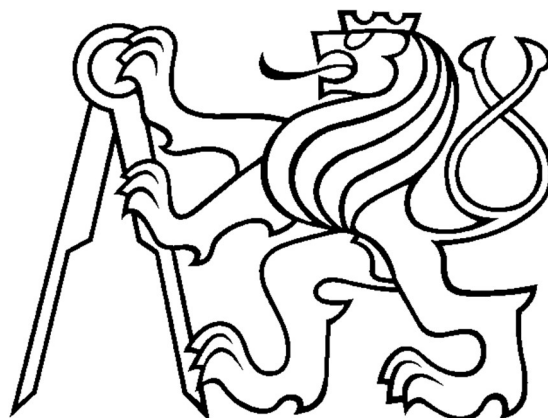


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA MECHANIKY



DISERTAČNÍ PRÁCE

Vliv prostředí na materiálové charakteristiky betonu a sádry

červenec 2018

Ing. Richard Ťoupek



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA MECHANIKY

Vliv prostředí na materiálové charakteristiky betonu a sádry
The influence of environment on the material characteristics
of concrete and plaster

Studijní program:	Stavební inženýrství (SI)
Studijní obor:	Fyzikální a materiálové inženýrství (FMI)
Školitel:	Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
Vypracoval:	Ing. Richard Ťoupek

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Tomáše Plachého, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Děkuji za konzultace vedoucímu disertační práce Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. a zároveň děkuji Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při tvorbě disertační práce.

Vliv prostředí na materiálové charakteristiky betonu a sádry

The influence of environment on the material characteristics
of concrete and plaster

ABSTRAKT:

Disertační práce je zaměřena na popis mechanických vlastností sádry a betonu v návaznosti na praktické využití při návrhu konstrukcí a výstavbě. Teoretická část práce je věnována zkušebním metodám, souvisejícím normám a stanovování materiálových charakteristik. V teoretické části práce jsou podrobně popsány testované materiály. Praktická část se zabývá stanovením mechanických vlastností sádrových a betonových vzorků. Laboratorní zkoušení bylo prováděno za pomoci destruktivních a nedestruktivních metod. Je řešeno, jak se mění materiálové charakteristiky vzorků v závislosti na obsahu vlhkosti, stáří a teplotě. Při experimentech bylo na jedné straně využito rezonanční metody a ultrazvuku, na straně druhé byly destruktivními zkušebními metodami stanoveny pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, statické moduly pružnosti a hloubky průsaku vybraných zkušebních vzorků. V jednotlivých kapitolách jsou srovnány hodnoty mechanických vlastností určených za pomoci uvedených metod. Výsledky experimentů jsou ověřeny na stovkách vzorků. Výsledky jsou jedním z kroků k bližšímu poznání chování materiálů na bázi cementu a sádry a mimo jiné slouží pro provedení průkazních zkoušek betonů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Nedestruktivní metody, destruktivní metody, sádra, beton, mechanické vlastnosti, vliv prostředí

ABSTRACT:

The PhD thesis is focuses on the description of the mechanical properties of plaster and concrete in connection with the practical application in design and construction. The theoretical part is devoted to description of test methods, related norms and determination of material characteristics. In the theoretical part of the thesis, the tested materials are described in detail. The practical part deals with determination of mechanical properties of plaster and concrete samples. Laboratory testing was performed using destructive and non-destructive methods. It is investigated how the material characteristics of the samples vary depending on the moisture content, age and temperature. In the experiments, resonance and ultrasound methods were used on the one hand and on the other hand, compressive strengths, transverse tensile strength, static elastic modulus and leakage depth of selected test specimens were determined by destructive test methods. The individual chapters compare the values of the mechanical properties determined using these methods. The results of the experiments are verified on hundreds of samples. The results are one of the steps to a closer understanding of the behaviour of cement and plaster based materials and, among other things, are used to carry out concrete proofing tests.

KEYWORDS:

Nondestructive methods, destructive methods, plaster, concrete, mechanic properties, influence of environment

OBSAH:

1.	ÚVOD	8
2.	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ VZORKŮ VYROBENÝCH ZE SÁDRY A BETONU	9
2.1.	NEDESTRUKTIVNÍ METODY	10
2.2.	DESTRUKTIVNÍ METODY	23
2.3.	KOMPARACE NEDESTRUKTIVNÍCH A DESTRUKTIVNÍCH METOD	29
3.	POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ VZORKY	30
3.1.	GYPSTREND ŠEDÉ SÁDROVÉ POJIVO	30
3.2.	ENERGOSÁDRA	32
3.3.	BETON	34
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ SÁDROVÝCH VZORKŮ	50
4.1.	GYPSTREND ŠEDÉ SÁDROVÉ POJIVO	50
4.2.	ENERGOSÁDRA	66
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ BETONOVÝCH VZORKŮ	75
5.1.	BETONY, PROJEKT VISIONARY	75
5.2.	BETON C30/37, PROJEKT CORSO COURT	87
5.3.	OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY	91
6.	ZÁVĚR	93
7.	POUŽITÁ LITERATURA, PODKLADY	95
8.	SEZNAMY	99

1. ÚVOD

Zkušební metody jsou ve stavebnictví standardně používány pro popis materiálových charakteristik stavebních materiálů a konstrukcí. Zkušebnictví je nástrojem při výzkumu a vývoji stávajících a nových stavebních materiálů. Prováděním experimentálních zkoušek je možné ověřit chování materiálů, stanovit vliv vnějších podmínek na testované materiály a predikovat změnu materiálových charakteristik v návaznosti na tyto podmínky. V neposlední řadě je možné za pomoci experimentů provádět průkazní, kontrolní a ověřovací zkoušky a popsat stávající stav nebo vady konstrukčních částí a celků.

Experimentální metody používané ve stavebnictví jsou často děleny na destruktivní a nedestruktivní. Vybrané metody z těchto skupin jsou v disertační práci použity pro stanovení materiálových vlastností sádry a betonu. Předmětem disertační práce je využití zkušebních metod pro podrobné popsání chování sádry a betonu v závislosti na vnějších vlivech prostředí. Experimentální testování umožňuje prokázat požadované vlastnosti použitých materiálů při výstavbě a srovnat vlastnosti vybraných materiálů s projekčním návrhem.

V disertační práci jsou v jednotlivých kapitolách podrobně popsány použité vzorky a materiály a použití těchto materiálů v praxi. Experimentálně určené materiálové vlastnosti sádry a betonu jsou v disertační práci stanoveny nedestruktivními metodami – rezonanční a ultrazvukovou průchodovou metodou a metodami destruktivními – pevnosti v tlaku a příčném tahu, stanovení statického modulu pružnosti a hloubku průsaku tlakovou vodou. Výsledky experimentálních zkoušek jsou porovnány v čase a při vlivu různých prostředí.

Betonové vzorky byly vyráběny v průběhu realizace dvou administrativních budov v Praze. Vyrobené vzorky byly rozděleny do skupin a zkoušeny nezávisle ve čtyřech různých laboratořích v průběhu roku 2017. S ohledem na velké množství zkušebních vzorků bylo možné podrobně stanovit materiálové charakteristiky betonu a jejich vývoj v čase.

Cílem disertační práce je blíže popsat mechanické vlastnosti sádry v závislosti na vlhkosti vzorků, teplotě okolního prostředí a staří vzorků a sledovat vývoj těchto parametrů dlouhodobě od okamžiku jejich výroby. Oproti tomu u betonových vzorků je kladen důraz na prokázání správnosti návrhu receptury betonové směsi s krystalizační přísadou a provedení ověřovací zkoušky.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ VZORKŮ VYROBENÝCH ZE SÁDRY A BETONU

Pro experimentální zjišťování materiálových charakteristik těles na bázi cementových a sádrových pojiv jsou používány destruktivní a nedestruktivní zkušební metody. Z destruktivních metod jsou v disertační práci použity zkoušky pevnosti v tlaku a příčném tahu a zkouška průsaku tlakovou vodou. Pro nedestruktivní zkoušení materiálů je nejčastěji slouží rezonanční metoda, ultrazvuková metoda, akustická emise, rentgenová difrakce, radiografie a radioskopie. Pro účely této práce byly z nedestruktivních metod zvoleny rezonanční a ultrazvuková průchodová metoda.

Opakovatelnost provádění experimentálních zkoušek nedestruktivními metodami na témže vzorku je nespornou výhodou. Pro určení materiálových vlastností nemusí být vyráběno velké množství vzorků, jako tomu je při provádění zkoušek destruktivních.

Zkoušení sádrových a betonových vzorků nedestruktivními metodami bylo prováděno v čase za různých okolních vlivů. V průběhu testování byly stanovovány materiálové charakteristiky za různých teplotních a vlhkostních stavů v různém čase od výroby vzorků.

Nedestruktivní metody jsou významné také pro zkoušení stávajících konstrukcí. Pomocí těchto metod zjišťujeme vlastnosti nosných i nenosných konstrukčních částí nebo celků. V případě zkoušek stávajících konstrukcí hodnotíme chování konstrukce jako celku. Vzhledem k funkčnosti a používání stávající testované konstrukce není možné použít destruktivní zkoušku proto, aby nebyla konstrukce poškozena.

Experimentální zkoušky jsou běžně kombinovány. Destruktivní zkoušky jsou doplněny zkouškami nedestruktivními a naopak. Tímto způsobem je dosaženo přesnějších hodnot testovaných materiálových vlastností. Při kombinaci zkoušek je rovněž možné podrobně popsat chování celých konstrukcí.

2.1. NEDESTRUKTIVNÍ METODY

Pro výzkum vlastností materiálů je ve stavebnictví a strojírenství běžné využití nedestruktivních zkušebních metod. Nedestruktivní zkušební metody mají nezastupitelnou úlohu ve stanovení mechanických vlastností materiálů a konstrukcí. V předchozí kapitole je uvedeno šest nejvýznamnějších nedestruktivních zkušebních metod. V disertační práci je pro stanovení materiálových charakteristik sádrových a betonových vzorků použita rezonanční a ultrazvuková průchodová metoda. Uvedené zkušební metody jsou vhodné pro experimentální stanovení vlastností porézních materiálů, které jsou předmětem disertační práce. Nedestruktivní metody jsou také aplikovatelné při řešení drobných defektů částí konstrukcí i při zjišťování vlastností konstrukčních celků.

Předmětem disertační práce je mimo jiné komparace výsledků nedestruktivních zkoušek se zkouškami destruktivními. Porovnání bylo provedeno na sádrových i betonových vzorcích, přičemž byly vybrané materiálové charakteristiky sádrových vzorků srovnány mezi oběma aplikovanými nedestruktivními metodami.

2.1.1. Rezonanční metoda

Rezonanční metoda je velmi efektivní nedestruktivní metoda, která určuje materiálové vlastnosti na základě vlastních frekvencí podélného, ohybového i torzního kmitání zkušebních vzorků. Na základě této metody je možné sledovat změny materiálových vlastností porézních stavebních materiálů v čase, v závislostech na vlhkosti, teplotě, stáří vzorku, místě a způsobu uložení.



Obrázek 2-1 Těleso připravené pro rezonanční zkoušku (torzní kmitání)

Při laboratorním zkoušení v rámci disertační práce byly za pomoci nedestruktivní rezonanční metody stanoveny dynamické moduly pružnosti sádrových a betonových vzorků. Dynamické moduly pružnosti byly podle vzorců (2) a (3) stanoveny ze získaných hodnot základních rezonančních frekvencí kmitání.

Při úderu rázovým kladívkem do testovaného vzorku jsou v závislosti na čase naměřeny hodnoty zrychlení $r''(t)$ a velikost síly při úderu $F(t)$. Za použití FFT (Fast Fourier Transform) jsou převedeny hodnoty zrychlení $r''(f)$ a síly $F(f)$ z časové oblasti do frekvenční oblasti. Z těchto funkcí je vyhodnocena přenosová funkce (Frequency Response Function - FRF) [28], která je definována následujícím vztahem:

$$H_r(f) = \frac{r''(f)}{F(f)}, \quad (1)$$

kde $H_r(f)$ je přenosová funkce (FRF),
 $r''(f)$ funkce zrychlení ve frekvenční oblasti,
 $F(f)$ funkce síly ve frekvenční oblasti.

Z přenosové funkce (FRF) se určí základní rezonanční frekvence pro řešené kmitání. Ze základní rezonanční frekvence, rozměrů a hmotnosti vzorku se stanoví dynamický modul pružnosti E_d , případně dynamický modul pružnosti ve smyku G_d , a na základě těchto veličin je následně možné určit vztahem (9) Poissonovo číslo ν . Resonanční metoda byla v průběhu experimentálních zkoušek použita celkem zhruba při tisíci měřeních různých sádrových a betonových vzorků. Jednotlivá měření a vyhodnocení materiálových charakteristik jsou uvedena v kapitolách 4 a 5.

Při nedestruktivní rezonanční metodě je velmi důležité nezanedbat okolní vlivy, aby neovlivňovaly přesnost měření. Především se jedná o uložení zkoušených těles (jednotlivým zkouškám odpovídá různé uložení – záleží na tom, jakým způsobem budíme kmitání vzorku a o jaký typ kmitání se při dané zkoušce jedná), o přichycení senzoru k tělesu a v neposlední řadě o způsobu a místě úderu rázovým kladívkem do testovaného vzorku. Způsob uchycení senzoru, použití lepidel anebo gum je provedeno dle ČSN EN 14146 a dle ČSN ISO 18437-2. V případě zkoušek prováděných pro účely disertační práce byl senzor běžně upevněn přes velmi tenkou vrstvu včelího vosku (cca 0,2 mm).

- *Příklad stanovení dynamického modulu pružnosti*

Pro příklad je uvedeno stanovení dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou (první vlastní frekvence podélného kmitání) na vzorcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm.

Těleso je před měřením uloženo do vodorovné pozice, přičemž je uprostřed délky podepřeno měkkou podporou z pěněného polyuretanu v místě uzlové linie 1. vlastního tvaru podélného kmitání. U takto připraveného tělesa se měří rezonanční frekvence podélného kmitání (Obrázek 2-3). Pro potřeby níže uvedených výpočtů se určí základní rezonanční frekvence podélného kmitání, se kterou se dále pracuje při stanovení dynamického modulu pružnosti.

Samotná budící síla je při rezonanční zkoušce vyvolána kladívkem Brüel&Kjær typ 8206 (Obrázek 2-2). Úder je veden do určené plochy připraveného vzorku dle schématu zkoušky (Obrázek 2-5). Na opačné straně tělesa je pomocí vosku připevněn snímač zrychlení Brüel&Kjær typ 4519-003. Stanice Brüel&Kjær Front-end 3560-B-120 zpracovává signál z obou prvků (kladívka a snímače zrychlení). Na základě FFT jsou signály zpracovány za pomoci software PULSE 14.0.



Obrázek 2-2 Rázové kladívko Brüel&Kjær typ 8206



Obrázek 2-3 Těleso připravené pro rezonanční zkoušku (podélné kmitání)

Při provádění rezonanční zkoušky bylo pro vyhodnocení FRF nastaveno průměrování z pěti měření. Do dalšího výpočtu se zaznamenávají hodnoty, které se při pěti měřeních vzájemně neliší více než o $\pm 1\%$.

- *Mechanické vlastnosti stanovené rezonanční metodou dle ČSN a ASTM*

Další část disertační práce je věnována stanovení dynamického modulu pružnosti, dynamického modulu pružnosti ve smyku a Poissonova čísla, které udávají technické normy (ČSN a ASTM). V kapitole jsou uvedeny rozdíly mezi stanovením hodnot modulů pružnosti podle českých technických norem a technických norem ze Spojených států amerických.

Nedestruktivní rezonanční metodou lze určit základní materiálové charakteristiky stavebních materiálů, například dle ČSN EN 843-2 (Metoda B: Rezonanční metoda), jež uvádí výpočet, kterým je možné stanovit výše uvedené charakteristiky testovaného vzorku na základě podélného kmitání zkušební vzorku.

Pro výpočet dynamického modulu pružnosti zkušební tělesa obdélníkového průřezu platí vztah:

$$E_d = \frac{4 l m f_1^2}{b h}, \quad (2)$$

kde	E_d	dynamický modul pružnosti [Pa],
	f_1	základní rezonanční frekvence pro podélné kmitání [Hz],
	b	šířka zkušební vzorku [m],
	h	výška zkušební vzorku [m],
	l	délka zkušební vzorku [m],
	m	hmotnost zkušební vzorku [kg].

V další části ČSN EN 843-2 (Metoda B: Rezonanční metoda) je stanoven postup pro výpočet dynamického modulu pružnosti E_d z ohybového kmitání zkušební vzorku obdélníkového průřezu. Pro určení hodnoty dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku platí vztahy:

$$E_d = 0,9464 \left(\frac{m f_r^2}{b} \right) \left(\frac{l}{h} \right)^3 A_f, \quad (3)$$

kde E_d dynamický modul pružnosti [Pa],
 f_r první vlastní frekvence pro základní tvar ohybového kmitání [Hz],
 b šířka zkušební vzorku [m],
 h výška zkušební vzorku [m],
 m hmotnost zkušební vzorku [kg],
 l délka zkušební vzorku [m],
 A_f tvarový faktor [-] daný vztahem:

$$A_f = 1 + 6,585 \left(\frac{h}{l}\right)^2. \quad (4)$$

Je důležité na tomto místě poznamenat, že ČSN EN 843-2 „Speciální technická keramika“ počítá s tvarovým faktorem A_f , který platí v případě, kdy je poměr délky l ku výšce vzorku h větší nebo roven 20 ($l/h \geq 20$). Technická norma ASTM E1876-01 „Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration“ do rovnice pro výpočet dynamického modulu pružnosti ze základní rezonanční frekvence ohybového kmitání dosazuje vliv Poissonova poměru dle vztahu (8) pro $l/h < 20$.

Vztah pro určení E_d v případě $l/h < 20$:

$$E_d = 0,9464 \left(\frac{m f_r^2}{b}\right) \left(\frac{l}{h}\right)^3 T_1, \quad (5)$$

kde T_1 je korekční faktor [-] daný vztahem:

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752 \mu + 0,8109 \mu^2) \left(\frac{h}{l}\right)^2 + \\ + 0,868 \left(\frac{h}{l}\right)^4 - \left[\frac{8,340(1+0,2023 \mu+2,173 \mu^2) \left(\frac{h}{l}\right)^4}{1+6,338(1+0,1408 \mu+1,536 \mu^2) \left(\frac{h}{l}\right)^2} \right], \quad (6)$$

kde ν Poissonovo číslo [-].

Další důležitou materiálovou vlastnost představuje dynamický modul pružnosti ve smyku G_d , který se stanoví dle vztahu:

$$G_d = \left(\frac{4lmf_t^2}{bh} \right) A_t, \quad (7)$$

kde G_d dynamický modul pružnosti ve smyku [Pa],
 f_t první vlastní frekvence pro základní tvar torzního kmitání [Hz],
 b šířka zkušební vzorku [m],
 h výška zkušební vzorku [m],
 l délka zkušební vzorku [m],
 m hmotnost zkušební vzorku [kg],
 A_t tvarový faktor [-] daný vztahem:

$$A_t = \frac{\left(\frac{h}{b}\right) + \left(\frac{b}{h}\right)}{4\left(\frac{h}{b}\right) - 2,52\left(\frac{h}{b}\right)^2 + 0,21\left(\frac{h}{b}\right)^6}. \quad (8)$$

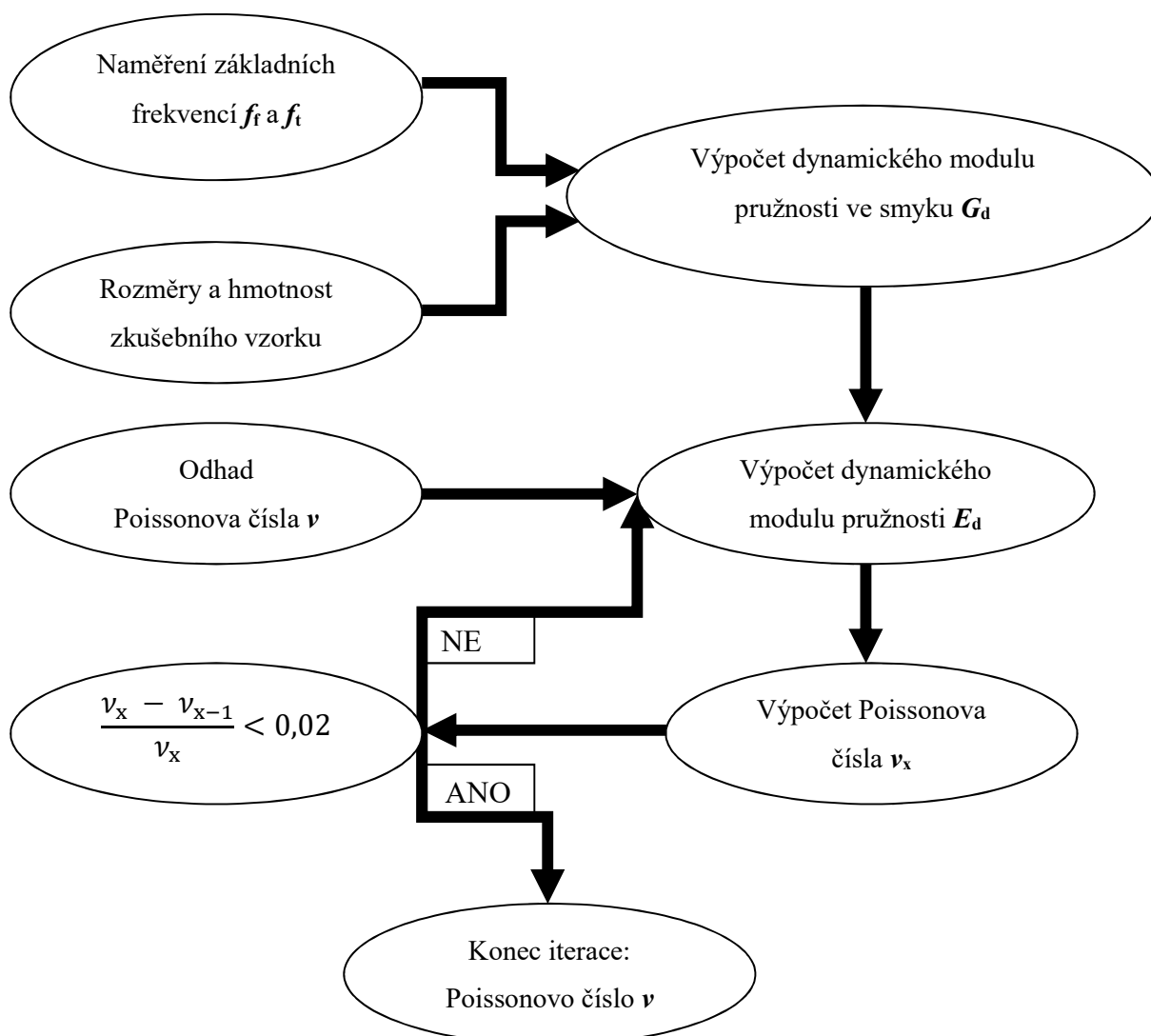
Rovnice (9) platí pouze za předpokladu $b \leq h$, tato podmínka byla při experimentálním zkoušení v laboratoři ve všech případech splněna.

- Výpočet Poissonova čísla je dán vztahem:

$$\nu = \frac{E_d}{2 G_d} - 1. \quad (9)$$

Jak je z výše uvedených vztahů patrné, tak pro přesné dopočítání Poissonova čísla a dynamického modulu pružnosti z ohybového kmitání zkušební vzorku je nutné použít iterační kroky, díky kterým se započítá vliv korekčního faktoru T_1 (7). Postup výpočtu je přiblížen následujícím schématem a komentářem (Obrázek 2-4). Postup je převzat z technické normy ASTM E 1876 – 01 [15].

- PROCES VÝPOČTU POISSONOVA ČÍSLA A DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI PODLE ASTM E 1876 - 01:



Obrázek 2-4 Proces stanovení Poissonova čísla podle ASTM 1876-01 [15]

V uvedeném schématu je popsán postup výpočtu E_d , G_d a ν testovaných vzorků na základě rezonanční zkoušky. Ze základní rezonanční frekvence torzního kmitání, změřených rozměrů a hmotnosti testovaného vzorku m se výpočtem určí dynamický modul pružnosti ve smyku G_d . Na základě odhadu Poissonova čísla se stanoví (za pomoci korekčního faktoru T_1) dynamický modul pružnosti testovaných vzorků. Dále se ze vztahu pro určení Poissonova čísla (9) určí hodnota ν_x . Porovnáním hodnot ν_x a ν_{x-1} se rozhodne o dalším postupu, zda je vhodné dále iterovat nebo se naopak iterací dospělo ke správné a konečné hodnotě Poissonova čísla.

- *Faktory ovlivňující přesnost rezonanční zkoušky [22]*

V informativní příloze A ČSN EN ISO 12680-1 je uvedena analýza chyb při použití rovnic pro stanovení dynamického modulu pružnosti. V tabulce 1 jsou vypsané hlavní proměnné, které mají přímý dopad na výpočet výše zmíněných materiálových charakteristik. Tabulka faktorů ovlivňující přesnost provedení a výsledků rezonančních zkoušek je shodná s platnou americkou technickou normou ASTM E 1876 – 01.

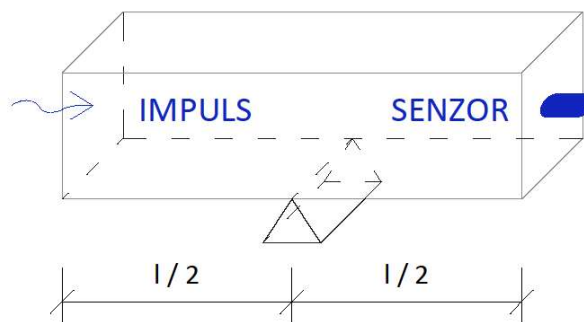
Tabulka 1 Vliv chyb měření proměnných na vypočítaný E_d dle ČSN ISO 12680-1

Veličina, jednotka	Chyba stanovení [%]	Mocnina proměnné v rovnici pro výpočet Youngova modulu	Jednotka	Vypočtená chyba dynamického modulu pružnosti [%]
Frekvence, f	1	f^2	Hz	2
Délka vzorku, l	1	L^3	m	3
Hmotnost vzorku, m	1	m	kg	1
Šířka vzorku, b	1	b^{-1}	m	1
Výška vzorku, h	1	h^{-3}	m	3

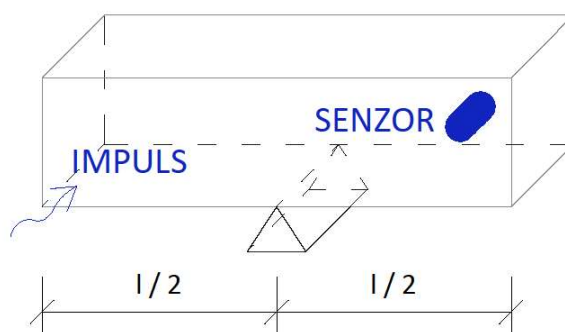
- *Parametry pro rezonanční zkoušku dle ČSN EN 14146 a ASTM C215*

Česká technická norma [20] udává způsob vyvolání podélného kmitání testovaného vzorku za pomoci rázového kladívka a způsob snímání podélných kmitů (Obrázek 2-5). Uvedeného způsobu vyvolání podélného kmitání sádrových a betonových vzorků bylo využito při experimentálním zkoušení.

Při zkoušení vzorků nedestruktivní rezonanční metodou bylo sledováno chování vzorků při vybuzení torzního kmitání testovaného sádrového vzorku. Bylo použito uspořádání buzení a snímání kmitání podle americké normy [14] (Obrázek 2-6). Na obrázku (Obrázek 2-6) je znázorněn také základní vlastní tvar torzního kmitání vzorku tvaru hranolu při dodržení předepsaného podepření.

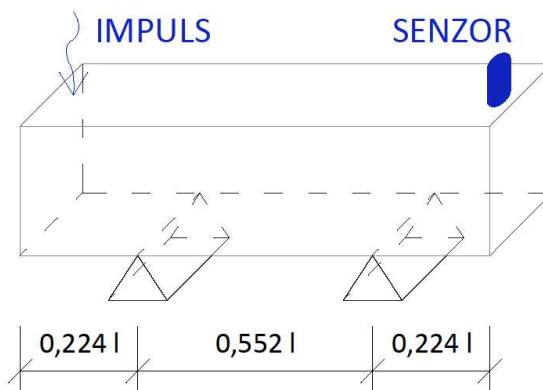


Obrázek 2-5 Poloha senzoru a impulsu pro podélné kmity



Obrázek 2-6 Pozice senzoru a impulsu a základní mód pro torzní kmity

V neposlední řadě je důležité uvést třetí způsob vybuzení kmitání na shodném vzorku tvaru hranolu. V případě, kdy je potřebné získat hodnoty z ohybového kmitání testovaného vzorku, se využívá způsobu excitace podle obrázku (Obrázek 2-7). Při splnění podmínek podepření zkušebního vzorku jsou získány hodnoty rezonanční frekvence odpovídající základnímu vlastnímu tvaru ohybového kmitání (Obrázek 2-7).



Obrázek 2-7 Pozice senzoru a impulsu pro ohybové kmity

2.1.2. Ultrazvuková metoda

Měření ultrazvukem je jeden z nejvíce využívaných procesů měření materiálových vlastností vzhledem k jeho rychlosti a relativní jednoduchosti provedení. Ultrazvuk vyhovuje velmi přesně nedestruktivnímu zkoušení vzorků především díky tomu, že je schopen podávat informace o defektech materiálu, stavu vnitřní struktury látky, velikosti vnitřního pnutí a podobně. Informační parametry ultrazvuku jsou v oblasti zobrazení (rychlost šíření vln), v oblasti časové (útlum ultrazvukových vln) a v oblasti frekvenční (spektrum vln).

Ultrazvukové metody zkoušení se dělí na tři základní ultrazvukové metody – průchodová ultrazvuková metoda, rezonanční ultrazvuková metoda a odrazová ultrazvuková metoda:

- *Metoda průchodová*

Při průchodové ultrazvukové metodě se do testovaného materiálu vysílají vlny z generátoru a měří se akustický tlak těchto vln dopadajících na opačné straně zkušební tělesa na akceptor. Přijímač dokáže vyhodnotit vlastnosti vnitřní struktury vzorku na základě odlišností při dopadu vln (různého akustického tlaku). Podmínky této nedestruktivní zkušební metody jsou následující: vlnová délka vln musí být vzhledem k jejich ohybu menší než nejmenší zkoumaný defekt materiálu; akustická vazba musí být regulovatelná; nastavitelnost ultrazvukových vln pro rozeznání potřebných defektů.

V disertační práci jsou uvedeny výsledky zkoušek ultrazvukem, které byly zadány do zkušební laboratoře Kloknerova ústavu [26]. Byla použita metoda průchodová pro stanovení dynamického modulu pružnosti. V laboratoři Kloknerova ústavu byl použit kalibrovaný ultrazvukový přístroj MATEST C372N, posuvné měřítko 450 mm a elektronické váhy KERN 572-57. Zkoušky probíhaly v souladu s ČSN 73 1371.

- *Příklad stanovení dynamického modulu pružnosti betonového vzorku [21].*

Výpočet dynamického modulu pružnosti se stanoví ze vztahu:

$$E_d = \rho v_1^2 \frac{1}{k^2}, \quad (10)$$

kde E_d dynamický modul pružnosti [MPa],
 ρ objemová hmotnost vzorku [kg / m³],
 v_1 rychlost podélného zvukového impulzu [km / s],
 k součinitel rozměrnosti prostředí. Pro jednorozměrné prostředí $k = 1$.

$$v_1 = \frac{L}{T}, \quad (11)$$

kde L délka měřicí základny [mm],
 T čas, který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μs].

Postup experimentu: Testovaný vzorek se zváží s přesností na 0,1 g a změří se jeho geometrie s tolerancí ± 0,1 mm. Z naměřených údajů se stanoví objemová hmotnost vzorku [kg / m³] podle vztahu (12). Poté se provede zkouška ultrazvukem. Testovaným prvkem třikrát v podélném směru projdou ultrazvukové vlny. Za pomoci ultrazvukového přístroje se určí doba prostupu vlny materiálem s přesností minimálně 0,1 μs. Všechna měření se zprůměrují a stanoví se výsledná hodnota rychlosti v_1 [km / s] dle vztahu (11). Na základě naměřených hodnot se provede výpočet dle vztahu (10).

- *Metoda rezonanční*

Při rezonanční metodě se do zkoušeného materiálu vysílají ultrazvukové vlny, jejichž frekvence se mění. Když se docílí rovnosti mezi tloušťkou prvku a násobku poloviční délky vlny vysílané ultrazvukem, vznikne ve zkoušené části vzorku stojaté vlnění. Při tomto vlnění dodává vysílač minimální energii do tělesa, které se tak dostane do stavu rezonance. Výše uvedeným způsobem se získá základní rezonanční frekvence vzorku. Resonanční metoda se používá například k měření tloušťky materiálů anebo kvality spojů.

- *Metoda odrazová*

Velmi významná součást nedestruktivního zkoušení materiálů vzhledem k tomu, že při odrazové metodě postačí zpřístupnit pouze jednu stranu zkušebního tělesa. Do testovaného vzorku jsou vysílány krátké ultrazvukové impulzy, které se odrážejí od všech akustických rozhraní uvnitř materiálu. Výhodou odrazové metody je to, že se může použít pouze jeden elektroakustický měnič z jedné strany vzorku. Další velmi významnou výhodou je možnost lokalizace vnitřních defektů a struktury materiálu při podstatně horší akustické vazbě než umožňují metody průchodová a rezonanční.

