

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí



Diplomová práce

**Porovnání statického a dynamického modulu
pružnosti u různých druhů betonu**

**Comparison of static and dynamic elastic modulus of
different types of concrete**

Bc. Lucie Tancošová

Vedoucí práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Studijní program: Stavební inženýrství

Obor: Konstrukce a dopravní stavby

15. května 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Tancošová Jméno: Lucie Osobní číslo: 396672
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti u různých druhů betonu
Název diplomové práce anglicky: Comparison of static and dynamic elastic modulus of different types of concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši k tématu stanovení modulu pružnosti:

- Popis způsoby stanovení statického a dynamického modulu pružnosti a zhodnoťte.
- Popis co ovlivňuje hodnotu modulu pružnosti z technologického hlediska.
- V literatuře vyhledejte doporučené převodní součinitele mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:

- Vytvořte zkušební tělesa z běžného betonu, drátkobetonu a UHPC. U těchto těles stanovte statický a dynamický modul pružnosti.
- Vyhodnoťte rozdíly ve statickém a dynamickém modulem pružnosti pro jednotlivé druhy betonu a porovnejte s poznatky z rešeršní části.
- Na zkušebních tělesech stanovte základní mechanicko-fyzikální vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000
Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005
Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

22.2.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě diplomové práce, poskytnuté studijní materiály a konzultace.

Děkuji také Bc. Nikole Tancošové, Ing. Karlu Šepsovi Ph.D., Ing. Romanu Chylíkovi a Ing. Tomáši Trtíkovi za pomoc v laboratořích při výrobě vzorků a Ing. Patriku Stonišovi za provedení rezonanční zkoušky.

Nazávěr bych ráda poděkovala svým rodičům za podporu při studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Josefa Fládra, Ph.D. a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 21. 5. 2018

.....

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na porovnání statického a dynamického modulu pružnosti u vybraných druhů betonů. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část.

Teoretická část obsahuje základní informace o modulu pružnosti a jeho dělení, o způsobu jeho ovlivňování a metodách zkoušení vlastností.

Experimentální část je zaměřena na zkoušky modulu pružnosti, které se prováděly (statický a dynamický modul pružnosti a tlaková pevnost) a zhodnocení a porovnání jejich výsledků.

Pro zkoušení byly zvoleny tři druhy betonů, a to prostý beton, drátkobeton a vysokohodnotný beton. Jako kontrolní zkoušky se zvolila jedna destruktivní metoda a dvě nedestruktivní metody. Jako destruktivní metoda byla zvolena zkouška modulu pružnosti v tlaku. Z nedestruktivních metod se vybrala zkouška impulzní pomocí ultrazvukových vln a zkouška rezonanční.

K porovnání se zvolila norma ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí.

Klíčová slova

beton, statický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti, tlaková pevnost

Abstract

The diploma thesis is focused on comparison of the static and dynamic modulus of elasticity in selected types of concrete. The thesis is divided into the theoretical and experimental part.

The theoretical part contains basic information about the modulus of elasticity and its division, the way of its influence and the methods of testing the properties.

The experimental part focuses on the elastic modulus tests that were performed (static and dynamic modulus of elasticity and pressure strength) and the evaluation and comparison of their results.

For testing, three types of concrete were chosen, namely plain concrete, wire concrete and high-grade concrete. As a control test, one destructive method and two non-destructive methods were chosen. A compressive elastic modulus was chosen as the destructive method. Non-destructive methods were used to select a pulsed ultrasonic wave test and a resonance test.

For comparison, ČSN 73 2011 Non-Destructive Testing of Concrete Structures is selected.

Keywords

concrete, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity, pressure strength

Obsah

1	Úvod	1
2	Modul pružnosti	3
2.1	Statický modul pružnosti	6
2.2	Dynamický modul pružnosti	7
2.3	Způsoby ovlivnění modulu pružnosti	7
2.3.1	Ovlivnění modulu pružnosti složením betonové směsi	8
2.3.2	Ovlivnění modulu pružnosti zkoušením betonové směsi	11
2.3.3	Tranzitní zóna	11
2.4	Stanovení převodního součinitele mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti	12
3	Experimentální posouzení betonu	16
3.1	Složení zkušebních těles	17
3.2	Výroba zkušebních těles	20
3.2.1	Postup výroby směsi:	21
3.2.2	Postup výroby těles:	21
3.3	Zkouška pevnosti v tlaku	24
3.4	Zkouška modulu pružnosti v tlaku	27
3.4.1	Postup zkoušky podle normy ČSN ISO 1920-10	29
3.4.2	Postup zkoušky podle normy ČSN EN 12390-13	31
3.5	Zkouška modulu pružnosti impulzní metodou	35
3.6	Zkouška modulu pružnosti rezonanční metodou	38
4	Vyhodnocení výsledků zkoušek	43
4.1	Zkouška pevnosti v tlaku	44
4.2	Zkouška modulu pružnosti v tlaku	51
4.3	Zkouška modulu pružnosti impulzní metodou	56
4.3.1	Výsledky modulu pružnosti na vzorcích zkoušených v tlaku	56
4.3.2	Výsledky modulu pružnosti na vzorcích zkoušených pružně	60
4.4	Zkouška modulu pružnosti rezonanční metodou	65
4.5	Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti	70

<i>OBSAH</i>	vii
5 Závěr	79
Literatura	81
A Seznam použitých zkratk	82

Seznam obrázků

1.1	Různé druhy betonu	2
2.1	Pracovní diagram betonu	4
2.2	Rozdíl mezi sečnovým a tečnovým modulem pružnosti	6
2.3	Tranzitní zóna	12
2.4	Parametry betonů podle ČSN EN 1992–1–1	15
3.1	Zkušební trámce	18
3.2	Drátky Dramix 80/30 BN	20
3.3	Formy pro výrobu trámků	22
3.4	Plnění forem směsí	23
3.5	Hotové naplněné formy betonovou směsí	23
3.6	Odbedňování trámků	23
3.7	Umístění zkušebního vzorku v lisu	25
3.8	Porušené vzorky z UHPC	26
3.9	Porušené vzorky z drátkobetonu	26
3.10	Zkušební lis	28
3.11	Schéma umístění měřicího zařízení	29
3.12	Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa	30
3.13	Těleso osazené měřícím zařízením v lisu	32
3.14	Schéma zatěžování	33
3.15	Porušené vzorky při zatížení tlakem	34
3.16	Ultrazvuk	35
3.17	Vliv prostředí na rychlost šíření impulsu	36
3.18	Postup použití ultrazvuku	37
3.19	Zkouška podélného kmitání	39
3.20	Zkouška příčného kmitání	40
3.21	Zkouška kroutivého kmitání	41
3.22	Uložení vzorku na podložku a rezonanční přístroj	42
3.23	Záznam rezonanční zkoušky	42
4.1	Souhrnné výsledky prostého betonu v tlaku	45

4.2	Souhrnné výsledky drátkobetonu v tlaku	46
4.3	Souhrnné výsledky vysokohodnotného betonu v tlaku	47
4.4	Souhrnné výsledky zatěžovacích sil při zkoušce v tlaku	48
4.5	Souhrnné výsledky pevností při zkoušce v tlaku	48
4.6	Vykreslená zkouška pevnosti v tlaku vyřazeného vzorku z UHPC	49
4.7	Souhrnné výsledky zatěžovacích sil při oddálené zkoušce v tlaku	50
4.8	Souhrnné výsledky pevností při oddálené zkoušce v tlaku	51
4.9	Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku prostého betonu	52
4.10	Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku drátkobetonu	53
4.11	Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku vysokohodnotného betonu	54
4.12	Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami	55
4.13	Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu	57
4.14	Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu	58
4.15	Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	59
4.16	Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami	60
4.17	Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu	61
4.18	Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu	62
4.19	Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	63
4.20	Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami	64
4.21	Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu	66
4.22	Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu	67
4.23	Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	68
4.24	Naměřené zprůměrované hodnoty modulu pružnosti	69
4.25	Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti	71
4.26	Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro prostý beton	74
4.27	Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro drátkobeton	75
4.28	Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton	76
4.29	Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti	77

Seznam tabulek

2.1	Materiálové konstanty	4
2.2	Hodnoty zmenšovacích součinitelů podle ČSN 73 2011	13
2.3	Parametry betonů podle ČSN EN 1992-1-1	15
3.1	Složení záměsí zkoušeného prostého betonu	18
3.2	Složení záměsí zkoušeného drátkobetonu	19
3.3	Složení záměsí zkoušeného vysokohodnotného betonu	19
3.4	Pevnostní třídy betonu	24
3.5	Poměry vlastních kmitočtů hranolu	41
4.1	Rozměry zkoušených těles ze směsi prostého betonu	44
4.2	Rozměry zkoušených těles ze směsi drátkobetonu	45
4.3	Rozměry zkoušených těles ze směsi vysokohodnotného betonu	46
4.4	Průměrné hodnoty naměřené pro jednotlivé druhy betonů při zkoušce v tlaku	47
4.5	Průměrné hodnoty naměřené pro jednotlivé druhy betonů při oddálené zkoušce v tlaku	50
4.6	Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu	52
4.7	Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu	53
4.8	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	54
4.9	Naměřené průměrné hodnoty modulu pružnosti	55
4.10	Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu	56
4.11	Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu	57
4.12	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	58
4.13	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	60
4.14	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	61
4.15	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	62
4.16	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	63
4.17	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	64
4.18	Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu	65
4.19	Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu	66
4.20	Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu	67

4.21 Naměřené zprůměrované hodnoty modulu pružnosti	69
4.22 Stanovení převodních součinitelů dle normy	70
4.23 Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti	70
4.24 Stanovení převodních součinitelů pro prostý beton	72
4.25 Stanovení převodních součinitelů pro drátkobeton	72
4.26 Stanovení převodních součinitelů pro vysokohodnotný beton	73
4.27 Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro prostý beton	73
4.28 Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro drátkobeton	74
4.29 Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton	75
4.30 Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton	77

Kapitola 1

Úvod

Tato práce byla zaměřena na porovnání a posouzení modulů pružnosti tří druhů betonů. Pro posouzení se použily statické a dynamické moduly pružnosti. Získané výsledky byly porovnány a výsledky zhodnoceny.

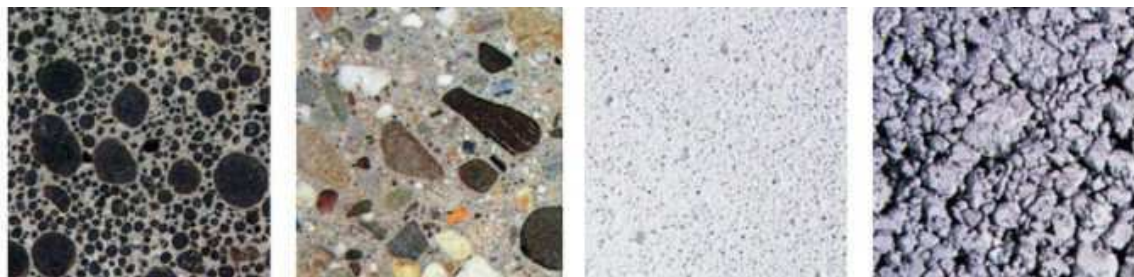
Modul pružnosti byl zvolen z toho důvodu, že patří mezi základní charakteristiky pro popis betonu. Ten se jinak nazývá umělým kamenem a je v dnešní době jeden z hlavních stavebních materiálů používaných po celém světě. Jeho využití je jak při výrobě obyčejných dlažebních kostek sloužících pro sestavování chodníků, tak pro výstavbu obrovských přehrad a mrakodrapů, které jsou náročné na vlastnosti použitého materiálu.

Beton jako stavební materiál je velmi oblíbený nejen kvůli možnostem jeho použití, ale také kvůli jeho vysoké pevnosti v tlaku, trvanlivosti a nehořlavosti, zároveň je možné z tohoto materiálu vytvářet nejrůznější tvary konstrukcí. V dnešní době snahy o co nejmenší zatěžování životního prostředí je u betonu ceněna možnost jeho recyklace. Z těchto důvodů se začínají zvyšovat nároky na jeho složení a následné vlastnosti směsi jak v jejím čerstvém stavu, tak hlavně po jejím zatvrdnutí.

Dříve se předepisovala pouze pevnost a velikost kameniva, případně i konzistence směsi. Dnes se při návrhu požadované směsi začíná předepisovat i minimální hodnota modulu pružnosti vyrobeného betonu. Vtom ale spočívá problém, jelikož jeho hodnoty nejsou dané pro daný druh betonu. Jeho hodnoty jsou ovlivňovány mnoha faktory, a proto byla moje práce zaměřena na toto téma.

Beton jako takový je anorganické hydraulické pojivo obecně složené z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí. Po smíchání jeho složek dostaneme nejdříve takzvanou kaši, která díky hydratačních procesů tuhne a tvrdne a vzniká tak výsledný produkt. Jeho vzhled a výsledné vlastnosti jsou ovlivněny poměrem jednotlivých použitých složek. Tím vznikají i různé druhy betonů, které jsou znázorněny na obrázku [1.1](#). Pro zlepšení specifických

vlastností betonové směsi se dosahuje přidáváním příměsí a přísad, tím se dá ovlivnit jak zpracovatelnost betonové směsi, tak konečné vlastnosti betonu.



Obrázek 1.1: Různé druhy betonu

Vznik moderního betonu, jak ho známe můžeme datovat od r. 1796 kdy byl patentován Angličanem J. Parkerem románský cement. V jeho patentu je uveden postup drcení a pálení vápencové suroviny s příměsí hlinitých součástí.

První portlandský cement vznikl v r. 1824 a byl vytvořen J. Sardinem. Pojmenován byl pro svoji podobnost s portlandským vápencem.

V r. 1844 byla zjištěna nutnost pálení surovin na mezi slinutí díky I. Ch. Johnsonovi. K pálení docházelo v šachtových pecích. Takto pálené suroviny dnes nazýváme portlandským slínkem, který vzniká při teplotě 1450 °C.

Vývoj betonu pokračuje ještě dnes. Pořád vznikají nové postupy pro jeho výrobu, zpracování a ošetřování betonové směsi. Stejně tak se během let začínají zvyšovat nároky na vlastnosti betonu a s tím je spojeno i ovlivňování jeho základních vlastností, mezi které spadá zmíněný modul pružnosti.

Kapitola 2

Modul pružnosti

Modul pružnosti je jednou ze základních charakteristik betonu a používá se k popsání deformovatelnosti materiálu a mrazuvzdornosti. Nejčastěji je spojován s pevností materiálů v tlaku. Při zatížení materiálu vnějším zatížením dochází k jeho deformaci ve směru kolmo k působící síle. Pokud se po odtěžení materiálu jeho tvar vrátí do původních rozměrů, můžeme o něm prohlásit, že u něj došlo k elastické deformaci.

Výpočet tohoto parametru vychází z Hookova zákona, který popisuje pružnou deformaci materiálu při jeho zatížení takovými silami, aby nedošlo k trvalé deformaci. Tento zákon stanovil anglický fyzik a inženýr Thomas Young a vyjádřil hodnoty modulů pružnosti pro mnoho materiálů. Každý materiál má rozdílné hodnoty této veličiny a u některých materiálů jsou tyto hodnoty velice rozdílné. Některé z modulů pružnosti stavebních materiálů jsou vyjádřeny v tabulce 2.1. Zároveň jsou v tabulce uvedeny hodnoty poissonova součinitele roztažnosti μ . Obecné znění Hookova zákona je:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.1)$$

kde

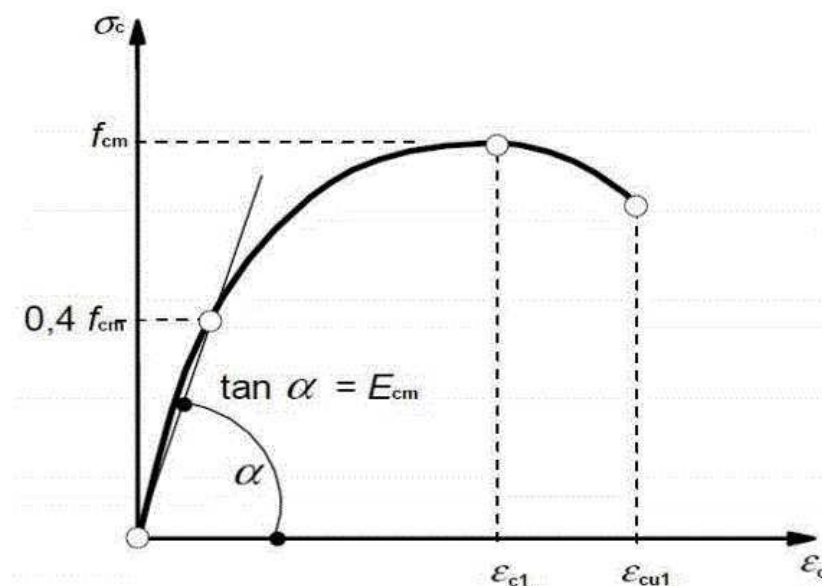
- σ - napětí $[MPa]$
- E - modul pružnosti $[MPa]$
- ϵ -poměrné přetvoření $[-]$

Tabulka 2.1: Materiálové konstanty

Materiál	E [MPa]	μ [-]
Beton C 20/25	26 000	0,1 - 0,2
Beton C 30/37	32 000	0,1 - 0,2
Beton C 50/60	37 000	0,1 - 0,2
Čedič	100 000	0,15
Žula	30 – 60 000	0,18
Cihla plná	5 000	0,3
Ocel	200 – 210 000	0,27

Obecně je známo, že modul pružnosti se zvyšuje s hodnotou tlakové únosnosti. Pokud bychom zatěžovali jednotlivé složky betonové směsi, získáme lineární průběhy zatížení. To ale neplatí o modulu pružnosti betonu. Jelikož je tento materiál kompozitní dochází k tomu, že průběh zatěžování je lineární pouze do určitého okamžiku. Ke změně mezi lineárním a nelineárním průběhem dochází okolo 40 % pevnosti betonu v tlaku. Z toho vyplývá, že vlastnosti betonu jsou ovlivňovány jeho složením a kvalitou použitých složek.

Tento průběh deformovatelnosti betonu je nejlépe zobrazen na pracovním diagramu. Běžný diagram zatěžovaného betonu je zobrazen na obrázku 2.1. Zde se vyjadřuje poměr mezi napětím značeným σ udávaným v MPa a poměrným přetvořením značeným jako ϵ , které je bez jednotek. Z tohoto poměru získáme Youngův modul pružnosti, známým pod písmenem E.



Obrázek 2.1: Pracovní diagram betonu

Závislost napětí na přetvoření je lineární jen v počátku zatěžování, při vyšším napětí není modul pružnosti konstantní, ale klesá. Při napětí asi 30 % zlomového napětí začínají vznikat trhlinky a projevují se trvalé deformace [1].

Obecně je modul pružnosti obtížně měřitelný. Pro jeho zjištění se využívá několik metod měření a podle toho je tato veličina rozdělena do několika skupin. Měření spočívá buď v silovém zatížení zkušební vzorku, kde výsledkem jsou přímo vyvolané deformace a napětí, nebo se využívá známých fyzikálně mechanických vlastností a jejich měřením pomocí určitých druhů vln, jako jsou ultrazvukové nebo rezonanční. Přes tyto vlny následně dopočítáme hledané deformace a napětí.

Podle způsobu měření získáme:

- Statický modul pružnosti
- Dynamický modul pružnosti

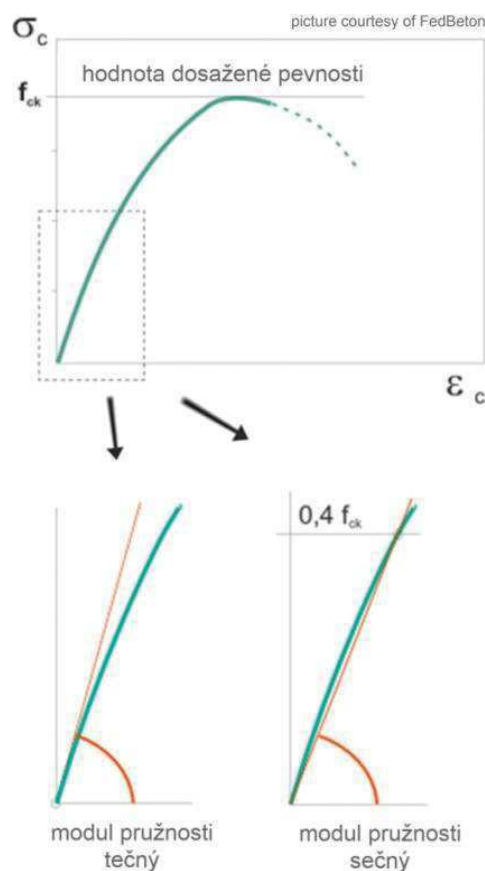
Podle způsobu odečtení z pracovního diagramu:

- Tečnový modul pružnosti
- Sečnový modul pružnosti

Díky poznatkům prověřeným zkoušením vyplývá, že statický modul pružnosti odpovídá sečnovému a dynamický modul pružnosti je zjišťovaný na tečnových křivkách.

Způsob a místo pro odečítání těchto modulů z pracovních diagramů je vyobrazeno na obrázku 2.2. Z něho vyplývá, že k odečítání dochází v místech s lineárním průběhem zatěžování a tím pádem i s platným Hookovo zákonem.

V dnešní době začíná být modul pružnosti předepisován jako jeden z parametrů, nutných dodržet při výrobě. Pro jeho specifikaci se udává střední hodnota značená jako E_{cm} . Bohužel modul pružnosti ovlivňuje mnoho faktorů a jeho hodnoty mohou kolísat.



Obrázek 2.2: Rozdíl mezi sečnovým a tečnovým modulem pružnosti

2.1 Statický modul pružnosti

Tento modul pružnosti se nejčastěji získává při destruktivních zkouškách na normových tělesech. Nejčastěji se používají válce s délkou 300 mm a průměrem 150 mm. Další možností pro zkoušení je použití hranolů o délce 400 mm s hranami 100x100 mm. Vhodné těleso pro zkoušky musí mít poměr stran L/d v rozmezí 2–4. Modul pružnosti se na krychlích neprovádí.

Nejčastější způsob měření je pomocí zatěžovací zkoušky v tlaku nebo zatěžovací zkoušky v tahu za ohybu. Díky tomu je možné využít principů Hookova zákona. Hodnoty tohoto modulu se zjišťují v laboratořích pomocí zrcátkového nebo hodinkového deformetru, odporového, strunového nebo indukčního tenzometru.

Statický modul pružnosti odpovídá svými hodnotami sečnovému modulu E_{cm} . Při jeho odečítání z grafu nejdříve vytvoříme spojnici mezi počátkem a maximální hodnotou zatížení f_{cm} . Hledaný modul pružnosti se pak nachází mezi námi vytvořenou spojnici a osou ϵ jako přibližná hodnota $tg\alpha$.

Postup pro jeho měření je udáván v normách ČSN 73 6174, ČSN 13412, ČSN EN 12 390 - 13, ČSN ISO 1920-10, která nahradila normu ČSN ISO 6784.

2.2 Dynamický modul pružnosti

Pro změření hodnot tohoto modu se používají zpravidla nedestruktivní metody. Jeho hodnoty odpovídají tečnovému modulu.

Jeho nejčastější využití je při zkoušení stávajících konstrukcí, kde je nežádoucí nebo nemožné udělat vývrty pro zkoušení v laboratořích.

Nejčastěji se pro zjištění tečnového modulu pružnosti používá ultrazvuková nebo rezonanční metoda. Jejich postupy provádění jsou uvedeny v normě ČSN 73 1371, ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1372.

Tento modul se vyjádří z grafu ze spojnice mezi počátkem zatěžování a hodnotou v $1/3 f_{cm}$ betonu, která se vyjadřuje jako $0,33 f_{cm}$. Mezi touto úsečkou a osou ϵ se pak nachází statický modul pružnosti odpovídající přibližně hodnotě $tg\alpha$.

Po získání hodnot dynamického modulu pružnosti je nutné jeho hodnoty převést pomocí normou udaných koeficientů na statický modul pružnosti, který je běžně používaný.

2.3 Způsoby ovlivnění modulu pružnosti

Jeho hodnoty jsou nejvíce ovlivněny složením betonové směsi, hlavně pak kvalitou použitého kameniva. Modul pružnosti se v betonu zvyšuje postupně jak betonová směs zraje. Čím vyšší má konstrukce E , tím menší deformace se na ní projeví. V některých případech speciálních konstrukcí je nutné dokonce modul pružnosti specifikovat.

Závislost modulu pružnosti E na pevnosti betonu f_c (v tlaku) nelze stanovit pro obecné použití s možností aplikace na libovolný beton. Vztah lze zjistit pro konkrétní beton konkrétního složení. Pro beton odlišného složení je potřeba stanovit nový vzájemný poměr mezi E a f_c [2].

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud chceme upravit modul pružnosti musíme změnit jednu z následujících položek ve složení směsi:

- vodní součinitel

- druh nebo složení kameniva
- množství a druh cementu
- množství a druh příměsí
- množství a druh přísad

Kromě technologických aspektů ovlivňují modul pružnosti i vlivy vycházející z postupů zkoušek a tvarů zkušebních těles. Zároveň je modul ovlivňován tranzitní zónou v betonové směsi.

2.3.1 Ovlivnění modulu pružnosti složením betonové směsi

Vodní součinitel se určuje jako poměr použité vody v záměsi a množstvím použitého cementu ve směsi.

$$w = \frac{v}{c + k * \rho} \quad (2.2)$$

kde

v - hmotnost vody [kg/m^3]

c - hmotnost cementu [kg/m^3]

k - součinitel příměsí [-]

ρ - hmotnost příměsí [kg/m^3]

Voda v betonu slouží k hydrataci cementu. Hydratace je chemický proces, při kterém dochází nejdříve k tuhnutí a následně k tvrdnutí směsi. Její množství se odvíjí od vlastností použitého cementu. Jako minimální množství se udává 23–28 % hmotnosti použitého cementu. Množství použité vody ale ovlivňuje zpracovatelnost betonu. Při použití tak malého množství vody pro zamísení směsi, nedojde k hydrataci všech zrn cementu a zároveň by vzniklý beton byl příliš suchý pro následující manipulaci a ukládání. Proto se volí vyšší množství záměsové vody. S vyšším množstvím vody se zmenšuje tření mezi zrny kameniva a tím se zlepšuje jeho zpracovatelnost. Zároveň ale s nadměrně se zvyšujícím množstvím vody snižuje únosnost směsi a zároveň i modul pružnosti.

Kamenivo je zrnitý materiál, který tvoří takzvanou kostru betonu. Podle původu ho můžeme rozdělit na přírodní nebo umělé. Za kamenivo se považují zrna do velikosti 125

mm, zrna o větších rozměrech spadají do kategorie lomového kamene. Velikost zrn kameniva je vyjádřeno frakcí, která udává velikost zrn v dané směsi. Při výběru kameniva do směsi je nutné dbát nejen na jeho chemické složení, ale i na jeho tvar. Nejvíce žádané jsou zaoblené a kulovité tvary, nejméně žádané jsou nerovnoměrné tvary s mnoha zaobleními a zkoseními. V těchto místech zůstává při míchání betonu voda nebo vzduchové bublinky. Po odpaření přebytečné vody vzniknou dutinky, které vedou ke zvýšení pórovitosti, tím zároveň dochází ke snížení únosnosti a modulu pružnosti. Z tohoto důvodu je nutné dobře zvolit složení směsi.

