



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV MNOHONÁSOBNÉHO CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA VLASTNOSTI OBYČEJNÉHO BETONU

THE INFLUENCE OF MULTIPLE CYCLIC LOADING ON THE PROPERTIES OF ORDINARY CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Pešek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

BRNO 2023



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIK Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Pešek
Název	Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování na vlastnosti obyčejného betonu
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	23. 3. 2022
Datum odevzdání	13. 1. 2023

V Brně dne 23. 3. 2022

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

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURA A PODKLADY:

Odborné knihy, jako jsou např.:

Aitcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.

Colleparidi, M.: Moderní beton.

Neville, A. M.: Properties of concrete.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Processes.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Neville, A. M.; Brooks, J. J.: Concrete technology.

Ramachandran, V. S.: Concrete Admixtures Handbook.

Bechyně, S.: Betonové stavitelství.

Pytlík, P.: Technologie betonu.

Tuzemské i zahraniční odborné články pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN ISO 1920-10, ČSN EN 206+A2, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, řada ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU:

Teoretická část bude obsahovat stručné informace, získané pomocí důkladné rešerše pramenů zadané problematiky. V této části bude pojednáno obecně o betonu, jeho vlastnostech, především pevnostních a pružnostních, podrobněji bude popsáno Poissonovo číslo. Dále budou důkladně popsány aspekty, které ovlivňují hodnotu modulu pružnosti betonu, bude zde také popis různých metod zkoušení modulu pružnosti a Poissonova čísla betonu.

Praktická část bude obsahovat následující body. Popis plánu experimentu, který se bude věnovat sledování vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování obyčejného betonu na jeho pružnostní a pevnostní vlastnosti. Mezi sledované vlastnosti budou patřit pevnost v tlaku, dynamický i statický modul pružnosti nebo dynamické i statické Poissonovo číslo. Provedení samostatného experimentu, který bude mimo jiné obsahovat nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody před i po zatěžování a také provedení dlouhodobějších (řádově desítky hodin) zatěžovacích zkoušek – mnohonásobné cyklické zatěžování. Dále zpracování výsledků zkoušek, jejich vyhodnocení a formulace vyplývajících závěrů.

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

CÍLE A VÝSTUPY DIPLOMOVÉ PRÁCE:

1. Provedení rešerše – shromáždění a prostudování relevantní literatury a vytvoření přehledu o stavu poznání v oboru a tématu práce.
2. Provedení experimentu – ověření vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování obyčejného betonu na jeho vybrané vlastnosti.
3. Vyhodnocení naměřených dat.
4. Formulace závěrů odpovídajících zjištěným skutečnostem.

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá sledováním pružnostních a pevnostních vlastností (primárně modulů pružnosti a Poissonova čísla) obyčejného betonu před a po mnohonásobném cyklickém zatěžování. Zkušební tělesa tvaru válce o průměru 150 mm a výšky 300 mm byla cyklicky zatěžována až 5000 zatěžovacími cykly, při kterých byly pomocí odporových tenzometrů naměřeny deformace zkušebních těles, ze kterých byl stanoven statický modul pružnosti. Dále byly provedeny zkoušky dynamického modulu pružnosti před i po zatěžování. Zkoušení těles bylo zakončené stanovením pevnosti v tlaku. Výsledky zkoušek jsou zpracovány a sledované parametry vyhodnoceny do tabelární a grafické podoby pro zformulování závěru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, mnohonásobné cyklické zatěžování, pevnost v tlaku, modul pružnosti, Poissonovo číslo

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the observation of elastic and strength properties (primary moduli of elasticity and Poisson's ratio) of ordinary concrete before and after multiple cyclic loading. Test specimens with cylinder shape and diameter of 150 mm and height of a 300 mm were cyclically loaded up to 5000 loading cycles with resistive strain gauges to measure deformations so static modulus of elasticity could be determined. Further on the test specimens were performed tests to determine the dynamic modulus of elasticity and whole testing was finished with compressive strength test. The results were processed and selected properties evaluated in tabular and graphical form to determine statistical data and formulate a conclusion.

KEYWORDS

Concrete, multiple cyclic loading, compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Lukáš Pešek *Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování na vlastnosti obyčejného betonu*. Brno, 2023. 73 s., 1 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování na vlastnosti obyčejného betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2023

Bc. Lukáš Pešek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv mnohonásobného cyklického zatěžování na vlastnosti obyčejného betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2023

Bc. Lukáš Pešek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Těmito řádky bych chtěl poděkovat v první řadě mému vedoucímu diplomové práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D za jeho hodnotné rady, připomínky a především trpělivost při zpracování mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, která nade mnou nezlomila hůl i přes moje neúspěchy a vždy mi byli po celou dobu studia oporou.

A nakonec mé přítelkyni Marušce, která po celou dobu zpracovávání diplomové práce při mně stála a pečovala o moje mentální zdraví.

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. CÍL PRÁCE.....	11
3. TEORETICKÁ ČÁST	12
3.1 Beton.....	12
3.1.1 Složky betonu.....	13
3.1.2 Rozdělení betonu.....	16
3.1.3 Vlastnosti betonu.....	18
3.2 Pevnosti betonu	19
3.2.1 Rozdělení pevností	19
3.2.2 Pevnost v tlaku.....	20
3.2.3 Pevnost v tahu	22
3.2.4 Pevnost ve smyku a kroucení	24
3.2.5 Třídy pevnosti betonu	25
3.3 Modul pružnosti.....	27
3.3.1 Pružnost a deformace betonu.....	27
3.3.2 Poissonovo číslo	30
3.3.3 Typy modulů pružnosti	36
3.3.4 Stanovení statického modulu pružnosti.....	37
3.3.5 Stanovení dynamického modulu pružnosti	40
3.3.6 Faktory ovlivňující modul pružnosti.....	44
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	49
4.1 Popis experimentu	49
4.2 Zkušební tělesa	49
4.3 Měření a zkoušení těles.....	51
4.3.1 Objemová hmotnost	51
4.3.2 Pevnost v tlaku.....	52
4.3.3 Dynamický modul pružnosti a Poissonovo číslo.....	53
4.3.4 Statický modul pružnosti a Poissonovo číslo	55
4.4 Výsledky měření.....	57
5. ZÁVĚR.....	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	68
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	71
SEZNAM OBRÁZKŮ	72

SEZNAM TABULEK	73
PŘÍLOHA	74

1. ÚVOD

Do popředí zájmu odborné veřejnosti se v posledních letech stále více dostávají vedle trvanlivosti betonu i jeho přetvárné vlastnosti. Mezi jednu z nich patří modul pružnosti betonu [1]. Modul pružnosti je základní charakteristika vypovídající o jeho přetvárných vlastnostech a ovlivňující deformační chování betonových konstrukcí. Je tak nezbytným parametrem pro správné statické modelování chování betonových konstrukcí a výpočtu dalších mechanických vlastností betonu jako třeba dotvarování, smršťování a mrazuvzdornost [2].

V minulosti byly tvořeny teoretické modely pro predikci vztahů mezi modulem pružnosti betonu a pevnostními charakteristikami betonů, které umožnily určit modul pružnosti výpočtem bez nutnosti jeho reálného měření. Nejčastěji je statický modul pružnosti vztahován k pevnosti v tlaku, ovšem jak vyplývá z teorie vnitřního systému chování betonu, každý element (kamenivo, cementová pasta, tranzitní zóna) vyznačuje značnými rozdíly ve schopnosti přenášet napětí a rozdílným pevnostním chováním, nelze tyto teorie o současných betonech přejímat bez ověření reálných hodnot [2]. Výsledná hodnota modulu pružnosti betonu je závislá na celé řadě faktorů od složení betonové směsi, přes technologii její výroby až po samostatné zkoušení vzorků v laboratorním prostředí.

V této práci se zaměříme speciálně na jeden faktor ovlivňující modul pružnosti a Poissonovo číslo, a tím je mnohonásobné cyklické zatěžování ztvrdlého betonu. Většina konstrukcí totiž během své funkčnosti vstupuje do střídavých stavů zatížení a odtížení. Je-li tedy zatížení konstrukce v jednom čase navýšeno a v dalším sníženo, pak lze konstrukci během její používání považovat za cyklicky zatěžovanou. Tyto cykly jsou nepravidelné a mohou se lišit v závislosti na účelu a způsobu použití konstrukce [3].

2. CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části této práce je rešerše pramenů o betonu, jeho vlastnostech, pevnostních a pružnostních, především Poissonovu číslu. Dále bylo cílem popsat jednotlivé aspekty, které ovlivňují hodnotu modulu pružnosti betonu a také popis různých metod zkoušení a stanovení modulu pružnosti a Poissonova čísla.

Cílem praktické části je zpracování plánu experimentu, jehož předmětem je sledování vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování obyčejného betonu na jeho pružnostní a pevnostní charakteristiky. Mezi sledované parametry bude patřit statický modul pružnosti a Poissonovo číslo, stanovené z deformací vzniklých při cyklickém zatěžování a odtěžování. Dále bude stanoven dynamický modul pružnosti a Poissonovo číslo pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody před i po zatěžování. Nakonec bude experiment zakončen zkouškou pevnosti v tlaku. Následně jsou zpracovány výsledky zkoušek, stanovení hledaných parametrů a jejich vyhodnocení do tabelární a grafické podoby pro stanovení statistických parametrů a zformulování závěru.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Beton

Beton, dříve definovaný jako umělý kámen, je nejrozšířenějším stavebním materiálem [4]. Beton je kompozitní látka vznikající ztvrdnutím směsi jeho základních složek, a to cementu jako nejčastěji používaného pojiva, kameniva (písku, šterku, drtě) jako plniva a vody, případně příměsí a přísady pro zlepšení jeho vlastností [5]. Na rozdíl od malt obsahuje beton drobné i hrubé kamenivo [6]. Je to druh staviva, které lze definovat jako umělý kámen vzhledově podobný přírodnímu slepenci [5].

Beton tvrdne a může být konstrukčním materiálem díky hydrataci cementu. To je souhrn chemických reakcí mezi cementem a vodou, díky nimž beton přechází z plastické hmoty, která je snadno zpracovatelná, přes materiál podobnému hornině, do materiálu pevného a mechanicky odolného. Během chemických reakcí mezi cementem a vodou dochází ke dvěma změnám. První změnou je tuhnutí, kdy čerstvému betonu postupně klesá zpracovatelnost, až cementová pasta úplně ztratí schopnost být tvarována. Druhou změnou je ztvrdnutí, kdy dochází k postupnému růstu pevnosti [7].

Aby beton skutečně splňoval požadavky na něj kladené, musí být vyráběn v dobré a stále stejnoměrné kvalitě. Toto je primárně zabezpečeno řadou normativních a doporučujících požadavků pro jeho výrobu a kontrolu v základním betonářském předpisu ČSN EN 206+A2 [8] a v navazujících souborech zkušebních metod pro čerstvý beton ČSN EN 12350 [9], pro ztvrdlý beton ČSN EN 12390 [10] a pro zkoušení betonu v konstrukci ČSN EN 12504 [11] spolu s ČSN EN 13791 [12] pro hodnocení kvality betonu v konstrukci či dílci a ČSN 73 2011 [13] pro nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí [5].

3.1.1 Složky betonu

Základní složky betonu tvoří cement, kamenivo a voda. Doplnkovými složkami jsou přísady a příměsi [5].

- **Cement** tvoří pojivou složku čerstvé betonové směsi [14]. Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Po smíchání s vodou vzniká cementový tmel, který postupně tuhne, tvrdne a mění se v cementový kámen [5]. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost i ve vodě. Hydraulické tvrdnutí je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů [4].

Při volbě druhu a třídy cementu se vychází z požadavků na výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti betonu, především na jeho pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem a trvanlivost [14].

Pro výrobu betonu je možno použít cementy, jejichž vhodnost je obecně prokázána splněním požadavků normy ČSN EN 197-1 ED.2 [15], která byla přijata pro jednotnou klasifikaci pro země EU.

Cementy se dělí druhově podle mineralogické skladby:

- CEM I – Portlandský (I)
- CEM II – Portlandský směsný (II)
 - Portlandský struskový (II/A-S, II/B-S)
 - Portlandský s křemičitým úletem (II-A/D)
 - Portlandský pucolánový (II-A/P, II-B/P, II-A/Q, II-B/Q)
 - Portlandský popílkový (II-A/V, II-B/V, II-A/W, II-B/W)
 - Portlandský s kalcinovanou břidlicí (II-A/T, II-B/T)
 - Portlandský s vápencem (II-A/L, II-B/L)
- CEM III – Vysokopecní (III-A, III-B, III-C)
- CEM IV – Pucolánový (IV-A, IV-B)
- CEM V – Směsný (V-A, V-B) [15].

Cementy se dále dělí na tři třídy normalizované pevnosti:

- 32,5; 42,5 a 52,5. (= pevnosti v tlaku v MPa)

Cementy s vysokými počátečními pevnostmi se označují R [4].

- **Kamenivo** je přírodní nebo umělá, převážně anorganická, zrnitá látka tvořící pevnou kostru v betonu s minimální mezerovitostí [4]. Mezi 70 až 80 % objemu betonu zabírá kamenivo, v důsledku čehož musíme očekávat významný vliv na vlastnosti betonu [16].

Kamenivo rozdělujeme podle původu (petrografie), velikosti největšího zrna v množině zrn, vzniku (těžené a drcené) a podle pórovitosti. Drcené kamenivo vzniklo drcením lomového kamene. Těžené kamenivo vzniklo přirozeným rozpadem hornin, zrna má teda zaoblena transportem zvětralé horniny. Předrcené kamenivo obsahuje 40-80 % drcených zrn, ostatní jsou přirozeně zvětralá zrna. Podle velikosti zrn a jejich skladby rozdělujeme:

- hrubé kamenivo s velikostí zrn 4-125 mm (štěrk, drť),
- drobné kamenivo s velikostí zrn do 4 mm (písek),
- jemné kamenivo do velikosti zrn 0,25 mm (filler, moučka),
- štěrkopísek, směr přírodního těženého hrubého a drobného kameniva, omezená největším zrnem,
- štěrkodrt, směs drceného přírodního kameniva hrubého i drobného, omezená největším zrnem [4].

Zrnitý charakter kameniva vystihuje zrnitost, tzn. rozdělení velikosti zrn kameniva od nejjemnějších po největší částice. Kamenivo tedy musí mít vhodnou zrnitost, aby nejjemnější zrna mohla vyplnit mezery mezi zrny většími. To napomáhá vzniku kostry kameniva, ve které je objem mezer mezi zrny minimální. Tyto mezery musí být zaplněny cementovým tmelem, takže po jejím ztvrdnutí je kamenivo, původně složené z jednotlivých zrn, transformováno na monolitický, tvrdý a pevný materiál, podobný kameni [7]. Kamenivo vhodné pro beton musí být tvořeno zrny různých velikostí, zrnitost buď plynulá nebo přetržitá [14]. Platí tedy, že křivka zrnitosti kameniva by se měla skládat minimálně ze dvou frakcí (z jednoho drobného a jednoho hrubého kameniva). Výrazně lepší vlastnosti vykazují kameniva složená ze tří frakcí [5].

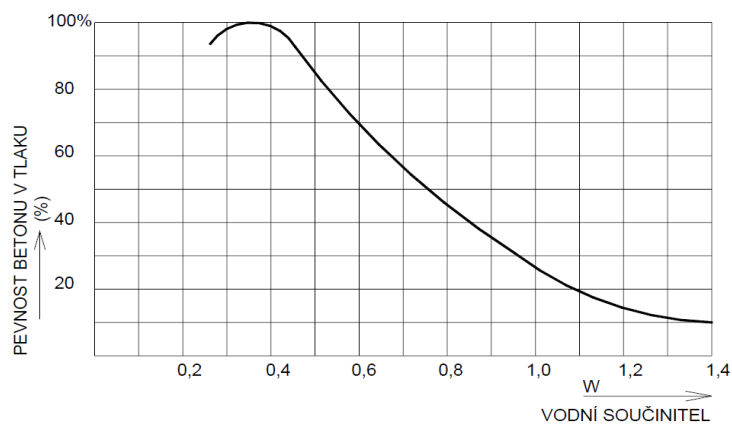
Kamenivo musí splňovat některé požadavky, jinak by došlo k porušení betonu. Do těchto požadavků patří především pevnost, odolnost vůči změnám teplot,

vlhkosti, mrazu, účinkům povětrnosti a absence škodlivých látek jako například chloridy, sírany, reaktivní silika, jíly nebo organické látky [4].

Vhodnost kameniva pro výrobu betonu podle ČSN EN 206+A2 [8] se obecně posuzuje pro hutné a těžké kamenivo podle ČSN EN 12620+A1 [17] a pro pórovité kamenivo podle ČSN EN 13055-1 [18] [5].

- **Voda** potřebná k výrobě betonu se dělí na záměsovou a ošetřovací. Záměsová voda je nezbytná k vytvoření dobře zpracovatelné směsi a k hydrataci cementu. Pro vlastní hydratační proces je potřeba cca 19-25 % vody z hmotnosti cementu. Tato minimální dávka zajistí přeměnu slinkových minerálů z cementu v hydrokřemičitany a hydrohlinity. Ošetřovací voda se zpravidla se dodává ve formě kropení nebo mlžení povrchu betonu a je nezbytná pro udržování betonu ve vlhkém stavu především prvních 14 dnech po zatuhnutí. Odpařuje se část záměsové vody a není-li nahrazena, snižuje se množství fyzikálně vázané vody ve struktuře čerstvého betonu a vzniká smršťování v době, kdy beton nemá ještě dostatečnou pevnost v tahu a tím nastává vznik trhlin a snížení konečné pevnosti a trvanlivosti betonu [14].

Množství vody přidávané k cementu vyjadřujeme vodním součinitelem, což je poměr hmotnosti vody k hmotnosti cementu [14]. Vyjadřuje zákonitost, že zvyšující se hodnota w/c na základě zvyšující se porozity projeví poklesem pevnosti. V praxi se uvažuje s množstvím vody odpovídajícím vodnímu součiniteli v rozmezí 0,35-0,80 [19], viz Obr. 1.



Obr. 1: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli w/c [19]

Voda musí odpovídat požadavkům ČSN EN 1008 [20] musí být čistá, málo tvrdá a příslušně teplá (15 °C). Nesmí obsahovat tuky, oleje, škodlivé organické látky, huminové kyseliny, fenolické látky a rašelinu [19].

3.1.2 Rozdělení betonu

Betony dělíme podle jejich vlastností, funkce v konstrukci, způsobu zpracování, způsobu dopravy a místa výroby [14].

- **Podle jiného použitého pojiva než portlandského nebo směsného cementu:**
 - sádrové,
 - vápenné,
 - polymerové,
 - z hlinitanového cementu,
 - z jemně mleté granulované vysokopecní strusky [14].
- **Podle objemové hmotnosti ztvrdlého betonu:**
 - lehké betony – $800 \leq D < 2000 \text{ kg/m}^3$,
 - obyčejné betony – $2000 \leq D \leq 2600 \text{ kg/m}^3$,
 - těžké betony – $D > 2600 \text{ kg/m}^3$ [8].
- **Podle speciálních vlastností:**
 - trvanlivé – odolávající vlivu prostředí a povětrnosti,
 - vodostavební – odolávající působení tlakové vody,
 - mrazuvzdorné – odolávající střídajícím účinkům mrazu,
 - korozivzdorné – odolávající účinkům agresivního prostředí,
 - rozpínavé – umožňující kontrolované rozpínání,
 - provzdušněné – lépe odolávající účinkům mrazu,
 - tepelně izolační – odolávající účinkům extrémních teplot,
 - žáruvzdorné – odolávající účinku ohně a žáru,
 - samozhutnitelný – zhutňuje se vlastní tíhou,
 - odolné vůči záření – [14].

- **Podle funkce v konstrukci:**
 - konstrukční – nosný beton,
 - výplňový – nenosný,
 - tepelně izolační,
 - silniční a vozovkové,
 - pohledový – upravený povrch [14].

- **Podle způsobu zpracování:**
 - vibrované,
 - dusané,
 - lité,
 - stříkané,
 - vibrolisované,
 - odsávané (vakuované),
 - odstředžované,
 - čerpané [19].