2.1.3. Stanovení objemové hmotnosti

U všech vyrobených a zkoušených betonových vzorků byla dle ČSN EN 12 390-7 stanovena objemová hmotnost. Obecně je potřeba rozlišit v jakém stavu se betonové vzorky měří a váží. Pro potřeby disertační práce byla u všech vzorků objemová hmotnost stanovena ve stavu, v jakém byla tělesa ze stavby dodána. Použitá posuvná měřidla měří s přesností dle 0,5 % a použité váhy váží s přesností do 0,1 % hmotnosti. Objemově a rozměrově tělesa vyhovují požadavkům ČSN EN 12 390-7 a použité kamenivo v betonu C30/37, 90d, XC4, S4 je frakce D_{\max} 16 mm.

Nejprve je každé těleso třikrát na každé straně změřeno a z těchto hodnot se vypočítá průměrná hodnota. Rozměry se vynásobí a vypočte se výsledný objem. Hmotnost testovaného vzorku se stanoví s přesností na 0,01 %. Objemová hmotnost se stanoví ze vztahu:

$$D = \frac{m}{V}, \quad (12)$$

kde D objemová hmotnost [kg / m³],
 m hmotnost tělesa stanovená vážením [kg],
 V objem tělesa stanovený z vnějších rozměrů [m³].

2.1.4. Stanovení tvrdosti betonu odrazovým tvrdoměrem

V průběhu výstavby byly průběžně kontrolovány pevnosti betonu odrazovým tvrdoměrem (Schmidtovo kladívko typ N) u konstrukcí, ze kterých byly odebrány vzorky pro experimentální ověření materiálových vlastností betonu. Hodnoty pevností betonových konstrukcí byly zaznamenávány do stavebního deníku a do kontrolního a zkušebního plánu pro každou konstrukci v programu BIM 360 Field. Pevnosti stanovené odrazovým tvrdoměrem slouží pro ověření nárůstu hodnot pevností sledovaných betonových konstrukcí na stavbě a pro vedení postupu prací.



Obrázek 2-8 Schmidtovo kladívko Proseq typ N [34]

Pevnosti betonu lze odrazovým tvrdoměrem typu N měřit běžně od hodnoty 10 MPa do hodnoty zhruba 70 MPa. Měření odrazovým tvrdoměrem probíhá při realizaci stavby druhý až sedmý den od betonáže sledované konstrukce podle jejího typu a aktuálních klimatických podmínek. Ze zkušenosti při porovnání hodnot pevností betonů lze tvrdit, že hodnoty jsou ve shodě se zkušebně naměřenými hodnotami pevností v tlaku, které byly stanoveny v kapitole 5.1.2.

Zkouška tvrdoměrem se provádí přiložením na zkušební plochu a pozvolným tlakem až do chvíle, kdy ocelový beran vyvodí ráz. Zaznamená se hodnota pevnosti v tlaku. Na zkušebním vzorku (ploše) se provede minimálně 7 měření, přičemž jednotlivá měření se nesmí od aritmetického průměru hodnot lišit více než 20 %. Velikost zkušební plochy musí být minimálně 0,02 m². Vzdálenost zkušebního místa od hrany vzorku (plochy) musí být minimálně 30 mm a jednotlivá měření se provádí v minimální vzdálenosti 20 mm od sebe. Je potřeba dbát na očištění zkušební plochy a neprovádět zkoušky při snížení krytí armatury [44] a [45].

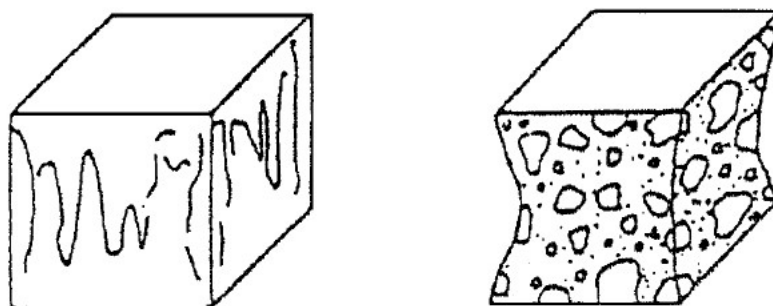
2.2. DESTRUKTIVNÍ METODY

Pro zjištění materiálových vlastností testovaných vzorků bylo použito standardních destruktivních zkoušek pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, hloubka průsaku tlakovou vodou a stanovení statického modulu. Rozdělení jednotlivých použitých zkušebních metod jsou v kapitolách 4 a 5. Destruktivní zkoušky byly provedeny zhruba na čtyřech stovkách betonových i sádrových vzorcích. Materiálové vlastnosti vybraných sad vzorků byly srovnány s výsledky z předcházejících nedestruktivních zkoušek.

2.2.1. Zkouška pevnosti v tlaku

Pro zkoušky pevnosti v tlaku betonových vzorků byl použit lis dle ČSN 12 390-4, který splňuje veškeré podmínky dané zkoušky. Zatěžovací desky odpovídají tvrdostí souboru 4 kategorii Vickers HV 30 s tvrdostí min 550 a je zajištěno, že nedochází k jejich deformaci. Protilehlé desky zkušebního lisu jsou rovnoběžné s maximální odchylkou 0,03 mm. Hodnota drsnosti povrchu desek R_a je v rozmezí 0,4 až 3,2 μm .

Před zahájením zkoušky se těleso osuší a očistí. Vloží se do lisu kolmo na způsob uložení betonové směsi ve vzorku. Na zkušebním lisu je vyvozena síla, během jejíhož vyvození se neustále kontroluje poloha zatěžovacích desek, poloha zkušebního tělesa, ustavení horní desky, nárůst zatěžovací síly probíhá dle předpisu zkoušky $0,4 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$. Zatěžování probíhá od počátečního předpokládaného zatížení na úrovni zhruba 30 % konečného zatížení při porušení betonového vzorku. Při porušení zkušebního vzorku dojde k zaznamenání maximální síly vyvozené na zkušebním lisu a je zkontrolován způsob porušení vzorku. Pokud se shoduje se schématem (Obrázek 2-9), pak je možné uvažovat zkoušku jako úspěšnou.



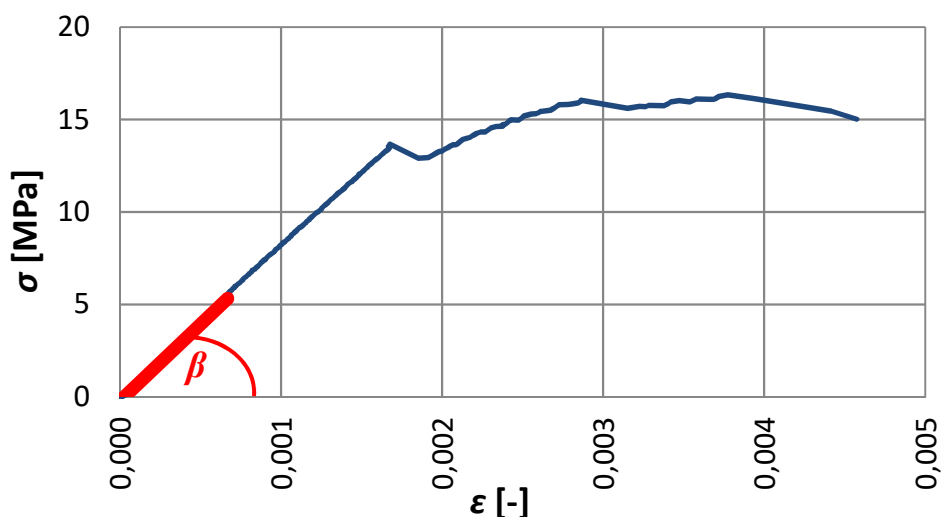
Obrázek 2-9 Schéma porušení vzorku při zatěžovací zkoušce pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku je vyjádřena vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (13)$$

kde f_c pevnost v příčném tahu [MPa],
 F maximální síla při porušení vzorku [N],
 A_c průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²].

Na základě závislosti napětí (σ) v sádrovém vzorku na poměrné deformaci (ε) bylo destruktivní zkouškou pevnosti v tlaku možné stanovit statický modul pružnosti. Pro určení hodnoty statického modulu pružnosti byla zvolena grafická metoda, jako je uvedeno v ČSN ISO 6784. Pracovní diagram sádrového pojiva umožňuje stanovení statického modulu pružnosti obdobně, jako je tomu u betonu. V grafu (Obrázek 2-10) závislosti napětí na poměrné deformaci je znázorněn průběh σ na ε a postup určení přímky pro stanovení statického modulu pružnosti. Statický modul pružnosti odpovídá velikosti $\tan \beta$ určený z poměru napětí v jedné třetině pevnosti vzorku ku odpovídající poměrné deformaci. Destruktivní zkoušky, jejichž výsledky jsou srovnány v kapitole 4.1.2, byly provedeny Ing. Tomášem Mračkem [27].



Obrázek 2-10 Příklad pracovního diagramu pro stanovení E_c .

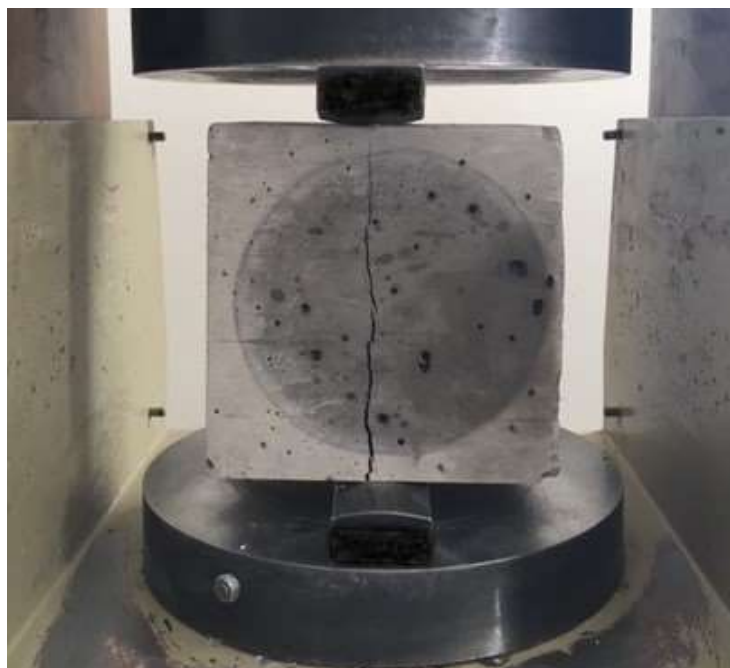
2.2.2. Zkouška pevnosti v příčném tahu

Zkouška je prováděna na zkušebním tělese tvaru kvádru podepřeného mezi dva roznášecí proužky dle schématu při zajištění rovnoběžnosti zatěžovaných ploch [6]. Po změření rozměrů a zvážení se uloží těleso do lisu. Podstatou zkoušky je zjištění pevnosti v příčném tahu, která se vyjádří vztahem mezi nejvyšší dosaženou silou a rozměry tělesa v místě zlomu. [48]. Pevnost zkušebního tělesa při zkoušce pevnosti v příčném tahu se určí ze vztahu:

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi L d'} \quad (14)$$

kde	f_{ct}	pevnost v příčném tahu [MPa],
	F	síla dosažená při porušení vzorku [N],
	L	délka dotykové přímky [mm],
	d	příčný rozměr tělesa [mm].

Stanovení hodnot pevnosti v příčném tahu bylo pro účely disertační práce prováděno na betonových vzorcích o rozměrech $150 \times 150 \times 150$ mm. Bylo průběžně odzkoušeno celkem 55 vzorků v prvním roce od jejich výroby. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v kapitole 5.1.

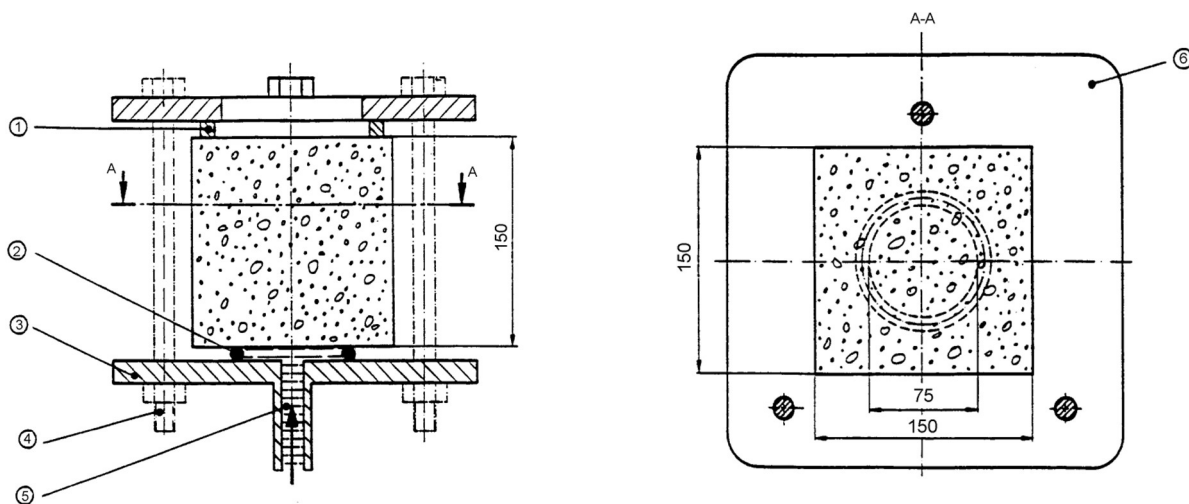


Obrázek 2-11 Provedení zatěžovací zkoušky pevnosti v příčném tahu

2.2.3. Hloubka průsaku tlakovou vodou

Zkušebními tělesy jsou kvádry o délce hrany 150 mm. Po vyjmutí vzorku z formy se plocha, která bude vystavena působení vodního tlaku, zdrsní ocelovým kartáčem dle ČSN EN 12390-2. Těleso se po vyjmutí z formy uloží do vody o teplotě $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Ve vodní lázni je uchováváno až do doby samotné zkoušky.

Zkušební těleso bylo pro samotnou zkoušku upnuto do zkušebního zařízení a na každý zkoušený vzorek působil vodní tlak 500 ± 50 kPa v ploše o průměru 75 mm (gumové těsnění) po dobu 72 ± 2 hodiny. Průběh zkoušky je uvedený na fotografii (Obrázek 2-13). Během zkoušení se pravidelně pozoruje stav povrchů zkušebních těles, které nejsou vystaveny vodnímu tlaku, zda se neobjevuje voda. Jestliže se objeví průsak, je třeba uvážit platnost výsledku zkoušky a tato skutečnost se musí zaznamenat. Po uplynutí zkušební doby se těleso vyjme a povrch tělesa se osuší. Těleso se rozlomí pomocí zatěžovacího lisu při zkoušce pevnosti v příčném tahu kolmo na povrch, na který působil vodní tlak (kapitola 2.2.2). Jakmile lomová plocha oschne natolik, že je zřetelně vidět průsak vody, označí se hranice průsaku vody. Změří se a zaznamená největší hloubka průsaku od zkoušené plochy v mm, zaokrouhlené na celé mm (Obrázek 2-14).



- 1 opěrný kroužek,
- 2 těsnící kroužek,
- 3 a 6 upevňovací deska,
- 4 utahovací šroub,
- 5 tlaková voda.

Obrázek 2-12 Schéma zkoušky při stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou; [mm]

Příklad provedení zkoušky tlakovou vodou a odečtení (zvýraznění) hloubky průsaku zkušebním betonovým tělesem po rozlomení je uveden níže (Obrázek 2-14). Stáří těles před zahájením zkoušky odpovídá hodnotám z uvedených grafů (kapitola 5.1.1). Zkoušky hloubky průsaku probíhaly ve stáří vzorků 28, 90, 180 a 365 dní.



Obrázek 2-13 Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou – laboratoř



Obrázek 2-14 Hloubka průsaku na vnitřních plochách zkušebního tělesa

2.2.4. Stanovení statického modulu pružnosti

Pro určení statického modulu pružnosti E_c bylo použito metody dle ČSN ISO 1920 Zkoušení betonu – část 10. Zkouška probíhá tak, že se těleso vsadí osově do zatěžovacího lisu Instron 3000 kN, který odpovídá požadavkům ČSN EN 12390-4 a následně se vyvodí dolní napětí 0,5 MPa, přičemž se toto napětí udržuje po dobu 60 vteřin a po tomto časovém úseku se zaznamenají hodnoty (dolní napětí σ a počáteční poměrné přetvoření ε). Zatěžování probíhá dle předpisu zkoušky $0,4 \pm 0,2$ N/mm²s. Statický modul pružnosti byl stanoven na trámcích $100 \times 100 \times 400$ mm. Pro každý zkušební vzorek byla stanovena zatěžovací plocha. Statický modul pružnosti E_c se stanoví podle vztahu:

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

kde E_c statický modul pružnosti [GPa],
 σ_a horní zatěžovací napětí [MPa],
 σ_b základní napětí 0,5 MPa,
 ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí,
 ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí.

Rozšířená nejistota měření modulu pružnosti je $\pm 0,5$ GPa. Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření $k = 2$, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95%.

2.3. KOMPARACE NEDESTRUKTIVNÍCH A DESTRUKTIVNÍCH METOD

Nedestruktivní metody zkoušení jsou charakteristické svou opakovatelností na jednom testovacím vzorku s možností sledování chování daného vzorku v čase a v závislostech na okolních vlivech (vlhkost, stáří vzorku, způsob uložení, vliv povětrnosti, mrazu, požáru atd.). Naopak destruktivní metody umožňují stejný vzorek testovat pouze jednou, a proto se při experimentech musí vytvářet velké soubory zkušebních vzorků.

U nedestruktivních metod je nutné v maximální možné míře omezit vlivy okolních podmínek (například klimatické vlivy), které mohou měnit neměřené hodnoty materiálových vlastností. Zatímco u destruktivních zkoušek záleží spíše na správném uložení testovaného vzorku a přesné kalibraci měřícího zařízení, protože se destruktivní zkoušky provádějí především v laboratorním prostředí [29].

Nedestruktivní metody zkoušení mají své uplatnění přímo insitu nebo při probíhající výstavbě. Měřicí linky a zařízení pro nedestruktivní zkoušení bývají malých rozměrů a dají se dopravit přímo na místo zkoušky oproti metodám destruktivním, které se provádějí výhradně v laboratořích, protože jsou zařízení pro destruktivní zkoušky příliš objemná a dá se s nimi jen těžko manipulovat.

3. POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ VZORKY

Při laboratorních zkouškách byly testovány dva druhy sádrových pojiv. V prvním případě byla použita neupravená komerční šedá sádra vyráběná firmou Gypstrend. Ve druhé fázi experimentálních zkoušek byly testovány sádrové vzorky získané nařezáním sádrové tvárnice z Energosádry z elektrárny Počerady. Použité typy sádry jsou podrobně rozepsány v následujících kapitolách 3.1 a 3.2.

3.1. GYPSTREND ŠEDÉ SÁDROVÉ POJIVO

Pro laboratorní zkoušení mechanických vlastností sádrových pojiv byla použita šedá sádra firmy Gypstrend spol. s r. o., která je vyráběna ze dvou složek. Z přírodního sádrovce a ze sádrovce z chemického průmyslu, v poměru jedna ku jedné. Použitá sádra byla klasifikována jako G2 BII, přičemž G2 stanovuje třídu pojiva a udává nejnižší hodnotu pevnosti v tlaku [MPa]. Po dvou hodinách tuhnutí šedé sádry je hodnota pevnosti v tlaku minimálně 2 MPa. Značka BII je vztažena ke druhu pojiva a popisuje sádrové pojivo jako normálně tuhnoucí středně mleté. Vodní součinitel 0,71, který byl pro šedou sádrovou použít podle normy ČSN 72 2301 „Sádrová pojiva“ odpovídá sádrové pastě normální konzistence. Objemová hmotnost sádrových vzorků z nemodifikované sádry se pohybuje mezi hodnotami 1100 až 1200 kg / m³.

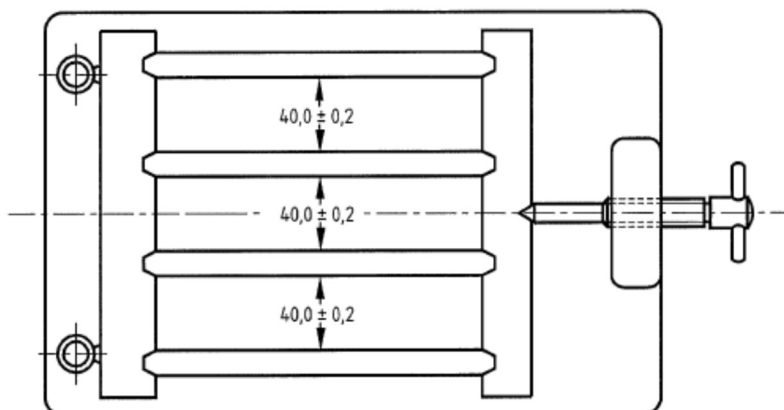
V první fázi experimentálního zkoušení šedé sádry bylo dlouhodobě průběžně zkoušeno několik sad vzorků zhotovených ze šedé nemodifikované sádry. Zkušební vzorky byly po výrobě měřeny v čase v průběhu tvrdnutí sádry ve třech různých prostředích.

První sada vzorků byla ihned po výrobě uložena do vodní lázně, druhá sada vzorků byla uschována v laboratorním prostředí při teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 50 % a poslední, třetí, sada byla po zhotovení vzorků vložena do sušárny při teplotě 40 °C. Vzorky byly průběžně měřeny, váženy a byly vyhodnocovány hodnoty dynamického modulu pružnosti, dynamického modulu pružnosti ve smyku a Poissonova čísla.

Po 3 měsících byly všechny testované vzorky vloženy na 1 týden do vodní lázně a byly plně saturovány. Po plném nasycení sádrových vzorků byly všechny sady uloženy do laboratorního prostředí (teplota 25 °C, relativní vlhkost 50 %). Se změnou uložení vzorků začalo další experimentální měření jejich mechanických vlastností. Laboratorní zkoušky byly prováděny od plného nasycení okamžitě po vyjmutí z lázně až k nejnižšímu možnému obsahu

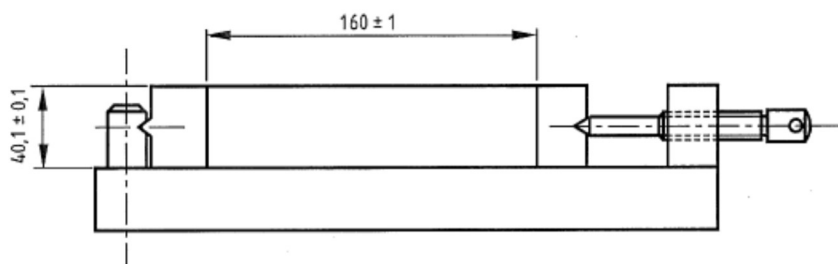
vody v daném vzorku, kterého bylo možno v laboratoři přirozeně dosáhnout. Měření rezonanční metodou se uskutečňovalo vždy po úbytku deseti gramů hmotnosti každého vzorku.

Kromě těchto sádrových vzorků byly v jednotlivých fázích nedestruktivně zkoušeny i další vzorky, jejichž mechanické vlastnosti byly následně ověřovány pomocí destruktivních zkoušek, aby bylo možné provést porovnání dynamického a statického modulu pružnosti. Komparace těchto zkoušek je uvedena v kapitole 4.1.2.



Obrázek 3-1 Půdorys formy pro výrobu sádrových těles dle ČSN 72 2301; [mm]

Laboratorní zkoušky sádrových těles se prováděly na vzorcích tvaru kvádrů o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Dle ČSN 72 2301 „Sádrová pojiva“ musejí být dodrženy tyto podmínky: rozměry těles se nesmí lišit více než ± 1 mm; sádra nesmí být znehodnocená (zvlhlá, smíšená s jiným materiálem nebo starší než 60 dní od data výroby); sádrová pasta musí vyhovět zkoušce na rozlív. Všechny uvedené podmínky byly pro všechny testované sádrové vzorky v rámci provedených experimentů splněny.



Obrázek 3-2 Řez formou pro výrobu sádrových těles dle ČSN 72 2301; [mm]

Přesné ocelové formy (Obrázek 3-1 a Obrázek 3-2) se před nalitím směsi potřou olejem, aby se sádra na formu nepřilepila. Po dvaceti minutách, kdy dojde k dostatečnému ztuhnutí

směsi, se vzorky z forem vyjmou, umístí se do laboratorního prostředí, kde vzorky dále tuhnou. Vyrobené vzorky se zkoušejí v předepsaných intervalech v průběhu tvrdnutí sádry za použití nedestruktivních a následně také destruktivních metod. Zjišťují se hodnoty E_c , E_d , G_d , a v . Pro experimentální zkoušení ztvrdlé sádry, kterým se zabývá tato disertační práce, bylo využito především rezonanční metody, ultrazvukové průchodové metody a standardní zkoušky pevnosti v tlaku [29].

3.2. ENERGOSÁDRA

Pro další část experimentálního zjišťování mechanických vlastností sádrových vzorků (zatvrdlé sádry) byla zvolena Energosádra z elektrárny Počerady. Vodní součinitel pro zhotovení sádrových tvárnic z Energosádry byl použit 0,627. Energosádra nebyla žádným způsobem modifikována. Bloky se vylévaly do dřevěných bednění o rozměrech $250 \times 175 \times 500$ mm. Experiment, ze kterého byla získána sádrová tvárnice pro nedestruktivní zkoušení, probíhal v průběhu 4 let. Během předcházejícího experimentu byly průběžně měřeny vlivy působící na sádrovou tvárnici. Zaznamenávána byla teplota (vnitřní a vnější), relativní vlhkost, atmosférický tlak a vnější podmínky (srážky, směr a rychlost větru) [31]. Tvárnice byla umístěna namísto stávajícího okna tak, aby lícovala vnější stranou s fasádou. Předmětem vlastního laboratorního měření je stanovení vlivu povětrnosti a dalších aspektů na změny materiálových vlastností Energosádry po čtyřletém cyklu zatěžování. Práce je zaměřena na stanovení dynamického a statického modulu jednotlivých vrstev směrem od exteriéru tak, aby byly zjištěny změny ve vlastnostech daného tělesa.

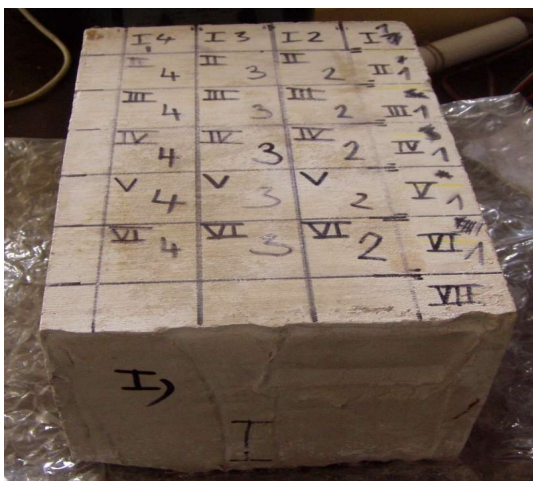
Sádrová tvárnice byla nejprve vyjmuta ze západní fasády v přízemí objektu D Fakulty stavební ČVUT v Praze, ve které byla osazena na místě okenního otvoru po celé 4 roky a kde na ni po celou tuto dobu působilo vnější prostředí bez jakékoliv ochranné vrstvy (Obrázek 3-3 převzat z [31]).

Sádrová tvárnice byla po vyjmutí ze stěny rozřezána na tři části, z nichž dva díly bylo možno použít pro další zkoušení. Obě části tvárnic byly rozřezány na 2×24 dílů o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm \pm 1 mm a následně testovány rezonanční metodou, ultrazvukovou průchodovou metodou a destruktivní zkouškou pevnosti v tlaku.



Obrázek 3-3 Sádrová tvárnice osazená do fasády objektu D FSv ČVUT v Praze

Ze sádrové tvárnice $250 \times 175 \times 500$ mm byla pilou na pórobeton řezáním vyrobena zkušební tělesa – sádrové kvádry $40 \times 40 \times 160$ mm ± 1 mm. Celkem bylo vyrobeno 48 sádrových vzorků vhodných pro laboratorní zkoušky rezonanční metodou i ultrazvukovou průchodovou zkouškou. První část (24 vzorků, Obrázek 3-4) byla zkoušena rezonanční metodou a standardní zkouškou pevnosti v tlaku pro srovnání naměřených hodnot a porovnání hodnot dynamických a statických modulů pružnosti (kapitola 4.3.1). Druhá část původní sádrové tvárnice z Energosádry byla testována rezonanční metodou a ultrazvukovou průchodovou metodou (kapitola 4.3.2, Obrázek 3-5).

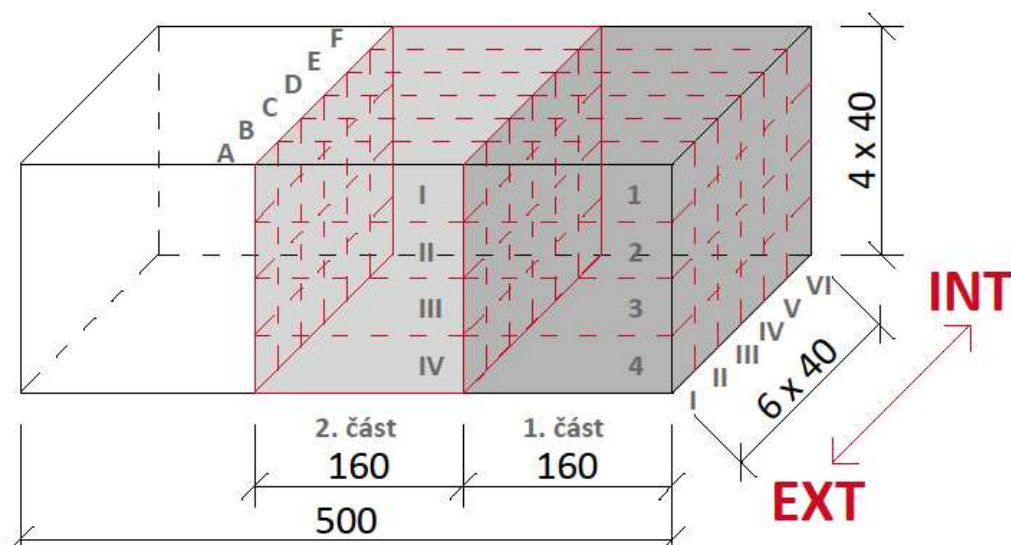


Obrázek 3-4 1. část tvárnice vyjmuté z fasády (pohled z interiéru – vrstva VI)



Obrázek 3-5 2. část tvárnice vyjmuté z fasády (pohled z exteriéru – vrstva A)

Na obrázku (Obrázek 3-4) je zobrazena 1 / 3 z původní sádrové tvárnice. Interiérová strana odpovídá vrstvě VI a exteriérová strana vrstvě I. Na obrázku (Obrázek 3-5) je pohled na druhou, již nařezanou, část sádrové tvárnice. Je patrné, že je tvárnice nařezána na 24 sádrových vzorků s označením IA až IVF. Vlevo na obrázku je zobrazena exteriérová strana tvárnice: vrstva A (vzorky IA až IVA). Schéma přípravy jednotlivých testovaných vzorků z původní tvárnice je znázorněno na obrázku níže (Obrázek 3-6).



Obrázek 3-6 Schéma přípravy vzorků z původní tvárnice

3.3. BETON

Betonové směsi, které byly experimentálně zkušeny pro potřeby této disertační práce, byly vyrobeny dodavatelem Skanska Transbeton s.r.o., betonárna Letňany. V průběhu výstavby projektů Corso Court (kapitola 5.2) a Visionary (kapitola 5.1) byly odebrány betonové vzorky z různých tříd betonových směsí. Směsi a vzorky jsou popsány v dalších kapitolách. V disertační práci je vyhodnoceno téměř 500 vzorků betonů různých tříd (C 30/37, C 40/50, C 50/60 a C 55/67) odebraných při výstavbě projektů Corso Court (v roce 2014) a Visionary (v letech 2016 až 2017).

3.3.1. Betonová směs pro spodní stavbu projektu Visionary

Pro spodní stavbu projektu Visionary (administrativní budova Praha 7) byly použity betonové směsi výhradně od dodavatele Skanska Transbeton s.r.o., betonárna Letňany. V průběhu statického návrhu spodní stavby a jednotlivých konstrukčních částí byly autorizovaným statikem navrženy betonové směsi. Pro zajištění požadovaných vlastností betonů obalových konstrukcí spodní stavby (ve styku s tlakovou vodou a s vlivem agresivního prostředí) byla do betonové směsi navržena dodavatelem krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF.

Na základě průzkumů před výstavbou bylo stanoveno, že betony musí vyhovět následujícím podmínkám:

1. Koroze vlivem karbonatace – XC4 – střídavě mokré a suché, povrchy betonu ve styku s vodou,
2. koroze vlivem chloridů – XD1 – povrchy betonů vystavené chloridům rozptýleným ve vzduchu,
3. chemické působení – XA1 – slabě agresivní chemické prostředí – beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě podle tabulky 2 z ČSN EN 206-1.

Pro betony základové desky a obvodových konstrukcí spodní stavby byla zvolena receptura Skanska Transbeton s.r.o. č. 860, která svými parametry odpovídá betonu třídy C30/37, 90d, XC4-XD1-XA1, S4 a splňuje X0, XC1-4, XD1-2, XF1, XA1.