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi [1]. Hlavními složkami jsou látky s množstvím větším než 5 % hmotnosti všech použitých složek [3]. Mezi ně patří:

- portlandský slínek
- granulovaná vysokopeční struska
- pucolány
- popílký
- kalcinovaná břidlice
- vápenec
- křemičitý úlet

Cement je vyroben vypálením vápence a jílu při teplotách 1450 °C [2]. Tím vznikne slínek, který se po vychladnutí rozemílá na šedý prášek. Po jeho smíchání s vodou dojde díky hydratačním procesům k tuhnutí a tvrdnutí. Během těchto procesů se vytváří krystalky, které navzájem prorůstají a tím je dosaženo pevnosti tohoto materiálu.

Měrný povrch tohoto materiálu odpovídá jemnosti mletí. Čím má cement větší měrný povrch, tím rychleji a úplněji hydratuje, ale jeho výroba je energeticky náročnější. Cementový kámen má však větší smrštění a pro smáčení zrn cementu je třeba větší množství vody [1]. Obecně platí, že čím je vyšší pevnostní třída cementu a čím méně obsahuje příměsí, tím rychleji probíhá jeho tvrdnutí a tuhnutí. Cement je vhodný např. do konstrukcí s požadavky na krátké odbedňovací lhůty nebo pro zimní betonáže. Naopak cementy nižších tříd s vysokým obsahem příměsí tuhnou a tvrdnou pomaleji a jsou vhodné např. pro masivní konstrukce nebo do chemicky agresivního prostředí [4].

Příměsí jsou jemné, sypké látky používané pro zlepšení vlastností betonu při jeho zpracování, nebo u už zatvrdlého materiálu. U čerstvého betonu se jedná zejména o konzistenci a zpracovatelnost a u ztvrdlého betonu o pevnost, hutnost, trvanlivost, odolnost

proti chemicky agresivnímu prostředí atd. [4]. Dávkování se pohybuje okolo 20 % hmotnosti cementu [3]. Při jejich použití musíme brát v potaz nutnost zvýšení množství záměsové vody.

Známy jsou dva typy:

- inertní
- latentně hydraulické

Inertní látky se nepodílí na hydrataci směsi. Důvodem jejich použití je zvětšení hutnosti betonové směsi. To vede ke zlepšení zpracovatelnosti nebo k obarvení betonové směsi.

Latentně hydraulické látky se hydratace účastní. Nejdříve je ale musí k tomuto procesu aktivovat takzvaný aktivátor. V tomto případě to je cement. Nejznámější používanou příměsí s aktivními vlastnostmi je jemně mletá vysokopecní struska.

Přísady jsou látky, které upravují jednu nebo více vlastností buď čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Přísady jsou sypké i tekuté. Dávkování je v 0,2 – 5 % hmotnosti cementu a do směsi se přidávají během míchání [3].

Podle funkce rozeznáváme:

- plastifikátory
- superplastifikátory
- zpomalovače tvrdnutí nebo tuhnutí
- urychlovače tvrdnutí nebo tuhnutí
- provzdušňovače
- inhibitory koroze
- stabilizační přísady atd.

Každá přísada ovlivňuje alespoň jednu z hlavních vlastností betonové směsi. V některých případech mohou mít ještě vedlejší účinek. Tyto vlivy se redukuje množstvím použité látky. Při špatně zvoleném množství přísad může dojít k vytváření nadměrné pórovitosti nebo může dojít k nevhodnému složení směsi pro daný objekt.

2.3.2 Ovlivnění modulu pružnosti zkoušením betonové směsi

Kromě složení betonové směsi zásadně ovlivňuje naměřený modul pružnosti:

- míra zhutnění
- způsob a doba ošetřování
- tvar zkušební tělesa a jeho zakončení
- zkušební zařízení
- výběr zkušební metody
- postup provádění zkoušky
- vlastnosti prostředí konkrétní laboratoře

Tvar zkušebních těles, jejich výroba a doba ošetřování jsou uvedeny v normě ČSN EN 12390-1 a ČSN EN 12390-2.

Zhutnění vzorků vede k lepšímu uložení směsi a ke snížení zachycených vzduchových pórů během jejich výroby.

Je obecně známo že beton svých pevností dosahuje postupně. Pokud betonové vzorky uložíme do 100 % vlhkého prostředí získáme vyšší modul pružnosti než u vzorků vystavených suchému prostředí. Při krátkém ošetřování nedojde k úplnému zhydratování cementových zrn a tím vzniká nadměrné smrštění a začnou vznikat trhlinky. Ty pak vedou ke snížení únosnosti materiálu. Při delší době ošetřování dochází k redukci smrštění a tím i ovlivnění množství vzniklých trhlin.

Zkušební zařízení a podmínky v laboratoři jsou popsány spolu s postupy prováděním jednotlivých zkoušek v příslušných normách patřící dané zkoušce.

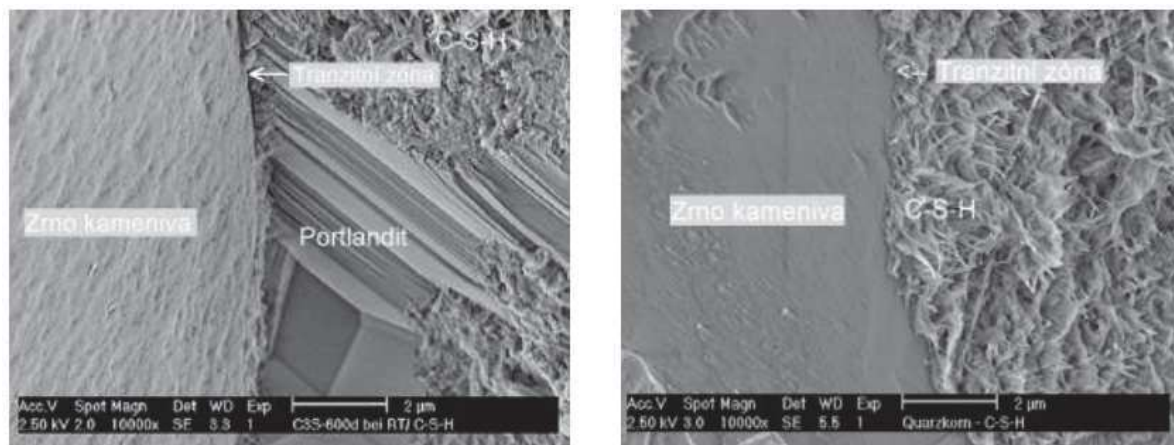
2.3.3 Tranzitní zóna

Při porušení betonu dochází ke vzniku trhliny procházející maltou nebo podél rozhraní mezi kamenivem a maltou. Rozhoduje ta část, která je slabší. Pokud je použito kamenivo s nízkou únosností může dojít ke vzniku trhliny skrz něj.

Zóna, která se nachází mezi maltou a kamenivem se označuje jako tranzitní, která je vyobrazena na obrázku 2.3. Bezprostředně u povrchu zrn je vyšší vodní součinitel

2.4. STANOVENÍ PŘEVODNÍHO SOUČINITELE MEZI STATICKÝM A DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI

než v okolní cementové pastě. Ve srovnání s cementovou pastou dál od rozhraní je mikrostruktura tranzitní zóny charakterizována velkými póry a velkými krystalickými hydratačními produkty. Tento jev způsobuje nehomogenitu v mikrostruktuře, které mají vážný dopad na pevnost betonu [5].



Obrázek 2.3: Tranzitní zóna

2.4 Stanovení převodního součinitele mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti

Jak již bylo řečeno dříve, pro zjištění vlastností betonu můžeme použít destruktivní a nedestruktivní zkoušky.

Jelikož je hlavním hledaným modulem statický modul, vznikly převodní součinitele jejichž pomocí můžeme jednotlivé moduly pružnosti převádět. Tyto součinitele jsou uvedeny v normě ČSN 73 2011 a jsou zobrazeny v tabulce 2.2.

Jednotlivé součinitele slouží pro přepočet dynamických modulů pružnosti získaných z impulzní ultrazvukové metody (κ_u) a z rezonanční metody (κ_R) na statický modul pružnosti. Tyto hodnoty však byly stanoveny v 30. letech 20. století pro betony tehdejší výroby. V dnešní době jsou hodnoty těchto koeficientů nižší a jsou ovlivňovány například použitým kamenivem, vodním součinitelem nebo zráním betonu.

Při výpočtu se statický modul pružnosti určí pomocí metody impulzní:

$$E_c = \frac{\Sigma E_{cu}}{n} \kappa_u \quad (2.3)$$

2.4. STANOVENÍ PŘEVODNÍHO SOUČiniteLE MEZI STATICKÝM A DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI

kde

E_c - statický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]

E_{cu} - dynamický modul pružnosti t tahu/tlaku zjištěný rezonanční metodou [MPa]

κ_R - zmenšovací koeficient [-]

n - počet zkušebních míst [-]

Při výpočtu statického modulu z hodnot rezonanční metody získáme:

$$E_c = \frac{\Sigma E_{cR}}{n} \kappa_R \quad (2.4)$$

kde

E_c - statický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]

E_{cR} - dynamický modul pružnosti t tahu/tlaku zjištěný rezonanční metodou [MPa]

κ_R - zmenšovací koeficient [-]

n - počet zkušebních míst [-]

Tabulka 2.2: Hodnoty zmenšovacích součinitelů podle ČSN 73 2011

Beton	Zmenšovací součinitel	
	K_u	K_r
C 8/10	0,62	0,81
C 12/15	0,71	0,86
C 16/20	0,76	0,88
C 25/30	0,81	0,90
C 30/37	0,83	0,91
C 35/45	0,86	0,93
C 40/50	0,88	0,94
C 45/55	0,90	0,95

Podle britské normy se dynamický modul pružnosti převede na statický pomocí následující rovnice:

2.4. STANOVENÍ PŘEVODNÍHO SOUČINITELE MEZI STATICKÝM A DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI

$$E_c = 1,25 * E_d - 19 \quad (2.5)$$

kde

E_c - statický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]

E_d -dynamický modul pružnosti t tah/tlaku [MPa]

Tento vzorec se nepoužívá pro betony s obsahem cementu větším než 500 kg/m³ a byl vyvinut pány Swamy a Bandyopadhyay.

Nejjednodušší empirický vztah, který byl stanoven pro převedení statického a dynamického modulu pružnosti, zhotovil Lydon a Balendran. Rozdíl mezi dynamickými a statickými moduly je založen na skutečnosti, že nehomogenní vlastnosti betonu ovlivňují různé moduly různými způsoby.

$$E_c = 0,83 * E_d \quad (2.6)$$

kde

E_c - statický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]

E_d -dynamický modul pružnosti t tah/tlaku [MPa]

Dalším možným postupem pro přepočítání modulů pružnosti platí pro lehké betony a betony s normální hustotou. Ten vychází právě z objemové hmotnosti betonové směsi.

$$E_c = \frac{k * E_d^{1,4}}{\rho_c} \quad (2.7)$$

E_c - statický modul pružnosti v tahu/tlaku [MPa]

E_d -dynamický modul pružnosti t tah/tlaku [MPa]

k -konstanta závisající na použitých jednotkách [-]

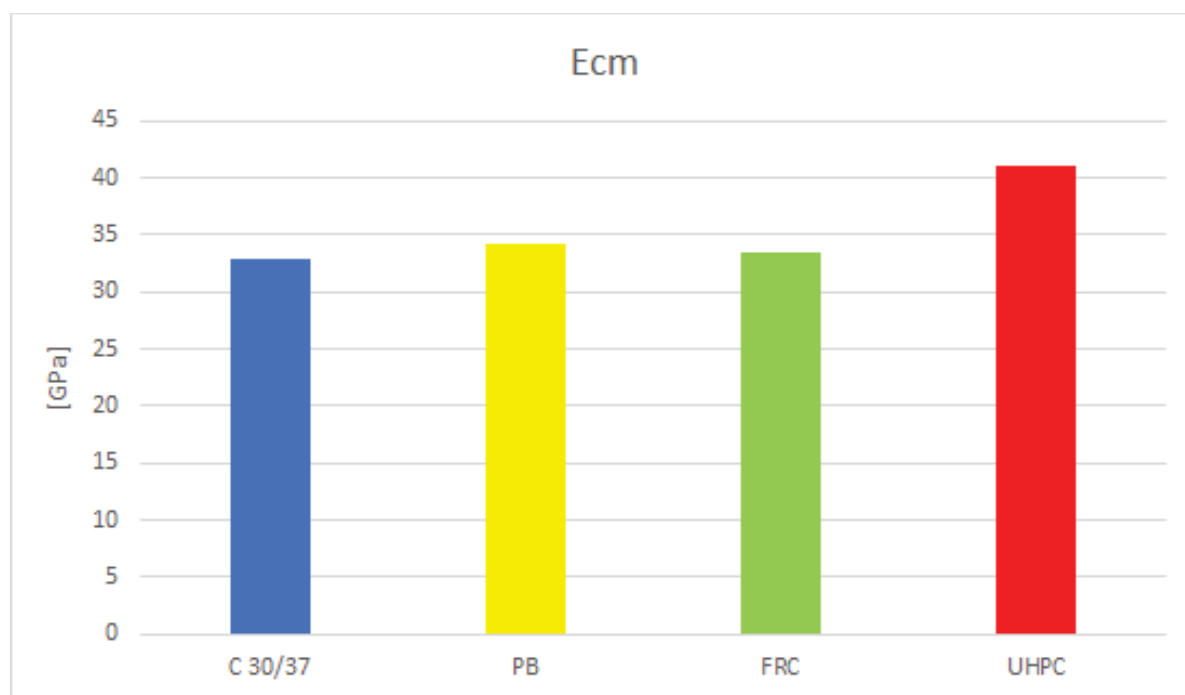
ρ_c -objemová hmotnost [kg/m³]

2.4. STANOVENÍ PŘEVODNÍHO SOUČINITELE MEZI STATICKÝM A DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI

Pro přehlednost jsou zde uvedeny v tabulce 2.3 základní parametry jako je charakteristická pevnost f_{ck} , návrhová pevnost betonu f_{cm} a sečnový modul pružnosti E_{cm} použitých betonů v této práci a beton C 30/37 pro srovnání naměřených hodnot. Jednotlivé hodnoty byly získány pomocí normy ČSN EN 1992-1-1 [6]. Výsledky jsou pro přehlednost vykresleny v grafu 2.4.

Tabulka 2.3: Parametry betonů podle ČSN EN 1992-1-1

Označení	f_{ck} [MPa]	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
Beton C 30/37	30,00	38,00	38,00
Beton C 35/45	35,86	43,86	34,28
Beton C 40/50	32,40	40,40	33,45
Beton C 45/55	72,19	80,19	41,08



Obrázek 2.4: Parametry betonů podle ČSN EN 1992-1-1

Kapitola 3

Experimentální posouzení betonu

V předcházejících kapitolách bylo vysvětleno, co je modul pružnosti, na co se dělí a co ho ovlivňuje. V kapitolách následujících je popsáno složení použitých betonových záměsí, postupy výroby zkušebních těles a postupy použitých zkoušek.

Veškeré zkoušky byly prováděny ve školních akreditovaných laboratořích katedry betonových a zděných konstrukcí ČVUT. Pro získání dat potřebných pro tuto práci byly zvoleny tři druhy zkoušek pro ztvrdlý beton. Jedna ze zvolených zkoušek patří mezi destruktivní metody, zbylé dvě pak patří mezi nedestruktivní metody. Pro destruktivní metodu se zvolila zkouška modulu pružnosti v tlaku a pro nedestruktivní metody byla zvolena zkouška impulzní pomocí ultrazvuku a zkouška rezonanční. Jejich postup byl proveden podle normových předpisů ČSN ISO 1920-10 [7], ČSN EN 73 12390-13 [8], ČSN EN 12504-4 [9] a ČSN EN 73 1372 [10].

Destruktivní zkouška byla zvolena pro svoji výhodu měření potřebných hodnot přímo na zkušebním vzorku. Při jejich zjišťování nedochází k ovlivnění změřených výsledků různými výpočetními vzorci a koeficienty. Nevýhodou tohoto postupu je, že pro změření daných hodnot je nutné těleso zničit, a proto nejde na tělese zkoušku opakovat. Z tohoto důvodu se destruktivní zkoušky dají provádět pouze v laboratoři. Naměřené výsledky z této metody byly brány jako nejvíce odpovídající realitě.

Nedestruktivní metody byly zvoleny jako zkoušky srovnávací s výsledky zjištěnými z destruktivních postupů. Výhodou těchto metod je možnost opakování měření díky tomu že materiál není při zkouškách poškozen. Díky tomu že vzorky nejsou zatěžovány nevznikají v nich napětí a tím nedochází ke vzniku a následnému rozvoji trhlin. Díky tomu se jejich použití rozšiřuje jak na zkoušky prováděné v laboratoři, tak na zkoušky prováděné přímo na již stojících stavbách, bez nutnosti jejich porušení. Nevýhodou těchto postupů je měření nepřímých hodnot, ze kterých se námi požadované hodnoty

musí přepočítat.

Jako zkušební beton se zvolili tři druhy betonu:

- prostý beton (PB)
- drátkobeton (FRC)
- vysokohodnotný beton (UHPC)

Před zahájením experimentálního měření byly vzorky nejdříve po dobu 28 dnů uloženy v prostředí se 100 % vlhkostí a následně byla tělesa uchovávána na vzduchu v laboratorním prostředí.

3.1 Složení zkušebních těles

Všechny zkoušky byly prováděny na trámciích o rozměrech 400x100x100 mm odpovídajících normě. Pro dostatečné množství výsledků jednotlivých zkoušek bylo z každé směsi zhotoveno 20 těles. Na obrázku [3.1](#) jsou vidět tělesa ze všech tří směsí po jejich odbednění. První ze zkoušek se provedly ve stáří těles 28 dní uložených během zrání ve vlhkém prostředí.

3.1. SLOŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES



Obrázek 3.1: Zkušební trámce

Tělesa konkrétního betonu byla vždy vyrobena z jedné záměsi. Jejich složení s hmotnostními poměry jsou uvedeny v následujících tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3.

Tabulka 3.1: Složení záměsí zkoušeného prostého betonu

Složení			kg/m^3
cement		42,5 R - Mokrý	340
voda		voda	150,0
v/c			0,44
kamenivo křemen	hrubé	8 - 16	680
	střední	4 - 8	345
	jemné	0 - 4	730
superplastifikátor		Stacheplast 2480	2,3
Celkem			2247,74

3.1. SLOŽENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Tabulka 3.2: Složení záměsí zkoušeného drátkobetonu

Složení		kg/m^3
cement	42,5 R - Mokrý	490
voda	voda	153,0
v/c		0,31
kamenivo křemen	hrubé	8 - 16
	střední	4 - 8
	jemné	0 - 4
superplastifikátor	Stacheplast 2480	4,9
drátky	Dramix 80/30 BN	60
Celkem		2448,21

Tabulka 3.3: Složení záměsí zkoušeného vysokohodnotného betonu

Složení		kg/m^3
cement	42,5 R - Mokrý	650
voda	voda	163
v/c		0,25
kamenivo čedič	hrubé	8 - 16
	střední	4 - 8
	jemné	0 - 4
superplastifikátor	SK	30
Mikrosilica	SK	80
drátky	Dramix ol 13	80
drátky	Dramix RC 80/30 BP	60
Celkem		2673,25

Cement použitý pro zkoušení označený normovou zkratkou CEM I 42,5 R vyjadřuje jeho pevnostní třídu a vysokou počáteční pevnost. Běžně se o něm mluví jako o portlandském cementu a obsahuje pouze slínek, sádrovec a směs, která umožňuje regulovat jeho tvrdnutí. Jeho použití je nejvhodnější pro vysokohodnotné betony a velmi namáhané konstrukce. Díky velkým hodnotám hydratačního tepla, které vzniká při smíchání tohoto druhu cementu s vodou, je vhodný pro použití při zimních betonážích.

Kamenivo v betonu tvoří takzvanou kostru. Zároveň na druhu a vlastnostech použitého kameniva závisí jeho únosnost a modul pružnosti. Pro výrobu prostého betonu a drátkobetonu bylo použito běžně používané křemičité kamenivo. Pro výrobu vysokohodnotného betonu se zvolilo únosnější čedičové kamenivo.

Superplastifikátor byl použit ve formě tekutého přípravku a jeho hlavním úkolem bylo snížení množství záměsové vody a zlepšení zpracovatelnosti čerstvé směsi. Jeho pomocí došlo ke snížení vodního součinitele u směsí a tím došlo k zvýšení pevnosti následného ztvrdlého betonu.

Mikrosilika se použila pro UHPC ve formě jemného šedivého prášku, který sloužil hlavně pro vyplnění mezer mezi kamenivem a cementovými zrny a tím se dosáhlo zlepšení vlastností tranzitní zóny. Zároveň se snížila ztráta vody ve směsi a zlepšila se její zpracovatelnost. Mikrosilika urychluje hydrataci cementu během prvních stadií hydratace. Poskytuje krystalizační zárodky, díky nimž se mohou hydratační produkty z roztoků rychleji vysrážet [11].

Při výrobě drátkobetonu se použily drátky typu Dramix 80/30 BN a jsou zobrazeny na obrázku 3.2. Pro vysokohodnotný beton byly zvoleny drátky typu Dramix RC 80/30 BP. Tyto drátky mají vyšší únosnost než běžné drátky. Pro jejich odlišení se takové prvky vyrábějí ve zlaté barvě.



Obrázek 3.2: Drátky Dramix 80/30 BN

3.2 Výroba zkušebních těles

Pro výrobu záměsi byla použita míchačka ve zkušební laboratoři odpovídající normovým požadavkům, do které byly postupně přidávány jednotlivé složky uvedené v tabulkách

3.1. pro prostý beton, 3.2 pro drátkobeton a v tabulce 3.3 pro vysokohodnotný beton.

3.2.1 Postup výroby směsi:

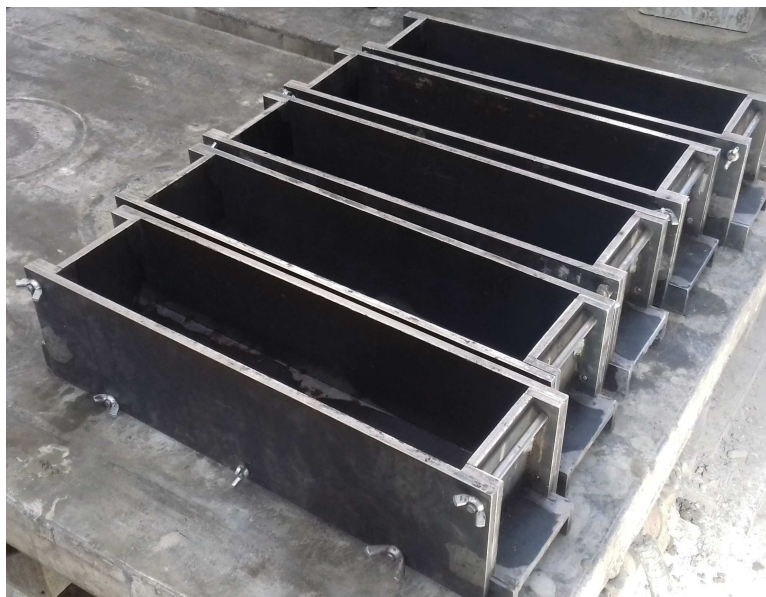
1. Do míchačky byly nejdříve nasypány frakce hrubého kameniva s cementem, míchačka byla zapnuta a jednotlivé složky se promísily.
2. Po uplynutí 30 s se do běžící míchačky přidaly jemné frakce kameniva. Během tohoto plnění bylo dbáno na sypání z malé výšky, aby bylo zabráněno nadměrnému prášení.
3. Výroba směsi pokračovala smícháním superplastifikátoru s vodou a přilitím této směsi do míchačky.
4. Pokud se jednalo o výrobu drátkobetonu nebo UHPC byly v tomto kroku do směsi přidáno předepsané množství drátků. Prostý beton se vyrobil bez drátků.
5. Během výroby betonu se míchačka zastavila a směs byla jednou ručně překontrolována pomocí zednické lžice, že došlo k úplnému promísení složek v bubnu míchačky.
6. Po dostatečném promísení se směs z míchačky vyjmula a začala se plnit do forem.

Jednotlivé druhy betonů se vyráběly stejným postupem, který je zde uveden. Jediný rozdíl při výrobě nastal v bodě 4. kdy došlo k přidání drátků do betonové záměsi.

Prvním vyrobeným betonem byl vysokohodnotný beton. S dvoutýdenním odstupem následovala výroba drátkobetonu. Poslední vyrobený byl prostý beton opět o dva týdny později.

3.2.2 Postup výroby těles:

Jako zkušební tělesa byly zvoleny trámce s normovými rozměry 400x100x100 mm. Pro jejich výrobu byly použity normou předepsané formy zobrazené na obrázku 3.3. Tyto formy jsou rozebíratelné vyrobené z oceli. Opět se pro všechny receptury zvolily shodné rozměry forem, aby bylo možné výsledky měření porovnat.



Obrázek 3.3: Formy pro výrobu trámek

1. Před použitím se formy vymazali tenkou vrstvou separačního prostředku, aby bylo zabráněno přilnutí směsi k bokům formy.
2. Následně došlo k plnění formy po $\frac{1}{3}$ výšky a jejich hutnění na vibračním stole, jak je ukázáno na obrázku [3.4](#).
3. Po naplnění forem se odstranil přebytečný beton a směs se uhladila. To je vyobrazeno na obrázku [3.5](#).
4. Nakonec byla tělesa označena a uložena na místo, kde bylo zabráněno jejich poškození.
5. Po uplynutí 24 hodin se trámky odbednily, odbedněné vzorky jsou na obrázku [3.6](#), a uložily se do vodní lázně kde byly ponechány 28 dní do doby, než se začaly zkoušet.

3.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES



Obrázek 3.4: Plnění forem směsí



Obrázek 3.5: Hotové naplněné formy betonovou směsí



Obrázek 3.6: Odbedňování trámek

Všechny trámečky ze všech směsí byly opět vyráběny stejným způsobem.

3.3 Zkouška pevnosti v tlaku

Pevnost betonu v tlaku je jednou ze základních charakteristik, kterou získáme při zatěžování tělesa až do meze porušení. Podle zkušebního tělesa se pevnosti rozdělují na válcovou pevnostech značenou $f_{ck,cyl}$ a krychelnou pevnost značenou $f_{ck,cube}$. Postup zkoušení je popsán v normě ČSN EN 12390-3:2009 [12].