- **Podle způsobu a místa uložení v konstrukci:**
 - **monolitický** – čerstvá betonová směs se ukládá do bednění, kde se zhutní, zatvrdne, ošetřuje se a po zatvrdnutí plní svou funkci,
 - **prefabrikovaný** – konstrukční prvek je vyráběn ve výrobně nebo přímo na staveništi, uložení na skládce k dozrávání, ošetřován a posléze dopraven a uložen do konstrukce [14].

- **Podle vyztužení:**
 - **prostý beton** – neobsahuje výztuž se statickou funkcí,
 - **železobeton** – záměr vyztužený ocelovými pruty nebo svařovanými sítěmi podle statického výpočtu,
 - **předpjatý beton** – ocelová výztuž je předem nebo dodatečně v betonu předeprnuta,
 - **drátkobeton** – obsahuje rozptýlené drátky,
 - **vláknobeton** – obsahuje rozptýlená vlákna různých druhů materiálu [5].

3.1.3 Vlastnosti betonu

Beton je kompozitní materiál skládající se z pojiva, vody, plniva a dalších modifikátorů. Jeho celkové vlastnosti závisí na mechanických a fyzikálních vlastnostech jednotlivých složek, jejich objemových podílech a také vzájemném působení, ať už mechanického, fyzikálního nebo chemického, mezi jednotlivými fázemi [21].

Vlastnosti betonu lze rozdělit do čtyř skupin podle společných znaků:

- **mechanické vlastnosti**, nebo-li pevnosti betonu v tlaku, v příčném tahu, v tahu ohybem a ve smyku,
- **deformační vlastnosti**, tj. vlastnosti související se změnou objemu, působením vnějších sil (modul pružnosti, dotvarování betonu) nebo působením vnitřních sil (smrštění),
- **permeabilita betonu**, která popisuje pohyb media nebo toku energie (vodotěsnost, vzlínavost, nasákavost, provzdušnost, tepelná a elektrická vodivost),
- **trvanlivost betonu**, tj. odolnost proti působení vnějších sil, polí a chemických látek (ohnivzdornost, mrazuvzdornost, chemická odolnost, obrusnost, odolnost proti korozi betonu a oceli) [4].

V technologii betonu platí obecné zásady:

- 1) **Vlastnosti betonu mají empirický charakter** a zjištěné veličiny jsou podmíněny použitou zkušební metodou. Provádí-li se zkoušení na jiných zkušebních tělesech nebo jiným způsobem či v jiném prostředí, výsledky nejsou srovnatelné.
- 2) **Vlastnosti betonu mají stochastický charakter**, výsledky musíme posoudit ze souboru nahodile vybraných vzorků pomocí matematické statistiky.
- 3) **Zkoušení vlastností je ireversibilní**. Na stejném vzorku nelze vícekrát zkoušet jednu nebo i další vlastnosti.
- 4) **Vlastnosti betonu jsou funkcí času (stáří betonu)**. každá veličina charakterizující vlastnost betonu souvisí se stářím betonu [4].

3.2 Pevnosti betonu

Pevnost betonu je jeho nejdůležitější konstrukční vlastností. V širším slova smyslu ji lze definovat jako schopnost betonu odolávat napětím. V užším slova smyslu se pevností rozumí mezní hodnota napětí, při kterém se materiál poruší. Pevnost se tedy vyjadřuje ve stejných jednotkách jako napětí a je praktickým měřítkem kvality betonu [22].

V principu je pevnost betonu výslednicí vyplívající z pevnosti zatvrdlého cementového tmele, pevnosti kameniva (plniva) a z pevnosti vazby mezi tmelem a kamenivem. Vzhledem k tomu, že je u běžných konstrukčních betonů je pevnost použitého kameniva vyšší než pevnost cementového tmele, stává se rozhodujícím faktorem pevnosti betonu obvykle pevnost cementového tmele [22].

Pevnost můžeme definovat ze tří hledisek:

- **Pevnost strukturní (teoretická)** – teoreticky stanovené hodnota pevnosti materiálu na základě vazebných sil mezi atomy, molekulami a částicemi látky, přičemž se uvažují skutečná rozdělení napětí deformací uvnitř struktury [5].
- **Pevnost technická** – pevnost z hlediska potřeb stavební praxe pro stanovení výpočtových hodnot pro projektování a pro provádění kontroly jakosti materiálů použitých v konstrukci [5].
- **Pevnost statistická** – je hodnota určená na základě teorie pravděpodobnosti a zajišťuje spolehlivost konstrukce i bez znalosti skutečných nebo teoretických pevností v konstrukci při současném uvažování technické pevnosti [14].

3.2.1 Rozdělení pevností

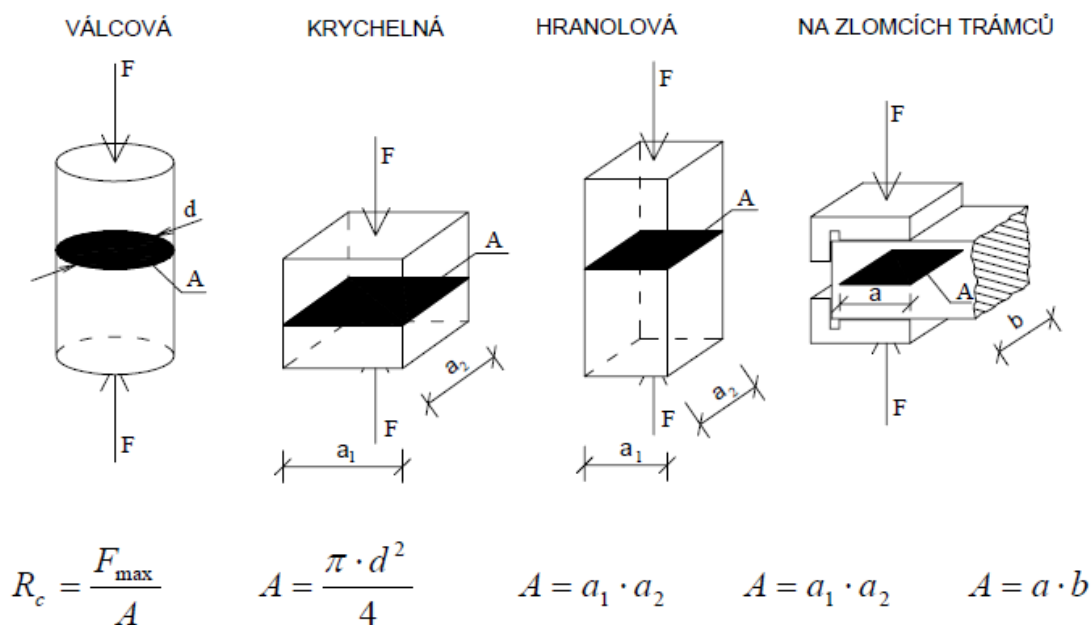
Beton vzdoruje rozdílnou měrou všem druhům napětí, která v betonové konstrukci vznikají. Beton je křehkou látkou, která vzdoruje napětím v tahu a ve smyku podstatně méně, než pevnosti v tlaku. Podle toho, jakému druhu napětí je beton vystaven až do mezní (lomové) hodnoty, označujeme i pevnosti [4].

Podle statického působení zatížení rozeznáváme pevnosti betonu:

- pevnost v tlaku (prostém, v sevřeném stavu, v soustředěném),
- pevnost v tahu (prostém, ohybem, příčném),
- pevnost ve smyku (stříhu, propichování) a v kroucení [4].

3.2.2 Pevnost v tlaku

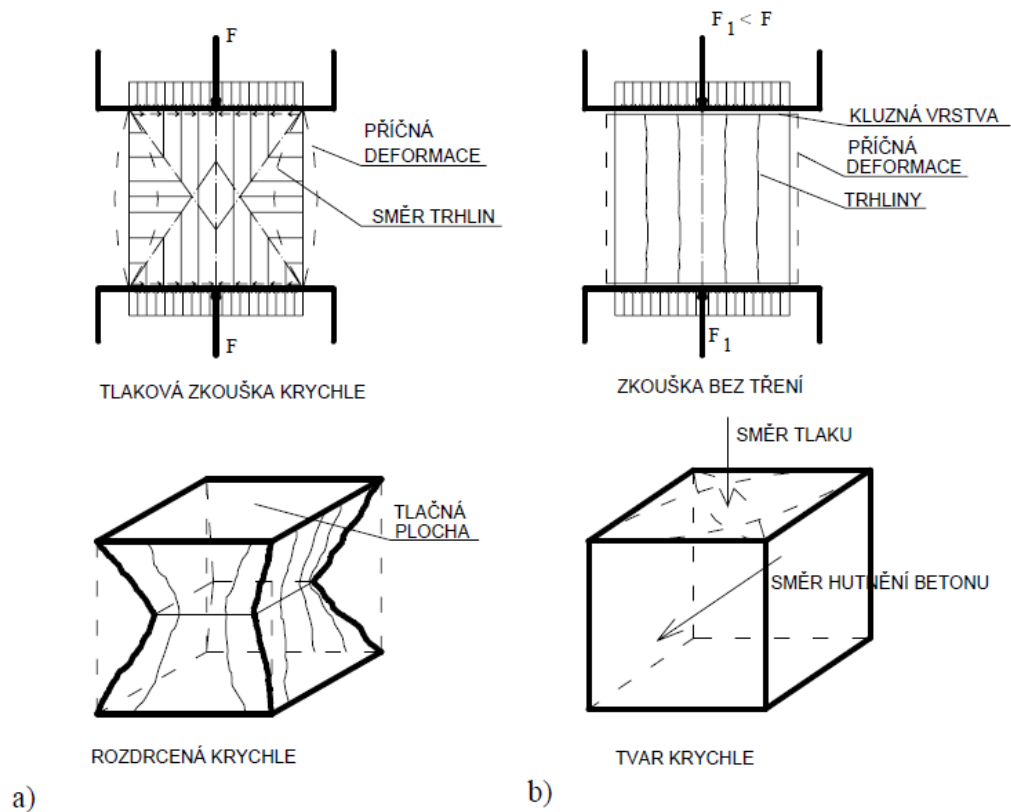
Zkouší podle normy ČSN EN 12390-3 [23] na krychlích (pevnost krychelná), válcích (pevnost válcová) a hranolech (pevnost hranolná) vyhovujících požadavků ČSN EN 12390-1 [24]. Poměr výšky k šířce základny u hranolů bývá 3:1 nebo 4:1, válců 1:1 nebo 2:1, viz Obr. 2 [14].



Obr. 2: Stanovení pevností v tlaku [19]

- **Krychlená pevnost** se zjišťuje běžně o hraně 150 mm. Betonová krychle vystavená tlaku od tlačných ploch zkušebního lisu se při překročení pevnosti v tlaku porušuje rozrušením betonu v příčném směru v důsledku účinků příčných tahů. Pokud by bylo možné vyloučit vliv tření na styčných plochách, potom by při překročení pevnosti nastalo porušení vertikálními trhlinkami, rovnoběžnými se směrem působící tlakové síly, viz Obr. 3 b). Při reálné zkoušce nelze vliv tření vyloučit, výslednicí tření pak jsou třecí síly směřující dovnitř styčné plochy a zabraňující volnému průběhu příčných deformací.

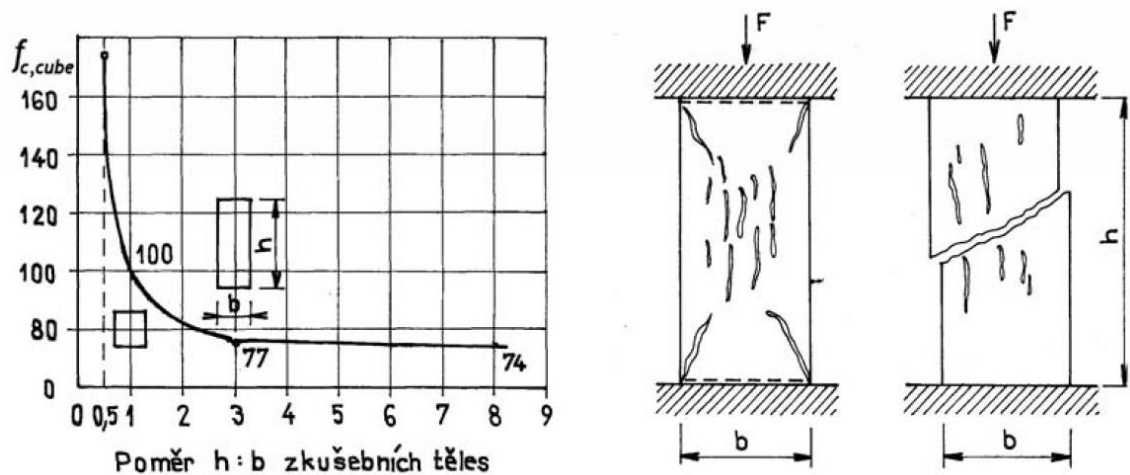
Účinek tření se zmenšuje se vzdáleností od čelních ploch krychle, a proto vzniká při porušení vzorku zbytkové těleso typického tvaru připomínající přesýpací hodiny, viz Obr. 3 a). přímým důsledkem popsaného jevu zvýšení pevnosti takto zkoušeného betonu oproti pevnosti ve skutečném prostém tlaku a to o přibližně 30 až 50 % [22].



Obr. 3: Reálný a ideální způsob porušení tlačného vzorku [19]

- **Hranolová a válcová pevnost** závisí výrazně na štíhlosti zkušebních tělesech, tj. na poměru výšky h a strany čtvercové strany základny b (průměru d u válce). Se vzrůstající štíhlostí se snižuje vliv tření v šelistech zkušebního zařízení a zjišťovaná pevnost klesá. Hranolová pevnost f_c výrazně klesá do štíhlosti $h/b = 3$ na cca 77 % pevnosti krychelné, viz Obr.4 [22].

Tyto dvě pevnosti lépe vyjadřují pevnost betonu v tlaku v konstrukci a nazýváme ji pevností v dostředném tlaku. Vztah mezi pevností krychelnou, hranolnou a válcovou je $1 : 0,75-0,8 : 0,7-0,83$ [19].



Obr. 4: Závislost relativní pevnosti betonu na štíhlosti, způsob porušení hranolu [22]

3.2.3 Pevnost v tahu

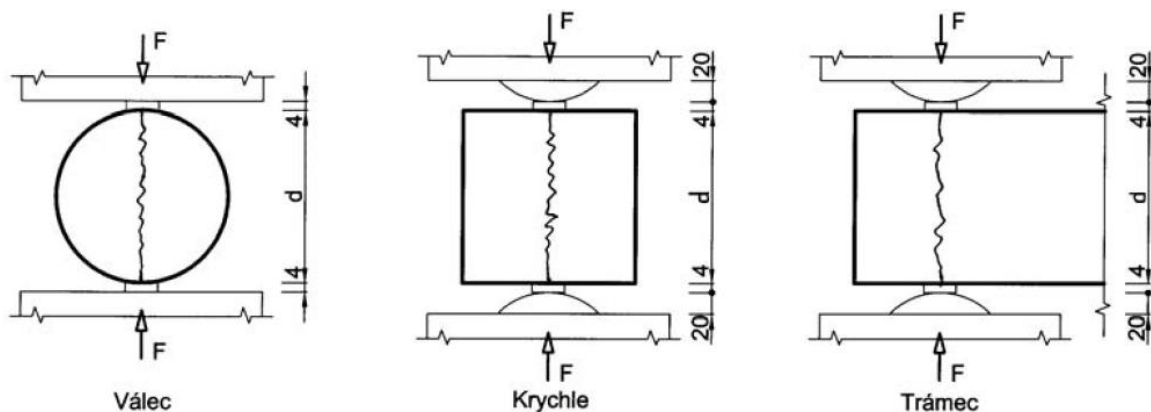
Pevnost betonu v tahu je relativně velmi malá a dosahuje u obyčejných betonů z hutného kameniva jen asi 1/8 až 1/15 pevnosti betonu v tlaku. Na pevnosti betonu v tahu přitom závisí, zda v tažené části betonu vzniknou či nevzniknou trhliny [22].

Pevnosti betonu v tahu rozeznáváme:

- pevnost v prostém (osovém) tahu,
 - pevnost v příčném tahu (štípaním),
 - pevnost v tahu ohybem [19].
- **Pevnost v prostém tahu** se zjišťuje na hranolech nebo válcích namáháním osovým tahem v podélném směru. Přesně zabroušené, rovnoběžné uží plochy se nalepí vhodným lepidlem na robustní ocelové desky, které ve středu mají závit pro zašroubování všestranně otočného kloubu s úchytnou tyčí, která se sevře do čelistí trhačího stroje. Dále je třeba při přípravě zkoušek věnovat značnou pozornost vystředění zkušebního hranolku nebo válce mezi čelisti. Seběmenší excentricita zapříčiní skutečnost, že hranolek není namáhán tahem osově nýbrž mimostředně, a získané výsledky jsou zkresleny [19].
- Zkoušení pevnosti betonu v prostém tahu je pro běžnou kontrolu jakosti obvykle dosti složité a proto se často používají spíše zkoušky v příčném tahu [22].

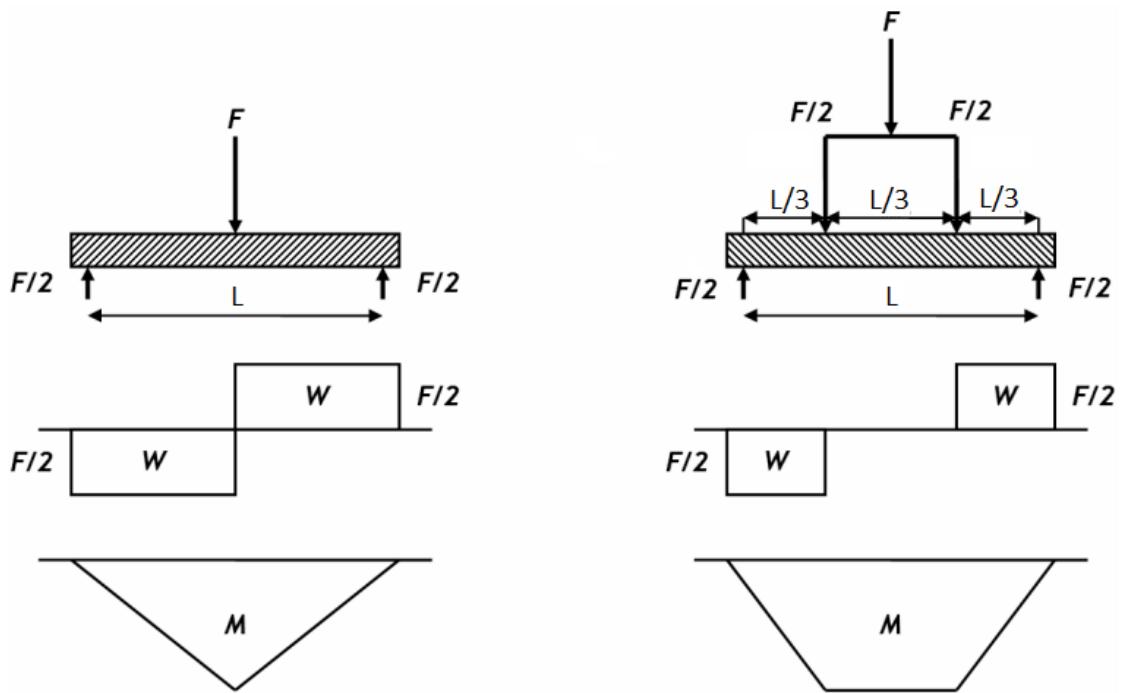
- **Pevnost v příčném tahu** se zkouší dle ČSN EN 12390-6 [25] na zkušebních tělesech ve tvaru válce, alternativně připouští se i krychle nebo hranol (zpravidla po jeho rozlomení zkouškou v tahu ohybem). Tělesa jsou prostřednictvím roznášecích příložek rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu vyhovujícím požadavkům ČSN EN 12390-4 [26], viz Obr. 5 [5]. Jde v podstatě o vyvození soustředěného namáhání, které uvnitř tělesa vyvodí příčné napětí v tahu, které následně rozstřípne zkušební vzorek ve svislé ploše spojující obě tlačené příložky. Toto napětí se nazývá pevnost v příčném tahu.

Pevnosti v příčném tahu jsou opět podstatně nižší než pevnosti tlakové a dosahují hodnot od 1,5 do 4,0 MPa v závislosti na pevnosti betonu v tlaku [19].