Tabulka 2 Mezní hodnoty pro stupně působení rostlé zeminy a podzemní vody

Chemická charakteristika	Referenční zkušební metoda	XA1	XA2	XA3
Podzemní voda				
SO ²⁻ ₄ mg/litr	EN 196-2	≥ 200 a ≤ 600	> 600 a ≤ 3 000	> 3 000 a ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 a ≥ 5,5	< 5,5 a ≥ 4,5	< 4,5 a ≥ 4,0
CO ₂ mg/litr agresivní	EN 13577	≥ 15 a ≤ 40	> 40 a ≤ 100	> 100 až do nasycení
NH ⁺ ₄ mg/litr	ISO 7150-1	≥ 15 a ≤ 30	> 30 a ≤ 60	> 60 a ≤ 100
Mg ²⁺ mg/litr	ISO 7980	≥ 300 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 3 000	> 3 000 až do nasycení
Rostlá zemina				
SO ²⁻ ₄ mg/kg ^a celkem	EN 196-2 ^b	≥ 2 000 a ≤ 3 000 ^c	> 3 000 ^c a ≤ 12 000	> 12 000 a ≤ 24 000
Kyselost podle Baumann Gully ml/kg	prEN 16502	> 200	v praxi se nepoužívá.	
^a Jílovité zeminy s propustností menší než 10 ⁻⁵ m/s se přiřadí do nižšího stupně. ^b Zkušební metoda předepisuje vyluhování SO ²⁻ ₄ kyselinou solnou. Jestliže jsou k dispozici zkušenosti v místě užití betonu, lze alternativně použít vyluhování vodou. ^c V případě nebezpečí hromadění síranových iontů v betonu při střídavém vysoušení a zvlhčování nebo v důsledku kapilárního sání se mezní hodnota 3 000 mg/kg musí zmenšit na 2 000 mg/kg.				

Složení betonové směsi dle receptury č. 860:

- Kamenivo: D_{\max} 16 mm, hrubé drcené kamenivo, lom Klecany
frakce 0 – 4 (880 kg), nasákavost 1,0 %
frakce 4 – 8 (185 kg), nasákavost 1,5 %
frakce 8 – 16 (660 kg) nasákavost 0,7 %
Nasákavost kameniva je stanovena dle ČSN EN 1097-6.
 - Cement a plnivo: Portlandský struskový cement CEM II/B-S 32,5 R
Cement vyráběn a zkoušen dle ČSN EN 197-1 a EN 196
k-hodnota 20 %
popílek „Mělník“ 20 kg
vápenec „Čertovy schody“ 10 kg
 - Přísady: S 33 – polykarboxylát 2,20 kg
STPL – lignosulfonan Stacheplast 1,90 kg
 - Objemová hmotnost: 2304 kg/m³
 - Vodní součinitel: 0,44
 - Konzistence: S4 (sednutí kužele 160 – 210 mm, tekutá směs)
 - Obsah chloridů: kategorie Cl 0,2
 - Krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF (2 kg / m³)
-
- *Krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF*

Krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF je složena z několika materiálů. Jedná se o kombinaci Portlandského cementu, vápenného hydrátu a chemickou bázi XYPEX. Chemická báze XYPEX neobsahuje organické částice. Jedná se o kyslíčnky kyselin. Podrobné složení dodavatel neposkytuje.

Přísada XYPEX vyvolává v betonu krystalické reakce, které jsou pro beton zcela přirozené. Krystaly postupně vyplňují pórový systém v betonu, přičemž se dá očekávat zvýšení hodnot pevností v tlaku za použití přísady XYPEX, což je prokázáno v kapitole 5.1.2. Reakce, kterou přísada XYPEX vyvolává je katalytická. Pro vznik nových krystalů, které jsou tvarově a rozměrově rozmanitější než krystaly obsažené v běžné struktuře betonu, je potřeba cementu a vody. V betonech tak probíhá krystalická reakce až do doby spotřebování vody v konstrukci. V případě, kdy je povrch betonu v přímém styku s vodou (v případě betonu spodní stavby

ve styku s podzemní vodou), dochází v betonu k uzavření pórové struktury a tím je dosaženo snížení průsaku tlakové vody do betonu, což je prokázáno v kapitole 5.1.1.

Krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF je plně v souladu s ČSN EN 206+A1, ČSN EN 13670, ČSN EN 1992-1-1 a souvisejícími normami. Systém XYPEX v kombinaci se systémovým těsněním spár a prostupů (kapitola 3.3.3) tvoří hydroizolační ochranu spodní stavby.

3.3.2. Konstrukční řešení spodní stavby

- *Základové podmínky a základová deska*

Založení objektu je ovlivněno geologickými a hydrogeologickými poměry na staveništi. Základová spára objektu je umístěna cca 4,5 m pod UHPV. Základové poměry jsou hodnoceny jako složité. Objekt administrativní budovy je založen celoplošně na základové desce tl. 800 mm, která je lokálně zesílena až na tloušťku 1200 mm. Základová deska je prováděna na podkladní beton tl. 100 mm. S ohledem na zajištění stability konstrukce (objektu) je obálka podzemní části objektu navržena tak, aby v běžných návrhových situacích vzdorovala vztlaku od běžné HPV na úrovni 184,5 m n. m. (tedy vodnímu sloupci o výšce cca 4,0 m) a v mimořádné návrhové situaci na povodňové úrovni Q2002 (tedy vodnímu sloupci o výšce cca 7,5 m od úrovně základové desky). V mimořádné návrhové situaci musí být uvažováno s tíhou objektu pouze od vlastní hmotnosti nosné konstrukce (simulace stavu, kdy např. povodně přijdou v průběhu celkové rekonstrukce, kdy bude objekt zcela odstojen).

Základová deska je navržena z betonu C30/37-XC4-XD1-XA1 (max. průsak 35 mm), což je laboratorně odzkoušeno na odebraných vzorcích na stavbě Visionary v průběhu betonáží dotčených konstrukcí. Byl použit beton s pomalým nárůstem pevnosti tzv. „90 ti denní“. Deska je vyztužena obousměrně a při obou površích vázanou výztuží B 500. Výztuž základové desky je navržena na maximální šířku trhliny 0,30 mm. Vodotěsnost konstrukce je zajištěna krystalizační přísadou XYPEX ADMIX C-1000 NF. Povrchová úprava základové desky je paropropustná, aby nedocházelo k odlupování finální stěrky. Krytí výztuže je navrženo 40 mm (spodní výztuž), resp. 25 mm (horní výztuž). Deska bude vyztužena základní celoplošnou výztuží Ø16/125 v obou směrech při obou površích. V místě lokálního namáhání je deska navíc vyztužena příložkami. Jako smyková výztuž jsou použity třmínky z vázané výztuže kladenými po obvodě sloupu. Pro napojení svislých nosných konstrukcí je z desek

vytažena kotevní výztuž odpovídající svislé výztuži stěn a sloupů. Vzdálenost spodní a horní výztuže je vymezena typovými distančními prvky a kozlíky z vázané výztuže [38].



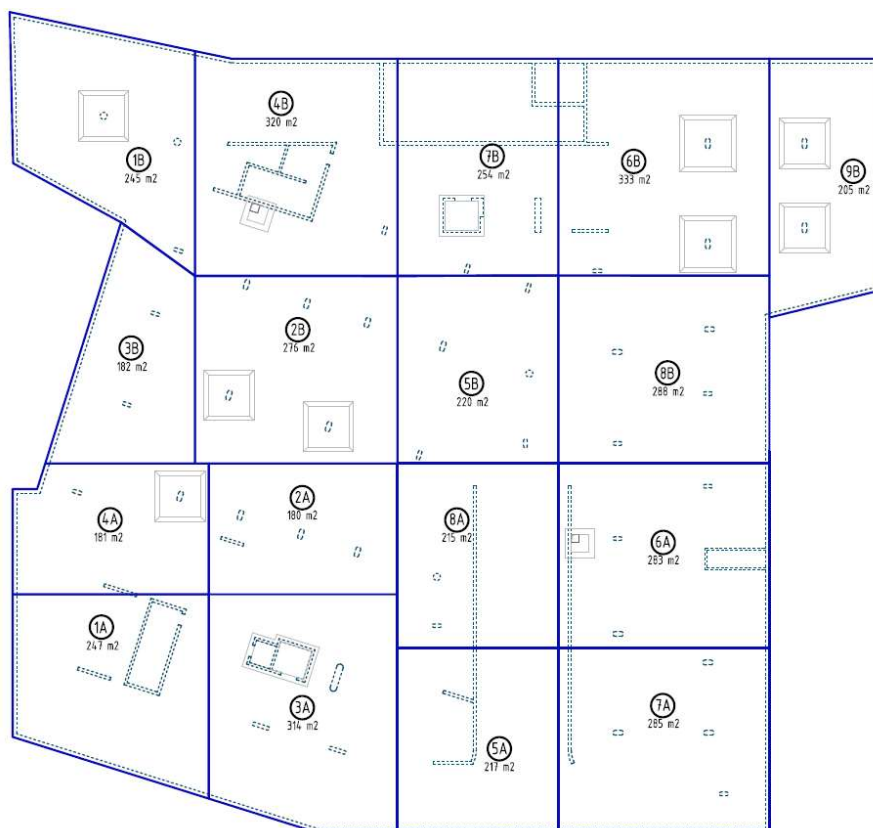
Obrázek 3-7 Dokončené armování základové desky (záběr 5A) před betonáží



Obrázek 3-8 Dokončené armování základové desky (záběr 4A) před betonáží



Obrázek 3-9 Dokončené armování základové desky (záběr 9B) před betonáží



Obrázek 3-10 Postup provádění jednotlivých záběrů základové desky

Po dobu realizace byla hladina podzemní vody snížena čerpáním pod úroveň základové spáry. Betonáž desky probíhala po jednotlivých výškových úrovních tak, aby maximální velikost pracovního záběru nepřesáhla rozměr 20×20 m. Rozvržení jednotlivých záběrů základové desky je zřejmé z přiloženého schématu (Obrázek 3-10). Pracovní spáry byly průběžně konzultovány se statikem projektu. Základová deska byla rozdělena na 17 záběrů. Výstavba probíhala souběžně ve dvou etapách po záběrech A1 až A8 a zároveň postupně po záběrech B1 až B9. Odstávky sousedních záběrů, které na sebe přímo navazují, byly betonovány vždy po 7 pracovních dnech, jak bylo stanoveno hlavním inženýrem statické části projektu. Mezi záběry 8B a 9B bylo z důvodu zrychlení výstavby využito smršťovacího pásu.

- *Svislé konstrukce*

Objekt je navržen jako sloupový skelet se ztužujícími jádry doplněný o obvodové stěny. Hlavní sloupy v suterénu jsou navrženy oválné průřezu 400×850 mm (resp. 300×850 mm a 300×750 mm) z betonu C40/50-XC1 (resp. C50/60-XC1 a C55/67-XC1). Z uvedených tříd betonů byly odebrány a vyrobeny betonové vzorky, na kterých byly stanoveny hodnoty pevnosti v tlaku (kapitola 5.1.2). Sloupy jsou vyztuženy vázanou výztuží B 500. Ve svislém směru jsou sloupy vyztuženy výztuží 20Ø25, příčná výztuž je tvořena třmínky Ø10/150 (100). Krytí výztuže svislých konstrukcí je navrženo 25 mm.

Obvodové suterénní stěny tloušťky 300 a 350 mm jsou provedeny z betonu C30/37-XC4-XD1-XA1 (max. průsak 35 mm). Stěny jsou vyztuženy vázanou výztuží B 500 v obou směrech při obou površích. Ve svislém směru jsou stěny vyztuženy vložkami Ø12/125. Ve vodorovném směru jsou obvodové stěny vyztuženy Ø12/200 (125) při obou površích. Při vnějším povrchu je umístěna vodorovná výztuž. Výztuž je navržena na šířku trhliny 0,30 mm. Povrchová úprava obvodových stěn je paropropustná, aby nedocházelo k odlupování finální stěrky, malby apod. Krytí vodorovné výztuže je uvažováno 25 mm k vnitřnímu, resp. 40 mm k vnějšímu líci. Přípustná tolerance krytí směrem k pažení je ± 10 mm. Maximální délka pracovního záběru je 15 m při realizaci řízených spár a max. 5 m. Prostupy skrz stěny jsou provedeny jako tlakově namáhané – systém Bettra.

Sloupy v nadzemních podlažích jsou navrženy kruhové Ø 500 mm z betonu C40/50-XC1 (resp. z betonu C30/37-XC1). Sloupy budou vyztuženy vázanou výztuží B 500. Ve svislém směru budou sloupy vyztuženy výztuží 20Ø22, příčná výztuž je tvořena třmínky Ø10/150 (100). Krytí výztuže je navrženo 25 mm.



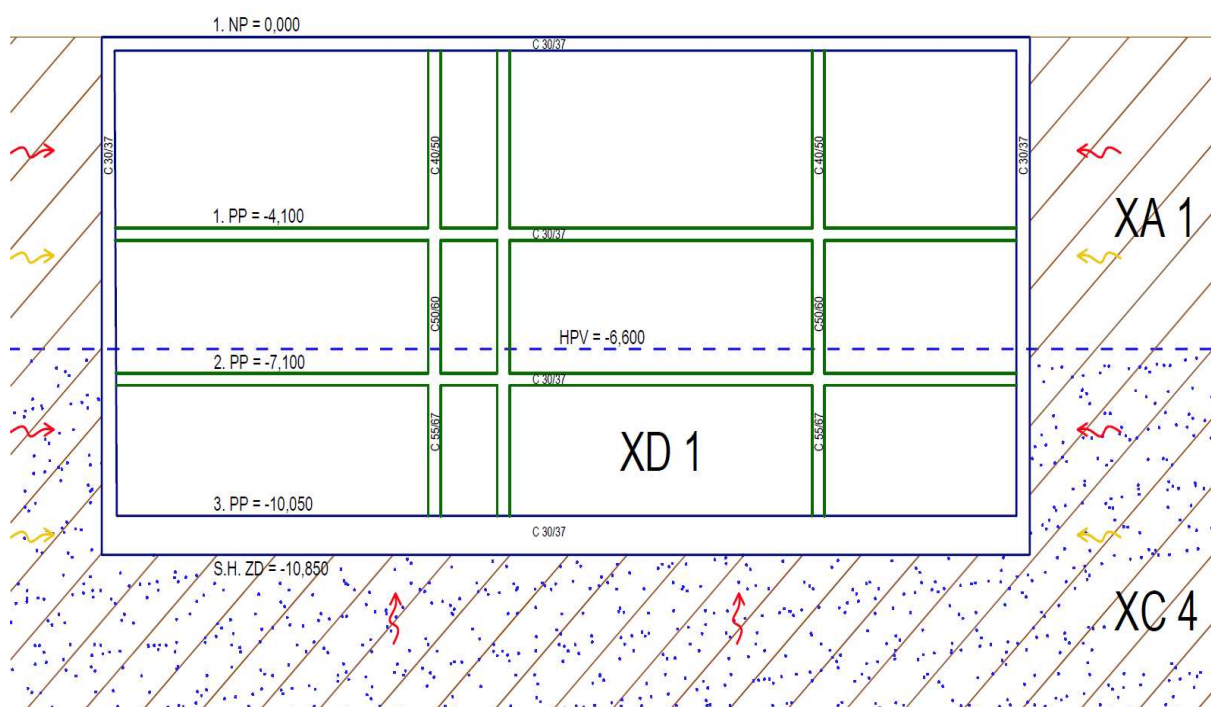
Obrázek 3-11 Dokončení armování stěny 3. PP C03 před záklopem bedněním



Obrázek 3-12 Dokončení armování stěny 3. PP C10 před záklopem bedněním

Vnitřní nosné stěny jsou navrženy tloušťky 200 a 250 mm. Stěny jsou navrženy z betonu C30/37-XC1 vyztuženého vázanou výztuží B 500 při obou površích v obou směrech. Stěny jsou ve svislém směru vyztuženy Ø10/150 při obou površích, ve vodorovném směru pak Ø10/150 (100) při obou površích. Krytí vodorovné výztuže je uvažováno 25 mm. Maximální délka pracovního záběru je 15 m.

Na schématu (Obrázek 3-13) jsou znázorněny vnější vlivy, které působí na konstrukci spodní stavby (modrou barvou je vykreslena hladina podzemní vody, žlutou barvou je naznačen směr působení bludných proudů). Na schématu jsou vepsány a barevně rozlišeny použité třídy betonů (zelenou barvou vnitřní svislé konstrukce a stropní konstrukce, modrou barvou jsou znázorněny obalové konstrukce – beton C 30/37 s přísadou). Ze schématu je zřejmé, na jaké konstrukce má vliv karbonatace (XC 4) ve styku s vodou, vliv chloridů rozptýlených ve vzduchu (XD 1) a chemické působení zeminy a podzemní vody (XA 1).



Obrázek 3-13 Schéma spodní stavby a vnějších vlivů

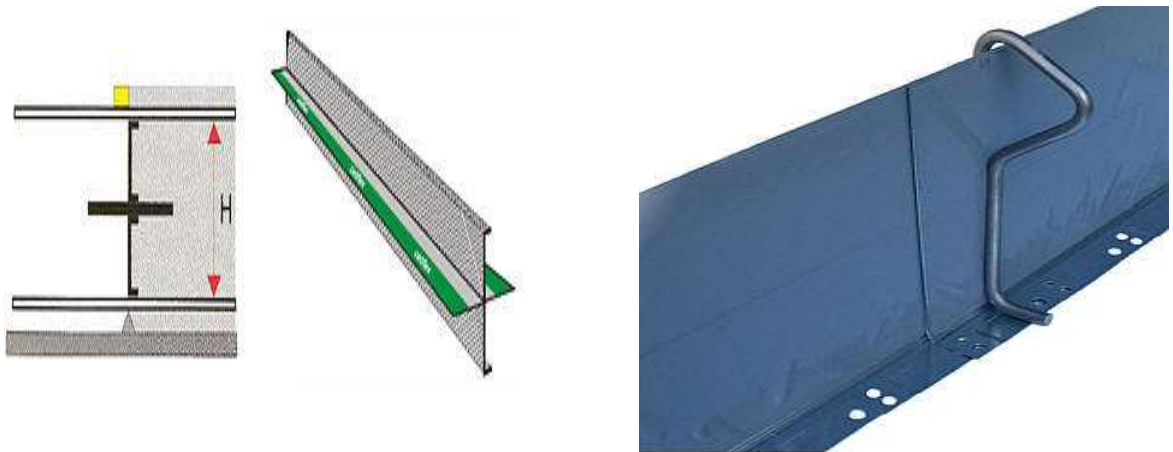
3.3.3. Hydroizolace spodní stavby

Spodní stavba je provedena z vodonepropustného betonu bez dalších povlakových izolací, tzv. „Xypexová vana“. Nepropustnost konstrukce je zajištěna návrhem betonu s krystalizační přísadou XYPEX ADMIX C-1000 NF, návrhem výztuže a ochranou pracovních a dilatačních spár (těsnící pásky, tlakové, těsnící plechy dodavatele Beto-Tech). Prostupy v monolitické konstrukci jsou navrženy v systému Bettra proti tlakové vodě (průchodky HSD a HRD). Ochrana proti agresivnímu prostředí je zajištěna větším krytím výztuže na úroveň 40 mm a složením betonové směsi. Železobetonové konstrukce jsou dimenzovány na šířku trhlin 0,30 mm, aby byla zajištěna jejich vodotěsnost pomocí krystalizační přísady.

Pro zařazení prostředí použita směrnice České betonářské společnosti „TP ČBS 02 Bílé vany – vodonepropustné betonové konstrukce“. Ve smyslu této směrnice je uvažována třída vodotěsnosti A2 – lehce vlhká, vizuálně a dotykem patrná jednotlivá lesklá (vlhká) místa na povrchu. Není možné změřit množství odtékající vody. Po dotyku ruky jsou rozeznatelné stopy vody. Je přípustné 1,0 % vlhkých míst na celém povrchu betonového dílu. Jednotlivé proužky vody, které na povrchu betonu vysychají. Ve zvláštních případech může být potřebné temperování/klimatizování. Třída vodotěsnosti je vhodná pro garážové prostory s domovní technikou (např. kotelny, kolektory), dopravní stavby, čemuž odpovídá realizovaný stavební objekt [39].

- Třída tlaku vody je uvažována W2 (tj. výška vodního sloupce 5,0 – 10,0 m).
- Třída betonové konstrukce Kon2 (tloušťka prvků $\geq 0,30$ m, šířka trhlin $< 0,35$ mm při použití krystalizační přísady).

Těsnící plechy jsou použity Formax 3000C/B určeny pro těsnění jednotlivých pracovních záběrů základových konstrukcí a obvodových svislých konstrukcí, které jsou v kontaktu s tlakovou podzemní vodou. Plechy Bituflex BF 202/0,5 jsou použity na pracovní spáry mezi svislými a vodorovnými konstrukcemi. Těsnící plechy se navazují před betonáží do koruny suterénních stěn v kontaktu s tlakovou podzemní vodou a na horní hrany základové desky a stropních desek podzemních podlaží.



Obrázek 3-14 Těsnící plechy Formax 3000C/B (vlevo) a Bituflex BF 202/0,5



Obrázek 3-15 Detail napojení konstrukcí (bentonit a těsnící plechy)



Obrázek 3-16 Pohled do armování obvodové stěny (těsnící plechy Bituflex)

Pro ochranu spodní stavby proti podzemní tlakové vodě byly v místech, které nelze řešit systémově, nebo tam, kde je nutnost zajistit stoprocentní řešení s ohledem na budoucí využití vnitřních prostor, použity injektážní hadičky pro možnost dodatečné injektáže problematických míst a detailů. Zároveň byla špatně ošetřená nebo systémově neřešená místa opatřena bentonitovými pásky Waterstop Redstop s ochrannou mřížkou, která jsou kotvena pomocí nerezových nastřelovacích hřebů (Obrázek 3-15).

3.3.4. Vnější vlivy působící na konstrukci spodní stavby

Spodní stavbu objektu je nutné ochránit proti nepříznivým vlivům způsobeným vnějším prostředím. Disertační práce se věnuje třem podstatným vlivům, které bylo při návrhu statické části spodní stavby potřeba zohlednit. Jedná se o řešení ochrany proti účinkům bludných proudů, ochraně před pronikáním radonu z podloží, ochraně proti agresivitě prostředí (agresivní podzemní vody). Bylo nutné přihlédnout i k dalším negativním vlivům jako jsou povodňové stavy, ochrana proti vibracím, ale s ohledem na složitost problematiky a téma disertační práce nejsou tyto body více diskutovány.

- *Řešení ochrany proti účinkům bludných proudů*

Na základě korozního průzkumu byl pro stavbu stanoven stupeň ochranných opatření na základě korozního průzkumu ve smyslu ČSN 03 8372.

Na základě stanovení stupně ochranných opatření byl proveden návrh pasivní ochrany stavby proti účinkům bludných proudů. Vzhledem k výsledkům korozního průzkumu – nízkých hustot bludných proudů zapříčiněných vysokou rezistivitou půdy (ne zcela běžnou pro lokalitu Prahy) a dále s ohledem na výsledky projednání se zhotovitelem stavby z hlediska založení a volby betonových směsí byl pro stavbu navržen 4. stupeň ochranných opatření bez provaření výztuže pomocnými bodovými svary. Stavba nevyžaduje návrh aktivní ochrany proti účinkům bludných proudů ani návrh měřicích a propojovacích vedení pro měření vlivu bludných proudů.

Na základě shora uvedených zásad je stanovena následující koncepce ochrany stavby proti účinkům bludných proudů. Základem koncepce je návrh pasivních opatření, a to zejména:

Primární ochranou je předepsané krytí výztuže. Minimální tloušťky betonu krycí vrstvy pro předepsanou značku betonu a třídu prostředí jsou uvedeny v ČSN EN 1992-1 a ČSN EN 206. Tloušťka krycí vrstvy je předpisy stanovena 35 mm. V návrhu bylo počítáno s tloušťkou krycí vrstvy nad výztuží z vnější strany obvodových stěn ve styku se zeminou a základové desky v tloušťce 40 mm.

U použitých železobetonových konstrukcí není překročen obsah chloridových iontů v betonu (0,4 % Cl⁻ z hmotnosti cementu). Je dodržen vodní součinitel dle ČSN EN 206. Přísady pro snazší dosažení zpracovatelnosti neobsahují více než 0,1% chloridů. Používají se nevodivé distanční vložky (betonové kostky) do všech betonových částí přicházejících do styku s okolním prostředím (základová deska a obvodové stěny podzemních podlaží). Do betonových

směsí bylo použito plastifikačních přísad a provzdušňovacích přísad (polymerů, aj.). Záměsová voda pro výrobu železobetonu obsahuje do 500 mg Cl⁻ chloridů, což je pro vodu v pražských podmínkách běžně splněno.

Z hlediska konstrukčních opatření u spodní stavby není provedeno provaření výztuže pro ochranu před účinky bludných proudů. Pro uzemňovací soustavu objektu se navrhuje základový zemnič tvořený provařenými pruty po obvodě a uprostřed v dolní vrstvě armatury základové desky. Využije se prvků průměru 2 × 12 mm. Tyto pruty budou vzájemně svařeny svary délky 100 mm. Provaření s kolmou výztuží pomocnými bodovými svary se z hlediska uzemnění a ochrany proti BP nestanovuje.

Hloubka průsaku pro beton třídy C 30/37, 90d, XC4, S4 je normou stanovena 35 mm. Přísadou XYPEX ADMIX C-1000 NF je tato hodnota snížena na max. 20 mm, což je dále prokázáno zkouškami vzorků betonů. V disertační práci je prokázáno, že za použití přísady XYPEX ADMIX C-1000 NF dochází ke zlepšení parametrů hloubky průsaků při zatížení betonových vzorků tlakovou vodou bez negativního vlivu na další sledované materiálové charakteristiky testovaných betonových vzorků.

Vývody z výztuže se navrhují s ohledem na projekční řešení části Elektroinstalace jako kontrolní vývody pro sledování vlivu bludných proudů i pro návrh uzemňovacích bodů. Vývody se upevní na vnitřní stěnu bednění stěn a přivaří se k svislé provařované výztuži. Vybrané svislé provařované pruty pro vývody z výztuže budou pomocí příložky se svary 100 mm přivařeny k provařované výztuži základové desky. V případě náročnosti řešení mohou být méně vizuálně exponované vývody (výtah, přípojková skříň) provedeny páskem FeZn 30 × 4 mm přivařeným 100 mm svarem k svislé provařované výztuži.

- *Ochrana před pronikáním radonu z podloží*

Z hlediska rizika vnikání radonu z podloží do budovy se jedná o pozemek se středním radonovým indexem. Hlavním protiradonovým opatřením bude vlastní konstrukce základové desky tloušťky 800 mm. Další prevencí proti radonu je nucené větrání prostor podzemních podlaží. V podzemních podlažích se neuvažuje trvalý pobyt osob. Samotná stavba nebude zdrojem radioaktivního ani elektromagnetického záření. Kombinace masivní železobetonové konstrukce s nuceným větráním všech tří podzemních podlaží bez trvalého pobytu osob zajišťuje dostatečnou ochranu před pronikáním radonu z podloží a v tomto bodě není potřeba zvláštních opatření.

- *Ochrana proti agresivnímu prostředí vlivem agresivní podzemní vody*

Ochrana před vlivem agresivní podzemní vody je zajištěna krytím výztuže a zároveň použitými betonovými směsí, které jsou uvedeny v kapitole 3.3.1.

3.3.5. Vzorky betonů spodní stavby

Pro potřeby disertační práce a prokázání funkčnosti návrhu konstrukcí spodní stavby bylo přímo na stavbě řešeného objektu vyrobeno přes 400 zkušebních těles o rozměrech 150 × 150 × 150 mm. Tělesa byla uložena ve shodném prostředí, ve kterém byly reálné konstrukce spodní stavby. Vzorky byly vyráběny v období 10/2016 až 03/2017.

Vzorky byly rozděleny do několika skupin, aby bylo možné zkoumat materiálové charakteristiky v různých na sobě nezávislých laboratořích. Jednalo se o laboratoře AZL LABBET (zkušební laboratoř č. 1687 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005), Kloknerův ústav, Zkušební laboratoř Kloknerova ústavu (zkušební laboratoř č. 1061 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005), Skanska Transbeton s.r.o. (zkušební laboratoř č. 1122 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005) a v neposlední řadě probíhalo na vzorcích vlastní měření v laboratoři ČVUT na katedře Mechaniky.

Na vzorcích byly stanoveny pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6 (55 vzorků), pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 (257 vzorků) a hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 (138 vzorků). Dále byly na 18 vyrobených trámčích 400 × 100 × 100 mm stanoveny dynamické moduly pružnosti dle ČSN 73 1371 a statické moduly pružnosti dle ČSN EN 12390-7.

Tabulka 3 Stupně pro zkoušku sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2

Stupeň	Zkouška sednutím podle EN 12350-2 [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥ 220



Obrázek 3-17 Provádění zkoušky sednutí kužele

Tabulka 4 Pevnostní a deformační charakteristiky betonu dle ČSN EN 1992-1-1

Třída betonu	Značení	Jednotky	Třídy betonu a jejich charakteristiky					
	C	[-]	12/15	16/20	20/25	30/37	35/45	40/50
Charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku	f_{ck}	[MPa]	12	16	20	30	35	40
Charakteristická krychelná pevnost betonu v tlaku	$f_{ck, cube}$	[MPa]	15	20	25	37	45	50
Střední hodnota pevnosti betonu v tlaku	f_{cm}	[MPa]	20	24	28	38	43	48
Střední hodnota pevnosti betonu v příčném tahu	f_{ctm}	[MPa]	1,6	1,9	2,2	2,9	3,2	3,5
Návrhová pevnost betonu v tahu (dolní kvantil)	$f_{ctk, 0,05}$	[MPa]	1,1	1,3	1,5	2,0	2,2	2,5
Návrhová pevnost betonu v tahu (horní kvantil)	$f_{ctk, 0,95}$	[MPa]	2,0	2,5	2,9	3,8	4,2	4,6
Střední hodnota modulu pružnosti betonu	E_{cm}	[GPa]	27	29	30	33	34	35
Poměrné přetvoření betonu	ϵ_{cl}	[%]	0,18	0,19	0,20	0,22	0,225	0,23

4. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ SÁDROVÝCH VZORKŮ

V praktické části disertační práce jsou za pomoci nedestruktivních zkušebních metod stanoveny vybrané materiálové charakteristiky sádrových vzorků. Reprezentanty nedestruktivních zkušebních metod jsou metody rezonanční a ultrazvuková průchodová. Sádrové vzorky použité pro laboratorní testování byly zhotoveny ze dvou sádrových pojiv. Pro sádrové vzorky v kapitole 4.1 byla k výrobě vzorků použita šedá sádra Gypstrend a vzorky vyrobené nařezáním z původní sádrové tvárnice (kapitola 4.2) byly zhotoveny z Energosádry Počerady. Použité materiály jsou podrobně popsány v kapitolách 3.1 a 3.2.

Laboratorní zkoušky v kapitole 4.1 probíhaly v několika různých prostředích a časech od výroby sádrových vzorků. Materiálové charakteristiky byly stanovovány v průběhu tvrdnutí sádry, v průběhu vysychání vzorků a při různém stupni nasycení vzorků vodou. Rovněž byl sledován vývoj hodnot materiálových charakteristik při uložení testovaných vzorků ve vodní lázni, sušárně a v laboratoři.

V kapitole 4.1.2 jsou materiálové charakteristiky vybraných sádrových vzorků určeny za využití destruktivní zkušební metody (zkouška pevnosti v tlaku). Tyto zkoušky byly provedeny na Fakultě stavební ČVUT v Praze [27]. Následně jsou u vzorků v kapitole 4.1.2 srovnány hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti.

Druhá kapitola (4.2) této části disertační práce popisuje za využití nedestruktivních a destruktivních zkušebních metod vliv dlouhodobého působení vnějšího prostředí na materiálové charakteristiky původní sádrové tvárnice z Energosádry, z níž bylo řezáním zhotoveno 48 sádrových vzorků dle schématu Obrázek 3-6.

4.1. GYPSTREND ŠEDÉ SÁDROVÉ POJIVO

Pro účely disertační práce bylo ve velké míře využito nedestruktivních zkušebních metod z důvodu jejich opakovatelnosti a možnosti sledování vývoje materiálových charakteristik totožného vzorku v čase. Stavební porézní materiály, v tomto případě sádra, byly laboratorně testovány za různých vnějších vlivů. Jedním ze zásadních faktorů, který má vliv na materiálové charakteristiky je vlhkost. V experimentální části disertační práce je prokázán vliv obsahu vlhkosti na materiálové charakteristiky sádry.

Sádrové vzorky byly v různých etapách zrání uloženy ve vodní lázni, v sušárně a v laboratorním prostředí. Po provedení první části testování byly vzorky vyjmuty

z jednotlivých prostředí a byly vyhodnocovány materiálové charakteristiky v průběhu vysychání vzorků v laboratorním prostředí. V rámci testování byl průběžně stanovován dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo.

