyklů, přičemž u zkušebních těles zatěžovaných intenzivněji lze pokles charakterizovat jako strmější. Následně se trend poklesu zmírní – dále dochází již pouze k mírnému poklesu u téměř všech zkušebních těles. V grafu lze také pozorovat selhání zkušebního tělesa LB2.12 vlivem cyklického zatěžování.

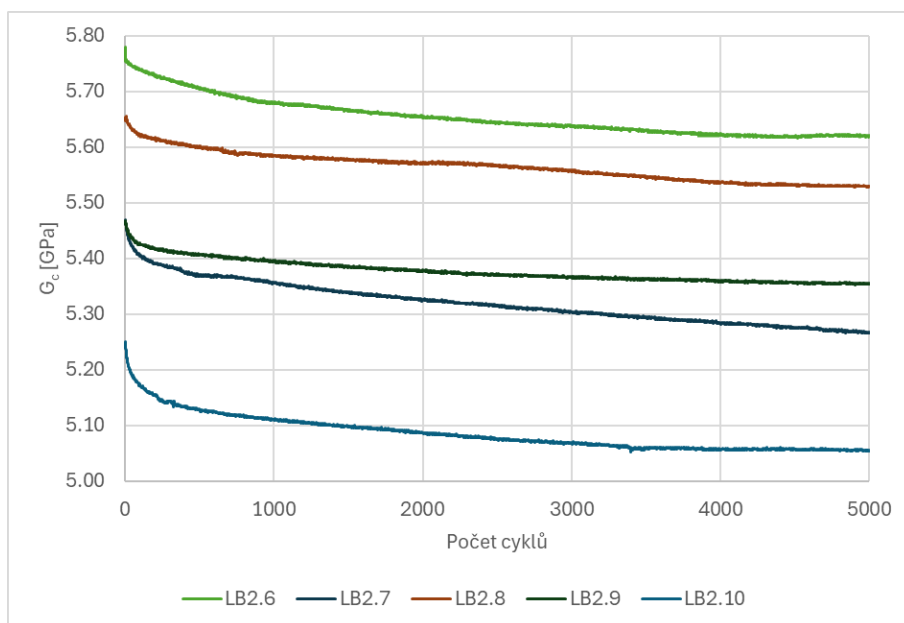


Obr. 53 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

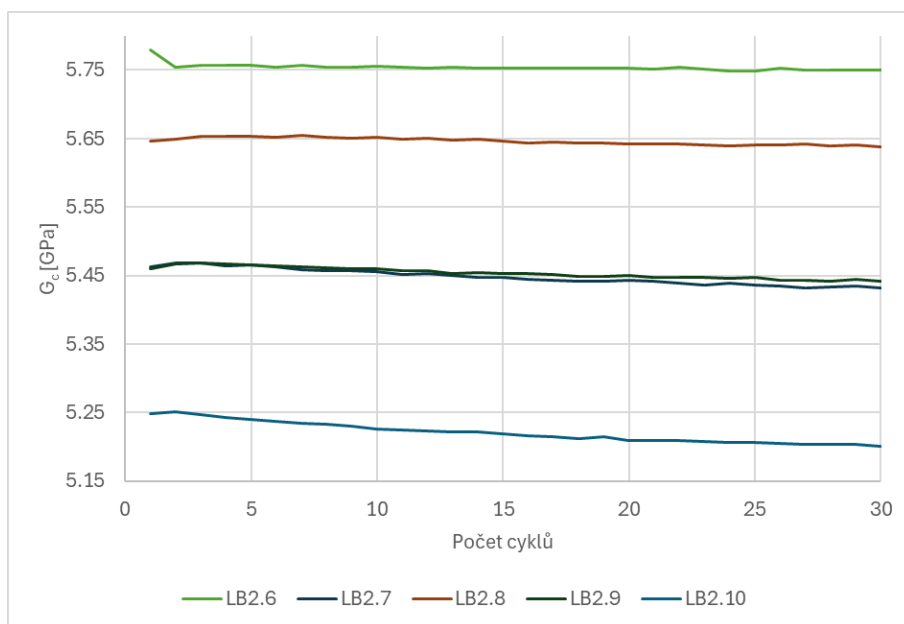


Obr. 54 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

V grafu na Obr. 55 a Obr. 56 lze pozorovat průběh hodnot statického modulu pružnosti ve smyku betonu LB2, horní hladina zatížení 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.

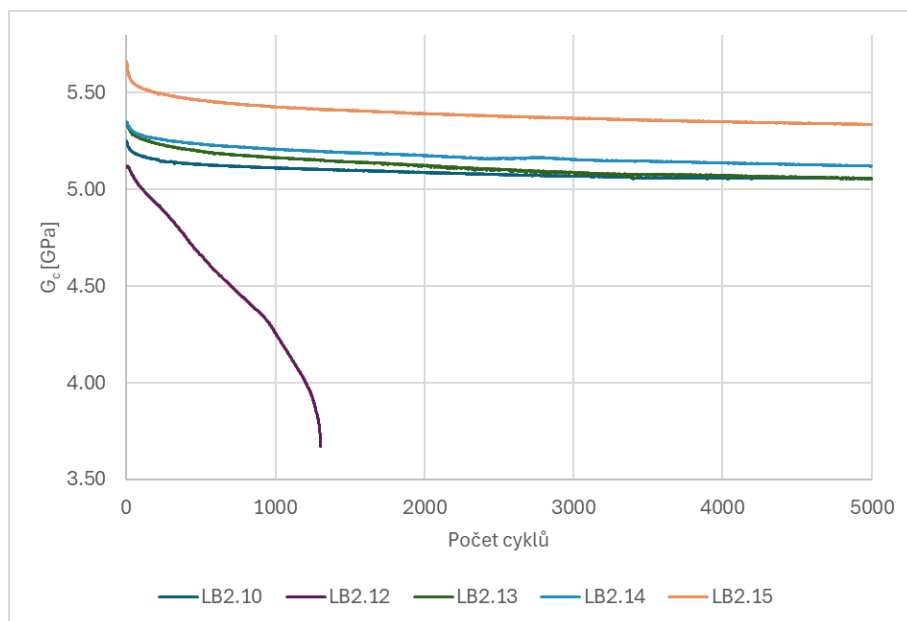


Obr. 55 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c

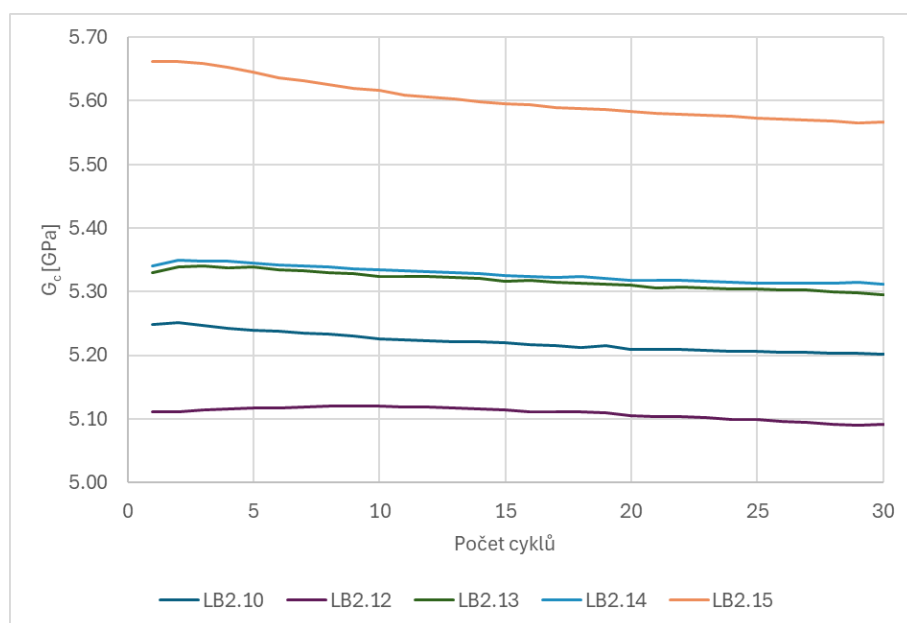


Obr. 56 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na Obr. 57 a Obr. 58 lze pozorovat průběh hodnot statického modulu pružnosti ve smyku betonu LB2, horní hladina zatížení 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.



Obr. 57 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c



Obr. 58 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Hodnoty statických modulů pružnosti v tlaku a smyku a také relativních modulů pružnosti jsou v Tab. 31. Relativní statické moduly pružnosti nenaznačují téměř žádnou změnu hodnot statických modulů pružnosti vlivem cyklického zatěžování hladinou odpovídající 1/3 očekávané pevnosti. U sady zkušebních těles, která byla zatěžovaná hladinou odpovídající 1/2 očekávané pevnosti betonu LB2 v tlaku, relativní moduly ukazují na téměř 3 % pokles modulů pružnosti. Větší pokles statických modulů oproti zbývajícím

dvěma sadám byl zaznamenán u zkušebních těles zatěžovaných hladinou odpovídající 2/3 očekávané pevnosti betonu, který ale nelze považovat za významný.

Tab. 31 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS LB2

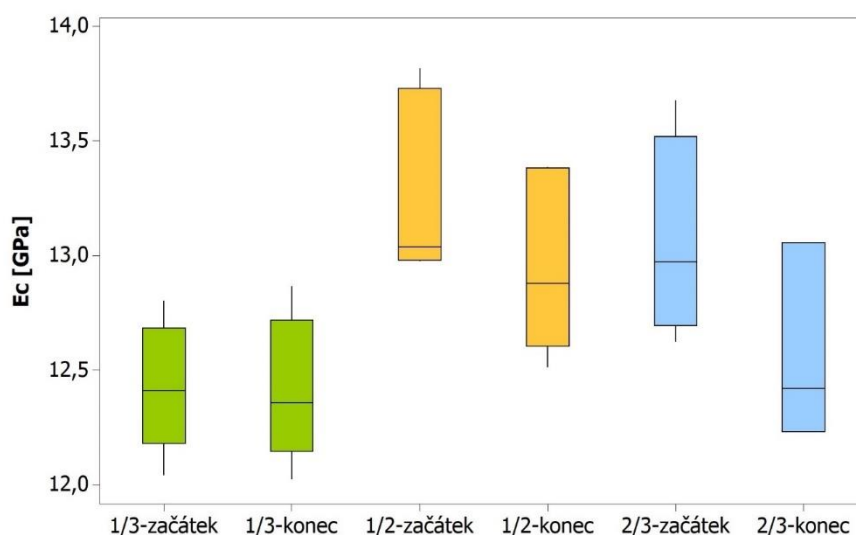
Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]	$G_{c,před}$ [GPa]	$G_{c,po}$ [GPa]	RSMS [%]
LB2.1 _{1/3}	12,41	12,36	99,56	5,29	5,25	99,27
LB2.2 _{1/3}	12,80	12,86	100,47	5,17	5,18	100,24
LB2.3 _{1/3}	12,56	12,57	100,06	5,36	5,35	99,83
LB2.4 _{1/3}	12,04	12,02	99,86	4,93	4,87	98,73
LB2.5 _{1/3}	12,32	12,27	99,58	5,17	5,16	99,79
Průměrná hodnota	12,4	12,4	99,9	5,2	5,2	99,6
Směr.výběrová odchylka	0,28	0,32	0,38	0,16	0,18	0,59
LB2.6 _{1/2}	13,81	13,37	96,82	5,76	5,62	97,67
LB2.7 _{1/2}	13,04	12,51	95,97	5,46	5,28	96,69
LB2.8 _{1/2}	13,64	13,38	98,12	5,65	5,54	97,98
LB2.9 _{1/2}	12,97	12,88	99,25	5,46	5,36	98,19
LB2.10 _{1/2}	12,98	12,70	97,80	5,24	5,06	96,54
Průměrná hodnota	13,3	13,0	97,6	5,5	5,4	97,4
Směr.výběrová odchylka	0,41	0,40	1,26	0,20	0,22	0,75
LB2.11 _{2/3}	-	-	-	-	-	-
LB2.12 _{2/3}	-	-	-	-	-	-
LB2.13 _{2/3}	12,90	12,42	96,24	5,33	5,07	95,12
LB2.14 _{2/3}	12,62	12,23	96,89	5,34	5,14	96,21
LB2.15 _{2/3}	13,68	13,05	95,46	5,64	5,35	94,85
Průměrná hodnota	13,1	12,6	96,2	5,4	5,2	95,4
Směr.výběrová odchylka	0,55	0,43	0,72	0,18	0,15	0,72

I u statických modulů pružnosti betonu LB2 byla provedena statistická analýza. Po ověření normality souborů dat na hladině významnosti 0,05 byl opět proveden dvouvýběrový t-test, a to pro všechny úrovně zatížení. Vypočtené p-hodnoty jsou uvedeny v Tab. 32. Z výsledků je vidět, že se žádné statické moduly pružnosti ani jedné ze tří různě zatěžovaných sad zkušebních těles LB2 během statického zatěžování statisticky významně nesnížily.

Tab. 32 *p*-hodnoty dvouvýběrového *t*-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	E_c	G_c
LB2 _{1/3}	0,959	0,845
LB2 _{1/2}	0,245	0,322
LB2 _{2/3}	0,302	0,155

Na Obr. 59 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_c před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Z grafu lze vidět, že čím vyšší byla hladina horního napětí při cyklickém zatěžování, tím větší byl pokles modul pružnosti. Tento pokles ovšem nelze označit jako významný, neboť statistická analýza neprokázala významné snížení na zvolené hladině významnosti. Krabicový graf statického modulu pružnosti ve smyku je v příloze této práce.

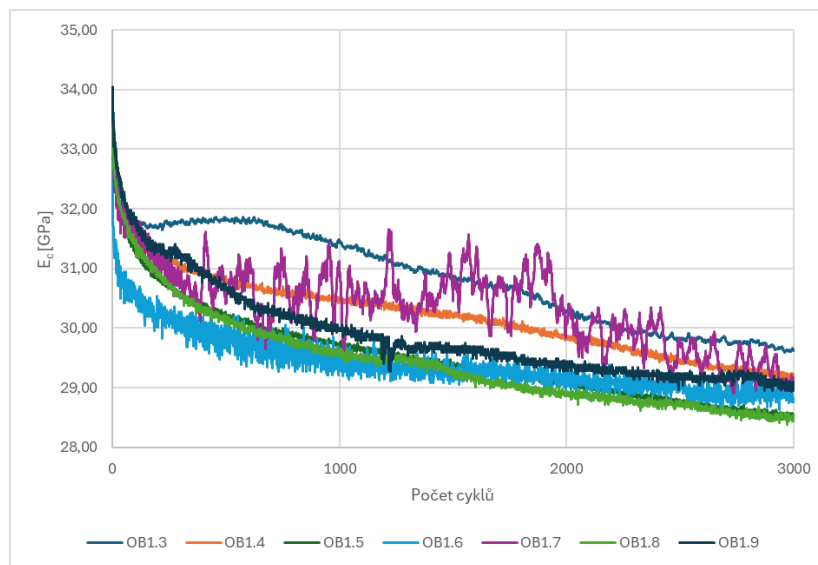


Obr. 59 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu LB2 během statického cyklického zatěžování

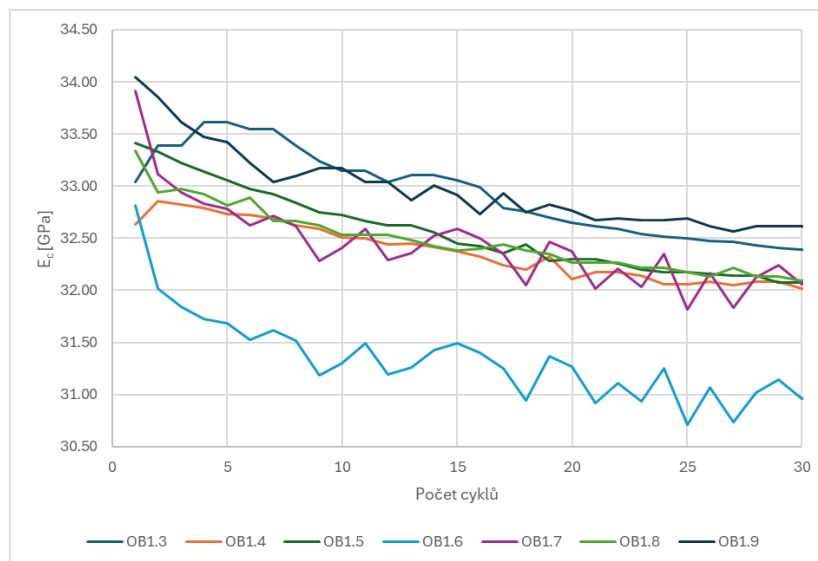
OB1

Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku betonu OB1 v průběhu cyklického zatěžování jsou zobrazeny na Obr. 60. V prvních stovkách cyklů dochází vlivem opakovaného zatěžování k relativně strmému poklesu statických modulů pružnosti (viz grafy prvních 30 cyklů) a následně lze pozorovat konstantní, podstatně mírnější klesání až do konce cyklování. Průběh hodnot modulu pružnosti stanovených na zkušebním tělese

OB1.7 vykazuje výrazný rozptyl a pro tento jev nebylo nalezeno žádné důvodné vysvětlení. Trend je ovšem podobný jako u ostatních těles.



Obr. 60 Statický modul pružnosti v tlaku OB1



Obr. 61 Statický modul pružnosti v tlaku OB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů

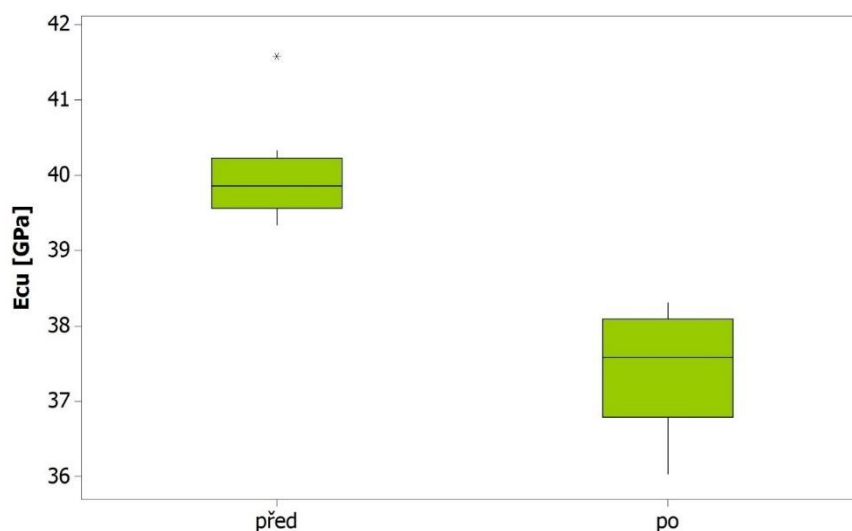
Z důvodu nekvalitně naměřených příčných přetvoření (grafy se záznamem nevyhodnotitelných dat jsou uvedeny v příloze práce) není pro beton OB1 vyhodnocen statický modul pružnosti ve smyku, a proto je v Tab. 33 vypočítán pouze relativní statický modul pružnosti v tlaku. Po 3 000 zatěžovacích cyklech byl zjištěn pokles modulu pružnosti o 13 % na hladině zatěžování odpovídající 1/3 očekávané pevnosti betonu v tlaku.

Tab. 33 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku, 1 a poslední cyklus, RSMT a OB1

Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]
OB1.1 _{1/3}	-	-	-
OB1.2 _{1/3}	-	-	-
OB1.3 _{1/3}	33,04	29,62	89,66
OB1.4 _{1/3}	32,63	29,19	89,44
OB1.5 _{1/3}	33,41	28,55	85,46
OB1.6 _{1/3}	32,82	28,84	87,89
OB1.7 _{1/3}	33,92	29,16	85,99
OB1.8 _{1/3}	33,34	28,49	85,47
OB1.9 _{1/3}	34,05	29,09	85,45
Průměrná hodnota	33,3	29,0	87,0
Směr.výběrová odchylka	0,53	0,40	1,91

Statistickou analýzou byla ověřena normalita dat na hladině významnosti 0,05. Následně byl proveden dvouvýběrový t-test. Výsledkem provedeného testu je, že na hladině významnosti 0,05 se střední hodnota statického modulu pružnosti významně **liší** (p-hodnota = 0,000) vlivem cyklického zatěžování.

Na Obr. 62 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_{cc} před a po cyklickém statickém zatěžování.

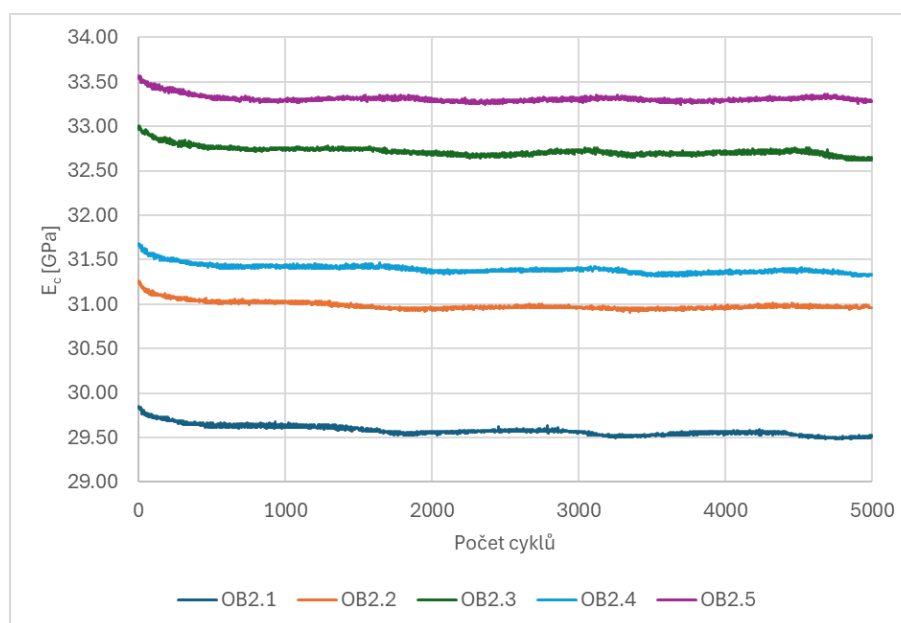


Obr. 62 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu OB1 během statického cyklického zatěžování

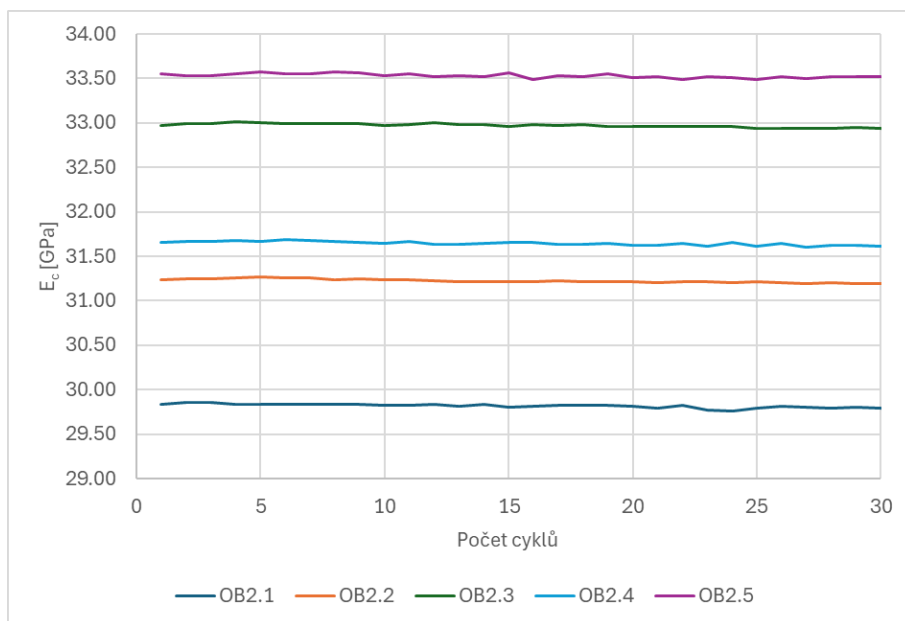
OB2

Obr. 63 prostřednictvím grafu zachycuje průběh hodnot statického modulu pružnosti v tlaku betonu OB2 během statického cyklického zatěžování 5 000 cykly do úrovně $1/3$ očekávané pevnosti v tlaku. Na Obr. 64 je následně uveden graf vývoje E_c stejných těles během prvních 30 zatěžovacích cyklů.

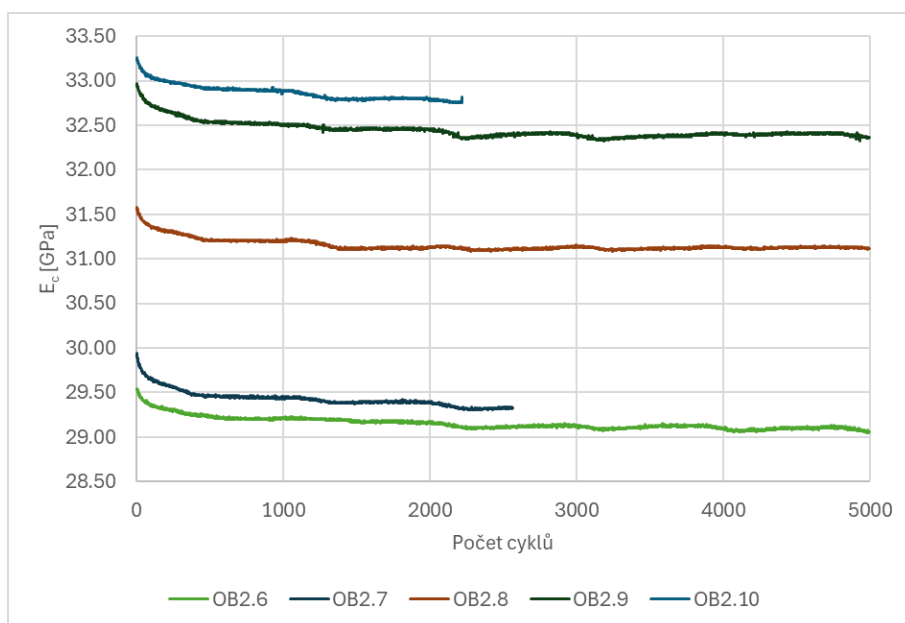
Na Obr. 65 je graf s průběhem hodnot statického modulu pružnosti v tlaku zkušebních těles sady, která byla zatěžována do $1/2 f_c$. Z grafu lze pozorovat nedokončené měření těles OB2.7 a OB2.10. Zkoušení tělesa OB2.7 bylo ukončeno po zjištění, že při cyklování z důvodu technické závady zůstala působící síla konstantní na hodnotě 142 kN místo cyklování. Těleso OB2.10 bylo zničeno z důvodu utržení příčnicku zkušebního lisu. Paradoxně tak byla – zcela neplánovaně – odzkoušena únava ocelových šroubů příčnicku. V grafu je také čitelný strmý pokles hodnoty modulu pružnosti během prvních stovek cyklů, přestože tento pokles není statisticky významný. V grafu jsou také (i když málo zřetelné) 3, respektive 4 vlny na křivkách hodnot modulů stanovených z naměřených dat. Tento jev byl způsoben měřením dat pro experiment v letním období, kdy okolní teplota prostředí ovlivnila zaznamenávání dat, i přesto, že byl použit tzv. kompenzační díl, který má eliminovat vliv okolního prostředí.



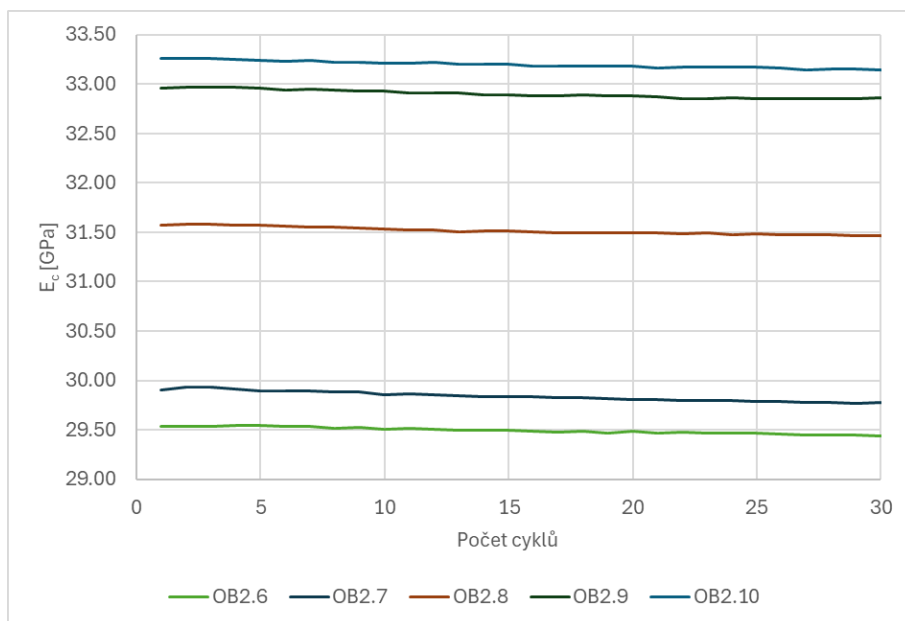
Obr. 63 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina $1/3$ očekávané f_c



Obr. 64 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

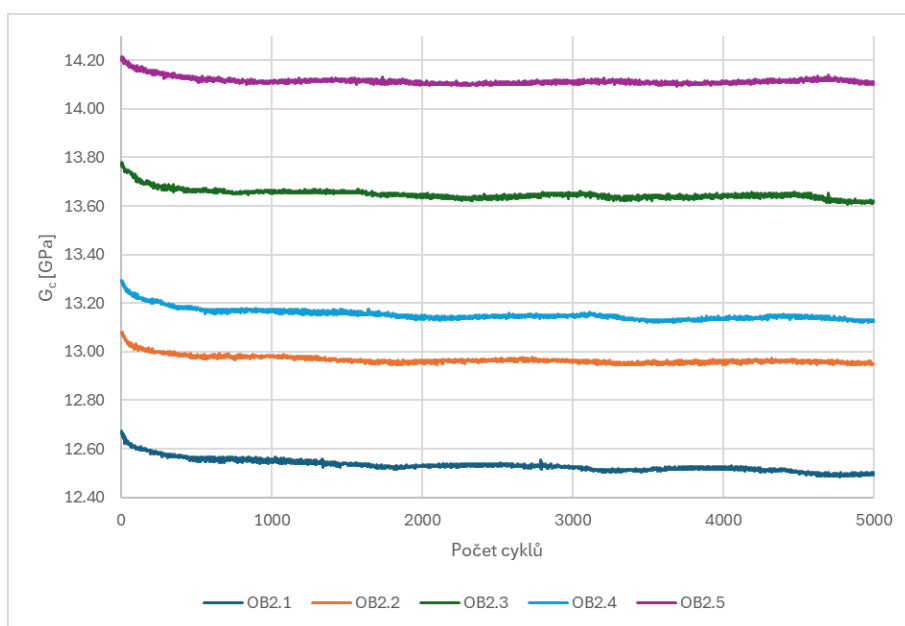


Obr. 65 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c

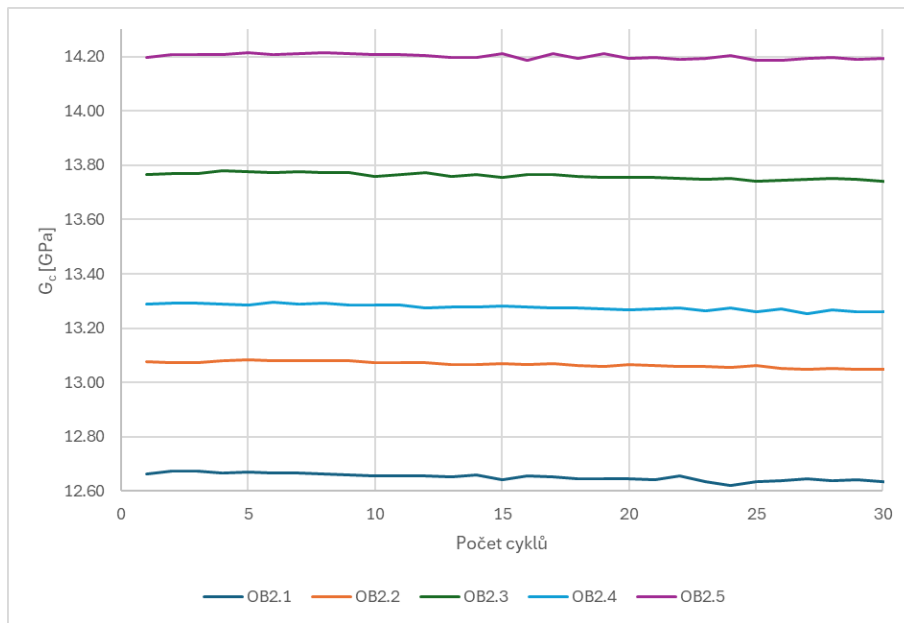


Obr. 66 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Statický modul pružnosti ve smyku a jeho změnu při zatěžování do 1/3 předpokládané pevnosti v tlaku lze pozorovat na Obr. 67 a Obr. 68. Stejně jako u modulu pružnosti v tlaku dochází (na první pohled) ke strmému poklesu hodnoty během prvních pár stovek cyklů a následně je průběh konstantní, ovlivněný pouze okolní teplotou při měření.

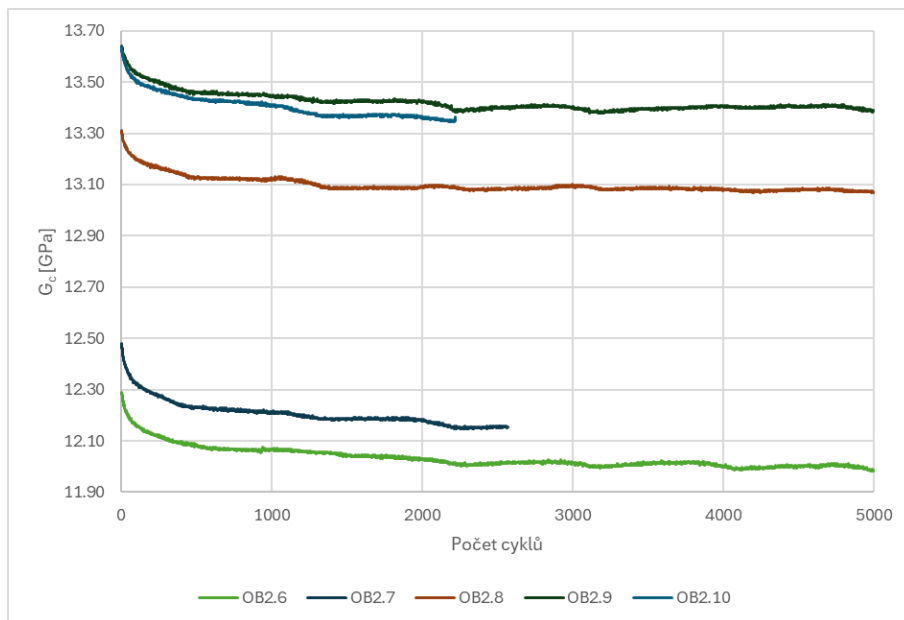


Obr. 67 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

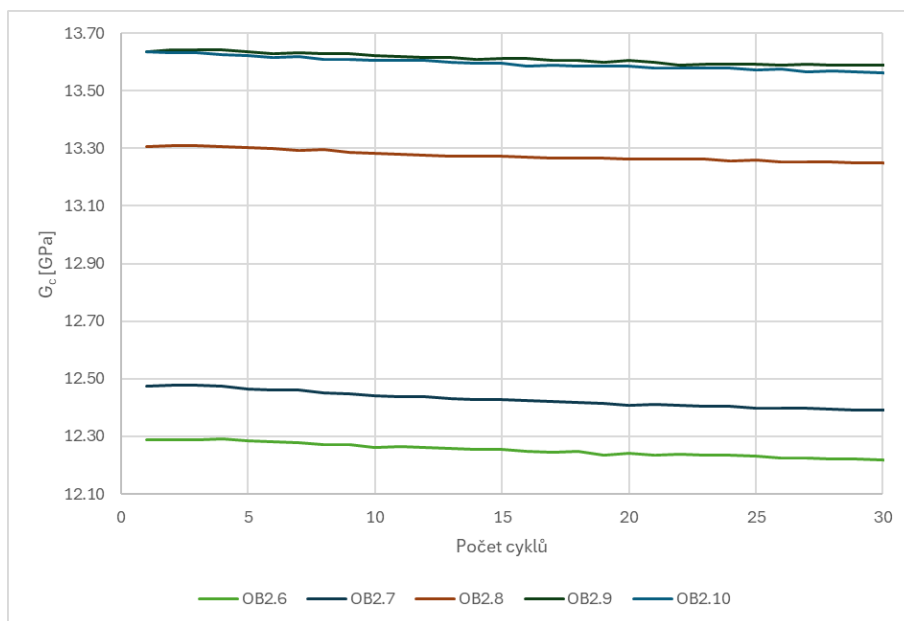


Obr. 68 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na Obr. 69 a Obr. 70 je zobrazen průběh statického modulu pružnosti ve smyku betonu OB2 během zatěžování horní zatěžovací hladinou odpovídající 1/2 očekávané pevnosti betonu v tlaku.