Obr. 5: Varianty uspořádání zkoušky v příčném tahu [22]

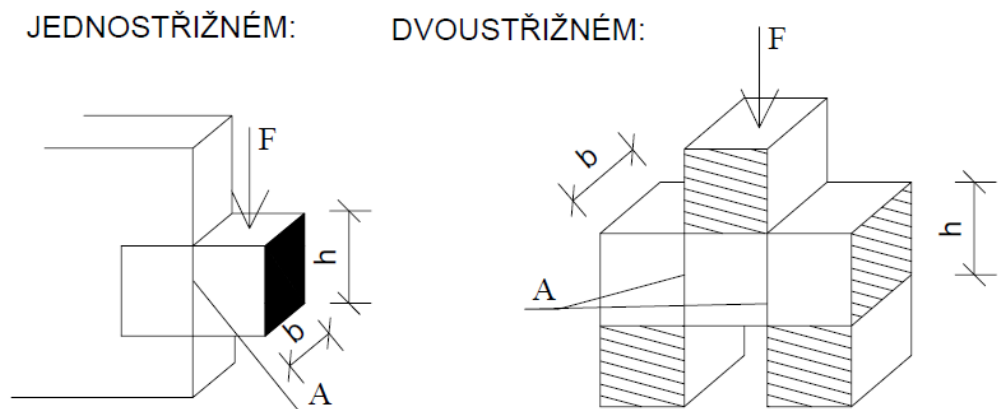
- **Pevnost v tahu ohybem** se zkouší dle ČSN EN 12390-5 [27] na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu dle ČSN EN 12390-1 [24]. Tělesa uložené na dvou válcových podporách jsou rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu prostřednictvím zatěžovacího zařízení, nastaveného buď na jedno břemeno (tříbodový ohyb) uprostřed zkušebního tělesa nebo dvě břemena (čtyřbodový ohyb) ve třetinách rozpětí trámce, viz Obr. 6 [5]. Při postupném zatěžování vznikají ve spodních vláknech trámce tahové napětí a v horních vláknech napětí tlaková. Při porušení tahem ve spodní části trámce se únosnost vyčerpá překročením pevnosti betonu v tahu za současného vzniku trhlin, které se v betonu rychle šíří po celé výšce hranolu k tlačnému okraji. Trámec se zlomí a současně nastává nastane částečné drcení betonu v horní tlačené zóně [19]. Výsledkem měření je maximální hodnota síly F , dosažené při porušení tělesa [5].



Obr. 6: Třibodový tah ohybem (vlevo) a čtyřbodový tah ohybem (vpravo) [27]

3.2.4 Pevnost ve smyku a kroucení

- **Pevnost ve smyku** se zjišťuje na tělesech takového tvaru, které umožní vyvolat požadovaná napětí ve smyku, ať jednostřížném nebo dvoustrížném, viz Obr. 7 [19].
- **Pevnost v kroucení** se běžně nestanovuje. Zkušební těleso, většinou opět válec nebo hranol se nalepí na speciální čelisti a vyožuje se v nich kroučící moment při porušení zkušební tělesa [14].



Obr. 7: Stanovení pevnosti ve smyku [19]

3.2.5 Třídy pevnosti betonu

Pevnost betonu v tlaku představuje vzhledem k obvyklé funkci betonu v konstrukci jeho základní charakteristiku a také se i nejnázne určuje. Proto se pevnost betonu v tlaku stala podkladem pro třídění a značení různých jakostí [22]. Evropská norma ČSN EN 206+A2 [8] tak klasifikuje třídy pevnosti jako charakteristické pevnosti betonu v tlaku zjištěné na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm nebo charakteristickou pevnost v tlaku zjištěnou na krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dnů zkoušené podle ČSN EN 12390-3 [23] a to pro obyčejný beton a těžký beton (C), viz Tab. 1 a pro lehký beton (LC), viz Tab. 2 [8].

Tab. 1: Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu [8]

Třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tab. 2: Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu [8]

Třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Výše uvedené údaje ukazují, že rozdíl mezi $f_{ck,cyl}$ a $f_{ck,cube}$ je asi 20 % u běžného betonu a mnohem méně u (asi 10 %) u lehkého betonu [7].

3.3 Modul pružnosti

Na pevnostní vlastnosti betonu úzce navazují vlastnosti přetvárné. Avšak charakteristiky, které jsou nutné pro výpočet okamžitých i dlouhodobých přetvoření, nezávisí jen na pevnostní třídě betonu, ale také na prostředí působícím na beton během jeho tuhnutí, tvrdnutí i během jeho celé životnosti [28].

Modul pružnosti betonu E je základní přetvárnostní charakteristikou betonu. Je definovaný z Hookeova zákona jako poměr napětí σ k poměrné deformaci ε . Pro případ smykového namáhání je modul pružnosti G definován jako poměr tečného napětí τ a zkosu γ [19]. Pro správné pochopení modulu pružnosti je potřeba vysvětlit i opěry na kterých stojí, a to teorii pružnosti a plasticity.

3.3.1 Pružnost a deformace betonu

Teorie pružnosti a teorie plasticity jsou součástí mechaniky kontinua pevné fáze – deformovatelných těles. Předmětem zkoumání jsou především napětí (intenzita vnitřních sil) v tělese a deformace (přetvoření). Studuje se též stabilita – schopnost zachovat nebo obnovit původní rovnovážný stav bez samovolného narůstání deformací [29].

Pružnost rozumíme, že materiál se chová elasticky (pružně), ve chvíli kdy tedy na něj přestanou působit vnější deformace, vrátí se do svého původního stavu. **Plasticita** je naopak schopnost látky deformovat se bez porušení nevratným, tvárným způsobem. Zatížení a odlehčení se neřídí shodnými zákonitostmi, v tělese zůstávají i po odstranění zatížení trvalé deformace [29].

Působením mechanického napětí dochází ve skruktuře pevných látek ke změnám vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi, k jejich vzájemným posunům i k složitým strukturálním změnám v důsledku čehož mění tuhá tělesa tvar i objem [30]. Tyto změny jsou označovány jako **deformace** nebo také přetvoření. Pro statický výpočet konstrukcí jsou ukazateli přetvárnosti modul pružnosti a modul přetvárnosti [2].

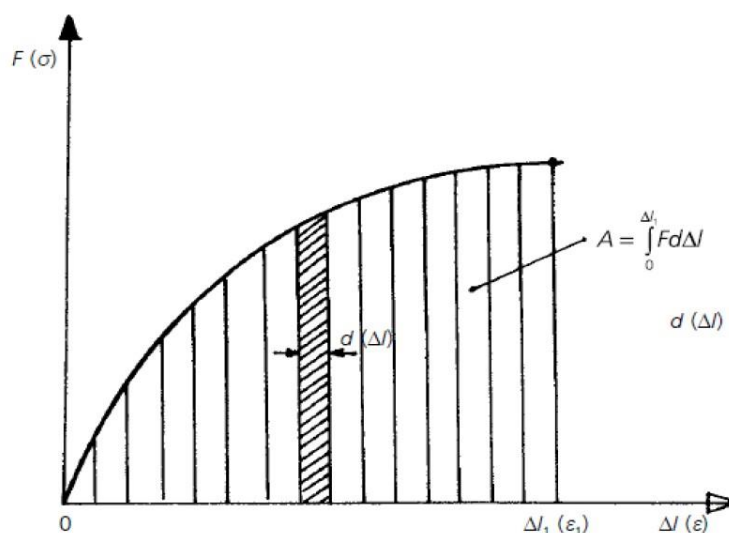
Přetvárnostní charakteristiky betonu se rozdělují na:

- statické – projeví se po krátkodobém nebo v krátké době opakovaném zatížení,
- dynamické – projeví se po mnohonásobně opakovaném cyklickém zatížení,
- reologické – projeví se při dlouhodobém zatížení označovaném jako dotvarování [2].

Deformace betonu dělíme dále na **pružné** (reversibilní, elastické, vratné) a **nepružné** (ireversibilní, plastické, nevratné). Pružná deformace je složena ze dvou částí, z okamžitého pružného přetvoření, které nastává okamžitě s přírůstkem (změnou) hladiny napětí a z dopružování (zpožděná pružnost), u které nastává opožděně a se zrušením napětí postupně vymizí [31]. Pružné deformace jsou charakterizované modulem pružnosti, teplotní roztažností a částečně i smrštěním betonu, způsobeným migrací vlhkosti [4]. Nepružná deformace se projevuje prakticky ihned po zvýšení hladiny napětí a po odlehčení ani čase nezmizí [31]. Plastickými deformacemi jsou dotvarování betonu, způsobené dlouhodobým zatížením a částečně smrštění, které vyvolává hydratace a karbonatace betonu [4].

Deformační a pracovní diagramy

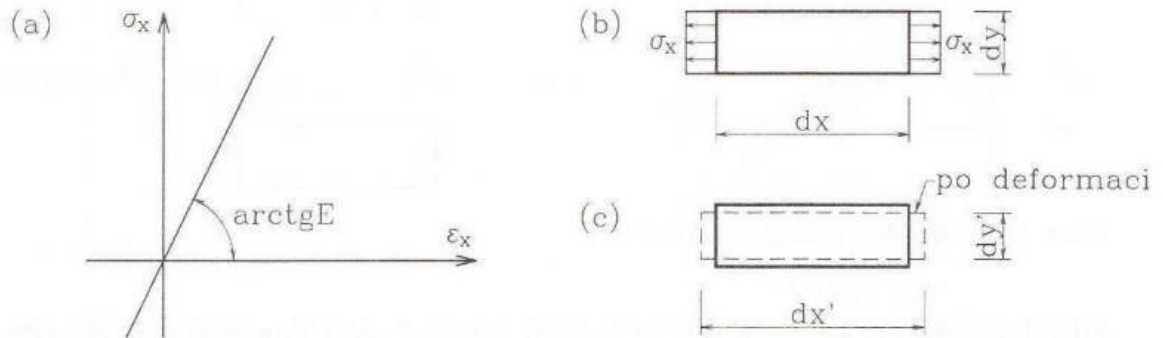
Deformace pevných látek účinkem napětí vyjadřuje pracovní diagram, tj. závislost deformace Δl na síle F , která způsobila v látce napětí, a tím i deformaci v určitém směru nebo deformační diagram, tj. závislost poměrné deformace ε na napětí σ jí vyzovující, viz Obr. 8 [5].



Obr. 8: Pracovní diagram ($F - \Delta l$), deformační diagram ($\sigma - \varepsilon$) [5]

Hookův zákon

Pro pružný materiál platí jednoznačná závislost mezi napětími a deformacemi ve všech fázích působení, tedy při zatěžování i odlehčování. Tato závislost by teoreticky mohla být i nelineární, praktický význam má však především pružnost lineární [29].

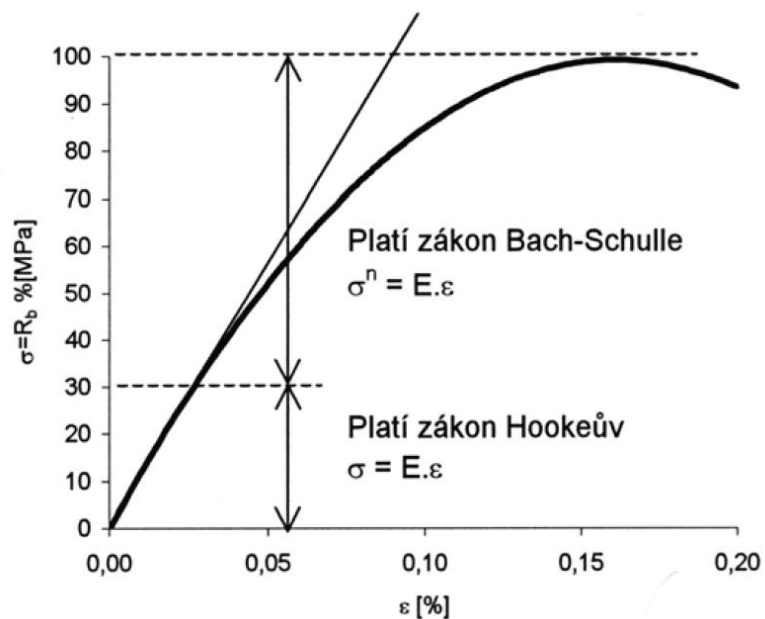


Obr. 9: Hookův zákon v tahu (a tlaku) [29]

Pro elementární kvádr namáhaný jen normálovým napětím ve směru osy x (jednoosá napjatost), viz Obr. 9, je lineární vztah mezi poměrným prodloužením ϵ_x a normálovým napětím σ_x vyjádřen Hookovým zákonem v tahu a tlaku :

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E},$$

kde E je modul pružnosti c tahu a tlaku (Youngův), což je fyzikální konstanta, která má rozměr napětí a obvykle se udává v MPa [29].



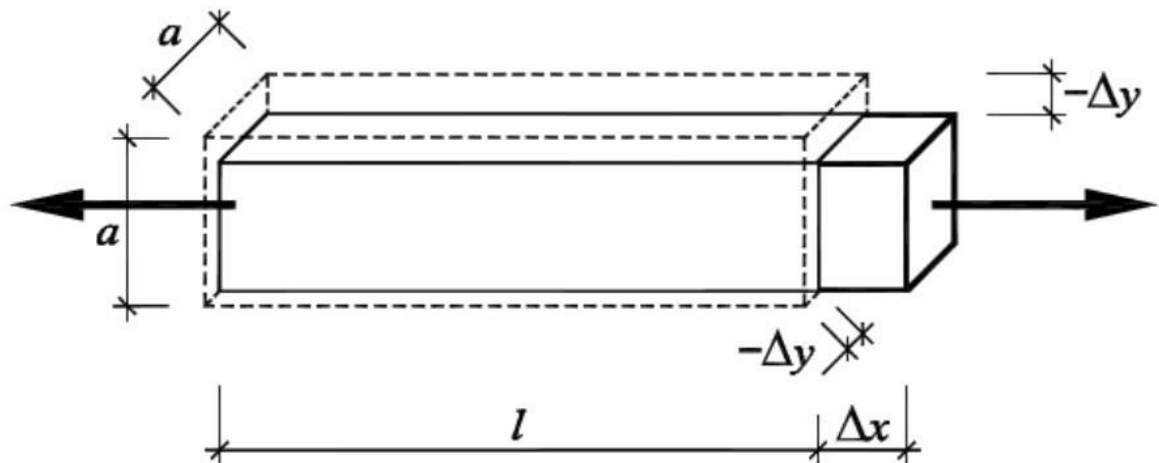
Obr. 10: Pracovní diagram betonu v tlaku [19]

Na Obr. 8 je zobrazen pracovní diagram betonu v tlaku. Zatímco v pružné oblasti platí Hookův zákon, v oblasti nepružné platí mocninový zákon Bach-Schulleův, což je obdoba Hookova zákona. Součinitel n v mocnině napětí je číslo větší než 1, do 20-30 % pevnosti betonu jej uvažujeme jako hodnotu $n = 1$ [14].

Z uvedeného je zřejmé, že pružné a přetvárné vlastnosti betonu lze plně vystihnout jednoduchou konstantní charakteristikou, jakou je například modul pružnosti. Proto se v případě betonu klade velký důraz na sledování závislosti přetvoření na působícím napětí v celém rozsahu možných namáhání [22].

3.3.2 Poissonovo číslo

Když na beton působí jednoosé zatížení, vyvolává v tělese podélnou deformaci a zároveň i deformaci příčnou opačného znaménka, viz Obr. 11 [32]. Poměr této příčné deformace k podélné deformaci se nazývá Poissonovo číslo nebo také součinitel příčného zkrácení. Příčná deformace při stlačování v podélném směru vyplývá ze změn ve struktuře zkušebního tělesa. Příčná deformace má vždy opačné znaménko než deformace podélná. Podélnému zkrácení odpovídá tedy příčné roztažení a naopak [14].



Obr. 11: Vzájemný vztah mezi podélnou a příčnou deformací [50]

Poissonovo číslo se značí řeckým písmenem ν (dříve označovanou též μ). Je to vždy kladné číslo a nemůže nabýt hodnoty větší jak 0,5, neboť by např. všestranně tláčené těleso zvětšovalo svůj objem [29].

Veličina je pojmenována po Siméonu Denisu Poissonovi, který byl francouzský teoretický fyzik, matematik, geometr a astronom [33].

Statické Poissonovo číslo se vypočítá pomocí vztahu:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

kde je ν Poissonovo číslo,

ε_y poměrná deformace v příčném směru (kolmá na směr namáhání),

ε_x poměrná deformace v podélném směru (ve směru namáhání) [29].

Pro anizotropní materiály jako je například dřevo je Poissonovo číslo různé v závislosti na směru zatížení vůči struktuře [29]. Pro izotropní a lineárně pružné materiály je Poissonovo číslo konstantní, ale u betonu může být ovlivněno specifickými podmínkami. Avšak pro napětí, pro která platí že jejich závislost na deformaci je lineární, je hodnota Poissonova čísla betonu přibližně konstantní. V závislosti na vlastnostech použitého kameniva se Poissonovo číslo betonu obecně pohybuje v rozmezí 0,08 až 0,20 pokud je stanoveno na základě statického měření deformace při zatížení v tlaku [32].

Jestliže není snadné měřit modul pružnosti betonu, tím spíše to můžeme říci o Poissonově čísle. Jeho měření vyžaduje současné měření axiálního zatížení, axiální deformace a příčné deformace při konstantní rychlosti zatížení [34].

Poissonovo číslo lze ale stanovit dynamicky díky korelaci s dynamickým modulem pružnosti [32]. Hodnotu dynamického Poissonova čísla ν_{cr} udává norma ČSN 731372 [35] pomocí následujícího vztahu:

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

kde je E_{cr} dynamický modul pružnosti betonu, zjištěný z hodnoty vlastních kmitočtů podélného kmitání zkušebního tělesa,

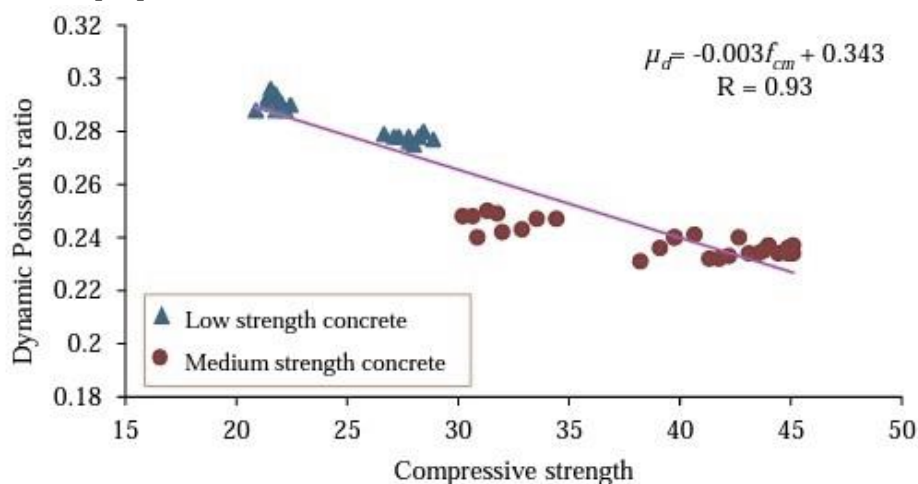
G_{cr} dynamický modul pružnosti betonu, zjištěný z hodnoty vlastních kmitočtů krouživého kmitání zkušebního tělesa [35].

Faktory ovlivňující Poissonovo číslo

Beton je kompozitní materiál skládající se z kameniva, cementové pasty a vody. Čím kvalitnější jsou jednotlivé komponenty a vazby mezi nimi, tím menší deformace budou při zatížení vznikat a menší Poissonovo číslo získáme.