Zkoušení se provádí ve stáří 28 dnů na válcích o rozměrech 300/150 mm nebo na krychlích o rozměrech 150/150/150 mm. Při zkouškách na rozdílných prvcích zjistíme, že krychelné pevnosti jsou vyšší než pevnosti na válcích. Tyto rozdíly jsou zobrazeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4: Pevnostní třídy betonu

Třída pevnosti v tlaku	Charakter. válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [MPa]	Charakter. krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [MPa]
C -/5		5
C -/7,5		7,5
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

Označení betonu se rozlišuje podle zařazení do pevnostních tříd značených například

3.3. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

C 20 / 25. Kde jednotlivé hodnoty popisují:

- C – označení betonu anglicky concrete
- 20 – hodnota charakteristické válcové pevnosti $f_{ck,cyl}$ [MPa]
- 25 - hodnota charakteristické krychelné pevnosti $f_{ck,cube}$ [MPa]

Jak je patrné i z názvů pevností jsou hodnoty uvedené v tabulce zkoušené na tělesech tvarů krychle a válce.

V našem případě byla zkouška prováděna na zkušebních hranolech a rozměrech 400/100/100 mm starých 28 dní. Před samotným zatěžováním se nejdříve otřely zkušební plochy lisu a ověřilo se, že byl odstraněn písek a jiné nečistoty z předešlého zkoušení. Zkušební tělesa se osušila a osadila do zkušebního zařízení dostředně a kolmo na směr ukládání betonu.

Po umístění tělesa do lisu se horní deska zkušebního zařízení přiblížila k hornímu povrchu trámku, a to z důvodu zkrácení doby náběhu síly před započítáním zkoušky. Osazení je zobrazeno na obrázku [3.7](#).



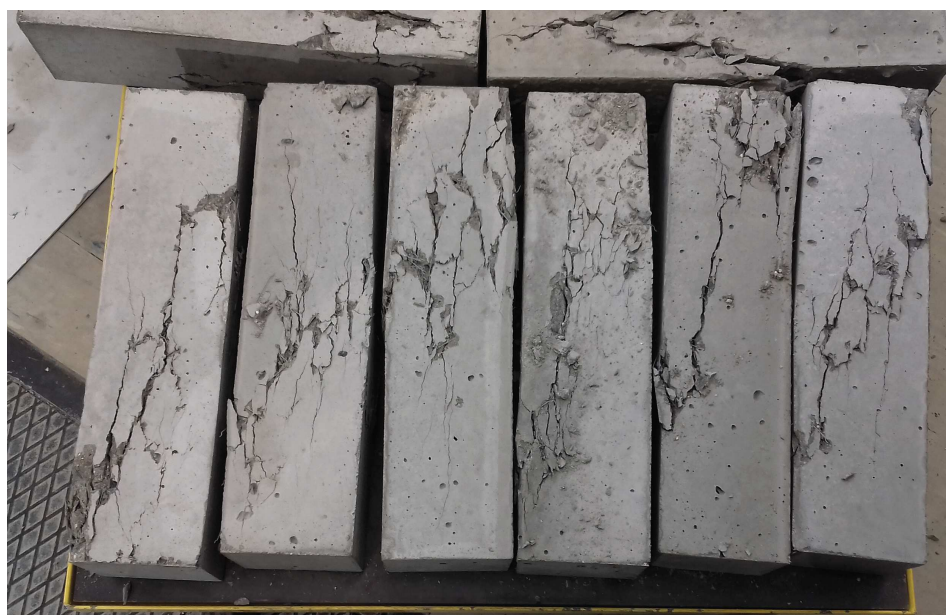
Obrázek 3.7: Umístění zkušebního vzorku v lisu

3.3. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

Pak se pokračovalo zatěžováním rychlostí $0,6 \pm 0,2$ MPa za sekundu. Po nastavení počátečního zatížení, které přibližně nebylo větší 30 % zatížení při porušení, se zatěžovalo plynule, bez nárazu, a nepřetržitě se zvyšovalo zatížení stanovenou konstantní rychlostí s přípustnou odchylkou ± 10 % až do porušení [12]. Během zkoušky docházelo k měření zatížení a vykreslování grafu v měřicím zařízení. Porušené vzorky jsou zobrazeny na obrázku 3.8 a 3.9.



Obrázek 3.8: Porušené vzorky z UHPC



Obrázek 3.9: Porušené vzorky z drátkobetonu

Pevnost betonu se stanovila vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

f_c - pevnost betonu v tlaku [MPa]

F - maximální zatěžovací síla při porušení [N]

A_c - průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení [mm²]

3.4 Zkouška modulu pružnosti v tlaku

Zkoušení betonu v tlaku je nejběžnější používaná zkouška při zjišťování modulu pružnosti na základě Hookova zákona. Používá se pro zjištění statického modulu pružnosti a jsou udány dva postupy zkoušek k jeho změření. První je stanoven v normě ČSN ISO 1920-10. Druhý postup popisuje norma ČSN EN 12390-13.

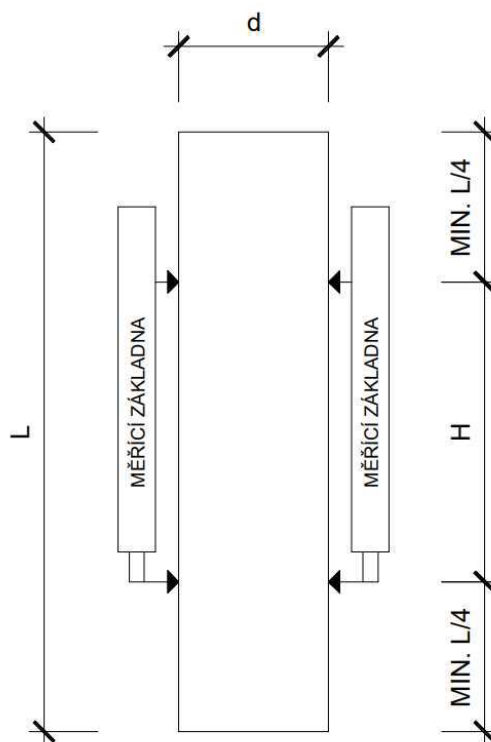
Obě zkoušky se provádí v lise odpovídajícímu normovým podmínkám v ČSN EN 12390-3. Lis použitý při zkouškách je zobrazen na obrázku [3.10](#). Při umístění vzorku do lisu se dbá na jeho uložení kolmo ke směru plnění a na dostředném uložení k zatěžovacím plochám lisu.

3.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU



Obrázek 3.10: Zkušební lis

Před umístěním zkušebního tělesa do lisu, je na něj instalováno snímací zařízení na svislé protilehlé plochy. Měřicí zařízení musí být osazeno tak aby mělo od obou konců tělesa stejnou vzdálenost. Tato vzdálenost je minimálně $L/4$ a zároveň měřená vzdálenost mezi nimi musí být minimálně $2/3$ průměru tělesa d a zároveň nesmí přesáhnout hodnotu d . Osazení měřicího zařízení je zobrazeno na obrázku 3.11. Přesnost měření nesmí být nižší než $\pm 5 \times 10^{-6}$.



Obrázek 3.11: Schéma umístění měřicího zařízení

Před zkouškou modulu pružnosti se provede zkouška pevnosti v tlaku na minimálně třech vzorcích shodných se vzorky určených pro zkoušku modulu pružnosti. Po změření pevností těchto těles dostaneme hodnoty srovnávací pevnosti v tlaku f_c . Ty se získají jako aritmetický průměr.

Následně vypočítáme horní zatěžovací mez σ_a jako 1/3 ze srovnávací pevnosti:

$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} \quad (3.2)$$

kde

σ_a - horní zatěžovací mez [MPa]

f_c -srovnávací pevnost v tlaku [MPa]

3.4.1 Postup zkoušky podle normy ČSN ISO 1920-10

Tento postup je základním a nejznámějším zatěžovacím postupem.

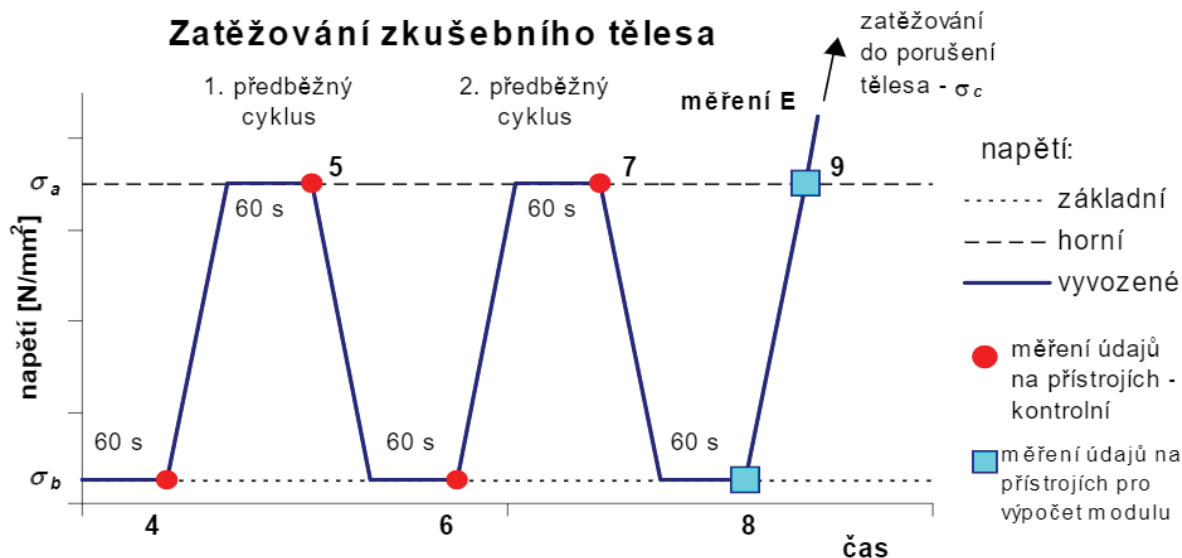
3.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Při zkoušce jsou trávky uloženy centricky do lisu s nainstalovaným měřicím zařízením a vyvodí se základní napětí σ_b o velikosti 0,5 MPa. Odečtou se první naměřené hodnoty. Následně probíhá plynulý nárůst napětí každou sekundu o hodnotu v rozmezí $0,6 \pm 0,4$ MPa až do dosažení mezní hodnoty σ_a . Toto maximální napětí se udržuje po dobu 60 s. Zkoušení pokračuje 30 s pro odečtení naměřených hodnot ze snímacího zařízení a kontrolou případných odlišností. V případě neshod průměrných hodnot o více než 20 % norma udává nutnost těleso v lisu znovu vycentrovat a celý předešlý postup zopakovat. V případě, že se vzorek vycentrovat nepodaří je toto těleso ze zkoušky vyřazeno.

Po vycentrování těles se ve zkoušce pokračuje cyklickým zatěžováním z hodnoty σ_b na hodnotu σ_a v intervalech 60 s se stejnými rychlostmi zatěžování a odtěžování jako na začátku zkoušky. Tento cyklus se opakuje dvakrát pro každé těleso.

Po ukončení zatěžování se na vzorku sníží napětí na hodnotu σ_b na dobu 60 s, poté dojde během 30 s k odečtení hodnot poměrného přetvoření ϵ_b . Napětí na vzorku se následně zvýší na mezní napětí σ_a na dobu 60 s a následně se odečte přetvoření ϵ_a během 30 s.

Konec zkoušky probíhá odstraněním měřicího zařízení ze vzorku a jeho zatížením až do doby jeho porušení. Celý průběh zkoušky je vyobrazen na obrázku 3.12. Následně se zkontroluje hodnota naměřené pevnosti se srovnávací pevností f_c , jestli nedošlo k odchylce větší než 20 %.



Obrázek 3.12: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušební tělesa

Z naměřených hodnot se statický modul pružnosti spočítá následovně:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b} \quad (3.3)$$

kde

σ_a - horní zatěžovací napětí [MPa]

σ_b - dolní zatěžovací napětí [MPa]

ϵ_a - průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]

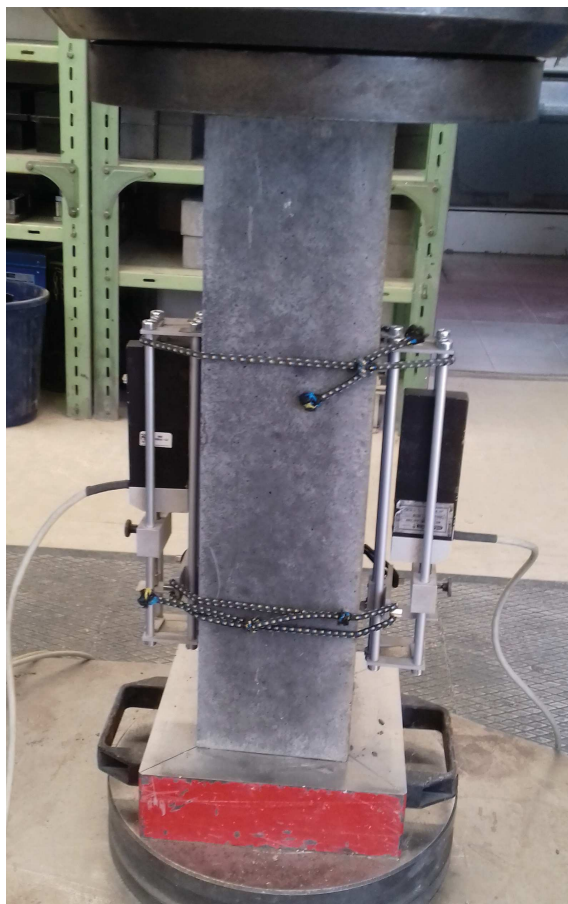
ϵ_b - průměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-]

Výsledná hodnota se zaokrouhlila na nejbližší hodnotu 0,5 MPa při hodnotách nad 10 MPa a na nejbližší hodnotu 0,1 MPa při hodnotách pod 10 MPa. Tím jsme získali modul pružnosti sečnový.

3.4.2 Postup zkoušky podle normy ČSN EN 12390-13

Tato norma rozděluje postup měření na metodu A a B. Postup popsáný v metodě A byl zvolen pro námi zjišťovaný sečnový modul pružnosti.

Nejdříve došlo k změření a vypočtení horní zatěžovací meze σ_a jak již bylo popsáno dříve. Poté byla zbylá tělesa postupně nejdříve osazena měřícím zařízením a poté vložena do lisu, jak je vidět na obrázku [3.13](#).



Obrázek 3.13: Těleso osazené měřícím zařízením v lisu

Při zatěžování se postupovalo podle metody A. Nejdříve se těleso zatížilo třemi předběžnými cykly kvůli ověření dostředného umístění vzorku a stabilního umístění měřícího zařízení.

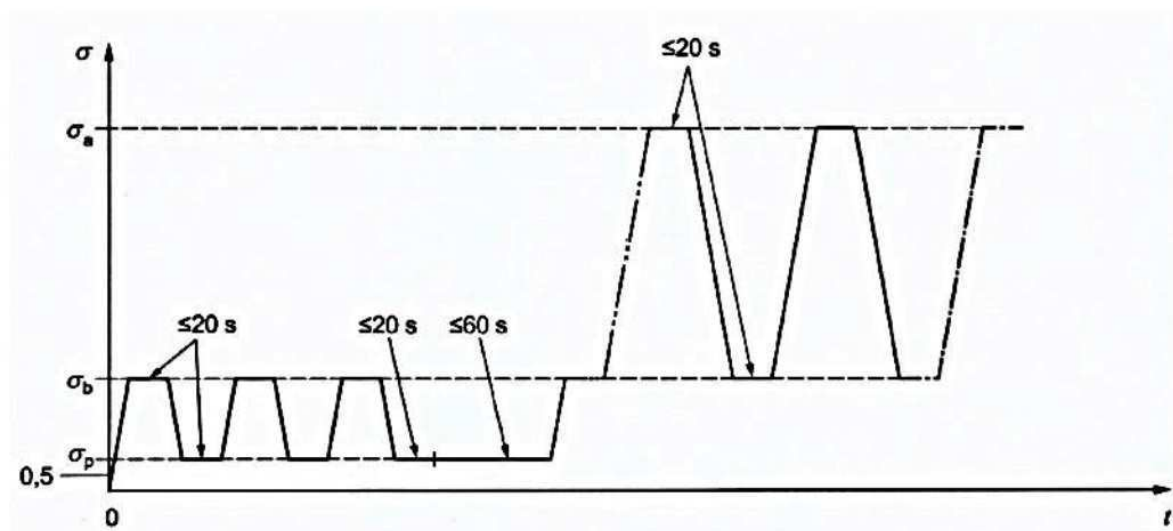
Toto zatěžování probíhalo rychlostí $0,6 \pm 0,2$ MPa/s od hodnoty napětí σ_p , které dosahovalo hodnot 0,5 MPa, k hodnotě napětí σ_b , jejíž hodnota byla $0,1 - 0,15 f_c$. Během prvního zatěžování se změřilo napětí σ_b . Následně došlo k odtížení na původní hodnotu σ_p . Zatížení se opakovalo ve třech cyklech. V jednotlivých fázích se udržovalo napětí po dobu menší než 20 s. Po skončení těchto cyklů se změřila deformace ϵ_b .

V zatěžování se postupovalo po uplynutí 80 s od skončení posledního odtěžení na hodnotu σ_p a napětí se zvedlo na hodnotu σ_a opět rychlostí $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, která odpovídala hodnotě $1/3 f_c$. Napětí se udržovalo po dobu menší než 20 s a následovalo odtížení na hodnotu σ_b . Postup se opakoval ve třech zatěžovacích cyklech.

Během zatěžování se měřily hodnoty deformace $\epsilon_{a,1}$ při prvním cyklu na hodnotě napětí σ_a a při třetím cyklu $\epsilon_{a,3}$. Při druhém cyklu se změřila hodnota deformace $\epsilon_{b,2}$

3.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

při hodnotě napětí σ_b . Postup zkoušky je zobrazen na obrázku 3.14.



———— - zatěžovací cyklus

— · — - cyklus pro stanovení počátečního sečnového modulu pružnosti

— · — - cyklus pro stanovení sečnového modulu pružnosti

σ_a - horní zatěžovací napětí $1/3$ z max. pevnosti f_c [MPa]

σ_b - dolní zatěžovací napětí $0,1-0,15f_c$ [MPa]

σ_p - základní zatěžovací napětí $0,5$ [MPa]

Obrázek 3.14: Schéma zatěžování

Nakonec se z hranolů odstranila měřidla pro modul pružnosti a vzorky se zatěžovaly až do meze porušení. To je zobrazeno na obrázku 3.15. Pak se ověřila maximální odchylka od f_c , která činí maximálně 20 %.

3.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU



Obrázek 3.15: Porušené vzorky při zatížení tlakem

Z naměřených hodnot se dá spočítat sečnový modul pružnosti následovně:

$$E_{c,0} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_{a,1} - \epsilon_{b,0}} \quad (3.4)$$

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_s} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\epsilon_{a,3} - \epsilon_{p,2}} \quad (3.5)$$

kde

σ_a - horní zatěžovací napětí [MPa]

σ_p - zatěžovací napětí 0,5 [MPa]

σ_b - dolní zatěžovací napětí [MPa]

ϵ_a - průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]

ϵ_p - průměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-]

ϵ_b - průměrné přetvoření při dolním zatěžovacím napětí [-]

3.5 Zkouška modulu pružnosti impulzní metodou

Pomocí ultrazvukové impulsivní metody se měří rychlost šíření vln potřebná pro stanovení dynamického modulu pružnosti betonu. Postup měření je popsán v normě ČSN 73 1371.

Tato metoda se používá pro ověření stejnorodosti a pevnosti zkoušených materiálů. Z naměřených veličin se zjistí nepřímé hodnoty fyzikálně mechanických vlastností.

Samotná zkouška se provádí pomocí ultrazvuku, který používá k měření ultrazvukové impulzy. Výsledkem je změření potřebné doby pro průchod těchto impulzů skrz zkoušený materiál mezi budičem na jedné straně a snímačem na opačné straně betonu.

Impuls podélných vibrací je vyvolán elektroakustickým budičem, který je osazen na ploše zkoušeného betonu. Po průchodu známou délkou dráhy v betonu impuls vibrací je přeměřen na elektrický signál snímačem a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu [9].

Celé zařízení se skládá z několika propojených částí. Hlavní je elektrický generátor, který generuje impulsy. Další částí jsou sondy neboli budiče a snímače, které vysílají a přijímají impulsy procházející materiálem. Zařízení je zobrazeno na obrázku 3.16. Jejich pracovní kmitočty se musí pohybovat v rozsahu od 20 kHz do 150 kHz s přesností doby průchodu s přípustnou odchylkou $\pm 0,1 \mu s$ s přesností 2 % [9].



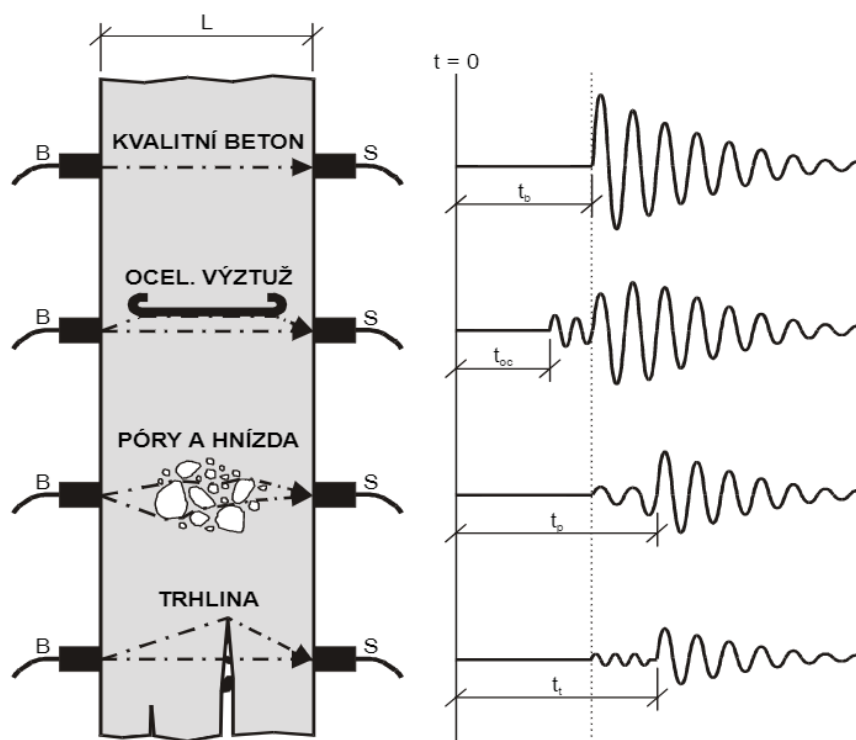
Obrázek 3.16: Ultrazvuk

Při výpočtu modulu pružnosti může dojít k ovlivnění měření. Proto je třeba dbát zvýšené opatrnosti na vlhkost, která ovlivňuje rychlost šíření impulsu. Největší rozdíly při měření vyvolá rozdílné ošetřování těles, které způsobuje rozdílnou hydrataci.

3.5. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

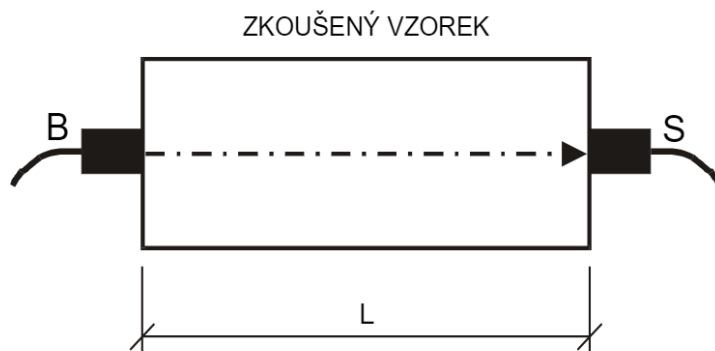
Rychlost vlny, při které projde materiálem je závislá na modulu pružnosti a hutnosti materiálu. To znamená, že jsou ovlivněny použitým kamenivem a jeho množstvím, vlastnostmi a složením cementové směsi. Stejně tak je zásadní pro rychlost šíření impulsu použitý vodní součinitel směsi.

Další možné ovlivnění měření způsobují trhliny a dutiny v betonu. Pokud jsou tyto poruchy větší, než jsou sondy, vzniká překážka pro přímý ultrazvukový impuls. Při měření tak dojde k prodloužení doby průchodu vln, jelikož se impuls šíří pouze okolo dutiny, a ne přes ní. Zároveň se dají tímto způsobem poruchy odhalit. Způsob změny šíření vln je vidět na obrázku 3.17.



Obrázek 3.17: Vliv prostředí na rychlost šíření impulsu

Před prováděním samotné zkoušky byl ultrazvuk nejprve zkalibrován na zkušebním válci se známým časovým průchodem. Pak následovala samotná zkouška na trámcích. Na nich byla zvolena místa pro provedení měření, ta se následně očistila. Na zvolená místa pro měření se přiložily snímací sondy ultrazvuku, jejichž konce se potřeli vrstvou sonogelu pro zlepšení průchodu signálu mezi sondami a materiálem. Budič a snímač byly k betonu přitlačeny a následně byl vyslán signál jehož průchod se změřil. Způsob použití je zobrazen na obrázku 3.18.



Obrázek 3.18: Postup použití ultrazvuku

Námi zvolený ultrazvuk rychlost průchodu u všech vzorků zaznamenal. Proto nebylo nutné tuto rychlost počítat. Pro objasnění měření je její stanovení následující:

$$v_L = \frac{L}{t} \quad (3.6)$$

v_L - rychlost šíření impulsu [km/s]

L - délka měřicí základny [mm]

t - čas, který potřebný k průchodu [μs]

Získaná hodnota se vyjádří na nejbližší 0,01 km/s. Po získání této rychlosti se může přistoupit k výpočtu dynamického modulu pružnosti. Ten se pak stanoví jako:

$$E_{cu} = \rho v_L^2 \frac{1}{k^2} 10^{-6} \quad (3.7)$$

E_{cu} - dynamický modul pružnosti betonu [MPa]

ρ - objemová hmotnost betonu [kg/m^3]

v_L - rychlost šíření impulsu [km/s]

k - součinitel rozměrnosti prostředí [-]

Podle normy se hodnoty součinitele k stanoví podle:

$$k_1 = 1 \quad (3.8)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \mu_{cu}^2}} \quad (3.9)$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \mu_{cu}}{(1 - \mu_{cu})(1 - 2\mu_{cu})}} \quad (3.10)$$

μ_{cu} - poissonův součinitel [-]

Součinitel k_1 je určen pro jednorozměrné prostředí, k_2 se určuje pro dvourozměrné prostředí a k_3 se stanovuje u třírozměrného prostředí.

3.6 Zkouška modulu pružnosti rezonanční metodou

Každý existující prvek má svoji vlastní frekvenci, kterou vyvolávají vnější podněty. Pokud takový vnější podnět dosáhne hodnoty kmitočtu shodné s hodnotou vlastního kmitočtu materiálu dojde k takzvané rezonanci. Při tomto jevu dojde k nárůstu kmitočtu na maximum.

Principem této zkoušky je změření vlastních frekvencí zkoušených betonových prvků. Pomocí těchto veličin se následně dají vypočítat určité mechanické vlastnosti daného materiálu. Postup pro jejich změření a zhodnocení je uveden v normě ČSN 73 1372.