Obr. 69 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c



Obr. 70 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

Vliv cyklického zatížení na hodnotu statických modulů pružnosti je kvantifikován pomocí relativních statických modulů v Tab. 34. Pokles modulů pružnosti během cyklování nenaznačuje významný vliv na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku a smyku.

Tab. 34 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku v 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS OB2

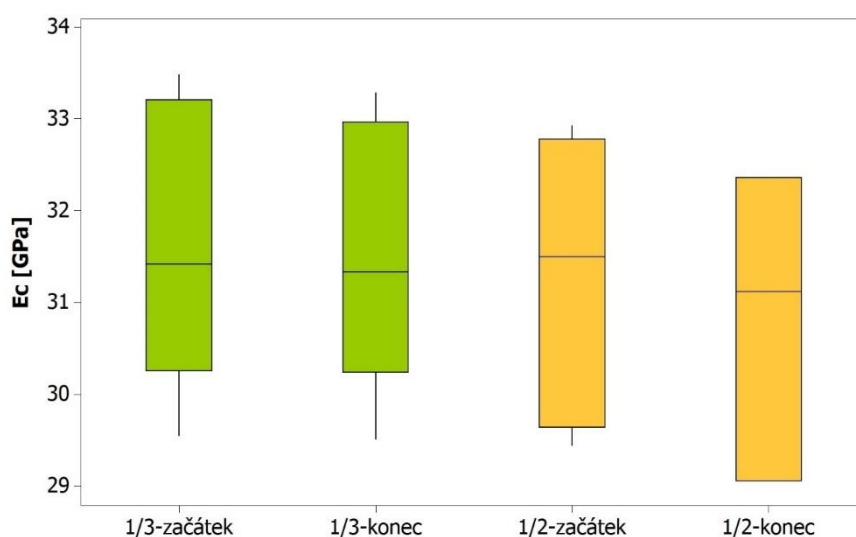
Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]	$G_{c,před}$ [GPa]	$G_{c,po}$ [GPa]	RSMS [%]
OB2.1 _{1/3}	29,54	29,51	99,89	12,54	12,50	99,62
OB2.2 _{1/3}	30,97	30,97	100,00	12,96	12,95	99,90
OB2.3 _{1/3}	32,93	32,65	99,15	13,75	13,62	99,08
OB2.4 _{1/3}	31,42	31,33	99,73	13,19	13,12	99,49
OB2.5 _{1/3}	33,48	33,29	99,42	14,19	14,11	99,43
Průměrná hodnota	31,7	31,5	99,6	13,3	13,3	99,5
Směr.výběrová odchylka	1,58	1,48	0,35	0,65	0,62	0,30
OB2.6 _{1/2}	29,44	29,05	98,70	12,25	11,98	97,79
OB2.7 _{1/2}	29,84	-	-	12,45	-	-
OB2.8 _{1/2}	31,50	31,11	98,78	13,28	13,07	98,42
OB2.9 _{1/2}	32,62	32,36	99,19	13,49	13,39	99,26
OB2.10 _{1/2}	32,93	-	-	13,48	-	-
Průměrná hodnota	31,3	30,8	98,9	13,0	12,8	98,5
Směr.výběrová odchylka	1,58	1,67	0,26	0,59	0,74	0,73

Pro stanovení vlivu cyklického zatěžování byla provedena statická analýza. Nejdříve byla ověřena normalita dat a následně dvouvýběrový t-test na hladině významnosti 0,05, který neprokázal odlišnost středních hodnot modulů pružnosti, viz Tab. 35.

Tab. 35 *p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu OB2 před a po zatěžování*

Beton / modul pružnosti	E_c	G_c
OB2 _{1/3}	0,906	0,874
OB2 _{1/2}	0,740	0,749

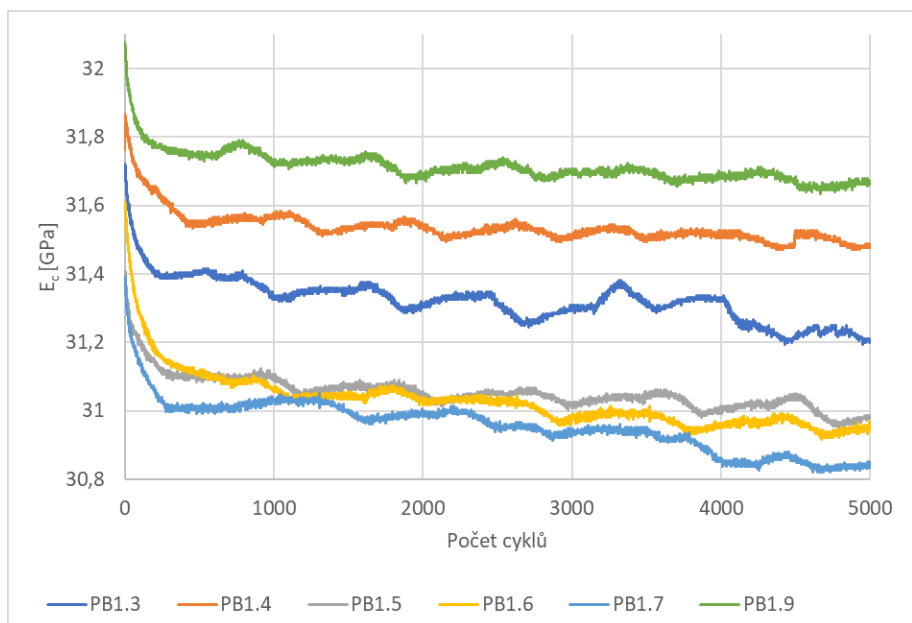
Na Obr. 71 je zobrazen krabicový graf hodnot statického modulu pružnosti E_c před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Krabicový graf statického modulu pružnosti ve smyku je uveden v příloze této práce.



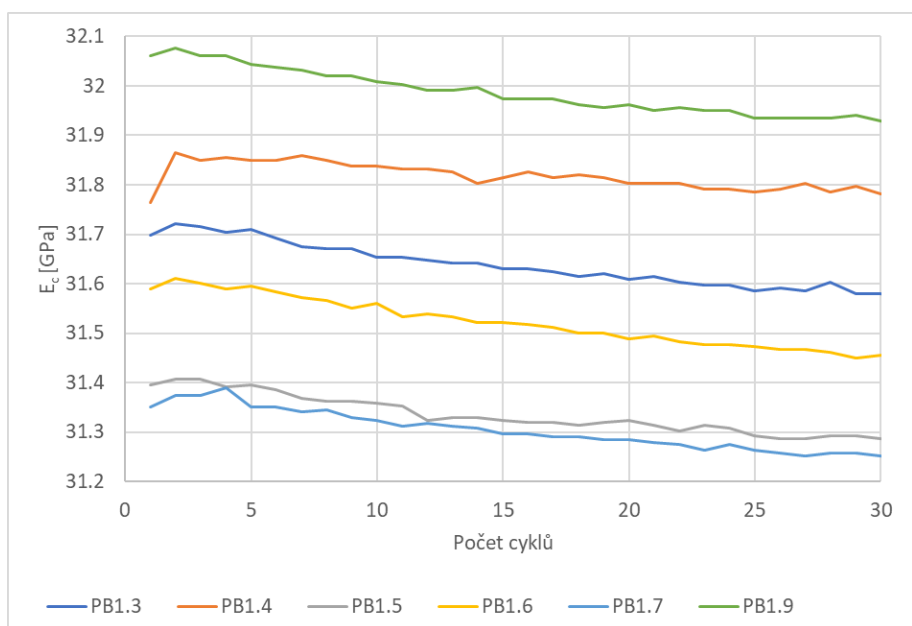
Obr. 71 *Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu OB2 během statického cyklického zatěžování*

PB1

V grafu na Obr. 72 a Obr. 73 je znázorněn průběh hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku betonu PB1 během cyklického zatěžování. Lze pozorovat vliv okolní teploty na záznam měření, který byl eliminován kompenzačním dílem pouze částečně. Na grafech lze také pozorovat počáteční strmý pokles hodnot statického modulu pružnosti v tlaku během prvních 500 cyklů a následně trend mírného poklesu v průběhu cyklování.

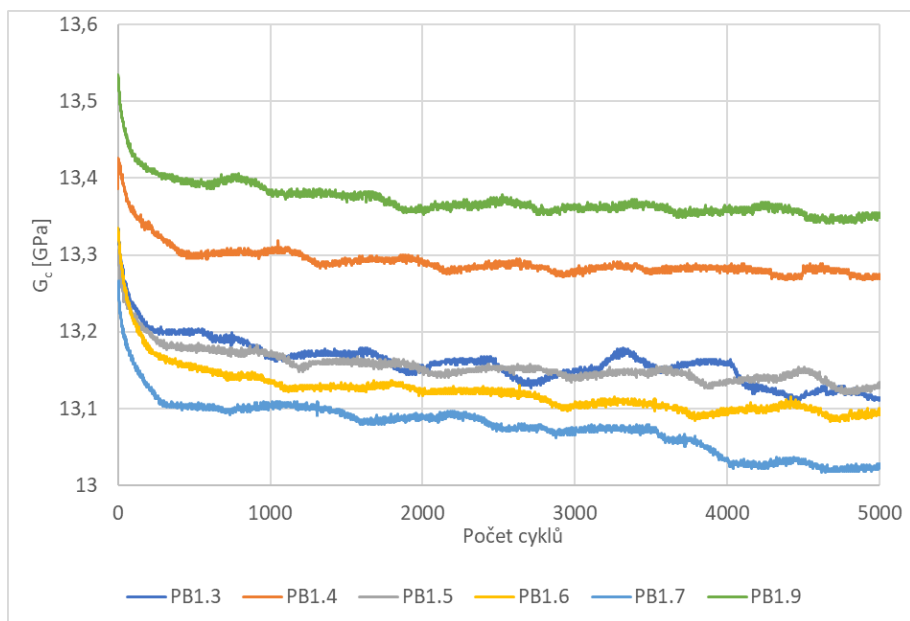


Obr. 72 Statický modul pružnosti v tlaku PB1

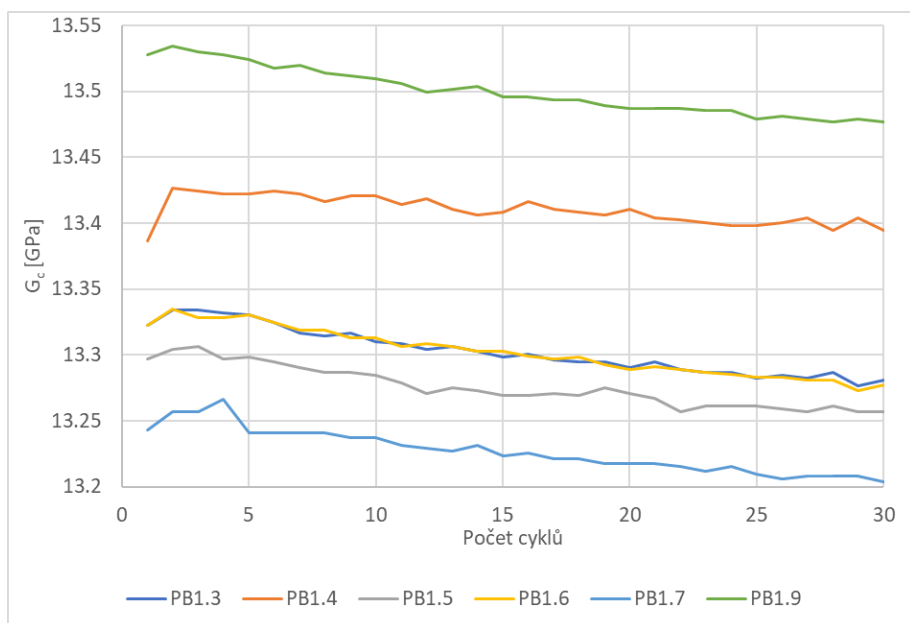


Obr. 73 Statický modul pružnosti v tlaku PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů

Podobně jako statický modul pružnosti v tlaku se choval statický modul pružnosti ve smyku, kde jeho hodnoty v průběhu prvních stovek cyklů klesnou výrazněji a následně mírně klesají po celou dobu měření. Také vliv okolní teploty je pozorován na záznamu hodnot modulů pružnosti ve smyku.



Obr. 74 Statický modul pružnosti ve smyku PB1



Obr. 75 Statický modul pružnosti ve smyku PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů

V Tab. 36 jsou zaznamenány hodnoty statických modulů pružnosti v tlaku a smyku stanovené v prvním zatěžovacím cyklu a v 5 000. zatěžovacím cyklu. Procentuální poměr zachycující změnu před a po zatěžování, stanovil pokles hodnoty o necelé 2 %. Toto by mohlo napovídat, že se nejedná o zásadní vliv na hodnotu modulu pružnosti v tlaku a smyku cyklickým zatěžováním. Výsledky statické analýzy však ukazují něco jiného.

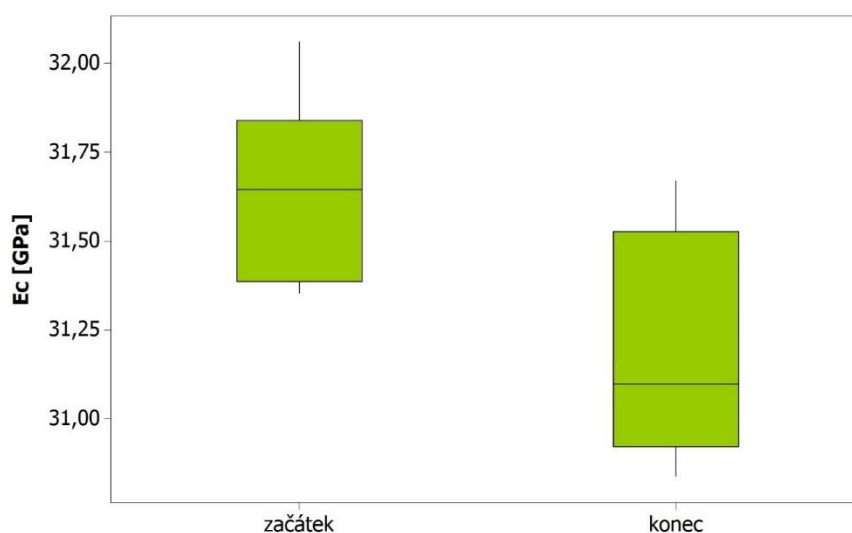
Tab. 36 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS PB1

Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]	$G_{c,před}$ [GPa]	$G_{c,po}$ [GPa]	RSMS [%]
PB1.3 _{1/3}	31,70	31,21	98,45	13,32	13,11	98,42
PB1.4 _{1/3}	31,76	31,48	99,10	13,39	13,27	99,15
PB1.5 _{1/3}	31,40	30,99	98,70	13,30	13,13	98,75
PB1.6 _{1/3}	31,59	30,95	97,97	13,32	13,09	98,27
PB1.7 _{1/3}	31,53	30,84	97,80	13,24	13,03	98,37
PB1.9 _{1/3}	32,06	31,67	98,78	13,53	13,35	98,69
Průměrná hodnota	31,7	31,2	98,5	13,3	13,2	98,6
Směr.výběrová odchylka	0,23	0,33	0,50	0,10	0,12	0,33

Statistickou analýzou byla ověřena normalita dat na hladině významnosti 0,05. Následně byl proveden dvouvýběrový t-test. Výsledkem provedeného testu je, že na hladině významnosti 0,05 se:

- statický modul pružnosti v tahu/tlaku E_c **liší** (p-hodnota = 0,018),
- statický modul pružnosti ve smyku G_c **liší** (p-hodnota = 0,017),

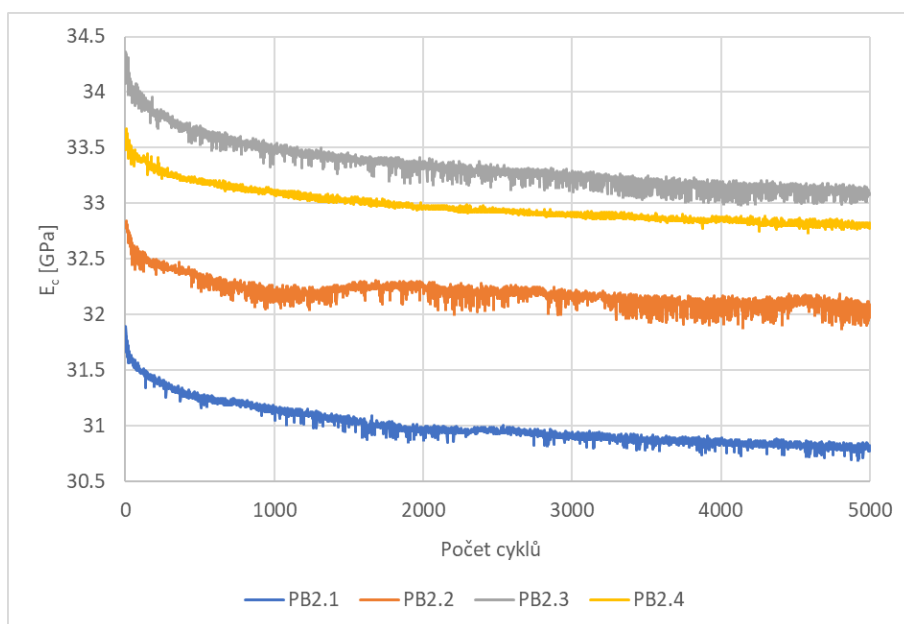
Na Obr. 76 je zobrazen krabicový graf hodnot dynamického modulu pružnosti E_c před a po cyklickém statickém zatěžování.



Obr. 76 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu PB1 během statického cyklického zatěžování

PB2

V grafech na Obr. 77-82 lze pozorovat strmější pokles hodnot statického modulu pružnosti v prvních stovkách cyklů u všech zkušebních těles – čím vyšší hladina zatěžování, tím výraznější pokles. Následně je možné vidět podstatně mírnější trend klesání hodnot během celého měření až do posledního cyklu.

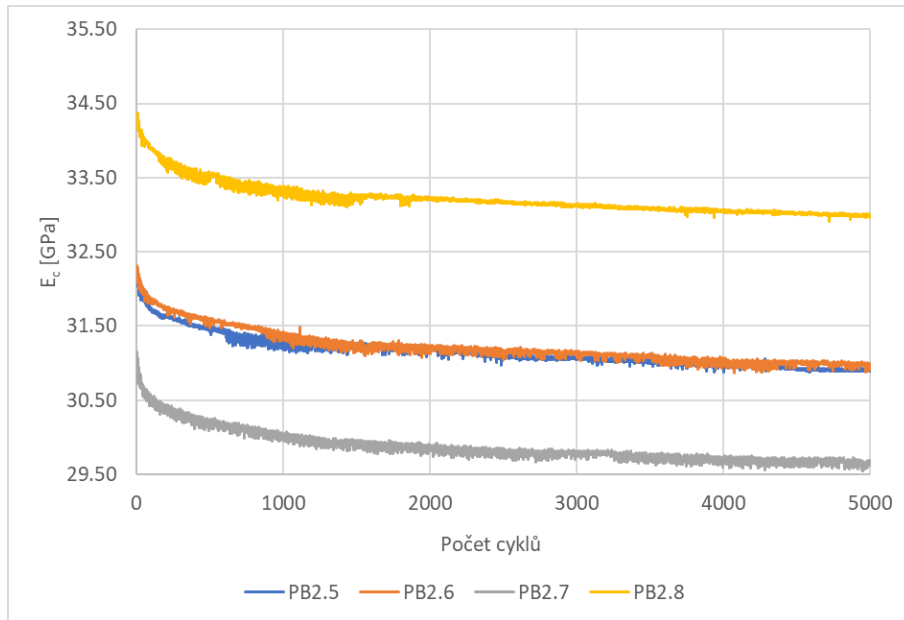


Obr. 77 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

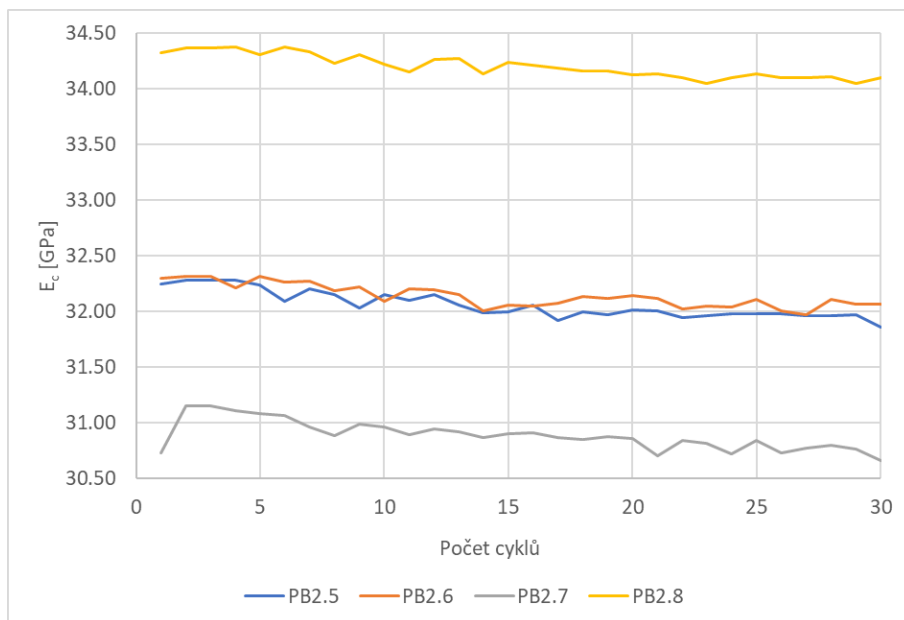


Obr. 78 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Statické moduly pružnosti v tlaku stanovené při horní zatěžovací hladině odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku v průběhu všech cyklů i prvních 30 jsou uvedeny v následujících grafech na Obr. 79 a 80.

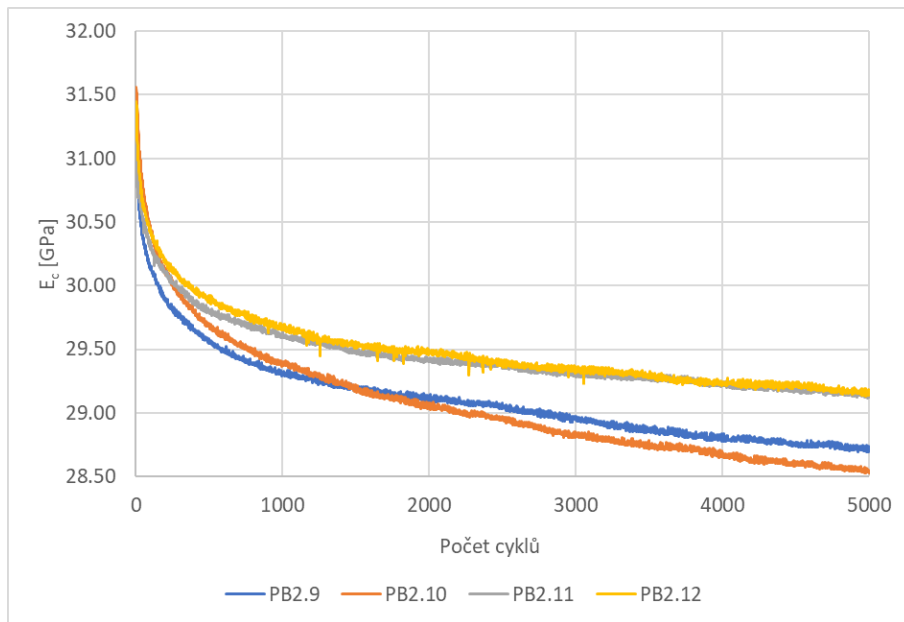


Obr. 79 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c



Obr. 80 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Statické moduly pružnosti v tlaku stanovené při horní zatěžovací hladině odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku v průběhu všech cyklů i prvních 30 jsou uvedeny v následujících grafech na Obr. 81 a 82.



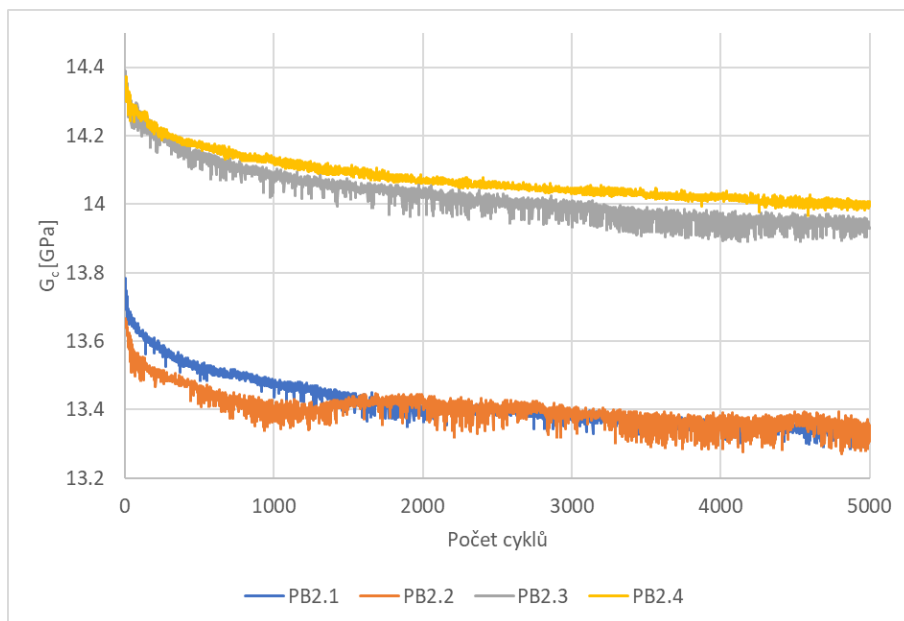
Obr. 81 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c



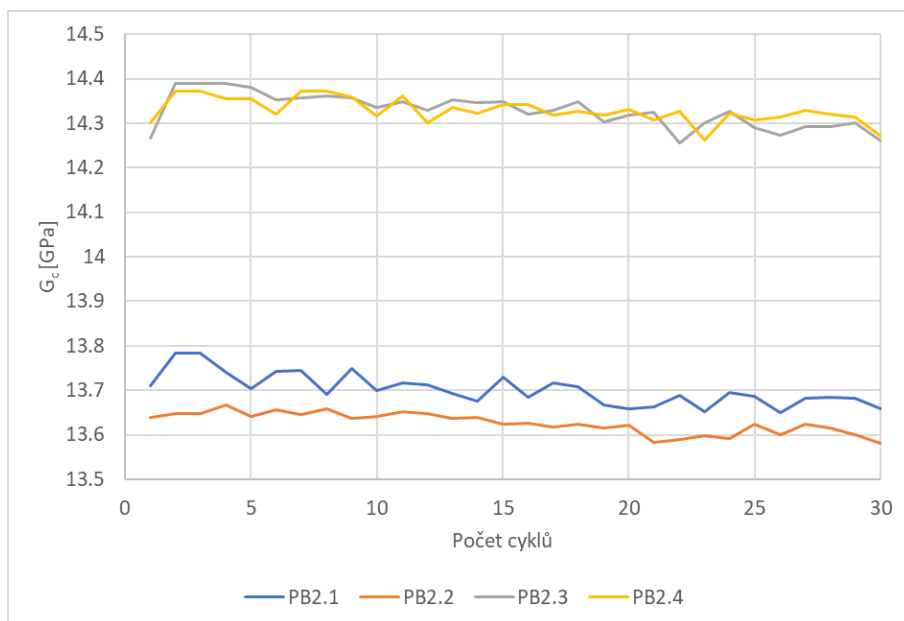
Obr. 82 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Průběh hodnoty modulu pružnosti ve smyku je podobný jako v tlaku. Strmější pokles během prvních stovek cyklů a následný pozvolně klesající trend. Zkušební tělesa

zatěžována vyšší hladinou zatížení vykazují rychlejší pokles hodnoty statického modulu pružnosti.

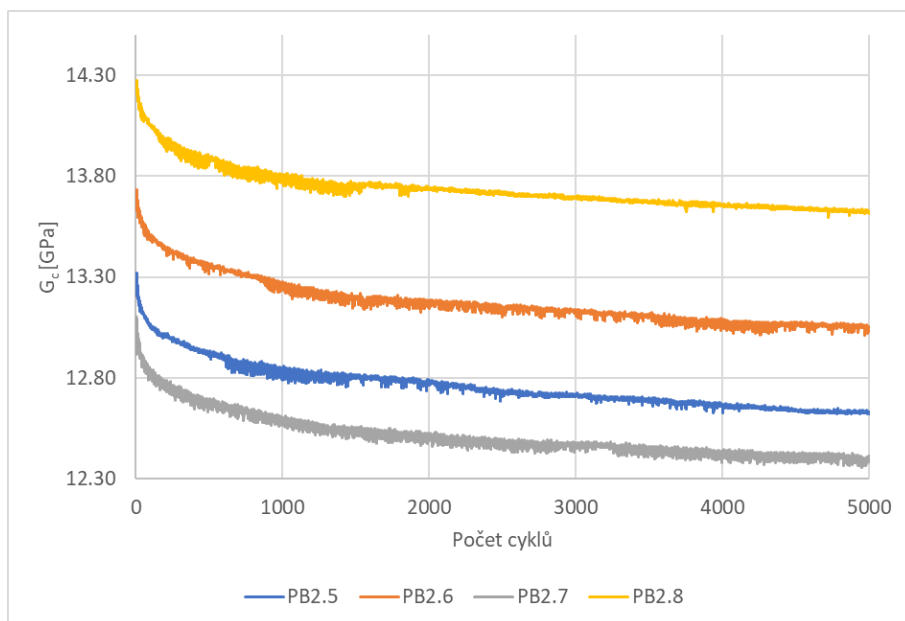


Obr. 83 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

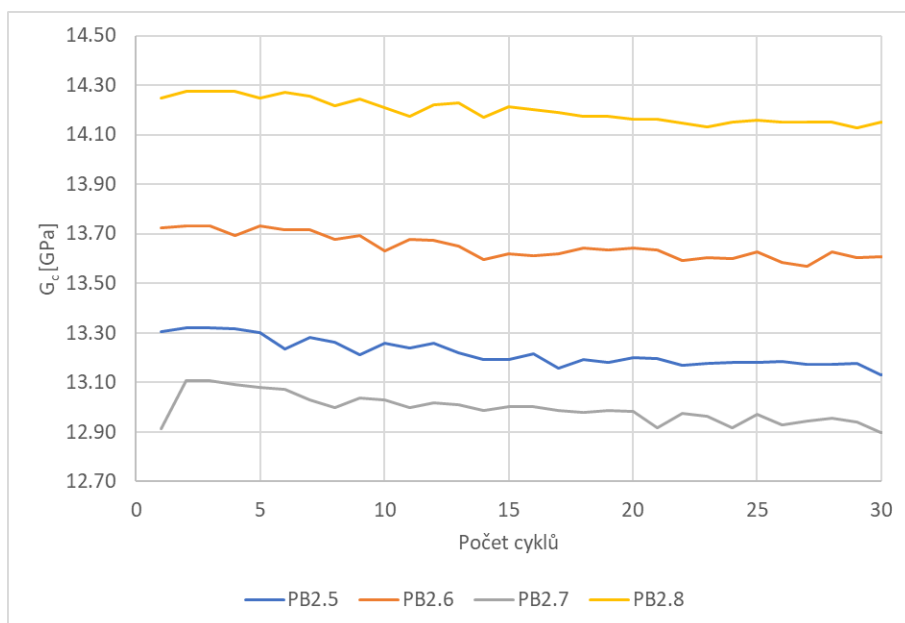


Obr. 84 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Statické moduly pružnosti ve smyku stanovené při horní zatěžovací hladině odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku v průběhu všech cyklů i prvních 30 jsou uvedeny v následujících grafech na Obr. 85 a 86.

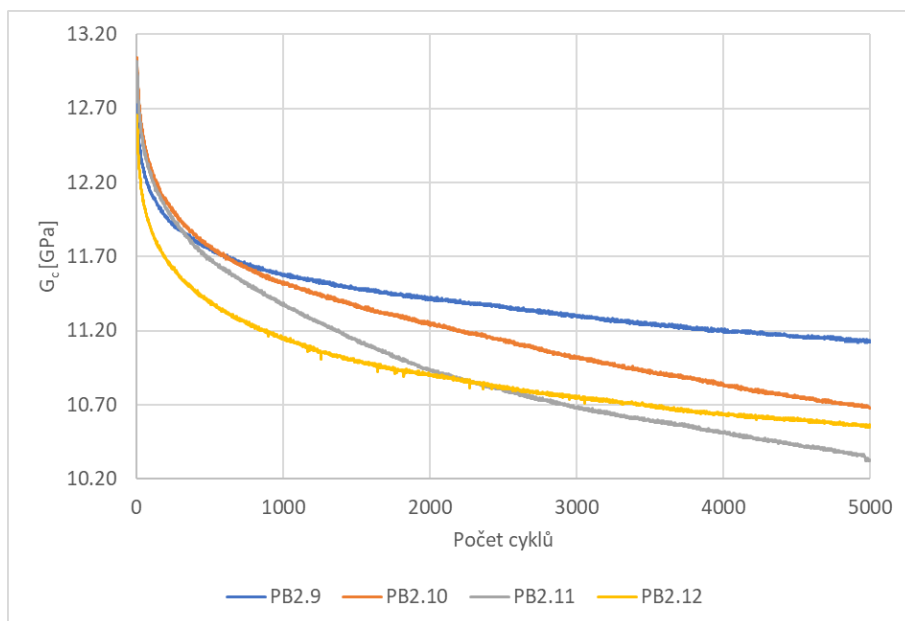


Obr. 85 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c

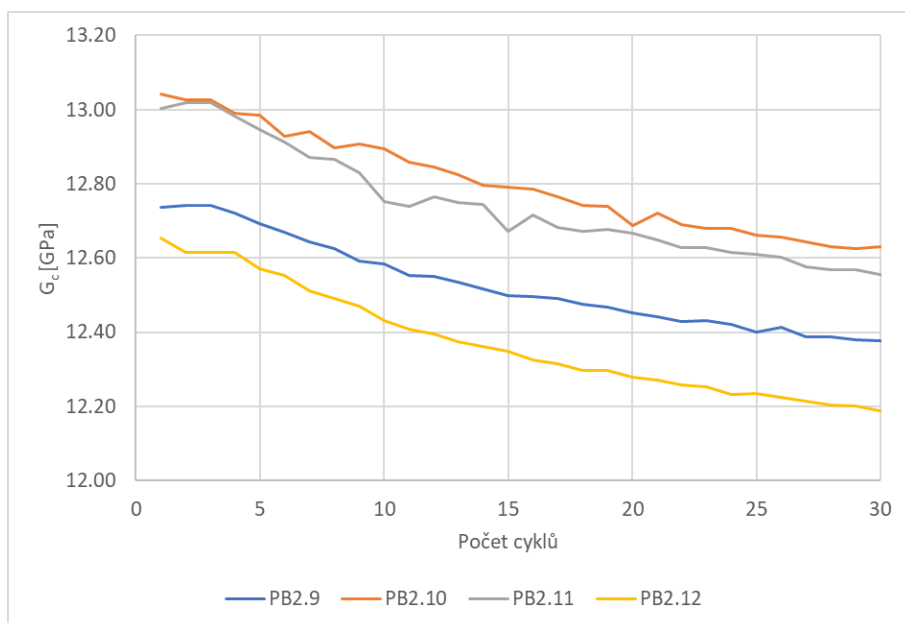


Obr. 86 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Statické moduly pružnosti ve smyku stanovené při horní zatěžovací hladině odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku v průběhu všech cyklů i prvních 30 jsou uvedeny v následujících grafech na Obr. 87 a 88.



Obr. 87 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c



Obr. 88 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku a smyku betonu PB2, vypočtené z prvního a posledního zatěžovacího cyklu, jsou v Tab. 37. Relativní statický modul pružnosti ukazuje vyšší pokles hodnot s vyšší zatěžovací hladinou. Průměrný pokles hodnot statických modulů pružnosti betonu PB2 při cyklování s nejvyšší zatěžovací hladinou byl ze všech zkoušených vzorků největší – dosahoval průměrně 7,7 % u statického modulu pružnosti v tlaku a dokonce 17 % u modulu pružnosti ve smyku.