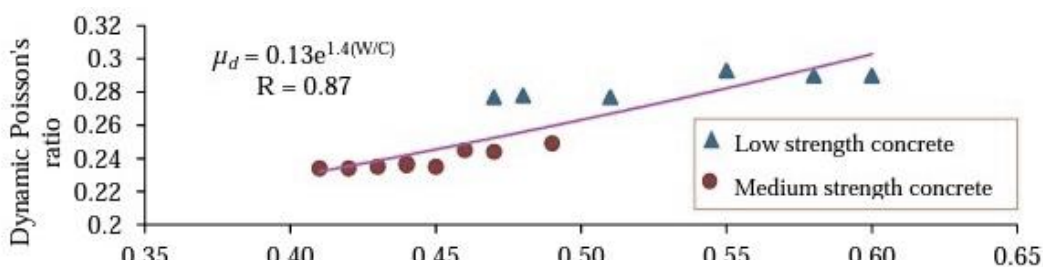
Obecně tedy platí, že Poissonovo číslo stanovené dynamickou metodou je zpočátku vysoké u betonu nižší třídy a s vyšší třídou betonu klesá [36]. Uvádí se, že beton z lehčeného kameniva má hodnotu Poissonova čísla blíže ke spodní hranici [32].

Nové studie také prokazují, že se zvyšující se pevností v tlaku betonu klesá Poissonovo číslo, viz Obr. 12 [36].



Obr. 12: Vliv pevnosti v tlaku betonu na Poissonovo číslo [36]

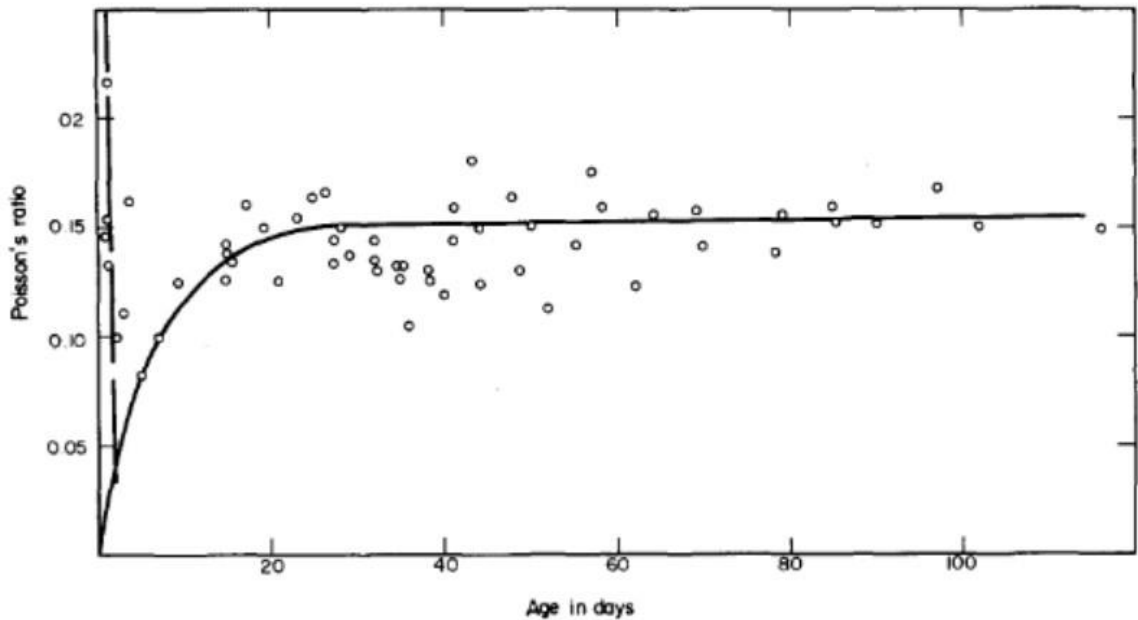
Zároveň bylo zjištěno, že s rostoucím vodním součinitelem w/c se Poissonovo číslo zvyšuje. To je částečně zapříčiněno Poissonově N/mm^2 číslem vody které je 0,5 a dále vyšší vodní součinitel způsobí vyšší pórovitost betonu a tím i vyšší pórovitost povrchu vazeb mezi cementem a kamenivem. Jelikož je vazba mezi



Obr. 13: Vliv vodního součinitele w/c na Poissonovo číslo [36]

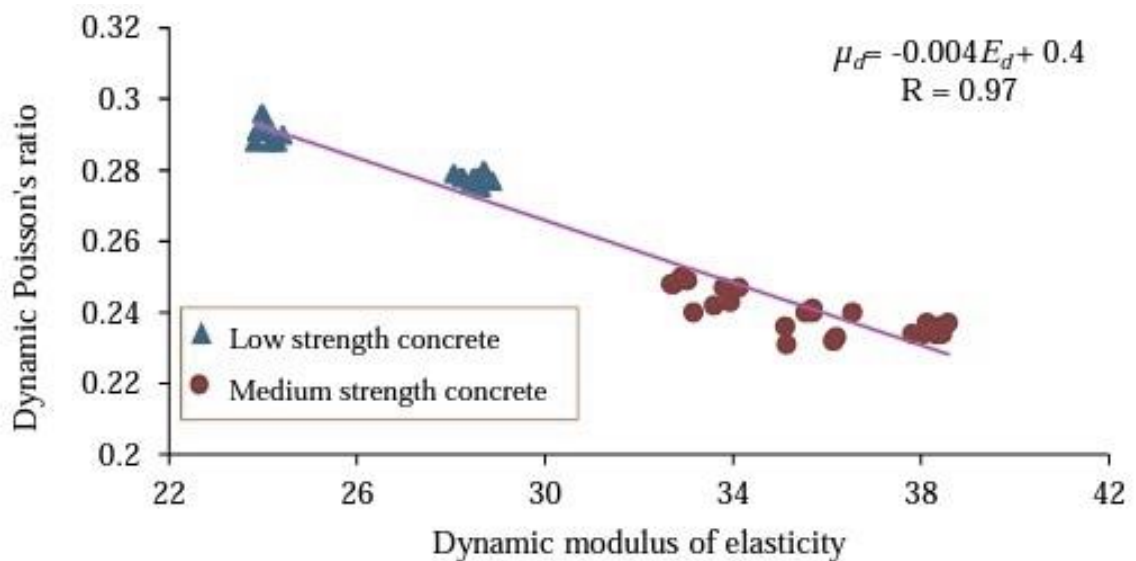
cementem kamenivem nejslabším článkem betonu, výsledkem zvýšení její pórovitost zvýší i Poissonovo číslo, viz Obr. 13 [36].

Poissonovo číslo rapidně narůstá pouze v době zrání betonu v intervalu do jednoho měsíce. Poté je její nárůst už minimální a může být zanedbán, viz Obr. 14 [37].



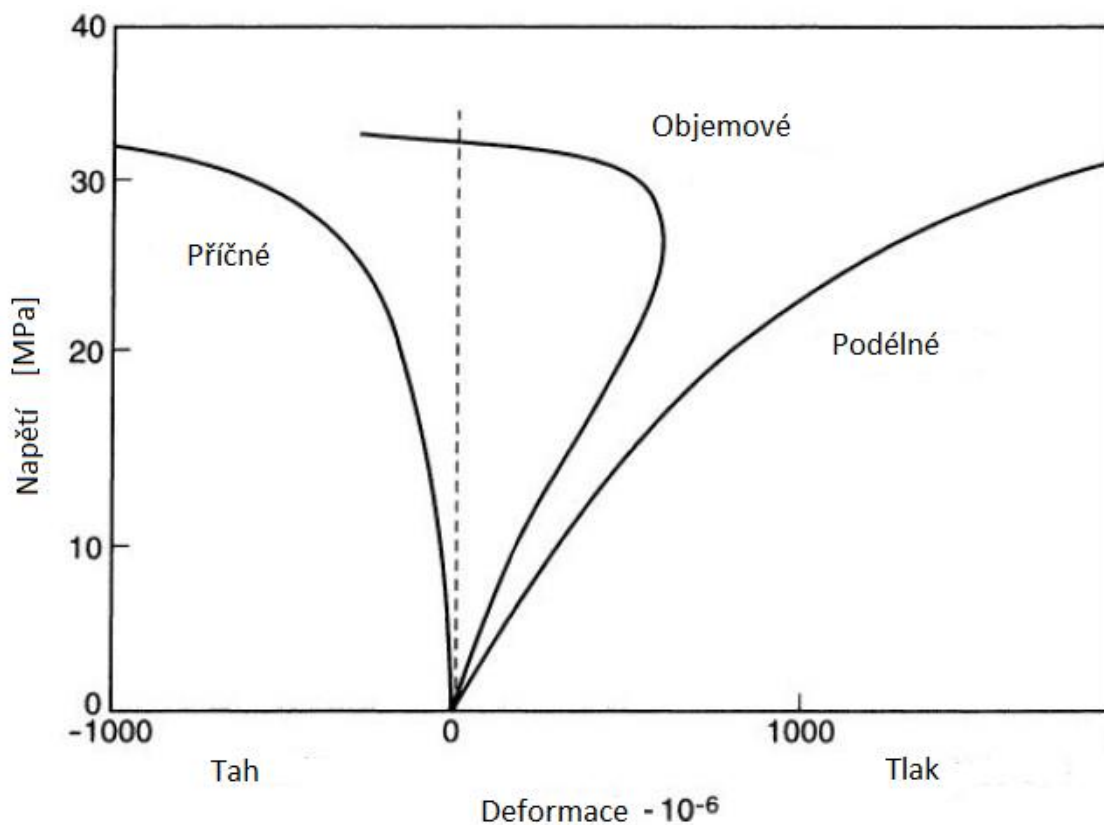
Obr. 14: Vliv doby zrání betonu na Poissonovo číslo [37]

Mezi Poissonově číslem a dynamickým modulem pružnosti je však jasná závislost, jak bylo řečeno v předchozí kapitole. Se zvyšujícím se modulem pružnosti se snižuje Poissonovo číslo, viz Obr. 15 [36].



Obr. 15: Závislost Poissonova čísla na dynamickém modulu pružnosti [36]

Na Obr. 16, můžeme vidět typický graf podélné a příčné deformace při rovnoměrném tlakovém zatížení. Kromě toho zde můžeme vidět změnu objemové deformace. Nad určitým napětím (cca 70 % pevnost příslušného betonu), Poissonovo číslo začne rychle narůstat, to je způsobeno vznikajícími vertikálními trhlinami které se postupně šíří a způsobují nárůst příčné deformace, takže ve skutečnosti je Poissonovo číslo pouze zdánlivá hodnota. Po dalším zvýšení napětí se objemová deformace změní z tlakové na tahovou, Poissonovo číslo následně přesáhne hodnotu 0,5 a betonové těleso přestane být spojitým tělesem a dojde ke kolapsu [32].



Obr. 16: Podélná, příčná a objemová deformace betonu v tlaku [32]

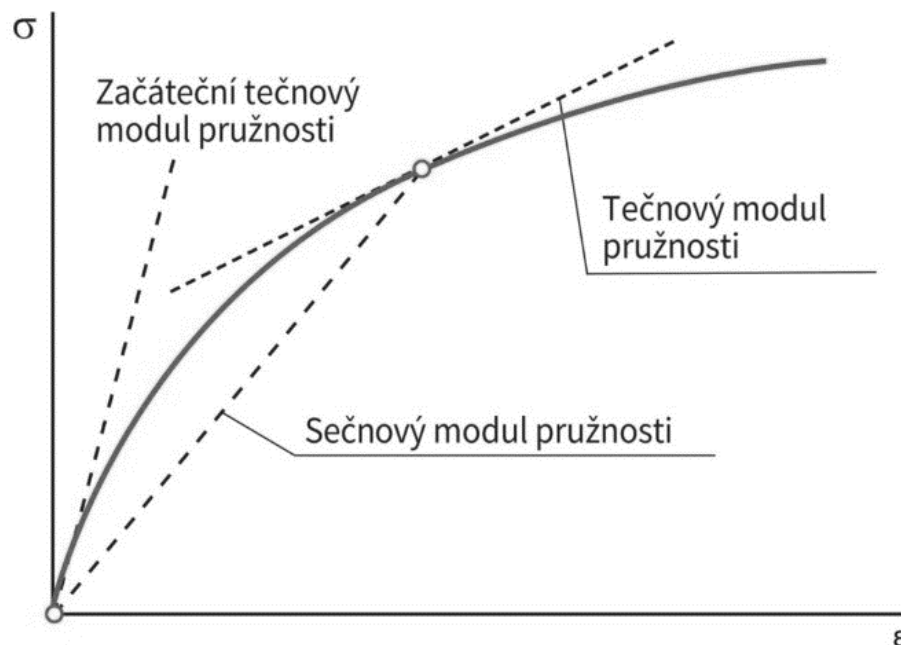
3.3.3 Typy modulů pružnosti

Modul pružnosti má tedy rozměr napětí a vyjadřuje tangentu úhlu, který svírá tečna či sečna k pracovnímu diagramu se směrem rovnoběžným s osou deformace [5].

Podle způsobu stanovení rozeznáváme modul pružnosti:

- **statický** modul pružnosti stanovený ze závislosti mezi napětím a poměrným přetvořením,
- **sečnový** modul pružnosti, který je daný poměrem σ_x/ϵ_x ,
- **tečnový** modul pružnosti daný směrnici ke křivce mezi napětím a deformací při daném napětí,
- **začáteční tečnový** modul pružnosti, který má směrnici ke křivce v začátku závislosti a dosahuje nejvyšší hodnoty, viz Obr. 17 [2].

Nejnižší hodnotu má naopak modul pružnosti tečnový a modul sečnový má hodnotu mezi nimi [2].



Obr. 17: Různé moduly pružnosti v závislosti mezi napětím a deformací betonu [2]

3.3.4 Stanovení statického modulu pružnosti

Statické moduly betonu jsou významné pružnostní charakteristiky vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Zjišťují se z deformací, které nastávají při známém zatížení [38].

Statické moduly se stanovují dvěma způsoby:

- stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku,
- stanovení modulu pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem [38].

Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku:

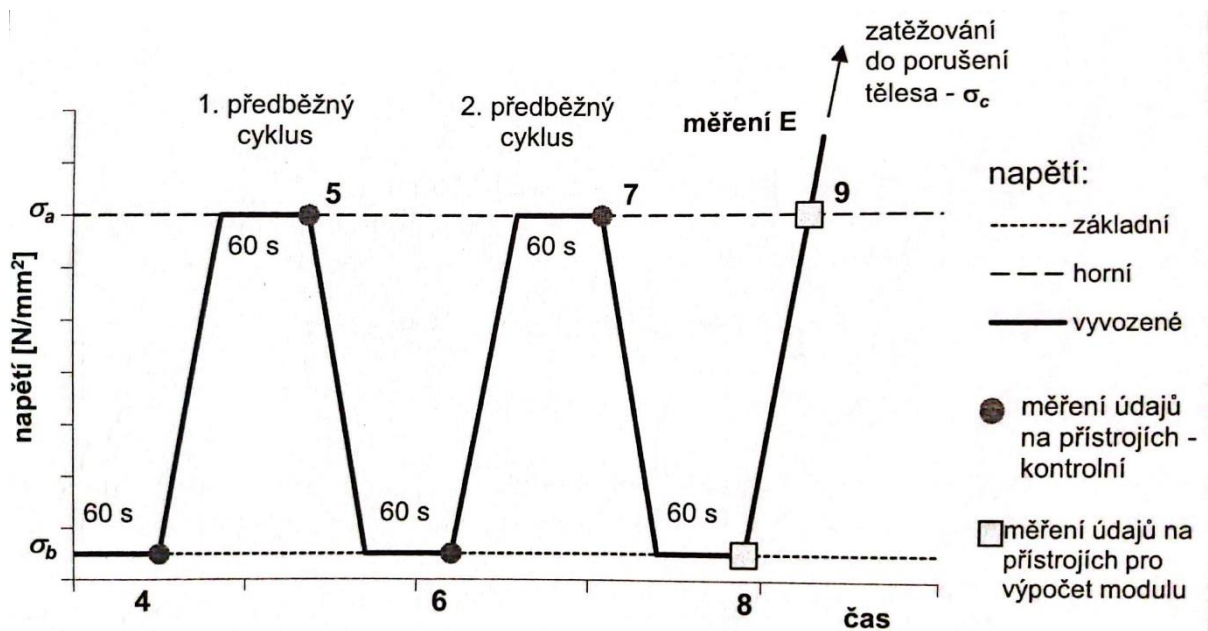
Zkoušení a vyhodnocení popisují normy ČSN EN 1920-10 [39] a ČSN EN 12390-13 [40].

Princip: Zkušební tělesa se při zkoušce zatěžují v lisu tlakem a měří se vznikající deformace. Úrovně zatížení se přitom volí tak, aby odpovídaly základnímu napětí $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$ (MPa) a hornímu napětí v hodnotě jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku $\sigma_a = f_c/3 \text{ N/mm}^2$ [38].

Zkušební tělesa: Zkouší se pět zkušebních těles o tvaru válce a poměru délky k průměru $L/D = 2$ až 4, vyrobených ve formách nebo vyřezané z konstrukce. Tři tělesa se použijí ke stanovení průměrné hodnoty pevnosti v tlaku a dvě ke stanovení modulu pružnosti. Nejmenší rozměr těles ve formách musí být 100 mm [39].

Postup: Stanoví se pevnost betonu v tlaku na třech zkušebních tělesech. Střední hodnota pevnosti v tlaku, F_c , se použije pro stanovení napětí použitého pro stanovení statického modulu pružnosti ($f_c = F_c/A$). Zkušební těleso s osově osazenými přístroji se vloží dostředně do zkušebního lisu. Vyvodí se napětí se základní napětí σ_b , tj. $0,5 \text{ N/mm}^2$, udržuje se po dobu 60 sekund, poté se odečtou a zaznamenají údaje na všech úchylkoměrech dilatometrů [39]. Dále se po dobu 30 s plynule zvyšuje zatížení do hodnoty σ_a , kde po dobu 60 s opět odečteme údaje na všech přístrojích. Tento předběžný cyklus ještě jednou opakujeme se stejnou rychlostí zatěžování a odtěžování [38]. Jestliže nejsou jednotlivá přetvoření v rozmezí $\pm 20 \%$ od své průměrné hodnoty při σ_a , opraví se centraxe zkušebního tělesa a zkouška se opakuje. Tento cyklus se opakuje nejméně dvakrát se stejnou rychlostí zatěžování a odlehčování a s udržováním napětí na hodnotách (σ_a a σ_b) po dobu 60 s. Po dokončení posledního zatěžovacího cyklu se vyčká 60 s při napětí $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$ a během následujících 30 s se

zaznamenávají poměrná přetvoření ε_b . Zkušební těleso znovu plynule zatížíme na napětí σ_a , to se udržuje po dobu 60 s a během 30 s se zaznamenají poměrné přetvoření ε_a [39]. Po dokončení měření a odstranění měřících přístrojů zvětšujeme zatížení zkušebního tělesa až do porušení, viz Obr. 18. Jestliže se pevnost zkušebního σ_c liší os pevnosti srovnávacích těles f_c o více než 20 %, je nutné tuto okolnost uvést do protokolu [38].



Obr. 18: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa [38]

Vyhodnocení:

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

kde je σ_a horní zatěžovací napětí ($\sigma_a = f_c/3$), v N/mm^2 [MPa],

σ_b základní napětí, tj. $0,5 \text{ N/mm}^2$,

ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí,

ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí.

Výsledek se vyjádří v GPa na 3 platné číslice. Uvedou se jednotlivě stanovené moduly pružnosti každého zkušebního tělesa a průměrná hodnota [39].

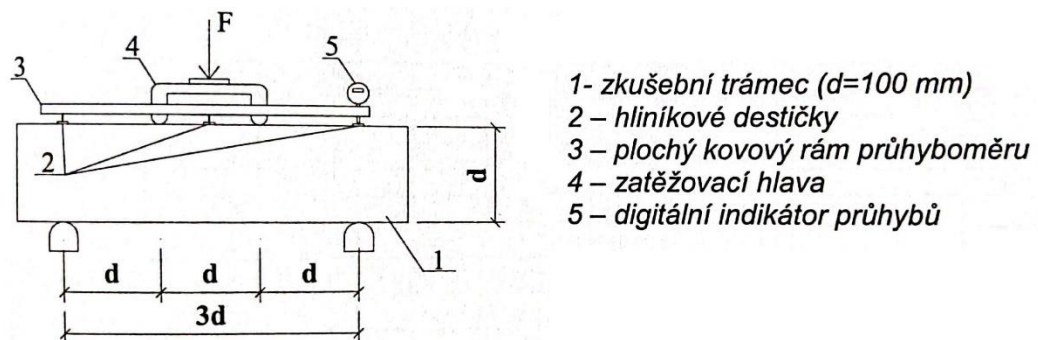
Modul pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem:

Zkoušení a vyhodnocení popisuje norma ČSN 73 6174 [41].