Zkušební těleso musí odpovídat svojí délkou nejméně dvojnásobku delší strany základny při provádění zkoušek na trámcích. Pokud se zkouška provádí na válcích musí být jejich délka minimálně dvojnásobku průměru základny.

Při zkoušení musí být těleso uloženo na podložku, která neomezuje v pohybu při kmitání a zároveň jeho vlastní frekvence jsou v jiném rozsahu a tím neovlivňují výsledky měření. Nejčastěji se jako materiál pro podložku používá guma.

Během měření je používán rezonanční přístroj, který vysílá do zkoušeného betonu mechanický kmitočet pomocí budiče a výsledky snímá pomocí snímače. Frekvence vysílané přístrojem jsou v rozmezí mezi 30 Hz a 30 000 Hz, kterou lze podle potřeby ladit. Měří se hodnoty získané odezvou na vysílaný kmitočet a zobrazuje amplitudu kmitání vzorku s minimální přesností ± 1 %. Během měření se získávají veličiny rezonanční frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání.

3.6. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU

Při zkoušení podélného kmitání je těleso uloženo na podložku v polovině své délky a sondy se ke vzorku přiloží na boční strany tak jak je zobrazeno na obrázku 3.19. Z měření doby průchodu při zkoušce ultrazvukem získáme první odhad kmitočtu f_l . Následně hledáme okolo této hodnoty námi požadovanou hodnotu rezonance. Tento kmitočet odpovídající rezonanci pak slouží pro výpočet modulu pružnosti E_{crl} :

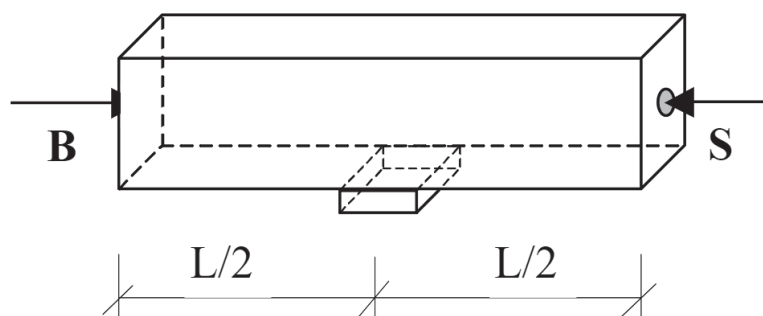
$$E_{crl} = 4L^2 f_l^2 \rho \quad (3.11)$$

E_{crl} - dynamický modul pružnosti betonu v tlaku při podélném kmitání [MPa]

L - délka vzorku [m]

f_l - vlastní frekvence podélného kmitání [kHz]

ρ - objemová hmotnost betonu [kg/m^3]



Obrázek 3.19: Zkouška podélného kmitání

Dalším způsobem kmitání je příčné. Jeho uložení je zobrazeno na obrázku 3.20. Sondy se přiloží na kraje vzorku ke kratším hranám tělesa v jeho ose. Při této zkoušce je možné provést i zkoušku krouťivého kmitání. To lze jen v případě použití podložky, která neovlivní výsledky měření. Z naměřených hodnot vlastního kmitočtu vypočítáme modul pružnosti E_{crf} :

$$E_{crf} = 0,0789c_1 L^4 f_f^2 \rho \frac{1}{i^2} \quad (3.12)$$

kde

E_{crf} - dynamický modul pružnosti betonu v tlaku při příčném kmitání [MPa]

3.6. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU

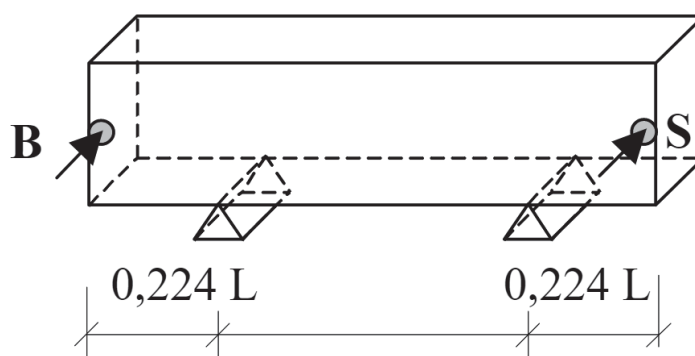
c_1 - korekční součinitel zahrnující vliv smyku a setrvačnosti [-]

L - délka vzorku [m]

f_f - vlastní frekvence příčného kmitání [kHz]

ρ - objemová hmotnost betonu [kg/m³]

i - poloměr setrvačnosti příčného řezu vzorku k ose kolmé na rovinu kmitání [m]



Obrázek 3.20: Zkouška příčného kmitání

Poslední možností měření je kroutivé kmitání. Vzorek se opět uloží v polovině své délky a sondy se přiloží do protilehlých vzdálenějších rohů, jak je zobrazeno na obrázku 3.21. Tímto měřením dostaneme hodnoty pro výpočet modulu pružnosti ve smyku G_{cr} :

$$G_{cr} = 4kL^2 f_t^2 \rho \quad (3.13)$$

kde

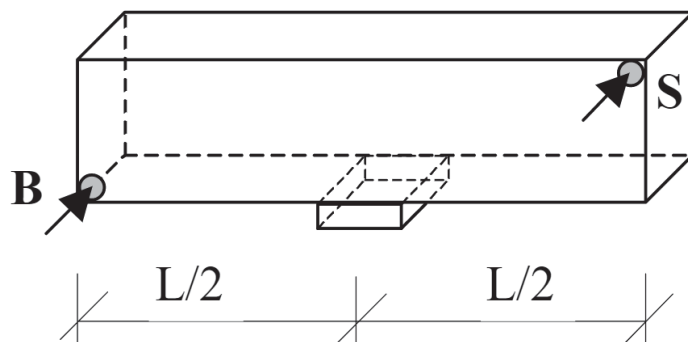
G_{cr} - dynamický modul pružnosti betonu v tlaku při příčném kmitání [MPa]

k - součinitel závislý na tvaru průřezu [-]

L - délka vzorku [m]

f_t - vlastní frekvence kroutivého kmitání [kHz]

ρ - objemová hmotnost betonu [kg/m³]



Obrázek 3.21: Zkouška kroutivého kmitání

Poměry prvních vlastních kmitočtů jsou v normě uvedeny v následující tabulce 3.5. Tyto hodnoty jsou vytvořeny pro beton $\nu = 0,20$.

Tabulka 3.5: Poměry vlastních kmitočtů hranolu

Poměry velikostí hran hranolů	Poměry kmitočtů	
	$f_l : f_t : f_f$	$f_f : f_{f2}$
1 : 1 : 3	1 : 0,59 : 0,52	1 : 2,1319
1 : 1 : 4	1 : 0,59 : 0,43	2 : 2,2667
1 : 1 : 4,67	1 : 0,59 : 0,38	3 : 2,3381
1 : 1 : 5	1 : 0,59 : 0,36	4 : 2,3683

Pokud je těleso homogenní, spočítané hodnoty podélného a příčného kmitání by měly vyjít téměř totožné. Materiál jako homogenní lze určit, pokud je rozdíl mezi těmito hodnotami E_{crl} a E_{crf} menší než 10 %.

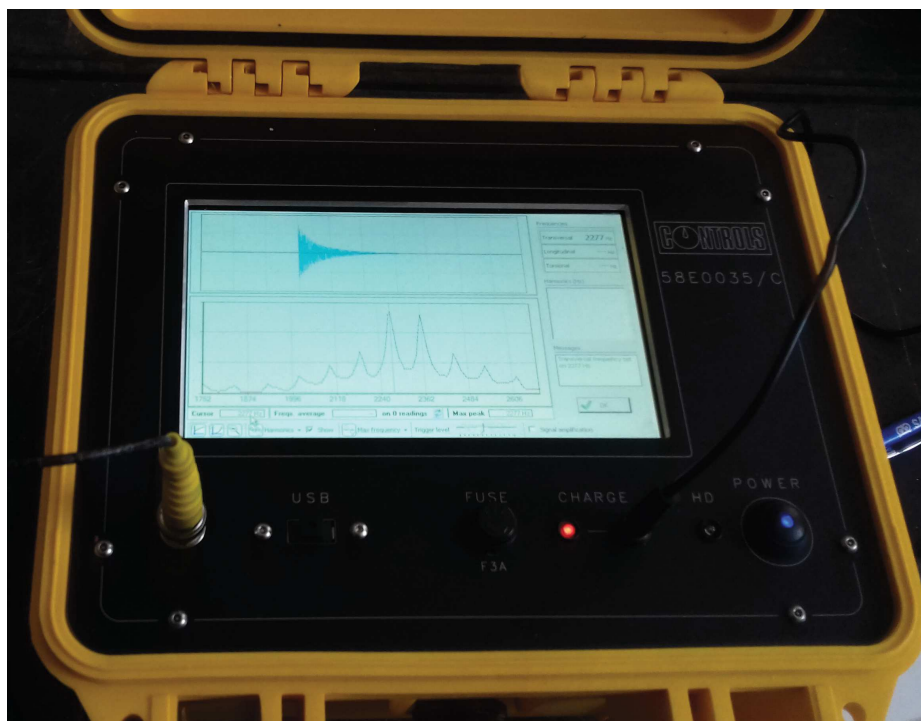
Před zahájením zkoušky bylo nutné si jednotlivá trámky zvážit a změřit s přesností 1 mm na délku vzorku a 0,1 mm pro výšku a šířku vzorku. Ze změřených veličin se vypočítala jejich objemová hmotnost.

Těleso se před zkouškou položilo na odpovídající podklad, který nebránil vzorku v kmitání a nezasahoval svým vlastním kmitáním do průběhu zkoušky. Uložení vzorku i s rezonančním přístrojem je zobrazeno na obrázku 3.22. Následně se k němu připevnily měřicí sondy v místech, kde byl předpokládán vhodný vnik hledaného kmitání a kde byl předpoklad vniku maximálních amplitud. Do požadovaného kmitočtu se trámek uvedl plynulou změnou kmitání pomocí oscilátoru v místě s předpokládaným vznikem rezonance. Na indikačním přístroji byl sledován vývoj kmitání až do vniku požadované rezonance. Ta je zobrazena na obrázku 3.23.

3.6. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU



Obrázek 3.22: Uložení vzorku na podložku a rezonanční přístroj



Obrázek 3.23: Záznam rezonanční zkoušky

Kapitola 4

Vyhodnocení výsledků zkoušek

V následující kapitole jsou popsány a zhodnoceny naměřené výsledky zkoušek popsaných v předešlé kapitole na zvolených druzích betonu. Výroba těles se uskutečnila v třech termínech pod odborným vedením Ing. Josefa Fládra, Ph.D v betonářských laboratořích ČVUT, kdy v každém termínu proběhla výroba konkrétní betonové záměsi. Výroba daných směsí probíhala jednou za čtrnáct dní.

Cílem této práce bylo posoudit moduly pružnosti jednotlivých druhů betonu a zhodnotit je. Pro jeho ověření se zkoušky provedly na třech druzích betonů za pomoci třech rozdílných způsobů zkoušek.

Výsledky jednotlivých zkoušek mohly být ovlivněny prostředím v laboratoři. Aby se zabránilo možným výkyvům je normou stanovena teplota 20 ± 2 °C a požadovaná relativní vlhkost vzduchu minimálně 50 %. Jednotlivé zkoušky byly prováděny na trámcích o rozměrech 400/100/100 mm provedených ve stáří 28 dnů. Postup výroby jednotlivých záměsí a výroby zkušebních těles je popsán v předchozích kapitolách 3.1 Složení zkušební směsi a 3.2 Výroba zkušebních těles.

Před jednotlivými zkouškami byly u trámek změřeny jednotlivé rozměry na třech místech a stanoven jejich aritmetický průměr s přesností na dvě desetinná místa. Poté následovalo jejich zvážení s přesností na celé gramy.

První provedenou zkouškou byla zkouška impulzní metodou provedená na polovině zkušebních vzorků, které pak byly určeny pro zkoušení pevnosti v tlaku. Poté se na zbylých tělesech opět provedla zkouška ultrazvukem následovaná zkouškou rezonance. Měření se zakončilo na těchto tělesech zkouškou modulu pružnosti v tlaku a jejich konečným rozdrčením.

4.1 Zkouška pevnosti v tlaku

Tato zkouška spadá do destruktivních zkoušek a sloužila jako srovnávací pro následné vyhodnocování výsledků. Z těchto hodnot byla stanovena horní mez napětí pro stanovení modulů pružnosti v tlaku σ_a .

Postup provádění zkoušky je popsán v kapitole 3.3 Zkouška pevnosti v tlaku. Při tomto měření se těleso zatěžovalo až do meze porušení.

V grafech 4.1, 4.2, 4.3 jsou zobrazeny celkové výsledky pevnosti v tlaku stanovené podle normy ČSN EN 12390-3:2009. V jednotlivých grafech jsou porovnány výsledky provedené vždy na deseti zkušebních tělesech z jednotlivých betonových záměsí.

Změřené rozměry, hmotnosti a objemové hmotnosti prostého betonu jsou uvedeny v tabulce 4.1 a zároveň jsou pro názorné zobrazení vykresleny dosažené maximální pevnosti těles na obrázku 4.1.

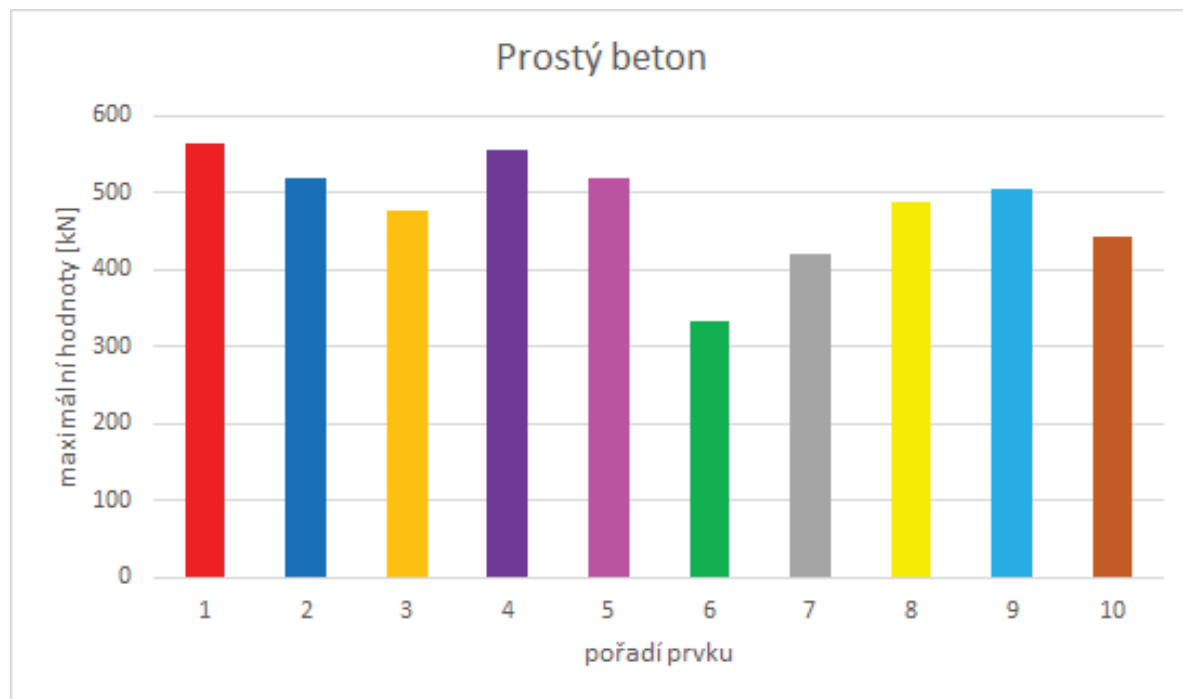
Jednotlivé hodnoty získané při vážení, měření rozměrů, vypočítané objemové hmotnosti a hodnot z tlakové zkoušky drátkobetonu jsou uvedeny v tabulce 4.2 a také jsou pro názornost vykresleny na obrázku 4.2.

Naměřené hodnoty hmotnosti, rozměrů, objemové hmotnosti a hodnot získaných při zkoušce v tlaku získaných na trámcích z vysokohodnotného betonu jsou popsány v tabulce 4.3 a názorné vykreslení tlakových pevností je zobrazeno na obrázku 4.3.

Tabulka 4.1: Rozměry zkoušených těles ze směsi prostého betonu

Číslo vzorku	Označení tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem hmot. kg/m^3	Tlak síla kN
		Délka	Šířka	Výška			
		mm	mm	mm			
PB	1	100,22	99,98	400	9575	2389	565,91
PB	2	99,93	96,34	400	9250	2402	520,42
PB	3	100,26	96,97	400	9290	2389	477
PB	4	100,3	98,06	400	9345	2375	556,49
PB	5	100,03	98,15	400	9320	2373	519,42
PB	6	99,93	99,08	400	9315	2352	334,47
PB	7	100,57	98,32	400	9360	2366	421,39
PB	8	100,25	99,41	400	9445	2369	487,65
PB	9	100,15	96,45	400	9260	2397	503,96
PB	10	99,62	99,31	400	9410	2378	443,08
Průměr						2379	482,98

4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

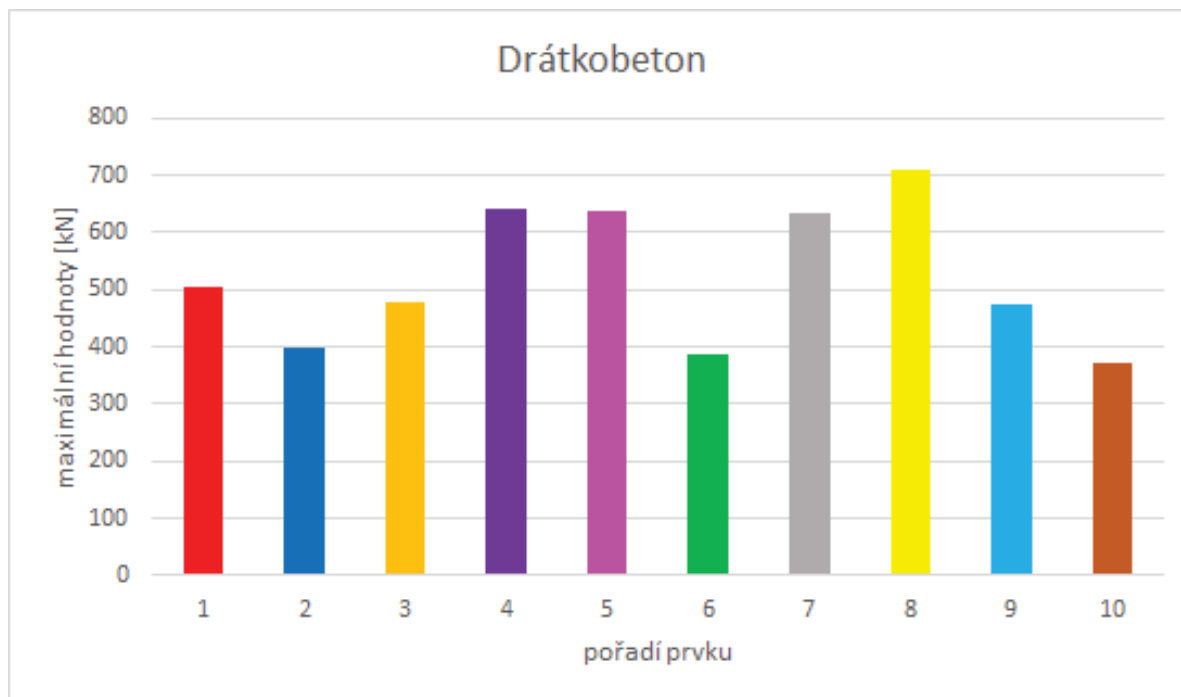


Obrázek 4.1: Souhrnné výsledky prostého betonu v tlaku

Tabulka 4.2: Rozměry zkoušených těles ze směsi drátkobetonu

Číslo vzorku	Označení tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem hmot. kg/m^3	Tlak síla kN
		Délka	Šířka	Výška			
		mm	mm	mm			
FRC	1	99,90	99,92	400,0	9785,0	2451	504,73
FRC	2	99,89	99,97	400,0	9695,0	2427	398,66
FRC	3	99,72	100,83	400,0	9815,0	2440	478,80
FRC	4	99,36	99,05	400,0	9450,0	2401	643,41
FRC	5	100,30	99,14	400,0	9710,0	2441	638,14
FRC	6	100,31	100,81	400,0	9765,0	2414	387,62
FRC	7	100,36	100,69	400,0	9905,0	2450	633,52
FRC	8	99,96	99,48	400,0	9820,0	2469	710,17
FRC	9	100,67	98,34	400,0	9640,0	2434	474,84
FRC	10	100,19	98,44	400,0	9605,0	2435	371,66
Průměr						2436	524,15

4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

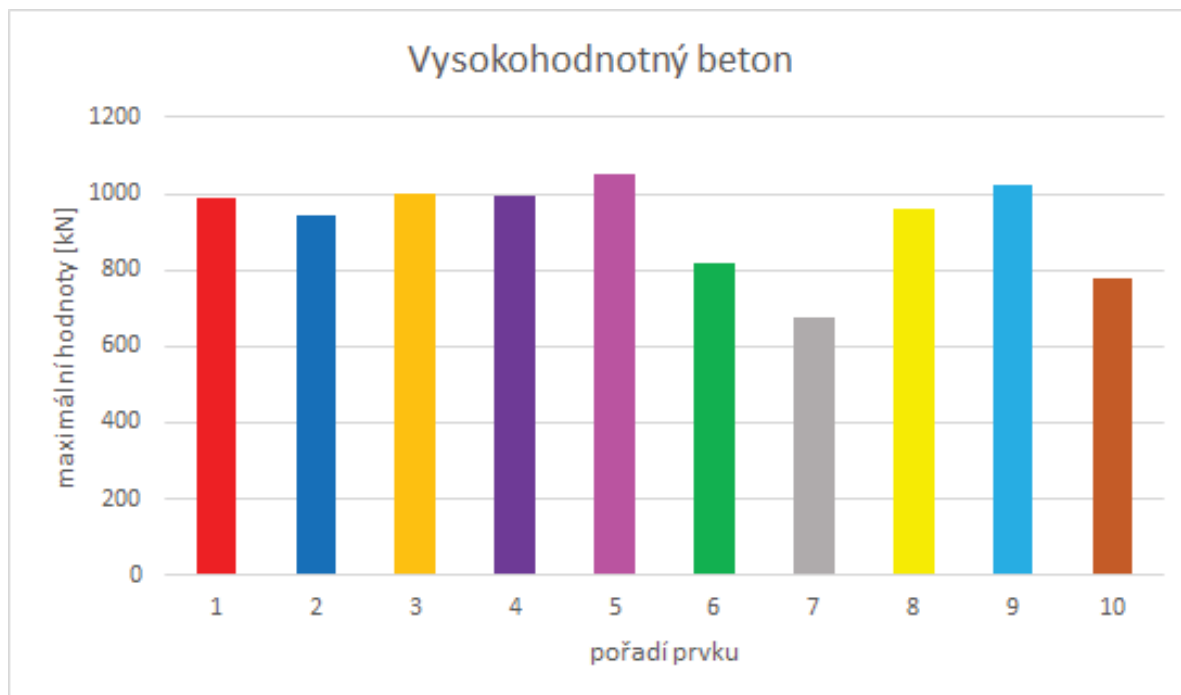


Obrázek 4.2: Souhrnné výsledky drátkobetonu v tlaku

Tabulka 4.3: Rozměry zkoušených těles ze směsi vysokohodnotného betonu

Číslo vzorku	Označení tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem hmot. kg/m^3	Tlak síla kN
		Délka	Šířka	Výška			
		mm	mm	mm			
UHPC	1	100,44	96,31	400,0	10425,0	2694	987,88
UHPC	2	100,03	95,37	400,0	10255,0	2687	944,50
UHPC	3	100,64	96,97	400,0	10490,0	2687	999,87
UHPC	4	100,17	97,74	400,0	10500,0	2681	992,53
UHPC	5	100,08	97,25	400,0	10410,0	2674	1052,49
UHPC	6	100,28	95,55	400,0	10325,0	2694	819,81
UHPC	7	100,10	97,56	400,0	10525,0	2694	677,40
UHPC	8	100,45	97,17	400,0	10435,0	2673	957,69
UHPC	9	99,86	97,73	400,0	10500,0	2690	1020,60
UHPC	10	99,38	96,00	400,0	10225,0	2679	779,93
Průměr						2685	923,27

4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU



Obrázek 4.3: Souhrnné výsledky vysokohodnotného betonu v tlaku

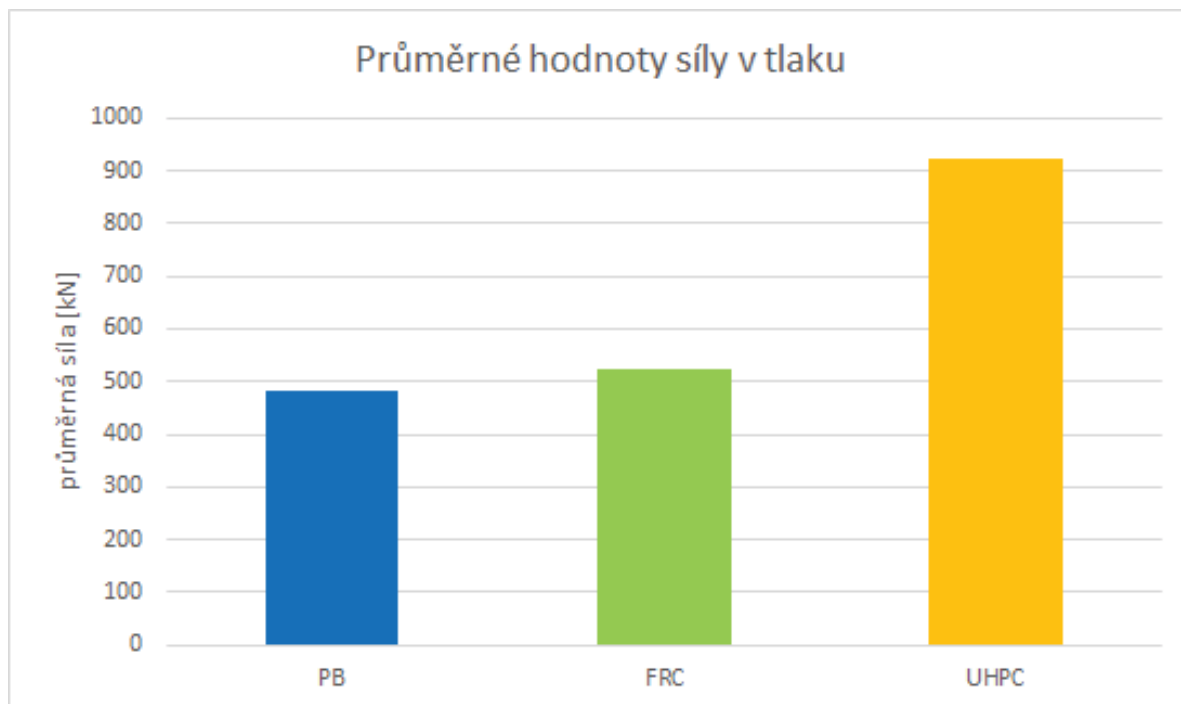
Hodnoty délek uvedených v tabulkách 4.1, 4.2, 4.3 byly vyhotoveny z průměrů změřených na tělesech ve třech místech daného rozměru. Z těchto rozměrů a hmotností jednotlivých těles byla zjištěna objemová hmotnost, která splňuje předpoklady nejnížší hmotnosti pro prostý beton a nejvyšší pro vysokopevnostní beton.