Tab. 37 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS PB2

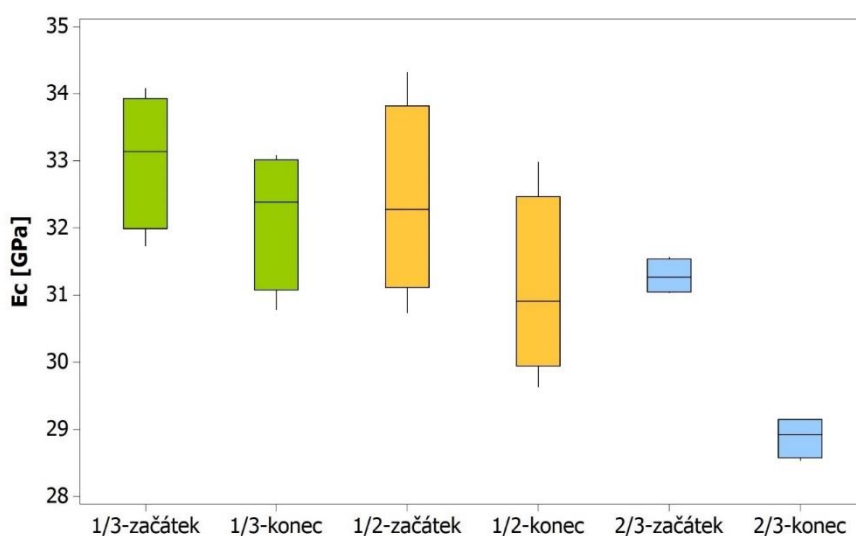
Označení	$E_{c,před}$ [GPa]	$E_{c,po}$ [GPa]	RSMT [%]	$G_{c,před}$ [GPa]	$G_{c,po}$ [GPa]	RSMS [%]
PB2.1 _{1/3}	31,73	30,78	97,01	13,71	13,33	97,21
PB2.2 _{1/3}	32,78	31,97	97,52	13,64	13,31	97,56
PB2.3 _{1/3}	34,07	33,08	97,08	14,27	13,93	97,66
PB2.4 _{1/3}	33,49	32,80	97,94	14,30	13,99	97,86
Průměrná hodnota	33,0	32,2	97,4	14,0	13,6	97,6
Směr.výběrová odchylka	1,01	1,03	0,43	0,35	0,37	0,27
PB2.5 _{1/2}	32,25	30,89	95,79	13,30	12,62	94,89
PB2.6 _{1/2}	32,30	30,92	95,73	13,72	13,03	94,95
PB2.7 _{1/2}	30,73	29,62	96,41	12,91	12,39	95,92
PB2.8 _{1/2}	34,32	32,98	96,09	14,25	13,62	95,59
Průměrná hodnota	32,4	31,1	96,0	13,5	12,9	95,3
Směr.výběrová odchylka	1,47	1,39	0,31	0,57	0,54	0,50
PB2.9 _{2/3}	31,03	28,70	92,49	12,74	11,12	87,31
PB2.10 _{2/3}	31,56	28,53	90,39	13,04	10,68	81,88
PB2.11 _{2/3}	31,08	29,14	93,74	13,00	10,32	79,39
PB2.12 _{2/3}	31,44	29,15	92,70	12,65	10,55	83,40
Průměrná hodnota	31,3	28,9	92,3	12,9	10,7	83,0
Směr.výběrová odchylka	0,26	0,31	1,40	0,19	0,34	3,32

I u statických modulů pružnosti betonu PB2 byla provedena statistická analýza. Po ověření normality souborů dat na hladině významnosti 0,05 byl opět proveden dvouvýběrový t-test, a to pro všechny úrovně zatížení. Vypočtené p-hodnoty jsou uvedeny v Tab. 38. Statistická analýza prokázala, že na zvolené hladině významnosti se liší střední hodnoty statických modulů pružnosti v tlaku a ve smyku zkušebních těles zatěžovaných napětím odpovídajícím 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.

Tab. 38 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	E_c	G_c
PB2 _{1/3}	0,287	0,242
PB2 _{1/2}	0,256	0,171
PB2 _{2/3}	0,000	0,000

Na Obr. 89 je zobrazen krabicový graf hodnot statického modulu pružnosti E_c před a po cyklickém statickém zatěžování betonu. Z grafu lze velmi dobře vidět, že čím vyšší byla hladina horního napětí při cyklickém zatěžování, tím významnější byl pokles modul pružnosti. Krabicový graf statického modulu pružnosti ve smyku je v příloze této práce.



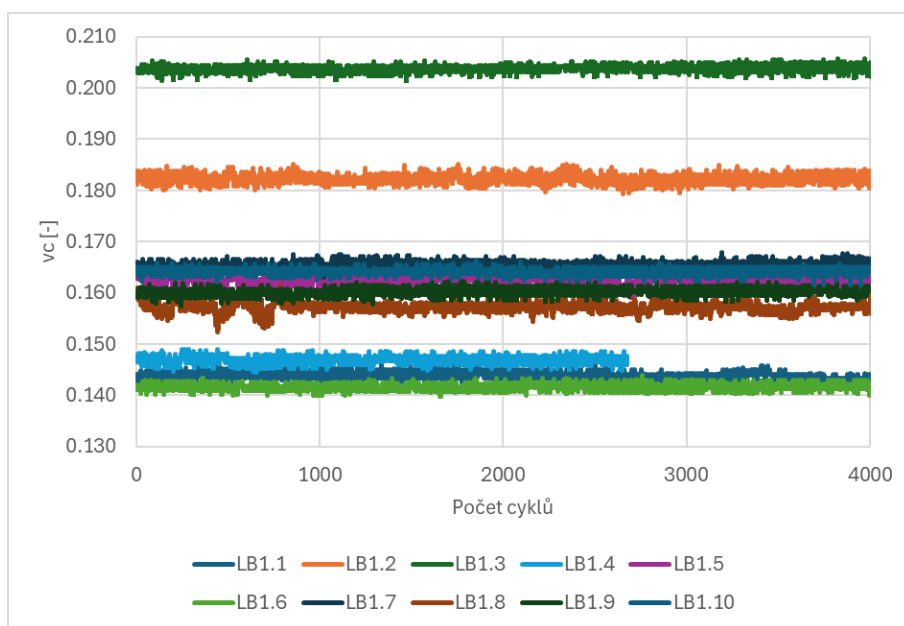
Obr. 89 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu PB2 během statického cyklického zatěžování

4.4.4. POISSONOVO ČÍSLO

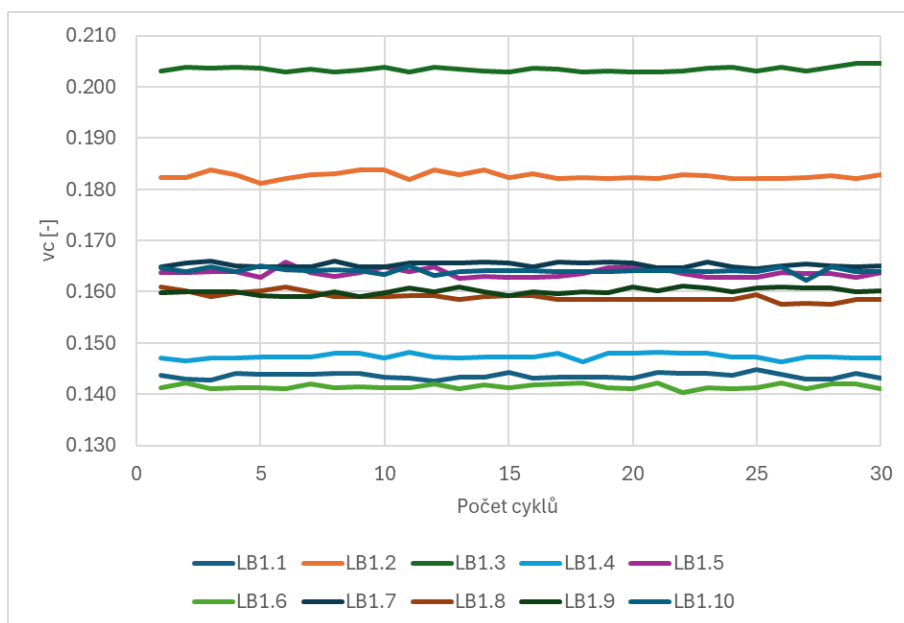
V této kapitole jsou vyhodnocena naměřená data během cyklického zatěžování, která stanovují poměr mezi příčnou a podélnou deformací – Poissonovo číslo. Jsou zde zobrazeny průběhy stanovených hodnot v jednotlivých cyklech statického Poissonova čísla, doplněny tabulkami, kde se nachází hodnoty dynamického Poissonova čísla před a po cyklickém zatěžování a také hodnoty statického Poissonova čísla vypočítané v prvním a posledním zatěžovacím cyklu.

LB1

Statické Poissonovo číslo stanovené v jednotlivých cyklech během opakovaného zatěžování je v grafu na Obr. 90 a Obr. 91. V grafu lze pozorovat neměnný trend této veličiny a tak lze předpokládat, že cyklické zatížení nemá významný vliv na hodnotu Poissonova čísla betonu LB1. Tento závěr následně potvrdila statistická analýza.



Obr. 90 Statické Poissonovo číslo LB1



Obr. 91 Statické Poissonovo číslo LB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů

Tabulka 39 obsahuje hodnoty Poissonova čísla betonu LB1 stanovené z naměřených dat. Zaznamenaný pokles, vyjádřený prostřednictvím relativního dynamického Poissonova čísla, pravděpodobně způsobuje jev tvorby mikrotrhlin, na který je rezonanční metoda citlivá, viz např. článek [111]. Cyklické zatěžování může způsobit ve vnitřní struktuře natolik malé mikroporuchy, že je není možné např. z vývoje statických vlastností během cyklování vůbec zaznamenat. Proto se také u některých betonů stalo, že se statické vlastnosti významně nezměnily, zatímco dynamické ano. Podobně je to u Poissonova čísla. Je zajímavé, že statické cyklické zatěžování způsobilo v některých případech (u některých betonů) nárůst hodnoty Poissonova čísla a u některých naopak pokles. U betonu LB1 došlo u dynamického Poissonova čísla k poklesu, a to dokonce o více než 20 %, zatímco u statického Poissonova čísla ke změně v podstatě nedošlo, anebo k velmi malé, a to jak směrem nahoru, tak směrem dolů. Z článku [111] mj. vyplývá, že při porušení vnitřní struktury materiálu nezáleží na směru změny Poissonova čísla (tedy zda dochází k poklesu, anebo naopak ke zvýšení jeho hodnoty), ale na absolutní hodnotě změny. V případě, že je vnitřní struktura poškozena velmi výrazně, nabývá vypočtené dynamické Poissonovo číslo dokonce hodnot mimo interval 0 až 0,5, neboť v těchto případech zcela přestávají platit teoretické poměry mezi vlastními frekvencemi jednotlivých druhů kmitání.

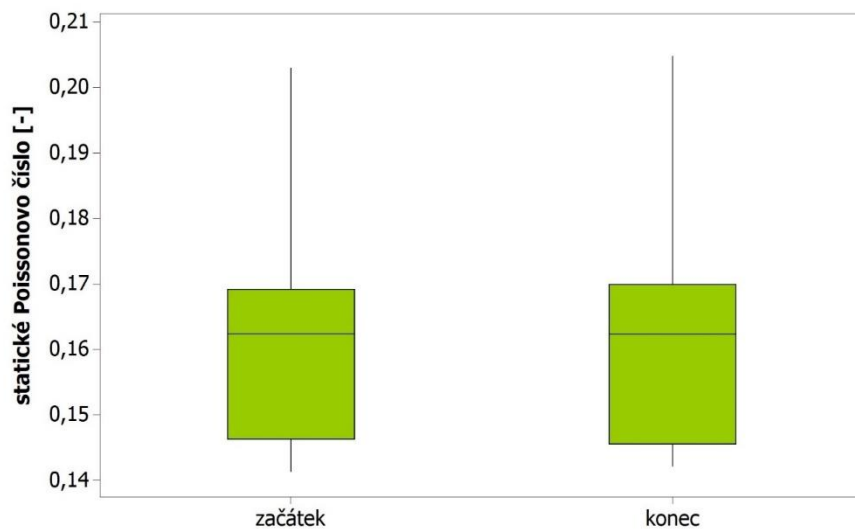
Tab. 39 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS LB1

Označení	$u_{cr,před} [-]$	$u_{cr,po} [-]$	RPČD [%]	$u_{c,před} [-]$	$u_{c,po} [-]$	RPČS [%]
LB1.1 _{1/3}	0,138	0,103	74,64	0,144	0,144	100,25
LB1.2 _{1/3}	0,140	0,118	84,29	0,182	0,181	99,47
LB1.3 _{1/3}	0,134	0,096	71,64	0,203	0,205	100,87
LB1.4 _{1/3}	0,128	0,108	84,38	0,147	0,146	99,26
LB1.5 _{1/3}	0,131	0,109	83,21	0,164	0,164	100,21
LB1.6 _{1/3}	0,152	0,120	78,95	0,141	0,142	100,58
LB1.7 _{1/3}	0,122	0,093	76,23	0,165	0,166	100,75
LB1.8 _{1/3}	0,129	0,106	82,17	0,161	0,157	97,36
LB1.9 _{1/3}	0,127	0,098	77,17	0,160	0,160	100,36
LB1.10 _{1/3}	0,135	0,109	80,74	0,165	0,165	100,09
LB1.11 _{1/3}	0,118	0,085	72,03	-	-	-
LB1.12 _{1/3}	0,117	0,079	67,52	-	-	-
Průměrná hodnota	0,13	0,10	77,75	0,16	0,16	99,92
Směr.výběrová odchylka	0,010	0,012	5,50	0,019	0,019	1,03

Statistická analýza prokázala, že:

- statické Poissonovo číslo ν_c se **neliší** (p-hodnota = 0,633),
- dynamické Poissonovo číslo ν_{cr} se **liší** (p-hodnota = 0,000).

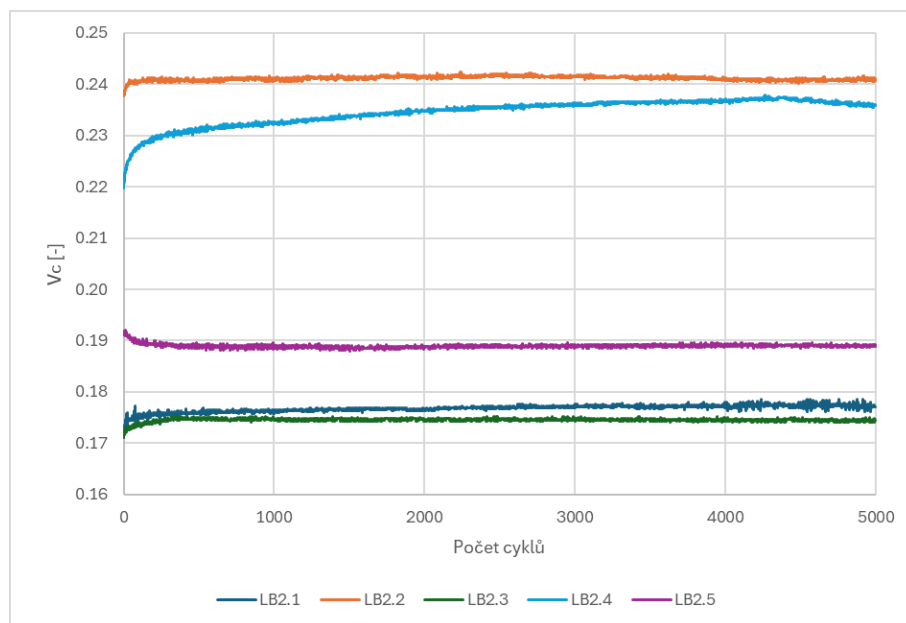
Na Obr. 92 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla ν_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf dynamického Poissonova čísla ν_{cr} je v příloze této práce.



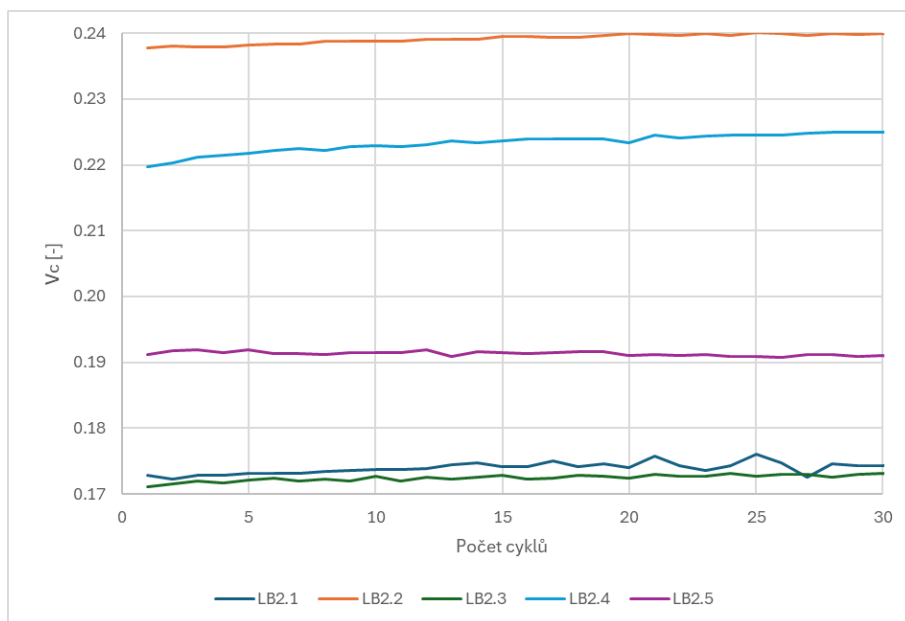
Obr. 92 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu LB1 během statického cyklického zatěžování

LB2

V grafu na Obr. 93-98 lze pozorovat vývoj hodnoty Poissonova čísla během cyklického zatěžování. Kromě zkušební tělesa, které nedokázalo odolat cyklickému zatížení na hladině odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku, lze pozorovat pouze mírně měnící se hodnoty Poissonova čísla v průběhu cyklického zatížení.

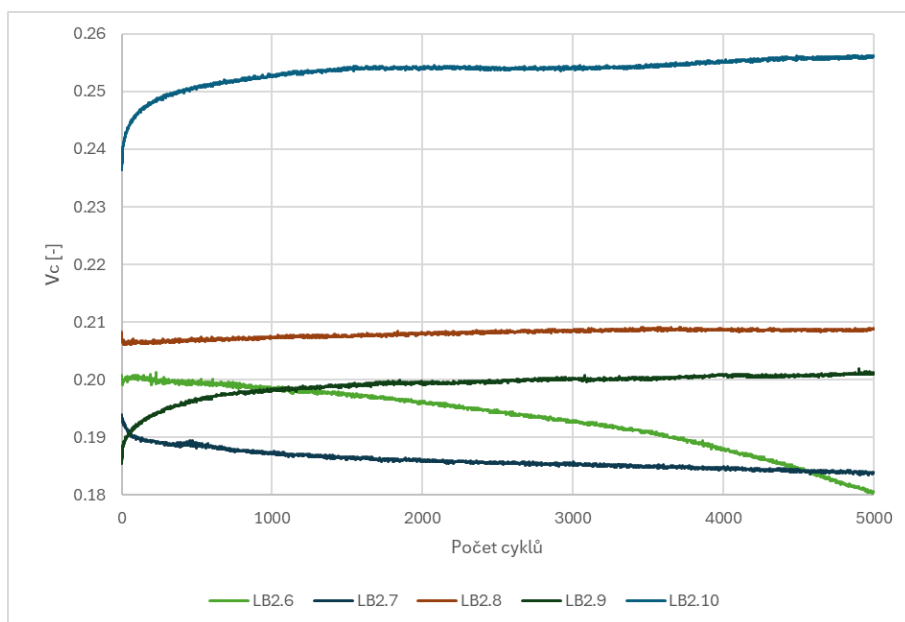


Obr. 93 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

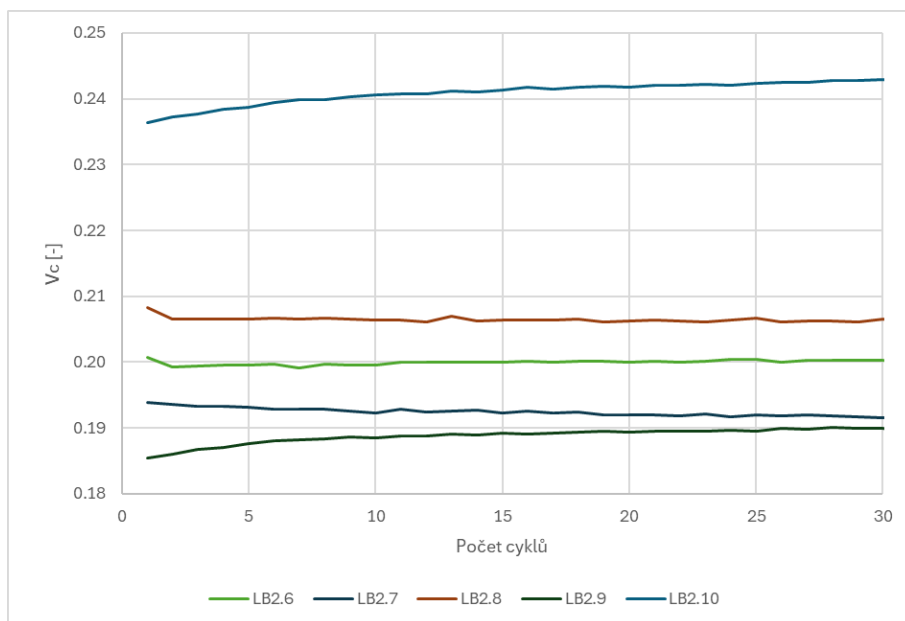


Obr. 94 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na následujících grafech je zobrazen průběh hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování při horní hladině zatěžování odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.

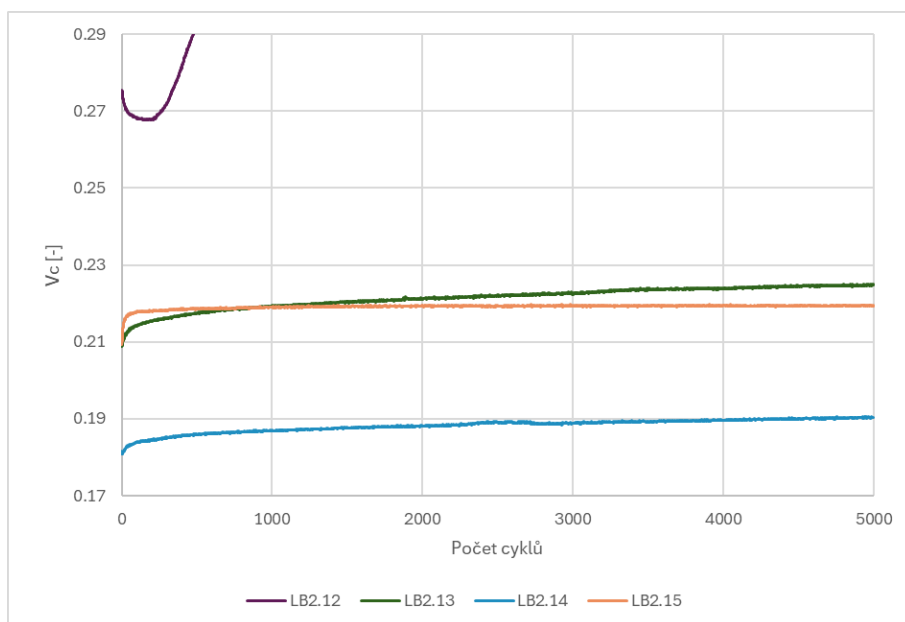


Obr. 95 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c

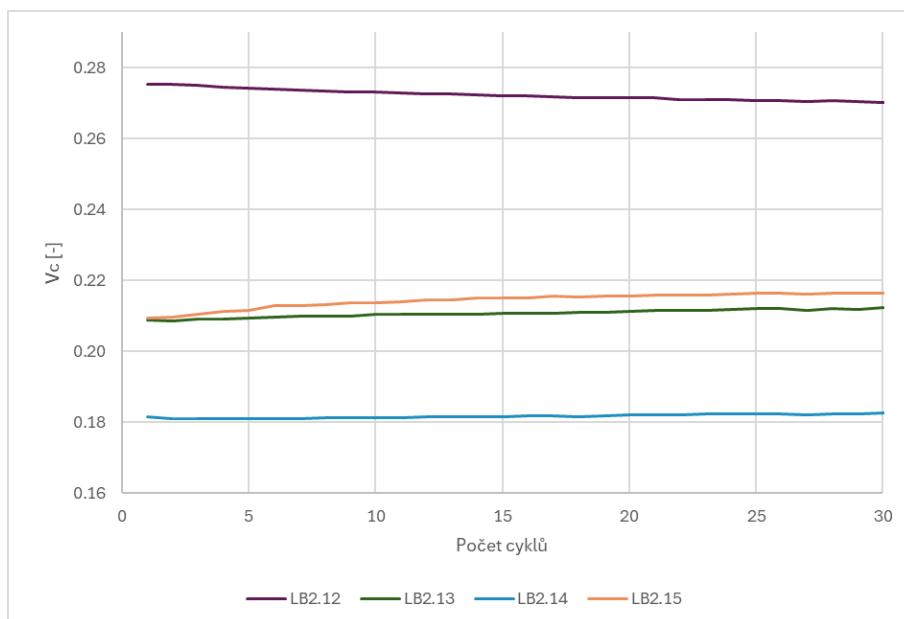


Obr. 96 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na následujících grafech je zobrazen průběh hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování při horní hladině zatěžování odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.



Obr. 97 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c



Obr. 98 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

V Tab. 40 jsou hodnoty Poissonova čísla betonu LB2 stanovené rezonanční metodou a z hodnot deformací během cyklického zatěžování.

Tab. 40 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS LB2

Označení	$u_{cr,před} [-]$	$u_{cr,po} [-]$	RPČD [%]	$u_{c,před} [-]$	$u_{c,po} [-]$	RPČS [%]
LB2.1 _{1/3}	0,345	0,304	88,12	0,173	0,178	102,77
LB2.2 _{1/3}	0,340	0,305	89,71	0,238	0,241	101,20
LB2.3 _{1/3}	0,304	0,282	92,76	0,172	0,175	101,58
LB2.4 _{1/3}	0,345	0,305	88,41	0,222	0,236	106,36
LB2.5 _{1/3}	0,361	0,304	84,21	0,192	0,189	98,68
Průměrná hodnota	0,34	0,30	88,64	0,20	0,20	102,12
Směr.výběrová odchylka	0,021	0,010	3,09	0,030	0,032	2,80
LB2.6 _{1/2}	0,310	0,316	101,94	0,200	0,189	94,77
LB2.7 _{1/2}	0,332	0,289	87,05	0,193	0,184	95,39
LB2.8 _{1/2}	0,316	0,310	98,10	0,207	0,209	100,88
LB2.9 _{1/2}	0,284	0,323	113,73	0,187	0,200	106,84
LB2.10 _{1/2}	0,304	0,297	97,70	0,239	0,255	106,79
Průměrná hodnota	0,31	0,31	99,70	0,21	0,21	100,93
Směr.výběrová odchylka	0,018	0,014	9,60	0,020	0,028	5,87
LB2.11 _{2/3}	0,292	-	-	-	-	-
LB2.12 _{2/3}	0,324	-	-	-	-	-
LB2.13 _{2/3}	0,322	0,335	104,04	0,209	0,224	106,80
LB2.14 _{2/3}	0,338	0,299	88,46	0,181	0,190	104,64
LB2.15 _{2/3}	0,274	0,420	153,28	0,212	0,219	103,69
Průměrná hodnota	0,31	0,35	115,26	0,20	0,21	105,04
Směr.výběrová odchylka	0,026	0,062	33,84	0,017	0,019	1,60

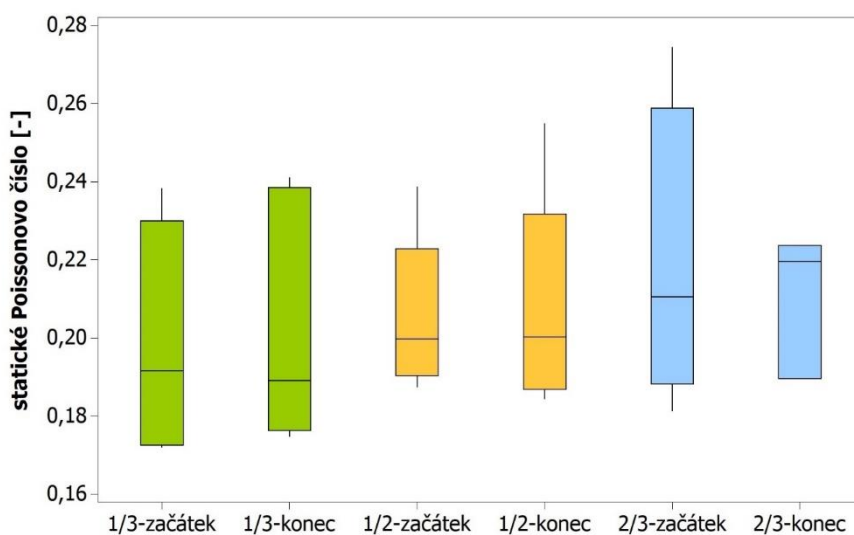
V Tab. 41 jsou p-hodnoty dvouvýběrových t-testů, které ukazují na odlišnost pouze dynamického Poissonova čísla ν_{cr} betonu LB2 zatěžovaného horní zatěžovací hladinou odpovídající 1/3 očekávané pevnosti v tlaku. U vlastnosti, u níž je jedno, zda se jeho hodnota zvýší či sníží, ale je důležité, o kolik se změní, není však výsledek takto provedeného statistického testu relevantní. Velmi dobře je to vidět u sady zatěžované do 2/3 očekávané pevnosti v tlaku. U jednoho tělesa se hodnota dynamického Poissonova čísla téměř nezměnila (zvýšila se o 4 %), u druhého došlo k poklesu o téměř 12 % a u třetího došlo ke zvýšení o více než 50 %(!). U sady, která byla zatěžována do 1/2 f_c , je situace podobná – RPČD se pohybuje od 87 % do 114 %. Pokud by byl statistický test koncipován jinak, např. všechny změny by byly ve stejném poměru přepočítány směrem k vyšším hodnotám, výsledek by byl jistě jiný. Lze proto konstatovat, že dynamické Poissonovo číslo

se statisticky významně liší, či že na základě jeho změn lze konstatovat, že v betonu vznikly významné mikroporuchy.

Tab. 41 *p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu LB2 před a po zatěžování*

Beton / modul pružnosti	ν_c	ν_{cr}
LB2 _{1/3}	0,828	0,014
LB2 _{1/2}	0,892	0,832
LB2 _{2/3}	0,527	0,388

Na Obr. 99 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla ν_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf dynamického Poissonova čísla ν_{cr} je v příloze této práce.



Obr. 99 *Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu LB2 během statického cyklického zatěžování*

OB1

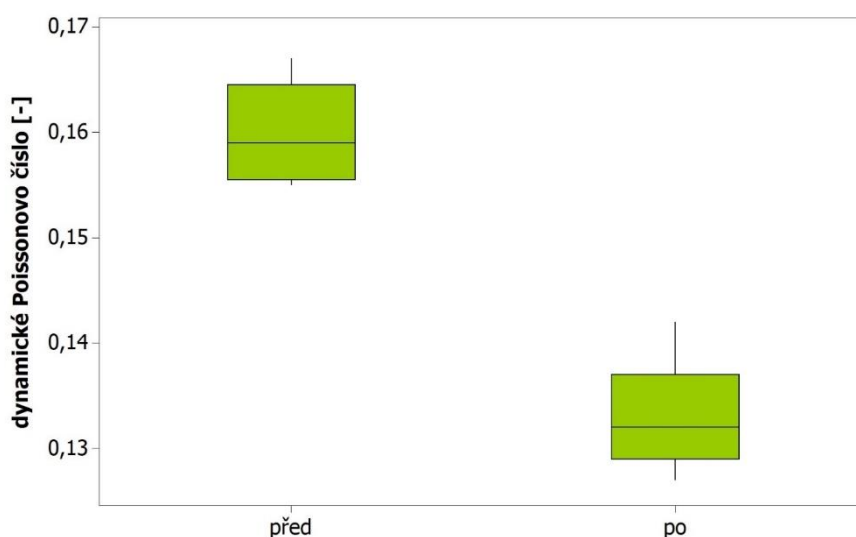
V Tab. 42 jsou hodnoty pouze dynamického Poissonova čísla stanovené rezonanční metodou, protože na zkušebních vzorcích nebyly naměřeny příčné poměrné deformace. Pokles hodnot sledovaného parametru naznačuje vznik mikrotrhlin ve vzorcích, na které je použita metoda měření citlivá.

Tab. 42 Dynamické Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD OB1

Označení	$u_{cr,před}$ [-]	$u_{cr,po}$ [-]	RPČD [%]
OB1.1 _{1/3}	0,155	0,132	85,16
OB1.2 _{1/3}	0,155	0,129	83,23
OB1.3 _{1/3}	0,164	0,142	86,59
OB1.4 _{1/3}	0,159	0,138	86,79
OB1.5 _{1/3}	0,156	0,127	81,41
OB1.6 _{1/3}	0,162	0,136	83,95
OB1.7 _{1/3}	0,167	0,136	81,44
OB1.8 _{1/3}	0,156	0,132	84,62
OB1.9 _{1/3}	0,165	0,129	78,18
Průměrná hodnota	0,16	0,13	83,48
Směr.výběrová odchylka	0,005	0,005	2,77

Statistická analýza prokázala, že na hladině významnosti 0,05 se střední hodnota dynamického Poissonova čísla významně **liší** (p-hodnota = 0,000) před a po statickém cyklickém zatěžování.

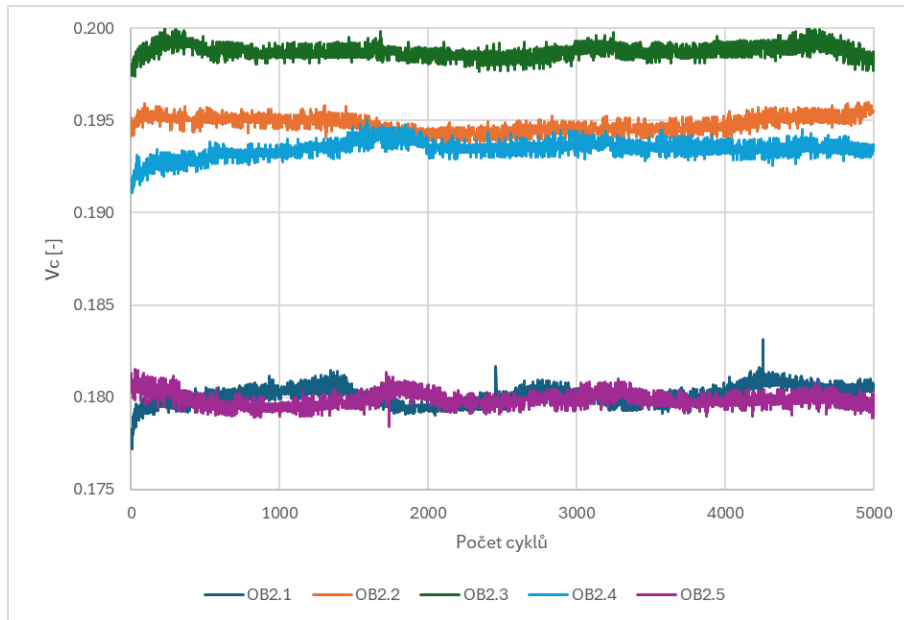
Na Obr. 100 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla v_{cr} před a po cyklickém statickém zatěžování.



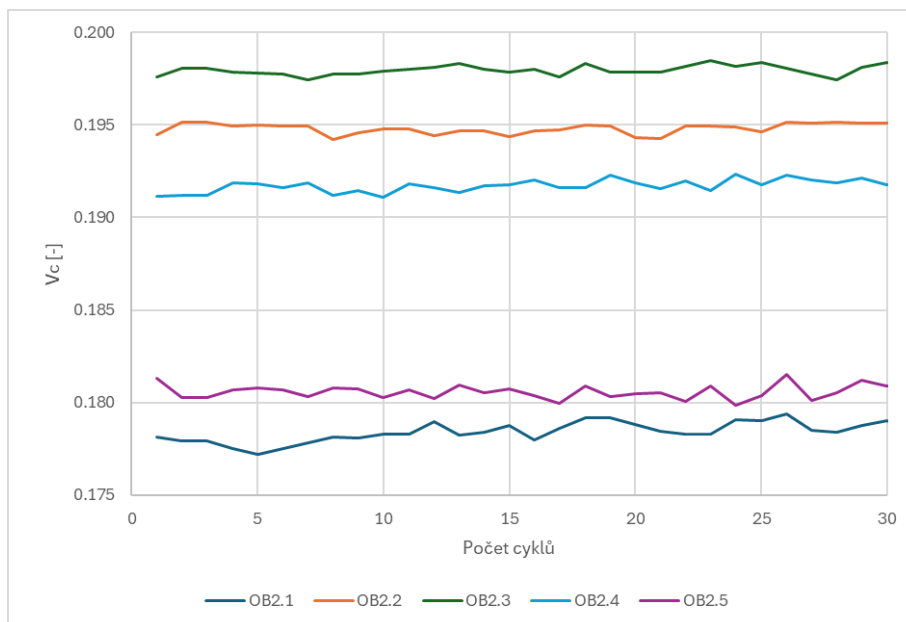
Obr. 100 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického Poissonova čísla v_{cr} betonu OB1 během statického cyklického zatěžování

OB2

Grafy na Obr. 101-104 zobrazují průběh hodnot Poissonova čísla během cyklického zatěžování. V prvních cyklech u většiny těles lze pozorovat mírný nárůst hodnoty tohoto parametru vlivem cyklického zatěžování.