Princip: Zkušební těleso je při zkoušce zatěžováno pomocí tzv. čtyřbodového ohybu. Modul pružnosti betonu namáhaného ohybem se stanoví výpočtem z naměřených průhybů trámce, který je zatěžován dvěma břemeny ve třetinách rozpětí [41].

Zkušební tělesa: Zkouší se tělesech tvaru hranolu o rozměrech 100x100x400 mm nebo 150x150x700.

Postup: Trámec se vloží do lisu stejným způsobem jako při zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Na zkušebním tělese se umístí konstrukce průhyboměru a ověří se jeho správná funkce. Konstrukce průhyboměru je schematicky znázorněna na Obr. 19. Vzhledem ke konstrukci průhyboměru zaznamenává indikátor dvojnásobné hodnoty měřených průhybů. Zkušební těleso se zatěžuje po stupních silami F_1 až F_m , které vyvozují napětí zvyšující se po 10 % z předpokládané pevnosti v tahu ohybem R_t . Trámec se zatíží silou F_1 , která vyvodí napětí v tahu ohybem σ_1 o hodnotě $0,1 R_t$ a určí se celkový průhyb $s_{tot,1}$. Zatížení se zvýší na F_2 rovném $2x F_1$ a určí se celkový průhyb $s_{tot,2}$. Pak se zatížení sníží na F_1 a určí se pružný průhyb $s_{t,2}$. Další zatěžovací stupně F_3 až F_n jsou obvykle násobkem F_1 . Po určení průhybů $s_{tot,3}$ až $s_{tot,n}$ se vždy zatížení sníží na F_1 a měří se pružné průhyby $s_{t,n}$ [38].



Obr. 19: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa [38]

Vyhodnocení:	Celkový průhyb	$f_{tot,n} = (s_{tot,n} - 2 \cdot s_{tot,1} + s_{tot,2})$
	Pružný průhyb	$f_{e,n} = \frac{1}{2} (s_{tot,n} - s_{t,n} + s_{tot,2} - s_{t,2})$
	Modul pružnosti	$E = \frac{F \cdot l}{f_e \cdot b \cdot h} (0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46)$

kde je	F	zatížení trámce v N,
	f_e	pružný průhyb v mm,
	f_{tot}	celkový průhyb v mm,
	b	šířka trámce v mm,
	h	výška trámce v mm,
	l	rozpětí trámce (vzdálenost podpor) v mm [38].

Modul pružnosti stanovte pro hodnotu zatížení přibližně odpovídající vyvozenému ohybovému napětí o hodnotě $2/3 R_t$ (pevnosti v tahu ohybem). Výsledek zaokrouhlíme na nejbližších 100 N/mm^2 [38].

3.3.5 Stanovení dynamického modulu pružnosti

Pro stanovení dynamických modulů pružnosti jsou využívány nedestruktivní zkoušení betonu, jmenovitě metoda **ultrazvuková**, popsaná v normách ČSN 73 1371 [42] a v ČSN EN 12504-4 [43] a metoda **rezonanční**, definovaná v ČSN 73 1372 [35]. Obě zkušební metody budou popsány v následujících kapitolách [44].

Ultrazvuková impulzová metoda:

Princip: Ultrazvuková impulzová metoda se zakládá na stanovení rychlosti šíření UZ vlnění v betonu. Ze stanovené rychlosti šíření UZ vlnění v_L se určí fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření UZ vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu [42].

Změřením UZ je možno stanovit:

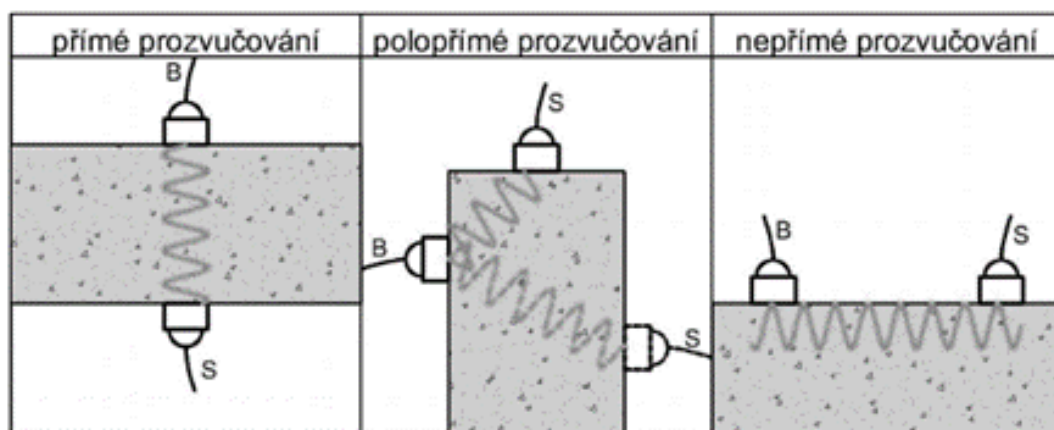
- rychlost šíření UZ vlnění,
- dynamický modul pružnosti betonu,
- pevnost betonu,
- degradaci betonu,
- statický modul pružnosti,
- objemovou hmotnost [42].

Zkušební zařízení: Jsou to speciální elektronické přístroje, které umožňují vyvodit v určitých časových intervalech spouštějící impulzy pro vytvoření mechanického kmitání. Při ultra zvukovém zkoušení stavebních prvků i konstrukcí se používá dvou elektroakustických měničů – sond: budiče a snímače [31]. Pracovní kmitočet budiče má být v rozsahu od 20 kHz do 150 kHz. Pracovní kmitočet je nutno volit v závislosti na nejmenší boční rozměru tělesa, délce měřící základny a pevnosti betonu [42].

Postup: Způsob prozvučování závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na zkoušeném tělese [31].

Proto rozeznáváme tyto typy prozvučování, viz Obr. 20:

- **protilehlé** – budič a snímač leží na protilehlých stěnách proti sobě,
- **polopřímé** – sondy leží na protilehlých stěnách ne přímo proti sobě,
- **nepřímé** – sondy leží na stejné straně [42].



Obr. 20: Typy prozvučování ultrazvukovou metodou [51]

Poloha sond má být volená tak, aby nedošlo k ovlivnění měřeného času vlivem okrajů zkušebního tělesa, nehomogenitou betonu nebo přítomností poruch nebo trhlin v oblasti zkušebních míst. Naměřená hodnota času T_L je ovlivněna konstrukcí obvodů sond UZ přístroje, proto se upravuje korekcí z měření na kalibračním vzorku (převážně etanolu). Měření na jednom zkušebním místě se opakuje dvakrát. Pokud se naměřené hodnoty od sebe neliší více než o 5 %, bere se za výsledek aritmetický průměr obou hodnot [31].

Vyhodnocení: $v_L = \frac{L}{T}$

kde je v_L rychlost šíření impulzu v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,
 L délka měřící základny v mm,
 T čas, který uplyne při průběhu impulzu základnou v μs
včetně t_{kor} (korekce), tj. $T = T_L \pm t_{kor}$ [42].

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2}$$

kde je E_{cu} dynamický modul pružnosti v MPa,
 ρ objemová hmotnost betonu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 v_L impulzová rychlost podélného UZ vlnění v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,
 k součinitel rozměrnosti prostředí [42].

Zjištěná rychlost impulzu se vyjádří na nejbližší 0,01 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo na 3 významná čísla. Pro jednorozměrné prostředí je součinitel $k_1 = 1$. Hodnoty součinitel k_2 pro dvojrozměrné a k_3 pro trojrozměrné prostředí lze vypočítat při znalosti Poissonova čísla ν_{cu} [42].

Rezonanční metoda:

Princip: Vychází ze změření hodnot určitého druhu vynuceného rezonančního kmitání menších zkušebních těles pravidelného tvaru, pro něž dovedeme teoreticky odvodit vztahy vlastními frekvencemi a odpovídajícími pružnými charakteristikami materiálu [31].

Ze zjištění vlastních frekvencí kmitání lze stanovit:

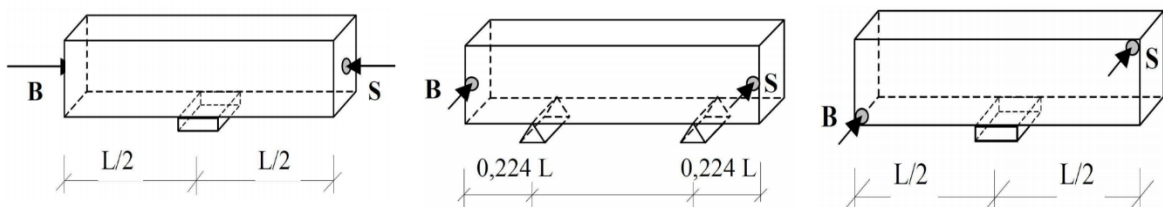
- dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu,
- dynamický modul pružnosti betonu ve smyku,
- dynamické Poissonovo číslo betonu,
- a další vlastnosti (např. degradaci betonu, logaritmický dekrement útlumu, rovnoměrnost výroby, trhliny ve zkušebních tělesech, aj.) [35].

Zkušební tělesa: Mají zpravidla tvar hranolů nebo válců s délkou rovnající se nejméně dvojnásobku příčného rozměru základny [35]. Nejběžněji se používají tělesa o tvaru hranolu o rozměrech 100x100x400 mm. Jak z uvedeného vyplývá je rezonanční metoda vhodná pro laboratorní zkoušení volných tj. nezabudovaných prvků, které mají být pokud možno homogenní [31].

Zkušební zařízení: Rezonanční aparatura se skládá ze dvou hlavních obvodů: budícího a snímajícího. Budící obvod je složen z budícího generátoru a výkonného zesilovače napojeného na vhodný budič (elektrodynamický, magnetostrikční). Snímací obvod je složen z velmi citlivého snímače mechanických kmitů (elektromechanického měniče), který je navázán přes zesilovač na indikační zařízení [31].

Postup: Zkušební tělesa, uložená jako prostý nosník s převislými konci můžeme vhodným budícím zařízením s plynule měnitelnou frekvencí rozkmitat třemi základními druhy jejich vlastních rezonančních frekvencí, viz Obr. 21 a to [31]:

- **podélným f_L** (longitudální) kmitáním,
- **příčným f_f** (ohybové) kmitáním,
- **krouživým f_t** (torzní) kmitání [35].



Obr. 21: Rezonanční frekvence; zleva: podélná, příčná, krouživá [38]

Zkušební těleso se rozkmitá plynulou změnou frekvence budícího zařízení přístroje. Jeho kmitání se snímá snímačem, které se zaznamenává na obrazovku osciloskopu nebo ručičky přístroje velikost amplitudy. Sleduje se se hodnota maximální amplitudy vlastní frekvence kmitajícího zkušební tělesa [35].

Vyhodnocení:	z podélného kmitání	$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$
	z příčného kmitání	$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$
	z kroutivého kmitání	$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho$

kde je	E_{crL} a E_{crf}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu v MPa,
	G_{cr}	dynamický modul pružnosti ve smyku v MPa,
	L	délka zkušební tělesa v m,
	ρ	objemová hmotnost betonu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
	f_L	první vlastní kmitočet podélného kmitání v kHz,
	f_f	první vlastní kmitočet příčného kmitání v kHz,
	f_t	první vlastní kmitočet kroutivého kmitání v kHz,
	i	poloměr setrvačnosti příčného řezu tělesa,
	c_1	korekční součinitel podle tabulky 2,
	k	součinitel charakterizující tvar příčného řezu tělesa [35].

3.3.6 Faktory ovlivňující modul pružnosti

Vliv na výslednou hodnotu modulu pružnosti má celá řada různých vlivů. Byť jsou některé faktory na jejich rozhraní, můžeme je v zásadě rozdělit do dvou hlavních skupin:

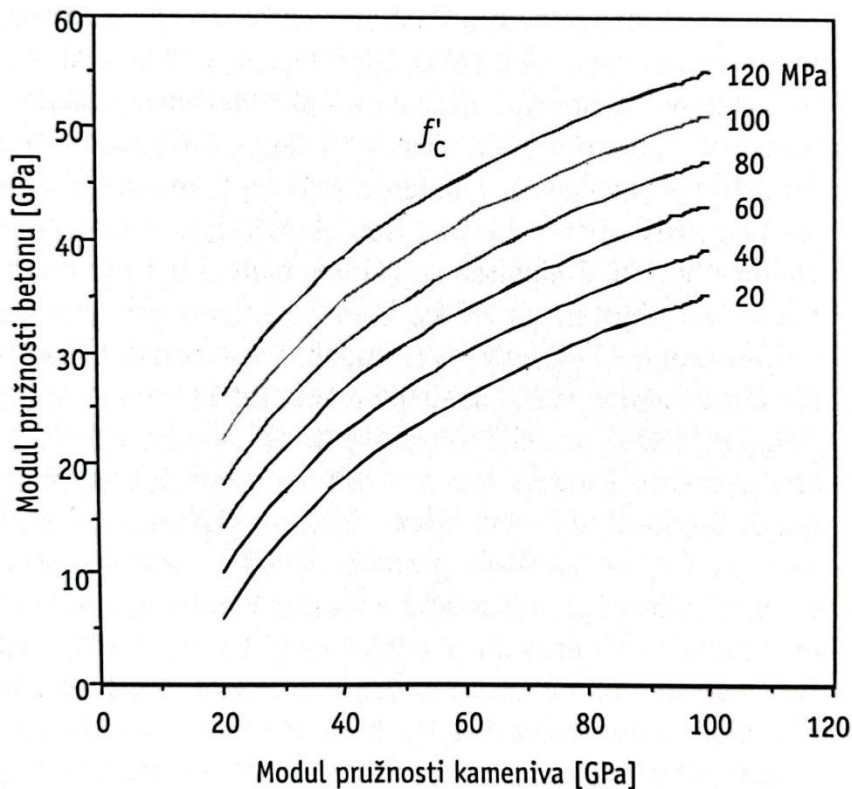
- Technologické vlivy (složení čerstvého betonu, technologie výroby),
- Zkušební vlivy (zkušební metoda, tvar a velikost tělesa, zatěžování) [1].

V následujících kapitolách si obě podrobněji popíšeme.

Technologické faktory

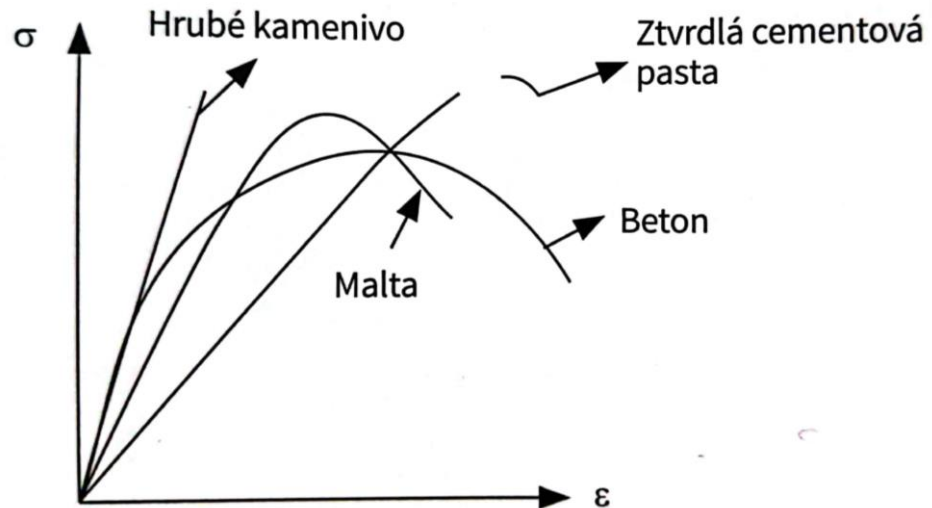
Mezi tyto faktory patří především jednotlivé složky tvořící čerstvou betonovou směs (druh a množství kameniva, typ a množství cementu, příměsi a přísady, provzdušení, vodní součinitel), technologie výroby a zpracování směsi čerstvého betonu (ukládání, míra zhutnění, teplota vlhkost a doba ošetřování během tuhnutí a tvrdnutí) a kvalita tranzitní zóny [1].

Kamenivo a jeho modul pružnosti má vzhledem k jeho objemu v betonu výrazný vliv na modul pružnosti samotného betonu. Moduly pružnosti ovlivňuje mineralogické složení, textura a struktura hornin, ze kterých bylo kamenivo vytvořeno, a jsou velice závislé na pórovitosti horniny [2]. Druh kameniva, lokalita těžení ale i množství a frakce použitého hrubého kameniva ovlivňují jak pevnost v tlaku, tak výrazně víc na modul pružnosti betonu, viz Obr. 22 [45].



Obr. 22: Nomogram znázorňující předpovězené hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na modulu pružnosti hrubého kameniva a na pevnosti betonu v tlaku [34]

Cement má prakticky lineární závislost mezi napětím a poměrným přetvořením, ovšem u betonu jako kompozitního materiálu je závislost nelineární [2]. Modul pružnosti cementového kamene se pohybuje mezi 10 až 20 GPa. Cementový tmel společně s fází drobného kameniva (do 4 mm) má výsledný modul pružnosti v rozmezí 20 až 40 GPa [46]. Jak je patrné z obr. 23, čím vyšší bude obsah kameniva, tím blíže bude křivka betonu ke křivce kameniva. Naopak v betonu s vyšší dávkou cementu bude křivka blíže ke křivce cementové pasty. Modul pružnosti betonu se tak pohybuje mezi modulem pružnosti cementové pasty a modulem pružnosti kameniva [2].



Obr. 23: Pracovní diagram betonu a jeho složek [2]

Porozita betonu má výrazný vliv na modul pružnosti cementového kamene, kdy zvyšující se pórovitostí betonu dochází ke snížení výsledné hodnoty modulu pružnosti betonu. Pórovitost cementové pasty při zvyšujícím se vodním součiniteli w/c navyšuje obsah volné vody v čerstvém betonu. Kapilární pórovitost potom podstatně ovlivňuje pevnost betonu v tlaku a tím i modul pružnosti [2].

Tranzitní zóna (ITZ), tzv. vrstva rozhraní mezi trny kameniva a ztvrdlého cementové pasty, vznikající kvůli nedostatečně těsného uskupení zrn kameniva, způsobující vyšší porozitost v okolí cementové pasty, má výrazný vliv na výsledný modul pružnosti betonu a považuje se za nejslabší článek celého kompozitní seskupení betonu [47]. Její kvalita rozhoduje jak o pevnosti betonu tak i modulu pružnosti a s její zhoršující se kvalitou klesají obě sledované veličiny [45].

Zkušební faktory

Zkušební vlivy oproti technologickým, kdy postupy pro provádění a vyhodnocení zkoušek mají oporu v normách, kde by měly být přesně definovány okrajové podmínky provedení zkoušky, mohou výslednou hodnotu modulu pružnosti ovlivnit, a to do značné míry [1].

Nejčastější zkušební vlivy jsou následující:

Zkušební metoda – statická x dynamická metoda. Hodnoty dynamického modulu pružnosti vycházejí vždy o něco vyšší než u statických modulů pružnosti [32].

Výpočetní vztah – závisí na druhu použití normy (ČSN ISO x ASTM), chybném zvolení vzorce nebo stanovení horní zatěžovací úrovně [45].

Tvar a velikost zkušebního tělesa – štíhlost tělesa má vliv na pevnost betonu i modul pružnosti. Platí, že čím je těleso štíhlejší, tím je výsledný modul pružnosti vyšší [48].

Způsob získání zkušebního tělesa – odebrání vzorku z konstrukce pomocí jádrového vývrtu přináší vlivů které mohou ovlivnit výslednou hodnotu modulu pružnosti jako např. narušený povrch a nepřesnosti vyřezaného tělesa, průměr a štíhlost zkušebního tělesa, poměr mezi průměrem a maximální velikostí kameniva [48].

Stáří zkušebního tělesa – s rostoucím stářím se pevnost a modul pružnosti betonu zvyšuje, což je způsobeno zvyšujícím se stupněm hydratace. Ke snížení modulu pružnosti v čase může ale dojít z důvodu vzniku mikrotrhlin ve ztvrdlém betonu [45].