Pro přehlednost výsledků byly hodnoty naměřených zatěžovacích sil a pevností zprůměrovány a zobrazeny v tabulce 4.4 a vykresleny do následujících grafů 4.4 a 4.5.

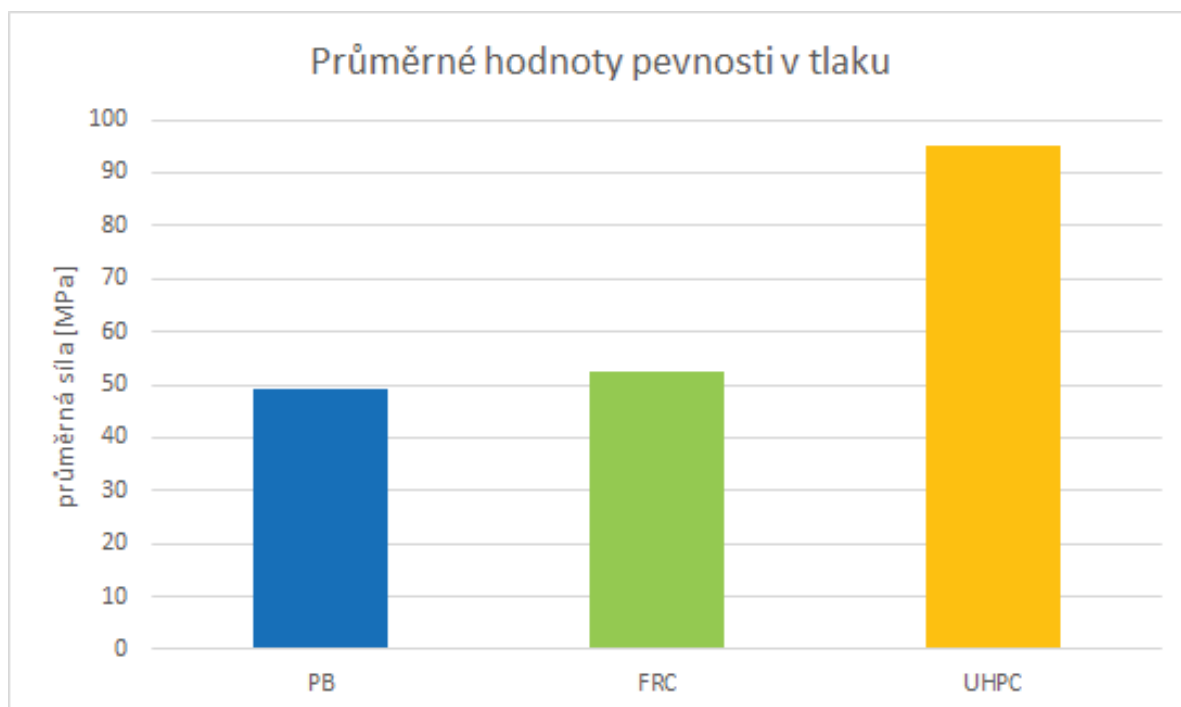
Tabulka 4.4: Průměrné hodnoty naměřené pro jednotlivé druhy betonů při zkoušce v tlaku

Označení	Síla	Pevnost
	kN	MPa
PB	482,98	49,14
FRC	524,15	52,57
UHPC	923,27	95,25

4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU



Obrázek 4.4: Souhrnné výsledky zatěžovacích sil při zkoušce v tlaku



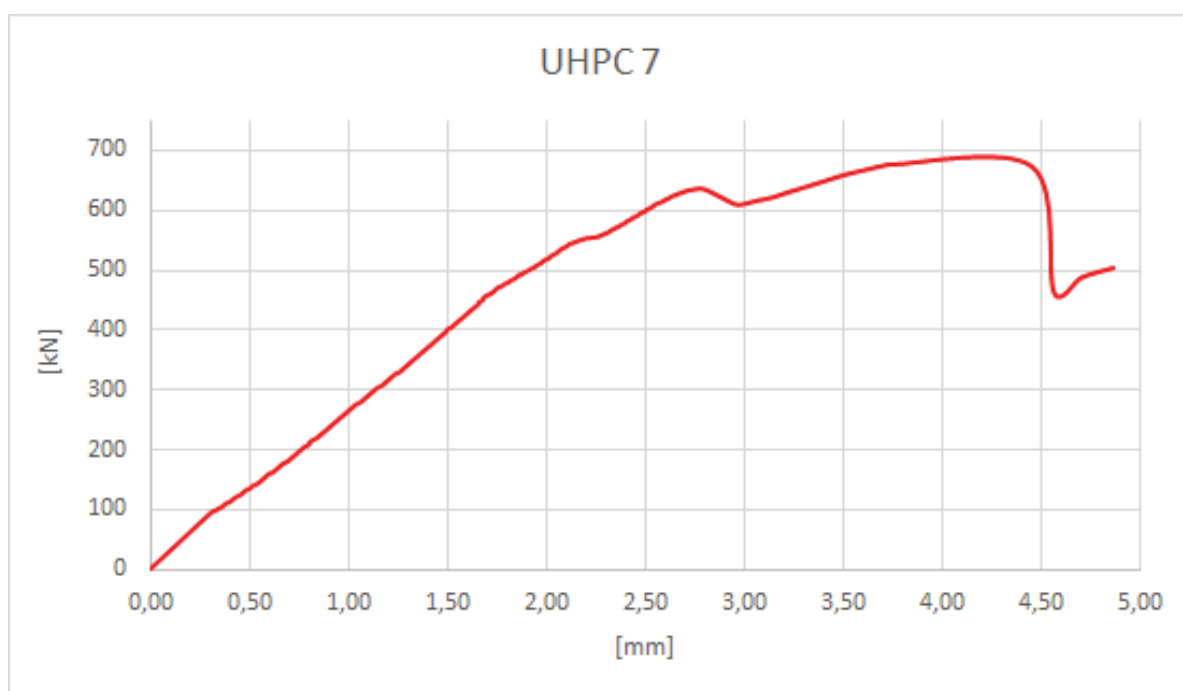
Obrázek 4.5: Souhrnné výsledky pevností při zkoušce v tlaku

Na grafech 4.4 a 4.5 jsou vidět potvrzené předpoklady rostoucí pevnosti, kde prostý

4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

beton má nejmenší výsledky a vysokohodnotný beton dosahuje hodnot nejvyšších. Zároveň je zde vidět, že drátkobeton převyšuje svými hodnotami prostý beton pouze o malou hodnotu. To je způsobeno přibližně stejným složením s výjimkou použité výztuže v drátkobetonu.

Pouze jeden vzorek byl porušen nevyhovujícím způsobem, a proto byl z posuzování vyřazen. Před zkouškou bylo zjištěno, že vzorek má chybnou geometrii. Pro zajímavost je zde tento vyřazený vzorek vykreslen na obrázku 4.6 z vysokohodnotného betonu číslo 7.



Obrázek 4.6: Vykreslená zkouška pevnosti v tlaku vyřazeného vzorku z UHPC

Z důvodu spolupráce s Ing. Patrikem Stonišem na posouzení vyrobených vzorků se veškeré zkoušky neprovedly v normou předepsaném stáří 28 dní od jejich vyrobení. V tomto termínu byly provedeny pouze zkouška v tlaku a první zkouška pomocí ultrazvuku.

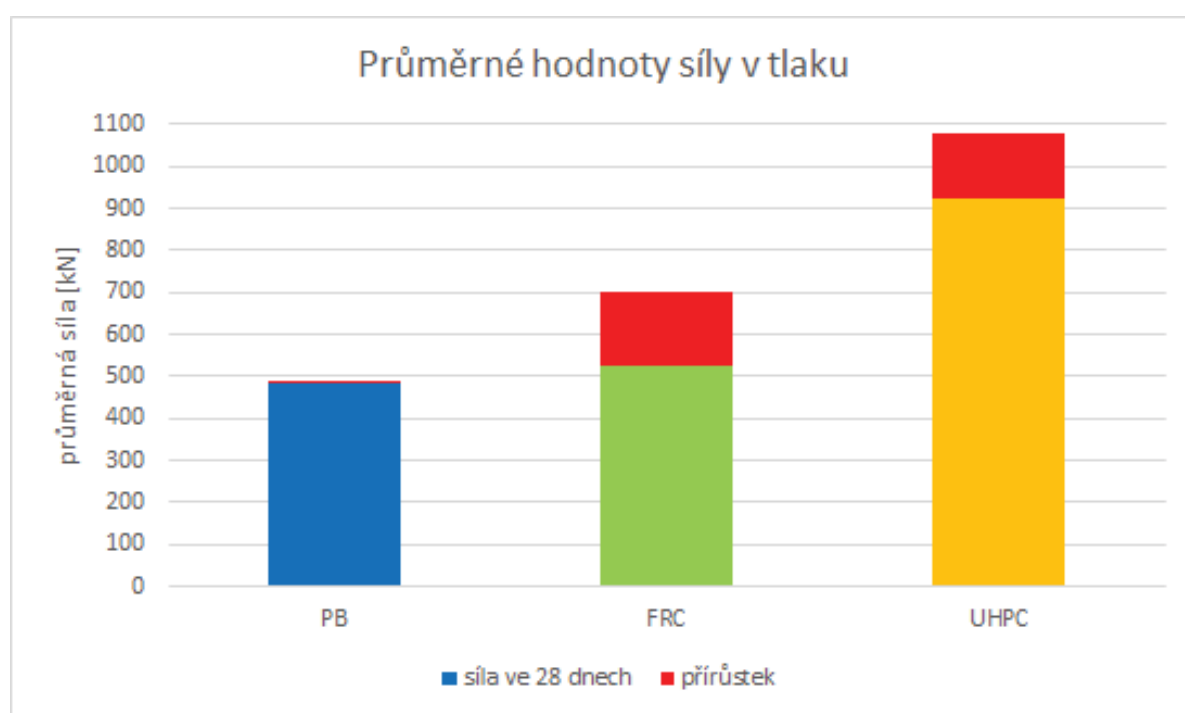
Zbylé zkoušky s provedly ve stáří vzorků 80 dní od výroby vysokohodnotného betonu. Stáří drátkobetonu při dynamických zkouškách bylo 65 dní a stáří prostého betonu bylo 55 dní.

V následující tabulce 4.5 jsou zobrazeny naměřené hodnoty pevnosti díky oddálenému měření oproti hodnotám získaným při zkoušce ve 28 dnech. Pro lepší přehlednost jsou v grafech 4.7 a 4.8 jsou zobrazeny hodnoty s nárůstem pevnosti oproti normovému měření.

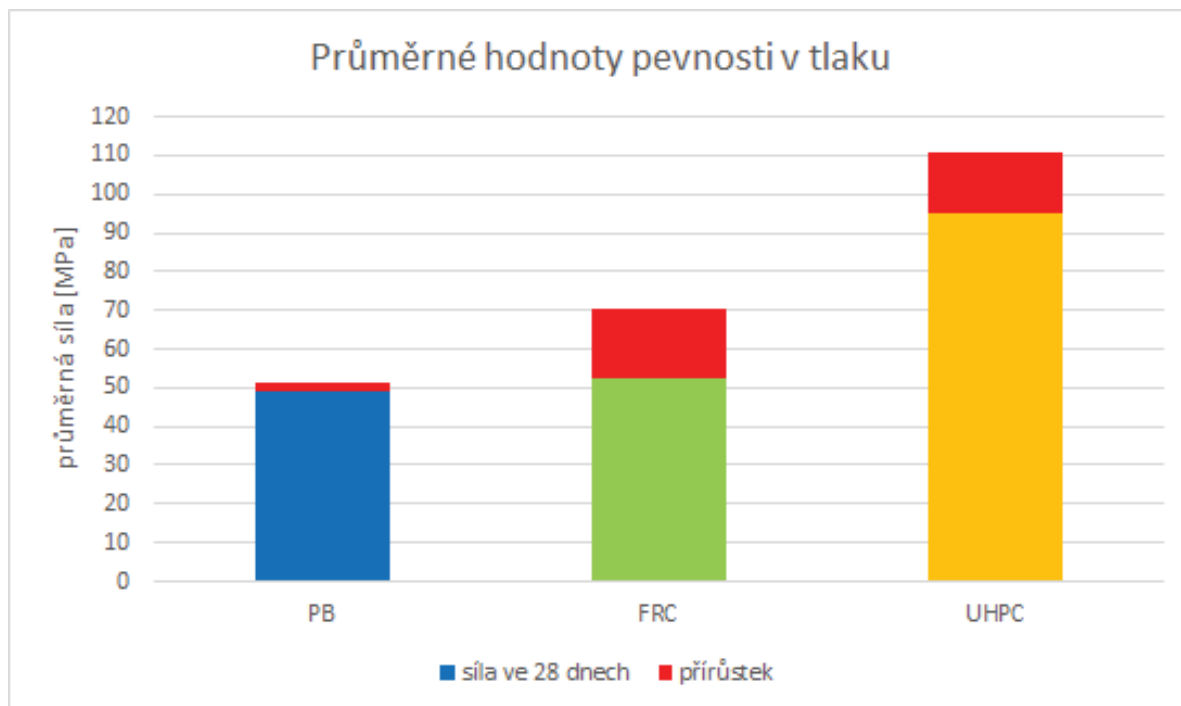
4.1. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TLAKU

Tabulka 4.5: Průměrné hodnoty naměřené pro jednotlivé druhy betonů při oddálené zkoušce v tlaku

Označení	Síla	Pevnost
	kN	MPa
PB	486,74	51,32
FRC	699,17	70,44
UHPC	1078,36	110,89



Obrázek 4.7: Souhrnné výsledky zatěžovacích sil při oddálené zkoušce v tlaku



Obrázek 4.8: Souhrnné výsledky pevností při oddálené zkoušce v tlaku

Na grafu 4.7 je vidět, že u prostého betonu došlo k minimálnímu nárůstu tlakové síly oproti drátkobetonu, kde došlo k nárůstu největšímu. Stejně došlo k nárůstu únosnosti i u vysokohodnotného betonu.

Při porovnání pevností na grafu 4.8 se naměřené hodnoty v čase opět zvětšily. Nejmenší rozdíly má opět prostý beton a nejvyšších drátkobeton s vysokohodnotným betonem.

4.2 Zkouška modulu pružnosti v tlaku

Hlavním cílem této práce bylo stanovit a posoudit naměřené hodnoty modulu pružnosti při různých způsobech zkoušení, na různých druzích betonů a posoudit zjištěné hodnoty.

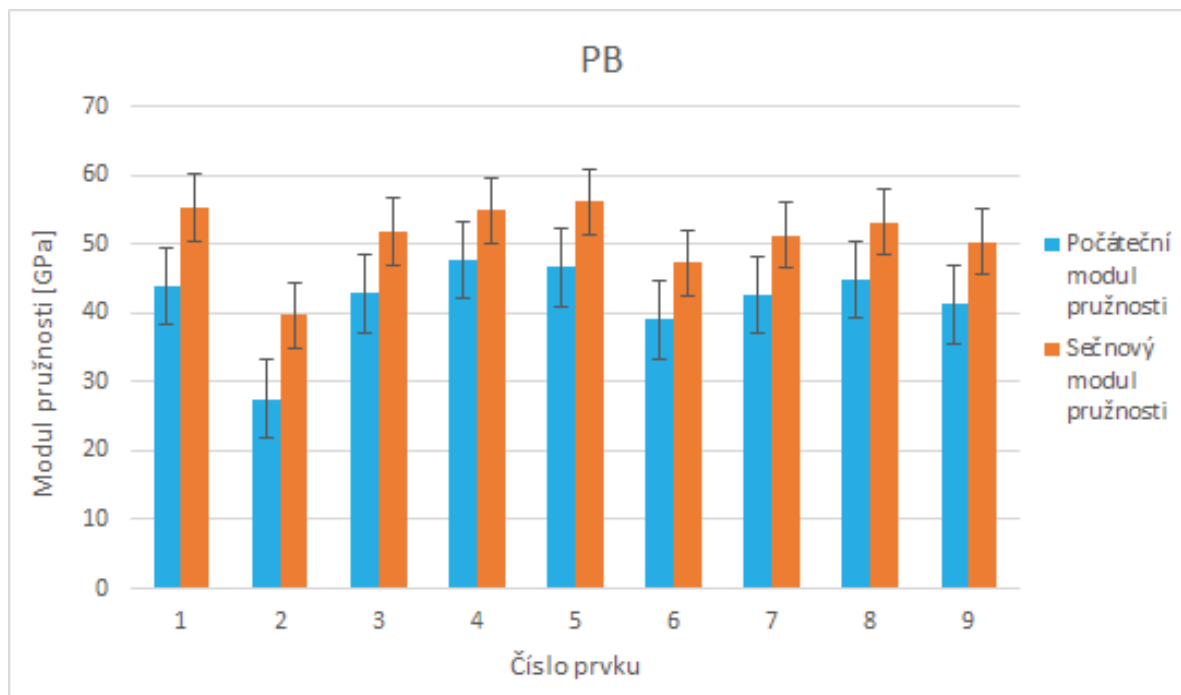
Z tohoto důvodu jsou výsledky zjištěné při této metodě považovány za nejpresnější a podle toho se bude dále postupovat.

V této podkapitole se jedná o zkoušení modulu pružnosti v tlaku prováděná podle normy ČSN EN 73 12390-13 metody A popsané v kapitole 3.4 Zkouška modulu pružnosti v tlaku. Zjištěné hodnoty jsou uvedené v tabulkách 4.6, 4.7 a 4.8. Grafické znázornění výsledků je zobrazeno na obrázcích 4.9, 4.10 a 4.11.

4.2. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu

PB 1	Počáteční modul pružnosti	43,88	GPa
	Sečnový modul pružnosti	55,30	GPa
PB 2	Počáteční modul pružnosti	27,51	GPa
	Sečnový modul pružnosti	39,66	GPa
PB 3	Počáteční modul pružnosti	42,81	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,79	GPa
PB 4	Počáteční modul pružnosti	47,63	GPa
	Sečnový modul pružnosti	54,90	GPa
PB 5	Počáteční modul pružnosti	46,65	GPa
	Sečnový modul pružnosti	56,10	GPa
PB 6	Počáteční modul pružnosti	38,98	GPa
	Sečnový modul pružnosti	47,23	GPa
PB 7	Počáteční modul pružnosti	42,68	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,28	GPa
PB 8	Počáteční modul pružnosti	44,81	GPa
	Sečnový modul pružnosti	53,14	GPa
PB 9	Počáteční modul pružnosti	41,20	GPa
	Sečnový modul pružnosti	50,34	GPa

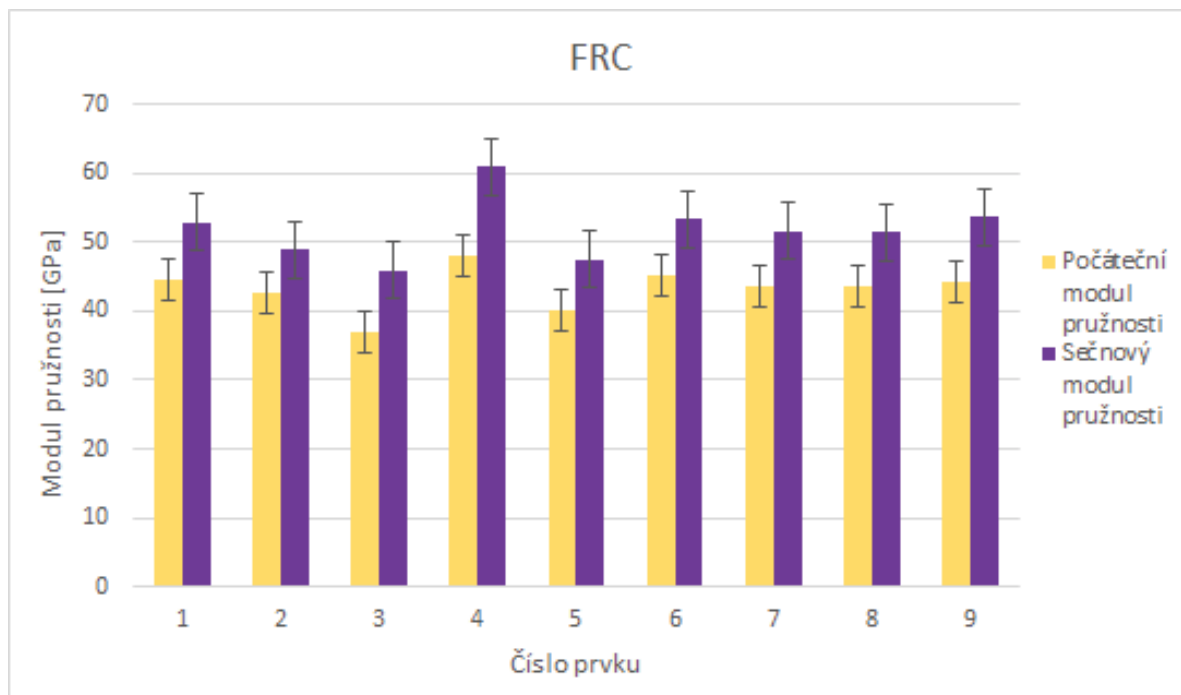


Obrázek 4.9: Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku prostého betonu

4.2. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu

FRC 1	Počáteční modul pružnosti	44,52	GPa
	Sečnový modul pružnosti	52,92	GPa
FRC 2	Počáteční modul pružnosti	42,63	GPa
	Sečnový modul pružnosti	48,90	GPa
FRC 3	Počáteční modul pružnosti	36,86	GPa
	Sečnový modul pružnosti	46,00	GPa
FRC 4	Počáteční modul pružnosti	48,10	GPa
	Sečnový modul pružnosti	60,99	GPa
FRC 5	Počáteční modul pružnosti	40,06	GPa
	Sečnový modul pružnosti	47,58	GPa
FRC 6	Počáteční modul pružnosti	45,30	GPa
	Sečnový modul pružnosti	53,37	GPa
FRC 7	Počáteční modul pružnosti	43,56	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,71	GPa
FRC 8	Počáteční modul pružnosti	43,70	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,40	GPa
FRC 9	Počáteční modul pružnosti	44,37	GPa
	Sečnový modul pružnosti	53,69	GPa

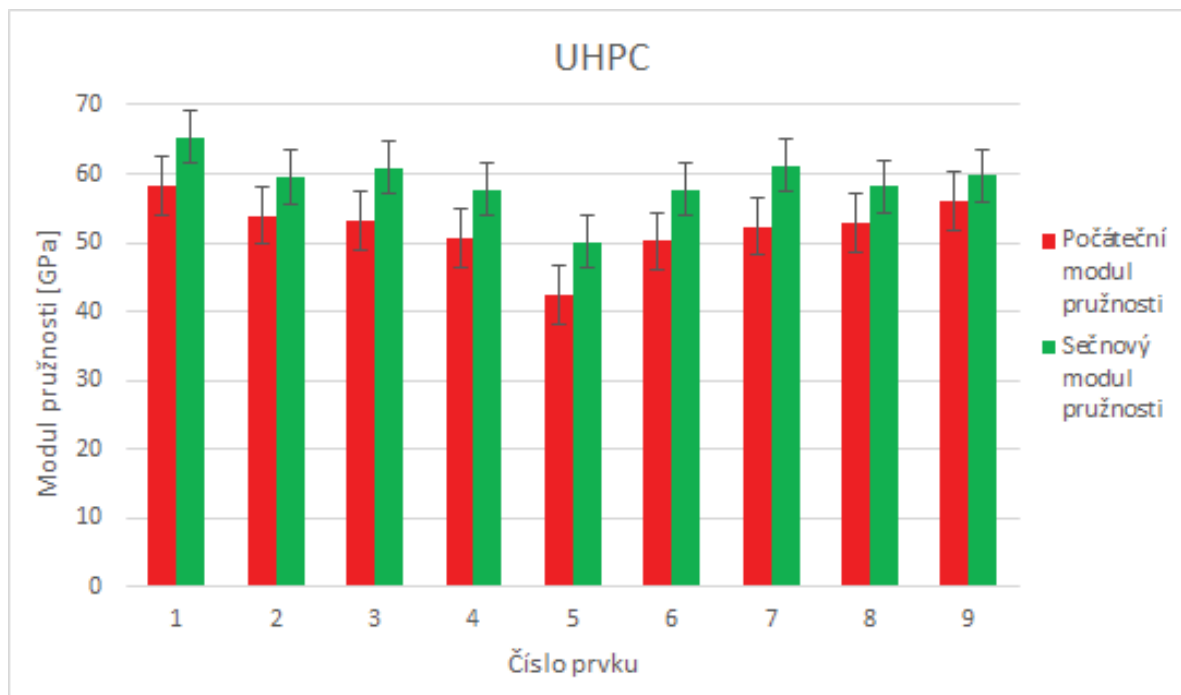


Obrázek 4.10: Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku drátkobetonu

4.2. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Tabulka 4.8: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

UHPC 1	Počáteční modul pružnosti	58,27	GPa
	Sečnový modul pružnosti	65,29	GPa
UHPC 2	Počáteční modul pružnosti	53,93	GPa
	Sečnový modul pružnosti	59,53	GPa
UHPC 3	Počáteční modul pružnosti	53,15	GPa
	Sečnový modul pružnosti	60,91	GPa
UHPC 4	Počáteční modul pružnosti	50,61	GPa
	Sečnový modul pružnosti	57,78	GPa
UHPC 5	Počáteční modul pružnosti	42,39	GPa
	Sečnový modul pružnosti	50,18	GPa
UHPC 6	Počáteční modul pružnosti	50,26	GPa
	Sečnový modul pružnosti	57,73	GPa
UHPC 7	Počáteční modul pružnosti	52,36	GPa
	Sečnový modul pružnosti	61,19	GPa
UHPC 8	Počáteční modul pružnosti	52,88	GPa
	Sečnový modul pružnosti	58,25	GPa
UHPC 9	Počáteční modul pružnosti	56,03	GPa
	Sečnový modul pružnosti	59,84	GPa



Obrázek 4.11: Vykreslená zkouška modulu pružnosti v tlaku vysokohodnotného betonu

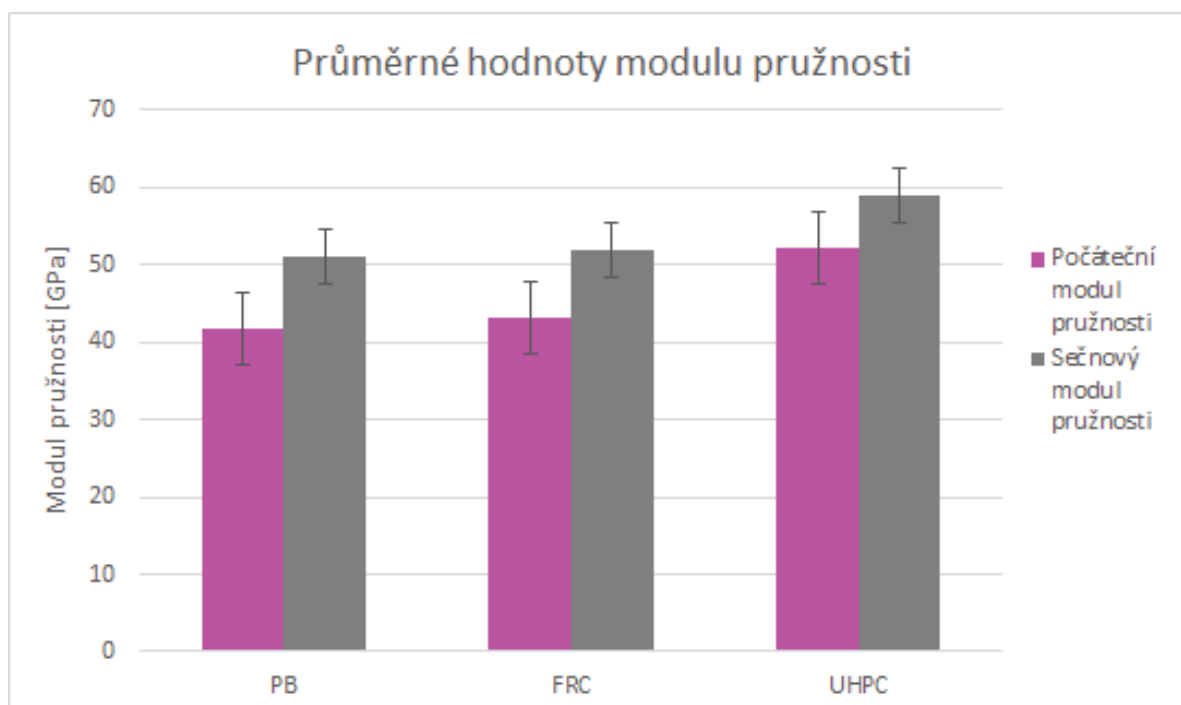
4.2. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Při porovnání jednotlivých grafů 4.9, 4.10 a 4.11 se došlo k závěru, že nejmenších výchylek dosáhl vysokohodnotný beton. Největších rozdílů se nachází u prostého betonu. Naměřené výsledky u jednotlivých zkoušených betonů dosahují rozdílů mezi nejnížší a nejvyšší naměřenou hodnotou ve všech grafech okolo 15 GPa. Nejvyšších hodnot podle očekávání dosáhl vysokohodnotný beton.