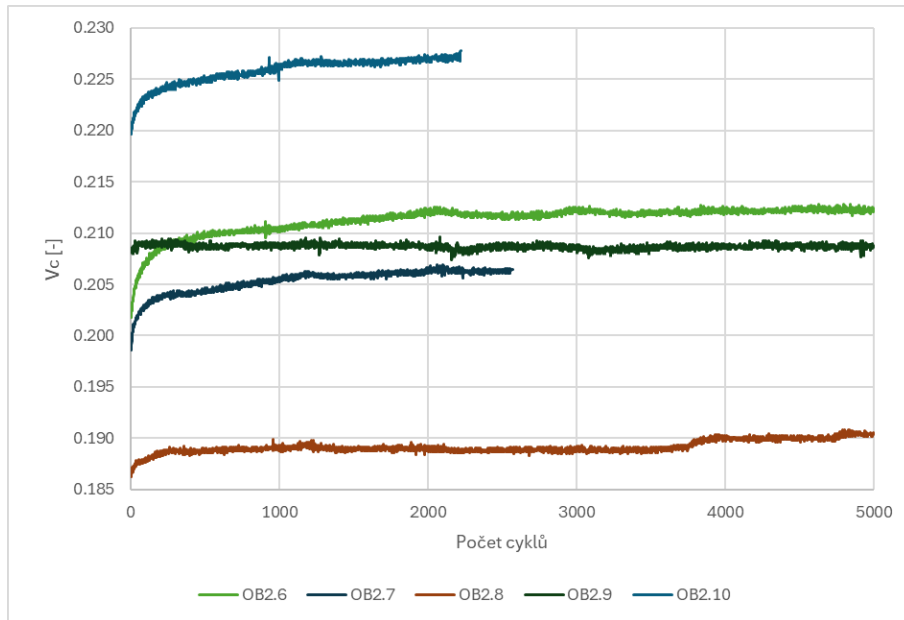


Obr. 101 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

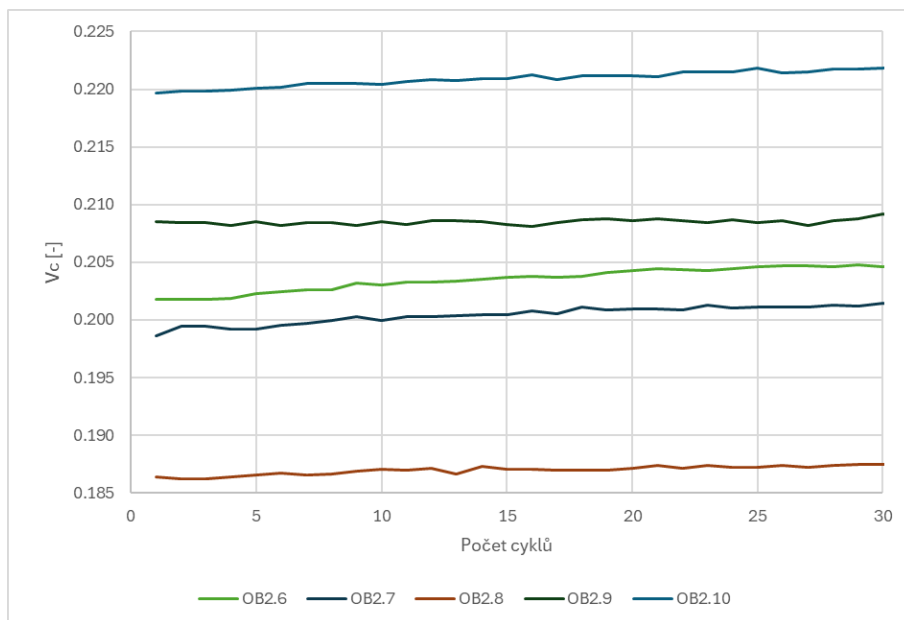


Obr. 102 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na následujících grafech je zobrazen průběh hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování při horní hladině zatěžování odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.



Obr. 103 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c



Obr. 104 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c prvních 30 zatěžovacích cyklů

V Tab. 43 jsou vyčísleny hodnoty Poissonova čísla statického i dynamického. Dynamické Poissonovo číslo mírně kleslo, zatímco hodnota statického poměru mírně vzrostla.

Tab. 43 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS OB2

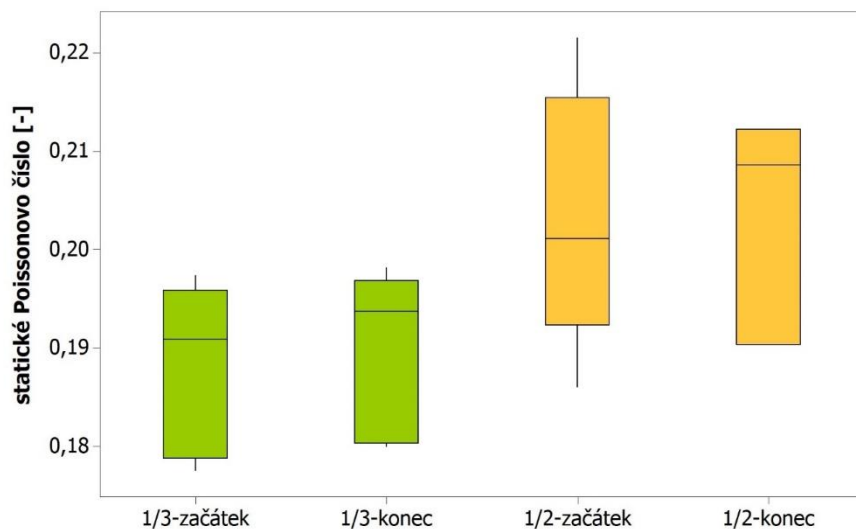
Označení	$\nu_{cr,před}$ [-]	$\nu_{cr,po}$ [-]	RPČD [%]	$\nu_{c,před}$ [-]	$\nu_{c,po}$ [-]	RPČS [%]
OB2.1 _{1/3}	0,198	0,179	90,40	0,177	0,181	101,80
OB2.2 _{1/3}	0,215	0,201	93,49	0,194	0,195	100,61
OB2.3 _{1/3}	0,224	0,202	90,18	0,197	0,198	100,42
OB2.4 _{1/3}	0,215	0,208	96,74	0,191	0,194	101,47
OB2.5 _{1/3}	0,206	0,191	92,72	0,180	0,180	99,95
Průměrná hodnota	0,21	0,20	92,71	0,19	0,19	100,85
Směr.výběrová odchylna	0,010	0,011	2,67	0,009	0,009	0,76
OB2.6 _{1/2}	0,206	0,173	83,98	0,201	0,212	105,53
OB2.7 _{1/2}	0,216	0,177	81,94	0,199	-	-
OB2.8 _{1/2}	0,212	0,185	87,26	0,186	0,190	102,37
OB2.9 _{1/2}	0,208	0,177	85,10	0,209	0,209	99,63
OB2.10 _{1/2}	0,211	-	-	0,222	-	-
Průměrná hodnota	0,21	0,18	84,57	0,20	0,20	102,51
Směr.výběrová odchylna	0,004	0,005	2,22	0,013	0,012	2,95

V Tab. 44 jsou p-hodnoty dvouvýběrových t-testů, které poukazují na odlišnost pouze dynamického Poissonova čísla ν_{cr} betonu OB2 zatěžovaného horní zatěžovací hladinou odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.

Tab. 44 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu OB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	ν_c	ν_{cr}
OB2 _{1/3}	0,751	0,057
OB2 _{1/2}	0,978	0,000

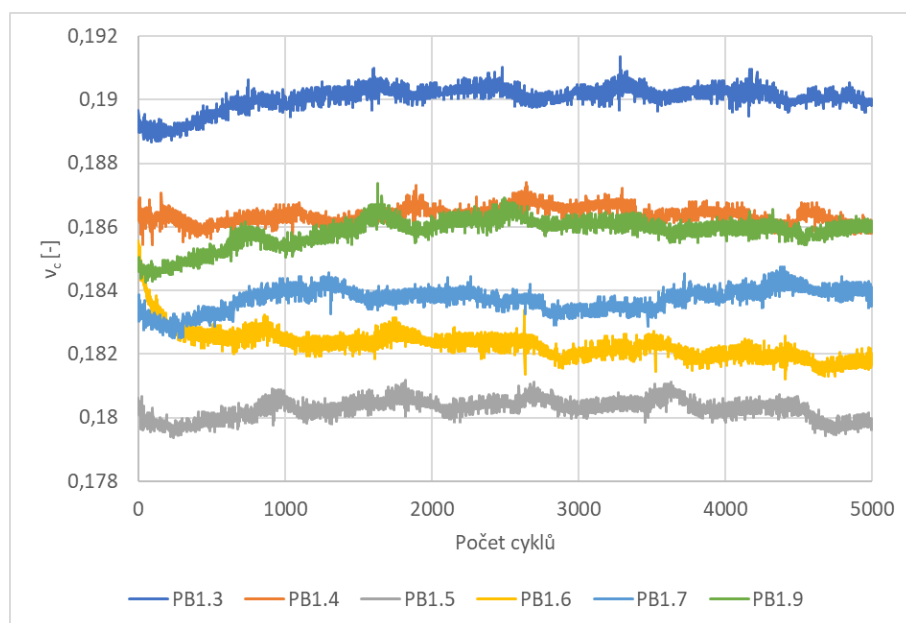
Na Obr. 105 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla ν_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf dynamického Poissonova čísla ν_{cr} je v příloze této práce.



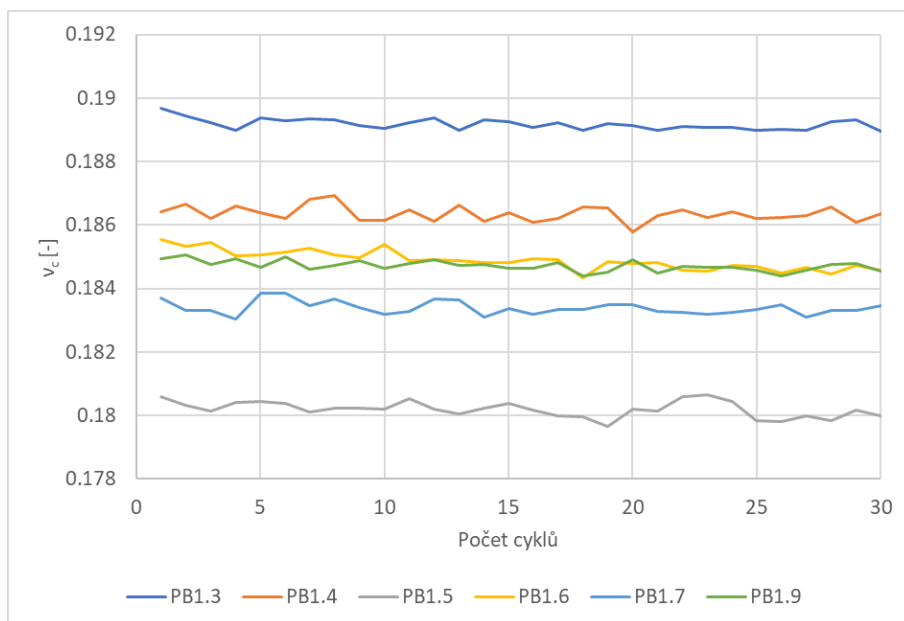
Obr. 105 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu OB2 během statického cyklického zatěžování

PB1

V grafu na Obr. 106 a Obr. 107 lze sledovat průběh statického Poissonova čísla betonu PB1. Jeho hodnota mírně kolísá, ovšem nedochází k výrazným změnám jeho hodnoty.



Obr. 106 Statické Poissonovo číslo PB1



Obr. 107 Statické Poissonovo číslo PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů

Dynamická i statická Poissonova čísla betonu PB1 jsou v Tab. 45. Z hodnot lze pozorovat, že cyklické zatěžování na statickou hodnotu sledovaného parametru nemělo téměř žádný účinek, zatímco na dynamický parametr ano – ten poklesl v průměru téměř o 15 %.

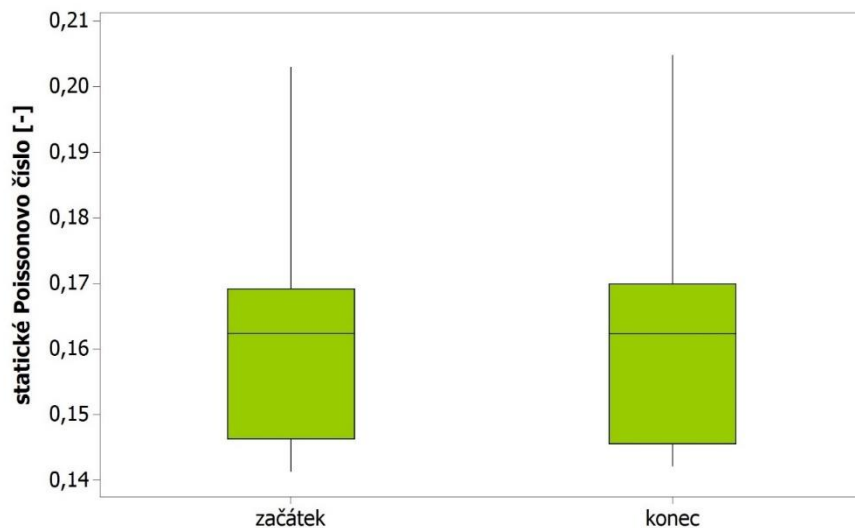
Tab. 45 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS PB1

Označení	$\nu_{cr,před}$ [-]	$\nu_{cr,po}$ [-]	RPČD [%]	$\nu_{c,před}$ [-]	$\nu_{c,po}$ [-]	RPČS [%]
PB1.3 _{1/3}	0,171	0,141	82,46	0,190	0,190	100,18
PB1.4 _{1/3}	0,163	0,137	84,05	0,186	0,186	99,66
PB1.5 _{1/3}	0,159	0,143	89,94	0,181	0,180	99,65
PB1.6 _{1/3}	0,167	0,142	85,03	0,186	0,182	98,06
PB1.7 _{1/3}	0,161	0,130	80,75	0,184	0,184	99,90
PB1.9 _{1/3}	0,157	0,141	89,81	0,185	0,186	100,58
Průměrná hodnota	0,16	0,14	85,34	0,19	0,18	99,67
Směr.výběrová odchylka	0,005	0,005	3,80	0,003	0,004	0,86

Statistická analýza prokázala, že:

- statické Poissonovo číslo ν_c se **neliší** (p-hodnota = 0,729),
- dynamické Poissonovo číslo ν_{cr} se **liší** (p-hodnota = 0,000).

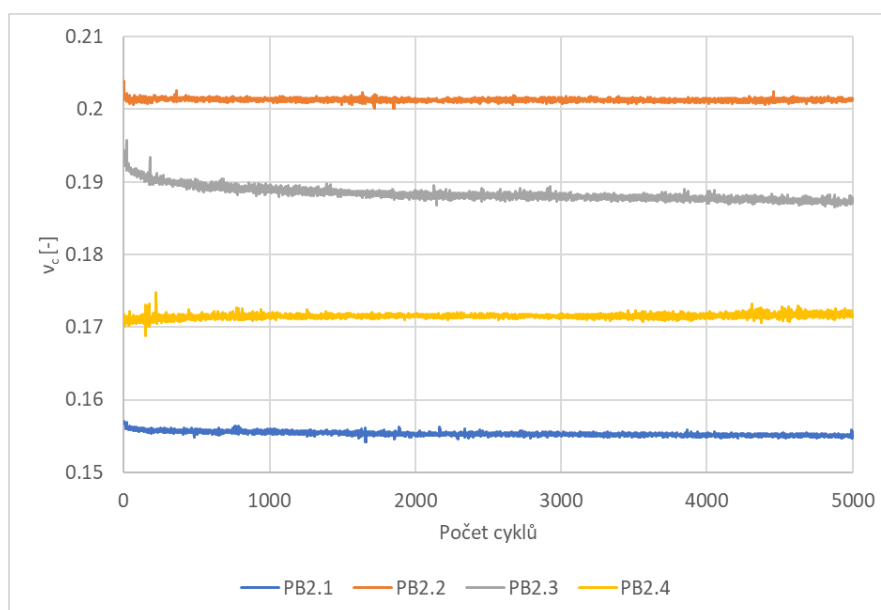
Na Obr. 108 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla ν_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf dynamického Poissonova čísla ν_{cr} je v příloze této práce.



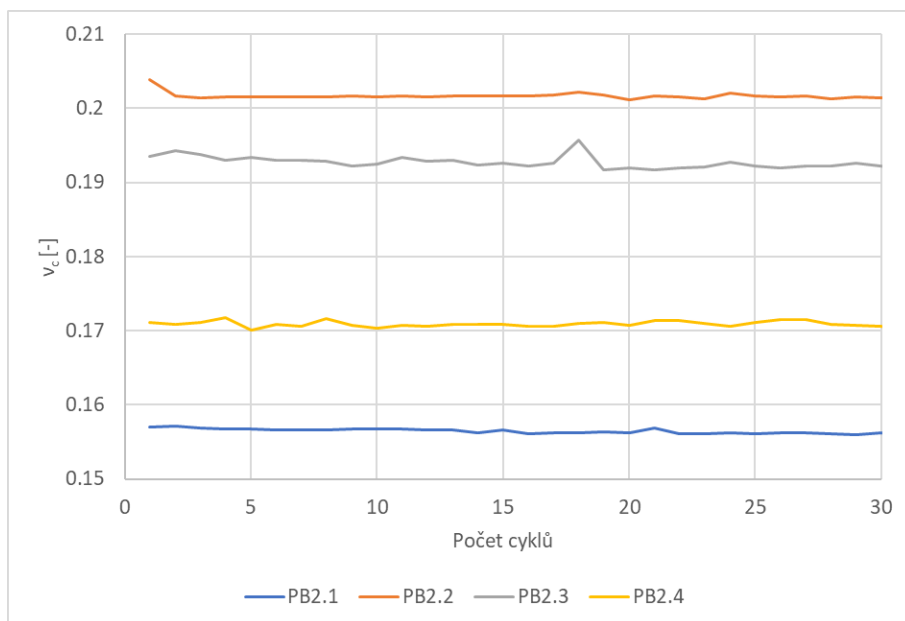
Obr. 108 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu PB1 během statického cyklického zatěžování

PB2

Vývoj hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování je zřetelný z grafu na Obr. 109-114.

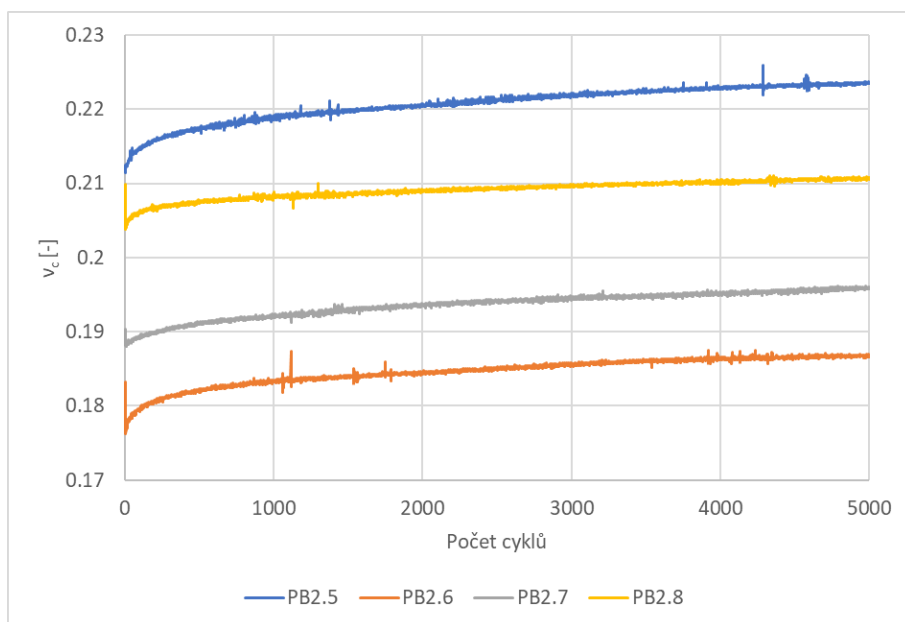


Obr. 109 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c

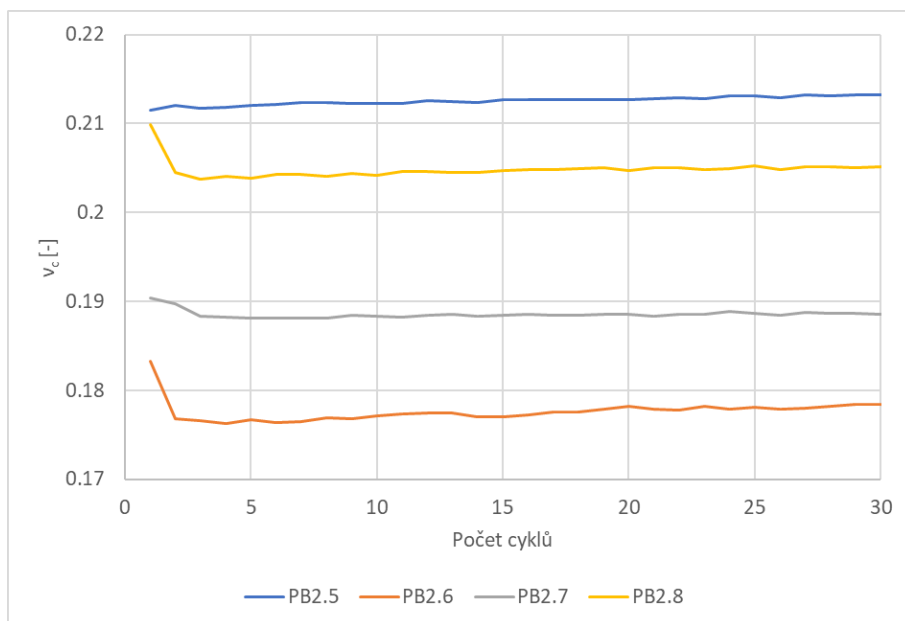


Obr. 110 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na následujících grafech je zobrazen průběh hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování při horní hladině zatěžování odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.

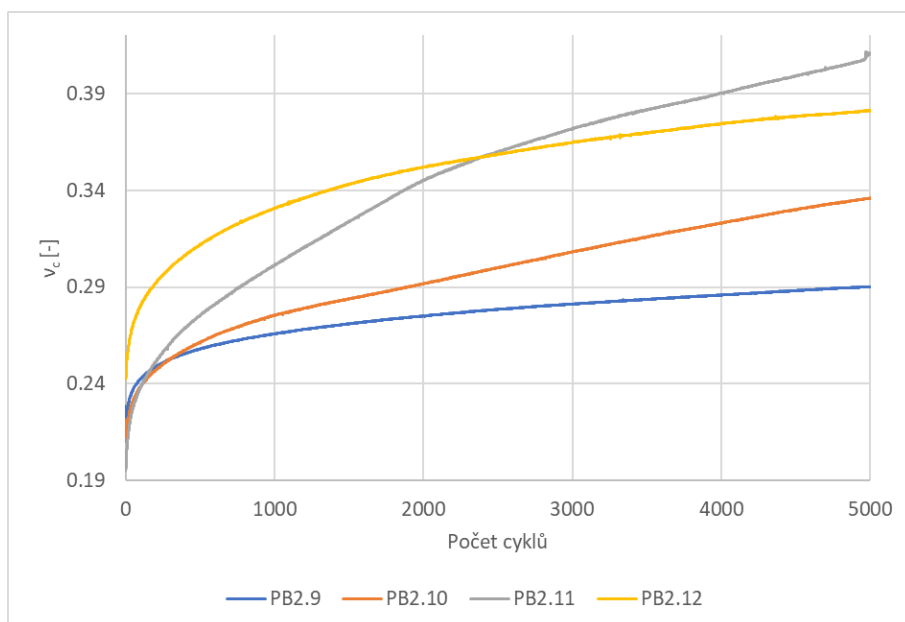


Obr. 111 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c

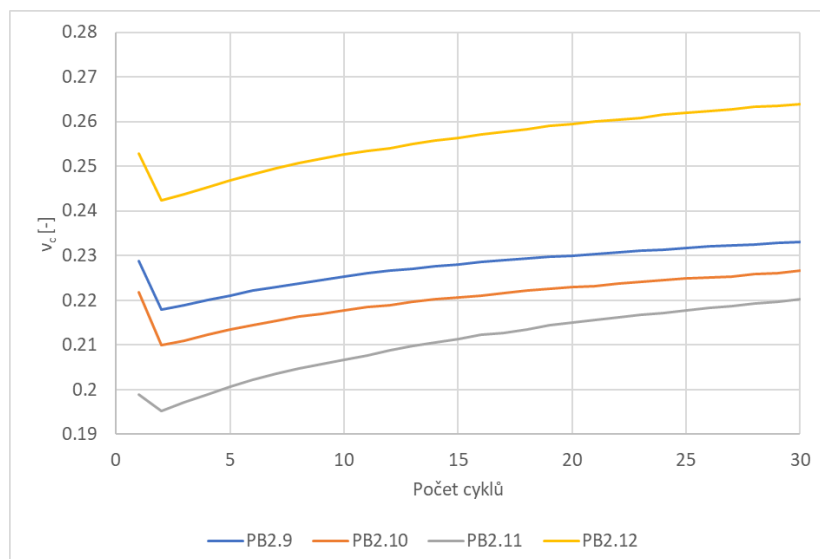


Obr. 112 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Na následujících grafech je zobrazen průběh hodnoty statického Poissonova čísla během cyklického zatěžování při horní hladině zatěžování odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.



Obr. 113 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c



Obr. 114 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů

Data v Tab. 46 ukazují, že cyklické zatěžování na vyšších zatěžovacích hladinách mělo významný vliv na hodnoty statického i dynamického Poissonova čísla betonu PB2.

Tab. 46 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS PB2

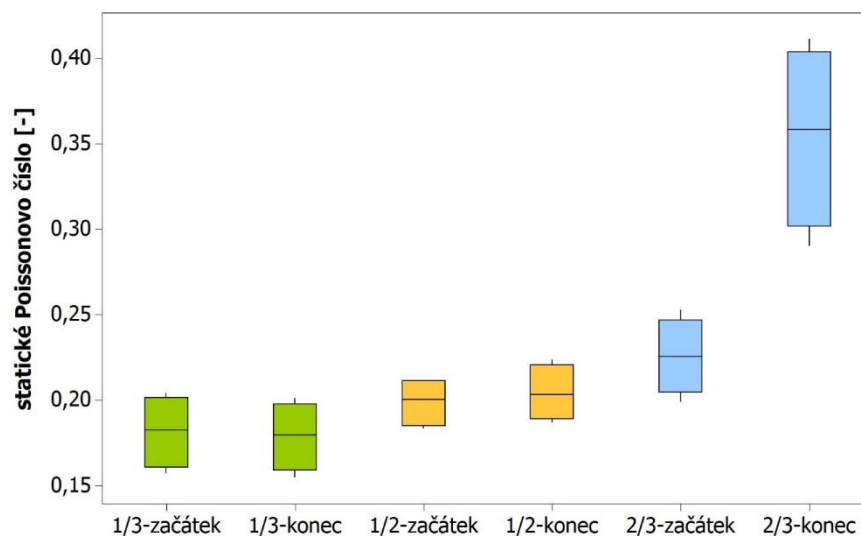
Označení	$u_{cr,před}$ [-]	$u_{cr,po}$ [-]	RPČD [%]	$u_{c,před}$ [-]	$u_{c,po}$ [-]	RPČS [%]
PB2.1 _{1/3}	0,178	0,148	83,15	0,157	0,155	98,51
PB2.2 _{1/3}	0,170	0,140	82,35	0,204	0,201	98,70
PB2.3 _{1/3}	0,159	0,131	82,39	0,193	0,187	96,77
PB2.4 _{1/3}	0,162	0,126	77,78	0,171	0,172	100,38
Průměrná hodnota	0,17	0,14	81,42	0,18	0,18	98,59
Směr.výběrová odchylka	0,009	0,010	2,45	0,021	0,020	1,48
PB2.5 _{1/2}	0,167	0,141	84,43	0,211	0,224	105,71
PB2.6 _{1/2}	0,167	0,130	77,84	0,183	0,187	101,83
PB2.7 _{1/2}	0,170	0,145	85,29	0,190	0,196	102,88
PB2.8 _{1/2}	0,153	0,113	73,86	0,210	0,211	100,38
Průměrná hodnota	0,16	0,13	80,36	0,20	0,20	102,70
Směr.výběrová odchylka	0,01	0,01	5,46	0,01	0,02	2,25
PB2.9 _{2/3}	0,180	0,177	98,33	0,229	0,290	126,83
PB2.10 _{2/3}	0,153	0,223	145,75	0,222	0,336	151,42
PB2.11 _{2/3}	0,160	0,228	142,50	0,199	0,411	206,69
PB2.12 _{2/3}	0,157	0,206	131,21	0,253	0,381	150,71
Průměrná hodnota	0,163	0,209	129,45	0,226	0,354	158,91
Směr.výběrová odchylka	0,012	0,023	21,66	0,022	0,053	33,84

V Tab. 47 jsou p-hodnoty dvouvýběrových t-testů, které poukazují na odlišnost dynamického Poissonova čísla ν_{cr} betonu PB2 pro všechny zatěžovací hladiny a odlišnost statického Poissonova čísla ν_c zatěžovaného horní zatěžovací hladinou odpovídající 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.

Tab. 47 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu PB2 před a po zatěžování

Beton / modul pružnosti	ν_c	ν_{cr}
PB2 _{1/3}	0,870	0,050
PB2 _{1/2}	0,603	0,017
PB2 _{2/3}	0,011	0,024

Na Obr. 115 je zobrazen krabicový graf hodnot statického Poissonova čísla ν_c před a po cyklickém statickém zatěžování. Krabicový graf dynamického Poissonova čísla ν_{cr} je v příloze této práce.



Obr. 115 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu PB2 během statického cyklického zatěžování

5. ZÁVĚR

Tato dizertační práce se zabývá vlivem statického cyklického zatěžování různých druhů betonu především na jejich modul pružnosti. Výzkum byl zaměřen na analýzu změn dynamických i statických hodnot modulů pružnosti v tlaku i ve smyku, ale také Poissonova čísla a pevnosti v tlaku v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů a na velikosti vnášeného napětí vzhledem k pevnosti betonu v tlaku.

Výsledky experimentů ukázaly, že opakované cyklické zatěžování může mít významný vliv na některé mechanické vlastnosti betonu. Bylo zjištěno, že dynamický i statický modul pružnosti betonu se mohou měnit s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů. Konkrétní změny závisí na druhu betonu, jeho složení i na úrovni zatěžování. Výzkum prokázal, že při vyšších úrovních zatěžování dochází k rychlejším a výraznějším změnám sledovaných vlastností.

Výsledky rovněž ukázaly rozdíly mezi různými druhy betonu. Lehký beton a provzdušněný beton vykazovaly odlišné reakce na cyklické zatěžování ve srovnání s obyčejným hutným betonem. Toto zjištění je důležité pro praktické aplikace, kde různé druhy betonu mohou být vystaveny různým zatěžovacím podmínkám.

Obecně lze říci, že větších změn v důsledku cyklického statického zatěžování dosahovaly dynamické vlastnosti betonu. Statické vlastnosti se často významně nezměnily, případně až při vyšších úrovních zatěžování. Lze proto konstatovat, že během cyklického zatěžování v tlaku v řádu tisíců cyklů pravděpodobně dochází ke vzniku mikroporuch ve vnitřní struktuře betonu. Tato mikroporušení jsou však většinou natolik malá, že se u statických vlastností, především u pevnosti v tlaku, vůbec neprojeví. Naopak je dokázkou odhalit metody dynamické, zejména rezonanční metoda prostřednictvím modulů pružnosti i Poissonova čísla.

Statická analýza prokázala významnou odlišnost středních hodnot dynamických modulů pružnosti u všech zkoušených betonů po statickém zatěžování tisíci zatěžovacími cykly. Jedinou výjimkou byl obyčejný hutný beton OB2, u kterého se při cyklování do zatěžovací úrovně odpovídající 1/3 očekávané pevnosti v tlaku střední hodnoty

dynamických modulů pružnosti významně nezměnily. Při cyklování do zatěžovací hladiny odpovídající 1/2 očekávané pevnosti v tlaku byly střední hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu OB2 statisticky odlišné, kromě dynamického modulu pružnosti ve smyku.

Naopak statický modul pružnosti v tlaku a ve smyku a také statické Poissonovo číslo nebylo statisticky významně ovlivněno provedeným cyklickým zatěžováním u většiny zkoušených betonů. Výjimkou byl obyčejný hutný beton OB1 (modul pružnosti v tlaku), provzdušněný beton PB1 (modul pružnosti v tlaku i ve smyku) a provzdušněný beton PB2 (všechny statické parametry pouze při zatěžování až do 2/3 očekávané pevnosti v tlaku).