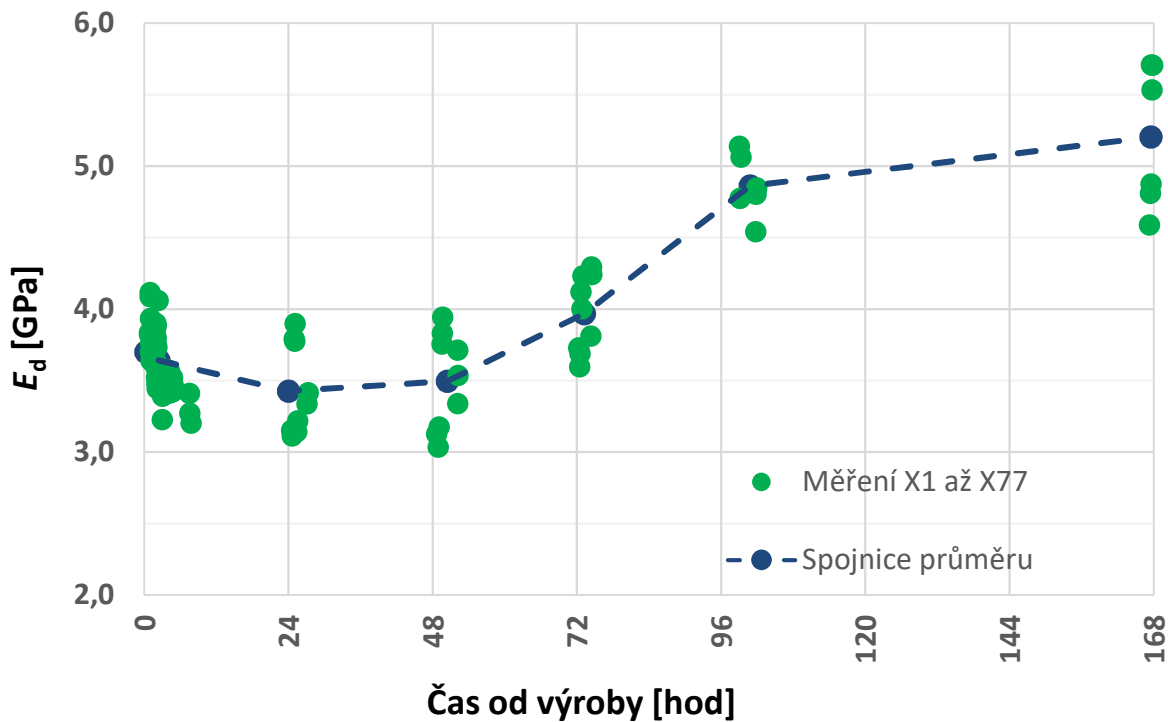
Pro bližší určení vývoje hodnot sledovaných mechanických vlastností po výrobě vzorků jsou laboratorní zkoušky doplněny o zkoušky na sádrových vzorcích v prvních 60 hodinách od jejich výroby (kapitola 4.1.3). Výše popsané nedestruktivní zkoušky jsou v kapitole 4.1.2 na vybraných sádrových vzorcích doplněny o zkoušky destruktivní (zkoušky pevnosti v tlaku) a jsou srovnány hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti. Data z destruktivních zkoušek jsou vyhodnocena z poskytnutých výsledků zkoušek provedených Ing. Tomášem Mračkem [27].

4.1.1. Vzorky zkoušené rezonanční metodou v průběhu tvrdnutí šedé sádry

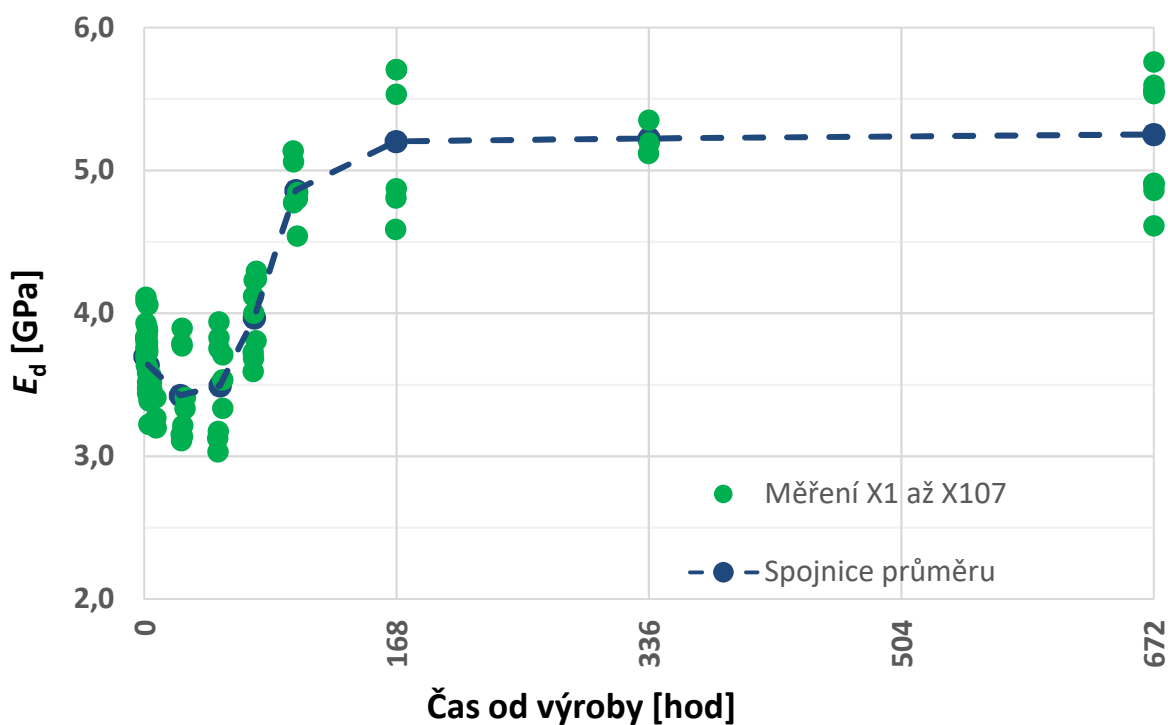
První fáze testování materiálových vlastností sádrových vzorků z šedé sádry Gypstend probíhala ve 28 dnech od výroby vzorků, přičemž byly vzorky okamžitě po výrobě uloženy ve třech různých prostředí. Vývoj hodnot sledovaných veličin pro soubor vzorků v laboratorním prostředí při teplotě prostředí 25 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 % je uveden v grafech Obrázek 4-1 až Obrázek 4-5, pro sadu vzorků uložených ve vodní lázni jsou mechanické vlastnosti sádrových vzorků uvedeny v grafech Obrázek 4-6 až Obrázek 4-8 a pro sadu vzorků uložených v prvních 28 dnech od výroby v sušárně jsou hodnoty uvedeny v grafech Obrázek 4-9 až Obrázek 4-11.

Materiálové charakteristiky byly stanoveny za pomoci rezonanční metody při určení základní rezonanční frekvence pro podélné f_l , ohybové f_f a torzní f_t kmitání. Na základě vzorců (2), (7) a (9) jsou průběžně stanoveny dynamického modulu pružnosti, dynamického modulu pružnosti ve smyku a Poissonova čísla pro všechny testované sádrové vzorky.

Bylo provedeno přes sto měření na souboru sádrových vzorků, které byly uloženy v laboratorním prostředí. V grafu Obrázek 4-1 je vyhodnocen vývoj hodnot dynamického modulu pružnosti v prvních 7 dnech od výroby vzorků. V grafu Obrázek 4-1 je patrný mírný pokles hodnot E_d na počátku tvrdnutí sádry a po 48 hodinách následnému vzestupu průměrné hodnoty E_d zhruba o 40 % v dalších dvou dnech až na průměrnou hodnotu E_d 5,2 GPa po prvním týdnu od výroby sádrových vzorků. V dalším grafu Obrázek 4-2 je vykreslen vývoj hodnot E_d pro soubor sádrových vzorků v prvních 28 dnech od výroby. Trend vývoje hodnot E_d zůstává od prvních 7 dnů od výroby konstantní.

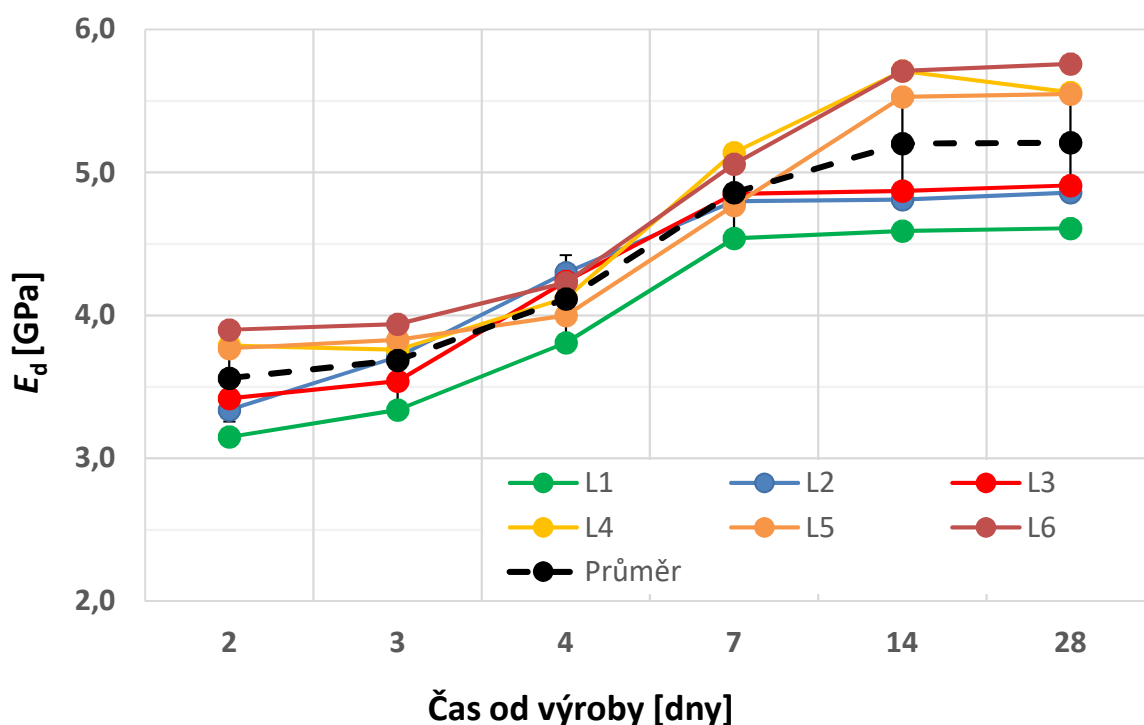


Obrázek 4-1 Dynamický modul pružnosti vzorků uložených v laboratorním prostředí (7 dní od výroby)



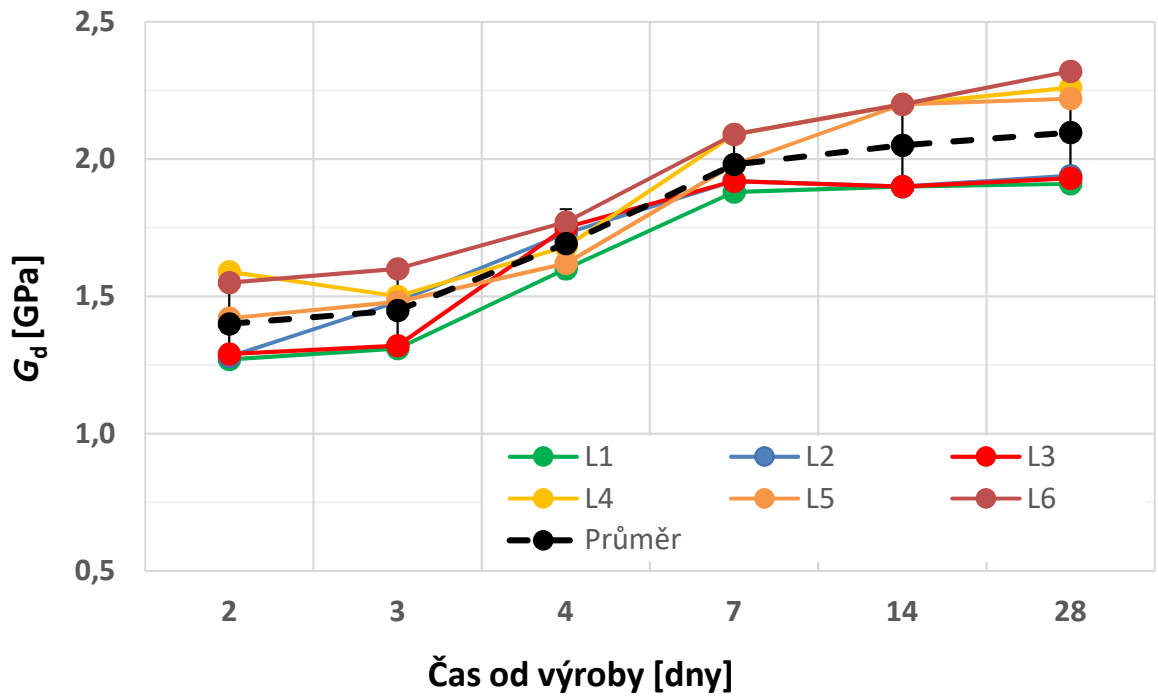
Obrázek 4-2 Dynamický modul pružnosti vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)

Mimo výše uvedených souborů sádrových vzorků uložených v laboratorním prostředí (L1 až L107) byly zhotoveny 4 sady vzorků, které byly uloženy v laboratorním prostředí (2 sady, vzorky L1 až L6), ve vodní lázni (1 sada, vzorky M1 až M3) a v sušárně (1 sada, vzorky S1 až S3). V grafu Obrázek 4-3 jsou podrobně popsány hodnoty E_d pro dvě trojice vzorků uložené v laboratoři. Průměrná hodnota E_d je ve dvou dnech od výroby 3,69 GPa, přičemž E_d pro vzorky L1 až L6 nabývá hodnot 3,34 až 3,94 GPa při směrodatné odchylce 0,20 GPa. V prvním týdnu od výroby vzorků je trend vývoje hodnot E_d vzrůstající, což odpovídá předchozímu zjištění z experimentálních zkoušek (Obrázek 4-2). V následujícím období (první až čtvrtý týden od výroby) se hodnoty E_d mění minimálně. Průměrná hodnota E_d v čase 7 dní od výroby odpovídá 5,20 GPa při směrodatné odchylce 0,46 GPa a v čase 28 dní od výroby odpovídá 5,21 GPa při směrodatné odchylce 0,43 GPa.

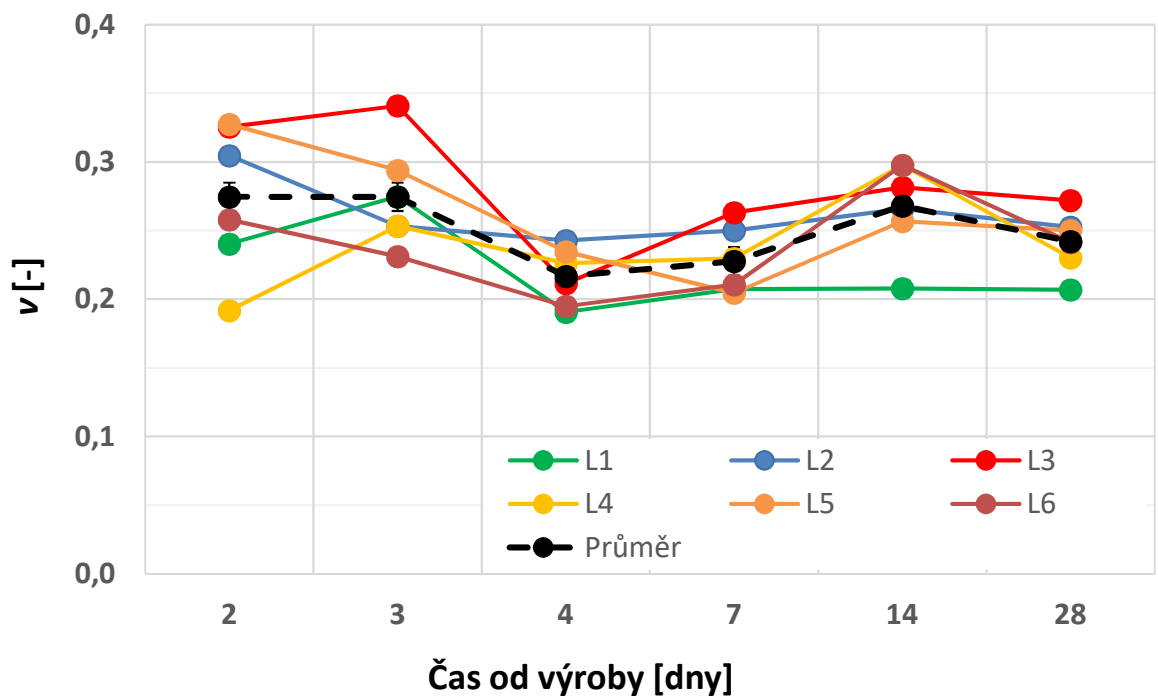


Obrázek 4-3 Dynamický modul pružnosti vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)

Hodnoty dynamického modulu pružnosti ve smyku jsou, stejně jako v případě E_d , stanoveny v čase 2, 3, 4, 7, 14 a 28 dní od výroby (Obrázek 4-4). Trend hodnot G_d koresponduje s vývojem hodnot E_d . Na základě stanovených hodnot E_d a G_d bylo podle vztahu (9) vypočteno Poissonovo číslo (ν) pro všechny sádrové vzorky L1 až L6. Hodnoty ν v čase jsou uvedeny v grafu Obrázek 4-5. Průměrné hodnoty ν jsou v rozmezí 0,23 až 0,27.



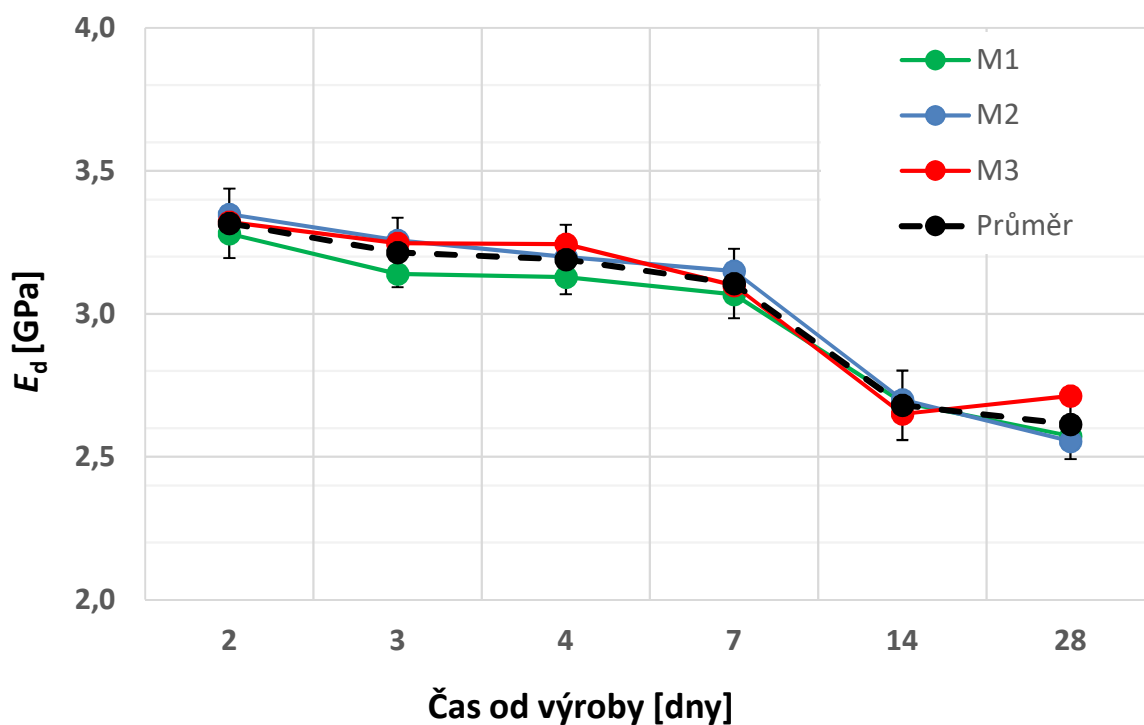
Obrázek 4-4 Dynamický modul pružnosti ve smyku vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)



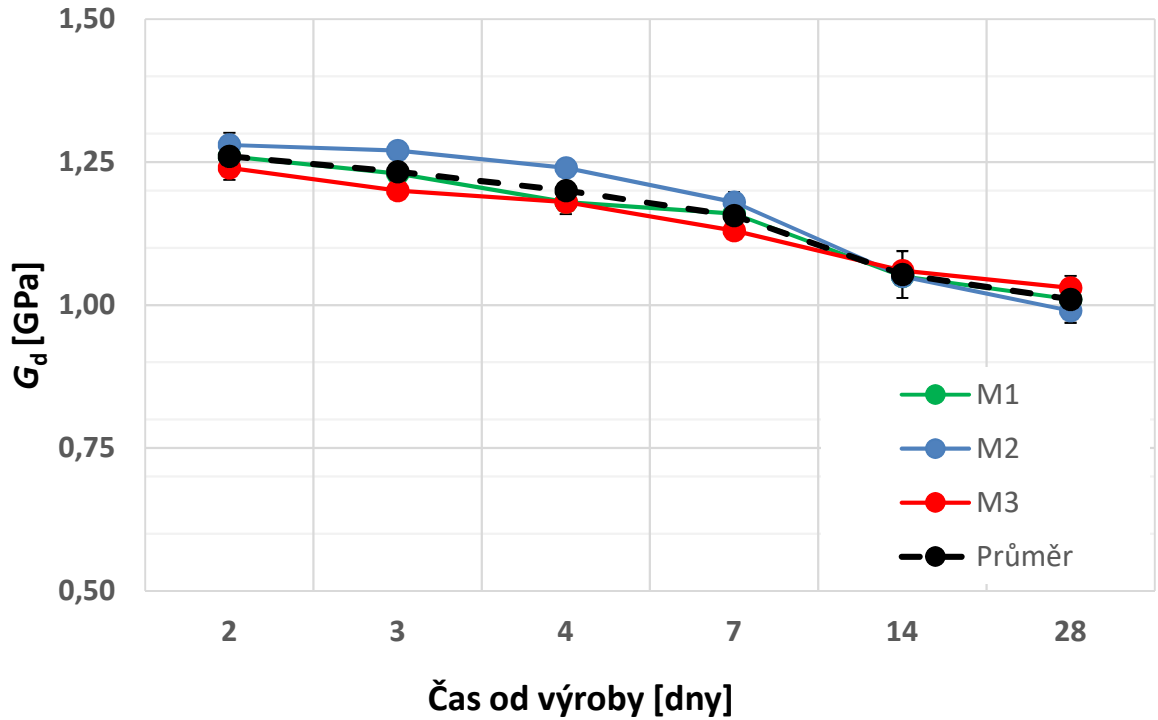
Obrázek 4-5 Hodnoty Poissonova čísla vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)

Výchozí hodnoty E_d jsou pro sadu vzorků uložených ve vodní lázni při teplotě vody 20 ± 2 °C stanoveny v čase 48 hodin od výroby. Průměrná hodnota E_d druhý den od výroby vzorků umístěných ve vodní lázni je 3,32 GPa. V prvním týdnu od výroby je trend hodnot E_d mírně klesající. V čase 7 dní od výroby byla stanovena hodnota E_d 3,11 GPa, což odpovídá poklesu hodnoty E_d zhruba o 6 %. V následujícím týdnu testování (v čase 14 dní od výroby) dochází k dalšímu poklesu hodnot E_d na průměrnou hodnotu 2,68 GPa. V dalším testování bylo prokázáno, že hodnoty E_d pro vzorky ve vodní lázni zůstávají bez výraznějších odchylek.

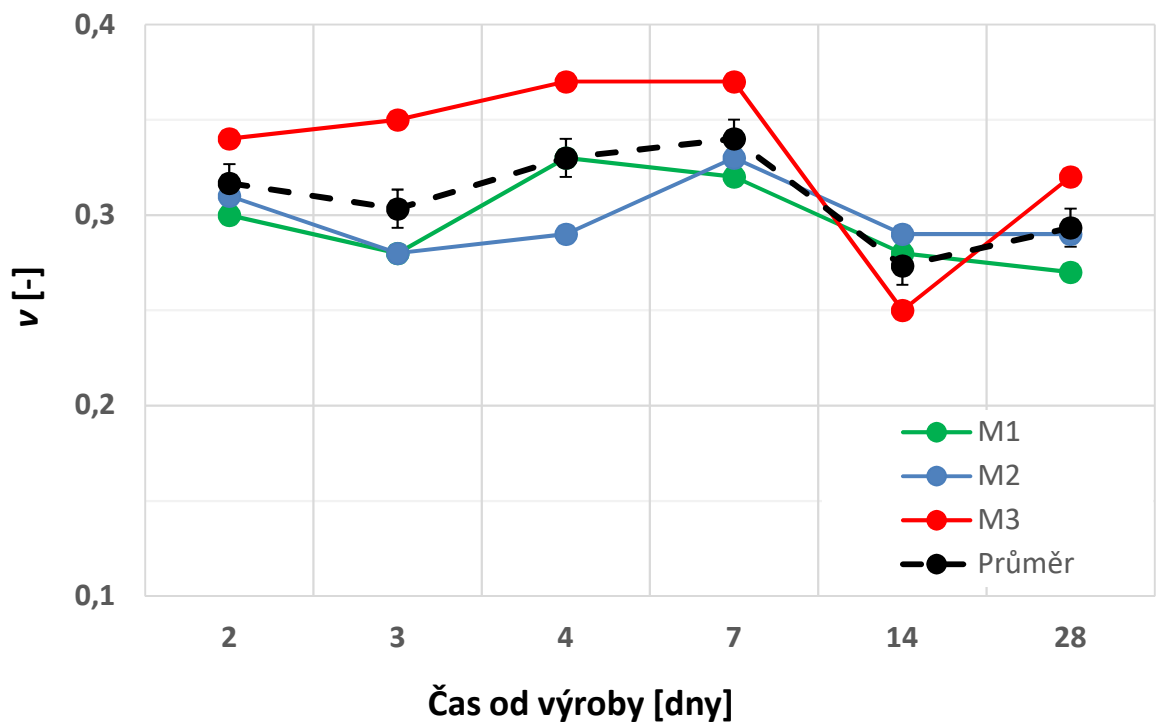
Vývoj hodnot G_d je ve shodě s vývojem hodnot E_d , přičemž průměrná hodnota G_d v čase 2 dní od výroby je 1,26 GPa. V čase 28 dní od výroby je hodnota G_d 1,01 GPa, což odpovídá poklesu průměrné hodnoty G_d zhruba o 25 %. Ze stanovených veličin bylo i pro vzorky uložených ve vodní lázni vypočteno ve všech měřeních Poissonovo číslo. Průměrné hodnoty ν nabývají hodnot 0,27 až 0,34. Rozptyl hodnot ν pro vzorky z vodní lázně v prvních 28 dnech od výroby je 0,07.



Obrázek 4-6 Dynamický modul pružnosti vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)



Obrázek 4-7 Dynamický modul pružnosti ve smyku vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)

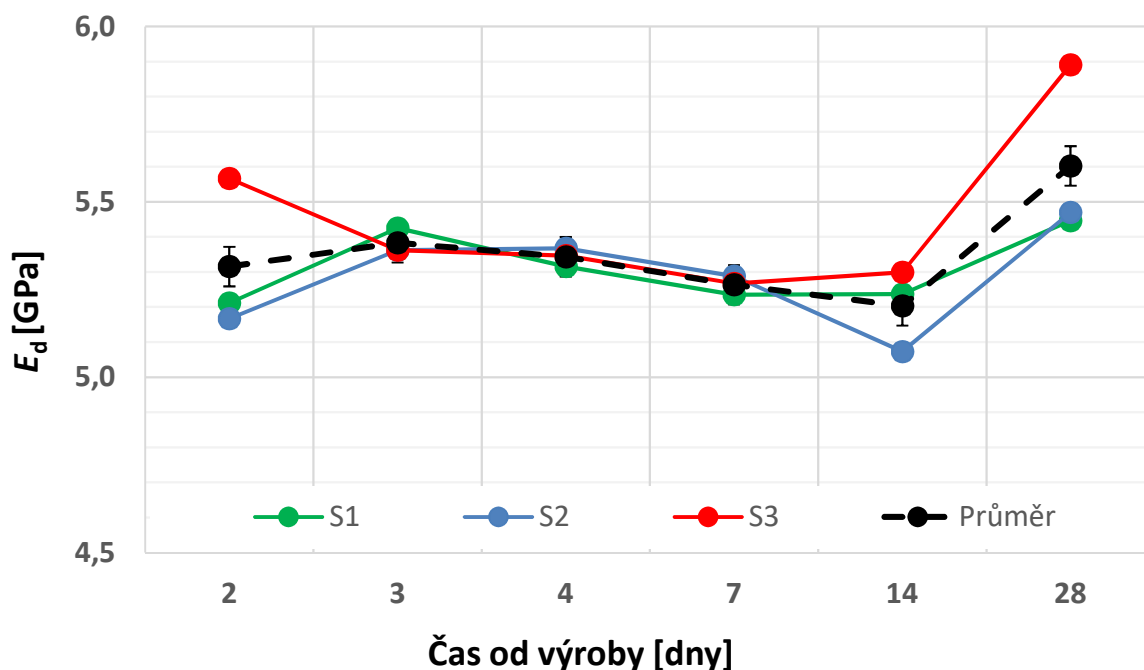


Obrázek 4-8 Hodnoty Poissonova čísla vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)

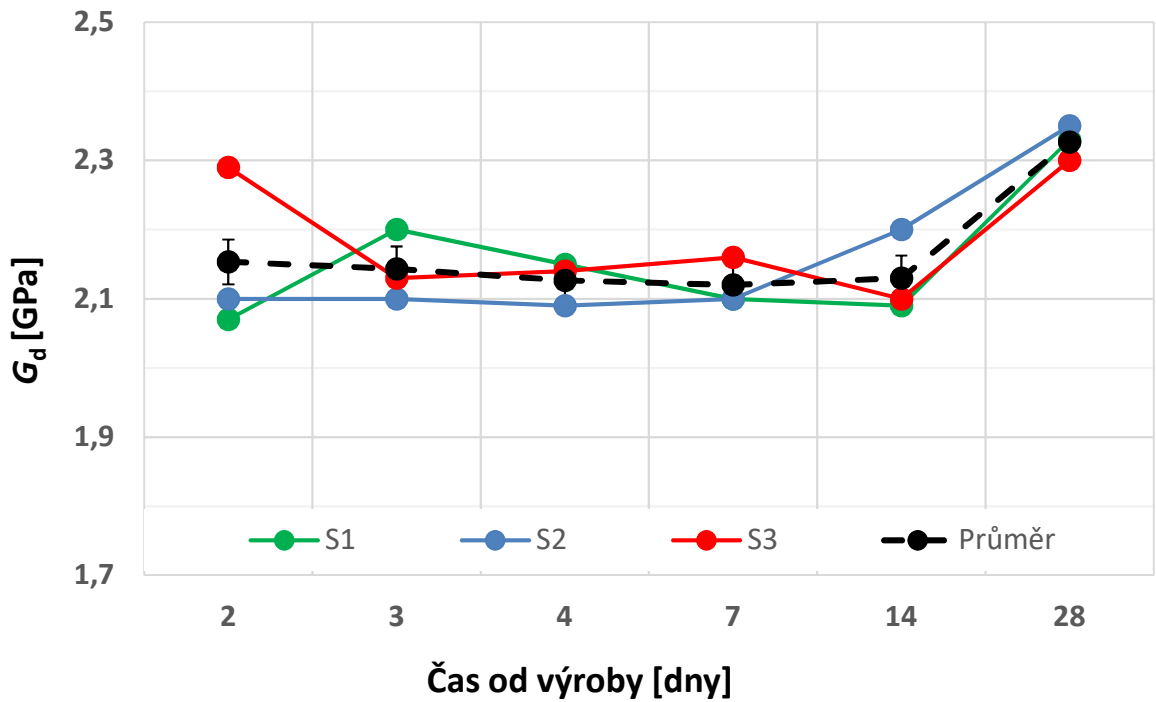
Další testovaná sada 3 sádrových vzorků (S1 až S3) byla po výrobě uložena do sušárny při konstantní teplotě prostředí 40 °C. Byly sledovány totožné mechanické vlastnosti jako u ostatních sad vzorků v této kapitole. Vývoj průměrných hodnot E_d pro vzorky ze sušárny je v prvních 14 dnech téměř konstantní. V druhé polovině testování dochází k mírnému nárůstu hodnot E_d (zhruba o 7 %). Tato pozitivní změna je zanedbatelná vzhledem k možným chybám měření a množství testovaných vzorků.

Hodnoty G_d svým vývojem korespondují s hodnotami E_d , přičemž nárůst hodnot G_d v posledních 14 dnech je zhruba 8 %. Maximální směrodatná odchylka E_d a G_d je 0,20 GPa. Na základě vyhodnocených modulů pružnosti (E_d a G_d) byla stanovena pro každý vzorek Poissonova čísla včetně jejich průměrů a odchylek. Průměrné hodnoty ν jsou v intervalu od 0,20 do 0,26 (Tabulka 8).