Pro úplné porovnání jsou jednotlivé výsledky daných betonových směsí zprůměrovány a zobrazeny v tabulce 4.9 a pro přehlednost jsou vykresleny v grafu 4.12.

Tabulka 4.9: Naměřené průměrné hodnoty modulu pružnosti

PB	Počáteční modul pružnosti	41,79	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,08	GPa
FRC	Počáteční modul pružnosti	43,23	GPa
	Sečnový modul pružnosti	51,84	GPa
UHPC	Počáteční modul pružnosti	52,21	GPa
	Sečnový modul pružnosti	58,97	GPa



Obrázek 4.12: Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami

Na zprůměrovaných hodnotách v grafu 4.12 je vidět potvrzený předpoklad nárůstu modulu pružnosti s nárůstem pevnosti betonu v tlaku. Rozdíl mezi prostým betonem a drátkobetonem je minimální. Rozdíl vysokohodnotného betonu od ostatních betonů

je značný. To je způsobeno použitím únosnějšího čedičového kameniva a únosnějších drátků než v předešlých směsích.

4.3 Zkouška modulu pružnosti impulzní metodou

Další způsob získání hodnot pro výpočet modulu pružnosti bylo pomocí zkoušky ultrazvukem. Postup provádění je uveden v normě ČSN EN 12504–4. Průběh zkoušky je popsán v kapitole 3.5 Zkouška modulu pružnosti impulzní metodou.

Na rozdíl od ostatního měření, které bylo prováděno pouze na polovině zhotovených vzorků, což odpovídá deseti vzorkům od každého druhu betonu, byla tato zkouška prováděna na všech vyrobených trámcích. Jelikož tato zkouška byla prováděna na všech dvaceti tělesech jsou tabulky a grafy rozděleny na dvě části.

4.3.1 Výsledky modulu pružnosti na vzorcích zkoušených v tlaku

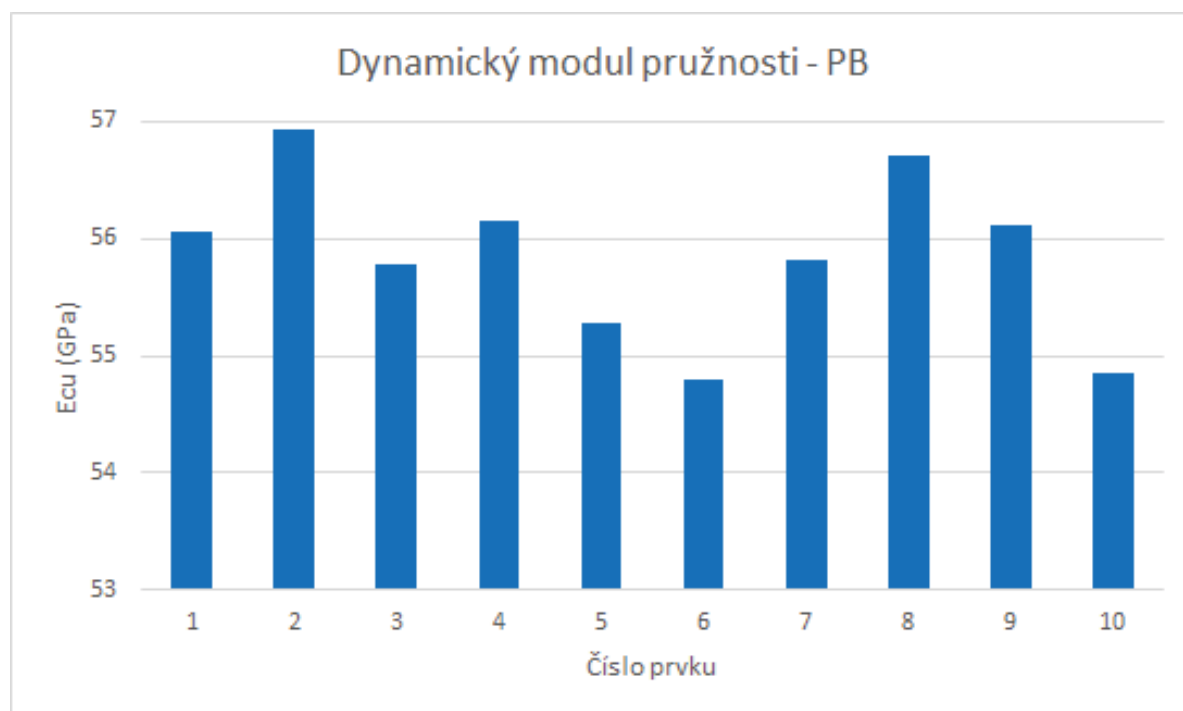
Vzorky, jejichž výsledky jsou uvedeny v této kapitole, byly následně použity pro získání výsledků pevnosti v tlaku a stanovení srovnávacího napětí.

Zjištěné hodnoty na trámcích určených pro následné zkoušení pouze v tlaku jsou uvedené v tabulkách 4.10, 4.11, 4.12 a jejich grafické znázornění výsledků je zobrazeno na obrázcích 4.13, 4.14, 4.15.

Tabulka 4.10: Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu

Označení	Rychlost	$\rho_c [kg/m_3]$	k	$E_{cu} [GPa]$
PB1	4944	2389	1,021	56,06
PB2	4969	2402	1,021	56,94
PB3	4932	2389	1,021	55,79
PB4	4963	2375	1,021	56,16
PB5	4926	2373	1,021	55,28
PB6	4926	2352	1,021	54,79
PB7	4957	2366	1,021	55,81
PB8	4994	2369	1,021	56,72
PB9	4938	2397	1,021	56,11
PB10	4902	2378	1,021	54,86

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

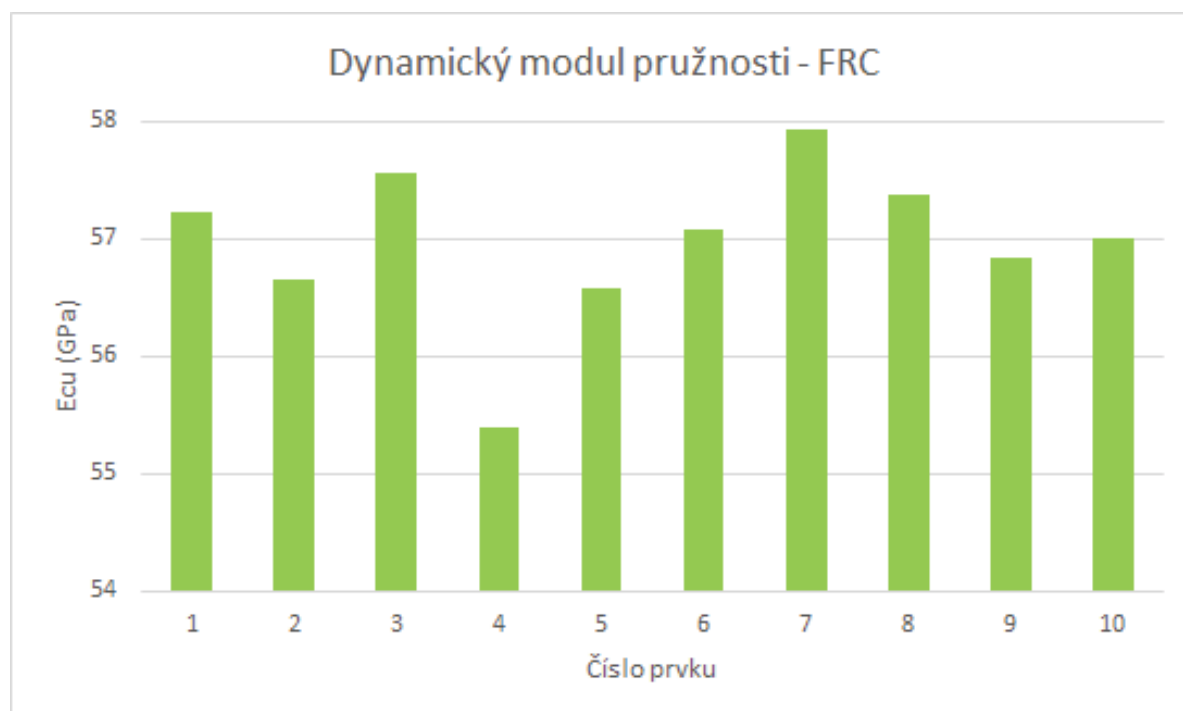


Obrázek 4.13: Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu

Tabulka 4.11: Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu

Označení	Rychlost	ρ_c [kg/m_3]	k	E_{cu} [GPa]
FRC1	4932	2451	1,021	57,23
FRC2	4932	2426	1,021	56,65
FRC3	4957	2440	1,021	57,56
FRC4	4902	2401	1,021	55,39
FRC5	4914	2441	1,021	56,59
FRC6	4963	2414	1,021	57,08
FRC7	4963	2450	1,021	57,93
FRC8	4920	2469	1,021	57,37
FRC9	4932	2434	1,021	56,84
FRC10	4938	2435	1,021	57,00

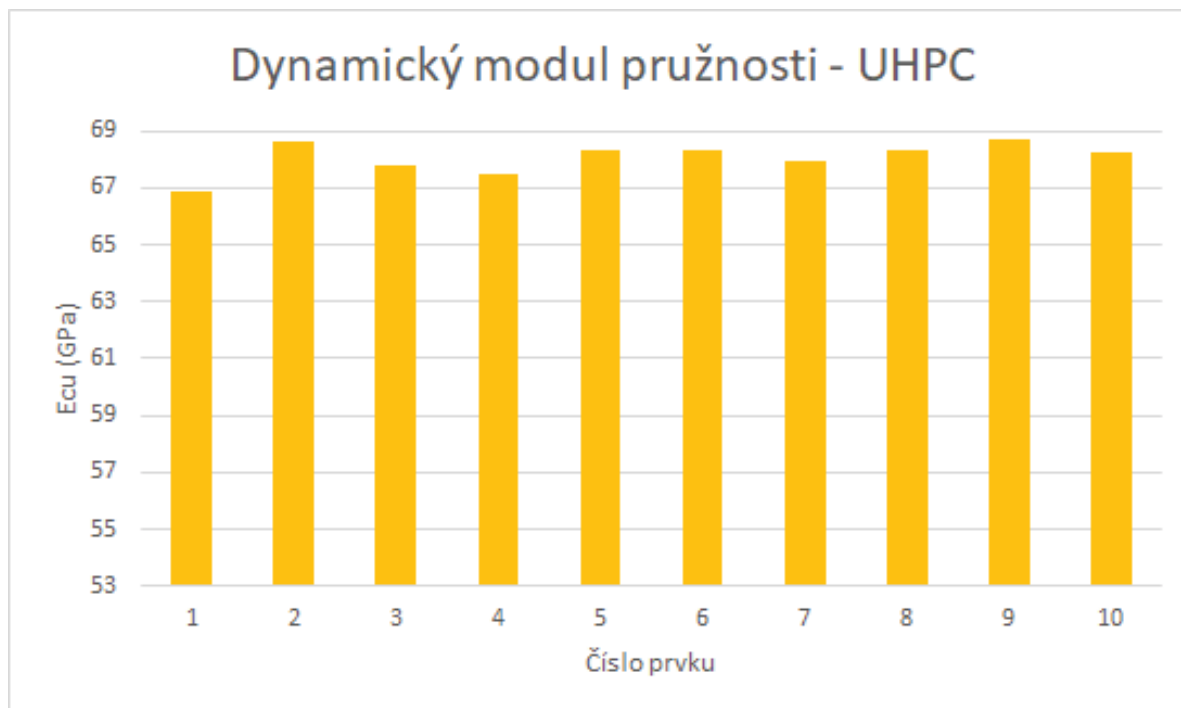
4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU



Obrázek 4.14: Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu

Tabulka 4.12: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	Rychlost	ρ_c [kg/m_3]	k	E_{cu} [GPa]
UHPC1	5076	2694	1,019	66,91
UHPC2	5148	2687	1,019	68,64
UHPC3	5115	2687	1,019	67,76
UHPC4	5109	2681	1,019	67,45
UHPC5	5148	2674	1,019	68,31
UHPC6	5128	2694	1,019	68,29
UHPC7	5115	2694	1,019	67,94
UHPC8	5148	2673	1,019	68,28
UHPC9	5148	2690	1,019	68,72
UHPC10	5141	2679	1,019	68,25



Obrázek 4.15: Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Z grafu 4.15 vysokohodnotného betonu je patrné, že naměřené hodnoty jednotlivých vzorků mají pouze malé odchylky mezi jednotlivými velikostmi modulů pružnosti. Nejnižších hodnot dosáhl vzorek č. 1 s modulem pružnosti 66,64 GPa, nejvyšších hodnot dosáhl vzorek č. 9 s modulem pružnosti 68,44 GPa. S ohledem na tato čísla můžeme tvrdit, že vzorky jsou homogenní a navzájem shodné.

Toto tvrzení se nedá aplikovat na vzorky vyrobené ze zbývajících dvou druhů betonů. U těchto materiálů naměřené hodnoty modulu pružnosti mezi jednotlivými vyrobenými trámečky velmi kolísaly. Nejvíce patrné jsou rozdíly modulů pružnosti získané ultrazvukem u drátkobetonu v grafu 4.14. Přesto byla nejnižší naměřená hodnota 55,39 GPa u vzorku č. 4 a nejvyšší hodnota dosáhla 57,93 GPa u trámku č. 7.

Velkých rozdílů mezi jednotlivými zkušebními vzorky dosáhl i prostý beton na grafu 4.13. Nejnižší hodnoty dosáhl modul pružnosti u vzorku č. 6 a to 54,79 GPa. Nejvyšší hodnota byla změřena u vzorku č. 2, ta dosáhla 56,94 GPa.

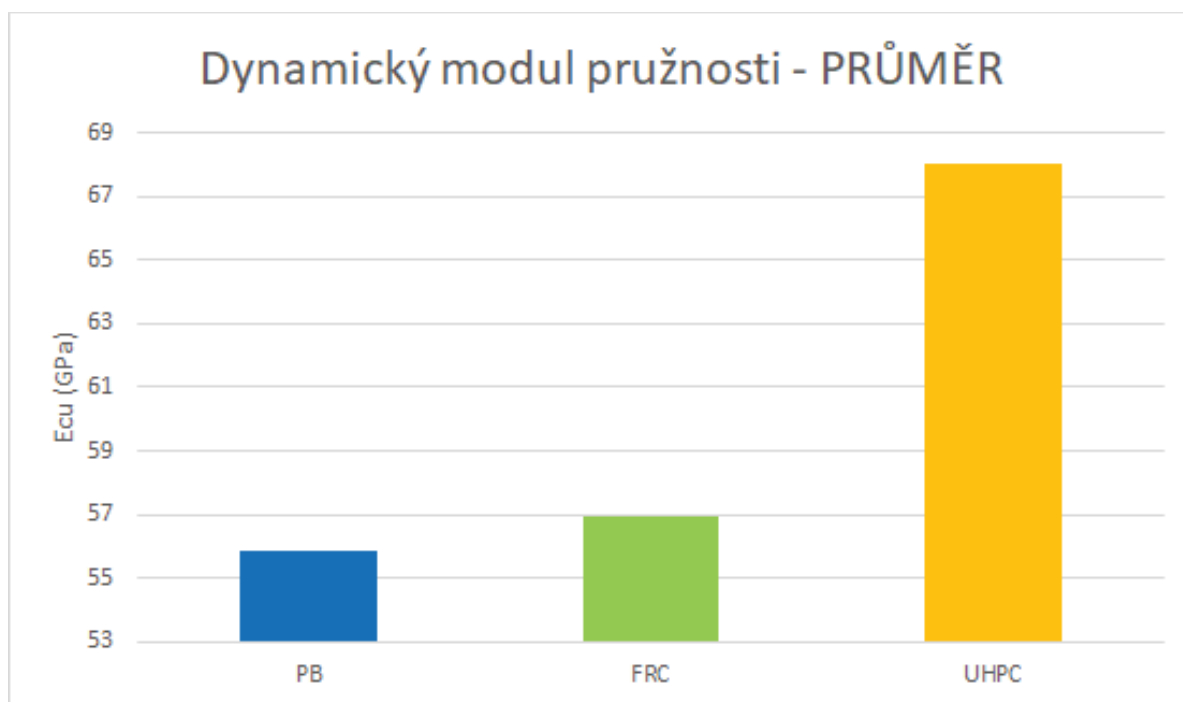
Velké rozdíly v hodnotách byly přisouzeny u prostého betonu možným trhlinám a vzduchovým dutinám ve vzorech. U drátkobetonu mohly rozdíly navíc způsobit drátky, pokud se v místě měření nacházeli ve větších shlucích.

Pro lepší srovnání byly jednotlivé moduly pružnosti opět zprůměrovány do tabulky 4.13 a hodnoty jsou vykresleny v grafu 4.16.

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

Tabulka 4.13: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	E_{cu} [GPa]
PB	55,85
FRC	56,96
UHPC	68,05



Obrázek 4.16: Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami

Na tomto grafu 4.16 je patrné, že modul pružnosti prostého betonu a drátkobetonu je opět velice podobný. Jednotlivé hodnoty měřených betonů jsou v poměrech mezi sebou shodná s poměry mezi jednotlivými hodnotami zjištěnými u zkoušky modulu pružnosti v tlaku. Výsledky, které jsou zde naměřené při této zkoušce, pouze dosahují v průměru o 6 GPa vyšších hodnot než u předchozí zkoušky.

4.3.2 Výsledky modulu pružnosti na vzorcích zkoušených pružně

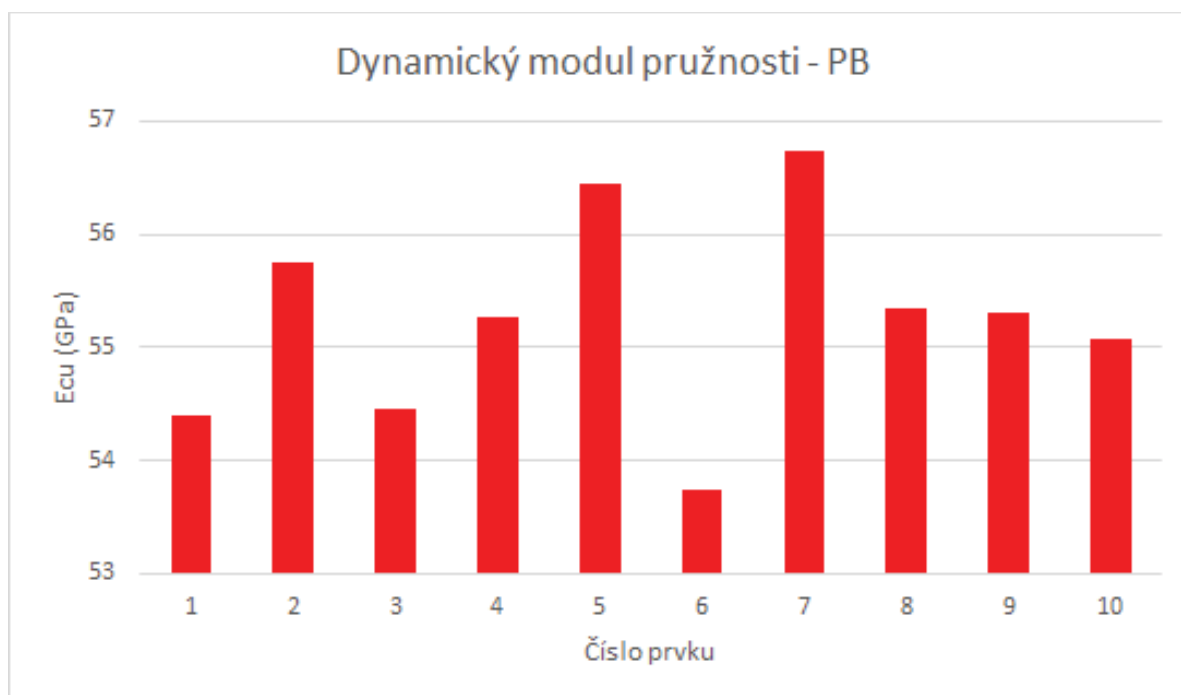
Jak již bylo popsáno na začátku kapitoly měření ultrazvukovou metodou probíhalo na všech vyrobených tělesech. Z tohoto důvodu se výsledky rozdělili do dvou samostatných kapitol. Hodnoty zobrazeny v této kapitole byly získány na vzorcích použitých pro následné zkoušky modulu pružnosti v tlaku a rezonanční metodu.

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

Naměřené hodnoty získané na vzorcích, které byly poté použity pro získání výsledků modulu pružnosti jsou uvedeny v tabulkách 4.14, 4.15, 4.16 a grafech 4.17, 4.18, 4.19.