Výsledky této dizertační práce mohou přispět k lepšímu porozumění chování betonu při statickém cyklickém zatěžování a mohou poskytnout cenné poznatky pro vývoj přesnějších prediktivních modelů pro odhad životnosti betonových konstrukcí. Tyto poznatky mohou být využity pro optimalizaci návrhu a údržby betonových konstrukcí, čímž přispívají k jejich udržitelnosti a trvanlivosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DE LANA, Jennifer, Pedro JÚNIOR, Cristina MAGALHãES, Ana MAGALHãES, Aniceto DE ANDRADE JUNIOR a Mariana DE BARROS RIBEIRO. Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section. *Engineering Structures* [online]. 2021, **227** [cit. 2024-05-10]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2020.111403
- [2] SARKAR, Kaustav, Amit SHIULY a Krishna DHAL. Revolutionizing concrete analysis: An in-depth survey of AI-powered insights with image-centric approaches on comprehensive quality control, advanced crack detection and concrete property exploration. *Construction and Building Materials* [online]. 2024, **411** [cit. 2024-05-10]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.134212
- [3] ZHANG, Shihang, Sherong ZHANG, Chao WANG, Guojin ZHU, Han LIU a Xiaohua WANG. Extended IFC-based information exchange for construction management of roller-compacted concrete dam. *Automation in Construction* [online]. 2024, **163** [cit. 2024-05-09]. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2024.105427
- [4] CHANDRABHAN, Singh a Gupta PRAMOD KUMAR. Biaxial behaviour of concrete and its failure mechanics under quasi-static and dynamic loading: A numerical study. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2024, **300** [cit. 2024-05-10]. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2024.109931
- [5] CHEN, Z.Q., H. WU a Y.H. CHENG. Dynamic behaviors of concrete gravity dam against combined blast wave and bubble pulsation of underwater explosion. *Ocean Engineering* [online]. 2024, **302** [cit. 2024-05-10]. ISSN 00298018. Dostupné z: doi:10.1016/j.oceaneng.2024.117677
- [6] BADIKA, Menes, Sophie CAPDEVIELLE, Pascal FORQUIN, Dominique SALETTI a Matthieu BRIFFAUT. Experimental study of the shear behavior of concrete-rock interfaces under static and dynamic loading in the context of low confinement stress. *Engineering Structures* [online]. 2024, **309** [cit. 2024-05-10]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2024.118059
- [7] PARK, Young-Ji a Alfredo ANG. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering* [online]. 1985, **1985**(111), 722-739 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722)
- [8] FATHI, Hamoon a Hooshang DABBAGH. Damage mechanism of SCC under cyclic loading with different speed. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **101**, 252-259 [cit. 2024-05-09]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.103
- [9] GAUTHIER, Jeffrey a Bill WOOLDRIDGE. Influences on Sustainable Innovation Adoption: Evidence from Leadership in Energy and Environmental Design. *Business Strategy and the Environment* [online]. 2012, **21**(2), 98-110 [cit. 2024-05-10]. ISSN 0964-4733. Dostupné z: doi:10.1002/bse.716
- [10] REVILLA-CUESTA, Víctor, Javier MANSO-MORATO, Nerea HURTADO-ALONSO, Marta SKAF a Vanesa ORTEGA-LÓPEZ. Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component. *Journal*

- of Building Engineering* [online]. 2024, **82** [cit. 2024-05-10]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2023.108383
- [11] GUAYGUA, Byron, Antonio SÁNCHEZ-GARRIDO a Victor YEPES. A systematic review of seismic-resistant precast concrete buildings. *Structures* [online]. 2023, **58** [cit. 2024-05-10]. ISSN 23520124. Dostupné z: doi:10.1016/j.istruc.2023.105598
- [12] LU, Xinzheng, Vagelis PLEVRIS, George TSIATAS a Dario DE DOMENICO. Editorial: Artificial Intelligence-Powered Methodologies and Applications in Earthquake and Structural Engineering. *Frontiers in Built Environment* [online]. 2022, **8** [cit. 2024-05-09]. ISSN 2297-3362. Dostupné z: doi:10.3389/fbuil.2022.876077
- [13] KHAN, Mohammad, Galal FARES, Yassir ABBAS a Fahad ALQAHTANI. Eco-Innovative UHPC—Enhancing Sustainability, Workability, and Ductility with Recycled Glass Cullet Powder and Plastic Bottle Hybrid Fibers. *Materials* [online]. 2024, **17**(2) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17020393
- [14] TROTTIER, Cassandra a Leandro SANCHEZ. Damage Generated and Propagated by the AAR Reactive Aggregate from Kingston, Ontario, Canada. *Materials* [online]. 2024, **17**(1) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17010166
- [15] TAMIMI, Adil, Sami TABSH a Magdi EL-EMAM. Pervious Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate and Reinforced with Date Palm Leaves Fibers. *Materials* [online]. 2023, **16**(23) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16237496
- [16] CHOWDHURY, Rumpa, Mir AL BIRUNI, Antara AFIA, Mehedi HASAN, Mohammed ISLAM a Tanvir AHMED. Medical Waste Incineration Fly Ash as a Mineral Filler in Dense Bituminous Course in Flexible Pavements. *Materials* [online]. 2023, **16**(16) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16165612
- [17] WAŁACH, Daniel. Analysis of Factors Affecting the Environmental Impact of Concrete Structures. *Sustainability* [online]. 2021, **13**(1) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su13010204
- [18] HUANG, Kailin, Xinjie WANG, Fajing WANG a Tianrui ZHANG. Mechanical Properties and Loading Simulation of Unidirectional Laminated Slabs Made from Recycled Concrete with Manufactured Sand. *Buildings* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings14030674
- [19] CHEN, Feixiang, Wangyang XU, Qing WEN, Guozhi ZHANG, Liuliu XU, Dingqiang FAN a Rui YU. Advancing Concrete Mix Proportion through Hybrid Intelligence: A Multi-Objective Optimization Approach. *Materials* [online]. 2023, **16**(19) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16196448
- [20] AHMAD, Shamsad a Saeid ALGHAMDI. A Statistical Approach to Optimizing Concrete Mixture Design. *The Scientific World Journal* [online]. 2014, **2014**, 1-7 [cit. 2024-05-11]. ISSN 2356-6140. Dostupné z: doi:10.1155/2014/561539
- [21] ABBAS, S., M. NEHDI a M. SALEEM. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 271-295 [cit. 2024-05-11]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0157-4

- [22] KIM, Taehyoung, Sungho TAE a Chang CHAE. Analysis of Environmental Impact for Concrete Using LCA by Varying the Recycling Components, the Compressive Strength and the Admixture Material Mixing. *Sustainability* [online]. 2016, **8**(4) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su8040389
- [23] YANG, Yan'e, Bo PANG, Yunsheng ZHANG, Minghui WANG, Gaixia MIAO a Aoxiang ZHOU. A Review of Waterborne Polymer–Cementitious Composite Repair Materials for Application in Saline Soil Environments: Properties and Progress. *Buildings* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings14030848
- [24] NENADOVIĆ, Aleksandra a Jelena MILOŠEVIĆ. Creating Sustainable Buildings: Structural Design Based on the Criterion of Social Benefits for Building Users. *Sustainability* [online]. 2022, **14**(4) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su14042133
- [25] FELMER, Gabriel, Rodrigo MORALES-VERA, Rodrigo ASTROZA, Ignacio GONZÁLEZ, Maureen PUETTMANN a Mark WISHNIE. A Lifecycle Assessment of a Low-Energy Mass-Timber Building and Mainstream Concrete Alternative in Central Chile. *Sustainability* [online]. 2022, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su14031249
- [26] BAUTISTA, Brian, Jason ONGPENG a Luis RAZON. LCA of Mortar with Calcined Clay and Limestone Filler in RC Column Retrofit. *Sustainability* [online]. 2022, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su14031175
- [27] ALOTHAIMEEN, Ibraheem, David ARDITI a Osman TÜRKAKIN. Multi-objective optimization for LEED - new construction using BIM and genetic algorithms. *Automation in Construction* [online]. 2023, **149** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2023.104807
- [28] DUBLJEVIĆ, Sanja, Bojan TEPAVČEVIĆ, Aleksandra STEFANOVIĆ a Aleksandar ANĐELKOVIĆ. BIM to BREEAM: A workflow for automated daylighting assessment of existing buildings. *Energy and Buildings* [online]. 2024, **312** [cit. 2024-05-11]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2024.114208
- [29] DOAN, Dat, Ali GHAFARIANHOSEINI, Nicola NAISMITH, Tongrui ZHANG, Amirhosein GHAFARIANHOSEINI a John TOOKEY. A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment* [online]. 2017, **123**, 243-260 [cit. 2024-05-10]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2017.07.007
- [30] KIM, Hyemi a Wonjun PARK. A Study of the Energy Efficiency Management in Green Standard for Energy and Environmental Design (G-SEED)-Certified Apartments in South Korea. *Sustainability* [online]. 2018, **10**(10) [cit. 2024-05-10]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su10103402
- [31] OPON, Joel a Michael HENRY. An indicator framework for quantifying the sustainability of concrete materials from the perspectives of global sustainable development. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **218**, 718-737 [cit. 2024-05-10]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.220
- [32] FREITAS, Iuri a Xingxing ZHANG. Green building rating systems in Swedish market - A comparative analysis between LEED, BREEAM SE, GreenBuilding and

- Miljöbyggnad. *Energy Procedia* [online]. 2018, **153**, 402-407 [cit. 2024-05-10]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2018.10.066
- [33] Life Cycle Assessment - Root Sustainability. In: *Life Cycle Assessment - Root Sustainability* [online]. 2022 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://root-sustainability.com/knowledgehub-life-cycle-assessment/>
- [34] TANG, S.W., Y. YAO, C. ANDRADE a Z.J. LI. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, **78**, 143-154 [cit. 2024-05-09]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.021
- [35] SUN, Wei, Ru MU, Xin LUO a Changwen MIAO. Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2002, **32**(12), 1859-1864 [cit. 2024-05-11]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(02)00769-X
- [36] MOSTOFINEJAD, Davood, Hadi BAHMANI, Abolfazl KHORSHIDIFAR a Reza AFSHARPOUR. Enhancing concrete durability with polymer impregnation: A comparative study of corrosion and freeze-thaw resistance. *Developments in the Built Environment* [online]. 2024, **18** [cit. 2024-05-11]. ISSN 26661659. Dostupné z: doi:10.1016/j.dibe.2024.100414
- [37] BANTHIA, N., A. BIPARVA a S. MINDESS. Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research* [online]. 2005, **35**(9), 1651-1655 [cit. 2024-05-11]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.044
- [38] FENG, Qiong, Xiaoyang XIE, Penghui WANG, Hongxia QIAO, Yunsheng ZHANG a Yunxia MA. Prediction of durability of reinforced concrete based on hybrid-Bp neural network. *Construction and Building Materials* [online]. 2024, **425** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.136091
- [39] HUANG, Dagan, Ying FENG, Qian XIA, Jianbo TIAN a Xiufei LI. Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2024, **425** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135988
- [40] DESMETTRE, C. a J.-P. CHARRON. Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading. *Cement and Concrete Research* [online]. 2012, **42**(7), 945-952 [cit. 2024-05-11]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2012.03.014
- [41] KATZER, Jacek, Jacek HALBINIAK, Bogdan LANGIER, Maciej MAJOR a Izabela MAJOR. Influence of Varied Waste Ceramic Fillers on the Resistance of Concrete to Freeze-Thaw Cycles. *Materials* [online]. 2021, **14**(3) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14030624
- [42] ZHAO, Ruize, Chenglin SHI, Ruixin ZHANG, Wensheng WANG, Huirong ZHU a Jing LUO. Study on the Freeze-Thaw Resistance of Concrete Pavements in Seasonally Frozen Regions. *Materials* [online]. 2024, **17**(8) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17081902
- [43] LIU, Hanbing, Guobao LUO, Yafeng GONG a Haibin WEI. Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete Modified by Waste Crumb Rubbers. *Applied Sciences* [online]. 2018, **8**(10) [cit. 2024-05-12]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8101843

- [44] XIAO, Jie, Hehui ZENG, Huanqiang HUANG, Lingfei LIU, Long LI, Bingxiang YUAN a Zucai ZHONG. Experimental Investigation on the Influence of Strength Grade on the Surface Fractal Dimension of Concrete under Sulfuric Acid Attack. *Buildings* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings14030713
- [45] HODUL, Jakub, Jana HODNÁ, Lenka MÉSZÁROSOVÁ a Ruben BORG. Experimental Comparison of Efficiency of Water-Soluble and Solvent Hydrophobic Agents for Concrete. *Buildings* [online]. 2022, **12**(11) [cit. 2024-05-12]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings12111857
- [46] ALAHMARI, Turki, Tareg ABDALLA a Mohammed RIHAN. Review of Recent Developments Regarding the Durability Performance of Eco-Friendly Geopolymer Concrete. *Buildings* [online]. 2023, **13**(12) [cit. 2024-05-12]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings13123033
- [47] ALTHOEY, Fadi, Osama ZAID, Mohamed ARBILI, Rebeca MARTÍNEZ-GARCÍA, Ali ALHAMAMI, Hammad SHAH a Ahmed.M. YOSRI. Physical, strength, durability and microstructural analysis of self-healing concrete: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2023, **18** [cit. 2024-05-11]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2022.e01730
- [48] AL-WAKED, Qusai, Jiping BAI, John KINUTHIA a Paul DAVIES. Durability and microstructural analyses of concrete produced with treated demolition waste aggregates. *Construction and Building Materials* [online]. 2022, **347** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128597
- [49] ZHANG, Mingming, Henglin LV, Shuchun ZHOU, Yuanzhou WU, Xiaowei ZHENG a Qiyao YAN. Study on the Frost Resistance of Composite Limestone Powder Concrete against Coupling Effects of Sulfate Freeze–Thaw. *Buildings* [online]. 2023, **13**(11) [cit. 2024-05-12]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings13112776
- [50] BERTOLA, Numa, Philippe SCHILTZ, Emmanuel DENARIÉ a Eugen BRÜHWILER. A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in Switzerland. *Frontiers in Built Environment* [online]. 2021, **7** [cit. 2024-05-11]. ISSN 2297-3362. Dostupné z: doi:10.3389/fbuil.2021.769686
- [51] PEREIRA, Mauricio a Branko GLISIC. Physics-Informed Data-Driven Prediction of 2D Normal Strain Field in Concrete Structures. *Sensors* [online]. 2022, **22**(19) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22197190
- [52] FERNANDEZ, Ignasi, Carlos BERROCAL a Rasmus REMPLING. Long-Term Performance of Distributed Optical Fiber Sensors Embedded in Reinforced Concrete Beams under Sustained Deflection and Cyclic Loading. *Sensors* [online]. 2021, **21**(19) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21196338
- [53] European standards - CEN-CENELEC. In: *European standards - CEN-CENELEC* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.cencenelec.eu/european-standardization/european-standards/>
- [54] ASTM International - Standards Worldwide. In: *ASTM International - Standards Worldwide* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.astm.org/>

- [55] YU, Xuanrui, Jiehong LI, Yang YU a Anxiang SONG. Advancing service life estimation of reinforced concrete considering the coupling effects of multiple factors: Hybridized physical testing and machine learning approach. *Journal of Building Engineering* [online]. 2024, **84** [cit. 2024-05-11]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2024.108476
- [56] NA, Okpin, Xiao-Chuan CAI a Yunping XI. Corrosion Prediction with Parallel Finite Element Modeling for Coupled Hygro-Chemo Transport into Concrete under Chloride-Rich Environment. *Materials* [online]. 2017, **10**(4) [cit. 2024-05-09]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10040350
- [57] YU, Hongfa, Haoxia MA a Kun YAN. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **137**, 104-116 [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.042
- [58] ZHENG, Li a Choosak PORNSING. Prediction of airport road service life based on concrete structure characteristics. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2024, **20** [cit. 2024-05-11]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2023.e02814
- [59] HARIRI-ARDEBILI, Mohammad, Leandro SANCHEZ a Roozbeh REZAKHANI. Aging of Concrete Structures and Infrastructures 3): Causes, Consequences, and Cures (C 3). *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2020, **2020**, 1-3 [cit. 2024-05-11]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2020/9370591
- [60] CAREVIĆ, Vedran, Snežana MARINKOVIĆ, Jasna PLAVŠIĆ a Andrija RADOVIĆ. Service Life Design of Concrete Structures Made of High-Volume Limestone Powder Concrete—Case of the Carbonation-Induced Corrosion. *Buildings* [online]. 2023, **13**(12) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings13123112
- [61] DUDI, Lupesh, Sreejith KRISHNAN a Shashank BISHNOI. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride. *Journal of Building Engineering* [online]. 2023, **79** [cit. 2024-05-11]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2023.107867
- [62] LI, Xuan, Faeze KHADEMI, Yiqi LIU, Mahmoud AKBARI, Chengduan WANG, Philip BOND, Jurg KELLER a Guangming JIANG. Evaluation of data-driven models for predicting the service life of concrete sewer pipes subjected to corrosion. *Journal of Environmental Management* [online]. 2019, **234**, 431-439 [cit. 2024-05-11]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2018.12.098
- [63] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. ÚNMZ, 2004.
- [64] LI, Yang, Zhongxu CAI, Lijuan HUANG a Ruiquan LIAO. A Comparative Study of the Corrosion Behavior of P110 Casing Steel in Simulated Concrete Liquid Containing Chloride and Annulus Fluid from an Oil Well. *Coatings* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings14030294
- [65] MA, Junjun a Pengzhen LIN. Simulation Approach for Random Diffusion of Chloride in Concrete under Sustained Load with Cellular Automata. *Materials* [online]. 2022, **15**(13) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15134384

- [66] SAURA GÓMEZ, Pascual, Javier SÁNCHEZ MONTERO, Julio TORRES MARTÍN, Servando CHINCHÓN-PAYÁ, Nuria REBOLLEDO RAMOS a Óscar GALAO MALO. Carbonation-Induced Corrosion of Reinforced Concrete Elements according to Their Positions in the Buildings. *Corrosion and Materials Degradation* [online]. 2023, **4**(3), 345-363 [cit. 2024-05-12]. ISSN 2624-5558. Dostupné z: doi:10.3390/cmd4030018
- [67] SONG, Wen, Jun DONG, Yu BAI, Fei DONG a Wei SUN. Investigation of Numerical Modeling for Concrete Corroded by Chloride Ion Diffusion. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, **166-169**, 1922-1925 [cit. 2024-05-09]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1922
- [68] ZHELIAZOV, Todor. Numerical Simulation of the Response of Concrete Structural Elements Containing a Self-Healing Agent. *Materials* [online]. 2022, **15**(3) [cit. 2024-05-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15031233
- [69] NAJAFI KOOPAS, Rasoul, Natalie RAUTER a Rolf LAMMERING. Two-Dimensional Mesoscale Finite Element Modeling of Concrete Damage and Failure. *Applied Sciences* [online]. 2023, **13**(15) [cit. 2024-05-12]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app13158971
- [70] SUN, Dandan, Zhenjie CAO, Changfu HUANG, Kai WU, Geert DE SCHUTTER a Lihai ZHANG. Degradation of concrete in marine environment under coupled chloride and sulfate attack: A numerical and experimental study. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2022, **17** [cit. 2024-05-11]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2022.e01218
- [71] BALLARI, M.M., Q.L. YU a H.J.H. BROUWERS. Experimental study of the NO and NO₂ degradation by photocatalytically active concrete. *Catalysis Today* [online]. 2011, **161**(1), 175-180 [cit. 2024-05-11]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2010.09.028
- [72] ATTAR, Arezou, Bora GENCTURK, Hadi ARYAN a Jianqiang WEI. Impact of Laboratory-Accelerated Aging Methods to Study Alkali-Silica Reaction and Reinforcement Corrosion on the Properties of Concrete. *Materials* [online]. 2020, **13**(15) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13153273
- [73] ALTOUBAT, S., M. MAALEJ a F. SHAIKH. Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 383-391 [cit. 2024-05-11]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0138-7
- [74] BARRIAS, António, Joan CASAS a Sergi VILLALBA. Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study. *Sensors* [online]. 2018, **18**(4) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s18040980
- [75] XIANG, Wei, Jiaoyuan WEI a Fengliang ZHANG. Structural Health Monitoring Design and Performance Evaluation of a Middle-Span Bridge. *Sensors* [online]. 2023, **23**(21) [cit. 2024-05-11]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s23218702
- [76] LEE, M.K. a B.I.G. BARR. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2004, **26**(4), 299-305 [cit. 2024-05-09]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(02)00139-7

- [77] JIA, Mengdi, Zhimin WU, Xingyue JIANG, Rena YU, Xiaoxin ZHANG a Yanjie WANG. Modified Paris law for mode I fatigue fracture of concrete based on crack propagation resistance. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2024, **131** [cit. 2024-05-11]. ISSN 01678442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2024.104383
- [78] HSU, Thomas T. C. Fatigue of Plain Concrete. *ACI Journal Proceedings* [online]. 1981, **78(4)**, 292-305 [cit. 2024-05-11]. ISSN 0002-8061. Dostupné z: doi:10.14359/6927
- [79] MA, Yu, Yongtao BAI, Dingzhu XIANG, Xuanding WANG a Jiepeng LIU. Experimental study on fatigue behavior of prefabricated high-strength steel-concrete composite bridge beams. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2024, **217** [cit. 2024-05-11]. ISSN 0143974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2024.108586
- [80] ZHAO, Hong, Youjun XIE, Guangcheng LONG et al. Experimental study on the static and fatigue splitting failure behaviors of bonding interface between bi-concrete materials. *Journal of Building Engineering* [online]. 2023, **76** [cit. 2024-05-11]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobee.2023.107326
- [81] WANG, Yuwei, Zuanfeng PAN, Bin ZENG a Qing XU. Cyclic creep model of concrete based on Kelvin chain under fatigue loads. *Construction and Building Materials* [online]. 2024, **417** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135255
- [82] LI, Lijian, Le HUANG, Yin CHI a Lihua XU. A damage constitutive model for consistent description of static and fatigue behaviors of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate. *International Journal of Fatigue* [online]. 2024 [cit. 2024-05-11]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2024.108386
- [83] XU, Donghui, Xiang XU, Michael FORDE a Antonio CABALLERO. Concrete and steel bridge Structural Health Monitoring—Insight into choices for machine learning applications. *Construction and Building Materials* [online]. 2023, **402** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132596
- [84] MIARKA, Petr, Stanislav SEITL, Vlastimil BÍLEK a Héctor CIFUENTES. Assessment of fatigue resistance of concrete: S-N curves to the Paris' law curves. *Construction and Building Materials* [online]. 2022, **341** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127811
- [85] GOEL, S. a S.P. SINGH. Fatigue performance of plain and steel fibre reinforced self compacting concrete using S–N relationship. *Engineering Structures* [online]. 2014, **74**, 65-73 [cit. 2024-05-11]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2014.05.010
- [86] TASNIMI, A.A. a H.H. LAVASANI. Uniaxial Constitutive Law for structural concrete members under monotonic and cyclic loads. *Scientia Iranica* [online]. 2011, **18(2)**, 150-162 [cit. 2024-05-11]. ISSN 10263098. Dostupné z: doi:10.1016/j.scient.2011.03.025
- [87] LEI, Bo, Taiyue QI, Yan LI, Zhiyi JIN a Wangping QIAN. An enhanced damaged plasticity model for concrete under cyclic and monotonic triaxial compression. *European Journal of Mechanics - A/Solids* [online]. 2023, **100** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09977538. Dostupné z: doi:10.1016/j.euromechsol.2023.104999

- [88] TIAN, Xin, Zhi FANG, Teng ZHOU a Yu XIANG. Behavior and constitutive model of ultra-high-performance concrete under monotonic and cyclic tensile loading. *Construction and Building Materials* [online]. 2023, **389** [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.131634
- [89] LI, Yongquan, Yuanzhang YANG, Qingmin WANG, Siyuan FENG a Weijian ZHAO. Cyclic shear loading test for grout-sleeve joints in precast concrete shear wall structure. *Journal of Building Engineering* [online]. 2024, **82** [cit. 2024-05-11]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2023.108329
- [90] XIAO, Jianzhuang, Hong LI a Zhenjun YANG. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **38**, 681-688 [cit. 2024-05-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.024
- [91] SUKONTASUKKUL, Piti, Pichai NIMITYONGSKUL a Sidney MINDESS. Effect of loading rate on damage of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, **34**(11), 2127-2134 [cit. 2024-05-12]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.03.022
- [92] ABDULLAH, Aiman Irfan. Effects of loading rates on concrete compressive strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, **1144**(1) [cit. 2024-05-09]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1144/1/012033
- [93] ČSN EN 12390-13 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku. ÚNMZ, 2024.
- [94] ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. ÚNMZ, 2016.
- [95] ASTM C469/C469M-10 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. 2014.
- [96] ZHENG, Dan, Qingbin LI a Linbing WANG. Rate effect of concrete strength under initial static loading. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2007, **74**(15), 2311-2319 [cit. 2024-05-09]. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2006.11.012
- [97] *Experimental and numerical research on fracture properties of mass concrete under quasi-static and dynamic loading* [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: doi:10.22541/au.171178627.78826153/v1
- [98] MÍNGUEZ, Jesús, Laura GUTIÉRREZ, Dorys GONZÁLEZ a Miguel VICENTE. Plain and Fiber-Reinforced Concrete Subjected to Cyclic Compressive Loading: Study of the Mechanical Response and Correlations with Microstructure Using CT Scanning. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(15) [cit. 2024-05-09]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9153030
- [99] LI, Hongjun, Baoyun ZHAO, Zhengjun HOU a Hongyao MIN. Experimental Study on the Mechanical Properties of Rock-Concrete Composite Specimens under Cyclic Loading. *Buildings* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-05-09]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings14030854
- [100] XIAO, Yao, Bing LI a Kazunori FUJIKAKE. Experimental Study of Reinforced Concrete Slabs under Different Loading Rates. *ACI Structural Journal* [online]. 2016, **113**(1), 157-168 [cit. 2024-05-09]. ISSN 0889-3241. Dostupné z: doi:10.14359/51688067

- [101] ČSN EN 12350-1: Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků. 4. ÚNMZ, 2020.
- [102] ČSN EN 12390-1: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. 3. ÚNMZ.
- [103] ČSN EN 12350-5 Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím. ÚNMZ, 2020.
- [104] ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. ÚNMZ, 2020.
- [105] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. ÚNMZ, 2020.
- [106] ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody. ÚNMZ, 2020.
- [107] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. ÚNMZ, 2020.
- [108] KOCÁB, Dalibor, Misák PETR, Tereza KOMÁRKOVÁ a Moravcová BRONISLAVA. Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. *Beton TKS*. 2014, **14**(3), 74-79. ISSN 1213-3116.
- [109] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. ÚNMZ, 2011.
- [110] ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. ÚNMZ, 2012.
- [111] KOCÁB, D, V BÍLEK, N NÁPRAVNÍK a B KUCHARCZYKOVÁ. Development of the internal structure of an alkali-activated paste related to the length of curing. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2023, **2568**(1) [cit. 2024-05-23]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/2568/1/012007

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Životní cyklus - LCA [33]	13
Obr. 2 Wöhlerova křivka [85]	20
Obr. 3 Rychlost přetvoření dle [8].....	23
Obr. 4 Jednotvárné zatěžování.....	24
Obr. 5 Různorodé zatěžování.....	24
Obr. 6 Sinusové schéma zatěžování.....	25
Obr. 7 Obdélníkové schéma zatěžování.....	25
Obr. 8 Pilové schéma zatěžování.....	26
Obr. 9 Zakoncování tlačných ploch zkušebních válců.....	32
Obr. 10 Osazení příčných a podélných tenzometrů na zkušebním tělese.....	33
Obr. 11 Výroba čerstvého betonu	35
Obr. 12 Výroba čerstvého betonu	36
Obr. 13 Transport čerstvého betonu	38
Obr. 14 Ukládání čerstvého betonu do forem	39
Obr. 15 Přeprava čerstvého betonu	41
Obr. 16 Ukládání čerstvého betonu do forem	42
Obr. 17 Stanovení pevnosti v tlaku.....	44
Obr. 18 Idealizovaný průběh zatěžování při zkoušce sečnového modulu pružnosti – Metoda B [93].....	45
Obr. 19 Zkušební sestava během cyklování	47
Obr. 20 Extenzometr použitý pro stanovení příčných i podélných deformací zkušebních válců OB1	48
Obr. 21 Umístění 4 indukčních snímačů dráhy WA-T (půdorysné zobrazení).....	49
Obr. 22 Zkušební sestava pro měření deformací zkušebních válců OB1 během cyklování	49
Obr. 23 Ukázka záznamu působící tlakové síly v časovém úseku 8000 až 9000 sekund zkoušení válce OB2.7	52
Obr. 24 Ukázka záznamu poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 9000 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace v podélném i příčném směru jsou v grafu znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné	53
Obr. 25 Ukázka záznamu působící tlakové síly v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 (detail horního zatěžovacího napětí).....	53
Obr. 26 Ukázka záznamu podélných poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné (detail horního zatěžovacího napětí).....	54
Obr. 27 Ukázka záznamu příčných poměrných deformací v časovém úseku 8000 až 8020 sekund zkoušení válce OB2.7 – deformace znázorněny v absolutních hodnotách, tedy vždy kladné (detail horního zatěžovacího napětí).....	54
Obr. 28 Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění pomocí ultrazvukové metody. 57	
Obr. 29 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušebního tělesa pomocí rezonanční metody.....	59
Obr. 30 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu LB1	62
Obr. 31 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu LB2	64
Obr. 32 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu OB1	65

Obr. 33 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu OB2	67
Obr. 34 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu PB1	68
Obr. 35 Krabicový graf pevnosti v tlaku zkušebních válců z betonu PB2.....	69
Obr. 36 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu LB1 během statického cyklického zatěžování.....	72
Obr. 37 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu LB2 během statického cyklického zatěžování.....	75
Obr. 38 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu OB1 během statického cyklického zatěžování.....	77
Obr. 39 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu OB2 během statického cyklického zatěžování.....	80
Obr. 40 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu PB1 během statického cyklického zatěžování.....	82
Obr. 41 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického modulu pružnosti E_{cu} betonu PB2 během statického cyklického zatěžování.....	85
Obr. 42 Statický modul pružnosti v tlaku LB1.....	86
Obr. 43 Statický modul pružnosti v tlaku LB1.....	87
Obr. 44 Statický modul pružnosti ve smyku LB1.....	88
Obr. 45 Statický modul pružnosti ve smyku LB1 prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	88
Obr. 46 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu LB1 během statického cyklického zatěžování.....	90
Obr. 47 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	91
Obr. 48 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , 30 zatěžovacích cyklů.....	91
Obr. 49 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	92
Obr. 50 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	92
Obr. 51 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c	93
Obr. 52 Statický modul pružnosti v tlaku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	93
Obr. 53 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	94
Obr. 54 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	94
Obr. 55 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	95
Obr. 56 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	95
Obr. 57 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c	96
Obr. 58 Statický modul pružnosti ve smyku LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	96
Obr. 59 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu LB2 během statického cyklického zatěžování.....	98
Obr. 60 Statický modul pružnosti v tlaku OB1.....	99
Obr. 61 Statický modul pružnosti v tlaku OB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	99
Obr. 62 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu OB1 během statického cyklického zatěžování.....	100
Obr. 63 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	101

Obr. 64 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	102
Obr. 65 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	102
Obr. 66 Statický modul pružnosti v tlaku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	103
Obr. 67 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c .	104
Obr. 68 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	104
Obr. 69 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c .	104
Obr. 70 Statický modul pružnosti ve smyku OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	105
Obr. 71 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu OB2 během statického cyklického zatěžování.....	106
Obr. 72 Statický modul pružnosti v tlaku PB1	107
Obr. 73 Statický modul pružnosti v tlaku PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů	107
Obr. 74 Statický modul pružnosti ve smyku PB1	108
Obr. 75 Statický modul pružnosti ve smyku PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	108
Obr. 76 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu PB1 během statického cyklického zatěžování.....	109
Obr. 77 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	110
Obr. 78 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	110
Obr. 79 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	111
Obr. 80 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	111
Obr. 81 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c	112
Obr. 82 Statický modul pružnosti v tlaku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	112
Obr. 83 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c .	113
Obr. 84 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	113
Obr. 85 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c .	114
Obr. 86 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	114
Obr. 87 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c .	115
Obr. 88 Statický modul pružnosti ve smyku PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	115
Obr. 89 Krabicový graf znázorňující změnu statického modulu pružnosti E_c betonu PB2 během statického cyklického zatěžování.....	117
Obr. 90 Statické Poissonovo číslo LB1.....	118
Obr. 91 Statické Poissonovo číslo LB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	118
Obr. 92 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu LB1 během statického cyklického zatěžování.....	121
Obr. 93 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	121
Obr. 94 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	122

Obr. 95 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	122
Obr. 96 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	123
Obr. 97 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c	123
Obr. 98 Statické Poissonovo číslo LB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	124
Obr. 99 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu LB2 během statického cyklického zatěžování.....	126
Obr. 100 Krabicový graf znázorňující změnu dynamického Poissonova čísla ν_{cr} betonu OB1 během statického cyklického zatěžování.....	127
Obr. 101 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	128
Obr. 102 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	128
Obr. 103 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	129
Obr. 104 Statické Poissonovo číslo OB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	129
Obr. 105 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu OB2 během statického cyklického zatěžování.....	131
Obr. 106 Statické Poissonovo číslo PB1	131
Obr. 107 Statické Poissonovo číslo PB1, prvních 30 zatěžovacích cyklů	132
Obr. 108 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu PB1 během statického cyklického zatěžování.....	133
Obr. 109 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c	133
Obr. 110 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	134
Obr. 111 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c	134
Obr. 112 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 1/2 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	135
Obr. 113 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c	135
Obr. 114 Statické Poissonovo číslo PB2, zatěžovací hladina 2/3 očekávané f_c , prvních 30 zatěžovacích cyklů.....	136
Obr. 115 Krabicový graf znázorňující změnu statického Poissonova čísla ν_c betonu PB2 během statického cyklického zatěžování.....	137
Obr. 116 Vážení cementu LB1.....	160
Obr. 117 Dávkování cementu LB1	160
Obr. 118 Míchání čerstvého betonu LB1	160
Obr. 119 Vyrobená zkušební tělesa LB1	160
Obr. 120 Zrání zkušebních těles ve vodní lázni LB1	161
Obr. 121 Broušení tlačných ploch	161
Obr. 122 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušebního tělesa pomocí rezonanční metody LB1.....	161
Obr. 123 Průběh záznamu cyklování na PC.....	161
Obr. 124 Navážka předvlhčeného lehkého kameniva a písku LB2.....	162
Obr. 125 Dávkování cementu LB2	162
Obr. 126 Míchání čerstvého betonu LB2	162
Obr. 127 Vyrobená zkušební tělesa.....	162

Obr. 128 Broušení tlačných ploch LB2	162
Obr. 129 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušebního tělesa pomocí rezonanční metody LB2.....	162
Obr. 130 Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění pomocí ultrazvukové metody LB2.....	163
Obr. 131 Zkušební těleso porušené tlakem OB1	163
Obr. 132 Zkušební těleso LB2.12 porušené během cyklování	163
Obr. 133 Zkušební těleso porušené tlakem PB1	164
Obr. 134 Zkušební sestava pro měření deformací zkušebních válců OB1 během cyklování	164
Obr. 135 Transport čerstvého betonu PB2.....	164
Obr. 136 Zkouška sednutí kužele PB2.....	164
Obr. 137 Zkouška rozlitím PB2	165
Obr. 138 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu PB2	165
Obr. 139 Ukládání čerstvého betonu PB2 do forem.....	165
Obr. 140 Zrání zkušebních těles PB2.....	165
Obr. 141 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku LB1	166
Obr. 142 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání LB1	166
Obr. 143 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání LB1	167
Obr. 144 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku LB1	167
Obr. 145 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo LB1	168
Obr. 146 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku LB2.....	168
Obr. 147 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z UZ impulzů LB2	169
Obr. 148 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání LB2	169
Obr. 149 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání LB2.....	170
Obr. 150 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku LB2	170
Obr. 151 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo LB2	171
Obr. 152 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání OB1	171
Obr. 153 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání OB1.....	172
Obr. 154 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku OB1	172
Obr. 155 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo OB1	173
Obr. 156 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku OB2.....	173
Obr. 157 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání OB2	174
Obr. 158 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání OB2.....	174
Obr. 159 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku OB2	175
Obr. 160 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo OB2	175
Obr. 161 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku PB1	176
Obr. 162 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání PB1	176
Obr. 163 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání PB1	177
Obr. 164 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku PB1	177
Obr. 165 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo PB1	178
Obr. 166 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku PB1	178
Obr. 167 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání PB2.....	179
Obr. 168 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání PB2	179
Obr. 169 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku PB2.....	180
Obr. 170 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo PB2.....	180

Obr. 171 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu LB2	181
Obr. 172 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu OB1	181
Obr. 173 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu OB2	181
Obr. 174 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu PB1	182
Obr. 175 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu PB2.....	182
Obr. 176 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa OB2.4 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/3 očekávané pevnosti v tlaku.....	183
Obr. 177 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa OB2.9 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.....	183
Obr. 178 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.1 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/3 očekávané pevnosti v tlaku.....	184
Obr. 179 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.5 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/2 očekávané pevnosti v tlaku.....	184
Obr. 180 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.9 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 2/3 očekávané pevnosti v tlaku.....	185
Obr. 181 Záznam působící síly během prvních 800 sekund – těleso OB1.7	185
Obr. 182 Záznam deformací během prvních 800 sekund – těleso OB1.7: je na první pohled zřejmé, že jediný záznam dat, který odpovídá působící síle, je podélná deformace zjištěná pomocí extenzometru, všechny ostatní záznamy jsou v podstatě nepoužitelné; pro výpočet modulu pružnosti byly proto použity pouze hodnoty získané pomocí odporových tenzometrů.....	186

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Třídy únavového zatížení [78].....	18
Tab. 2 Receptura lehkého betonu LB1	33
Tab. 3 Receptura lehkého betonu LB2	35
Tab. 4 Receptura hutného betonu OB1	37
Tab. 5 Receptura hutného betonu OB2	38
Tab. 6 Receptura provzdušněného betonu PB1.....	40
Tab. 7 Receptura provzdušněného betonu PB2.....	41
Tab. 8 Přehled zatěžovacích úrovní všech sad zkušebních těles	46
Tab. 9 Pevnost betonu LB1 v tlaku	63
Tab. 10 Pevnost betonu LB2 v tlaku	63
Tab. 11 Pevnost betonu OB1 v tlaku	66
Tab. 12 Pevnost betonu OB2 v tlaku	66
Tab. 13 Pevnost betonu PB1 v tlaku	68
Tab. 14 Pevnost betonu PB2 v tlaku	68
Tab. 15 Dynamické moduly pružnosti betonu LB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	71
Tab. 16 Relativní dynamický modul pružnosti betonu LB1	72
Tab. 17 Dynamické moduly pružnosti betonu LB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	73
Tab. 18 Relativní dynamický modul pružnosti betonu LB2	74
Tab. 19 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování	75
Tab. 20 Dynamické moduly pružnosti betonu OB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	76
Tab. 21 Relativní dynamický modul pružnosti betonu OB1	77
Tab. 22 Dynamické moduly pružnosti betonu OB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	78
Tab. 23 Relativní dynamický modul pružnosti betonu OB2	79
Tab. 24 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu OB2 před a po zatěžování	79
Tab. 25 Dynamické moduly pružnosti betonu PB1 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	81
Tab. 26 Relativní dynamický modul pružnosti betonu PB1	81
Tab. 27 Dynamické moduly pružnosti betonu PB2 před zatěžováním (vlevo) a po zatěžování (vpravo).....	83
Tab. 28 Relativní dynamický modul pružnosti betonu PB2.....	84
Tab. 29 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu PB2 před a po zatěžování	85
Tab. 30 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku v 1. a posledním cyklu, RSMT a RSMS betonu LB1	90
Tab. 31 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS LB2.....	97
Tab. 32 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování	98

Tab. 33 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku, 1 a poslední cyklus, RSMT a OB1	100
Tab. 34 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku v 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS OB2	105
Tab. 35 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu OB2 před a po zatěžování	106
Tab. 36 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS PB1	109
Tab. 37 Hodnota statického modulu pružnosti v tlaku a smyku 1 a posledním cyklu, RSMT a RSMS PB2	116
Tab. 38 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání modulů pružnosti betonu LB2 před a po zatěžování	117
Tab. 39 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS LB1	120
Tab. 40 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS LB2	125
Tab. 41 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu LB2 před a po zatěžování	126
Tab. 42 Dynamické Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD OB1	127
Tab. 43 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS OB2	130
Tab. 44 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu OB2 před a po zatěžování	130
Tab. 45 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS PB1	132
Tab. 46 Poissonovo číslo před cyklickým zatěžováním vlevo, po cyklickém zatěžování vpravo, RPČD a RPČS PB2	136
Tab. 47 p-hodnoty dvouvýběrového t-testu u porovnání Poissonova čísla betonu LB2 před a po zatěžování	137