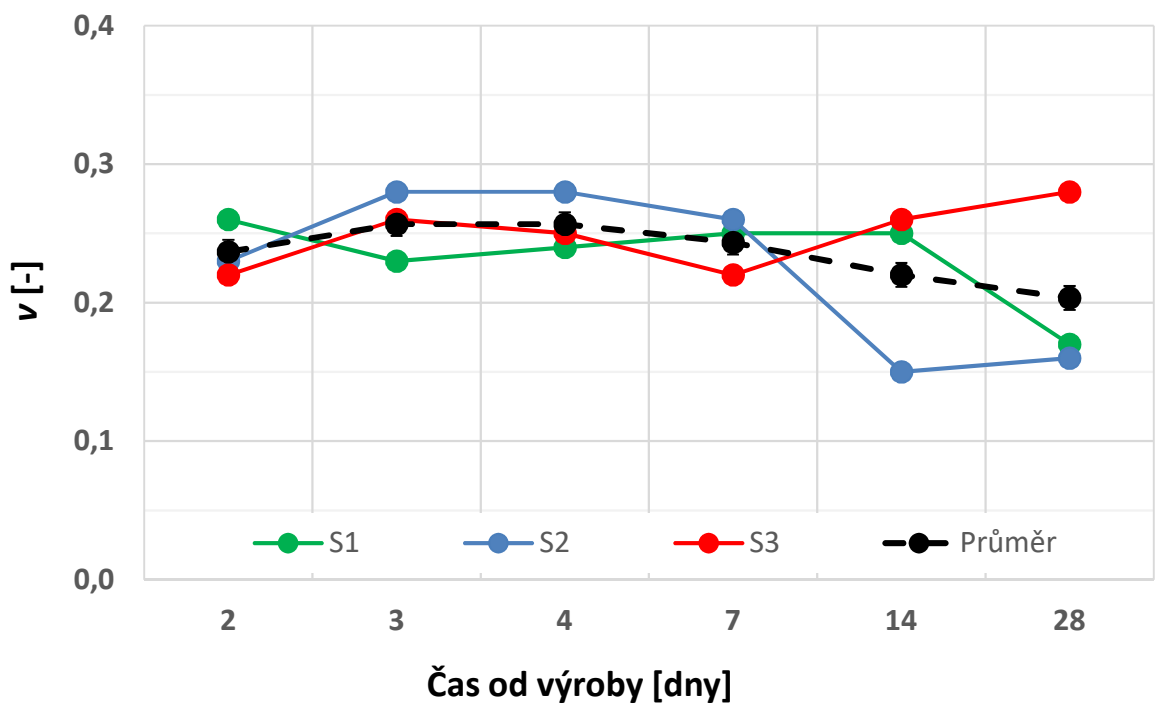
Při zhodnocení laboratorních zkoušek lze potvrdit předpoklad, že vlhkost má zásadní vliv na materiálové charakteristiky. Vzorky uložené v laboratorním prostředí prokazují největší nárůst hodnot E_d a G_d mezi druhým až sedmým dnem od výroby s maximální hodnotou E_d 5,76 GPa. Sádrové vzorky uložené ve vodní lázni vykazují po celou dobu experimentálního testování mírný pokles hodnot E_d , přičemž maximální hodnota E_d v čase 28 dní od výroby je 2,71 GPa. Hodnoty E_d jsou pro vzorky ze sušárny téměř neměnné a maximální hodnota E_d je 5,89 GPa. Hodnoty všech sledovaných parametrů jsou uvedeny v tabulkách na konci této kapitoly.



Obrázek 4-9 Dynamický modul pružnosti vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)



Obrázek 4-10 Dynamický modul pružnosti ve smyku vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)



Obrázek 4-11 Hodnoty Poissonova čísla vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)

Tabulka 5 Dynamický modul pružnosti – tabulka hodnot a odchylek (2 dny od výroby)

[GPa]	Laboratorní prostředí	Vodní lázeň	Sušárna
	Průměr L1 - L6	Průměr M1 - M3	Průměr S1 - S3
Průměrná hodnota E_d	3,69	3,32	5,32
Minimální hodnota E_d	3,34	3,28	5,17
Maximální hodnota E_d	3,94	3,35	5,57
Směrodatná odchylka E_d	0,20	0,03	0,18

Tabulka 6 Dynamický modul pružnosti – tabulka hodnot a odchylek (7 dní od výroby)

[GPa]	Laboratorní prostředí	Vodní lázeň	Sušárna
	Průměr L1 - L6	Průměr M1 - M3	Průměr S1 - S3
Průměrná hodnota E_d	5,20	3,13	5,26
Minimální hodnota E_d	4,89	3,07	5,24
Maximální hodnota E_d	5,21	3,16	5,29
Směrodatná odchylka E_d	0,46	0,04	0,02
Odchylka hodnot E_d , 7dní k hodnotám E_d , 2dny	40,9 %	5,7 %	1,1 %

Tabulka 7 Dynamický modul pružnosti – tabulka hodnot a odchylek (28 dní od výroby)

[GPa]	Laboratorní prostředí	Vodní lázeň	Sušárna
	Průměr L1 - L6	Průměr M1 - M3	Průměr S1 - S3
Průměrná hodnota E_d	5,21	2,61	5,60
Minimální hodnota E_d	4,61	2,55	5,45
Maximální hodnota E_d	5,76	2,71	5,89
Směrodatná odchylka E_d	0,43	0,07	0,20
Odchylka hodnot E_d , 28dní k hodnotám E_d , 7dní	0,2 %	16,6 %	6,5 %

Tabulka 8 Poissonovo číslo - tabulka hodnot a odchylek

	Laboratorní prostředí						Vodní lázeň			Sušárna		
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	M1	M2	M3	S1	S2	S3
Průměrná hodnota Poissonova čísla	0,22	0,26	0,28	0,24	0,26	0,24	0,30	0,30	0,33	0,23	0,23	0,25
Minimální hodnota Poissonova čísla	0,19	0,24	0,21	0,19	0,20	0,19	0,27	0,28	0,25	0,17	0,15	0,22
Maximální hodnota Poissonova čísla	0,27	0,30	0,34	0,30	0,33	0,30	0,33	0,33	0,37	0,26	0,28	0,28
Rozdíl hodnot k minimální hodnotě	0,03	0,02	0,07	0,05	0,06	0,05	0,03	0,02	0,08	0,06	0,08	0,03
Rozdíl hodnot k maximální hodnotě	0,05	0,04	0,06	0,06	0,07	0,06	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03
Směrodatná odchylka Poissonova čísla	0,03	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,05	0,02

4.1.2. Srovnání nedestruktivní a destruktivní metody při stanovení materiálových vlastností

Pro vybraný soubor deseti sádrových vzorků bylo provedeno srovnání hodnot dynamického modulu pružnosti E_d určeného z nedestruktivní rezonanční zkoušky a statického modulu pružnosti E_c stanoveného za pomoci zkoušky pevnosti v tlaku. Vzorky byly vybrány ze zkušebních těles popsanych v kapitole 4.1.1 a v grafech Obrázek 4-1 a Obrázek 4-2, které byly uloženy v laboratorním prostředí, a bylo je možno po provedení rezonanční zkoušky otestovat pomocí zkoušky pevnosti v tlaku.

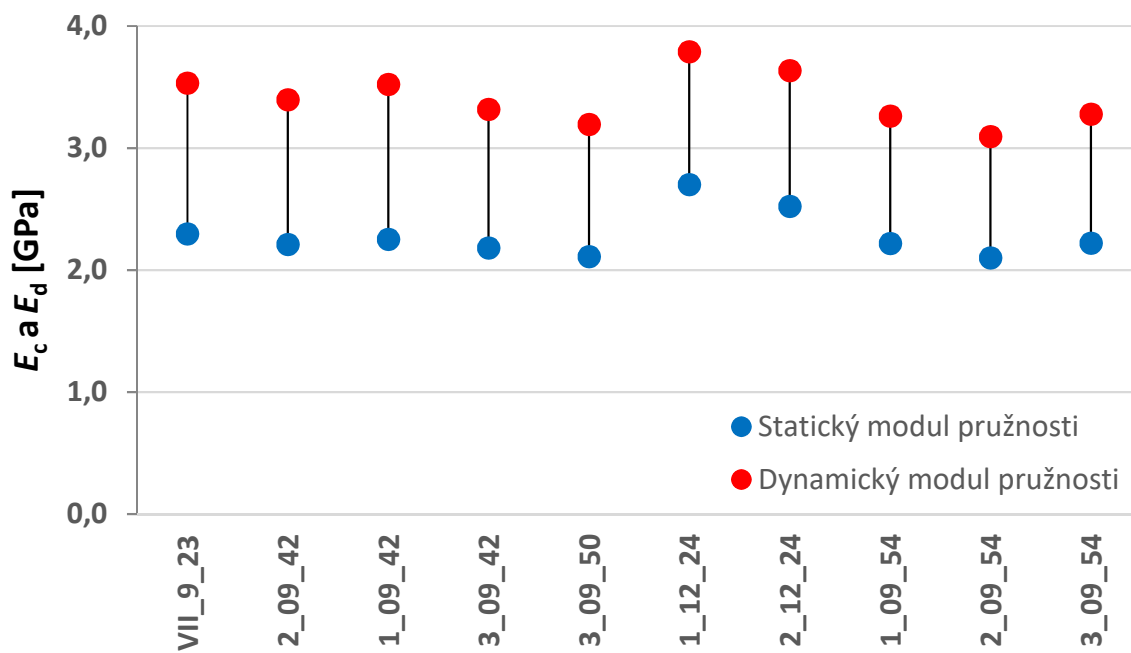
Destruktivní zkoušky probíhaly v průběhu druhého až čtvrtého týdne od výroby vzorků. Vzorky byly pro potřeby zkoušek pevnosti v tlaku rozděleny na poloviny a z provedených dvou měření pro každý vzorek byla určena průměrná hodnota statického modulu pružnosti E_c , která je srovnána s hodnotou dynamického modulu pružnosti E_d . Naměřená data pro vyhodnocení E_c ze zkoušek pevnosti v tlaku byly převzaty od Ing. Tomáše Mračka [27].

Rezonanční metodou byly stanoveny dynamické moduly pružnosti pro soubor vzorků z podélného a příčného kmitání Tabulka 9. Z takto určených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota E_d pro každý vzorek. Vybrané vzorky byly testovány v podobném čase od výroby a byly uloženy v laboratorním prostředí, proto není uvažováno s vlivem vlhkosti obsažené ve zkušebních tělesech sledované na materiálové charakteristiky. Hodnoty E_d vypočtené

na základě základní frekvence podélného a příčného kmitání vykazují odchylky maximálně 3,6 % a nabývají hodnot 3,06 až 3,86 GPa. Průměrná hodnota E_d je 3,40 GPa.

Tabulka 9 Srovnání E_c a E_d pro soubor sádrových vzorků

Vzorek, veličina	Dynamický modul pružnosti				Statický modul pružnosti				Rozdíl E_c a E_d [%]
	$E_{d,1}$ [GPa]	$E_{d,r}$ [GPa]	E_d [GPa]	Odchylka [%]	$E_{c,1}$ [GPa]	$E_{c,2}$ [GPa]	E_c [GPa]	Odchylka [%]	
VII_9_23	3,42	3,65	3,54	3,2	2,23	2,37	2,30	3,2	53,7
2_09_42	3,27	3,53	3,40	3,7	2,19	2,24	2,22	1,1	53,5
1_09_42	3,41	3,64	3,53	3,2	2,29	2,23	2,26	1,3	56,3
3_09_42	3,20	3,44	3,32	3,6	2,16	2,20	2,18	1,0	52,1
3_09_50	3,18	3,22	3,20	0,7	2,13	2,09	2,11	0,9	51,4
1_12_24	3,73	3,86	3,79	1,7	2,70	2,71	2,71	0,2	40,3
2_12_24	3,60	3,86	3,64	1,1	2,50	2,55	2,53	1,0	44,1
1_09_54	3,17	3,36	3,26	3,0	2,19	2,25	2,22	1,2	47,1
2_09_54	3,06	3,13	3,10	1,0	2,10	2,10	2,10	0,1	47,3
3_09_54	3,22	3,34	3,28	1,8	2,25	2,20	2,23	1,1	47,6
Průměrná hodnota			3,40	2,3			2,28	0,4	49,4



Obrázek 4-12 Komparace E_d a E_c vybraných vzorků

Při destruktivní zkoušce v prostém tlaku bylo testováno totožných deset sádrových vzorků. Postup vyhodnocení E_c probíhal v souladu s ČSN [23]. Na každém z pracovních diagramů testovaných vzorků byla vypočtena a zaznamenána jedna třetina pevnosti sádry v tlaku, kde byl stanoven první bod. Jako druhý bod byl určen počátek zatěžování sádrového vzorku. Při spojení těchto dvou bodů v pracovních diagramech byly získány přímkové, které s vodorovnou osou určují úhel β pro každý testovaný vzorek, přičemž $\tan \beta$ udává hodnotu statického modulu pružnosti [29].

V tabulce Tabulka 9 jsou uvedené hodnoty E_c stanovené ze zkoušek pevnosti v tlaku a tyto hodnoty jsou srovnány s hodnotami E_d , přičemž na základě provedených zkoušek lze tvrdit, že dynamický modul pružnosti nabývá hodnot zhruba o 50 % vyšší než statický modul pružnosti. Závislost hodnot E_c a E_d je prokázána na celém souboru vzorků a je znázorněna v grafu Obrázek 4-12. Závěrem je nutné dodat, že z původně poskytnutého souboru výsledků statických zkoušek sádrových vzorků pevnosti v tlaku musela být značná část vyřazena kvůli výraznému rozptylu hodnot E_c , které byly patrně způsobené prokluzem čelistí na lisu.

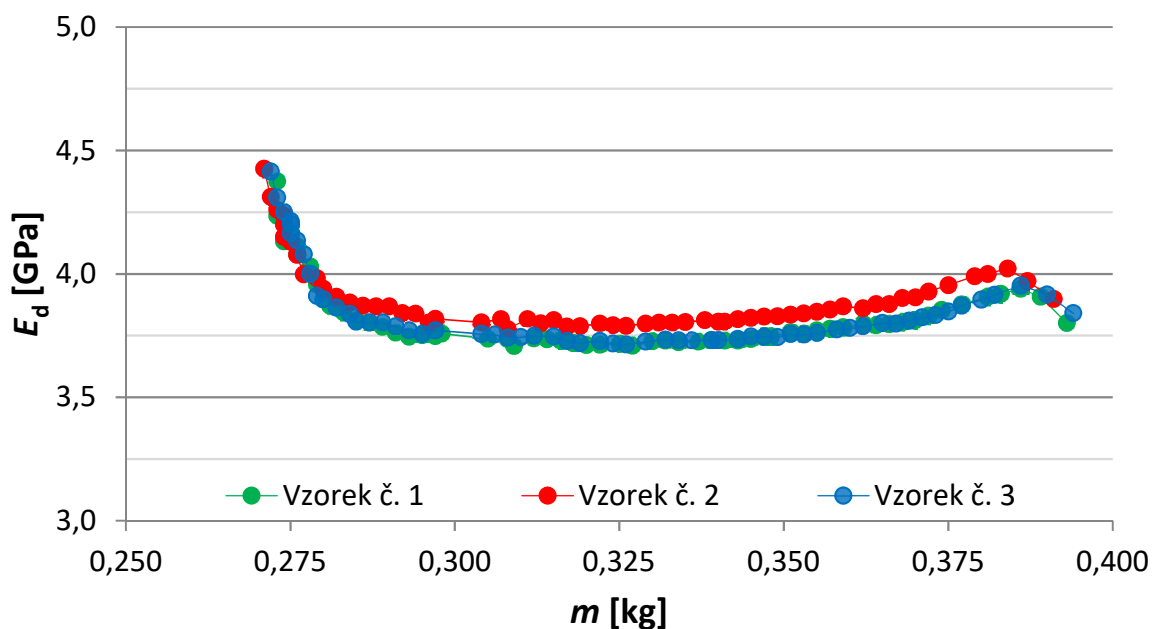
4.1.3. Zkoušky prováděné prvních 60 hodin od výroby sádrových vzorků

V této kapitole je popsán vývoj materiálových charakteristik (E_d a G_d) v průběhu tvrdnutí sádry v prvních šedesáti hodinách od výroby. Z uvedených veličin bylo dále stanoveno Poissonovo číslo. Experimentální zkoušení probíhalo za využití nedestruktivní rezonanční metody a probíhalo na sadě 3 sádrových vzorků. Sádrové vzorky, které byly označeny jako vzorek č. 1, vzorek č. 2 a vzorek č. 3, byly vyrobeny z komerčně vyráběné sádry výrobce Gypstrend (kapitola 3.1).

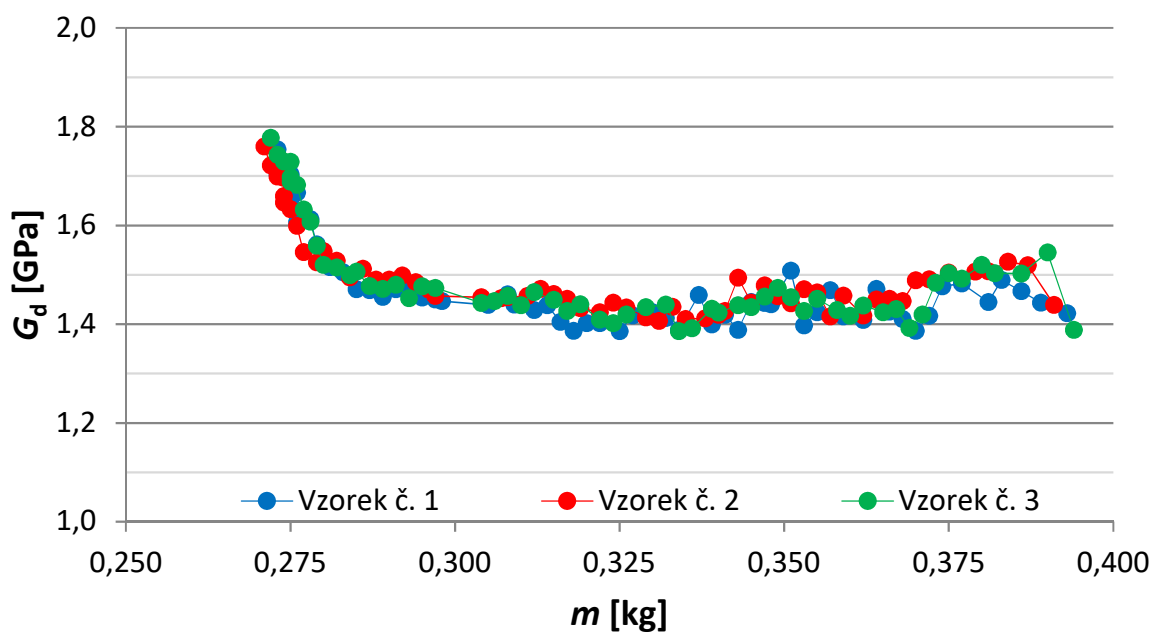
Zkoušení sádrových vzorků probíhalo v laboratoři při průměrné teplotě prostředí 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 45 ± 10 %. Vzorky byly vyrobeny ve formě o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Při každém měření byly vzorky zváženy a byly změřeny jejich rozměry. Z rozměrů a hmotnosti zkušebních vzorků byla průběžně stanovena objemová hmotnost. Testování celé sady vzorků probíhalo každou hodinu po dobu prvních 60 hodin od výroby. Při testování vzorků došlo k úbytku volné vlhkosti těles zhruba o 110 g.

Dynamický modul pružnosti stanovený ze základní frekvence podélného kmitání sádrových vzorků je určen podle vztahu (2). Průběh hodnot E_d stanoveného z podélného kmitání je uveden v grafu Obrázek 4-13. V prvních třech hodinách došlo k nárůstu hodnoty E_d o 4 % z 3,8 GPa na 3,95 GPa. Následujících 48 hodin se pohybovaly hodnoty E_d v rozmezí 3,7

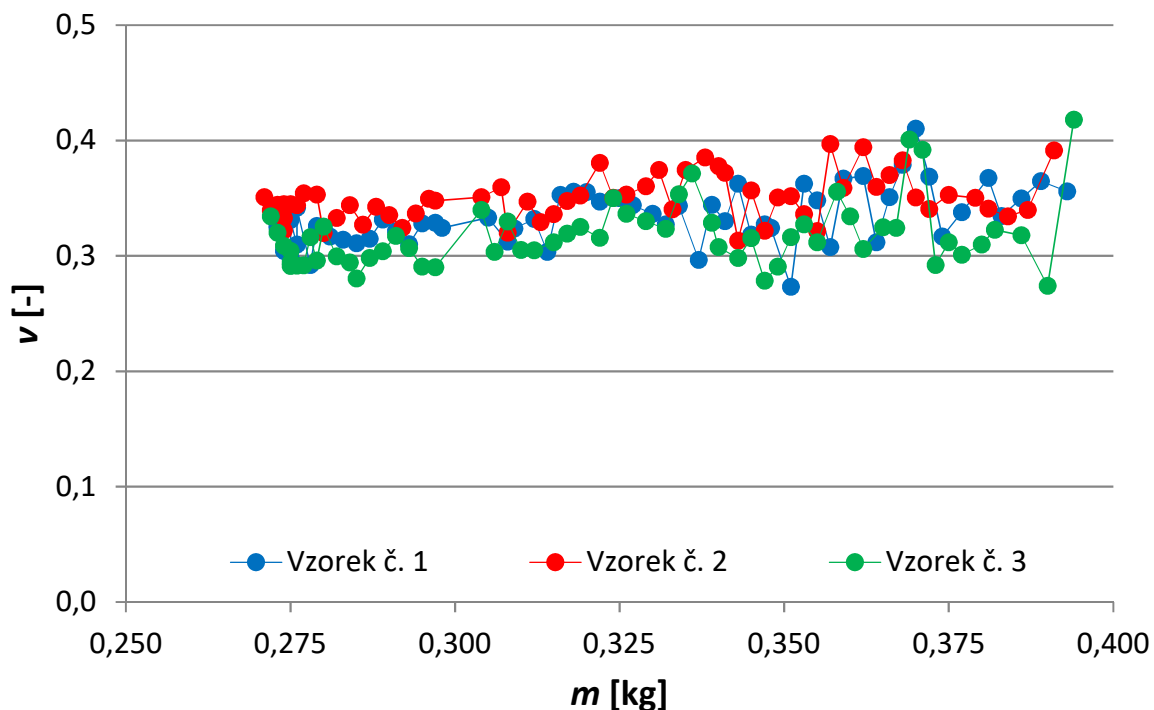
až 3,9 GPa. Při úbytku zbývající volné vlhkosti ve vzorcích došlo v poledních deseti měřeních (hodinách) k nárůstu E_d z hodnoty 3,9 GPa až na hodnotu 4,4 GPa. Po provedeném měření byla sledována hmotnost jednotlivých vzorků. Při opakovaných váženích vzorků po ukončení testování nedocházelo k úbytku volné vlhkosti a hmotnost vzorků byla neměnná.



Obrázek 4-13 Dynamický modul pružnosti 60 hodin od výroby



Obrázek 4-14 Dynamický modul pružnosti ve smyku 60 hodin od výroby



Obrázek 4-15 Hodnoty Poissonova čísla 60 hodin od výroby

Pro určení hodnot dynamického modulu pružnosti ve smyku během prvních 60 hodin od výroby vzorků byl použit vztah (7). Hodnoty G_d byly stanoveny shodně s E_d . V průběhu tvrdnutí sádrových těles byly určeny základní frekvence torzního kmitání vzorků a z těchto frekvencí byly stanoveny hodnoty G_d . Hodnoty G_d se prvních 50 hodin testování od výroby vzorků pohybovaly v rozmezí 1,4 až 1,5 GPa (Obrázek 4 14).

V průběhu úbytku posledních 10 g volné vlhkosti ve vzorcích došlo v závěrečných deseti měřeních k výraznému nárůstu hodnot G_d o 17 %, a to až na hodnotu 1,75 GPa. Na základě stanovených hodnot E_d a G_d bylo podle vztahu (9) stanoveno Poissonovo číslo. Průběh hodnot je znázorněn v grafu Obrázek 4-15. Hodnoty ν se až na výjimky pohybují v rozmezí 0,30 a 0,35 a v průběhu tvrdnutí sádrových vzorků nebyly zaznamenány výrazné odchylky hodnot.

4.1.4. Diskuze a výsledky

V kapitole věnované komerčně vyráběné šedé sádře Gypstrend bylo podrobně popsáno chování sádrových vzorků v průběhu tvrdnutí sádry ve třech odlišných prostředích (vodní lázeň, laboratorní prostředí, sušárna. Ke stanovení mechanických vlastností sádrových vzorků bylo použito nedestruktivní rezonanční metody a standardní zkoušky pevnosti v tlaku [27].

Výsledkem experimentálního měření v kapitole 4.1.1 je popsání materiálových charakteristik sádrových vzorků v průběhu prvních 28 dní od výroby. Charakter křivek hodnot E_d a G_d je vykreslen v grafech Obrázek 4-2, Obrázek 4-3 a Obrázek 4-4. Trendy vývoje hodnot jsou si velmi podobné. Vzorky uložené v laboratorním prostředí jsou charakteristické prudkým nárůstem hodnot E_d a G_d druhý až pátý den od výroby zhruba o 40 %. Pro vzorky uložené ve vodní lázni platí, že hodnoty dynamických modulů pružnosti v prvních dvou týdnech od výroby mírně klesají až k hodnotě 2,5 GPa (E_d) a 0,8 GPa (G_d), přičemž se dále v čase hodnoty dynamických modulů pružnosti ustálí. Sádrové vzorky uložené v sušárně v průběhu testování vykazují téměř konstantní hodnoty E_d a G_d . Hodnoty Poissonova čísla pro všechny soubory sádrových těles se pohybují ve velké většině v rozmezí 0,2 až 0,3.

V kapitole 4.1.2 byl vybrán soubor 10 vzorků, které byly testovány kombinací nedestruktivní a destruktivní metody, aby bylo možné na shodných vzorcích stanovit dynamické a statické moduly pružnosti. Výsledné hodnoty E_d a E_c byly srovnány v tabulce Tabulka 9. Cílem experimentálního testování bylo získat závislost E_d na E_c . Z experimentu vyplývá, že průměrná hodnota E_d odpovídá 1,5 násobku E_c .

V závěrečné kapitole 4.1.3 jsou popsány mechanické vlastnosti šedé sádry v průběhu prvních 60 hodin od výroby vzorků. Experimentální testování bylo zaměřeno na stanovení hodnot E_d a G_d v průběhu tvrdnutí sádrových těles a na základě těchto hodnot bylo vypočteno Poissonovo číslo pro testované vzorky. Z výsledků lze tvrdit, že úbytek vlhkosti v objemu jedné čtvrtiny hmotnosti sádrového vzorku nemá vliv na sledované mechanické vlastnosti, v průběhu prvních 48 hodin nedochází k nárůstu hodnot E_d a G_d a hodnota ν je v prvních 60 hodinách konstantní. Výsledky podrobných zkoušek na sádrových vzorcích v prvních 60 hodinách potvrzují trendy vývoje materiálových charakteristik popsané v kapitole 4.1.1.

4.2. ENERGOSÁDRA

Druhým experimentálně testovaným sádrovým pojivem je Energosádra Počerady (kapitola 3.2). Pro účely disertační práce byla zvolena sádrová tvárnice zabudovaná po dobu 4 let ve fasádě objektu D Fakulty stavební ČVUT v Praze (Obrázek 3-3). Sádrová tvárnice byla převzata od Ing. Pavla Tesárka [31]. V rámci laboratorních měření byly za pomoci různých nedestruktivních metod a destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku stanoveny mechanické vlastnosti celkem 48 sádrových vzorků, které byly z původní sádrové tvárnice vyrobeny (Obrázek 3-6). Nedestruktivními metodami jsou metoda rezonanční a ultrazvuková metoda průchodová.

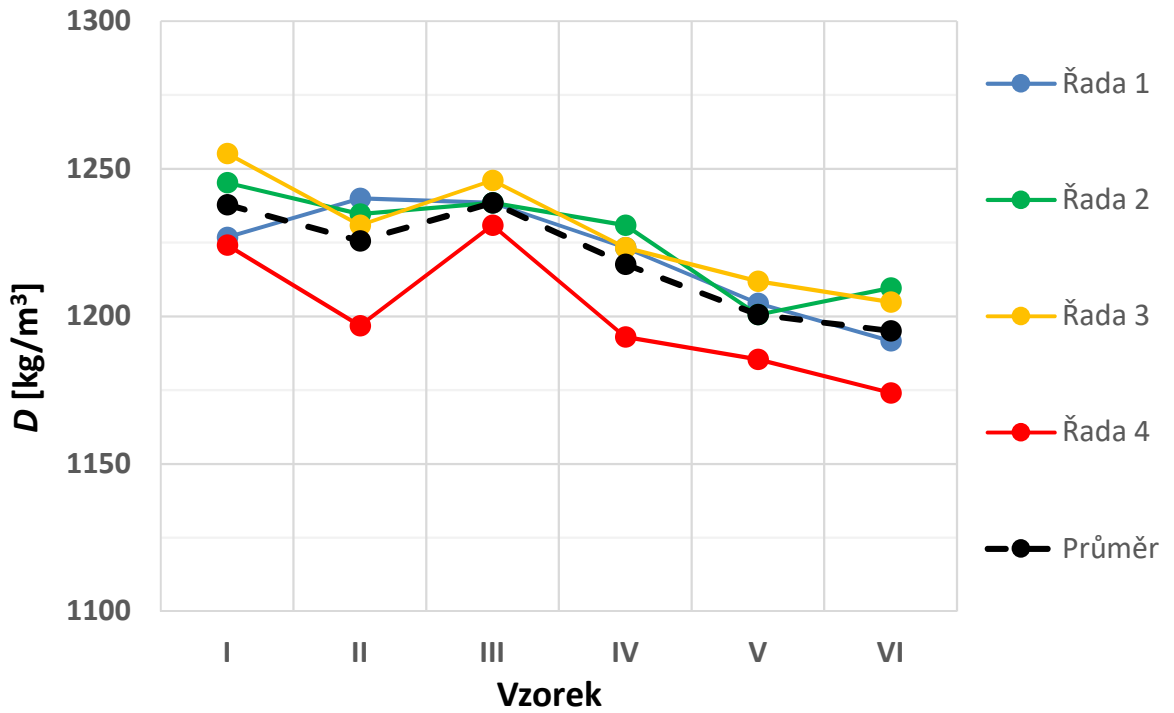
4.2.1. První část tvárnice z Energosádry

Sádrová tvárnice byla rozdělena na dvě části, přičemž byly zkušební tělesa vyrobená z první části původní tvárnice testována pomocí rezonanční metody a následně destruktivní zkouškou pevnosti v tlaku. Na vzorcích z první části tvárnice byly určeny dynamické a statické moduly pružnosti, jejichž hodnoty jsou porovnány.

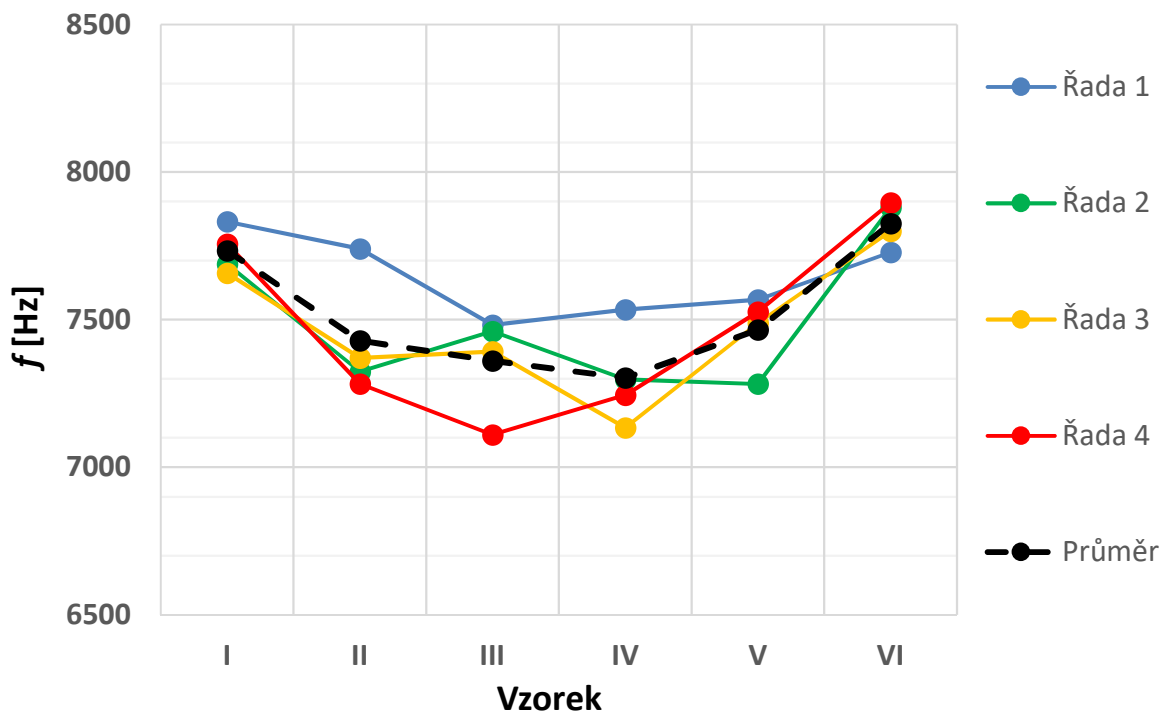
Sádrové trávce vyrobené z první části tvárnice byly změřeny, zváženy a byla vypočtena jejich objemová hmotnost. Objemová hmotnost sádrových vzorků je znázorněna v grafu Obrázek 4-16. V grafu je patrné, že směrem k interiérové straně objemová hmotnost vzorků mírně klesá. Nejvyšší hodnotu ($1257 \text{ kg} / \text{m}^3$) objemové hmotnosti má vzorek 3I z exteriérové vrstvy. Maximální odchylka objemové hmotnosti ze souboru 24 vzorků je 3 %.