Tabulka 4.14: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	Rychlost	$\rho_c [kg/m_3]$	k	$E_{cu} [GPa]$
PB1	4902	2358	1,021	54,40
PB2	4926	2393	1,021	55,74
PB3	4866	2396	1,021	54,46
PB4	4932	2367	1,021	55,27
PB5	4969	2381	1,021	56,44
PB6	4866	2364	1,021	53,74
PB7	4957	2405	1,021	56,73
PB8	4926	2376	1,021	55,35
PB9	4932	2368	1,021	55,30
PB10	4902	2387	1,021	55,06

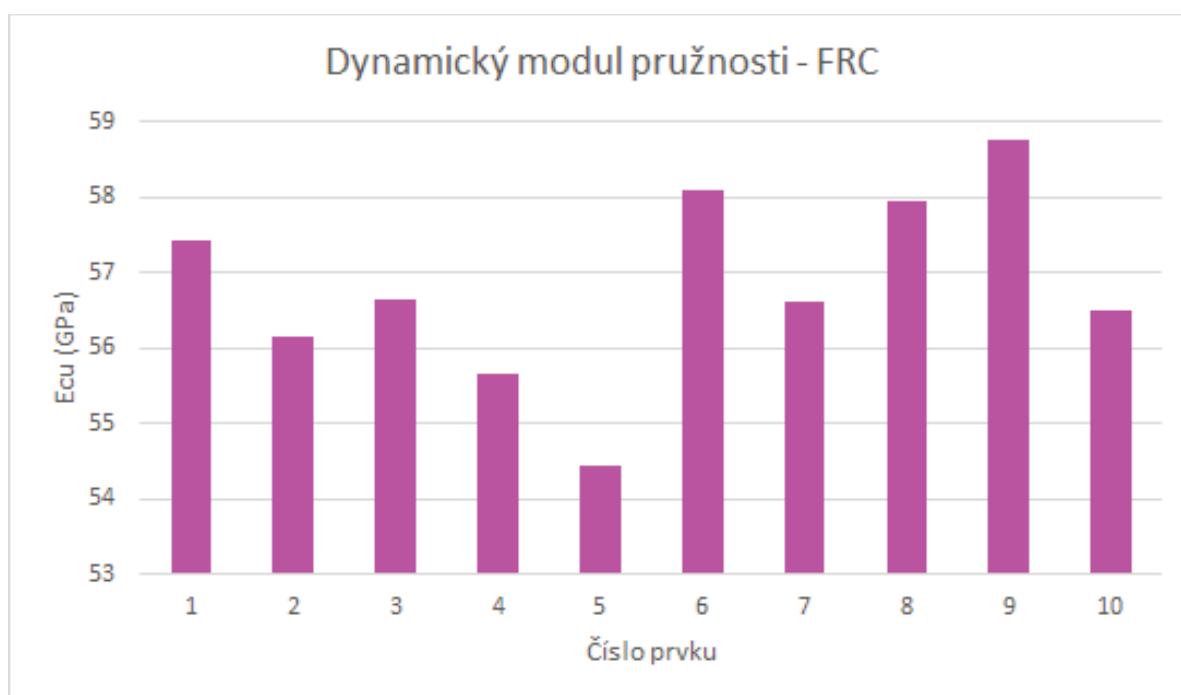


Obrázek 4.17: Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

Tabulka 4.15: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	Rychlost	$\rho_c [kg/m_3]$	k	$E_{cu} [GPa]$
FRC1	4896	2495	1,021	57,41
FRC2	4896	2440	1,021	56,15
FRC3	4926	2431	1,021	56,63
FRC4	4866	2448	1,021	55,65
FRC5	4854	2407	1,021	54,44
FRC6	4981	2439	1,021	58,09
FRC7	4932	2425	1,021	56,63
FRC8	4957	2457	1,021	57,96
FRC9	4994	2454	1,021	58,75
FRC10	4926	2425	1,021	56,49

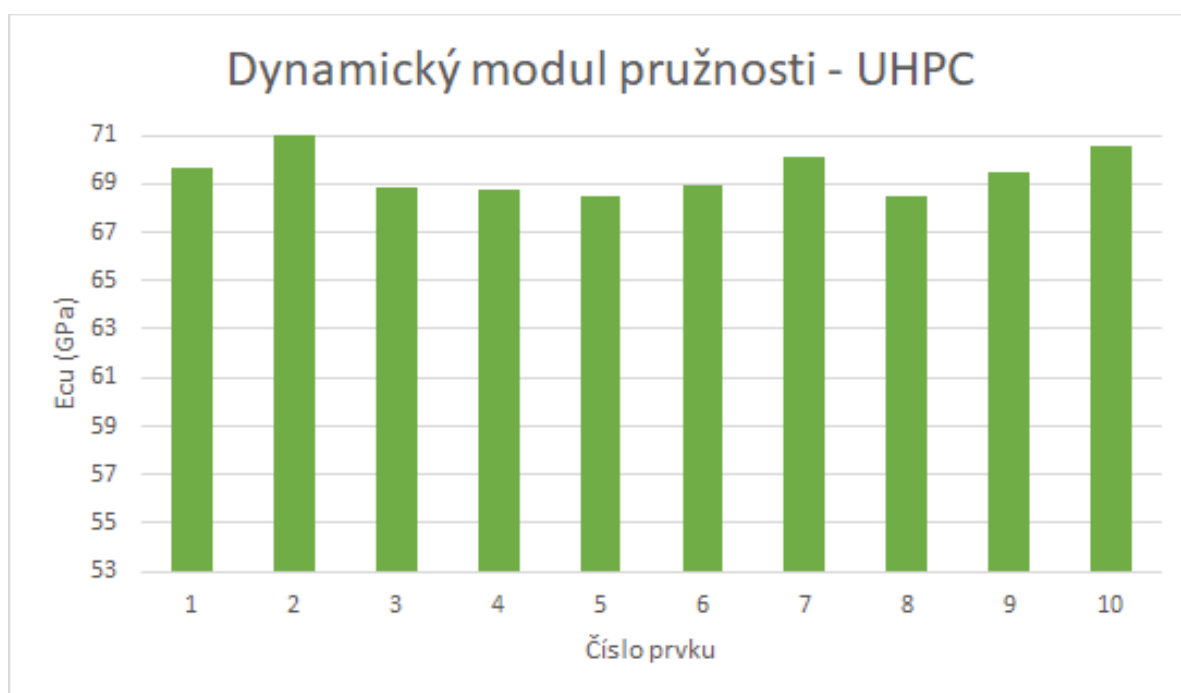


Obrázek 4.18: Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

Tabulka 4.16: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	Rychlost	$\rho_c [kg/m_3]$	k	$E_{cu} [GPa]$
UHPC1	5181	2693	1,019	69,68
UHPC2	5215	2707	1,019	70,96
UHPC3	5175	2668	1,019	68,87
UHPC4	5148	2690	1,019	68,72
UHPC5	5181	2648	1,019	68,51
UHPC6	5175	2671	1,019	68,95
UHPC7	5181	2709	1,019	70,09
UHPC8	5148	2682	1,019	68,51
UHPC9	5195	2671	1,019	69,48
UHPC10	5208	2697	1,019	70,51



Obrázek 4.19: Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Při měření u vzorků v této kapitole byly zjištěny větší rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou u jednotlivých druhů betonů. Opět zde naměřené výsledky u prostého betonu v grafu 4.17 dosáhly u všech těles velmi rozdílných hodnot. Maximální modul pružnosti zde byl naměřen u vzorku č. 7 a to 56,73 GPa. Nejnižší hodnota se zjistila u tělesa č. 6 a to 53,74 GPa.

Drátkobeton v grafu 4.18 svými výsledky dosáhl také značných rozdílů mezi jednot-

4.3. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI IMPULZNÍ METODOU

livými moduly pružnosti. U této směsi byl jistěn dokonce nejvyšší rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším výsledkem. Ty odpovídají hodnotám, kde nejméně je 54,44 GPa u trámečku č. 5 a nejvíce 58,75 GPa u vzorku č. 9.

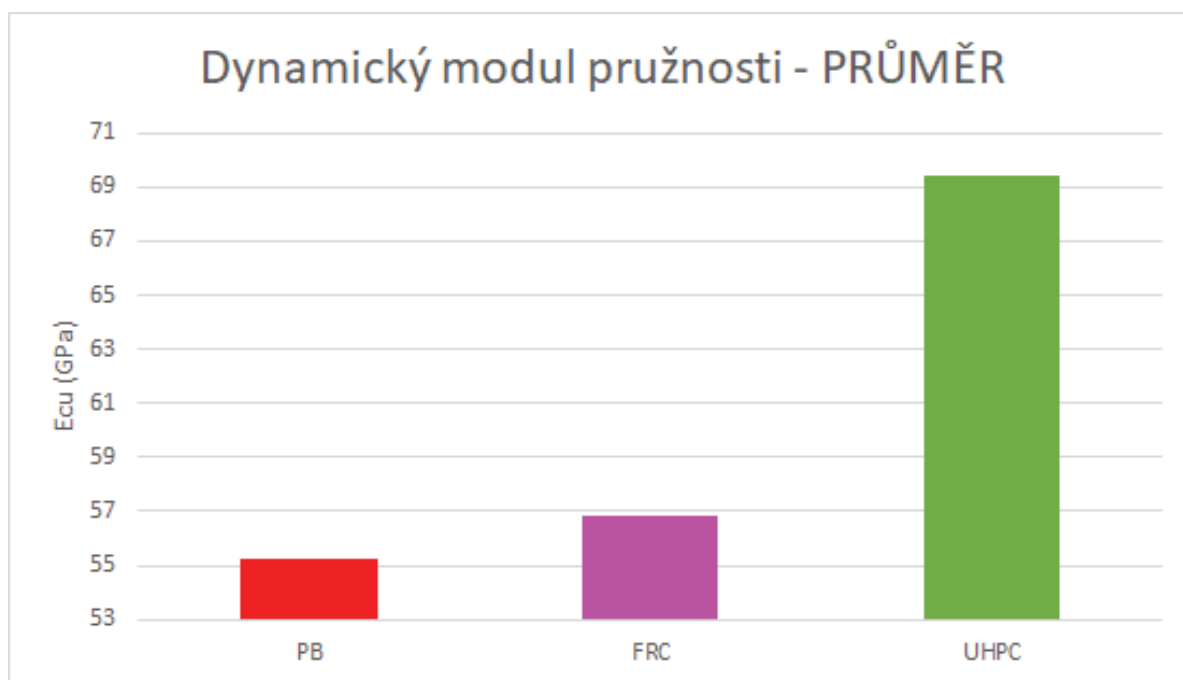
Výchyvky byly opět přisouzeny nedostatečné homogenitě směsí, kde mohl zůstat větší podíl vzduchových pórů, a navíc u drátkobetonu mohlo dojít ke špatnému rozptýlení drátků.

U výsledků zjištěných na vzorcích z vysokohodnotného betonu v grafu 4.19 už nedochází k takovým rozdílům jako u předešlých betonů. Nejnižší naměřený modul pružnosti dosáhl 68,23 GPa u vzorku č. 8. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u vzorku č. 2, kde se naměřilo 70,68 GPa.

Kvůli porovnání byly hodnoty zprůměrovány a jsou zobrazeny v tabulce 4.17 a jsou vykresleny na grafu 4.20.

Tabulka 4.17: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	E_{cu} [GPa]
PB	55,25
FRC	56,82
UHPC	69,43



Obrázek 4.20: Vykreslená zkouška modulu pružnosti s průměrnými hodnotami

Opět je na grafu 4.20 názorně vidět, že modul pružnosti prostého betonu a drátko-betonu jsou si hodnotami velmi blízké oproti vysokohodnotného betonu. Zároveň jsou naměřené průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti porovnatelné s průměrnými hodnotami dynamického modulu pružnosti zjištěnými u předešlých hodnot modulu pružnosti v tlaku pouze s odchylkou průměrně 0,4 GPa u prostého betonu a drátkobetonu. U vysokohodnotného betonu je rozdíl zhruba 1 GPa. Při porovnání se statickým modulem pružnosti je rozdíl u naměřených veličin přibližně 6 GPa pro každý beton.

4.4 Zkouška modulu pružnosti rezonanční metodou

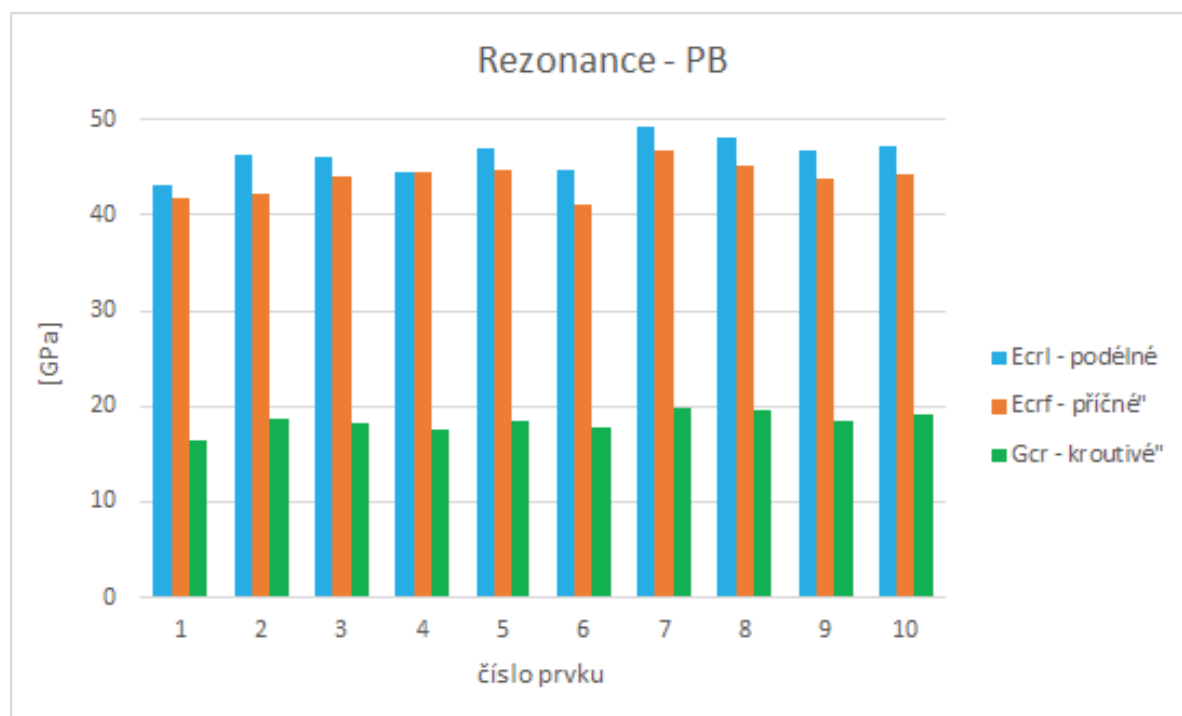
Poslední způsob získání hodnot pro výpočet modulu pružnosti bylo pomocí zkoušky rezonanční metodou. Postup provádění je uveden v normě ČSN 73 1372. Průběh zkoušky je popsán v kapitole 3.6 Zkouška modulu pružnosti rezonanční metodou.

Tato zkouška se opět provedla pouze na deseti trámcích od každé směsi. Zjištěné hodnoty jsou uvedené v tabulkách 4.18, 4.19 a 4.20 a jejich grafické znázornění výsledků je zobrazeno na dvou různých typech grafů 4.21, 4.22, 4.23, které vykresluje hodnoty modulu pružnosti pro různá kmitání vždy na dané směsi betonu.

Tabulka 4.18: Naměřené hodnoty modulu pružnosti prostého betonu

Označení	f_l [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{crl} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
PB1	5,341	2,240	3,033	43,05	41,69	16,42
PB2	5,505	2,252	3,204	46,41	42,28	18,60
PB3	5,487	2,295	3,174	46,17	44,08	18,28
PB4	5,426	2,319	3,131	44,60	44,52	17,57
PB5	5,548	2,319	3,198	46,90	44,80	18,44
PB6	5,432	2,234	3,149	44,64	41,17	17,75
PB7	5,652	2,362	3,296	49,17	46,70	19,78
PB8	5,627	2,340	3,296	48,15	45,19	19,54
PB9	5,554	2,301	3,210	46,75	43,81	18,47
PB10	5,560	2,313	3,253	47,23	44,38	19,12

4.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU

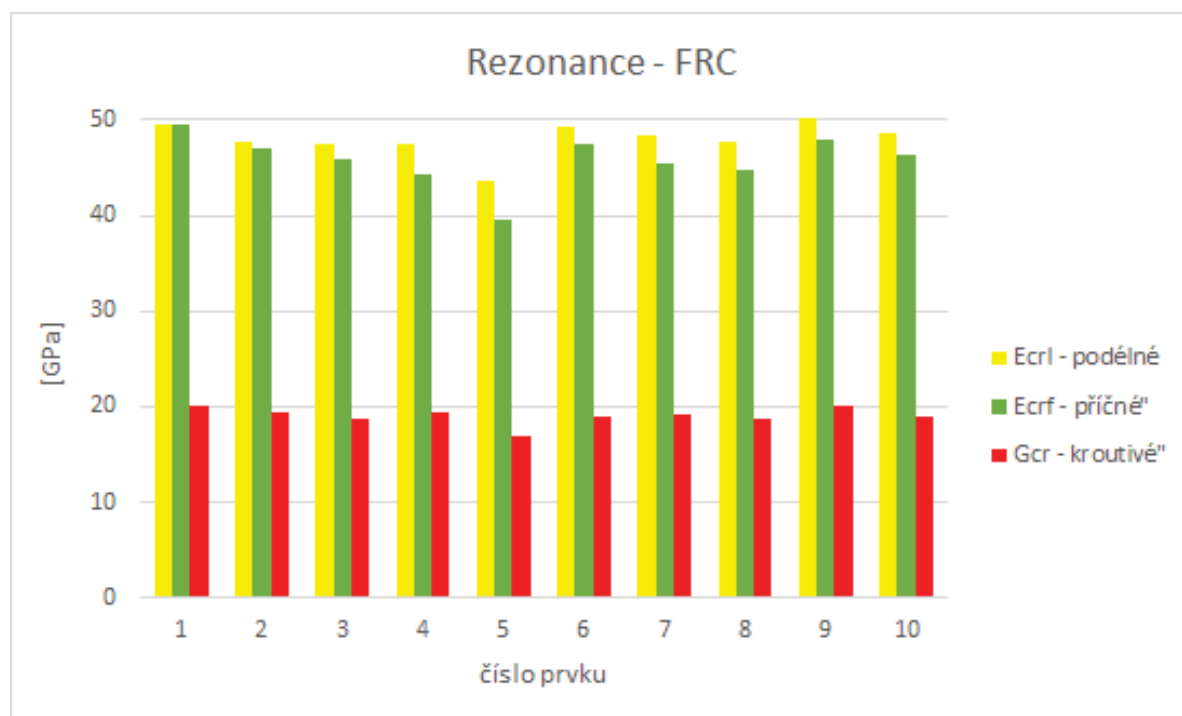


Obrázek 4.21: Vykreslená zkouška modulu pružnosti prostého betonu

Tabulka 4.19: Naměřené hodnoty modulu pružnosti drátkobetonu

Označení	f_l [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{crI} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
FRC1	5,566	2,393	3,265	49,47	49,59	20,14
FRC2	5,524	2,356	3,247	47,65	46,97	19,48
FRC3	5,524	2,327	3,198	47,48	45,97	18,82
FRC4	5,505	2,283	3,229	47,48	44,29	19,32
FRC5	5,328	2,167	3,052	43,73	39,66	16,98
FRC6	5,615	2,350	3,198	49,21	47,39	18,89
FRC7	5,585	2,319	3,241	48,41	45,49	19,29
FRC8	5,511	2,283	3,168	47,76	44,86	18,67
FRC9	5,688	2,362	3,284	50,81	47,87	20,04
FRC10	5,603	2,332	3,210	48,72	46,27	18,92

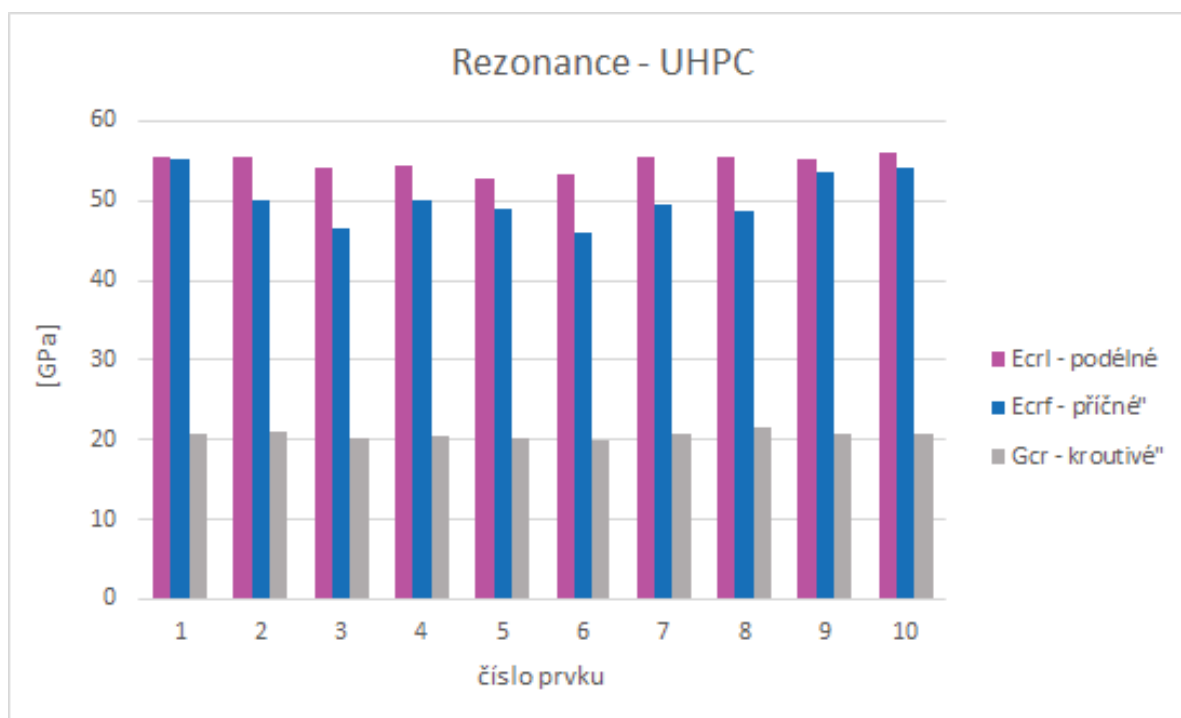
4.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU



Obrázek 4.22: Vykreslená zkouška modulu pružnosti drátkobetonu

Tabulka 4.20: Naměřené hodnoty modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Označení	f_l [kHz]	f_f [kHz]	f_t [kHz]	E_{crI} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
UHPC1	5,676	2,405	3,192	55,53	55,14	20,77
UHPC2	5,658	2,289	3,210	55,46	50,00	21,12
UHPC3	5,634	2,222	3,168	54,20	46,63	20,27
UHPC4	5,627	2,295	3,174	54,51	50,08	20,52
UHPC5	5,585	2,289	3,168	52,86	48,91	20,12
UHPC6	5,591	2,203	3,131	53,44	45,98	19,82
UHPC7	5,658	2,271	3,180	55,50	49,47	20,74
UHPC8	5,688	2,277	3,259	55,53	48,79	21,57
UHPC9	5,688	2,380	3,204	55,31	53,51	20,76
UHPC10	5,701	2,380	3,192	56,10	54,19	20,81



Obrázek 4.23: Vykreslená zkouška modulu pružnosti vysokohodnotného betonu

Na grafu 4.23 vysokohodnotného betonu je vidět, že hodnoty vypočítané z podélného kmitání u jednotlivých vzorků mají malé odchylky ve svých hodnotách. Nejvyšší naměřená hodnota dosáhla 56,1 GPa a nejnižší 52,86 GPa. Rozdíl mezi těmito hodnotami je pouze cca 3 GPa. Hodnoty získané z příčného kmitání už dosahují větších rozdílů. Zde byla nejmenší hodnota 45,98 GPa a nejvyšší 55,14 GPa, tudíž rozdíl mezi nimi je okolo 9 GPa. Nejmenších rozdílů dosáhlo měření kroutivého kmitání, kdy nejnižší hodnota dosáhla 19,82 GPa a nejvyšší 21,57 GPa. Zde se dosáhlo maximálního rozdílu pouze cca 1,5 GPa. Toto byla nejnižší odchylka mezi výsledky ze všech typů kmitání.

Větších rozdílů dosáhly vzorky zhotovené z drátkobetonu na grafu 4.22. Naměřené hodnoty svými rozdíly odpovídají výkyvům u vysokohodnotného betonu. Podélné kmitání dosáhlo maximálních hodnot 50,81 GPa a minimálních 43,73 GPa. To činí rozdíl cca 7 GPa. Z příčného kmitání se získala maximální hodnota 49,59 GPa a minimální hodnota 39,66 GPa. Rozdíl mezi nimi dosáhl téměř 10 GPa. Kroutivé kmitání zde stejně jako v předešlém případě dosáhlo nejmenší odchylky mezi největší hodnotou 20,14 GPa a nejnižší hodnotou 16,98 GPa pouhých cca 3 GPa.

Hodnoty naměřené na vzorcích z prostého betonu na grafu 4.21 dosáhly vyšších rozdílů u podélného kmitání než vysokohodnotný beton a to cca 6 GPa mezi maximální hodnotou 49,17 GPa a nejnižší 43,05 GPa. Příčné kroucení u tohoto druhu betonu dosáhlo nejnižšího rozdílu z tohoto typu měření. Maximální hodnota dosáhla 46,7 GPa

4.4. ZKOUŠKA MODULU PRUŽNOSTI REZONANČNÍ METODOU

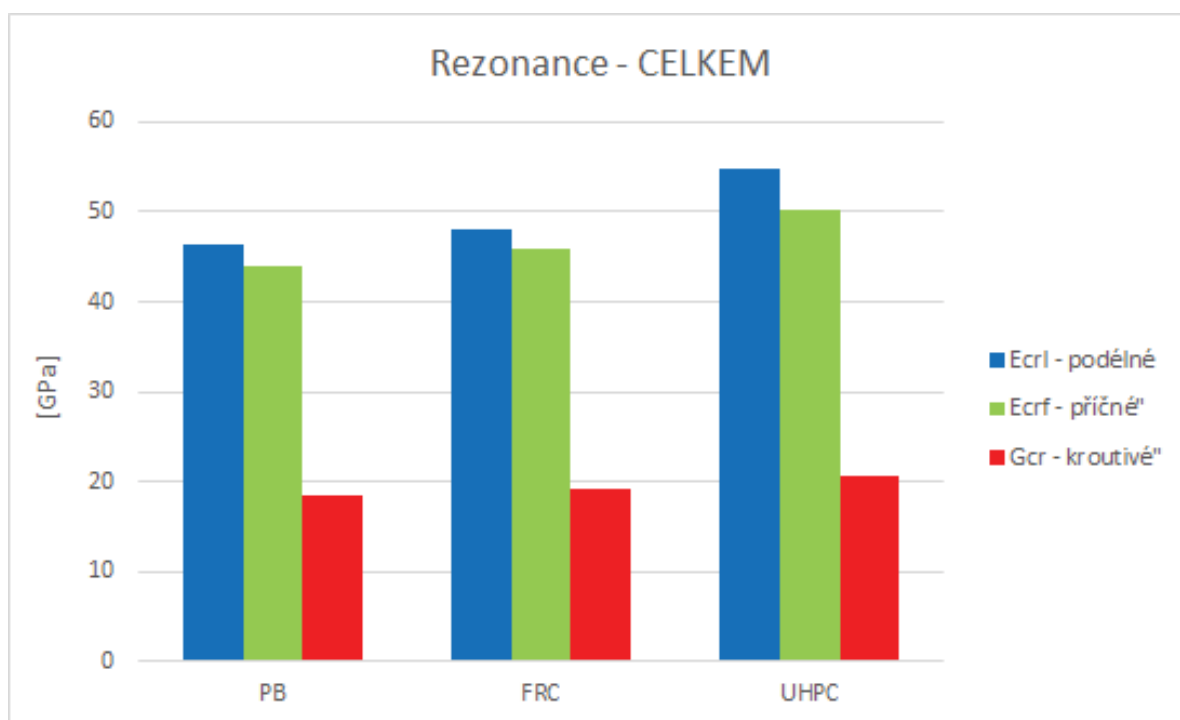
a nejnižší 41,17 GPa. Rozdíl mezi nimi dosáhl zhruba 5,5 GPa. Příčné kmitání dosáhlo minimální hodnoty 19,78 GPa a nejvyšších hodnot 16,42 GPa. Rozdíl dosáhl cca 3 GPa.

Při porovnání s impulzní metodou se může dojít k závěru, že během rezonančního měření dochází u jednotlivých výsledků k větším rozdílům mezi hodnotami než u předešlé zkoušky.

V následující tabulce 4.21 jsou zprůměrovány a porovnány zjištěné hodnoty pro jednotlivé druhy kmitání získaných rezonanční zkouškou. Pro lepší přehlednost jsou tyto hodnoty vykresleny v grafu 4.24.

Tabulka 4.21: Naměřené zprůměrované hodnoty modulu pružnosti

Označení	E_{crl} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]
PB	46,31	43,86	18,40
FRC	48,07	45,84	19,05
UHPC	54,84	50,27	20,65



Obrázek 4.24: Naměřené zprůměrované hodnoty modulu pružnosti

Pokud porovnáme jednotlivé výsledky mezi sebou v grafu 4.24 je jasné, že hodnoty se zvyšují od prostého betonu k vysokohodnotnému. Rozdíly mezi jednotlivými měření

u prostého betonu a drátkobetonu jsou opět malé jako u předešlých zkušebních postupů. Velký rozdíl však nastal u vysokohodnotného betonu, kde v předešlých případech dosáhl jeho průměrný modul pružnosti od výsledků ostatních betonů značně vyšších hodnot. Při tomto měření dosáhl modul pružnosti vysokohodnotného betonu pouze malých rozdílů od zbylých druhů betonů, a to u podélného měření pouze cca 8,5 GPa, příčného měření cca 6,5 GPa a cca 2 GPa u kroutivého kmitání mezi UHPC a prostým betonem.

4.5 Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti

Pro porovnání jednotlivých dynamických modulů získaných při předešlých zkouškách se statickými moduly pružnosti byl zvolen postup podle normy ČSN 73 2011 [13]. Jelikož v této normě jsou jednotlivé převodní koeficienty staré 30 let, není zde určen převodní součinitel pro betony o vyšší pevnosti, než je C 45/55.