Prostředí během zkoušky – zkoušky by měly probíhat v laboratoři při teplotě 20 ± 5 °C a vlhkosti 50 ± 20 %. Při zvýšené teplotě může dojít např. k protažení snímačů i zkušebního tělesa [45].

Vliv zkušebního lisu, excentricita vzorku – norma ČSN ISO 1920-10 [39] požaduje centrování zkušebního lisu. Excentricita 12,5 mm nám může snížit pevnost až o 10 % [34].

Cyklické zatěžování – očekává pokles modulu pružnosti betonu z důvodu vzniku mikrotrhlin po opakování zatěžování [3].

Kvalita použitých forem – norma ČSN EN 12390-1 [24] nám udává požadavky na tvar, přesnost, rovinnost, kolmost, rovnoběžnost a tuhost forem pro výrobu zkušebních těles. Nedodržením těchto požadavků povede k nerovnoměrnému rozložení napětí ve zkušebním tělese a tím i k poklesu pevnosti v tlaku [45].

Z uvedených faktorů je zřejmé, že na výslednou hodnotu modulu pružnosti má vliv celá řada činitelů. Z hlediska technologických je celkem pochopitelné, že změna složení betonu, jeho zpracování povede ke změně modulu pružnosti ve větší míře. Ta zákonitost je zcela zřejmá a pracují s ní jak modely a výpočetní vztahy, tak i některé normy [1].

4. PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Popis experimentu

Hlavním úkolem tohoto experimentu je sledování vlivu mnohonásobného cyklického zatěžování na pružnostní a pevnostní charakteristiky obyčejného betonu.

K provedení pokusu bylo vyrobeno 12 zkušebních těles (MPZ1-12) tvaru válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Na všech těchto zkušebních tělese se provedlo měření pro stanovení objemové hmotnosti a zkoušení ultrazvukovou a rezonanční metodou pro získání dynamického modulu pružnosti a Poissonova čísla před působením cyklického zatěžování. Následovně byly dva válce (MPZ11 a MPZ12) odzkoušeny na pevnost v tlaku v hydraulickém lisu pro stanovení horních zatěžovacích mezí cyklického zatěžování.

Zkušební tělesa byla poté podstoupena 5000 cyklům zatěžování, při kterém byly zaznamenávány podélné a příčné deformace pomocí čtyř odporových tenzometrů. Válce MPZ1 až MPZ5 byly zatěžovány do třetiny jejich pevnosti v tlaku a válce MPZ6 až MPZ10 do poloviny jejich pevnosti v tlaku. Po ukončení cyklického zatěžování bylo znovu provedeno zkoušení těles ultrazvukovou a rezonanční metodou pro stanovení hledaných dynamických parametrů po cyklickém zatěžování. Nakonec byly všechny zbylá zkušební tělesa odzkoušena na pevnost v tlaku.

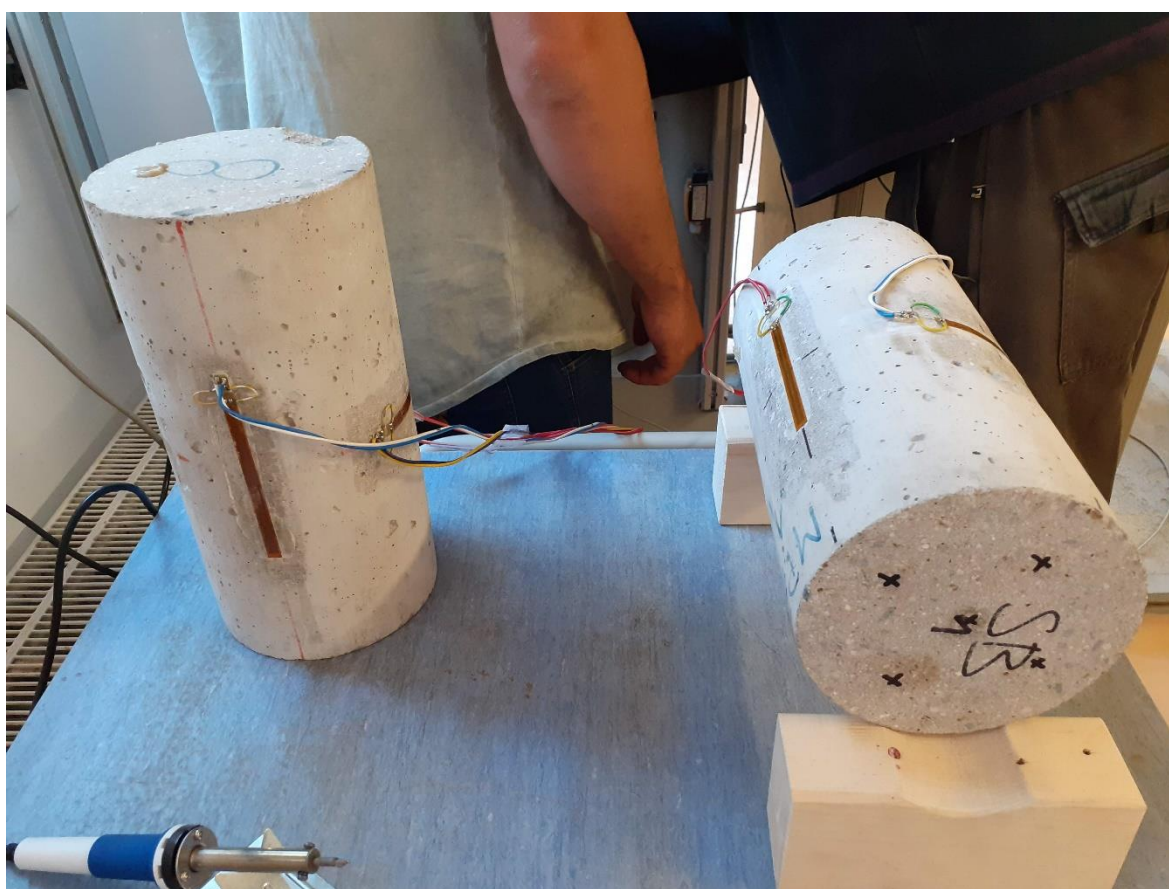
V rámci experimentu jsou námi hledané parametry tedy moduly pružnosti a Poissonova čísla stanovené statickou i dynamickou metodou a pevnost v tlaku betonu.

4.2 Zkušební tělesa

Pro popisovaný experiment bylo vyrobeno 12 o jmenovitém průměru 150 mm a výšce 300 mm, viz Obr. 24. Beton který byl použit pro výrobu zkušebních těles měl recepturu uvedenou v Tab. 3. Receptura je uvedena bez specifikací složek z důvodů firemních zásad které betonárna nemůže uvést.

Tab. 3: Receptura čerstvého betonu

Složka	Množství na 1 m ³ čerstvého betonu [kg]
Cement	285
Popílek	100
Jemné kamenivo 0/4 mm	845
Hrubé kamenivo 4/8 mm	182
Hrubé kamenivo 8/16 mm	734
Superplastifikační přísada	1,63
Voda	190



Obr. 24: Zkušební tělesa tvaru válce [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

4.3 Měření a zkoušení těles

Všech 12 zkušebních těles bylo očištěno, následně zváženo na váze a změřeny posuvným měřidlem Mitutoyo (300 mm) všechny rozměry pro stanovení objemové hmotnosti potřebné k dalšímu vyhodnocení pružnostních charakteristik.



Obr. 25: Měření rozměrů zkušebních těles [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D]

4.3.1 Objemová hmotnost

Stanovena ze skutečných změřených rozměrů a zjištěných hmotností zkušebních těles podle ČSN EN 12390-7 [49] následujícím vztahem:

$$D = \frac{m}{V}$$

kde je

D	objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 ,
m	hmotnost zkušebního tělesa v podmínkách v době zkoušení v kg,
V	objem stanovený příslušným způsobem v m^3 .

4.3.2 Pevnost v tlaku

Následovně byly dvě zkušební tělesa (MPZ11 a MPZ12) ozkoušena na pevnost v tlaku pro stanovení horní hranice napětí pro cyklické zatěžování. Zbýlých 10 těles bylo odzkoušeno až na konci experimentu po cyklickém zatěžování a všech nedestruktivních měřeních.

Pro zkoušení byl použit hydraulický lis ALPHA 3-3000 S, které byl zkalibrován a jeho dotykové plochy tlačných desek byly očištěny. Plochy zkušebních těles byly také otřeny a zbaveny pískových nečistot. Zkušební tělesa byla poté umístěna do hydraulického lisu a zatěžována konstantní rychlostí až do jejich porušení, viz Obr. 26. Na přístroji byly zaznamenány maximální dosažené síly ze kterých se vyhodnotí pevnost v tlaku dle normy ČSN 12390-3 [23] následujícím vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde je f_c pevnost v tlaku v MPa,
 F maximální zatížení při porušení v N,
 A_c průřezová plocha zkušebního tělesa zatížená tlakem v mm².



*Obr. 26: Stanovení pevnosti zatěžovací zkouškou
v hydraulickém lisu*

4.3.3 Dynamický modul pružnosti a Poissonovo číslo

Hodnoty dynamického modulu pružnosti a Poissonova čísla byly stanoveny ultrazvukovou metodou a metodou rezonanční, viz Obr. 27 na zbylých 10 zkušebních válcích a to jak před začátkem cyklického zatěžování tak i potom.



Obr. 27: Měření doby průchodu UZ impulsu (vlevo), stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa (vpravo) [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

Měření ultrazvukovou metodou se provádělo přístrojem Pundit PL-200 firmy Proceq. Přístroj byl nejdříve zkalibrován za pomoci válečku etanolu, u kterého je známá přesná doba průchodu UZ impulsu. Přístrojem byly vždy na třech místech změřeny doby průchodu UZ impulsu v podélném směru skrze každé zkušební těleso, kterých získáme rychlost šíření jeho šíření. Dynamický modul pružnosti byl vyhodnocen dle normy ČSN 73 1371 [42] z následujícího vztahu:

$$E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2}$$

kde je

E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu v MPa,
D	objemová hmotnost betonu v kg/m^3 ,
v_L	impulzová rychlost podélného UZ vlnění v km/s,
k	součinitel rozměrnosti prostředí.

Modul pružnosti byl dále taky stanoven pomocí rezonanční metody, kdy se mechanickým úderem rázového kladívka rozkmitá amplituda zkušební tělesa na pružné podložce. Vlastní frekvence se poté vyhodnotila pomocí snímače osciloskopu Handy HS4 zjištěním největší amplitudy. Bylo stanovené podélné, příčné a kroutivé kmitání podle umístění snímačů, viz Obr. 21. Vyhodnocení dynamického modul pružnosti pomocí rezonanční metody udává norma ČSN 73 1372 [35], přesněji při podélném kmitání dle vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot D$$

kde je E_{crL} dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu v MPa,
 L délka zkoušeného tělesa v m,
 f_L první vlastní kmitočet podélného kmitání tělesa v kHz,
 D objemová hmotnost betonu v kg/m³.

Dále byl stanoven modul pružnosti z příčného kmitání dle vztahu:

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

kde je E_{crf} dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu v MPa,
 c_1 korekční součinitel podle tabulky 2 v normě ČSN 73 1372 [35],
 L délka zkušební tělesa v m,
 f_f první vlastní kmitočet příčného kmitání zkušební tělesa v kHz,
 D objemová hmotnost betonu v kg/m³,
 i poloměr setrvačnosti řezu k ose kolmé na rovinu kmitání v m.

Jako následující byl stanoven modul pružnosti ve smyku dle vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot D$$

kde je L délka zkušební tělesa v m,
 f_t první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušební tělesa v kHz,
 D objemová hmotnost betonu v kg/m³,
 k součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa.

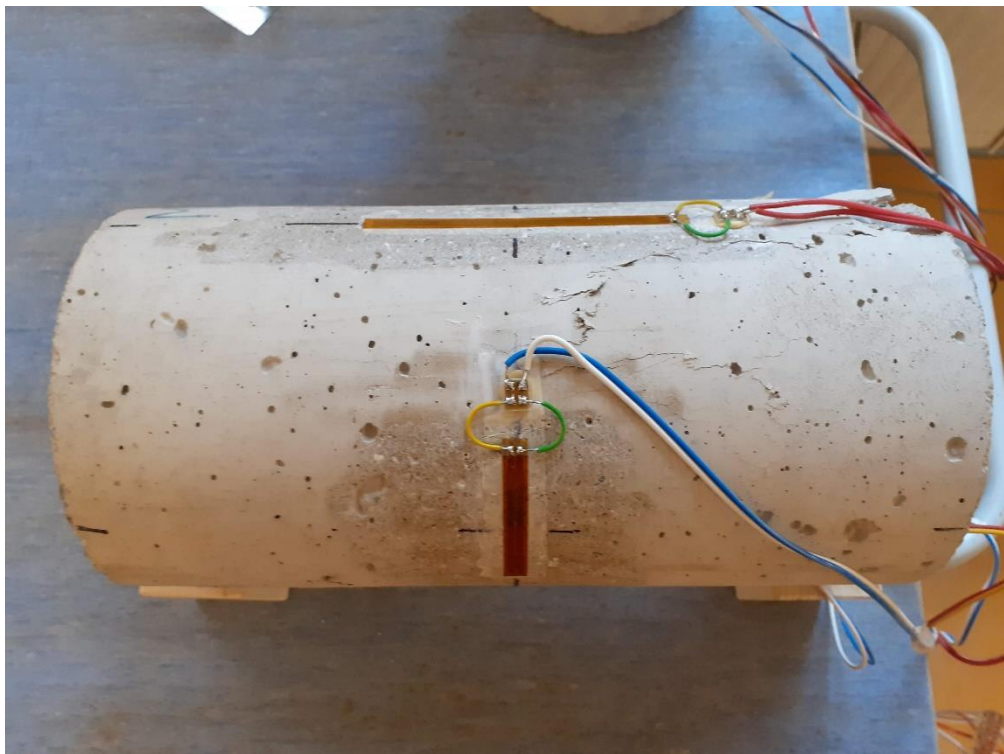
A nakonec bylo vyhodnoceno i Poissonovo číslo z rezonanční metody pomocí vztahu uvedeném v normě ČSN 73 1372 [35], který je následující:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_l^2}{f_t^2} - 2 \right)$$

kde je k koeficient závislý na tvaru průřezu, pro válce $k = 1$,
 f_l a f_t hodnoty prvních vlastních kmitočtů podélného a krouživého kmitání zkušební tělesa.

4.3.4 Statický modul pružnosti a Poissonovo číslo

Stanovení statického modulu pružnosti bylo provedeno pomocí již zmiňovaného cyklického zatěžování 10 zkušebních těles tvaru válce dle normy ČSN EN 12390-13 [40]. Následovně byly na každé zkušební těleso umístěny čtyři odporové tenzometry Spider 1-LY41-100/120 (dva podélně a dva příčně) pomocí epoxidového lepidla, viz Obr. 28. Podélné tenzometry sloužili k měření podélných deformací pro stanovení statického modulu pružnosti a příčné k měření příčných deformací pro získání statického Poissonova čísla.



Obr. 28: Umístění odporových tenzometrů na zkušebním válci

Dále zkušební tělesa podstoupila cyklické zatěžování na mechanickém lisu LaborTech s rozsahem až 1000kN, viz Obr. 29. Z výsledků zkoušky pevnosti v tlaku byla stanovena horní mez zatěžovacího rovnající se přibližně napětí $\sigma_a = 15,85$ MPa (vyvozeno silou $F_a = 280$ kN) a dolní mez $\sigma_b = 4,5$ MPa ($F_b = 80$ kN) kterými byly zatěžovány zkušební tělesa MPZ1 až MPZ5. A pro zkušební tělesa MPZ6 až MPZ9 byla stanovena horní mez $\sigma_a = 24,33$ MPa ($F_b = 430$ kN) a dolní opět $\sigma_b = 4,5$ MPa ($F_b = 80$ kN). Rychlost zatěžování byla nastavena na 8,24 kN/s (cca 0,47 MPa/s), zatížení na horní i dolní mezi setrvalo po dobu 2 sekund a požadovaný počet cyklů byl 5000. Jediné zkušební těleso MPZ10 nebylo cyklicky zatěžované, sloužilo pro měření deformací způsobenými změnami teplot pro vytvoření korekce s ostatními tenzometry. Deformace byly zaznamenávány na datovou ústřednu QuatumX.



Obr. 29: Mechanický lis LaborTech [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

Vyhodnocení statického modulu pružnosti bylo uskutečněno pomocí normy ČSN EN 12390-13 [40], pro 1., 3., 10., 50., 100., 500., 1000., 2000., 3000. a 5000. cyklus zatěžování a to dle vztahu:

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

kde je E_c statický modul pružnosti v tlaku v MPa,
 σ_a horní zatěžovací mez napětí v MPa,
 σ_b dolní zatěžovací mez napětí v MPa,
 ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí,
 ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí.

Stanovení statického Poissonova čísla bylo možné díky známým podélným a příčným deformacím z následujícího vztahu:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

kde je ν Poissonovo číslo,
 ε_y poměrná deformace v příčném směru (kolmá na směr namáhání),
 ε_x poměrná deformace v podélném směru (ve směru namáhání).

4.4 Výsledky měření

Celkem bylo cyklicky zatěžováno 9 zkušebních těles tvaru válce, z nichž u jednoho (MPZ7) zůstala zatěžovací síla při odtěžování stát na hodnotě 142 kN, máte tedy jen hodnoty do 2000 cyklů. Všechny zkušební tělesa byla odzkoušena ultrazvukovou i rezonanční metodou a nakonec otestována na pevnost v tlaku až do jejich porušení.

Rozměry zkušebních válců, objemové hmotnosti, výsledky hodnot dynamických a statických modulů pružnosti i Poissonových čísel, včetně pevností v tlaku betonu jsou shrnuty v následujících tabulkách s průměrnými hodnotami a výběrovými směrodatnými odchylkami.

Tab. 4: Změřené rozměry zkušebních válců

Válec	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]	d [mm]	L [mm]
MPZ-01	149,07	148,99	148,94	148,91	297,60	297,62	148,98	297,61
MPZ-02	149,11	149,09	149,15	149,24	297,50	297,14	149,15	297,32
MPZ-03	149,12	149,19	149,20	149,34	297,83	297,68	149,21	297,76
MPZ-04	149,03	149,06	149,08	149,10	296,92	296,99	149,06	296,96
MPZ-05	149,18	148,91	149,07	149,35	297,07	297,12	149,13	297,10
MPZ-06	149,05	149,08	148,91	148,87	298,19	298,15	148,98	298,17
MPZ-07	149,38	148,87	149,06	149,19	297,66	297,74	149,12	297,70
MPZ-08	149,23	149,07	149,27	149,10	297,78	297,76	149,17	297,77
MPZ-09	149,11	149,03	149,03	149,18	297,39	297,35	149,09	297,37
MPZ-10	-	-	-	-	-	-	-	-
MPZ-11	149,17	149,24	149,27	149,23	296,85	296,75	149,23	296,80
MPZ-12	148,99	149,20	149,44	149,34	298,60	298,78	149,24	298,69

Rozměry zkušebního válce MPZ-10 nebyly změřeny z důvodu jeho použití pouze pro korekci deformací s tenzometry.