- *Vzorky zkoušené rezonanční metodou*

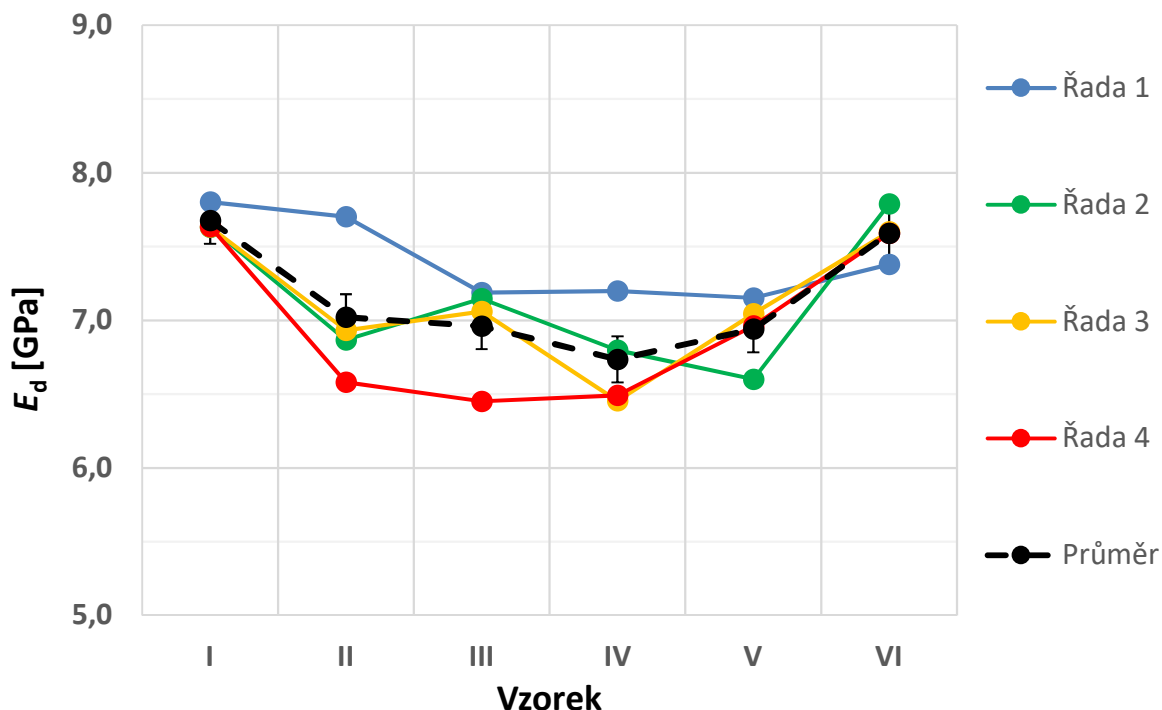
Rezonanční metodou byly určeny základní frekvence podélného kmitání všech 24 vzorků (Obrázek 4-17) a podle vztahu (2) byly stanoveny hodnoty dynamického modulu pružnosti. Hodnoty E_d se pohybují v rozmezí od 6,4 do 7,8 GPa (Obrázek 4-18). Maximální hodnoty E_d byly stanoveny na vzorcích II1 a VI2. Tyto vzorky jsou zástupci exteriérové i interiérové vrstvy. Nejnižší hodnotu E_d vykazují vzorky III4 a IV3, které jsou naopak uvnitř sádrového bloku. Maximální odchylka je 9,8 %. Z grafu je zřejmé, že vliv vnějšího prostředí po dobu 4 let nemá zásadní vliv na hodnotu E_d .



Obrázek 4-16 Objemová hmotnost vzorků 1. části tvárnice



Obrázek 4-17 Základní rezonanční frekvence podélného kmitání vzorků 1. části tvárnice



Obrázek 4-18 Dynamický modul pružnosti sádrových vzorků 1. části tvárnice

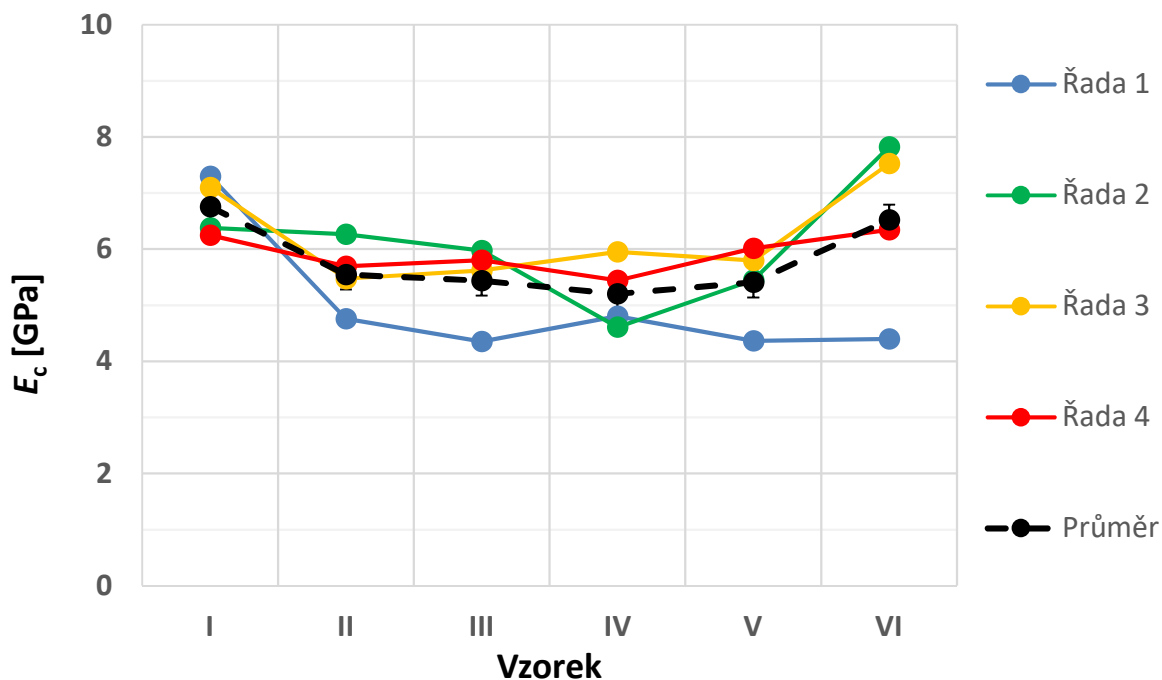
- *Vzorky testované zkouškou pevnosti v tlaku*

Po provedení nedestruktivních zkoušek byly na shodných 24 vzorcích z první části tvárnice z Energosádry provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Z výsledků destruktivních zkoušek byly stanoveny hodnoty statického modulu pružnosti (Obrázek 4-19). Statický modul pružnosti vykazuje výrazné odchylky pro vzorky ve stejné vrstvě (téměř 50 % pro interiérovou vrstvu), a proto je dále hodnota E_c vyhodnocena po vrstvách (sada 4 vzorků) jako hodnota průměrná.

Průměrná hodnota E_c všech vzorků první části tvárnice je 5,8 GPa, přičemž maximální průměrná hodnota je 6,7 GPa (exteriérová vrstva I) a minimální průměrná hodnota je 5,2 GPa (vnitřní vrstva). Při srovnání průměrné hodnoty statického modulu pružnosti s průměrnou hodnotou dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé vrstvy původní tvárnice vychází rozdíl průměrných hodnot 24 %.

Tabulka 10 Komparace E_c a E_d 1. části tvárnice

Vrstva, <i>veličina</i>	I	II	III	IV	V	VI	Průměr
Průměrná hodnota E_c [GPa]	6,7	5,5	5,4	5,2	5,4	6,5	5,8
Průměrná hodnota E_d [GPa]	7,7	7,0	7,0	6,7	6,9	7,6	7,2
Rozdíl	15 %	27 %	30 %	29 %	28 %	17 %	24 %



Obrázek 4-19 Statický modul pružnosti 1. části tvárnice

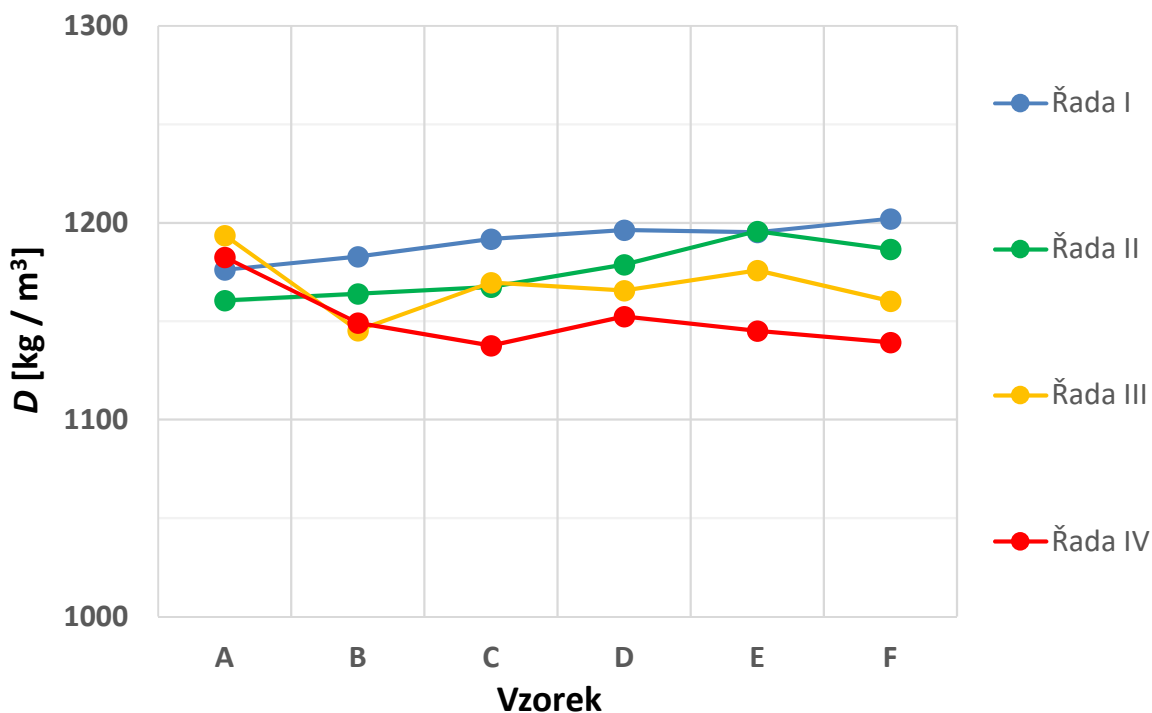
- *Diskuze a výsledky*

Experimentálním testováním za použití rezonanční metody a zkoušky pevnosti v tlaku byly stanoveny mechanické vlastnosti Energosádry Počerady. Byly podrobně popsány průběhy hodnot E_c a E_d po jednotlivých vrstvách původní sádrové tvárnice umístěné po dobu 4 let ve fasádě budovy Fakulty stavební ČVUT v Praze. Sádrová tvárnice nebyla před umístěním do fasády ošetřena povrchovou úpravou. Průběhy hodnot E_c a E_d korespondují. Hodnoty E_c a E_d směrem vně tvárnice (do exteriérové a interiérové strany tvárnice) mají rostoucí charakter. Uprostřed tvárnice byly naopak stanoveny minimální hodnoty E_c a E_d . Na základě provedených zkoušek lze konstatovat, že vliv vnějšího prostředí (povětrnost) nemá vliv na sledované materiálové charakteristiky.

4.2.2. Druhá část tvárnice z Energosádry

Experimentální zkoušení druhé části původní sádrové tvárnice probíhalo za pomoci nedestruktivní rezonanční metody a metody ultrazvukové průchodové. V kapitole je uvedeno srovnání výsledků dynamického modulu pružnosti při stanovení různými nedestruktivními metodami. Stejně jako v předchozí kapitole bylo k testování použito 24 zkušebních těles. Způsob výroby zkušebních vzorků je proveden podle schématu v kapitole 3.2.

U vyrobených sádrových těles bylo provedeno zvážení a změření rozměrů. Na základě zjištěných hmotností a rozměrů byla vypočtena objemová hmotnost pro každý zkušební vzorek. Průměrná objemová hmotnost všech vzorků je 1170 kg/m^3 při maximální odchylce 2 %. Všechny vrstvy tvárnice vykazují shodné objemové hmotnosti, což je vykresleno v grafu Obrázek 4-20. Na objemovou hmotnost těles nemá vnější prostředí významný vliv. Odchylka ve výši 2 % je s ohledem na způsob stanovení objemové hmotnosti zanedbatelná.

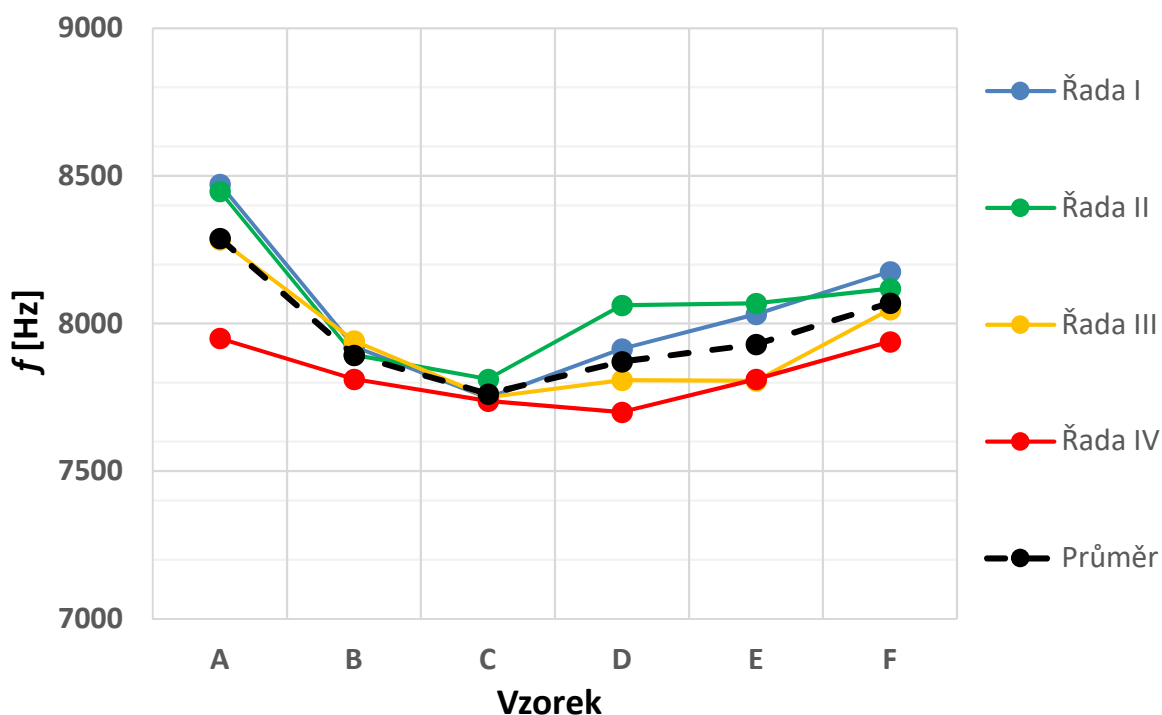


Obrázek 4-20 Objemová hmotnost vzorků 2. části tvárnice

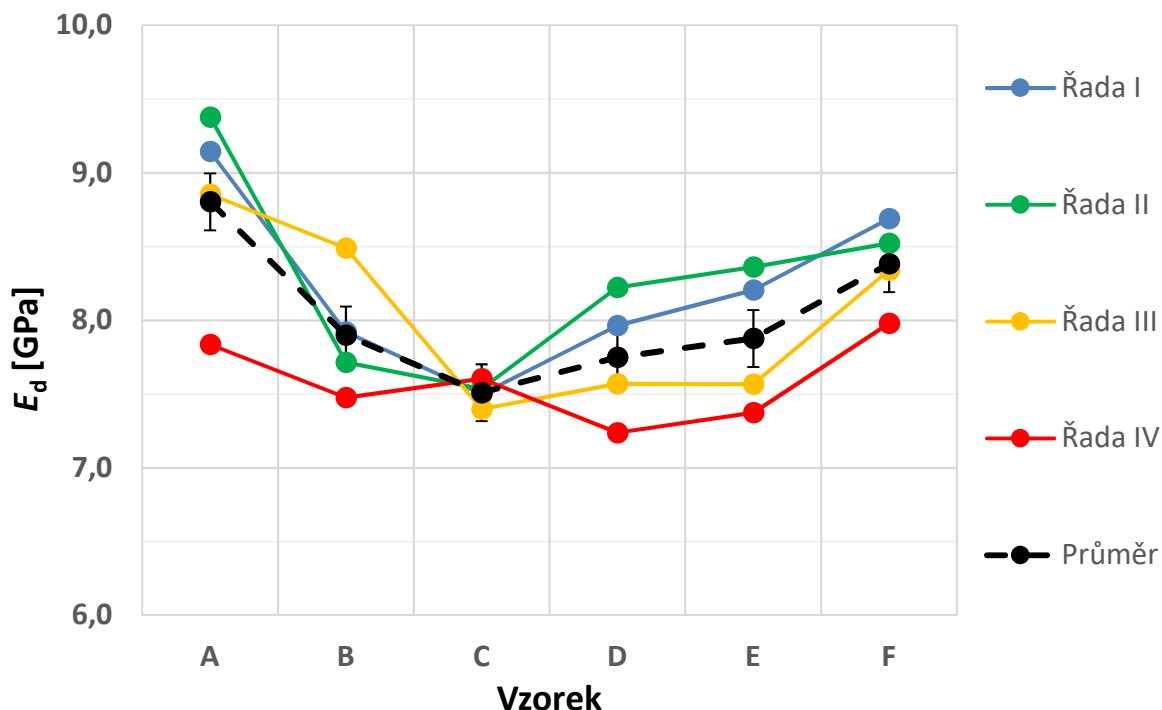
- *Vzorky zkoušené rezonanční metodou*

Pro stanovení dynamického modulu pružnosti byly nejprve zjištěny základní frekvence podélného kmitání všech 24 sádrových vzorků. Hodnoty základních frekvencí jsou uvedeny v grafu Obrázek 4-21. Podle vztahu (2) byl z rozměrů, hmotnosti a základních frekvencí podélného kmitání určen dynamický modul pružnosti.

Hodnoty E_d na exteriérové straně (vrstva A) původní sádrové tvárnice jsou mírně vyšší. Průměrná hodnota E_d je ve vrstvě A 8,8 GPa. Pro interiérovou stranu tvárnice (vrstva F) je průměrná hodnota E_d 8,4 GPa, což je zhruba o 5 % nižší hodnota. Směrem do středu tvárnice (vrstva C a D) klesá hodnota E_d na 7,6 GPa. Průměrné hodnoty E_d a hodnoty E_d pro každý vzorek jsou uvedeny v grafu Obrázek 4-22. Rozptyl hodnot dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé vrstvy tvárnice (A až F) maximálně 0,18 GPa. Hodnoty E_d jsou v závěru kapitoly srovnány s hodnotami E_d určenými z ultrazvukové průchodové metody a zároveň jsou průměrné hodnoty E_d podrobně vypsány v tabulce Tabulka 11.



Obrázek 4-21 Základní rezonanční frekvence podélného kmitání 2. části tvárnice

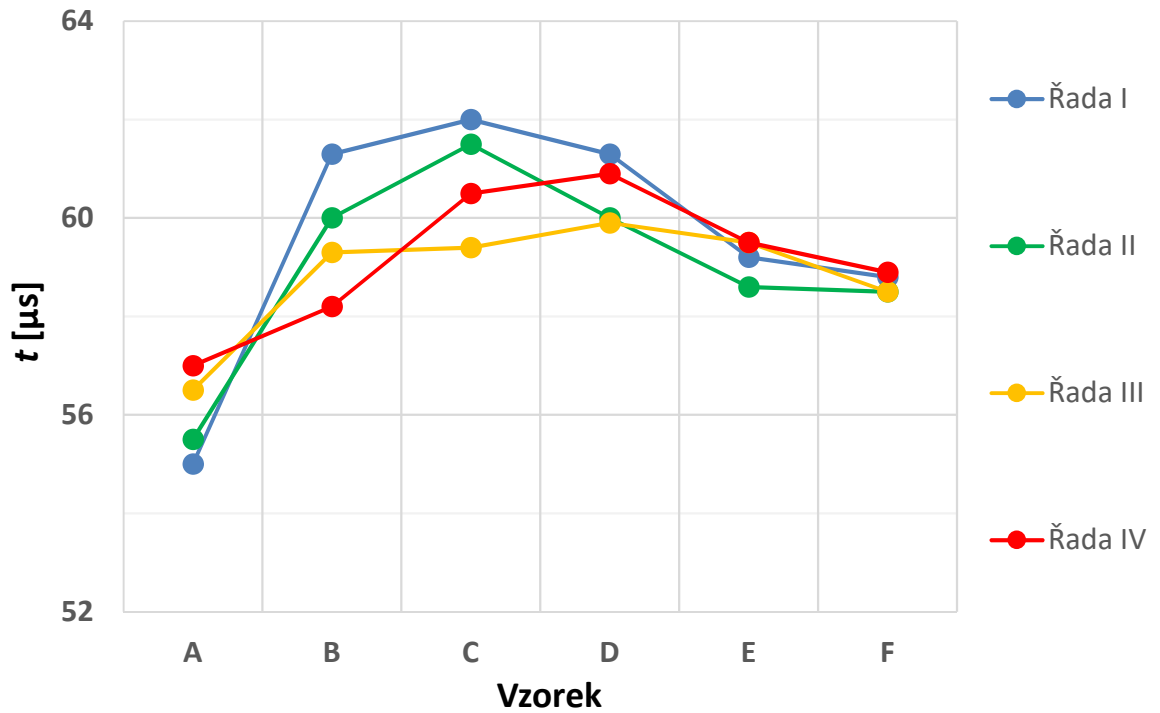


Obrázek 4-22 Dynamický modul pružnosti 2. části tvárnice

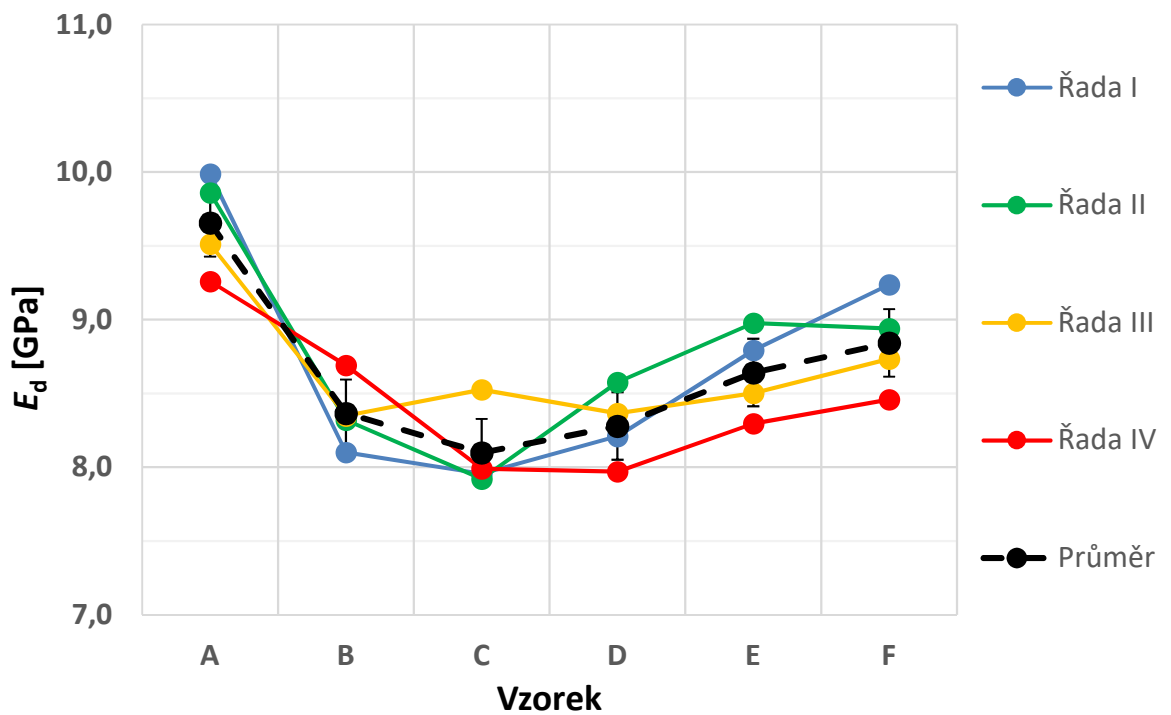
- *Vzorky zkoušené ultrazvukovou průchodovou metodou*

Níže jsou uvedeny výsledky měření nedestruktivní ultrazvukovou metodou v laboratoři na sádrových vzorcích vyrobených z druhé části původní sádrové tvárnice, které byly v předchozí fázi testování zkoušeny rezonanční metodou. Pro výpočet bylo využito stanovených hodnot objemových hmotností jednotlivých vzorků. Nejkratší dobu průchodu impulzu tělesem vykazuje exteriérová vrstva (vrstva A) sádrové tvárnice. Časy prostupu jsou mezi hodnotami 55,0 až 57,0 vs. Maximální odchylka od průměru dané vrstvy je 7 % (vzorek 1I) resp. 5 % (vzorek 3I). Nejdelší doba prostupu sádrovými vzorky byla naměřena v prostředních vrstvách (vrstvy III a IV). Doba prostupu středních vrstev se pohybuje mezi 59,4 až 62,0 vs. Doba prostupu impulzů, délka sádrového vzorku a objemová hmotnost jsou vstupními daty pro výpočet dynamického modulu pružnosti.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou zobrazeny v grafu (Obrázek 4-24). Dynamický modul pružnosti byl vypočítán pomocí vztahu (10). Získané hodnoty E_d jsou porovnány pro všech 24 sádrových vzorků, jak je uvedeno v závěru této kapitoly. Maximální hodnota E_d vypočtená na základě dat získaných ze zkoušky ultrazvukem se rovná 10,0 GPa. Nejnižší hodnota se rovná 7,9 GPa. Průměrná hodnota E_d všech vzorků je 8,7 GPa [29].



Obrázek 4-23 Doba průchodu signálu vzorky 2. části tvárnice



Obrázek 4-24 Dynamický modul pružnosti vzorků 2. části tvárnice určený ultrazvukovou metodou

V tabulce Tabulka 11 jsou zaznamenány hodnoty dynamického modulu pružnosti stanovené ultrazvukovou průchodovou metodou. Maximální hodnotu E_d dosahují vzorky ve vrstvě A (exteriér). Minimální hodnoty E_d vykazují vnitřní vrstvy sádrové tvárnice, což je ve shodě z předchozími závěry této kapitoly. Maximální rozptyl hodnot v jednotlivé vrstvě sádrové tvárnice nepřesahuje 5 %.

Tabulka 11 Komparace E_c 2. části tvárnice při stanovení nedestruktivními metodami

Vrstva, <i>veličina</i>	A	B	C	D	E	F	Průměr
Průměrná hodnota E_d (Rezonance) [GPa]	8,8	7,9	7,5	7,7	7,9	8,4	8,0
Průměrná hodnota E_d (Ultrazvuk) [GPa]	9,6	8,4	8,1	8,3	8,6	8,8	8,6
Rozdíl	9 %	6 %	8 %	8 %	9 %	5 %	7 %

- *Diskuze a výsledky*

Na základě provedených experimentálních měření, při kterých byly použity dvě různé nedestruktivní metody, byly vyhodnoceny E_d pro soubor 24 sádrových vzorků. Odchylna hodnot E_d stanovených ultrazvukovou průchodovou metodou a rezonanční metodou je pro jednotlivé vrstvy maximálně 9 %. Celkově nabývají hodnoty E_d stanovené ultrazvukovou průchodovou metodou zhruba o 7 % vyšší hodnoty.

Pro obě metody jsou znázorněny průběhy hodnot ve vrstvách sádrové tvárnice (A až F). Trendy hodnot E_d jsou ve shodě, přičemž směrem do exteriéru (působení vnějšího prostředí) jsou hodnoty E_d vyšší než ve vnitřních vrstvách. Pozitivním zjištěním této kapitoly je fakt, že vnější prostředí po 4 letech působení na povrch původní sádrové tvárnice nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti sádrové tvárnice. Naopak v exteriérové vrstvě A jsou hodnoty E_d nejvyšší. Trendy hodnot E_c a E_d v této kapitole jsou si velmi podobné.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ BETONOVÝCH VZORKŮ

Experimentální testování betonových vzorků v disertační práci je řešeno několika metodami a má za úkol popsat materiálové charakteristiky betonu při různých vnějších vlivech, které jsou v praxi řešeny. Byly použity destruktivní a nedestruktivní zkušební metody, přičemž byly tyto hodnoty na vybraných vzorcích porovnány. Při testování zhruba 500 vzorků byly průběžně stanovovány materiálové charakteristiky (pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, průsak tlakovou vodou, statický a dynamický modul a další) v průběhu prvního roku od výroby zkušebních těles.

Zkušební vzorky z betonu byly vyráběny v průběhu výstavby spodní stavby projektu administrativní budovy v Praze. Vzorky byly vyrobeny z betonových směsí několika tříd (C 30/37, C 40/50, C 50/60 a C 55/67), přičemž pro obalové konstrukce spodní stavby (základovou desku a obvodové suterénní stěny 1. až 3. podzemního podlaží bylo použito betonu C 30/37 s krystalizační přísadou, která je popsána v kapitole (3.3). Schéma spodní stavby je uvedeno v kapitole 3.3.2 (Obrázek 3-13).

5.1. BETONY, PROJEKT VISIONARY

V první části experimentálního testování betonových vzorků se disertační práce věnuje vzorkům betonů vyrobených při výstavbě spodní stavby projektu Visionary. Vzorky byly odebírány v průběhu výstavby v období od listopadu 2016 do března 2017. Pro provedení zkoušek pevností v tlaku, v příčném tahu a stanovení průsaku tlakovou vodou byly vyráběny sady vzorků o rozměrech 150 × 150 × 150 mm. Celkem bylo vyrobeno téměř 500 vzorků několika tříd betonů, jejichž materiálové vlastnosti jsou v následujících kapitolách podrobně vyhodnoceny. K vzorkům betonových krychlí o hraně 150 mm bylo vyrobeno 6 trojic betonových trámců o rozměrech 400 × 100 × 100 mm z betonu třídy C 30/37.

V kapitole 5.1.1 je u betonových vzorků sledován průsak tlakovou vodou. Zkouška hloubky průsaku [ČSN EN 12390-8] je jednou ze zkušebních metod, která je součástí ověřovací zkoušky pro betony třídy C 30/37 s krystalizační přísadou (kapitola 5.3), ve kterých jsou podrobně sledovány vybrané materiálové charakteristiky. V další kapitole (5.1.2) je popsán vývoj hodnot pevností betonových vzorků v čase v prvním roce od výroby těchto vzorků. Pevnosti v tlaku [ČSN EN 12390-3] jsou stanoveny pro beton C 30/37 s krystalizační přísadou i bez ní. Tyto hodnoty jsou mezi sebou srovnány. Dále jsou vyhodnoceny hodnoty pevnosti

betonu v tlaku i pro další třídy betonů použité při realizaci spodní stavby projektu Visionary. Na závěr kapitoly jsou vyhodnoceny pevnosti v příčném tahu vybraných vzorků, porovnány hodnoty statického a dynamického modulu pružnosti betonových trámů.

Materiálové charakteristiky betonů obalových konstrukcí spodní stavby projektu Visionary jsou podrobně vyhodnoceny pro ověřovací zkoušku, která doplňuje průkazní zkoušky betonových směsí. Ověřovací zkouška, která je součástí disertační práce v kapitole 5.3, je provedena z důvodu prokázání pozitivního vlivu přísady XYPEX v betonech použitých při výstavbě. Vliv krystalizační přísady byl sledován výhradně v betonu C 30/37-XC4-XD1-XA1 s pomalým náběhem pevnosti (90 dní).