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LCA – Life cycle assessment – posuzování životního cyklu
 LEED - Leadership in Energy and Environmental Design
 BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method
 ASTM – American Society for Testing and Materials
 EN - evropská norma
 SHM - structural health monitoring
 S-N – stress-number, napětí-počet
 ČSN – česká státní norma
 ISO - International Organization for Standardization
 MPa - Megapascal
 kN – kilonewton
 s – vteřina

mm – milimetr
 Hz - Hertz
 L-Series – low series
 H-Series – High series
 LB1 – lehký beton 1
 LB2 – lehký betonu 2
 OB1 – Obyčejný beton 1
 OB2 – Obyčejný beton 2
 PB1 - Provdzdušněný beton 1
 PB2 – Provdzdušněný beton 2
 CEM II/B-S 32,5 R – CEM II je portlandský směsný cement, B - příměsí tvoří 21-35 % hmotnosti cementu, S – granulovaná struska, 32,5 charakteristická pevnost cementu v tlaku po 28 dnech je 32,5 MPa, R – rychle tuhnoucí
 °C – stupeň Celsia
 kg – kilogram
 m³ – metr krychlový
 CEM I 42,5 R – CEM I – čistý portlandský cement, 42,5 – charakteristická pevnost cementu v tlaku po 28 dnech 42,5 MPa, R – rychle tuhnoucí
 FAST – Fakulta stavební
 SZK – Ústav stavebního zkušebnictví
 VUT – Vysoké učení technické v Brně
 N – Newton
 f_c – Pevnost v tlaku
 σ – napětí
 RSMT – relativní statický modul pružnosti v tlaku
 RSMS – relativní statický modul pružnosti ve smyku
 E_{cu} – dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku určený pomocí ultrazvukové impulzové metody
 D – objemová hmotnost zkoušeného materiálu
 v_L – rychlost šíření ultrazvuku
 k – koeficient rozměrnosti prostředí
 k₃ – koeficient pro trojrozměrné prostředí
 μ_{cu} – Poissonovo číslo
 E_{crL} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu určený pomocí rezonanční metody, podélného kmitání
 L – délka zkoušeného tělesa
 f_L – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa
 ρ – objemová hmotnost betonu
 E_{crf} – dynamický modul pružnosti v tahu nebo tlaku určený pomocí rezonanční metody, příčného kmitání
 c₁ – korekční součinitel
 f_f – první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa
 i – poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa
 G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku
 k – součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa
 f_t – první vlastní frekvence kroutivého kmitání zkoušeného tělesa

RDM_{xx} – relativní dynamický modul pružnosti
 ν – Poissonovo číslo
 ϵ_t – příčná poměrná deformace
 ϵ_l – podélná poměrná deformace
 ν_{cr} – dynamické Poissonovo číslo
RPČD – relativní Poissonovo číslo dynamické
RPČS – relativní Poissonovo číslo statické

PŘÍLOHY



Obr. 116 Vážení cementu LB1



Obr. 118 Míchání čerstvého betonu LB1



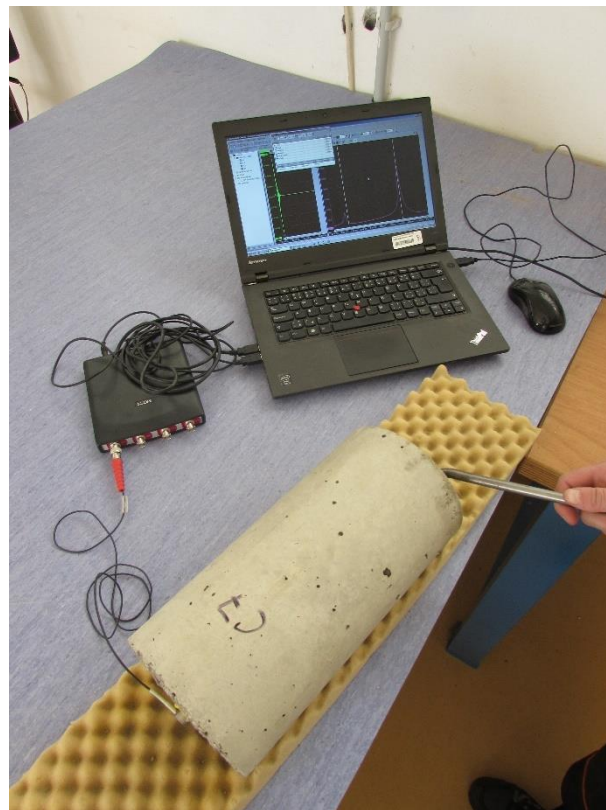
Obr. 117 Dávkování cementu LB1



Obr. 119 Vyrobená zkušební tělesa LB1



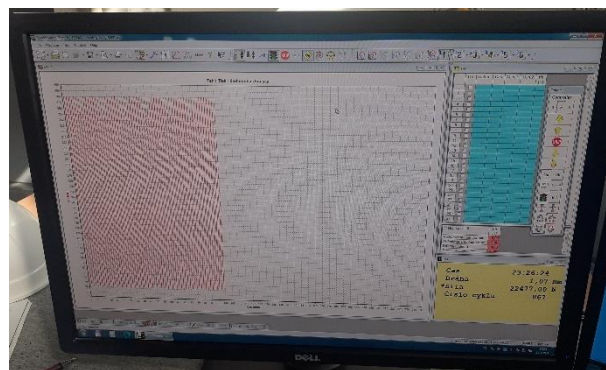
Obr. 120 Zrání zkušebních těles ve vodní lázni LB1



Obr. 122 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušebního tělesa pomocí rezonanční metody LB1



Obr. 121 Broušení tlačných ploch



Obr. 123 Průběh záznamu cyklování na PC



Obr. 124 Navážka předvlhčeného lehkého kameniva a písku LB2



Obr. 127 Vyrobená zkušební tělesa



Obr. 125 Dávkování cementu LB2



Obr. 128 Broušení tlačných ploch LB2



Obr. 126 Míchání čerstvého betonu LB2



Obr. 129 Stanovení prvních vlastních frekvencí zkušební tělesa pomocí rezonanční metody LB2



Obr. 130 Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění pomocí ultrazvukové metody LB2



Obr. 131 Zkušební těleso porušené tlakem OB1



Obr. 132 Zkušební těleso LB2.12 porušené během cyklování



*Obr. 133 Zkušební těleso porušené tlakem
PB1*



Obr. 135 Transport čerstvého betonu PB2



*Obr. 134 Zkušební sestava pro měření
deformací zkušebních válců OB1 během
cyklování*



Obr. 136 Zkouška sednutí kužele PB2



Obr. 137 Zkouška rozlitím PB2



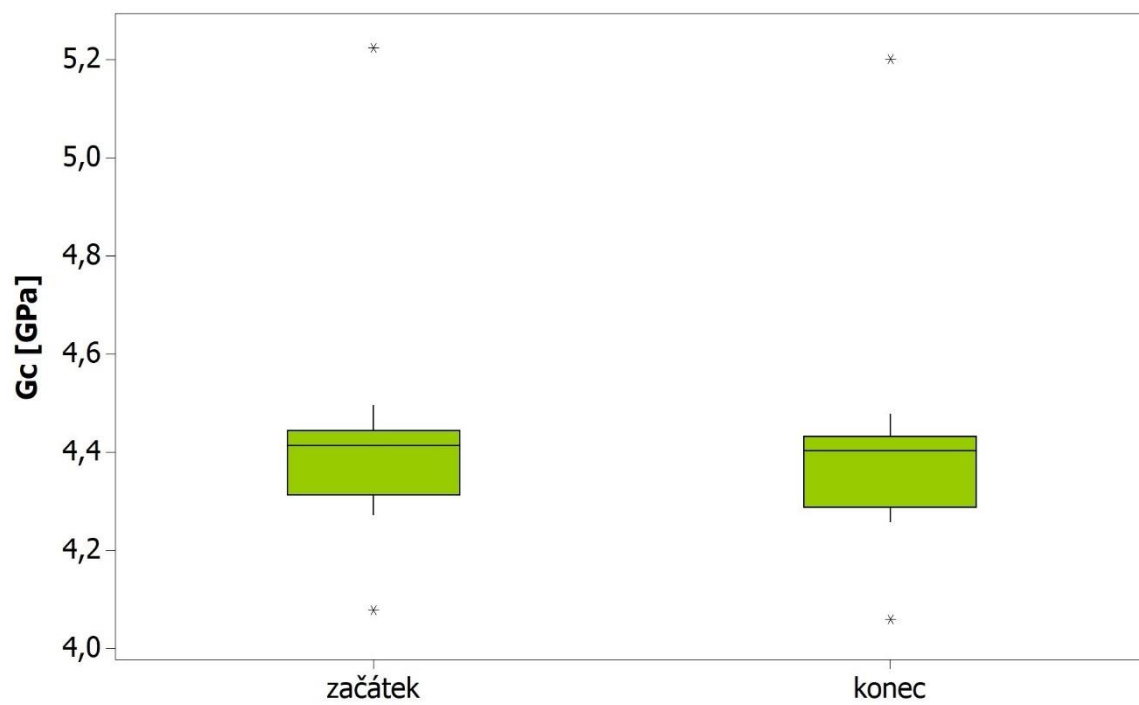
Obr. 139 Ukládání čerstvého betonu PB2 do forem



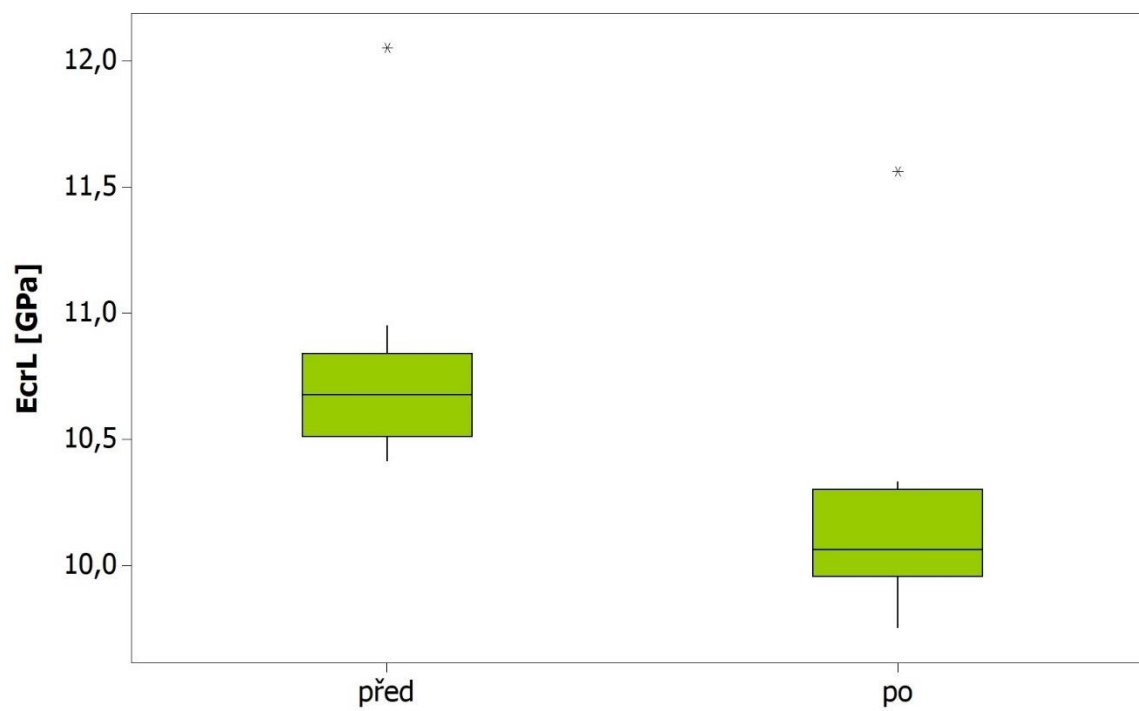
Obr. 138 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu PB2



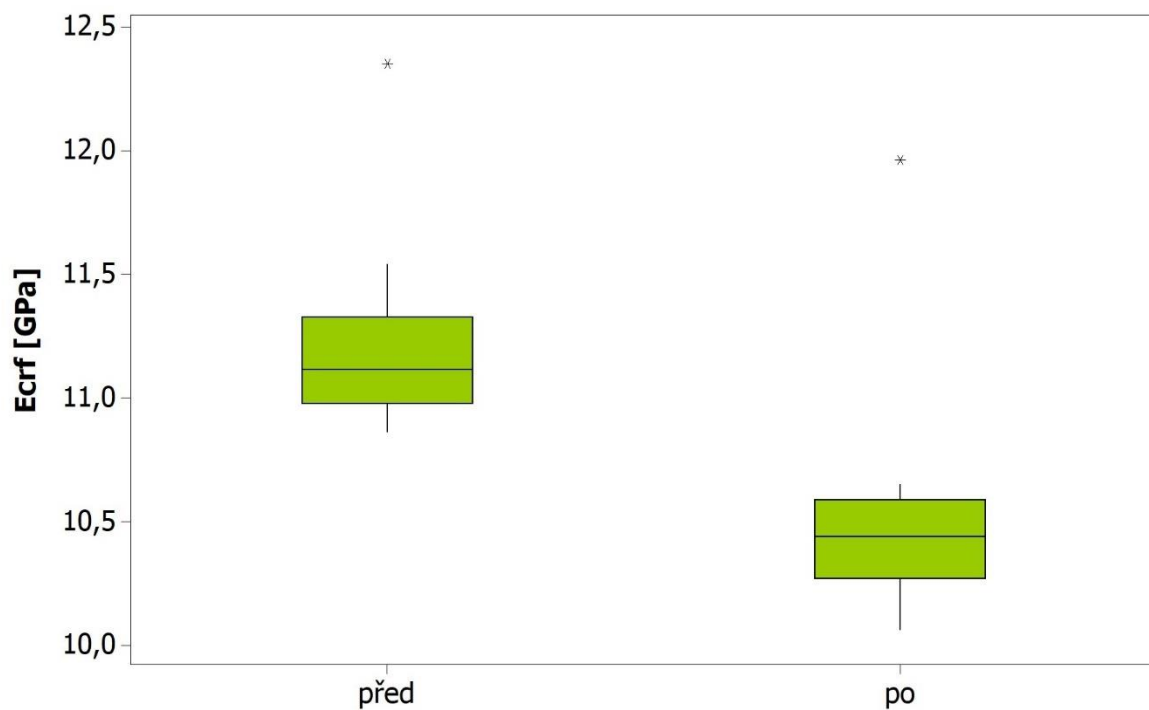
Obr. 140 Zrání zkušebních těles PB2



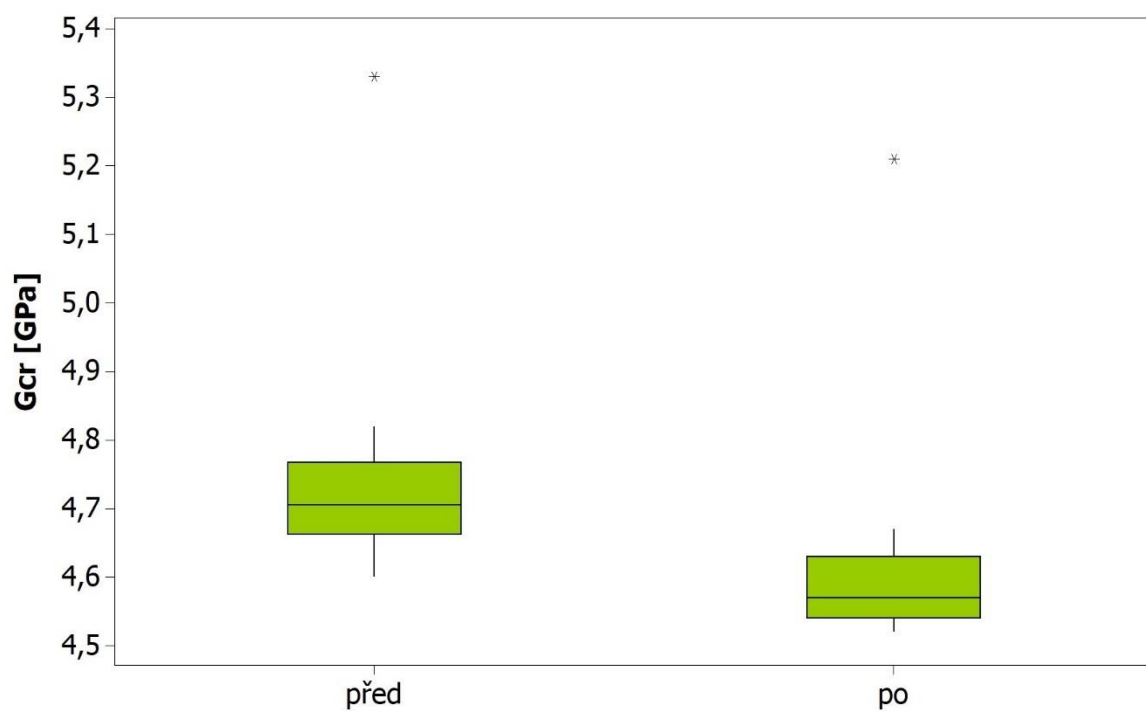
Obr. 141 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku LB1



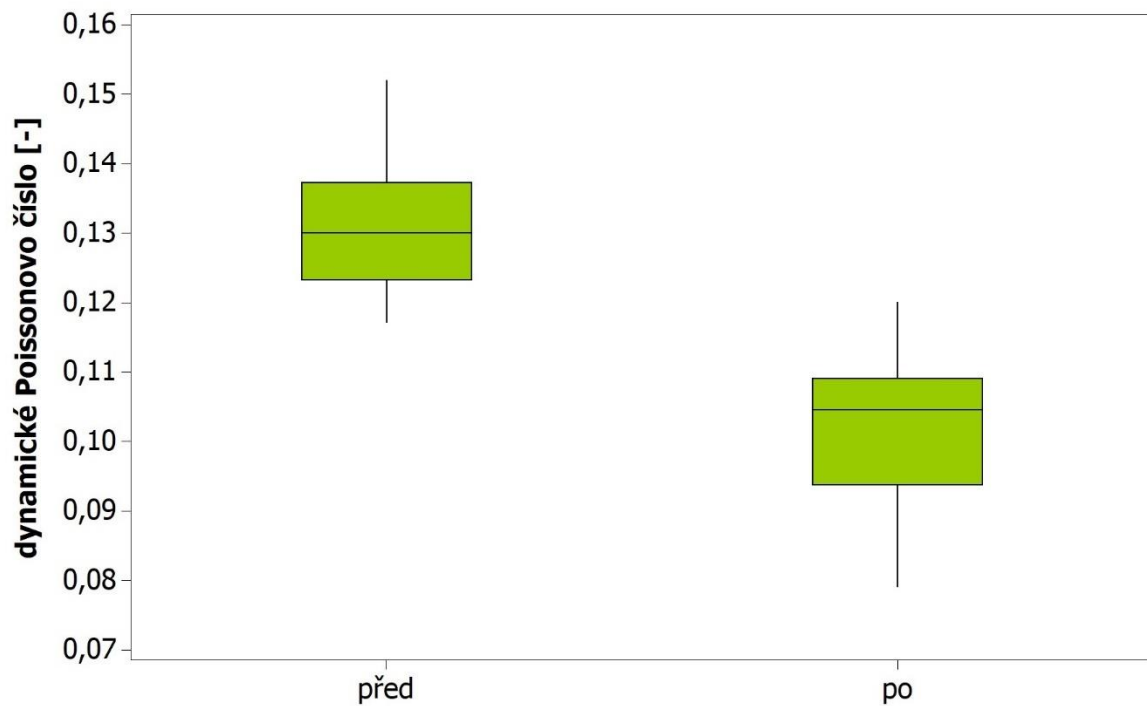
Obr. 142 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání LB1



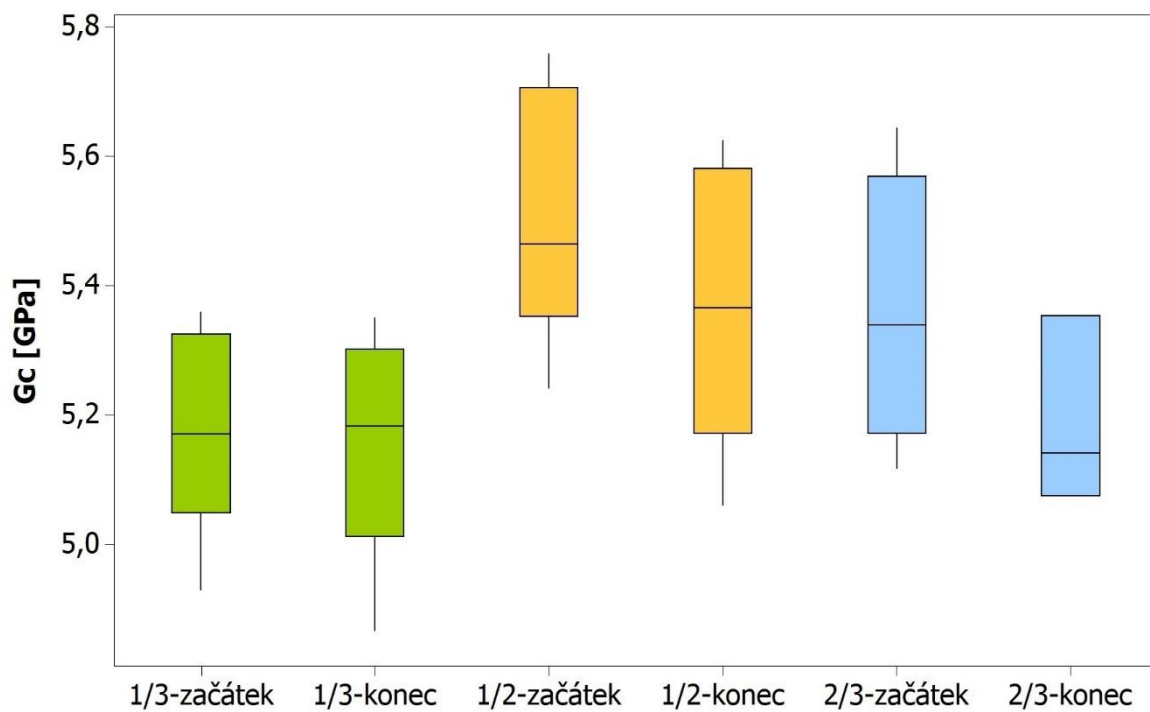
Obr. 143 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání LB1



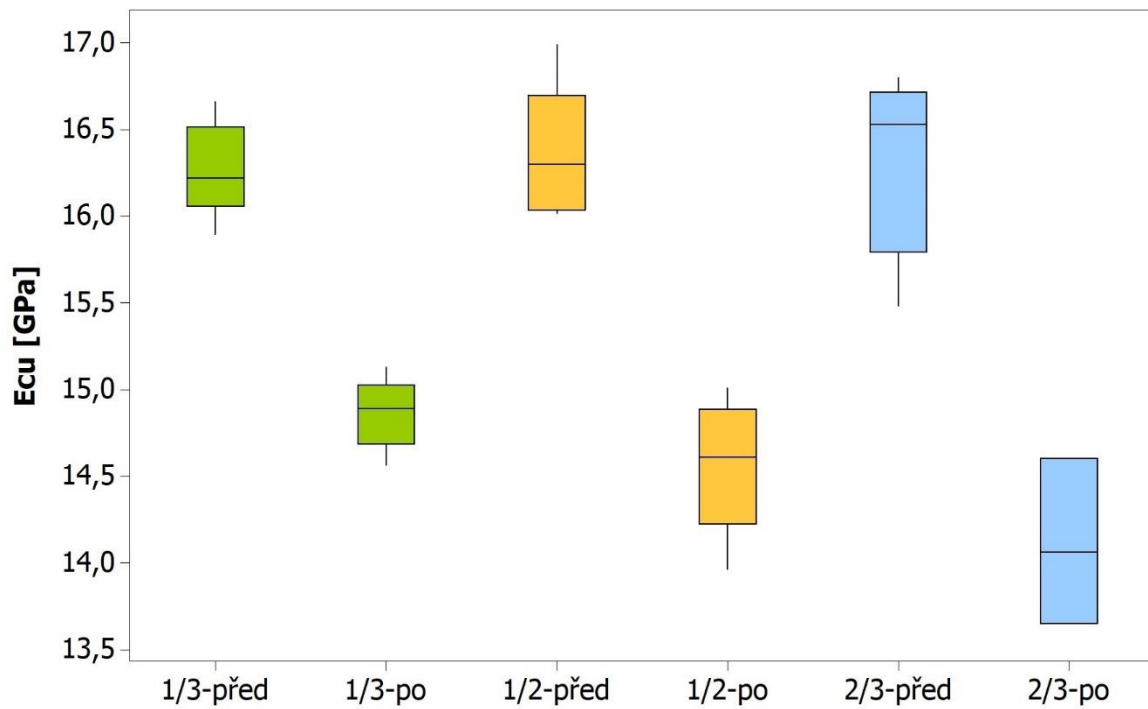
Obr. 144 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku LB1



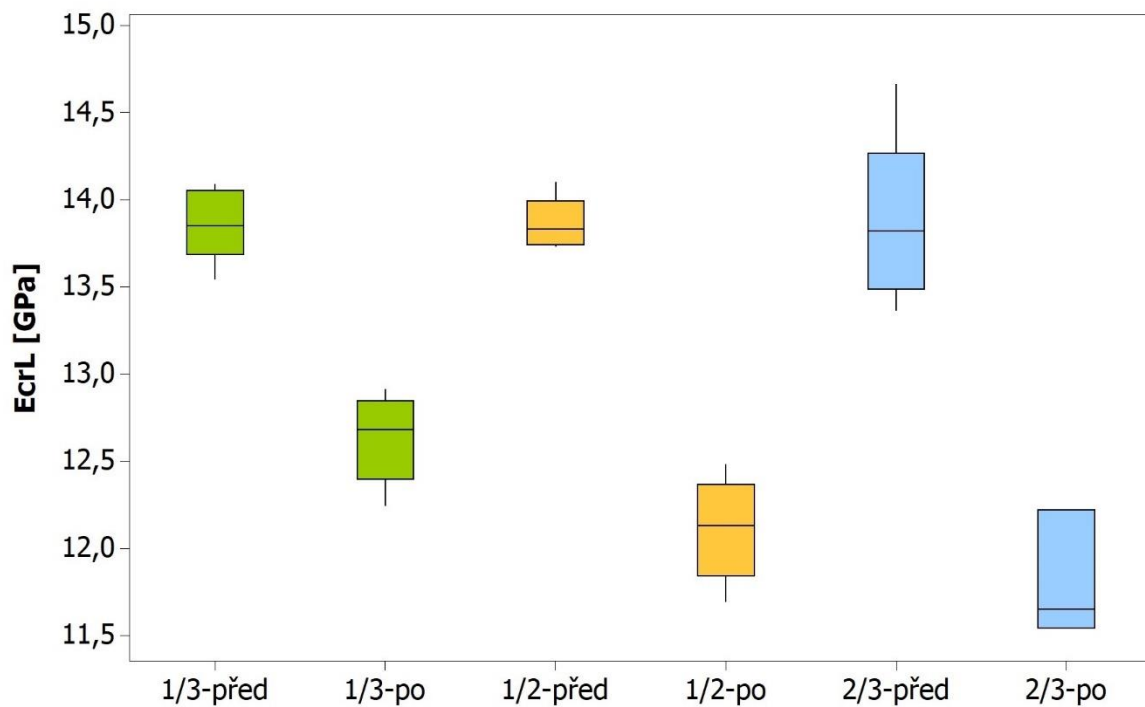
Obr. 145 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo LB1



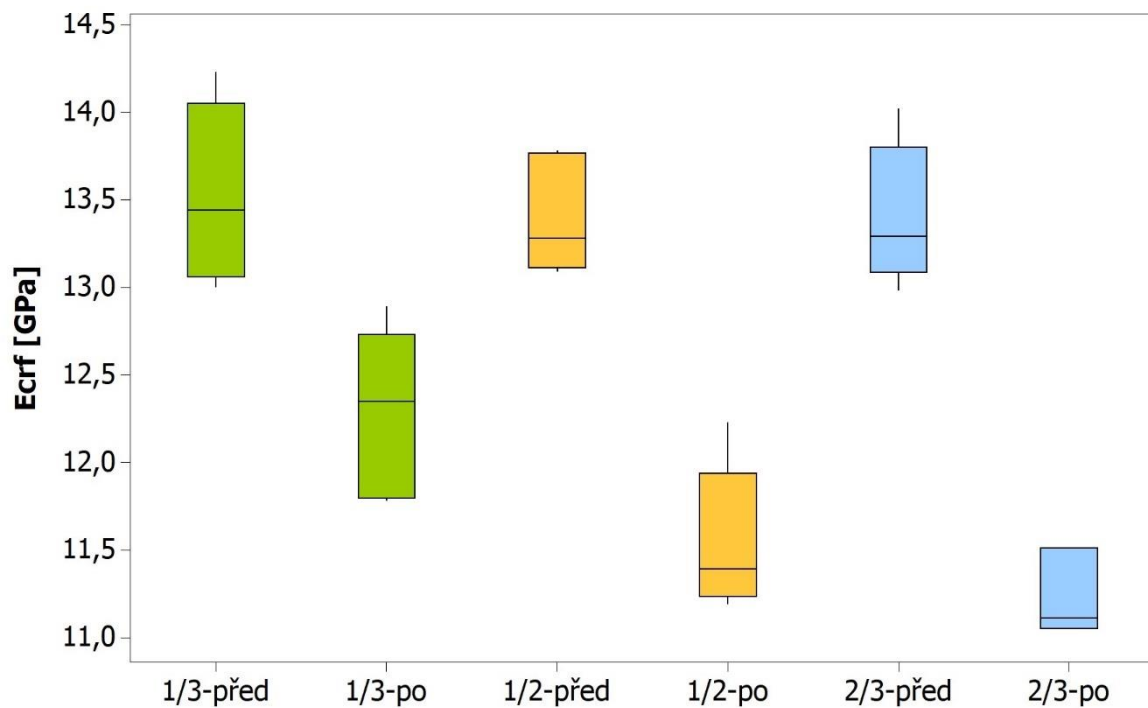
Obr. 146 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku LB2



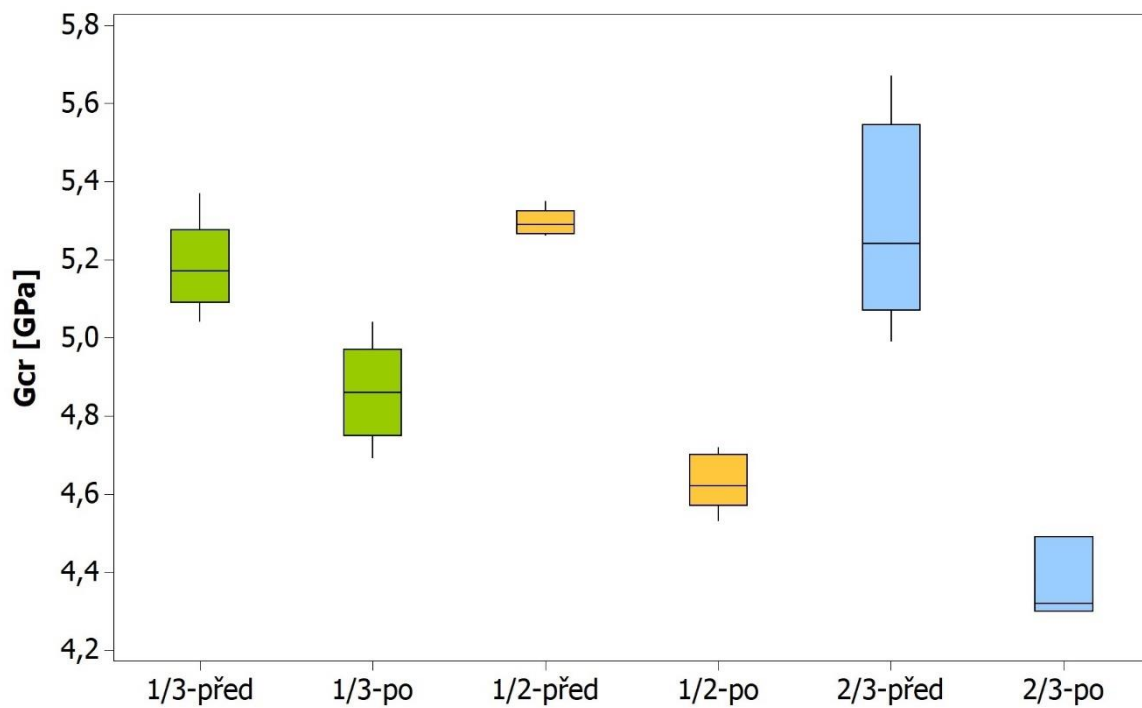
Obr. 147 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z UZ impulzů LB2



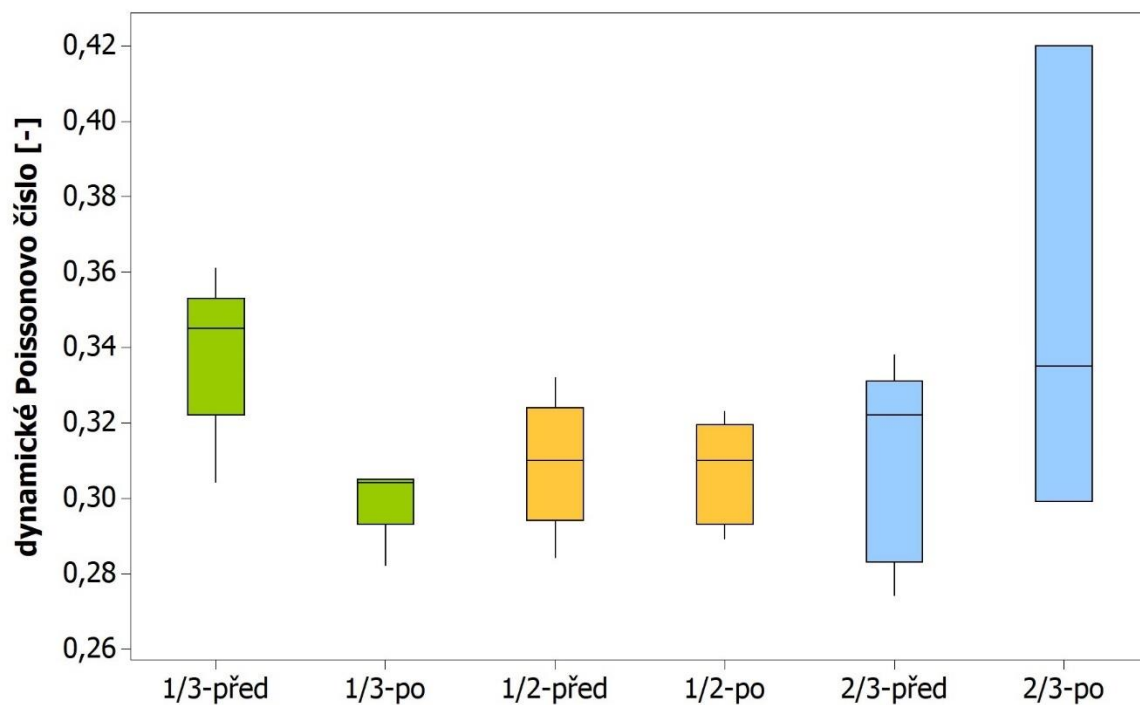
Obr. 148 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání LB2



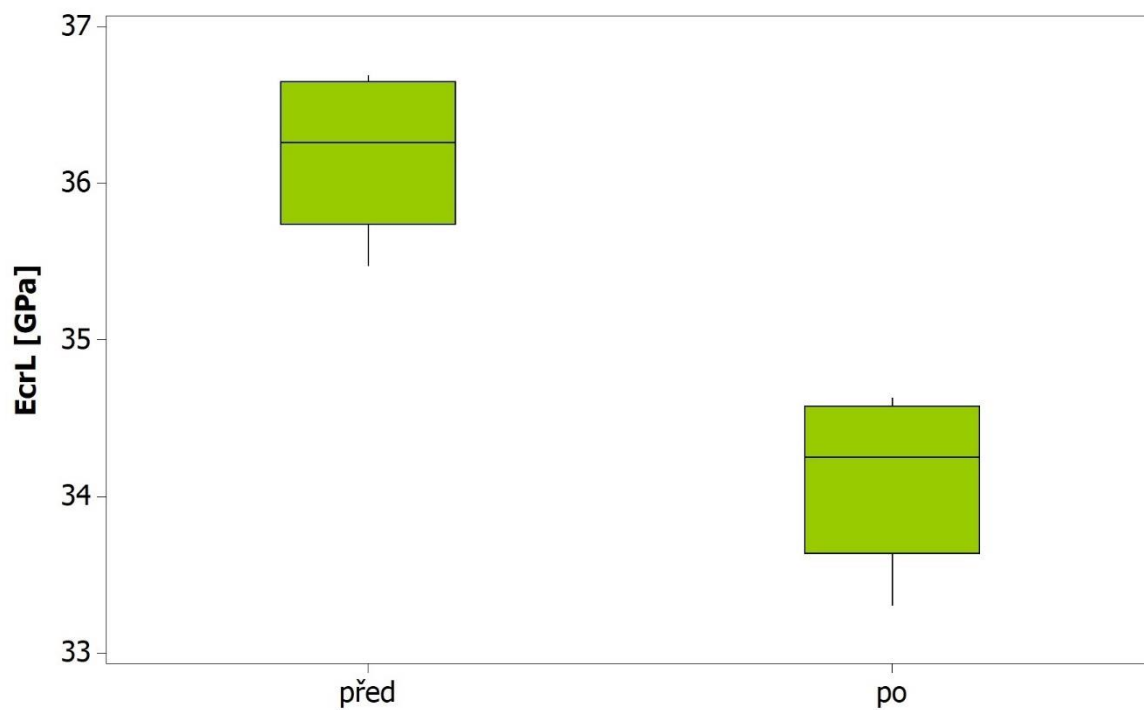
Obr. 149 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání LB2