Tab. 5: Stanovení objemových hmotností zkušebních válců

Válec	d [mm]	L [mm]	V [m ³]	m [kg]	D [kg/m ³]
MPZ-01	148,98	297,61	0,00519	11,766	2270
MPZ-02	149,15	297,32	0,00519	11,693	2250
MPZ-03	149,21	297,76	0,00521	11,782	2260
MPZ-04	149,06	296,96	0,00518	11,631	2240
MPZ-05	149,13	297,10	0,00519	11,763	2270
MPZ-06	148,98	298,17	0,00520	11,867	2280
MPZ-07	149,12	297,70	0,00520	11,778	2270
MPZ-08	149,17	297,77	0,00520	11,766	2260
MPZ-09	149,09	297,37	0,00519	11,830	2280
MPZ-10	-	-	-	-	-
MPZ-11	149,23	296,80	0,00519	11,692	2250
MPZ-12	149,24	298,69	0,00523	11,824	2260

Tab. 6: Dynamický modul pružnosti E_{cu}

Dynamický modul pružnosti E_{cu} [GPa]		
Válec	Před zatěžováním	Po zatěžování
MPZ-01	36,56	35,02
MPZ-02	37,97	36,75
MPZ-03	39,56	38,49
MPZ-04	38,50	36,93
MPZ-05	40,09	38,84
MPZ-06	37,77	34,49
MPZ-07	37,78	34,85
MPZ-08	39,38	36,74
MPZ-09	40,82	37,94
MPZ-10	-	-
MPZ-11	36,23	-
MPZ-12	37,09	-
Průměr	38,34	36,67
Odchylka	1,48	1,60

Tab. 7: Dynamický modul pružnosti E_{crL}

Dynamický modul pružnosti E_{crL} [GPa]		
Válec	Před zatěžováním	Po zatěžování
MPZ-01	32,40	30,55
MPZ-02	33,74	32,26
MPZ-03	35,01	33,59
MPZ-04	34,25	33,00
MPZ-05	35,51	34,23
MPZ-06	33,30	30,14
MPZ-07	33,48	30,68
MPZ-08	34,90	32,39
MPZ-09	36,12	33,69
MPZ-10	-	-
MPZ-11	32,62	-
MPZ-12	32,71	-
Průměr	34,00	32,28
Odchylka	1,25	1,51

Tab. 9: Dynamický modul pružnosti E_{crf}

Dynamický modul pružnosti E_{crf} [GPa]		
Válec	Před zatěžováním	Po zatěžování
MPZ-01	32,77	30,61
MPZ-02	34,69	32,75
MPZ-03	34,71	33,70
MPZ-04	35,15	34,00
MPZ-05	36,19	34,77
MPZ-06	33,57	29,77
MPZ-07	34,03	31,05
MPZ-08	35,50	32,20
MPZ-09	37,22	34,58
MPZ-10	-	-
MPZ-11	33,54	-
MPZ-12	32,64	-
Průměr	34,55	32,60
Odchylka	1,42	1,82

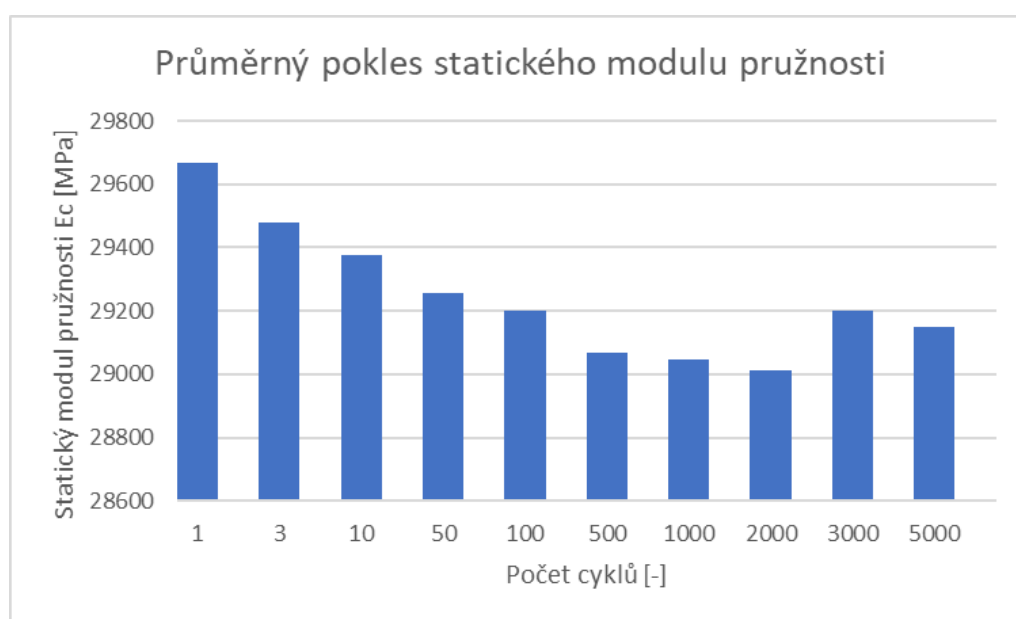
Tab. 8: Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}

Dynamický modul pružnosti G_{cr} [GPa]		
Válec	Před zatěžováním	Po zatěžování
MPZ-01	13,52	12,96
MPZ-02	13,88	13,43
MPZ-03	14,30	13,97
MPZ-04	14,10	13,66
MPZ-05	14,72	14,37
MPZ-06	13,80	12,85
MPZ-07	13,77	13,04
MPZ-08	14,40	13,67
MPZ-09	14,95	14,31
MPZ-10	-	-
MPZ-11	13,73	-
MPZ-12	13,73	-
Průměr	14,08	13,58
Odchylka	0,46	0,57

Z předchozích tabulek můžeme pozorovat pokles dynamických modulů pružnosti po cyklickém zatěžování a to průměrně až o 1,77 GPa. Pokles by zaznamenan také u dynamického modulu pružnosti ve smyku a to o 0,23 GPa. Dále můžeme vypočítat, že dynamický modul pružnosti stanovený pomocí ultrazvukové metody je přibližně o 4 GPa vyšší než modul stanovený rezonanční metodou, což je celkem běžný faktor.

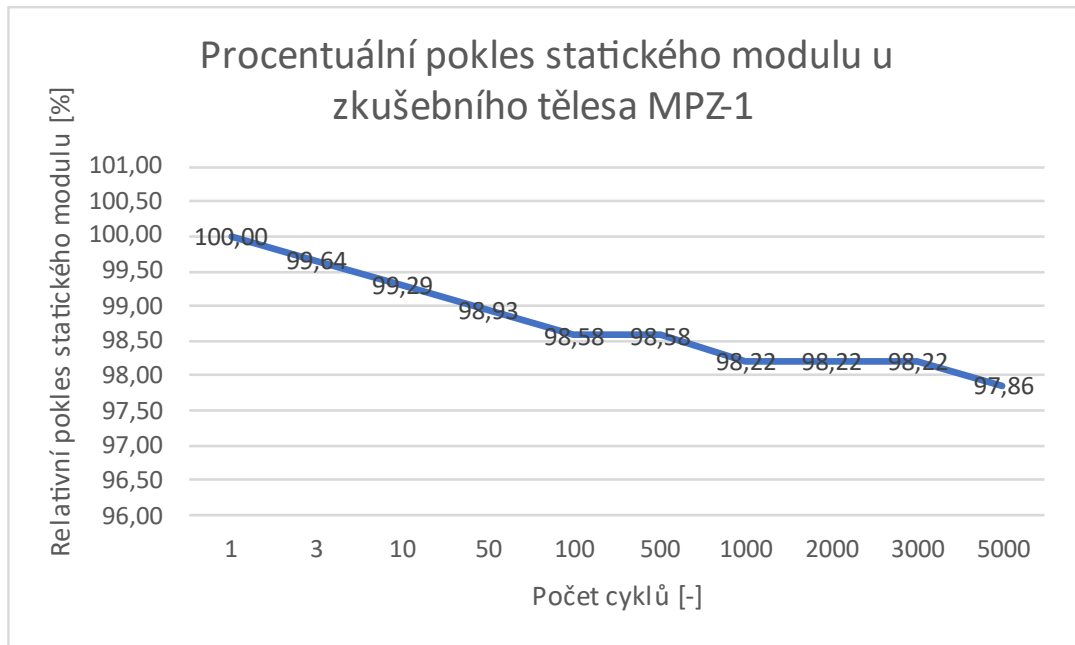
Tab. 10: Statický modul pružnosti E_c

Statický modul pružnosti E_c [MPa]									
Cyklus	MPZ-1	MPZ-2	MPZ-3	MPZ-4	MPZ-5	MPZ-6	MPZ-7	MPZ-8	MPZ-9
1.	28100	29400	31000	29800	31500	28000	28300	29700	31200
3.	28000	29200	30800	29700	31400	27800	28000	29500	30900
10.	27900	29200	30700	29600	31300	27600	27900	29400	30800
50.	27800	29000	30700	29500	31200	27500	27700	29300	30600
100.	27700	29000	30600	29500	31200	27400	27600	29200	30600
500.	27700	28900	30500	29300	31000	27300	27400	29100	30400
1000.	27600	28900	30500	29300	31000	27300	27400	29100	30300
2000.	27600	28900	30400	29300	31000	27200	27400	29000	30300
3000.	27600	28800	30500	29300	31000	27200	-	29000	30200
5000.	27500	28800	30400	29200	31000	27100	-	29000	30200



Obr. 30: Graf průměrného poklesu statického modulu pružnosti

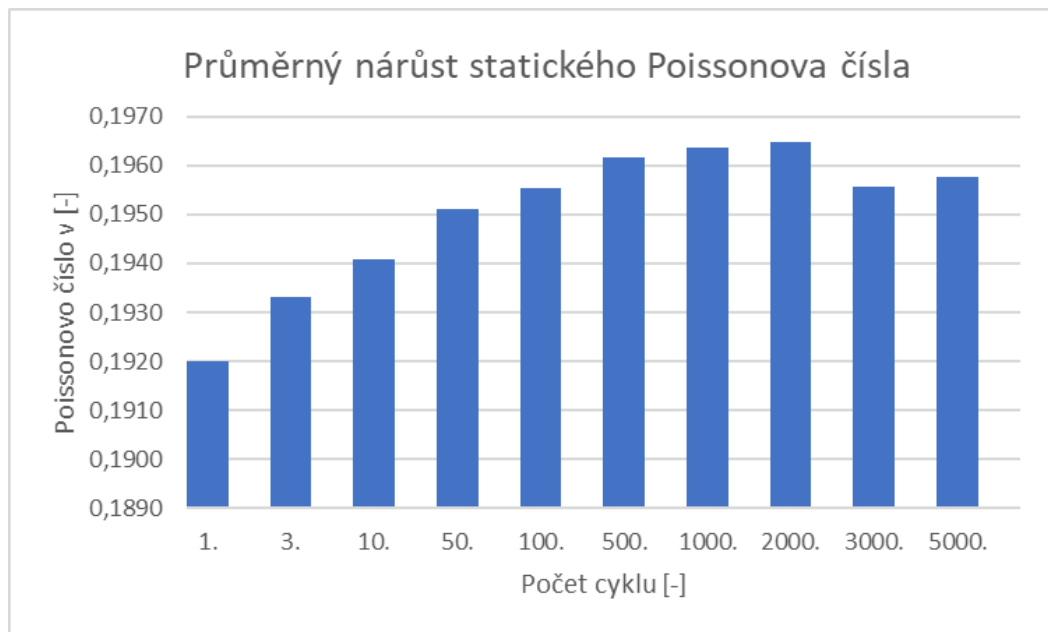
Z předchozí tabulky můžeme opět vyčíst, že došlo k poklesu statického modulu pružnosti po cyklickém zatěžování a to průměrně až o 520 MPa. Pro příklad relativního zobrazení máme obrázku č. 31 máme představený procentuální pokles statického modulu pružnosti, který dosahuje 2,14 %.



Obr. 31: Graf procentuálního poklesu statického modulu u MPZ-1

Tab. 11: Statické Poissonovo číslo ν

Statické Poissonovo číslo ν [-]									
Cyklus	MPZ-1	MPZ-2	MPZ-3	MPZ-4	MPZ-5	MPZ-6	MPZ-7	MPZ-8	MPZ-9
1.	0,177	0,195	0,197	0,191	0,181	0,198	0,196	0,185	0,207
3.	0,178	0,195	0,198	0,192	0,182	0,201	0,199	0,187	0,209
10.	0,178	0,195	0,198	0,193	0,181	0,204	0,201	0,188	0,209
50.	0,179	0,196	0,199	0,194	0,181	0,206	0,203	0,188	0,210
100.	0,180	0,196	0,200	0,193	0,181	0,208	0,204	0,188	0,210
500.	0,181	0,196	0,200	0,194	0,180	0,210	0,206	0,189	0,210
1000.	0,181	0,196	0,199	0,194	0,180	0,211	0,207	0,190	0,210
2000.	0,180	0,195	0,199	0,194	0,180	0,213	0,207	0,190	0,210
3000.	0,182	0,195	0,200	0,195	0,180	0,213	-	0,190	0,209
5000.	0,181	0,196	0,199	0,195	0,180	0,213	-	0,191	0,210



Obr. 32: Graf průměrného nárůstu statického Poissonova čísla

Z tabulky č. 11 může pozorovat průběžný nárůst statického Poissonova čísla po cyklickém zatěžování průměrně o 0,0038 %. Opačný trend můžeme sledovat v následující tabulce č. 12 kde hodnoty dynamického Poissonova čísla po cyklickém zatěžování poklesy a v tomto případě průměrně až o 0,019 %.

Tab. 12: Dynamické Poissonovo číslo ν_{cr}

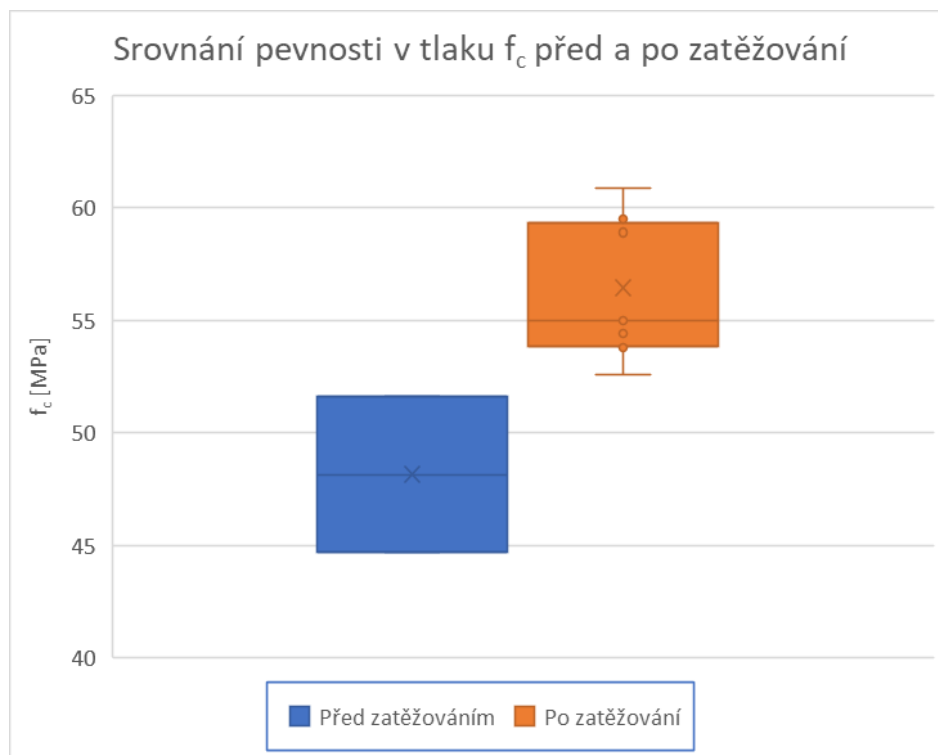
Dynamické Poissonovo číslo ν_{cr} [-]		
Válec	Před zatěžováním	Po zatěžování
MPZ-01	0,198	0,179
MPZ-02	0,215	0,201
MPZ-03	0,224	0,202
MPZ-04	0,215	0,208
MPZ-05	0,206	0,191
MPZ-06	0,206	0,173
MPZ-07	0,216	0,177
MPZ-08	0,212	0,185
MPZ-09	0,208	0,177
MPZ-10	0,211	-
MPZ-11	0,187	-
MPZ-12	0,191	-
Průměr	0,207	0,188
Odchylka	0,011	0,013

Tab. 13: Pevnost v tlaku f_c

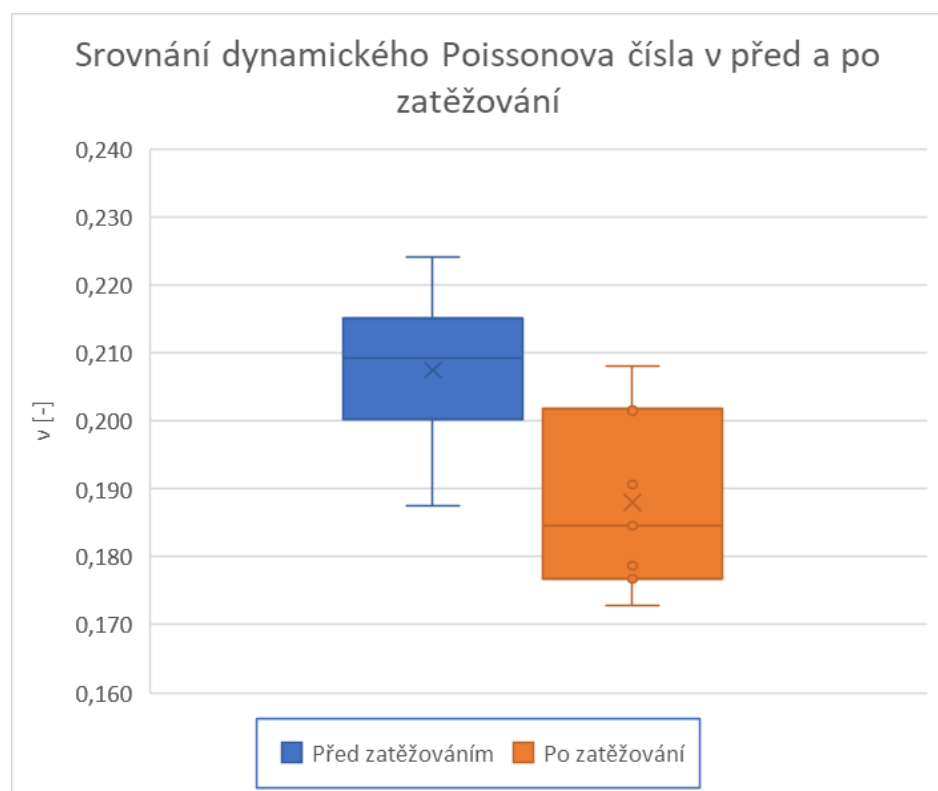
Pevnost v tlaku před zatěžováním		
Válec	F_{max} [KN]	f_c [MPa]
MPZ-11	902,7	51,6
MPZ-12	781,8	44,7
Průměr	842,3	48,2
Odchylka	85,5	4,9
Pevnost v tlaku po zatěžování		
Válec	F_{max} [KN]	f_c [MPa]
MPZ-01	949,1	54,4
MPZ-02	918,5	52,6
MPZ-03	1033,2	59,1
MPZ-04	959,7	55
MPZ-05	1039,5	59,5
MPZ-06	937,7	53,8
MPZ-07	941,4	53,9
MPZ-08	1028,8	58,9
MPZ-09	1063,0	60,9
Průměr	985,7	56,5
Odchylka	54,5	3,1

U pevností v tlaku můžeme pozorovat navýšení pevnosti v tlaku po cyklickém zatěžování a to průměrně až o 8,3 MPa. V příloze jsou přiloženy dva typické deformační diagramy zkušebního tělesa.