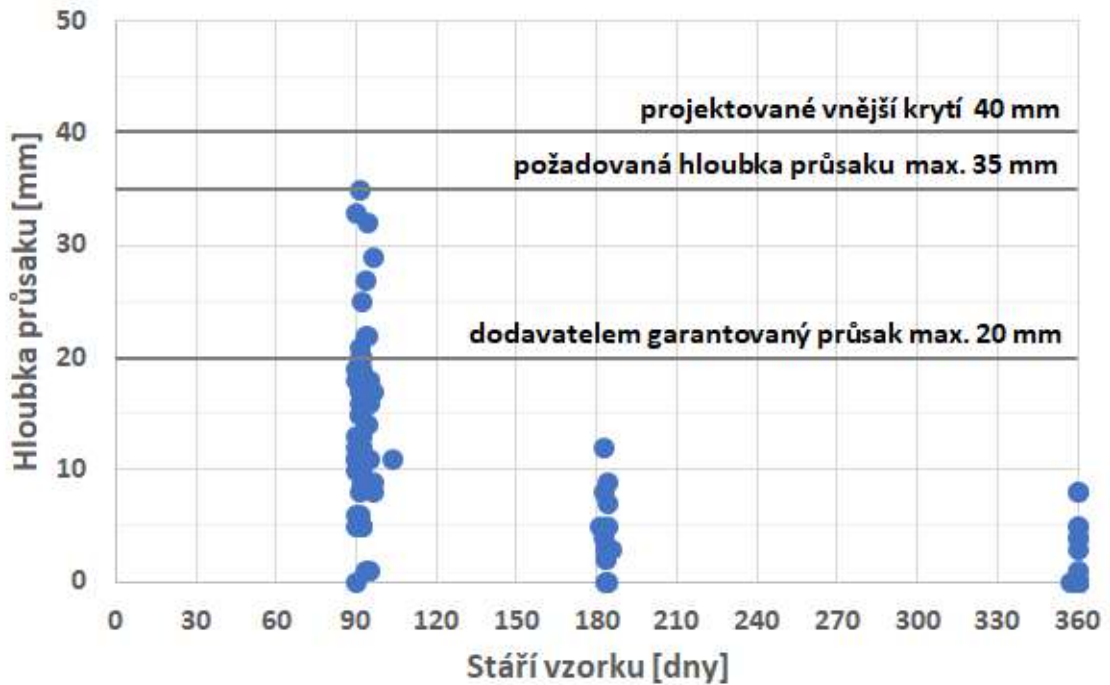
5.1.1. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

V grafu (Obrázek 5-1) jsou zobrazeny hloubky průsaku pro betony C 30/37 s krystalizační přísadou, která je popsána v kapitole 3.3.1. V grafu jsou vyznačeny úrovně hloubky průsaku, které jsou převzaty z projekčního návrhu a smluvních ujednání mezi generálním dodavatelem a dodavatelem betonové směsi resp. monolitické konstrukce spodní stavby.

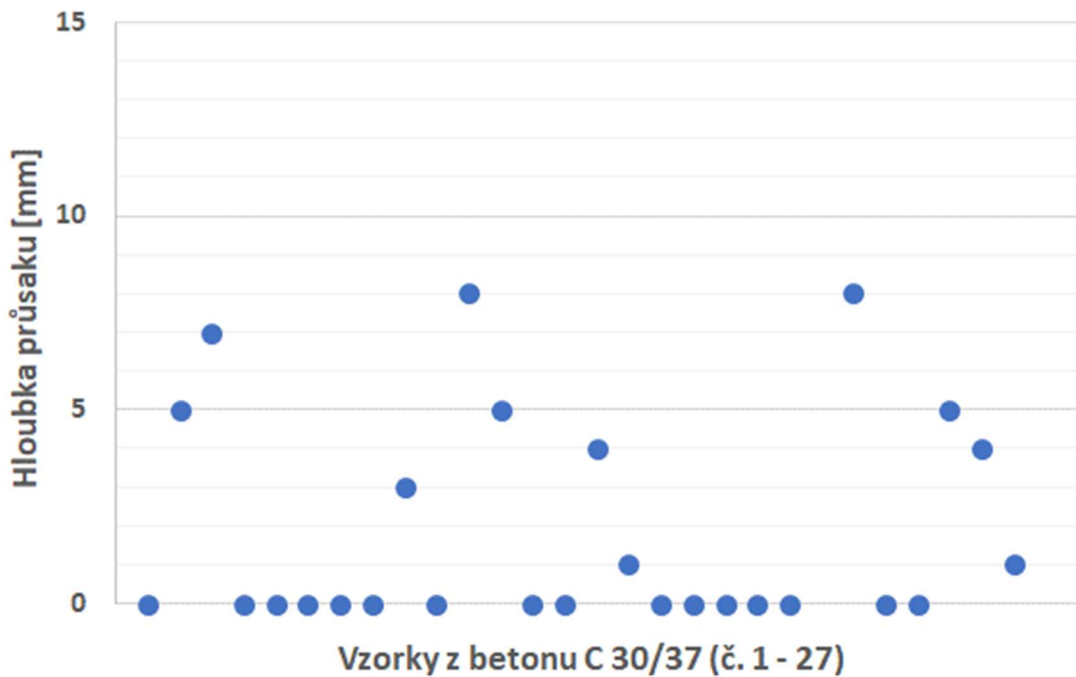
Vnější krytí armatury je projektované 40 mm. Hloubka vnějšího krytí armatury obvodových suterénních stěn a základové desky je navržena s ohledem na vlivy působící na betony spodní stavby po celou dobu životnosti konstrukce (kapitola 3.3.4). Generálním dodavatelem stavby je požadovaná maximální hloubka průsaku na úrovni 35 mm. Vzhledem k tomu, že se jedná o betony s pomalým nárůstem pevnosti, je tato maximální hloubka průsaku požadovaná v čase 90 dní od výroby vzorku resp. konstrukce. Poslední zvýrazněná úroveň hloubky průsaku na betonových tělesech je 20 mm. Hloubka průsaku 20 mm odpovídá garanci dodavatele betonové směsi při použití krystalizační přísady. Hloubka průsaku na betonových vzorcích je garantována v čase 180 dní od výroby vzorků při uložení do vodní lázně. Uložení ve vodní lázni simuluje vliv podzemní vody na betony spodní stavby.

V čase 90 dní od výroby vykazuje všech 61 betonových vzorků hloubku průsaku na úrovni 35 mm a nižší. Průměrná hodnota hloubky průsaku je 14 mm. Variačním rozpětí je 35 mm a směrodatná odchylka odpovídá hodnotě 7,4 mm. Pro betonové vzorky v čase 180 dní od výroby byla naměřena průměrná hloubka průsaku 4 mm při variačním rozpětí 12 mm a směrodatné odchylce 3,4 mm. Poslední měření hloubky průsaku na betonových vzorcích probíhalo v 1 roce od výroby vzorků. Při stáří vzorku 360 dní byla na 27 vzorcích

naměřena průměrná hodnota průsaku 2 mm, přičemž směrodatná odchylka byla 2,7 mm a variační rozpětí odpovídalo hodnotě 8 mm. Hodnoty jsou přehledně zpracovány v tabulce 12.



Obrázek 5-1 Hloubka průsaku vzorků z betonu C 30/37 s přísadou



Obrázek 5-2 Hloubka průsaku betonu C 30/37 s přísadou v čase 360 dní

V grafu (Obrázek 5-2) je znázorněno všech 27 betonových vzorků testovaných v čase 360 dní od výroby. Na 16 vzorcích nebyl po rozlomení vzorků zatížených tlakovou vodou naměřen žádný průsak. Maximální průsak 8 mm byl naměřen u dvou vzorků. Téměř 90 % vzorků vykazuje hodnotu průsaku menší nebo rovnu 5 mm. S ohledem na navazující ověřovací zkoušky betonů je možné konstatovat, že krystalizační přísada XYPEX ADMIX C-1000 NF má pozitivní vliv na hloubku průsaku v betonových vzorcích (konstrukcích). Lze předpokládat, že betony resp. realizované konstrukce, které jsou v kontaktu s podzemní vodou a zajišťují vodonepropustnost spodní stavby, mají výše uvedené parametry a plní funkci, pro kterou byly navrženy.

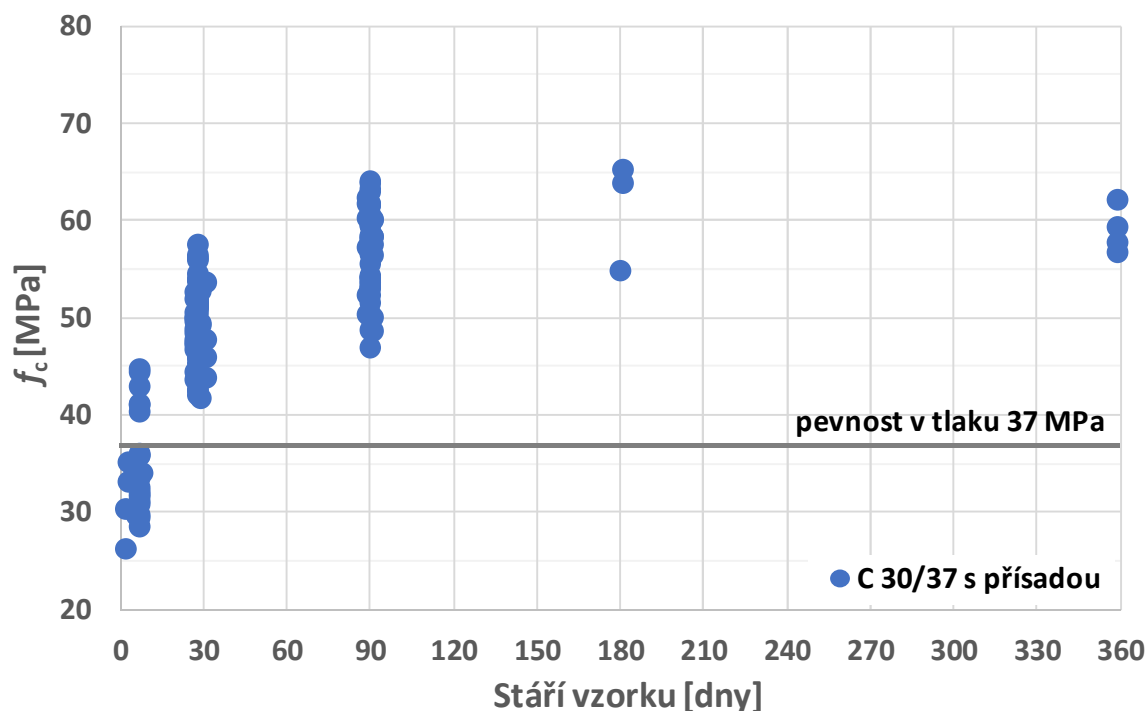
Tabulka 12 Srovnání hloubky průsaku betonu C 30/37 s krystalizační přísadou

Čas od výroby	Hloubka průsaku betonu C 30/37 s krystalizační přísadou		
	90 dní	180 dní	365 dní
Počet vzorků	61	15	27
Průměrná hodnota [mm]	14	4	2
Směrodatná odchylka [mm]	7,4	3,4	2,7
Minimální hodnota [mm]	0	0	0
Maximální hodnota [mm]	35	12	8
Variační rozpětí [mm]	35	12	8

5.1.2. Pevnost betonu v tlaku

V této kapitole jsou podrobně popsány pevnosti v tlaku, které jsou určovány v čase v průběhu prvního roku od výroby betonových těles pro různé třídy použitých betonových směsí. Pevnosti v tlaku byly stanoveny pro betony C 30/37 s krystalizační přísadou a bez této přísady, přičemž tyto hodnoty byly mezi sebou porovnány. Dále byly pro ověření hodnot pevností v tlaku stanoveny tyto hodnoty pro betony třídy C 40/50, C 50/60 a C 55/67.

Pevnost v tlaku je nejvýznamnější materiálovou vlastností betonu, a proto byla zkouška pevnosti v tlaku použita při testování celkem 148 vzorků betonu třídy C 30/37 s přísadou a při testování 51 vzorků betonu C 30/37 bez přísady. Pevnosti v tlaku zkušebních těles zhotovených z ostatních výše uvedených tříd betonu byly stanoveny na 32 vzorcích. V grafu (Obrázek 5-3) jsou zobrazeny hodnoty pevnosti v tlaku všech 148 vzorků z betonu C 30/37 s krystalizační přísadou v čase.

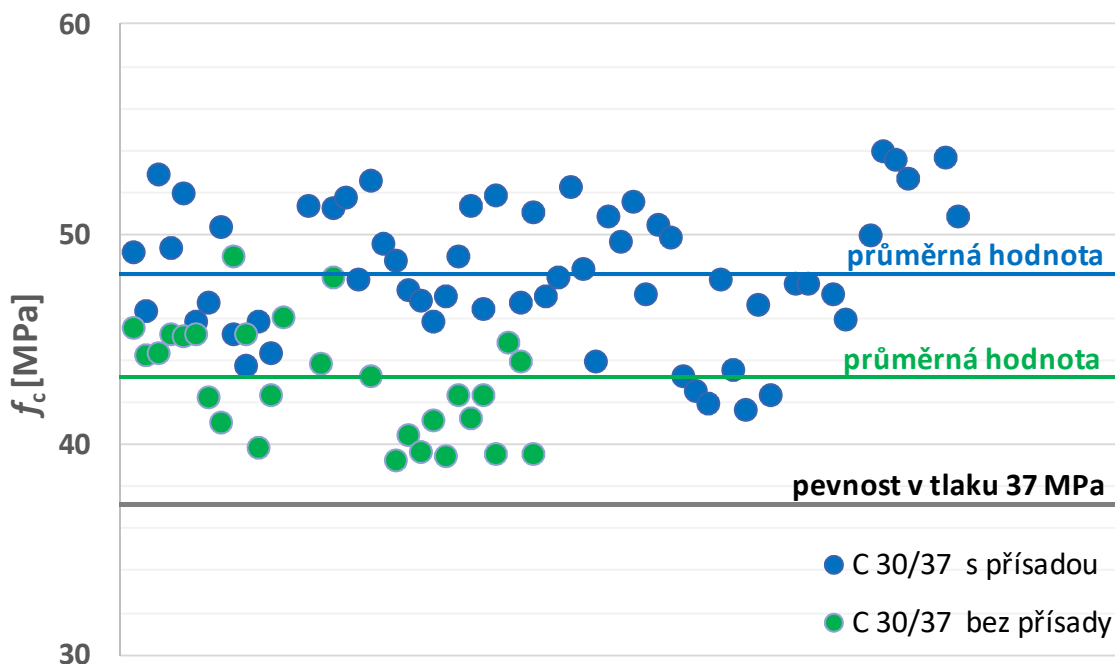


Obrázek 5-3 Hodnoty pevnosti v tlaku f_c betonu C 30/37 s přísadou

V prvním týdnu od výroby se pohybují hodnoty pevnosti v tlaku mezi 26 až 45 MPa. Hodnoty pevnosti v tlaku na těchto 25 vzorcích vykazují průměrnou hodnotu 34,5 MPa, směrodatnou odchylku 5,1 MPa a variační rozpětí 18,5 MPa. V prvním týdnu od výroby nemají hodnoty pevnosti v tlaku rozhodující váhu. Výše uvedené hodnoty pevnosti jsou pozitivním zjištěním a pomáhají v rámci výstavby, kdy dostatečně rychle nabývají pevnosti realizovaných konstrukcí.

Hodnoty pevnosti v tlaku betonových vzorků v čase 28 dní od výroby jsou dále srovnány pro betony C 30/37 s krystalizační přísadou a bez přísady (Obrázek 5-4). Průměrná hodnota pevnosti v tlaku pro vzorky s přísadou je 48,9 MPa oproti vzorkům z betonu C 30/37 bez přísady, které vykazovaly hodnotu pevnosti v tlaku 43,1 MPa, což je o 12 % nižší hodnota. Směrodatné odchylky, variační rozpětí a další vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 13), ve které jsou srovnány betonové vzorky vyrobené ze shodné třídy C 30/37, ale za přidání krystalizační přísady XYPEX anebo bez přísady 28 dní od výroby.

Vzhledem k tomu, že pro obalové konstrukce spodní stavby byl navržen beton s pomalým nárůstem pevnosti, je pro pevnosti v tlaku tohoto betonu čas 90 dní od výroby. Beton C 30/37 v čase 90 dní od výroby vykazoval průměrnou hodnotu pevnosti v tlaku 56,7 MPa. Podrobné vyhodnocení pevnosti v tlaku pro beton C 30/37 s přísadou je uveden v tabulce (Tabulka 13).



Obrázek 5-4 Srovnání hodnot pevnosti v tlaku f_c 28 dní od výroby

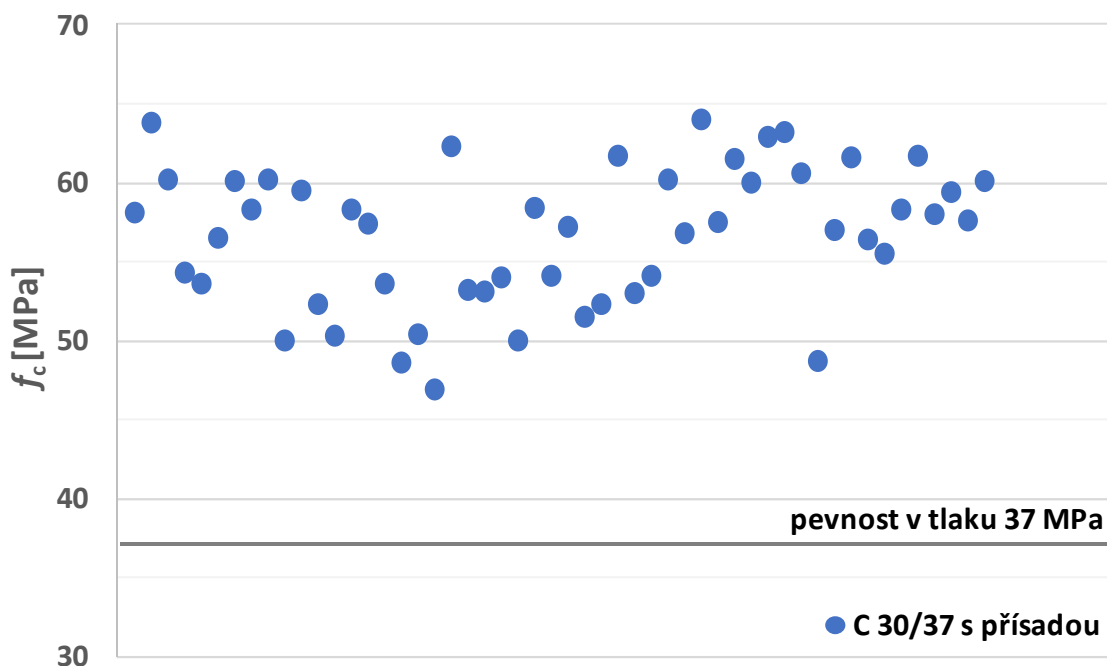
Tabulka 13 Srovnání hodnot pevnosti v tlaku betonu C 30/37

Beton	C 30/37		
	28 dní	28 dní	90 dní
Čas od výroby	28 dní	28 dní	90 dní
Krystalizační přísada	ANO	NE	ANO
Počet vzorků	64	28	52
Průměrná hodnota [MPa]	48,9	43,1	56,7
Směrodatná odchylka [MPa]	3,7	2,6	4,3
Minimální hodnota [MPa]	41,7	39,3	46,9
Maximální hodnota [MPa]	57,5	49,0	64,0
Variační rozpětí [MPa]	15,8	9,7	17,1

V průběhu dalšího experimentálního testování za pomoci zkoušky v prostém tlaku byly stanoveny hodnoty pevnosti v tlaku betonových vzorků 180 a 365 dní od výroby. V čase 180 dní od výroby vzorků byly stanoveny hodnoty pevnosti v rozmezí od 54,8 MPa do 65,2 MPa při průměrné hodnotě 61,3 MPa. Variační rozpětí je 10,4 MPa a směrodatná odchylka těchto hodnot je 4,6 MPa. Stanovení pevnosti v tlaku na betonových vzorcích

v jednom roce od výroby bylo provedeno pouze informativně na 4 zbývajících betonových tělesech. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku byla 59 MPa při směrodatné odchylce 2,0 MPa.

Zkouška stanovení pevnosti v tlaku byla provedena na dvou stovkách vzorků, které byly vyrobeny při realizaci spodní stavby projektu Visionary a bylo tak prokázáno, že hodnoty pevnosti v tlaku všech testovaných vzorků mají minimálně požadované hodnoty, přičemž lze konstatovat, že krystalizační přísada má pozitivní vliv na hodnoty pevnosti v tlaku, což bylo výše prezentováno (Obrázek 5-3, Obrázek 5-4 a Tabulka 13).



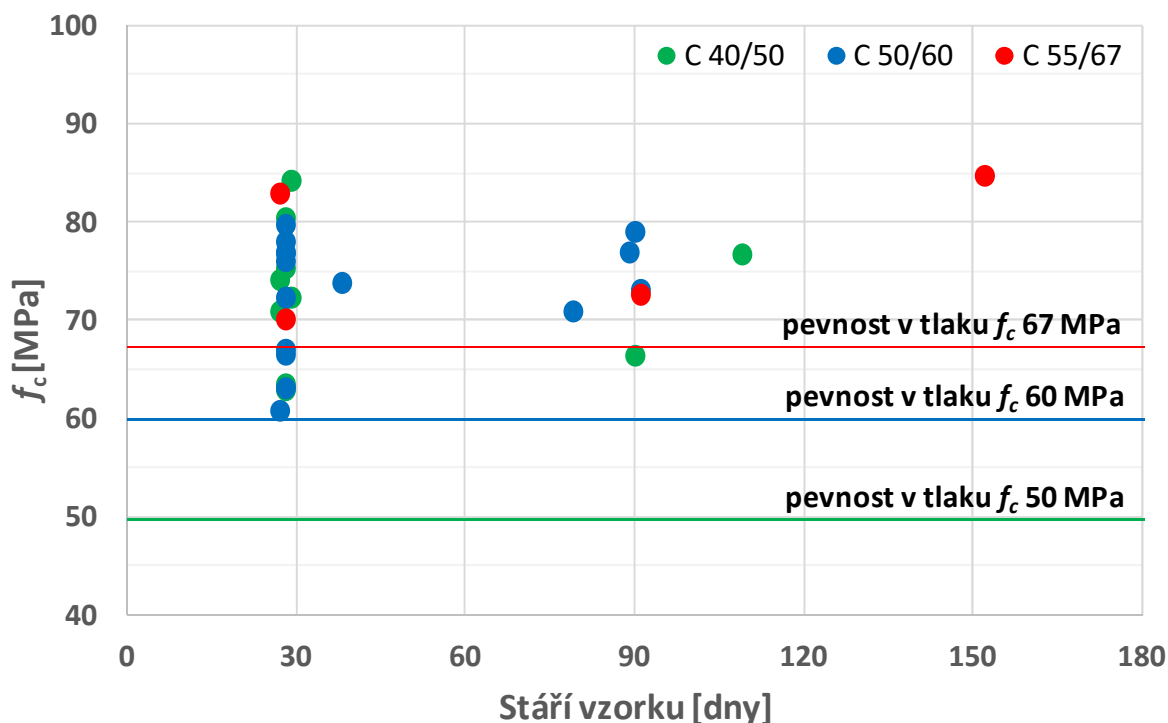
Obrázek 5-5 Pevnost v tlaku betonu C 30/37 s přísadou v čase 90 dní od výroby

V grafu (Obrázek 5-6) jsou uvedeny stanovené hodnoty pevnosti v tlaku tři odlišné třídy betonů, které byly použity na vnitřní konstrukce spodní stavby, kdy nebyla přidána krystalizační přísada a ani nejsou konstrukce navrženy na styk s podzemní vodou ani dalšími negativními vlivy z podloží. Experimentálně byly za pomoci zkoušky v prostém tlaku určeny hodnoty pevnosti v tlaku pro třídy betonu C 40/50 (11 betonových těles), C 50/60 (15 betonových těles) a C 55/67 (4 betonová tělesa). Testování betonových vzorků probíhalo především v čase 28 a 90 dní od výroby. V rámci experimentálního zkoušení pevnosti v prostém tlaku byly stanoveny průměrné hodnoty pevnosti v tlaku v čase 28 dní od výroby pro třídy betonu C 40/50 a C 50/60 shodně 71,8 MPa. S ohledem na malé množství vzorků z betonu třídy C 55/67 nebyly pro tuto třídu betonu výsledky vyhodnoceny.

V čase 90 dní od výroby byly stanoveny hodnoty pevnosti v tlaku zhruba o 5 % vyšší. V porovnání s projekčním statickým návrhem pevnosti v tlaku daných tříd jsou skutečné hodnoty pevnosti v tlaku testovaných vzorků vyšší o 43 % pro beton C 40/50 a o 20 % pro beton C 50/60.

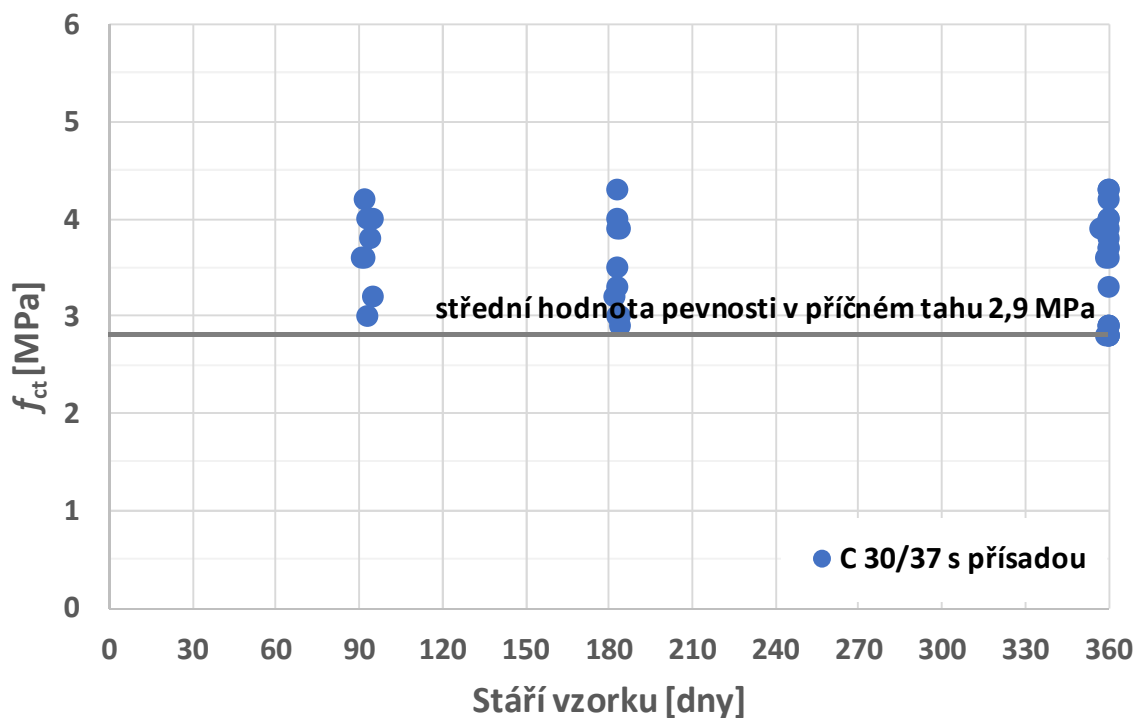
Jsou vyhodnoceny hodnoty pevnosti v příčném tahu pro betonové vzorky z betonu C 30/37 s krystalizační přísadou pro srovnání hodnot s hodnotami tabulkovými a také jsou vypočteny a vykresleny objemové hmotnosti všech testovaných betonových vzorků pro možnost srovnání této vlastnosti s předpokladem (normou). Pevnost v příčném tahu testovaných vzorků byly stanoveny v čase 90, 180 a 365 dní od výroby.

Střední hodnota pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 1992-1-1 pro beton třídy C 30/37 odpovídá hodnotě 2,9 MPa. V rámci testování 44 vzorků zkouškou v příčném tahu byly stanoveny hodnoty pevnosti v příčném tahu v rozmezí od 2,8 MPa do 4,3 MPa. Průměrná hodnota pevnosti v příčném tahu je 3,5 MPa, variační rozpětí 1,5 MPa a směrodatná odchylka 0,5 MPa. Na základě vyhodnocení hodnot pevnosti v příčném tlaku pro beton C 30/37 s krystalizační přísadou v této kapitole lze konstatovat, že krystalizační přísada nemá negativní vliv na výše uvedenou charakteristiku.



Obrázek 5-6 Pevnosti v tlaku f_c pro ostatní třídy betonu

5.1.3. Další materiálové charakteristiky betonu

Obrázek 5-7 Hodnoty pevnosti v příčném tahu f_{ct} betonu C 30/37 s přísadou

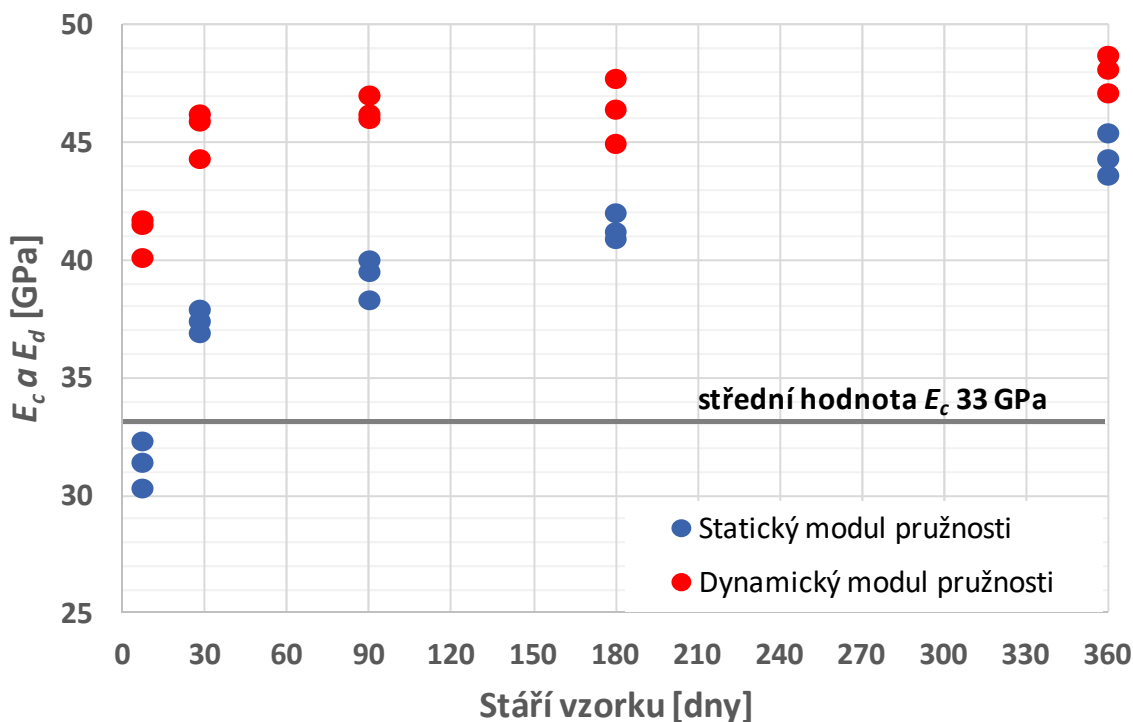
V další části kapitoly 5.1.3 jsou vyhodnoceny statické a dynamické moduly pružnosti šesti sad betonových trámů z betonu třídy C 30/37, které byly odebrány rovněž v průběhu realizace spodní stavby řešeného projektu. Podle tabulky z ČSN EN 1992-1-1 (Tabulka 4) je střední hodnota statického modulu pružnosti 33 GPa. Tato hodnota je znázorněna v grafu (Obrázek 5-8). V grafu jsou vykresleny hodnoty modulů pružnosti v průběhu prvního roku od výroby zkušebních sad vzorků. V grafu je patrný vývoj hodnot E_c a E_d testovaných těles, který koresponduje s faktem, že hodnota modulu pružnosti v čase při zrání betonu narůstá.

V následujícím grafu Obrázek 5-8 jsou srovnány hodnoty dynamického modulu pružnosti E_d stanoveného ultrazvukovou průchodovou metodou (kapitola 2.1.2) a statického modulu pružnosti E_c stanoveného dle ČSN ISO 1920 (kapitola 2.2.4). V čase 28 dní od výroby všech sad betonových vzorků odpovídají hodnoty E_c 37 GPa a hodnoty E_d 45 GPa. Hodnota E_d je přibližně o 20 % vyšší než hodnota E_c . Závislost dynamického a statického modulu pružnosti odpovídá běžně udávanému koeficientu 0,8 pro betony třídy C 30/37.

V dalším průběhu zrání betonových trámů je zřejmý nárůst E_c zhruba o 10 % při každém měření (90, 180 a 365 dní od výroby). Naopak vývoj hodnoty E_d stanoveného ultrazvukovou

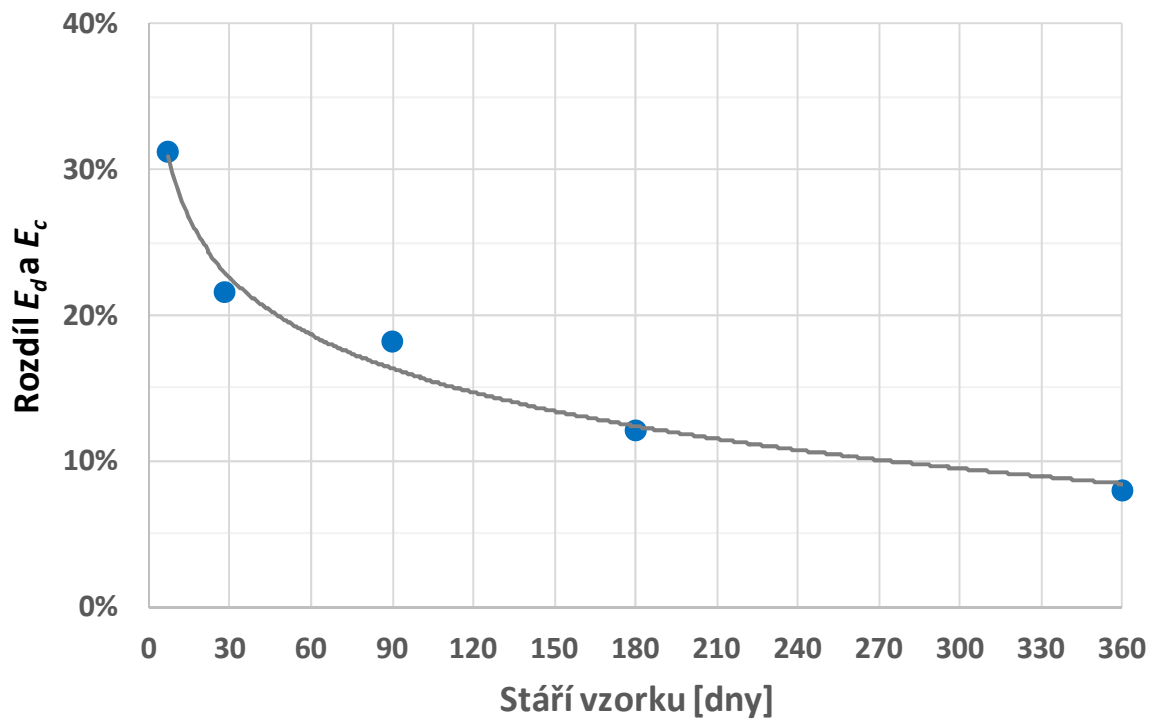
průchodovou metodou je po prvních 28 dnech od výroby téměř konstantní. Mezi jednotlivými měřeními (28 a 365 dní od výroby) narůstají hodnoty E_d o 5 %.