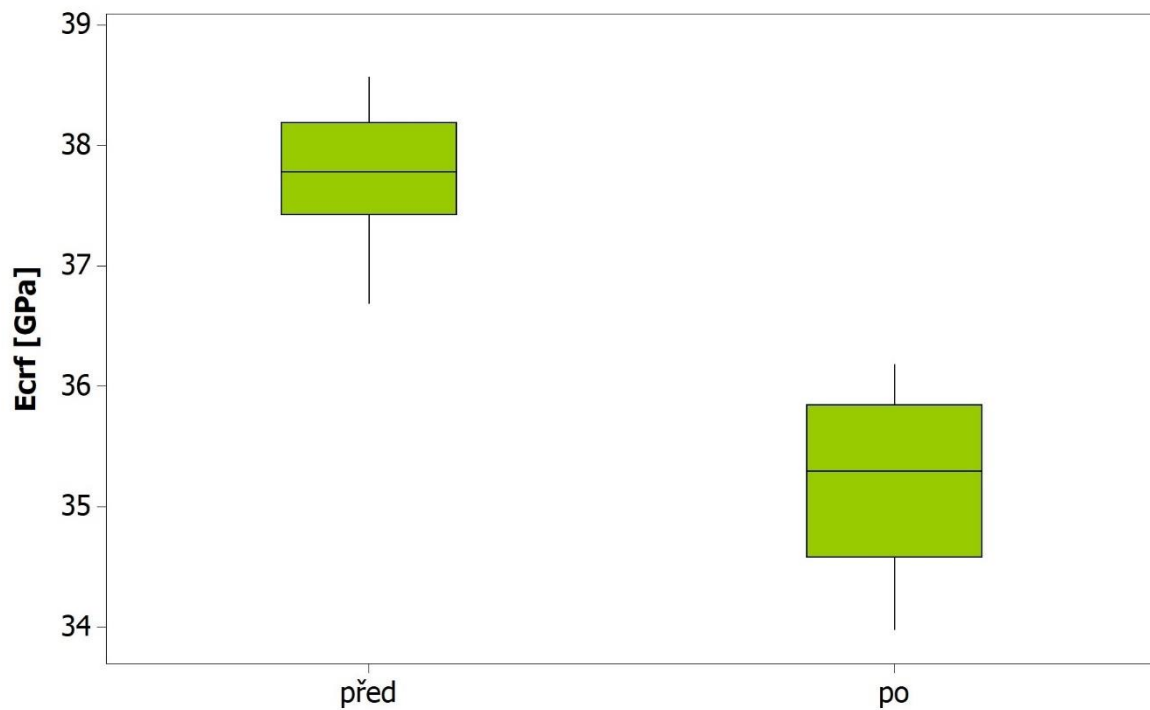
Obr. 150 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku LB2



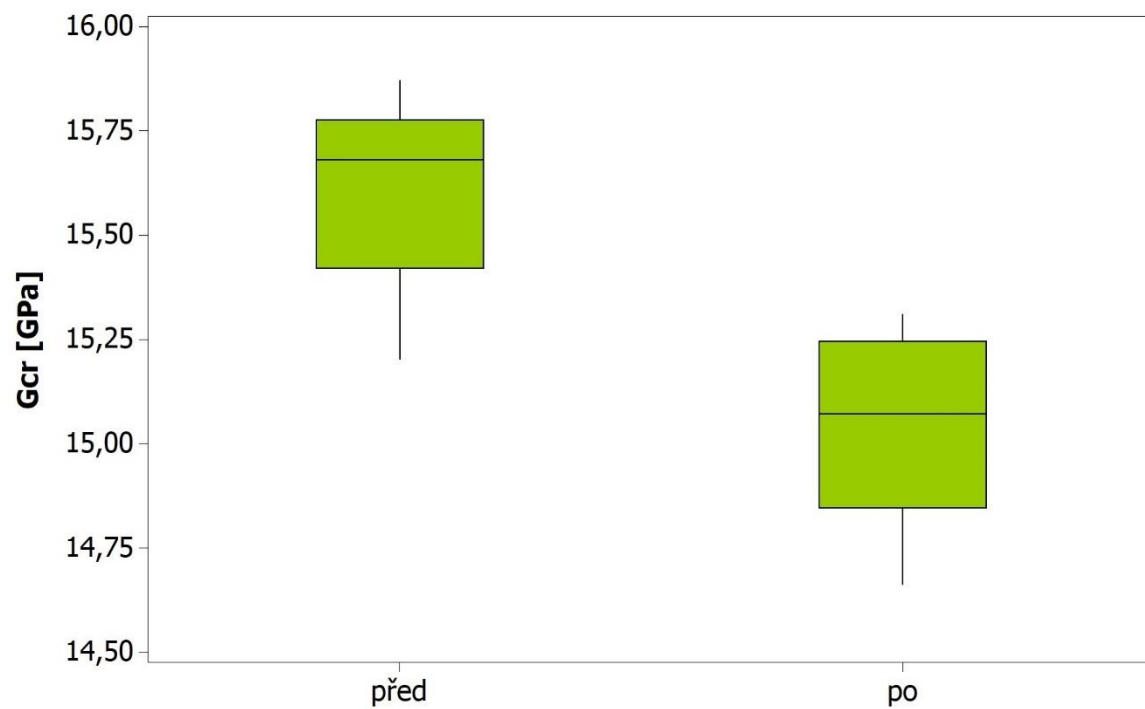
Obr. 151 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo LB2



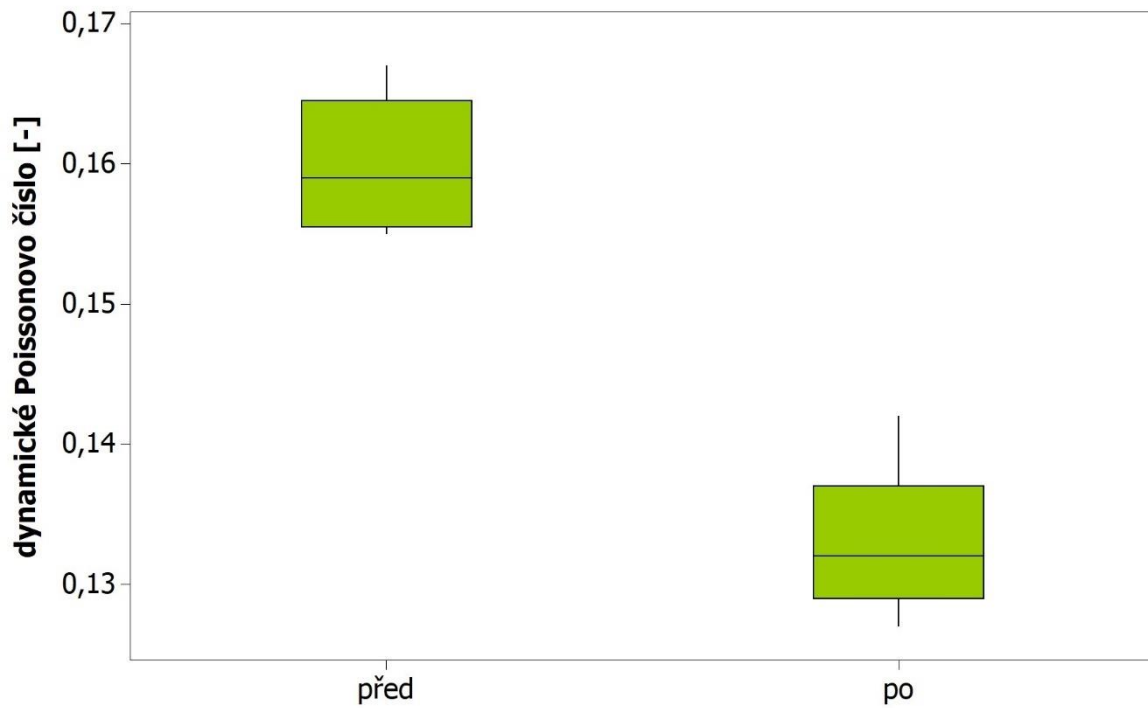
Obr. 152 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání OB1



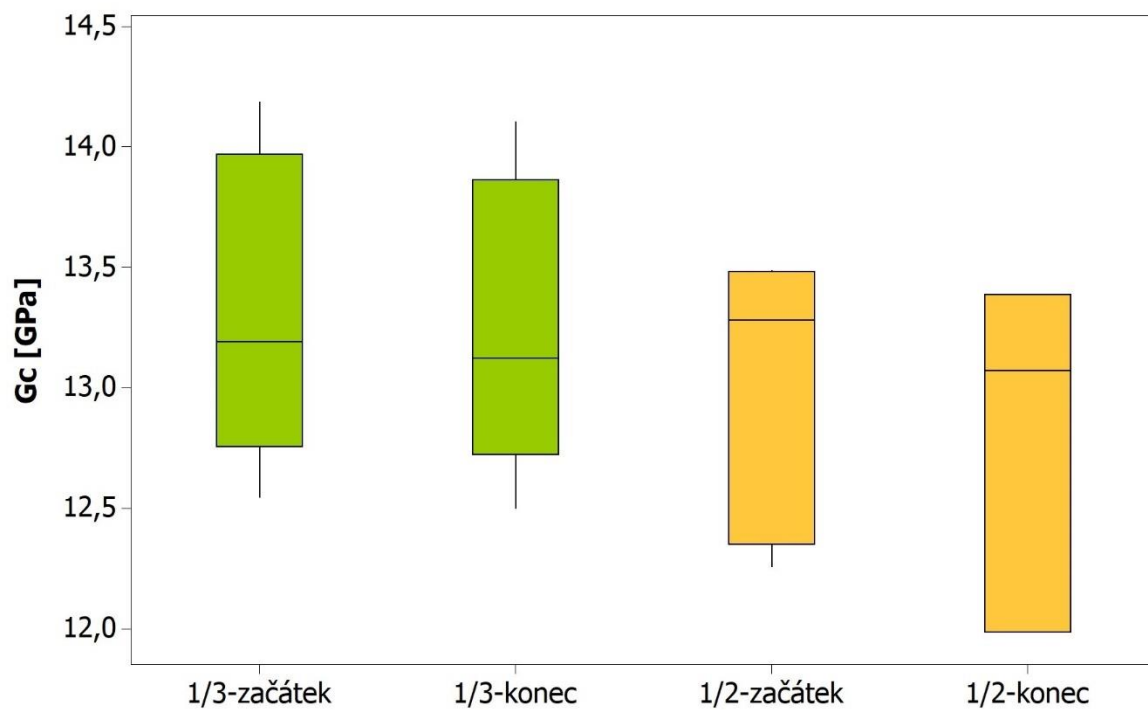
Obr. 153 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání OB1



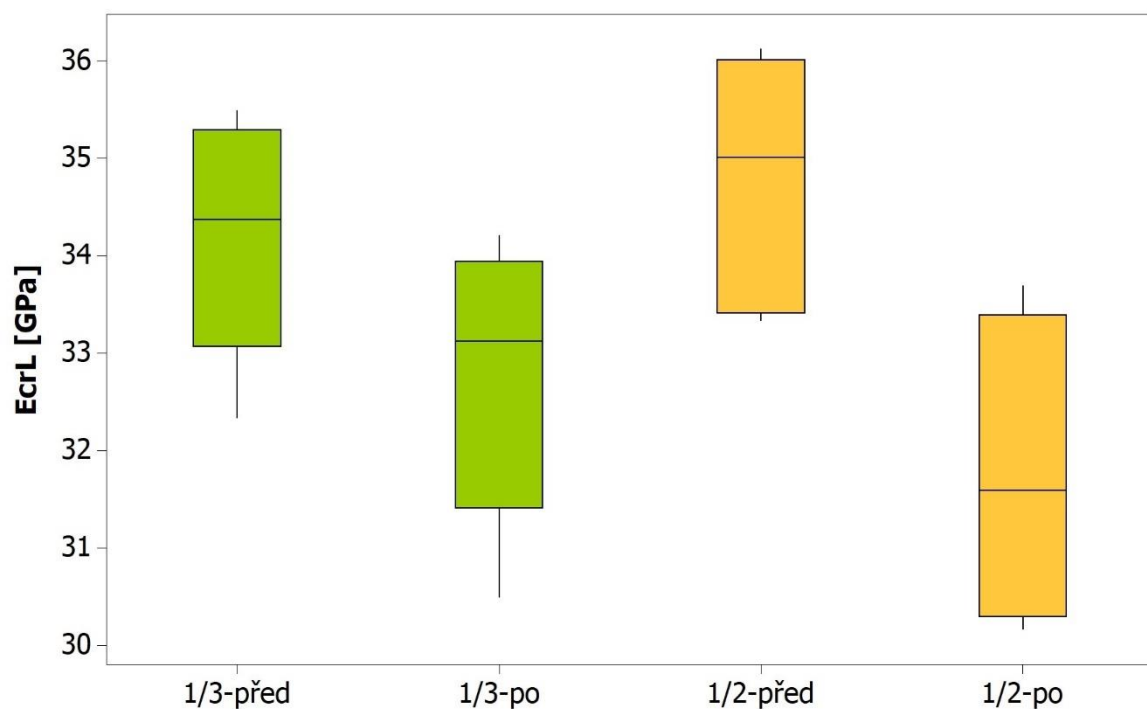
Obr. 154 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku OB1



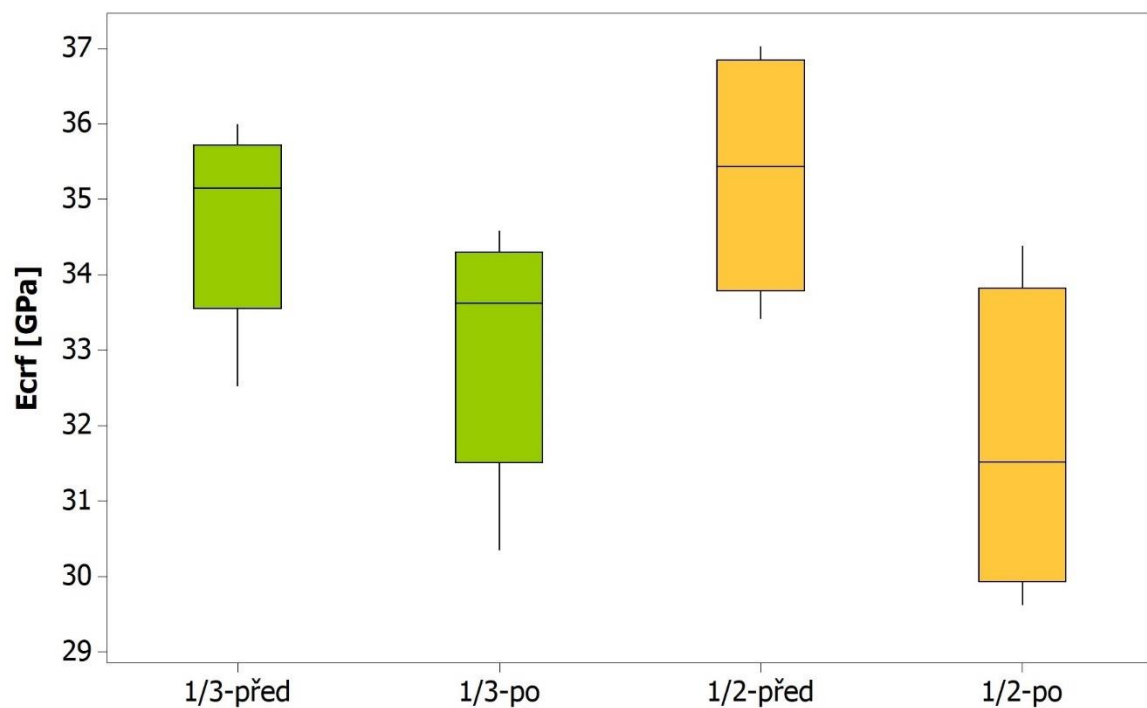
Obr. 155 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo OB1



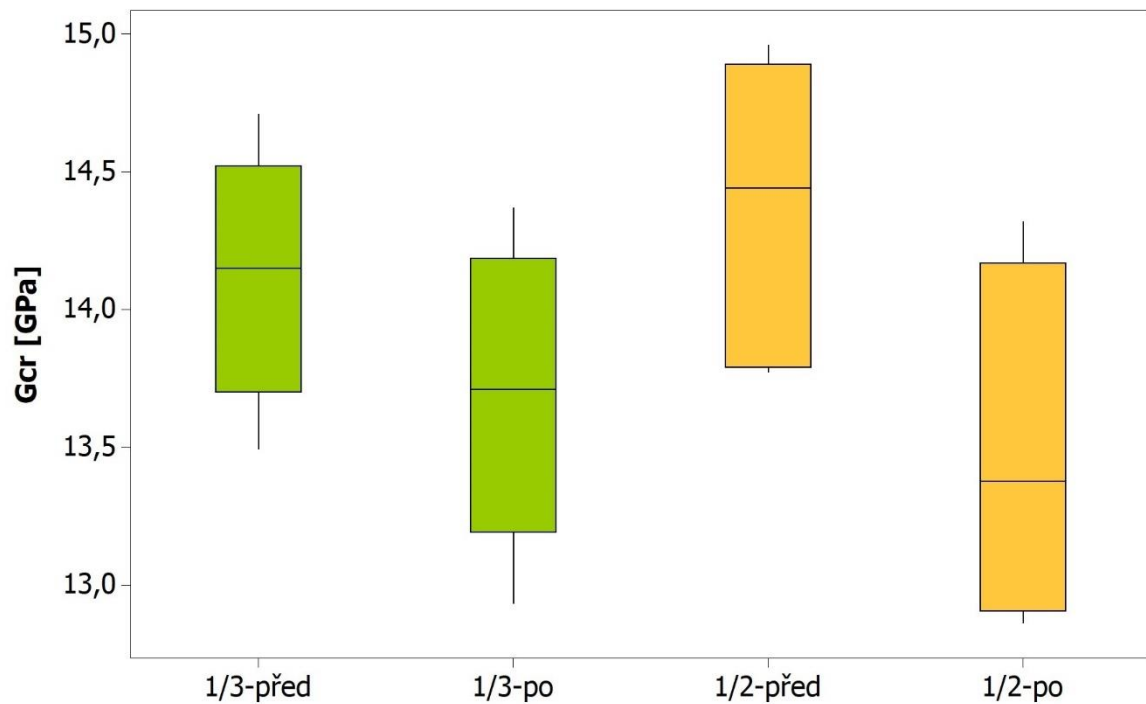
Obr. 156 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku OB2



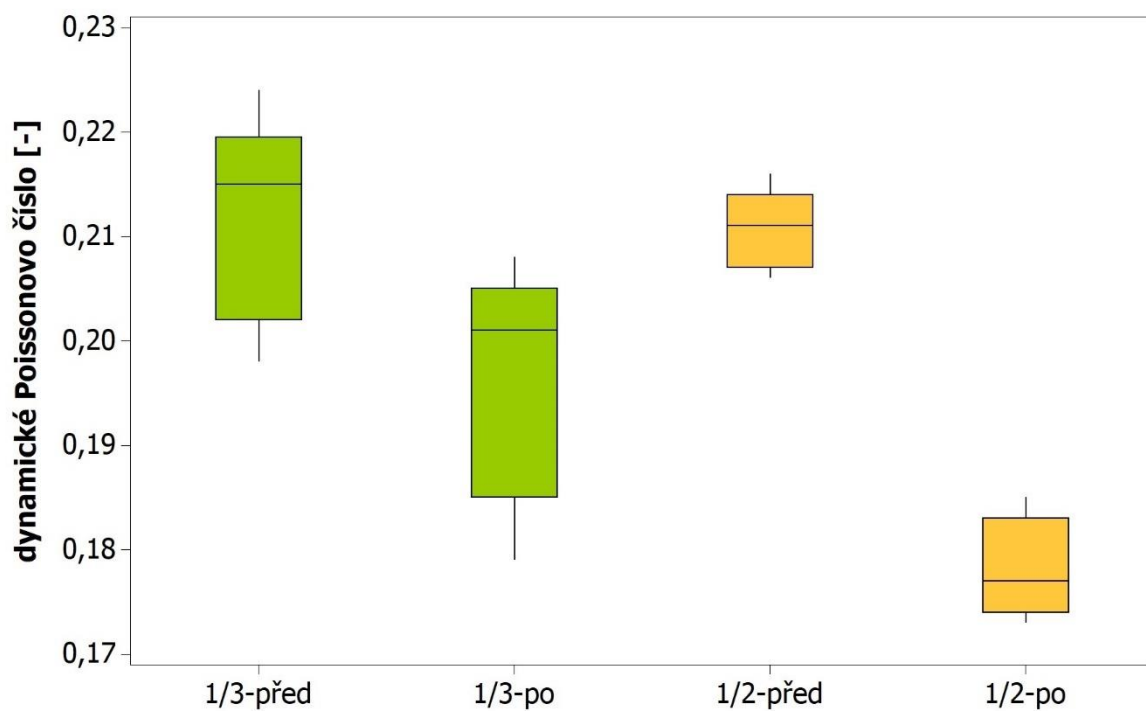
Obr. 157 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání OB2



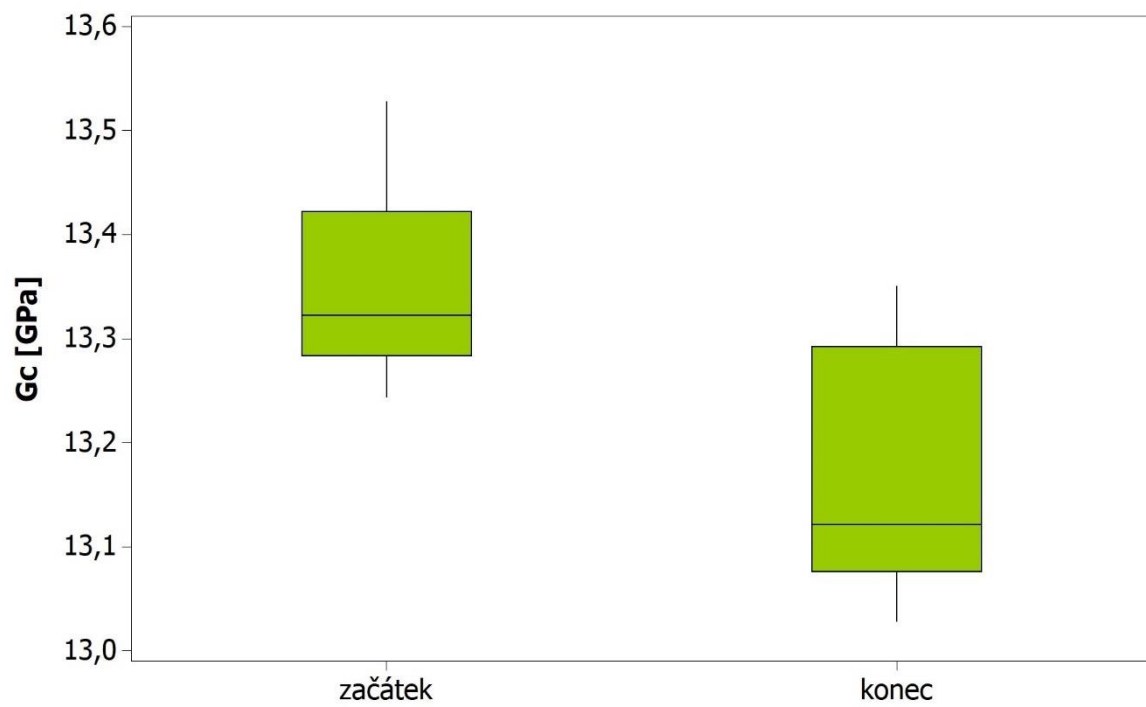
Obr. 158 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání OB2



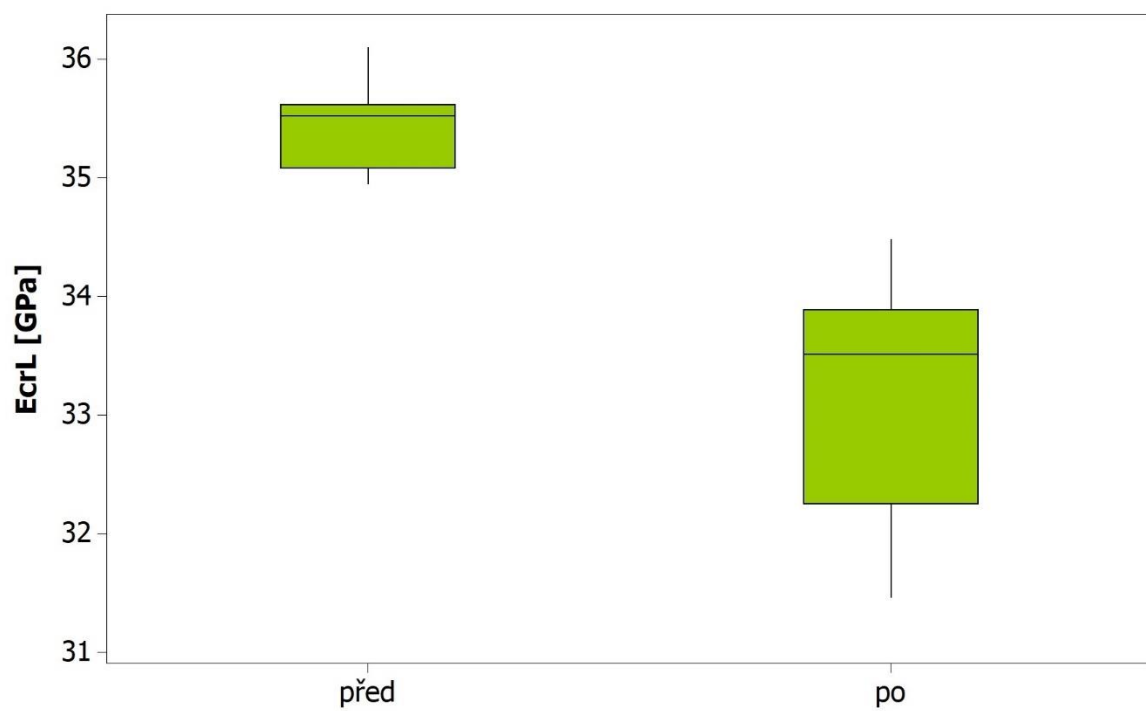
Obr. 159 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku OB2



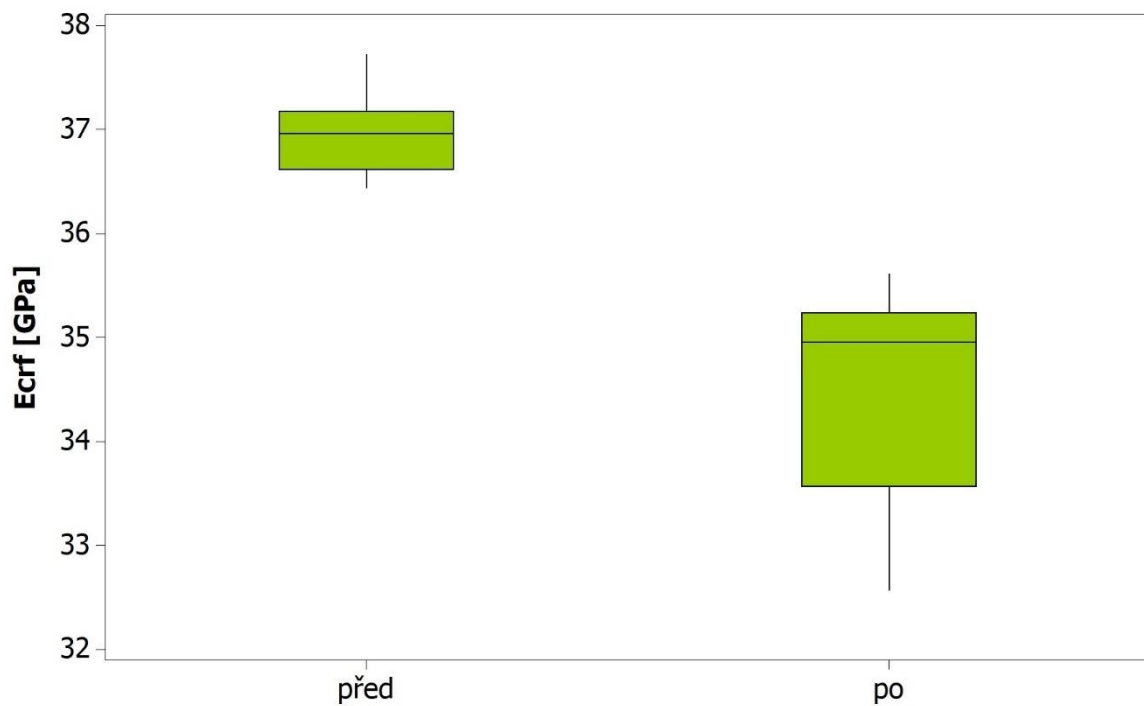
Obr. 160 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo OB2



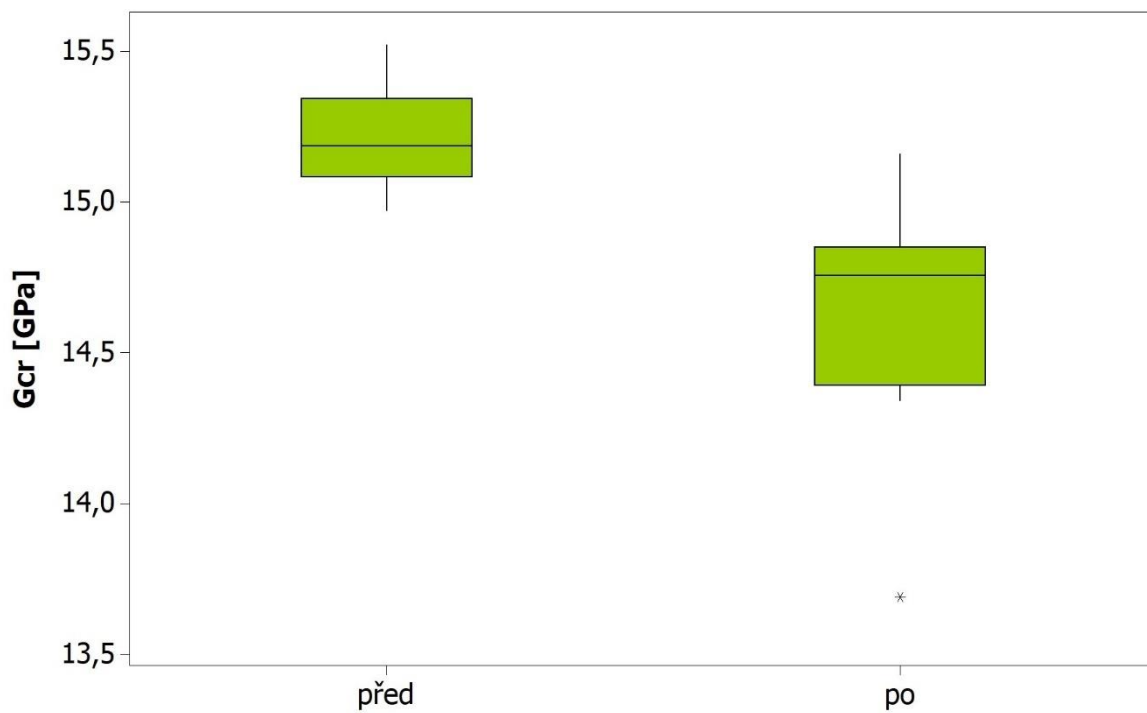
Obr. 161 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku PB1



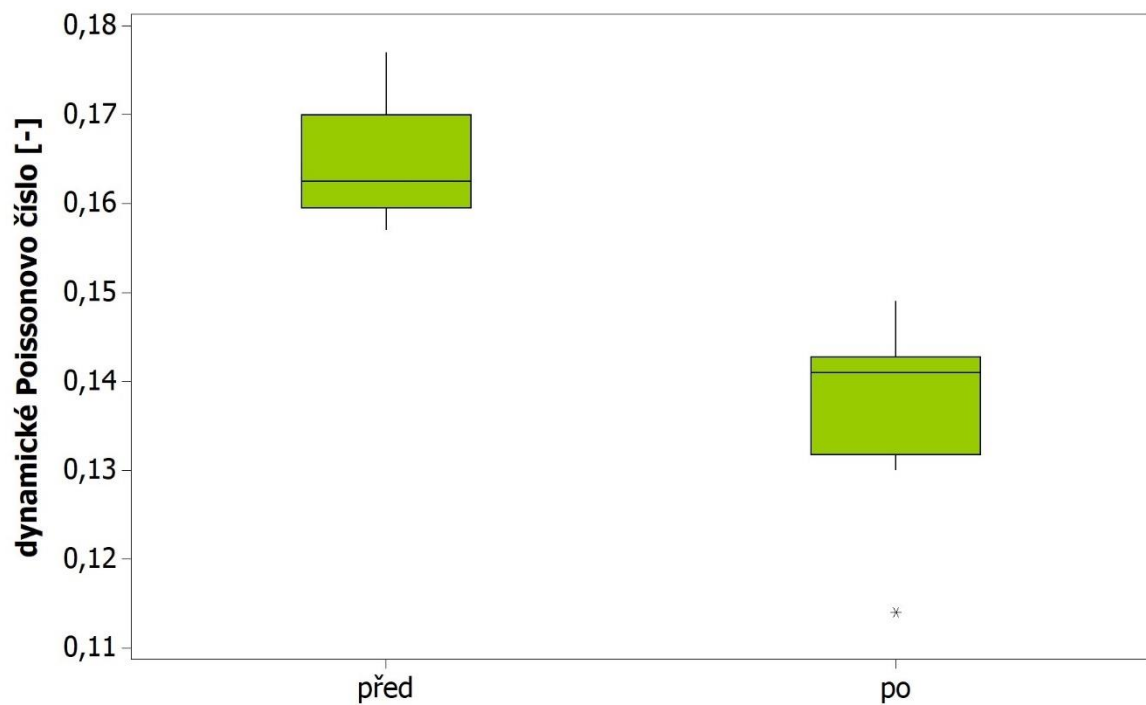
Obr. 162 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání PB1



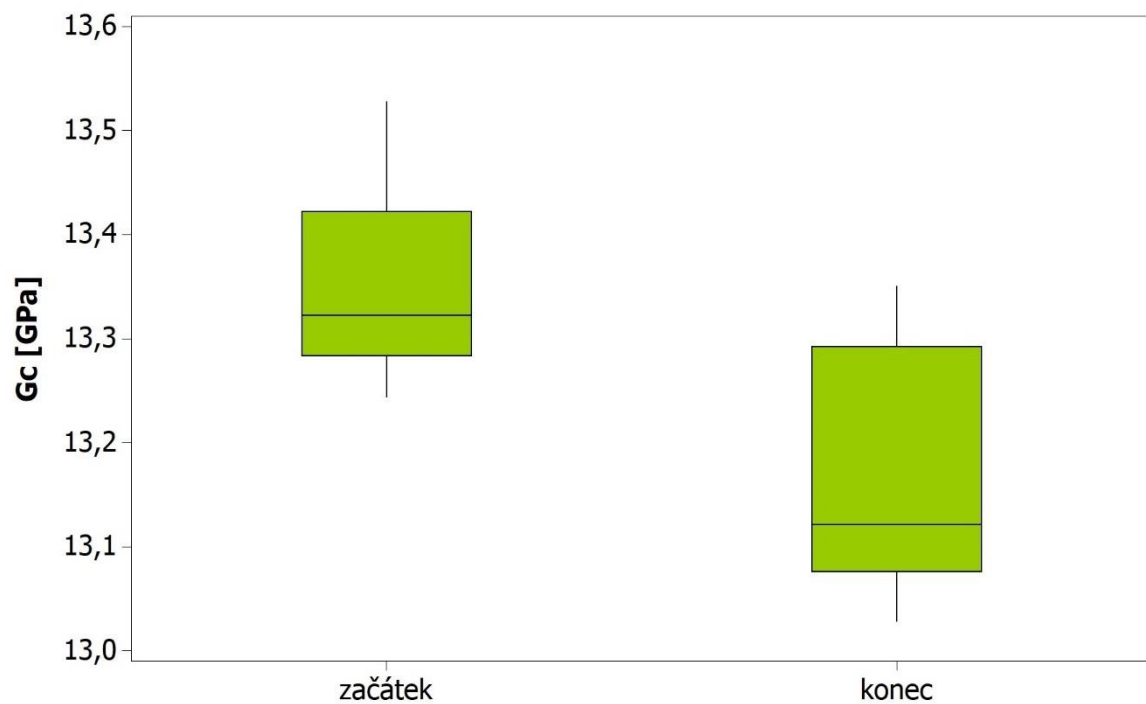
Obr. 163 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání PB1