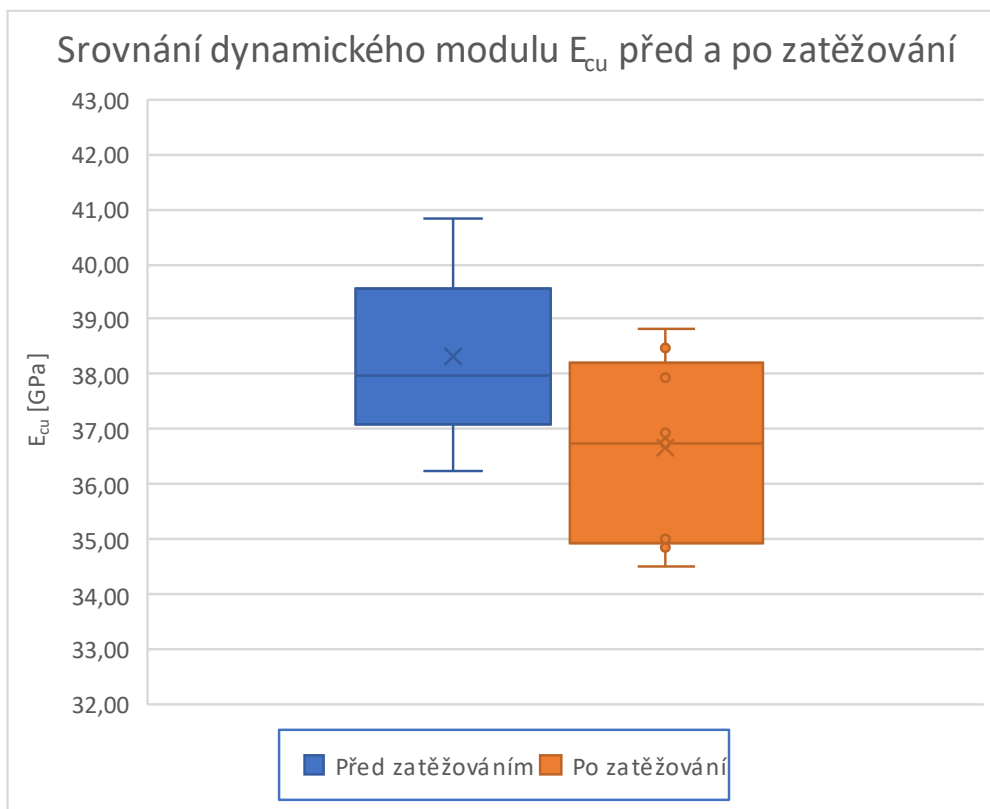
V následujících krabicových grafech (grafy 33 až 38) je ukázán vliv cyklického zatěžování na pevnosti v tlaku, dynamickém modulu pružnosti a Poissonově čísle. Krabicový graf znázorňuje v horní části 75% kvartil a v dolní části 25 % kvartil. Střední křížek v obdélníku vyznačuje medián.



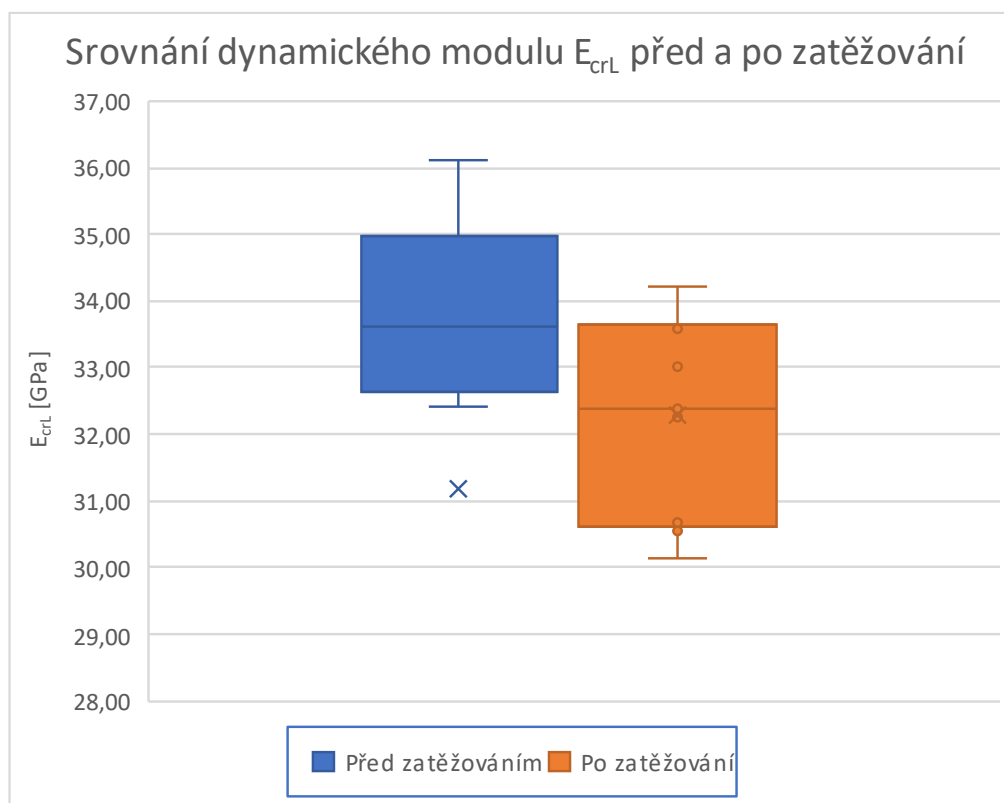
Obr. 33: Krabicový graf pevnosti v tlaku f_c



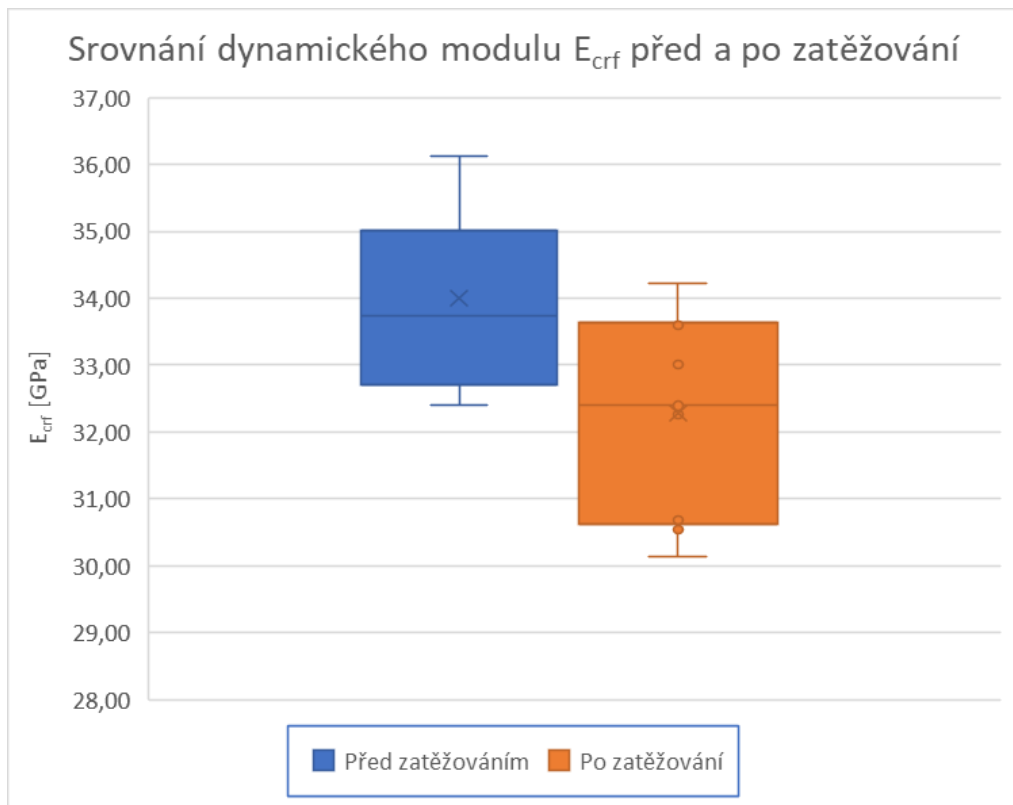
Obr. 34: Krabicový graf dynamického Poissonova čísla v



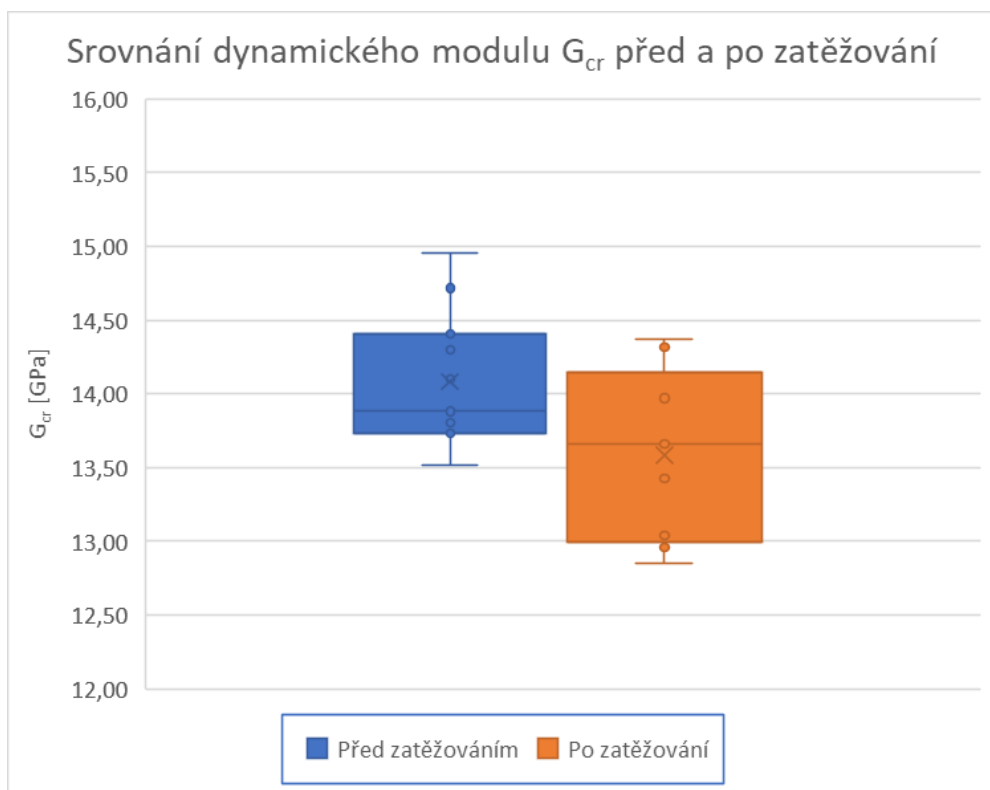
Obr. 36: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{cu}



Obr. 35: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{crL}



Obr. 38: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{crf}



Obr. 37: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr}

5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv mnohonásobného cyklického zatěžování na pevnostní a pružnostní parametry obyčejného betonu, zejména statického a dynamického modulu pružnosti a Poissonova čísla. Experiment zahrnoval zatěžování devíti těles zkušebních těles až 5000 zatěžovacími cykly na každém tělese.

Z výsledků jsme pozorovali mírný pokles u všech hodnot modulů pružnosti betonu, které může být způsobeno vznikem mikrotrhlin způsobeném zatěžováním zkušebních těles. Dalšími sledovanými parametry bylo Poissonovo číslo které u staticky stanovených hodnot narůstalo během cyklického zatěžování a oproti tomu dynamicky stanovené Poissonovo číslo po cyklickém zatěžování vykazovalo klesající trend, nelze tedy stanovit žádná určitá závislost a hodnoty se mohou lišit pouze z důvodů odlišných metod zkoušení. Naopak u pevnosti v tlaku můžeme sledovat jasný nárůst hodnot po dokončení zatěžování.

Z výsledků zkouše je patrné, že cyklické zatěžování má významný vliv na pevnostní a pružnostní charakteristiky betonu, není ale možné vyvodit žádné definitivní závěry. Po další budoucí experimenty doporučuji zkoušet větší množství zkušebních těles i přes to že mnohonásobné cyklické zatěžování je velice časově náročné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu. *Beton*. **2012**, 62-67.
- [2] HELA, Rudolf a Klára KŘÍŽOVÁ. *Modul pružnosti betonu* [online]. [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2021_1_76_modul-pruznosti-betonu/
- [3] MISÁK, Petr, Dalibor KOCÁB, Petr DANĚK a Libor TOPOLÁŘ. Experimental assessment of the influence of multiple cyclic loading on the dynamic modulus of elasticity of concrete. *MATEC Web of Conferences*. Brno, 2017. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/201710700038
- [4] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [5] SVOBODA, L. a spol. *Stavební hmoty*. Praha, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [6] DĚDEK, Miloň a František VOŠICKÝ. *Stavební materiály: pro 1. ročník SPŠ stavebních*. Praha: Sobotáles, 2008. ISBN 978-80-86817-26-2.
- [7] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [8] *ČSN EN 206+A2: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [9] *ČSN EN 12350: Zkoušení čerstvého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [10] *ČSN EN 12390: Zkoušení ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [11] *ČSN EN 12504: Zkoušení betonu v konstrukcích*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [12] *ČSN EN 13791: Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [13] *ČSN 73 2011: Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [14] ADÁMEK, Jiří. *Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů*. Brno: CERM, s.r.o., 1995.
- [15] *ČSN EN 197-1 ED.2: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [16] ALEXANDER, Mark a Sidney MINDESS. *Aggregates in concrete*. New York: Taylor & Francis, 2005. ISBN 0-203-96369-5.
- [17] *ČSN EN 12620+A1: Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [18] *ČSN EN 13055: Pórovité kamenivo*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [19] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. *Stavební materiály*. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [20] *ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: ÚNMZ, 2003.
- [21] NEWMAN, John a Ban SENG CHOO. *Advanced concrete technology: Concrete Properties*. Oxford: Elsevier, 2003. ISBN 0-7506-5104-0.

- [22] TERZIJSKI, Ivailo. *Betonové prvky: Základy pro navrhování konstrukcí, zatížení, materiály*. Brno, 2005.
- [23] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [24] ČSN EN 12390-1: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [25] ČSN EN 12390-6: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [26] ČSN EN 12390-4: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [27] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [28] NETOPILOVÁ, Miroslava. *Stavební materiály*. Ostrava, 2004. ISBN 80-86634-27-2.
- [29] ŠMIRÁK, Svatopluk. *Pružnost a plasticita I*. Brno: CERM, 2006. ISBN 80-7204-468-0.
- [30] NOVÁK, Jaroslav. *Nauka o materiálech 10: stavební materiály I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1619-6.
- [31] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Brno: CERM, s.r.o., 2000.
- [32] NEVILLE, Adam M. *Properties of Concrete*. Fifth Edition. Harlow, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [33] JÁCHIM, F. Všestranný fyzik Siméon Denis Poisson. *Matematika Fyzika Informatika: časopis pro výuku na základních a středních školách*. 2011, **20**(8), 505-507. ISSN 1210-1761.
- [34] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [35] ČSN 73 1372: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [36] PAL, Priyaranjan. Dynamic Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Pozzolana Portland Cement Concrete. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*. Allahabad, India: Department of Civil Engineering, Motilal National Institute of Technology Allahabad, 2019, **9**(2), 131-144.
- [37] ALLOS, Atheel E. a L. H. MARTIN. Factors affecting poisson's ratio for concrete. *Bulding and enviroment*. Great Britain: Pergamon Press, 1981, **16**(1), 1-9.
- [38] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-846-5.
- [39] ČSN ISO 1920-10: *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 2016. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [40] ČSN EN 12390-13: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2021.

- [41] ČSN 73 6174: *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: ČNI, 1994.
- [42] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [43] ČSN EN 12504-4: *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [44] PETR, Cíkrle a Kocáb DALIBOR. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. In: *TZB Info* [online]. 2014 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>
- [45] HUŇKA, Petr. *Modul pružnosti betonu – možnosti stanovení, technologické a zkušební vlivy*. Praha, 2014. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Kolář, CSc.
- [46] NEVILLE, Adam M. a J. J. BROOKS. *Concrete Technology*. Second Edition. Harlow, 2010. ISBN 978-0-273-73219-8.
- [47] KŘÍŽOVÁ, Klára. *Studium závislostí složení betonů na hodnoty modulů pružnosti*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [48] KOCÁB, Dalibor. *Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cíkrle, Ph.D.
- [49] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [50] FRANTÍK, Petr. *Nesrovnalosti v popisu příčné kontrakce* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <http://www.kitnarf.cz/publications/2003/2003.06.plm3/2003.06.plm3.html>
- [51] ŠTĚPÁN, Stanislav. *Využití ultrazvukové metody při diagnostice betonových konstrukcí*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cíkrle, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ρ – objemová hmotnost

$f_{c,cly}$ – cylindrická pevnost v tlaku

$f_{c,cube}$ – krychelná pevnost v tlaku

MPa – Megapascal

UZ – ultrazvuk

LK – lehké kamenivo

L – délka

d – průměr

f_c – pevnost betonu v tlaku

σ – napětí

E_c – statický modul pružnosti

ε – poměrná deformace

E_{cu} – dynamický modul pružnosti – UZ metoda

D – objemová hmotnost zkoušeného materiálu

v_L – rychlost šíření ultrazvuku

k – koeficient rozměrnosti prostředí

E_{crl} – dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu - rezonanční

f_L – první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa

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

c_1 – 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

F_c – naměřená maximální tlaková síla

A – tlačná plocha zkušebního tělesa

f_{ct} – pevnost v příčném tahu

F – naměřená maximální tlaková síla

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli w/c [19]	15
Obr. 2: Stanovení pevností v tlaku [19]	20
Obr. 3: Reálný a ideální způsob porušení tlačného vzorku [19]	21
Obr. 4: Závislost relativní pevnosti betonu na štíhlosti, způsob porušení hranolu [22]	22
Obr. 5: Varianty uspořádání zkoušky v příčném tahu [22]	23
Obr. 6: Třibodový tah ohybem (vlevo) a čtyřbodový tah ohybem (vpravo) [27]	24
Obr. 7: Stanovení pevnosti ve smyku [19]	24
Obr. 8: Pracovní diagram ($F - \Delta l$), deformační diagram ($\sigma - \epsilon$) [5]	28
Obr. 9: Hookův zákon v tahu (a tlaku) [29]	29
Obr. 10: Pracovní diagram betonu v tlaku [19]	29
Obr. 11: Vzájemný vztah mezi podélnou a příčnou deformací [50]	30
Obr. 12: Vliv pevnosti v tlaku betonu na Poissonovo číslo [36]	32
Obr. 13: Vliv vodního součinitele w/c na Poissonovo číslo [36]	32
Obr. 14: Vliv doby zrání betonu na Poissonovo číslo [37]	33
Obr. 15: Závislost Poissonova čísla na dynamickém modulu pružnosti [36]	33
Obr. 16: Podélná, příčná a objemová deformace betonu v tlaku [32]	35
Obr. 17: Různé moduly pružnosti v závislosti mezi napětím a deformací betonu [2]	36
Obr. 18: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušební tělesa [38]	38
Obr. 19: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušební tělesa [38]	39
Obr. 20: Typy prozvučování ultrazvukovou metodou [51]	41
Obr. 21: Rezonanční frekvence; zleva: podélná, příčná, kroutivá [38]	43
Obr. 22: Nomogram znázorňující předpovězené hodnoty modulu pružnosti betonu v závislosti na modulu pružnosti hrubého kameniva a na pevnosti betonu v tlaku [34]	45
Obr. 23: Pracovní diagram betonu a jeho složek [2]	46
Obr. 24: Zkušební tělesa tvaru válce [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]	50
Obr. 25: Měření rozměrů zkušebních těles [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]	51
Obr. 26: Stanovení pevnosti zatěžovací zkouškou v hydraulickém lisu	52
Obr. 27: Měření doby průchodu UZ impulsu (vlevo), stanovení vlastní frekvence zkušební tělesa (vpravo) [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]	53
Obr. 28: Umístění odporových tenzometrů na zkušebním válci	55
Obr. 29: Mechanický lis LaborTech [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]	56
Obr. 30: Graf průměrného poklesu statického modulu pružnosti	60
Obr. 31: Graf procentuálního poklesu statického modulu u MPZ-1	61
Obr. 32: Graf průměrného nárůstu statického Poissonova čísla	62
Obr. 33: Krabicový graf pevnosti v tlaku f_c	64
Obr. 34: Krabicový graf dynamického Poissonova čísla v	64
Obr. 35: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{crL}	65
Obr. 36: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{cu}	65
Obr. 38: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr}	66
Obr. 37: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti E_{crf}	66

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu [8]</i>	25
<i>Tab. 2: Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu [8]</i>	26
<i>Tab. 3: Receptura čerstvého betonu</i>	50
<i>Tab. 4: Změřené rozměry zkušebních válců</i>	58
<i>Tab. 5: Stanovení objemových hmotností zkušebních válců</i>	58
<i>Tab. 7: Dynamický modul pružnosti E_{cu}</i>	59
<i>Tab. 6: Dynamický modul pružnosti E_{crL}</i>	59
<i>Tab. 9: Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}</i>	59
<i>Tab. 8: Dynamický modul pružnosti E_{crf}</i>	59
<i>Tab. 10: Statický modul pružnosti E_c</i>	60
<i>Tab. 11: Statické Poissonovo číslo ν</i>	61
<i>Tab. 12: Dynamické Poissonovo číslo ν_{cr}</i>	62
<i>Tab. 13: Pevnost v tlaku f_c</i>	63

PŘÍLOHA

Příloha A: Typické deformační diagramy