Použité koeficienty podle této normy jsou uvedeny v tabulce 4.22 a hodnoty pro porovnání jednotlivých modulů pružnosti jsou popsány v tabulce 4.23 a jsou zobrazeny na grafu 4.25.

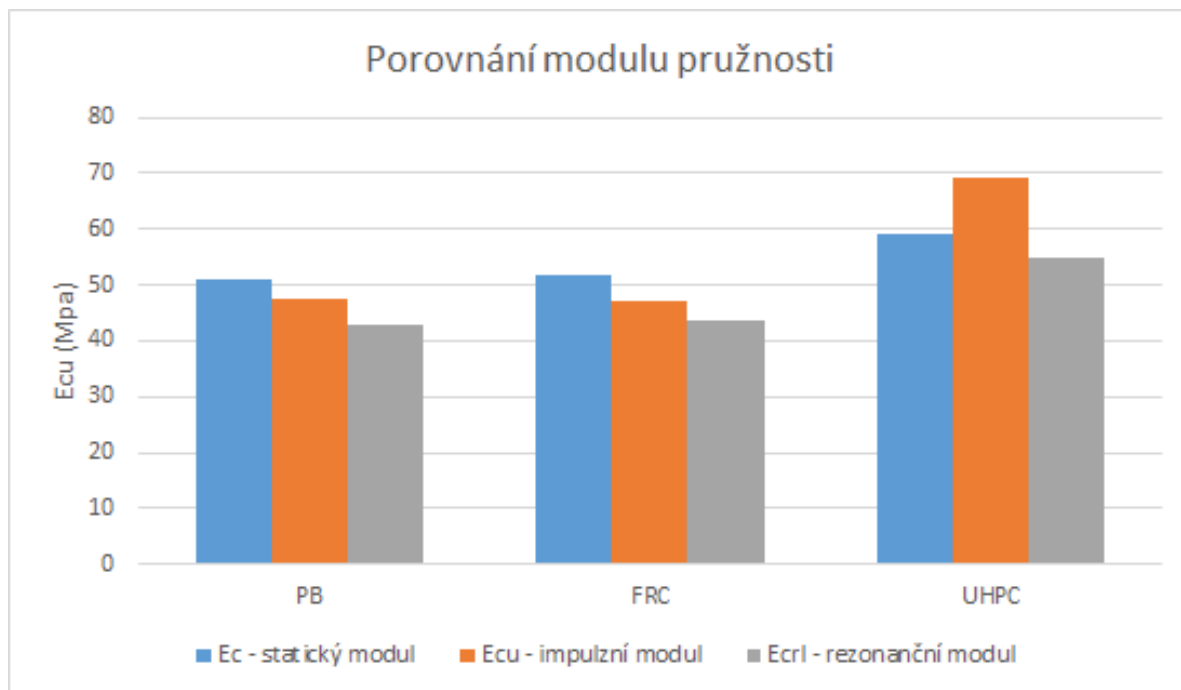
Tabulka 4.22: Stanovení převodních součinitelů dle normy

Označení	f_{ck} [MPa]	Beton	κ_u	κ_R
PB	35,86	C 34/45	0,86	0,93
FRC	32,40	C 30/37	0,83	0,91
UHPC	72,19	C 70/85	1	1

Tabulka 4.23: Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti

Označení	E_c [GPa]	E_{cu} [GPa]	E_{crl} [GPa]
PB	51,08	47,53	42,97
FRC	51,84	47,19	43,68
UHPC	58,97	69,31	54,70

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI



Obrázek 4.25: Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti

Hodnoty zjištěné pomocí koeficientů z normy jsou zastaralé. Z grafu 4.25 je patrné, že hodnoty jednotlivých zkoušek klesají a nelze jednoznačně určit které zkoušky si svými výsledky nejvíce odpovídají.

U prostého betonu i drátkobetonu je nejvyšší hodnota u statického modulu pružnosti získaného z tlakové zkoušky. Výsledky se postupně snižují u impulzní metody a nejnižších hodnot dosáhla rezonanční zkouška, a to o zhruba o 8 GPa od nejvyšší hodnoty.

Nevýhodou u těchto postupů jsou neexistující koeficienty pro vysokohodnotný beton.

Pro porovnání s normou se zjistily hodnoty převodních koeficientů pro dynamické moduly pružnosti, aby bylo možné výsledky mezi sebou porovnat. Výsledné převodní koeficienty κ_u pro impulzní metodu a κ_R pro rezonanční metodu jsou zobrazeny v následujících tabulkách 4.24, 4.25 a 4.26.

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

Tabulka 4.24: Stanovení převodních součinitelů pro prostý beton

Označení	E_c [GPa]	E_{cu} [GPa]	κ_u	celkem κ_u	E_{ssl} [GPa]	κ_R	celkem κ_R
PB1	55,30	54,40	1,02	0,92	43,05	1,28	1,11
PB2	39,66	55,74	0,71		46,41	0,85	
PB3	51,79	54,46	0,95		46,17	1,12	
PB4	54,90	55,27	0,99		44,60	1,23	
PB5	56,10	56,44	0,99		46,90	1,20	
PB6	47,23	53,74	0,88		44,64	1,06	
PB7	51,28	56,73	0,90		49,17	1,04	
PB8	53,14	55,35	0,96		48,15	1,10	
PB9	50,34	55,30	0,91		46,75	1,08	

Tabulka 4.25: Stanovení převodních součinitelů pro drátkobeton

Označení	E_c [GPa]	E_{cu} [GPa]	κ_u	celkem κ_u	E_{ssl} [GPa]	κ_R	celkem κ_R
FRC1	52,92	57,41	0,92	0,91	49,47	1,07	1,08
FRC2	48,90	56,15	0,87		47,65	1,03	
FRC3	46,00	56,63	0,81		47,48	0,97	
FRC4	60,99	55,65	1,10		47,48	1,28	
FRC5	47,58	54,44	0,87		43,73	1,09	
FRC6	53,37	58,09	0,92		49,21	1,08	
FRC7	51,71	56,63	0,91		48,41	1,07	
FRC8	51,40	57,96	0,89		47,76	1,08	
FRC9	53,69	58,75	0,91		50,81	1,06	

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

Tabulka 4.26: Stanovení převodních součinitelů pro vysokohodnotný beton

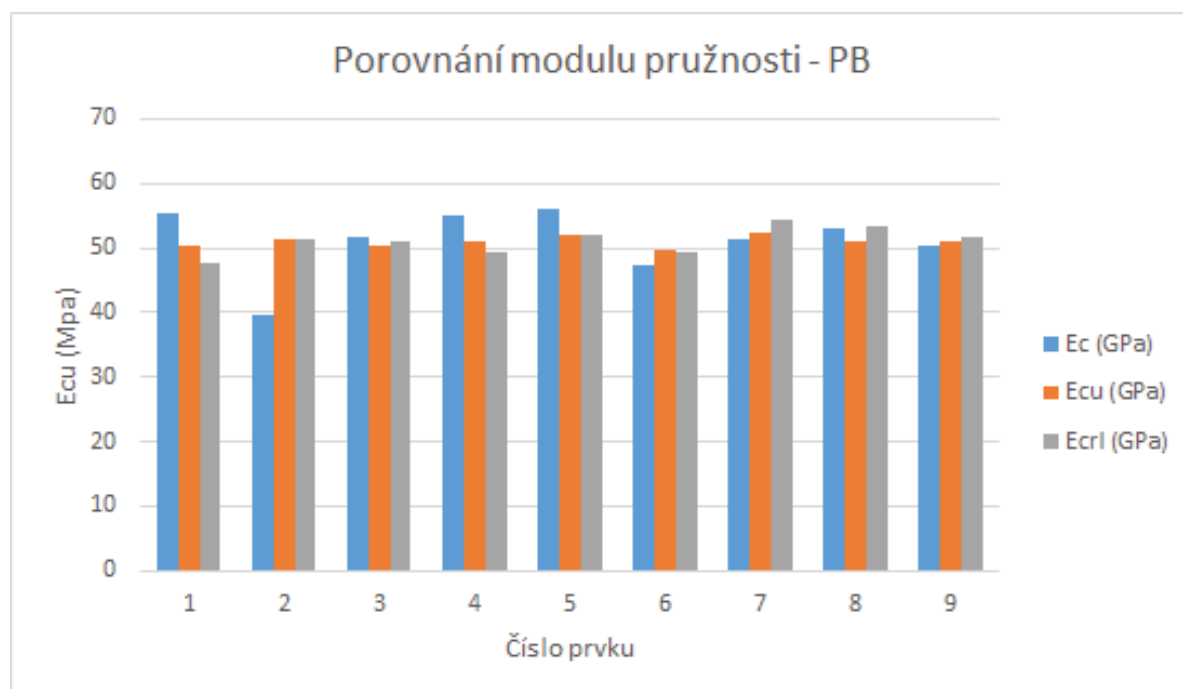
Označení	E_c [GPa]	E_{cu} [GPa]	κ_u	celkem κ_u	E_{csl} [GPa]	κ_R	celkem κ_R
UHPC1	65,29	69,68	0,94	0,85	55,53	1,18	1,08
UHPC2	59,53	70,96	0,84		55,46	1,07	
UHPC3	60,91	68,87	0,88		54,20	1,12	
UHPC4	57,78	68,72	0,84		54,51	1,06	
UHPC5	50,18	68,51	0,73		52,86	0,95	
UHPC6	57,73	68,95	0,84		53,44	1,08	
UHPC7	61,19	70,09	0,87		55,50	1,10	
UHPC8	58,25	68,51	0,85		55,53	1,05	
UHPC9	59,84	69,48	0,86		55,31	1,08	

Pokud přenásobíme výsledným redukčním součinitelem příslušné dynamické moduly pružnosti z jednotlivých zkoušek získáme hodnoty uvedené v tabulkách 4.27, 4.28 a 4.29. Kvůli přehlednosti jsou jednotlivé hodnoty vykresleny v grafech 4.26, 4.27 a 4.28.

Tabulka 4.27: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro prostý beton

Označení	E_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	G_{crl} [GPa]
PB1	55,30	50,28	47,69
PB2	39,66	51,53	51,41
PB3	51,79	50,35	51,14
PB4	54,90	51,09	49,40
PB5	56,10	52,17	51,96
PB6	47,23	49,67	49,45
PB7	51,28	52,44	54,47
PB8	53,14	51,16	53,33
PB9	50,34	51,12	51,78

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

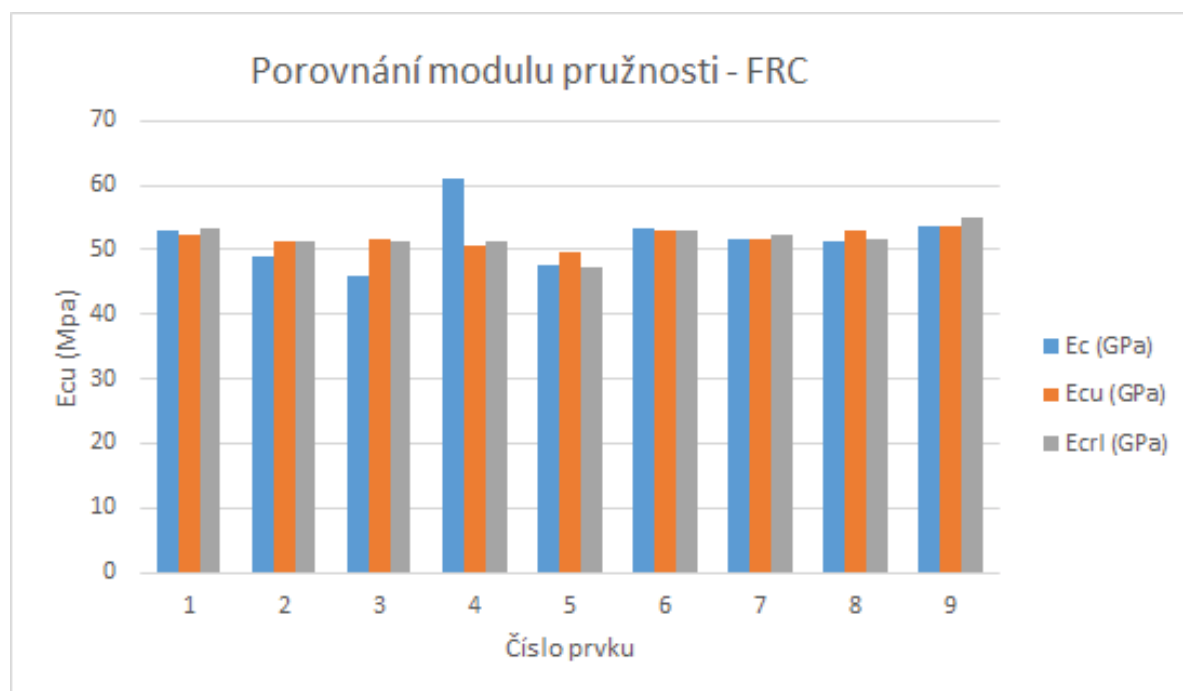


Obrázek 4.26: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro prostý beton

Tabulka 4.28: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro drátkobeton

Označení	E_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	G_{crl} [GPa]
FRC1	52,92	52,36	53,44
FRC2	48,90	51,20	51,48
FRC3	46,00	51,64	51,29
FRC4	60,99	50,74	51,29
FRC5	47,58	49,65	47,24
FRC6	53,37	52,98	53,17
FRC7	51,71	51,64	52,30
FRC8	51,40	52,85	51,59
FRC9	53,69	53,58	54,89

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

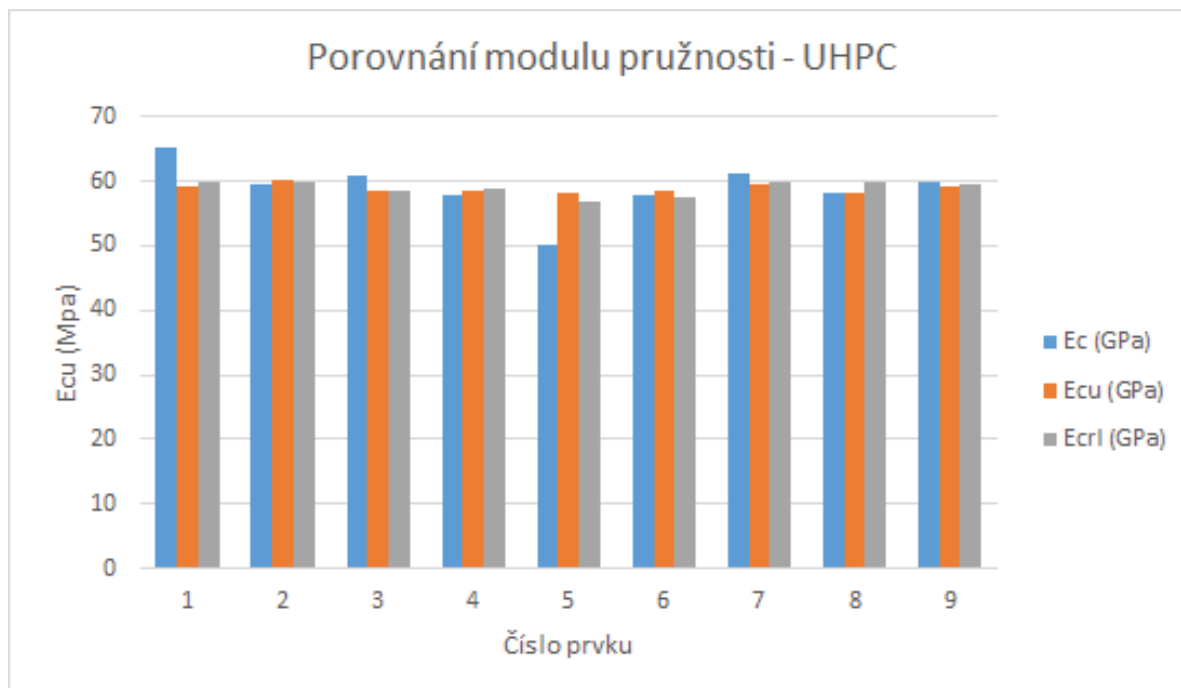


Obrázek 4.27: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro drátkobeton

Tabulka 4.29: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton

Označení	E_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	G_{crl} [GPa]
UHPC1	65,29	59,27	59,82
UHPC2	59,53	60,36	59,75
UHPC3	60,91	58,58	58,39
UHPC4	57,78	58,45	58,73
UHPC5	50,18	58,28	56,95
UHPC6	57,73	58,65	57,57
UHPC7	61,19	59,62	59,79
UHPC8	58,25	58,28	59,83
UHPC9	59,84	59,10	59,58

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI



Obrázek 4.28: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton

Při porovnání jednotlivých statických modulů u prostého betonu na grafu 4.26 je vidět, že hodnoty kolísají. Nejvíce odpovídají statickému modulu pružnosti zjištěné při zkoušce v tlaku hodnoty impulzní metody.

U drátkobetonu v grafu 4.27 jsou hodnoty více vyrovnané než u prostého betonu. Nejvíce se shodují moduly pružnosti zjištěné ze zkoušky v tlaku s hodnotami získanými impulzní metodou. Největšího rozdílu dosahují hodnoty vzorku č. 4, kdy naměřený statický modul pružnosti z tlakové zkoušky dosáhl hodnoty 60,99 GPa zatím co hodnoty impulzní metody dosahují mezi 50,74 a rezonanční 51,29 GPa.

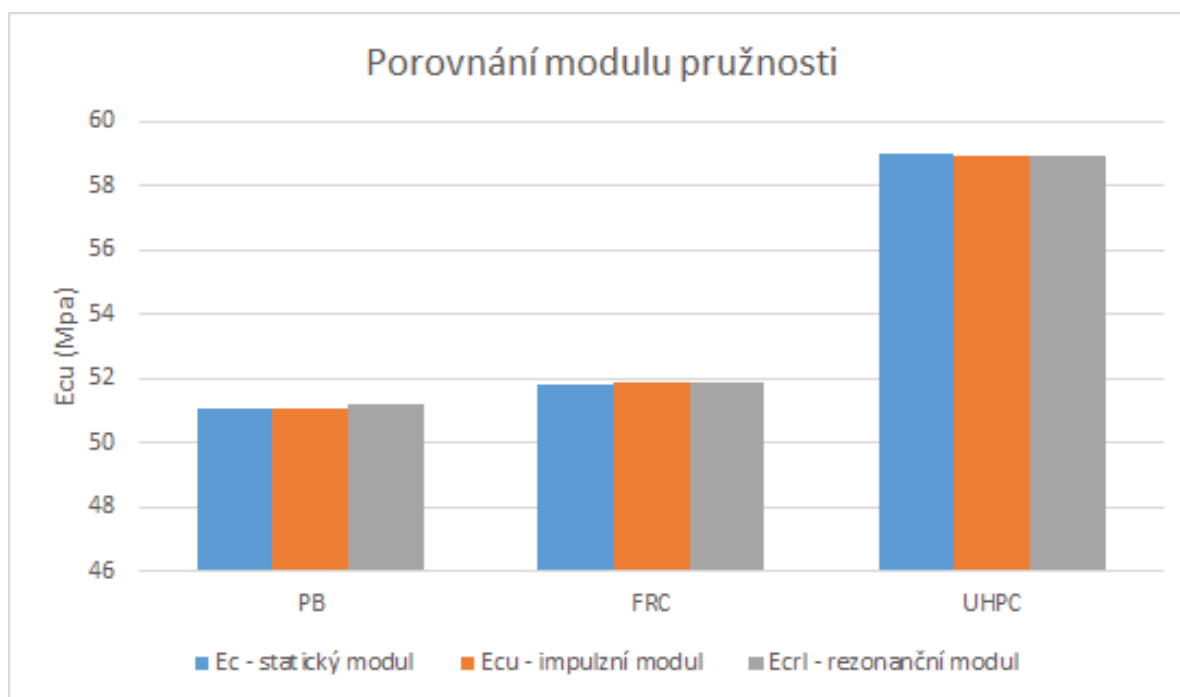
U vysokohodnotného betonu v grafu 4.28 výsledky opět značně kolísají. V tomto případě statickému tlakovému modulu pružnosti nejvíce odpovídají hodnoty získané při rezonanční zkoušce. U tohoto betonu byly výsledky získané při impulzní zkoušce u poloviny případů vyšší než výsledky z tlakové zkoušky.

Pro snadnější posouzení byly hodnoty zprůměrovány a vypsány v tabulce 4.30 a vykresleny v grafu 4.29.

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

Tabulka 4.30: Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti pro vysokohodnotný beton

Označení	E_{cr} [GPa]	E_{cu} [GPa]	G_{crl} [GPa]
PB	51,08	51,09	51,18
FRC	51,84	51,85	51,86
UHPC	58,97	58,95	58,93



Obrázek 4.29: Výsledné průměrné hodnoty statických modulů pružnosti

Pro možnost posouzení bylo rozhodnuto, že statický modul získaný ze zkoušky modulu pružnosti v tlaku zde označovaný jako E_c je nejpřesnější a ostatní výsledky jsou vyhotoveny pro porovnání zkušebních metod.

Při zhodnocení výsledků pomocí průměrných hodnot všech statických modulů pružnosti naměřených u prostého betonu dosahují nejlepší shody u všech postupů. Rozdíly u tohoto druhu materiálu bylo dosaženo minimálních rozdílů. V tomto případě se jednotlivé hodnoty modulů pružnosti postupně zvyšují, kde nejnižší hodnoty dosáhl statický modul pružnosti z tlakové metody a nejvyššího výsledku dosáhla rezonanční metoda. Rozdíl mezi jednotlivými metodami je však zcela minimální. Tudíž můžeme říci, že nejpřesnějších hodnot dosáhla metoda impulzní.

Stejně dopadly zprůměrované hodnoty u drátkobetonu V tomto případě se nedá

4.5. POROVNÁNÍ STATICKÉHO A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

jednoznačně určit který z výsledků je nejpřesnější pro porovnání rozdíl je zde opět minimální.

Stejně dopadly hodnoty u vysokohodnotného betonu.

Kapitola 5

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjištění a posouzení modulů pružnosti změřené třemi různými metodami na třech různých druzích betonu.

Beton je spíše nehomogenní materiál, a proto je měření jeho modulů složitější, jak již bylo popsáno dříve. Je otázkou, kterým ze způsobů měření se získají nejpřesnější hodnoty. Mezi odbornou veřejností se na zpřesnění jeho hodnot začíná klást postupně více a více důrazu. Proto je důležité vědět jakým postupem se dá nejlépe změřit a posoudit.

Modul pružnosti je závislý na poměrech a vlastnostech jednotlivých složek, ze kterých je směs vyrobena. Zároveň je ovlivňován druhem jejich uložení během zrání a tvrdnutí těles a vlastnostmi prostředí ve kterém se uchovávají. Dalším způsobem, který je schopen hodnoty měnit je přesnost provedení příslušných zkoušek. Všechny tyto prvky mohly mít vliv na výsledné hodnoty zjištěné během experimentu.

V této práci byl pro jeho posouzení zvolen jako nejpřesnější modul pružnosti získaný ze zkoušky v tlaku. Při takovém měření se získají hodnoty z přímého zatěžování a porušení materiálu a výsledkem je takzvaný statický modul pružnosti. Hodnoty získané z impulsní metody a z rezonanční metody se použili pro porovnání, kvůli způsobu jejich získání. To je přepočtem změřeného času a délky vlny procházející tělesem a jsou závislé na fyzikálně mechanických vlastnostech konkrétního betonu. Z těchto zkoušek byl získán dynamický modul pružnosti.

Jak již názvy jednotlivých modulů pružnosti napovídají, nejedná se o stejné hodnoty. Pro jejich porovnání bylo nutné je nejdříve převést. Pro posouzení se zvolil modul pružnosti statický, který odpovídá sečnovému modulu.

Zkoušení probíhalo ve stáří vzorků 28 dní u poloviny vyrobených těles a ve stáří 50 až

80 dní po jejich zhotovení podle druhu betonu u druhé poloviny těles. Samotné zkoušky byly prováděny podle postupů uváděných v normách. Kdy nejprve proběhly zkoušky ultrazvukovou impulzní metodou následovanou tlakovou zkouškou na polovině vyrobených vzorků a rezonanční zkouškou na druhé polovině trámečků. Poslední prováděnou zkouškou byla tlaková zkouška pro získání modulu pružnosti.

Při porovnání výsledků jednotlivých zkoušek na určitém druhu betonu bylo zjištěno, že výsledné hodnoty kolísají v určitém rozmezí u všech záměsů a vzorků. Z výsledků se nedá jednoznačně určit, který postup měření je nejvýhodnější.

Pokud bychom hodnotily podle výsledků získaných pomocí normy, dojdeme k závěru, že převodní koeficienty jsou v dnešní době nevyhovující. Při porovnání statického modulu pružnosti s moduly pružnosti získanými přes dynamické metody dostaneme jasný výsledek, hodnoty se ani v jednom z případů neshodují. Naopak značně klesají s použitím náročnějšího měření.

Nejbližší hodnota ke statickému modulu pružnosti v tlaku je pak získaná z impulzní metody, kdy její hodnoty jsou o několik GPa nižší než srovnávací veličiny a výsledky získané z rezonanční zkoušky jsou ještě menší.

Dalším problémem u porovnání pomocí normy jsou chybějící koeficienty pro betony vyšších pevnostních tříd, než je C 45/55. To je ovšem v dnešní době se zvyšujícím se využíváním vysokohodnotných betonů problémem.

Z tohoto důvodu se došlo k závěru, že je nutné normu opravit a aktualizovat pro betony vyráběné v dnešní době zmodernizovanými postupy, s kvalitnějšími materiály a novými přísadami, než byly vyráběny před 30 lety kdy byla tato norma publikována.

Pro přesné zhodnocení vhodnosti použitých metod jako náhradu za destruktivní zkoušení se doporučilo provést dlouhodobé zkoušení na více vzorcích daných materiálů uložených v různém prostředí. Měření by se zároveň mělo uskutečnit na různých druzích zkušebních vzorků.

Literatura

- [1] Pavel Pytlík. Technologie betonu. druhé vydání, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] Modul pružnosti EBETON, 2012.
<http://www.ebeton.cz>, stav z 4.3.2018.
- [3] HEIDELBERGCEMENT Group: Příručka technologa beton. první vydání, 2010.
- [4] O betonu. ZAPA.
http://www.zapa.cz/o_betonu/, stav z 5.4.2018.
- [5] P. C. Aitcin. Vysokohodnotný beton, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [6] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006.
- [7] ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, 2016.
- [8] ČSN EN 73 12390-13: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku), 2014.
- [9] ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, 2005.
- [10] ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu – rezonanční metoda zkoušení betonu, 2012.
- [11] Časopis beton. vydání 2/2015, str. 6.
- [12] ČSN EN 12390-3:2009 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, 2009.
- [13] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí, 2012.

Příloha A

Seznam použitých zkratk

CEM - cement

ČSN - České technické normy

ČSN EN - Evropské normy přijaté do českých technických norem

ISO - Mezinárodní organizace pro standardy (International Organization for Standardization)

PB - prostý beton

FRC - drátkobeton

UHPC - vysokohodnotný beton