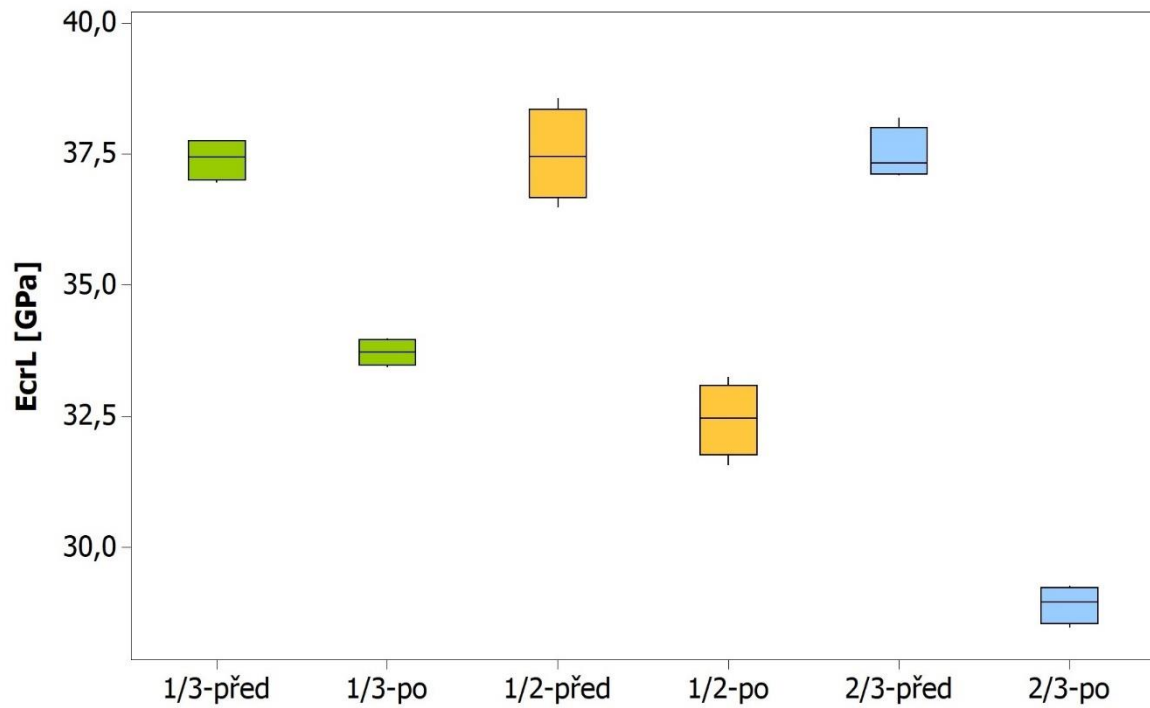
Obr. 164 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku PB1



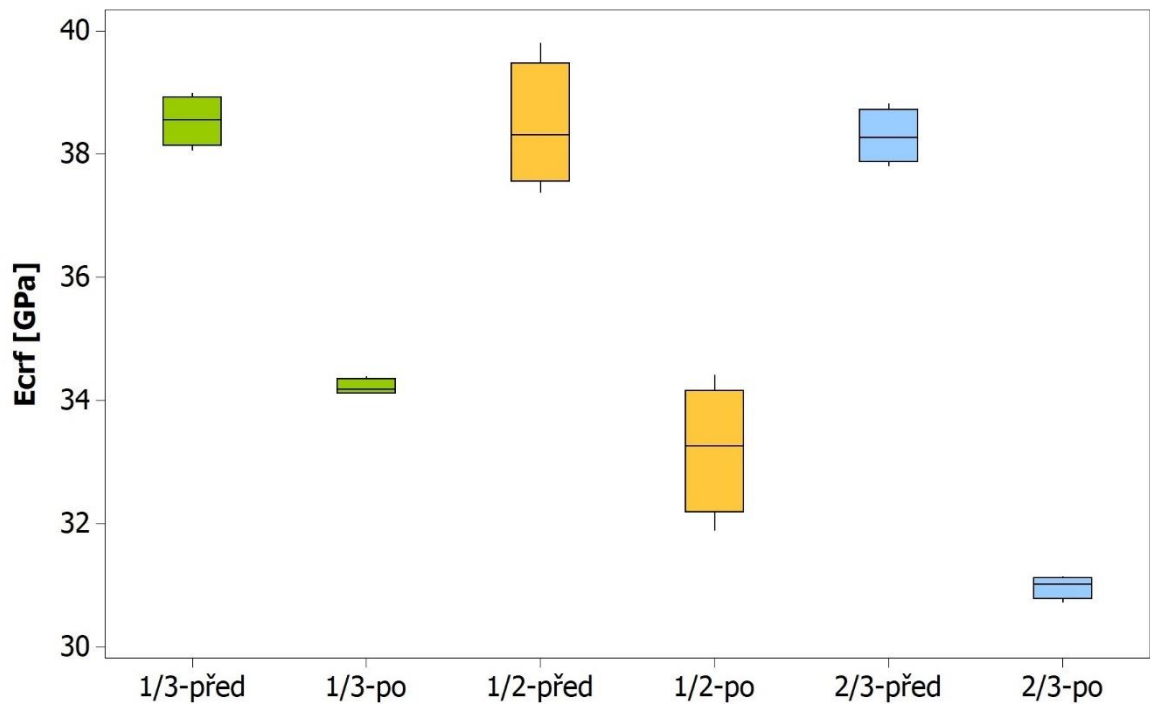
Obr. 165 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo PB1



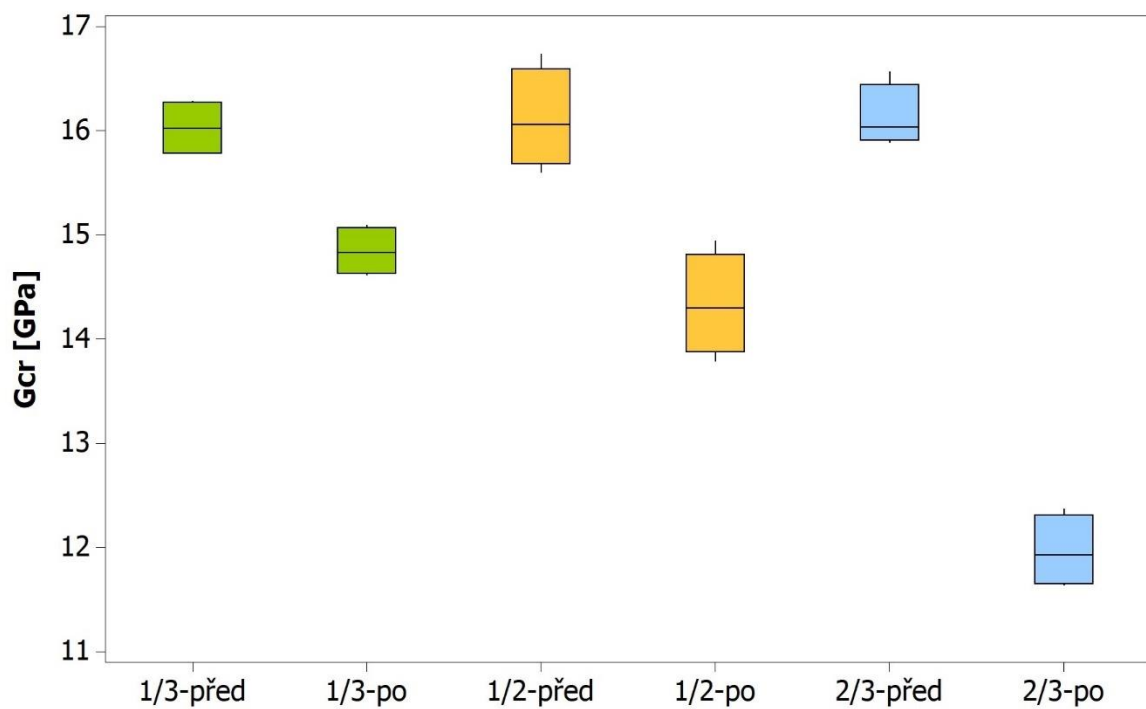
Obr. 166 Krabicový graf statický modul pružnosti ve smyku PB1



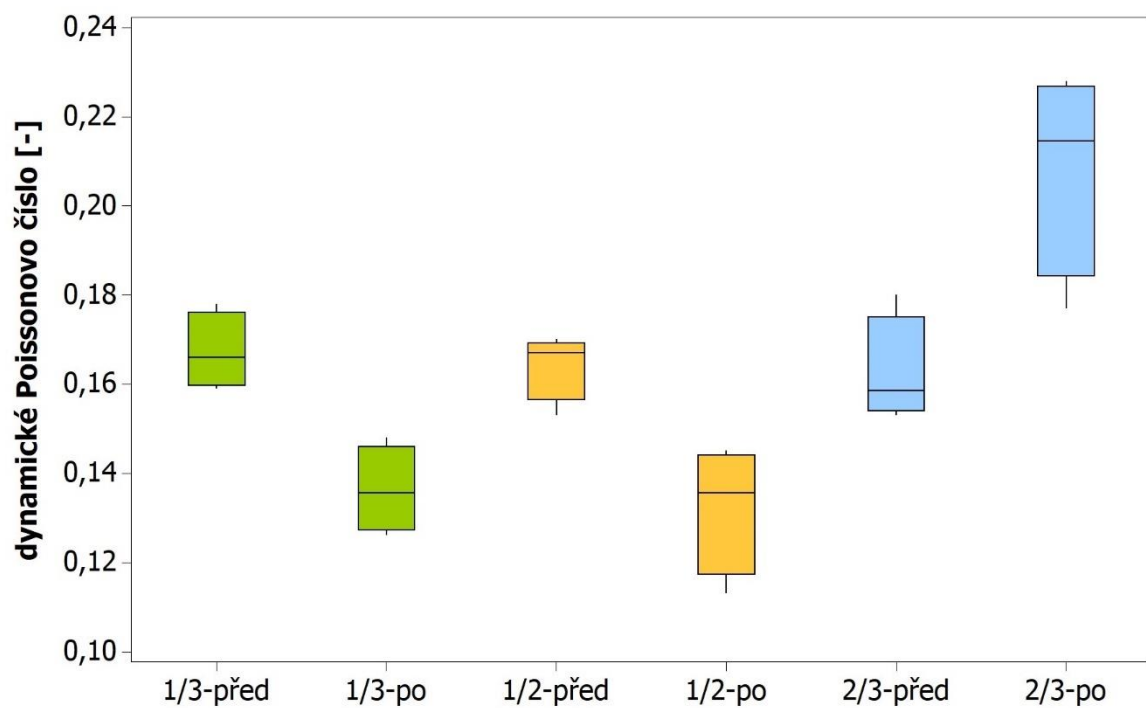
Obr. 167 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z podélného kmitání PB2



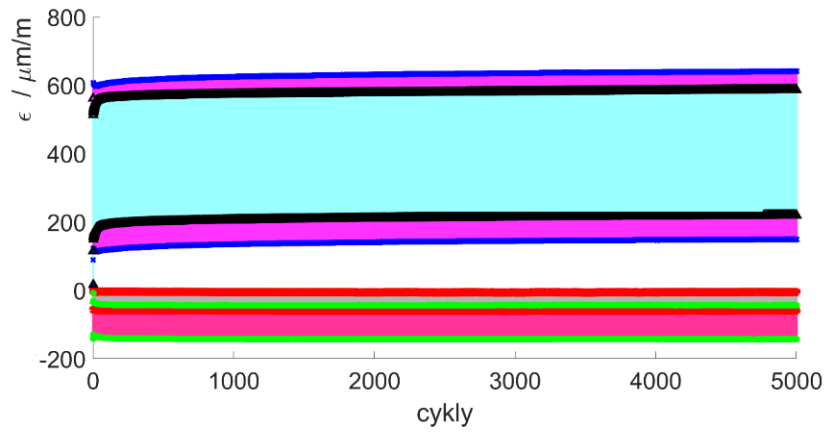
Obr. 168 Krabicový graf dynamický modul pružnosti z příčného kmitání PB2



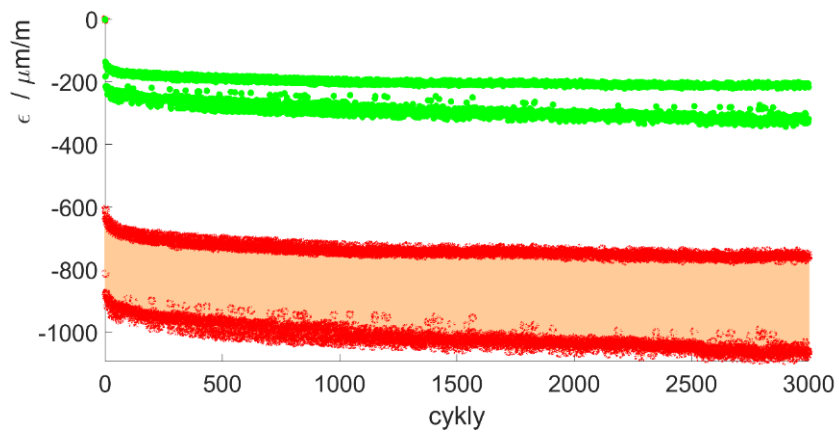
Obr. 169 Krabicový graf dynamický modul pružnosti ve smyku PB2



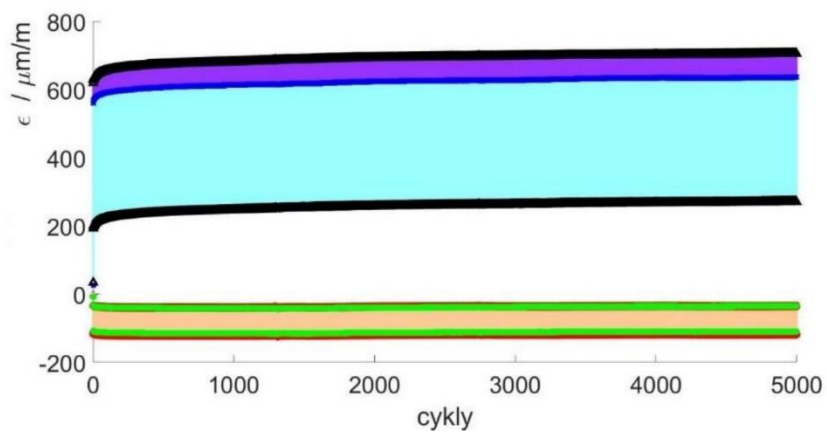
Obr. 170 Krabicový graf dynamické Poissonovo číslo PB2



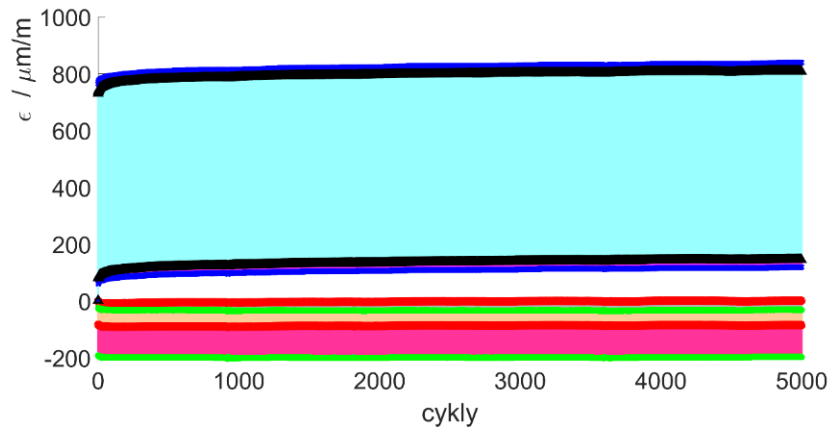
Obr. 171 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu LB2



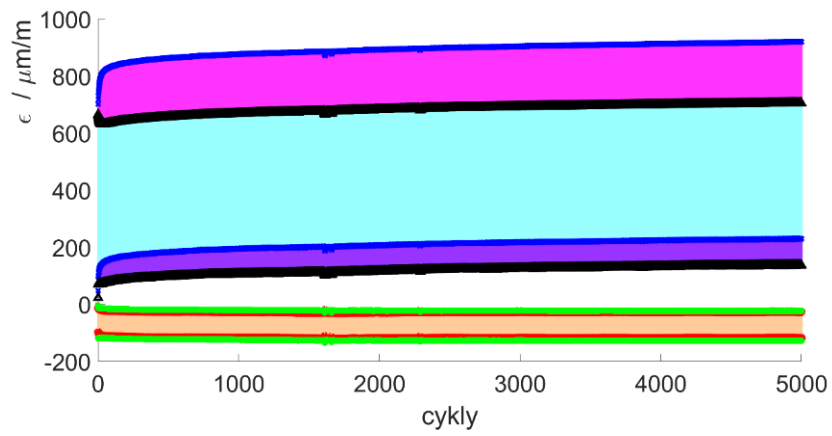
Obr. 172 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu OB1



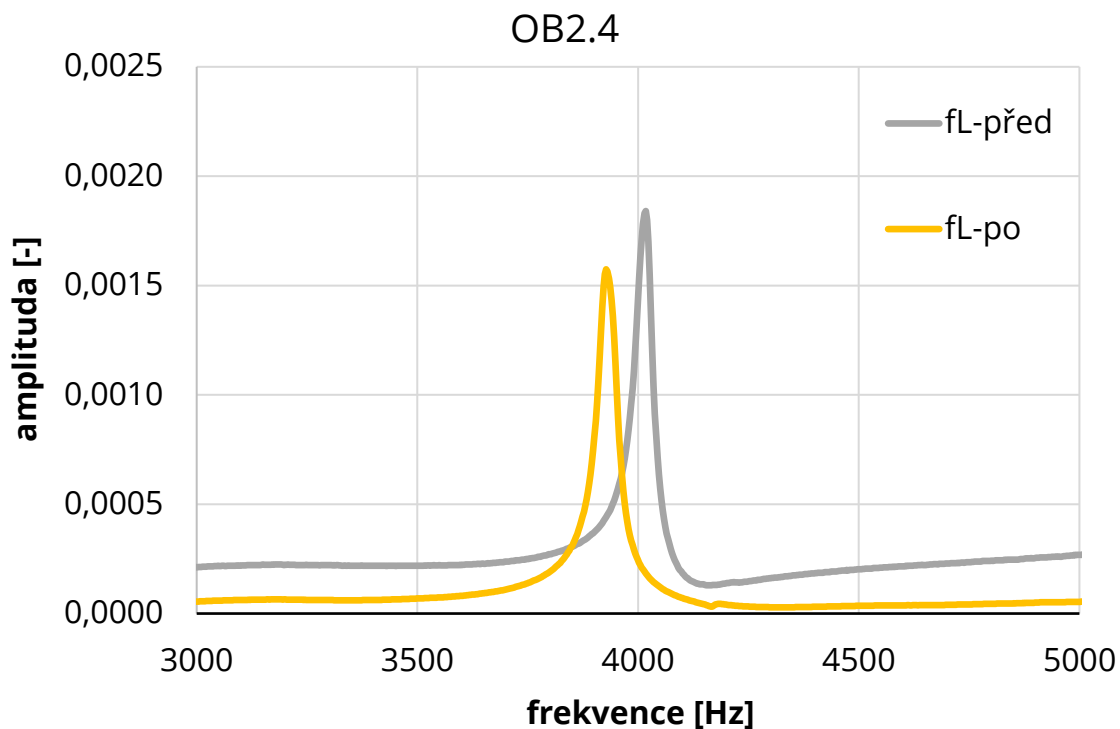
Obr. 173 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu OB2



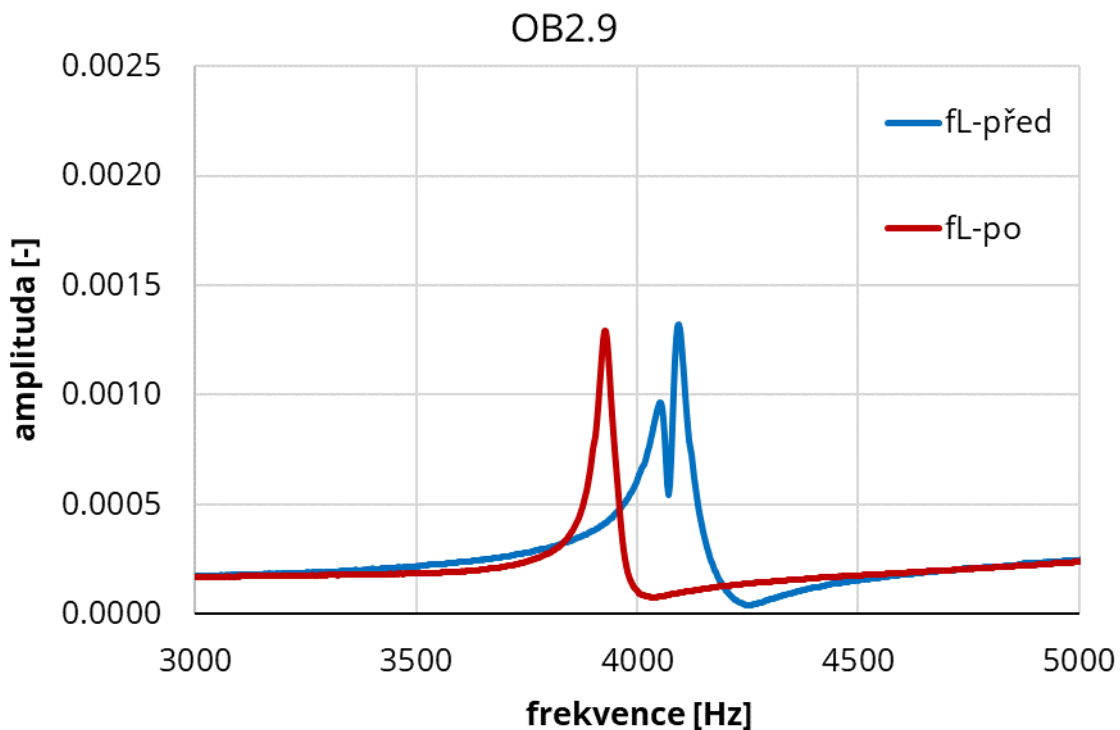
Obr. 174 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu PB1



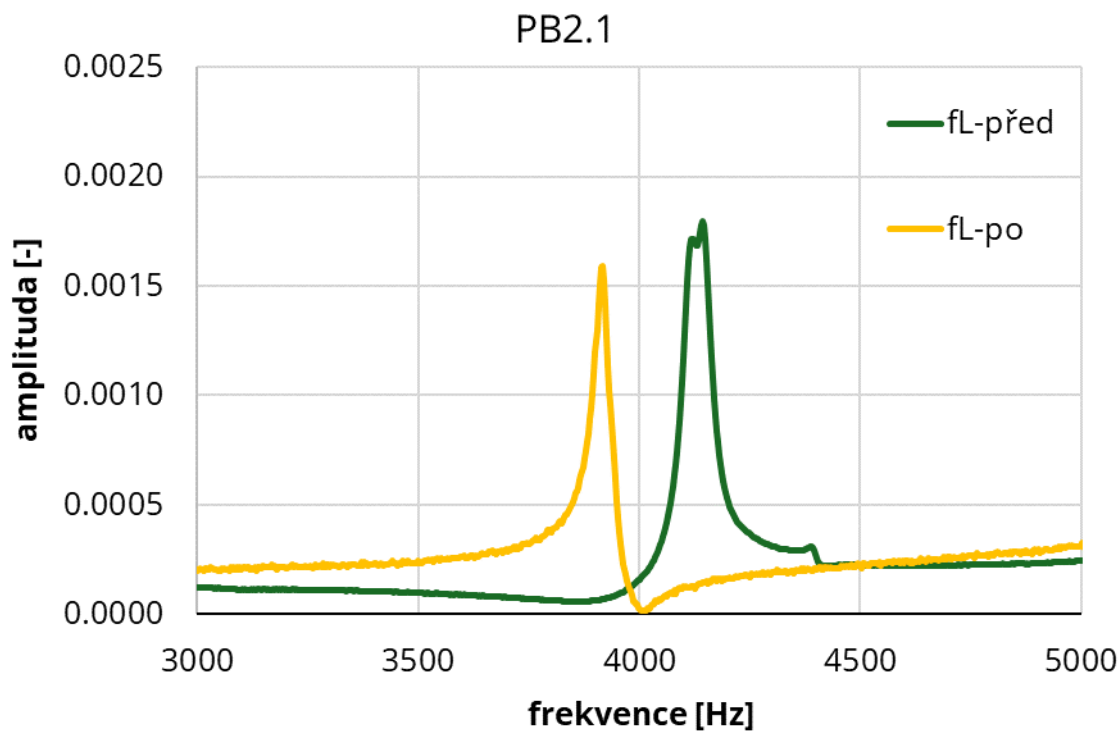
Obr. 175 Průběh poměrné deformace během cyklování betonu PB2



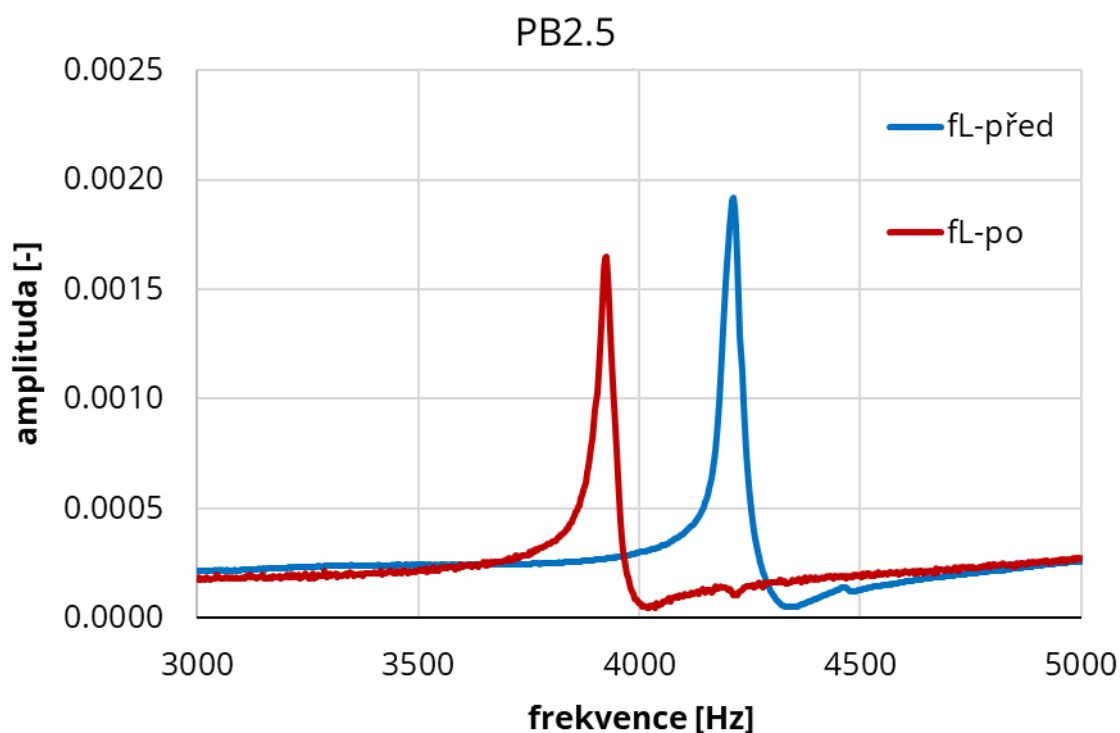
Obr. 176 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa OB2.4 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/3 očekávané pevnosti v tlaku



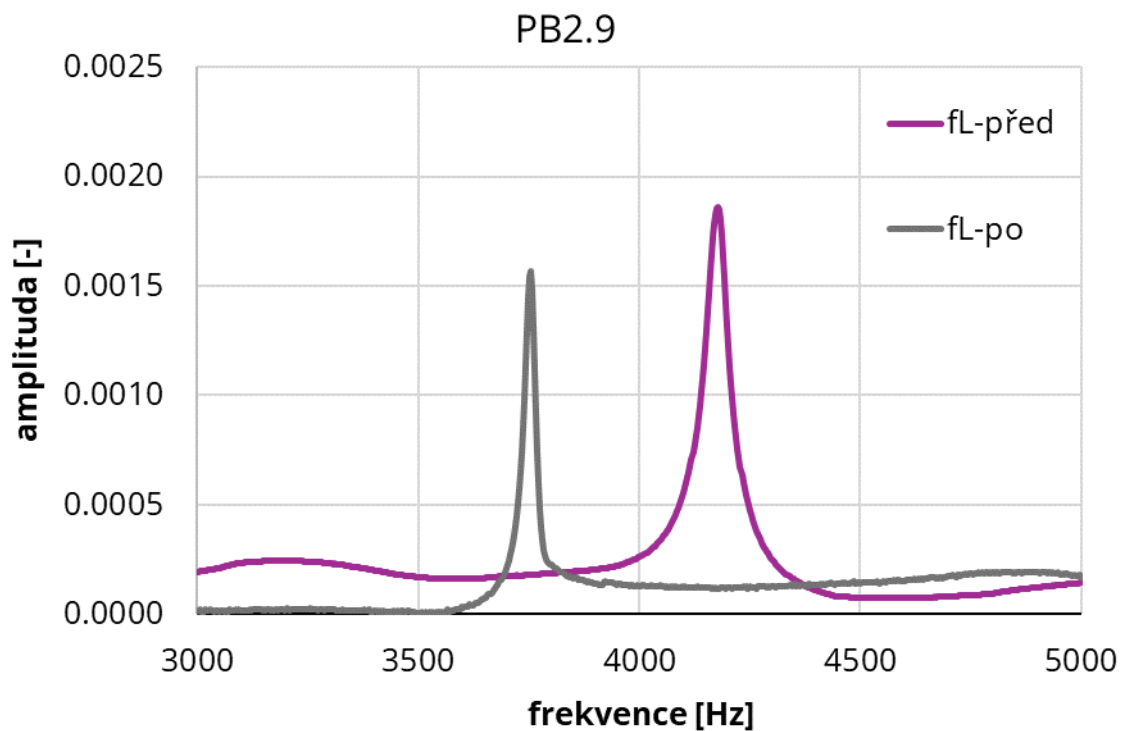
Obr. 177 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa OB2.9 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/2 očekávané pevnosti v tlaku



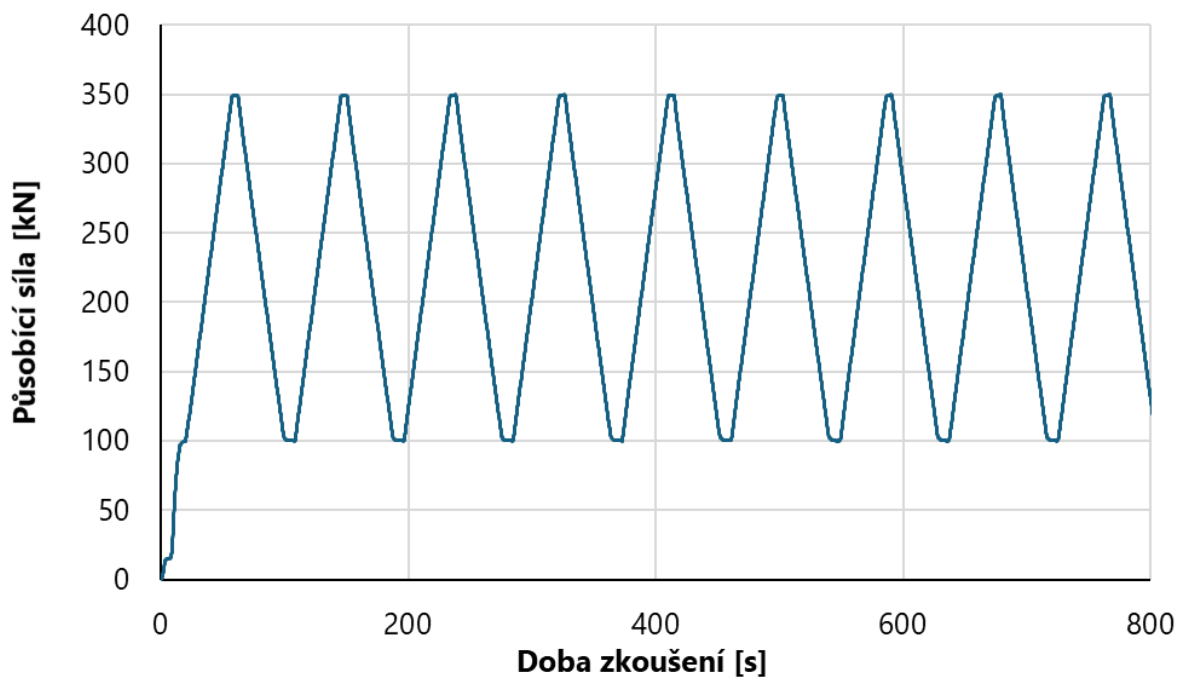
Obr. 178 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.1 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/3 očekávané pevnosti v tlaku



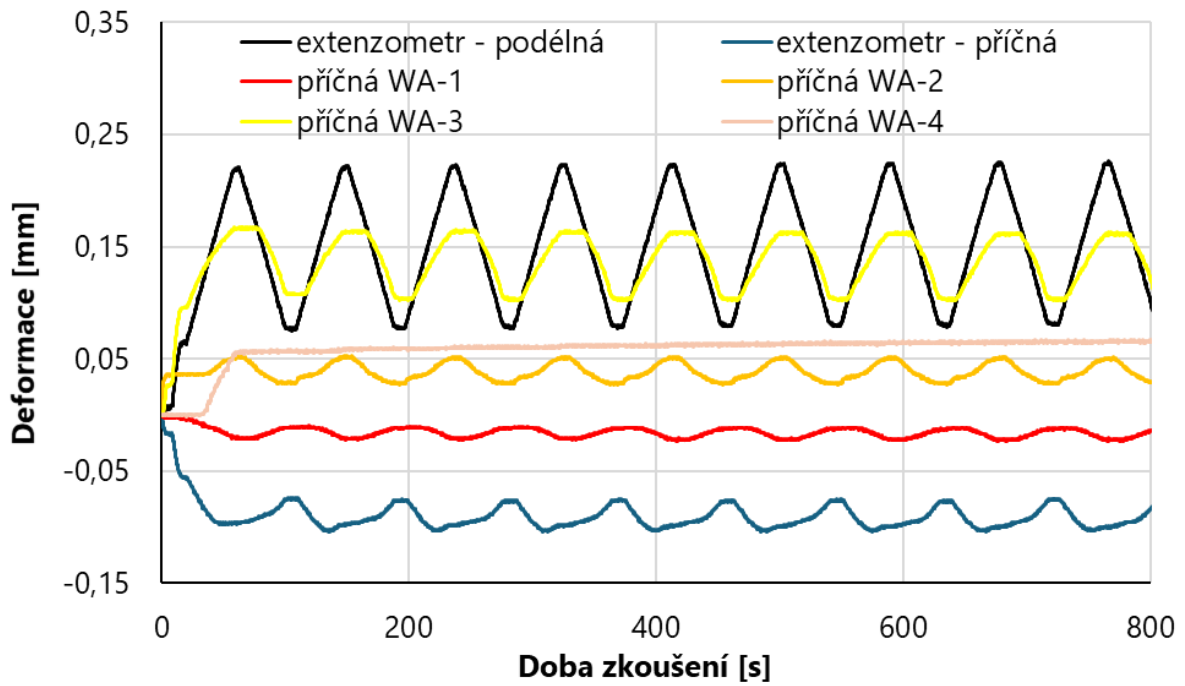
Obr. 179 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.5 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 1/2 očekávané pevnosti v tlaku



Obr. 180 Ukázka poklesu vlastní podélné frekvence zkušebního tělesa PB2.9 vlivem cyklování, horní zatěžovací hladina 2/3 očekávané pevnosti v tlaku



Obr. 181 Záznam působící síly během prvních 800 sekund – těleso OB1.7



Obr. 182 Záznam deformací během prvních 800 sekund – těleso OB1.7: je na první pohled zřejmé, že jediný záznam dat, který odpovídá působící síle, je podélná deformace zjištěná pomocí extenzometru, všechny ostatní záznamy jsou v podstatě nepoužitelné; pro výpočet modulu pružnosti byly proto použity pouze hodnoty získané pomocí odporových tenzometrů