V grafu (Obrázek 5-9) je vykreslena závislost dynamického a statického modulu pružnosti v prvním roce od výroby.

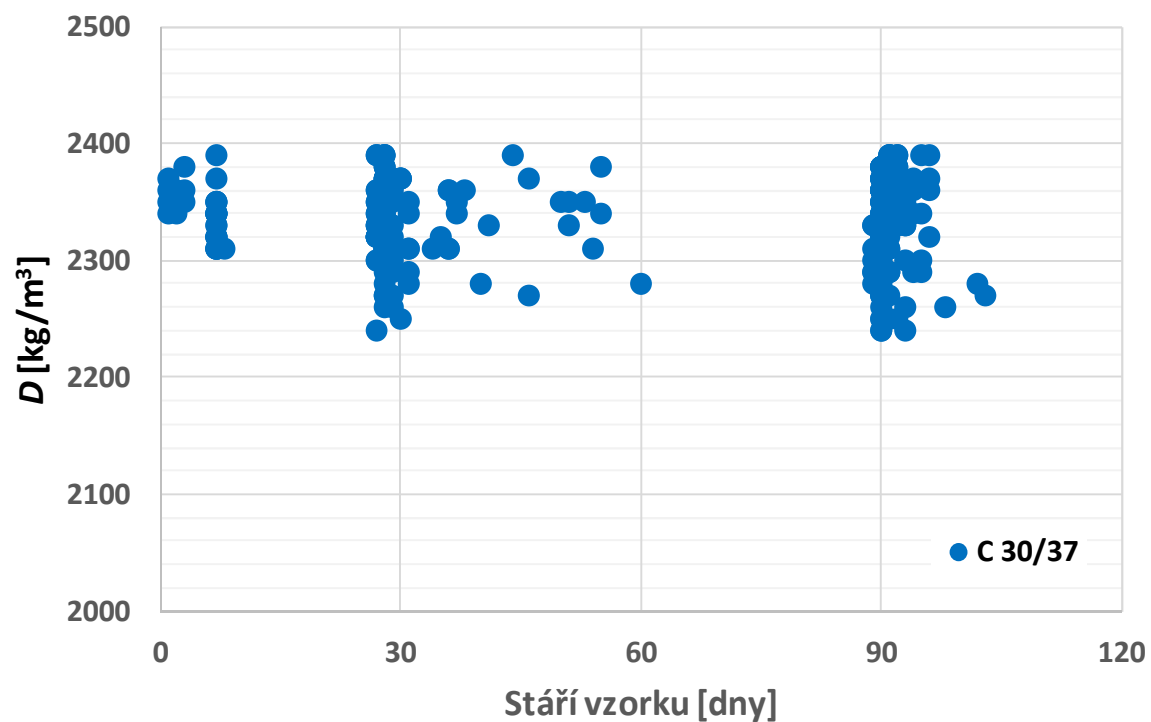


Obrázek 5-8 Srovnání hodnot statického a dynamického modulu pružnosti

V průběhu experimentálního zkoušení betonových vzorků byly průběžně stanovovány hodnoty objemových hmotností vzorků dle ČSN EN 12390-7 a podle vztahu (12). Minimální hodnota objemové hmotnosti pro soubor všech testovaných vzorků betonu C 30/37 odpovídá hodnotě 2260 kg/m^3 , maximální hodnota je 2380 kg/m^3 . Rozptyl hodnot objemové hmotnosti je do 5 %, směrodatná odchylka má hodnotu 29 kg/m^3 . Hodnoty objemové hmotnosti splňují požadavky ČSN EN 206-1 pro obyčejné betony. V grafu (Obrázek 5-10) jsou znázorněny hodnoty objemových hmotností vzorků z betonu C 30/37 s přísadou i bez přísady (kapitola 5.1.3). Objemové hmotnosti betonů s přísadou a bez přísady byly podrobně sledovány a jsou téměř totožné. Z toho důvodu je možné tvrdit, že krystalizační přísada nemá na tuto vlastnost betonů vliv.

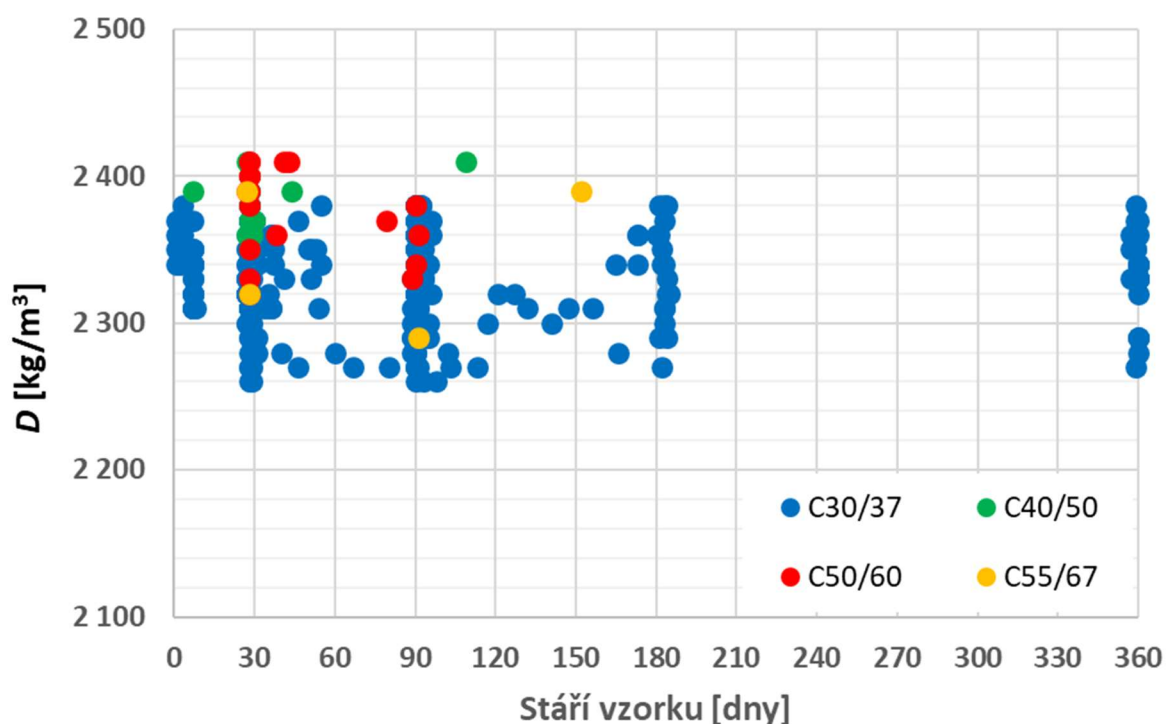


Obrázek 5-9 Rozdíl hodnot statického a dynamického modulu pružnosti v čase



Obrázek 5-10 Objemová hmotnost betonových vzorků C 30/37

V grafu (Obrázek 5-11) jsou znázorněny objemové hmotnosti všech testovaných sad betonových vzorků pro třídy C 30/37, C 40/50, C 50/60 a C 55/67. Hodnoty jsou zaokrouhleny na celé 10 g dle ČSN EN 12390-7 a jsou vybrány vzorky, které byly zkoušeny od výroby až po stáří 365 dní. Jsou znázorněny hodnoty převážně v prvním týdnu od výroby, ve 28 dnech od výroby a v čase 90, 180 a 365 dní od výroby. Rozptyl hodnot je od 2260 do 2410 kg/m³, průměrná hodnota objemové hmotnosti všech betonových vzorků je 2335 kg/m³ a směrodatná odchylka hodnot je 32 kg/m³.



Obrázek 5-11 Objemová hmotnost betonových vzorků

5.2. BETON C30/37, PROJEKT CORSO COURT

V kapitole 5.2 byly za pomoci nedestruktivní rezonanční zkoušky stanoveny hodnoty dynamického modulu pružnosti E_d a dynamického modulu pružnosti ve smyku G_d pro zkušební vzorky vyrobené v průběhu výstavby projektu Corso Court (administrativní budova Praha 8, Obrázek 5-12). Z E_d a G_d byly shodně s předchozími kapitolami podle vztahu (9) stanoveny hodnoty Poissonova čísla v průběhu testování. Vzorky o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm byly vyrobeny za účelem dlouhodobého sledování vývoje výše uvedených charakteristických vlastností betonu. Pro účely disertační práce jsou vyhodnoceny hodnoty výše uvedených veličin za 3 roky.

Při výstavbě monolitické nosné konstrukce projektu Corso Court byly využity betonové směsi třídy C 30/37, stejně jako je tomu v případě projektu Visionary. Rovněž pro výstavbu spodní stavby bylo použito krystalizační přísady pro zajištění vodotěsnosti obalových konstrukcí spodní stavby. Základová desky a obvodové stěny podzemních podlaží byly navrženy a provedeny tak, aby odolávaly vnějším vlivům (tlak podzemní vody, pronikání radonu z podloží, bludné proudy).

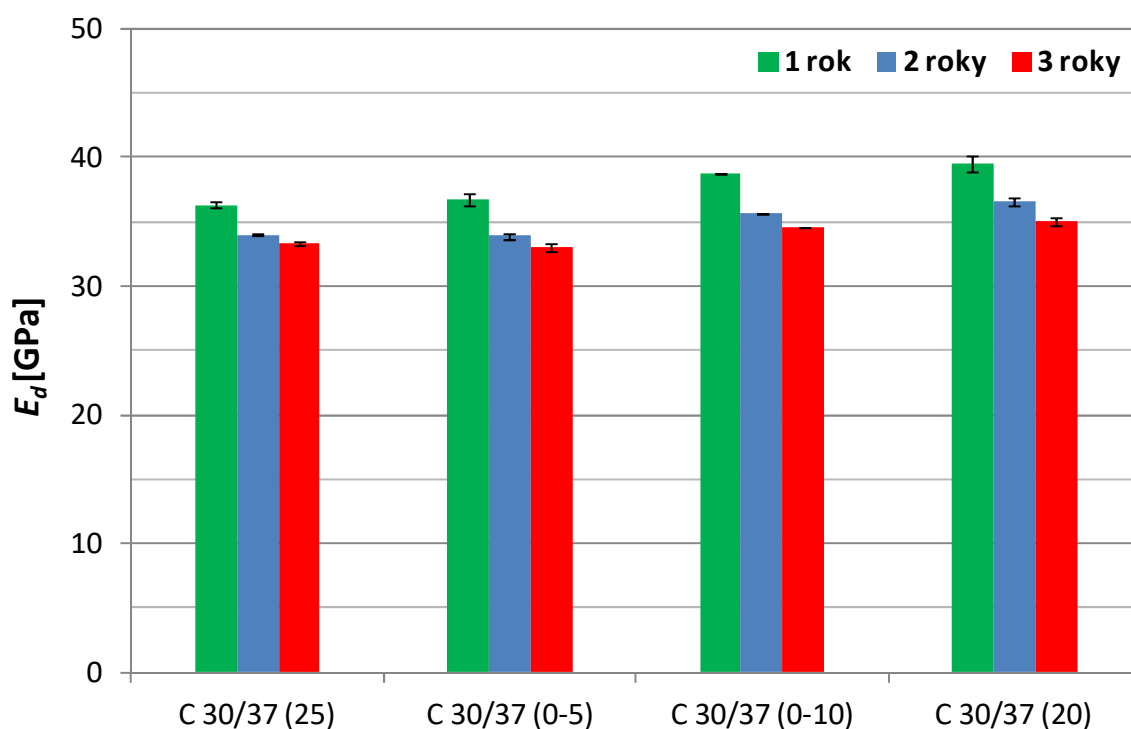


Obrázek 5-12 Sady vzorků z projektu Corso Court

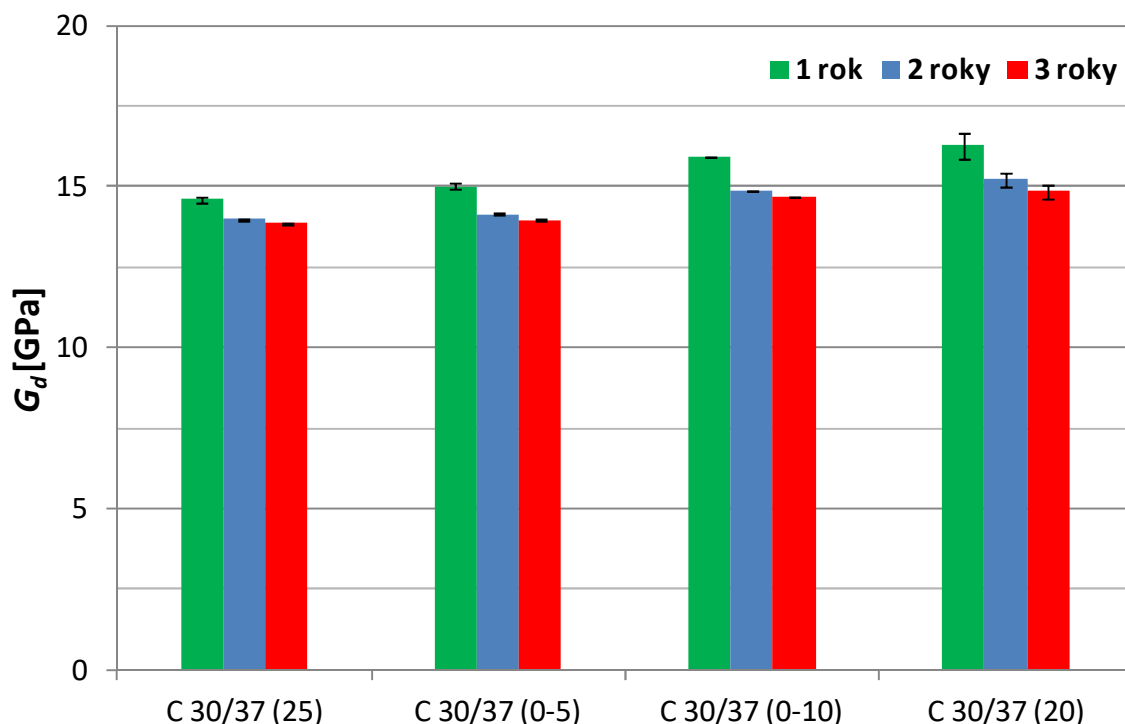
Vyrobené betonové vzorky byly rozděleny podle způsobu uložení. Sada vzorků C 30/37 (25) byla uložena laboratorním prostředím (teplota 25 °C, 50 % relativní vlhkost), druhá sada vzorků C 30/37 (0-5) byla uložena ve vodní lázni ve venkovním prostředí, přičemž v průběhu uložení vzorku (prvních 90 dní od výroby) byla teplota vodní lázně 0 až 5 °C. Třetí sada vzorků

byla uložena ve venkovním nechráněném prostoru v zimním období po dobu 90 dní od výroby, kdy byla teplota vzduchu mezi 0 až 10 °C. Poslední sledovaná sada vzorků byla uložena ve vodní lázni o konstantní teplotě 20 °C. Po prvních 90 dnech od výroby byly vzorky přeneseny do nechráněného venkovního prostředí, aby bylo zajištěno zrání betonu v totožném prostředí, v jakém jsou skutečné konstrukce spodní stavby. Následně byly po prvním experimentálním testování vzorky uloženy společně v laboratorním prostředí při teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 50 %.

Při každém testování (jednou ročně) byly betonové vzorky zváženy a byly změřeny jejich rozměry. Z naměřených hodnot byla stanovena objemová hmotnost podle vztahu (12). Pro všechny sady vzorků je zřejmý rozptyl hodnot (Obrázek 5-13, Obrázek 5-14, Obrázek 5-15) při prvním měření, kdy má vliv způsob uložení zkušebních těles. Rozdíl hodnot E_d pro první sadu z laboratorního prostředí oproti sadě vzorků, které byly uloženy při 20 °C ve vodní lázni, činí 10 %. Naopak je z grafů zřejmé, že jsou rozdíly naměřených uvedených hodnot v jednotlivých měřeních, které jsou prováděny vždy po roce, velmi malé. Lze tvrdit, že vzorky vykazují dlouhodobě velmi podobné materiálové vlastnosti i vzhledem k tomu, že bylo vyrobeno malé množství vzorků v jednotlivých sadách (vyrobena vždy 3 vzorky pro každou sadu).



Obrázek 5-13 Hodnoty E_d pro vzorky z projektu Corso Court



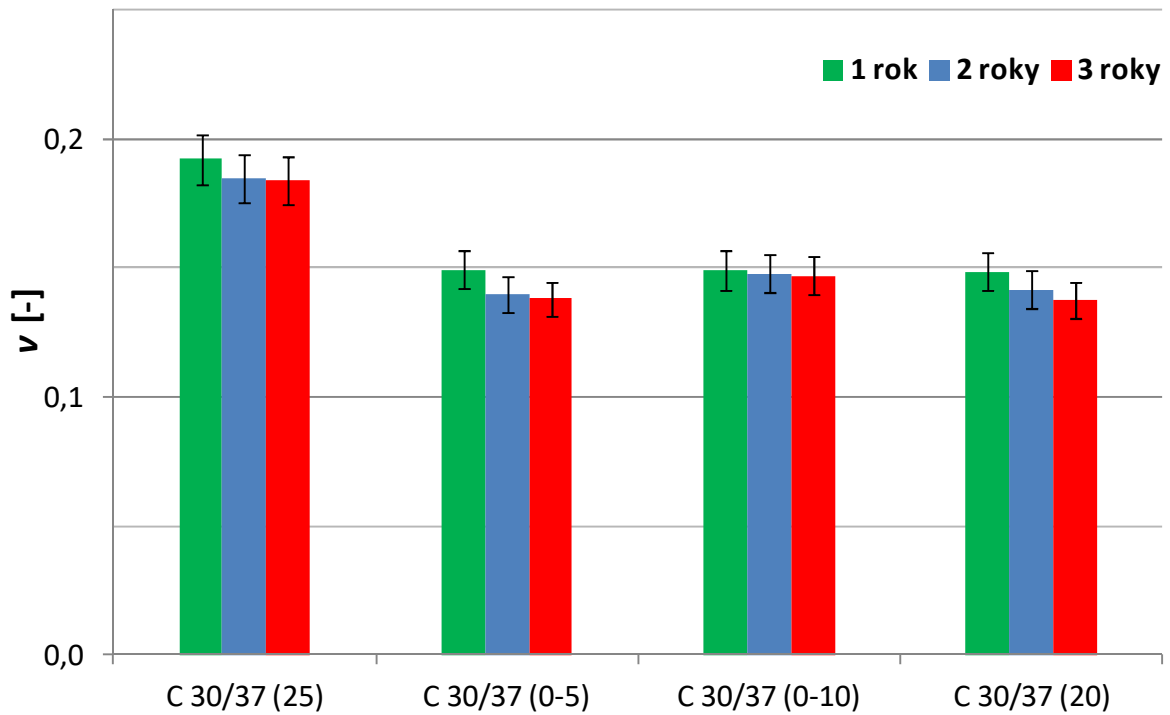
Obrázek 5-14 Hodnoty G_d pro vzorky z projektu Corso Court

V grafu (Obrázek 5-13) je zřejmý vývoj hodnot E_d v průběhu experimentálního testování za využití rezonanční metody. Při prvním zkoušení 327 dní (1 rok) od výroby nabývaly hodnoty základní frekvence podélného kmitání betonových vzorků hodnot 4950 až 5150 Hz, přičemž hodnoty základních frekvencí torzního kmitání nabývaly hodnot 2900 až 3050 Hz. Objemové hmotnosti vzorků při prvním měření odpovídaly hodnotám 2300 až 2320 kg/m³. V grafu (Obrázek 5-14) jsou uvedeny hodnoty dynamického modulu pružnosti ve smyku.

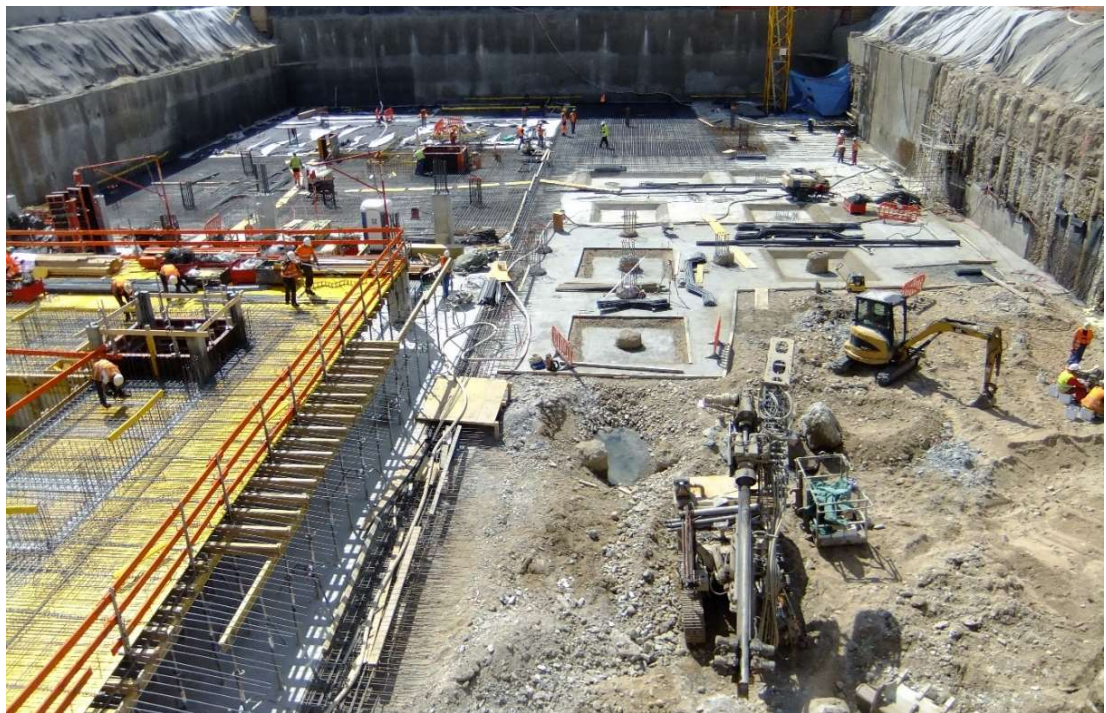
V průběhu dalších měření v druhém a třetím roce zkušebních vzorků od výroby je zaznamenán mírný pokles hodnot E_d a G_d . Zaznamenaný pokles je pravděpodobně způsoben změnou uložení betonových vzorků a malého množství betonových vzorků. Maximální rozdíly hodnot E_d pro sady vzorků (tři vzorky v sadě) mezi jednotlivými měřeními je 5 % od průměrné hodnoty a zároveň jsou v některých případech hodnoty E_d a G_d v po sobě jdoucích měřeních (letech) téměř shodné. V grafech (Obrázek 5-13, Obrázek 5-14) jsou v jednotlivých sloupcích pro všechny čtyři sady vzorků znázorněny směrodatné odchylky pro každou sadu.

Na závěr bylo z hodnot E_d a G_d vztahem (9) určeno Poissonovo číslo pro všechny sady betonových vzorků v časech 1, 2 a 3 roky. V grafu (Obrázek 5-8) je možné sledovat minimální rozdíly hodnot ν při jednotlivých měřeních. Vyjma sady betonových vzorků uložených od výroby v laboratorním prostředí (hodnoty ν jsou v rozmezí 0,18 až 0,19) nabývají hodnoty

v od 0,13 až do 0,15, přičemž je patrný mírně klesající trend těchto hodnot. Mírné snižování hodnot Poissonova čísla v čase je v souladu se standardním chováním betonů.



Obrázek 5-15 Hodnoty Poissonova čísla pro vzorky z projektu Corso Court



Obrázek 5-16 Stavební jáma projektu Corso Court

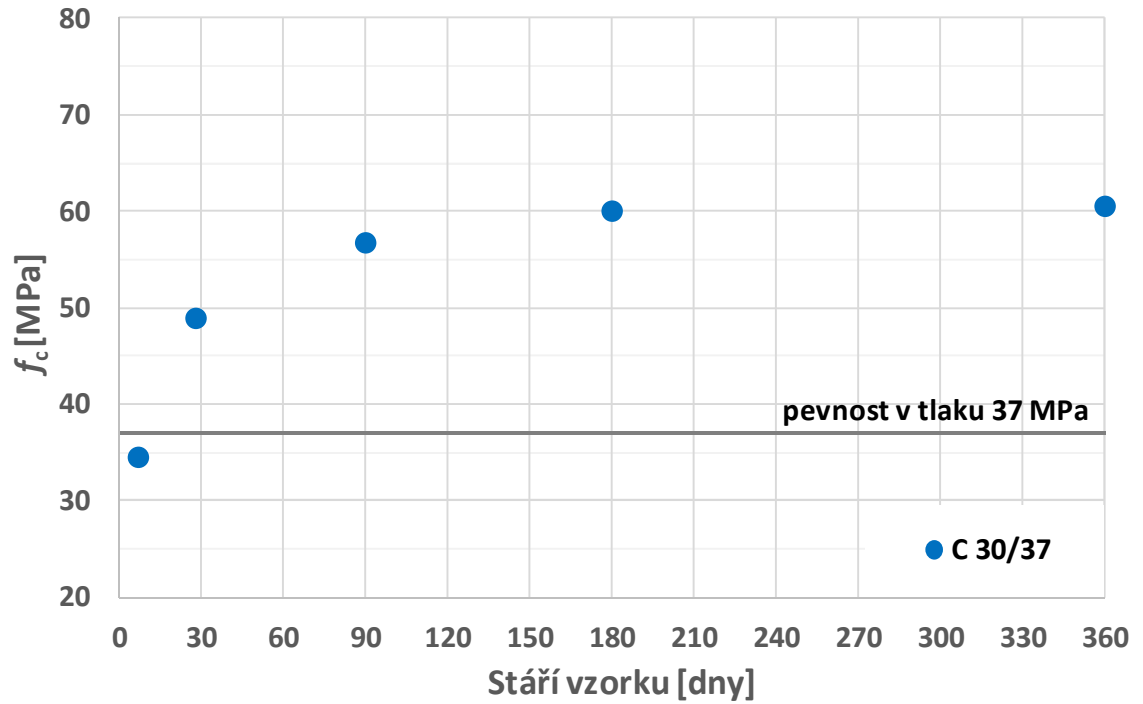
5.3. OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY

Na základě výsledků experimentálních zkoušek betonů použitých na projektu Visionary v předchozích kapitolách (5.1.1 a 5.1.2) disertační práce bylo provedeno vyhodnocení materiálových charakteristik a zároveň je těmito zkouškami ověřena správnost návrhu betonové směsi (kapitola 3.3.1).

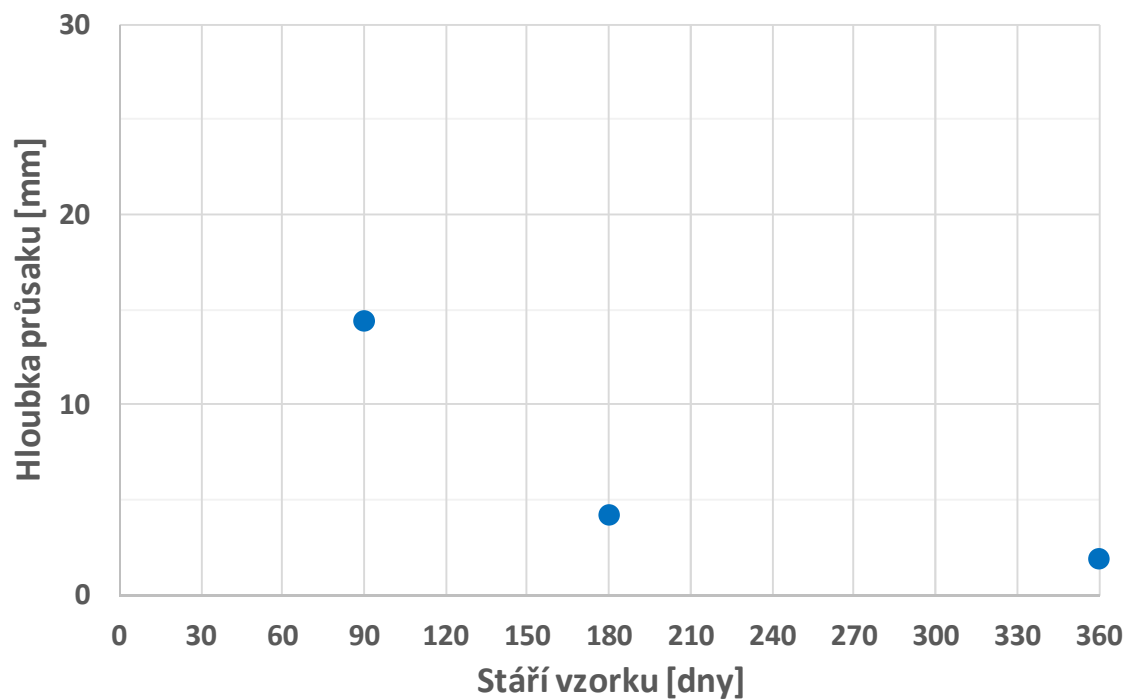
Vzhledem k tomu, že při návrhu receptury betonové směsi pro konstrukce spodní stavby, bylo dodavatelem monolitické konstrukce rozhodnuto o přidání krystalizační přísady XYPEX ADMIX C-1000 NF v množství $2 \text{ kg} / \text{m}^3$, bylo nutné provedení ověřovací zkoušky použitého betonu. Byla proto provedena ověřovací zkouška běžně dodávaného typového betonu s realizovanou změnou (v případě disertační práce přidání krystalizační přísady). Provedená zkouška má funkci ověřovacího dokladu. Plní funkci protokolu „o ověřovací zkoušce úpravy receptury“.

V případě doplnění přísady XYPEX Admix C-1000 NF probíhalo provedení ověřovací zkoušky za součinnosti společnosti NEKAP s.r.o. (distributora přísady v ČR). Realizovaná ověřovací zkouška je podrobně popsána ve výše uvedených kapitolách včetně závěrů, které byly díky experimentálnímu testování zhruba pěti set betonových vzorků vyhodnoceny. V grafech (Obrázek 5-17 a Obrázek 5-18) jsou uvedeny vývoje průměrných hodnot zásadních sledovaných materiálových charakteristik, které jsou součástí ověřovací zkoušky.

Pevnost v tlaku „devadesátidenního“ betonu třídy C 30/37 odpovídá v čase 90 dní od výroby 1,5 násobku požadované hodnoty. Od 90 dní od výroby vykazuje trend hodnot f_c další mírný růst. Průměrná hodnota průsaku tlakovou vodou pro „devadesátidenní“ beton třídy C 30/37 je v čase 90 dní od výroby 14 mm. V jednom roce od výroby je hodnota průsaku tlakovou vodou rovna 2 mm. Hodnoty pevnosti v tlaku a hloubky průsaku tlakovou vodou jsou zásadní parametry prokazující vhodnost použité betonové směsi s krystalizační přísadou.



Obrázek 5-17 Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku v čase (beton C 30/37 s přísadou)



Obrázek 5-18 Průměrná hloubka průsaku v čase (beton C 30/37 s přísadou)

6. ZÁVĚR

Disertační práce je zaměřena na stanovení mechanických vlastností porézních stavebních materiálů. Mechanické vlastnosti byly stanovovány pro sádrová pojiva a betony pomocí nedestruktivních a destruktivních zkušebních metod. Reprezentanty nedestruktivních metod jsou rezonanční a ultrazvuková průchodová metoda. Aplikovanými destruktivními metodami jsou pevnosti v tlaku, v příčném tahu a hloubka průsaku tlakovou vodou. Při experimentálním testování bylo použito téměř 200 sádrových vzorků vyrobených ze dvou různých sádrových pojiv a zhruba 500 vzorků betonů různých tříd. Vzhledem k tomu, že bylo částečně využito nedestruktivních zkušebních metod, které byly opakovány na totožných zkušebních tělesech, bylo provedeno více než jeden tisíc měření v průběhu 5 let.

Kapitola 4.1 je zaměřena na stanovení mechanických vlastností šedé sádry Gypstrend v průběhu jejího tvrdnutí v prvních 28 dnech od výroby. Kapitola je rozdělena na několik podkapitol, ve kterých jsou stanoveny dynamického moduly pružnosti zkušebních těles při uložení vzorků ve třech různých prostředích. Sady sádrových vzorků byly okamžitě po výrobě uloženy v laboratorním prostředí, vodní lázni anebo v sušárně. Pro takto uložené vzorky byly za pomoci rezonanční metody stanoveny vývoje hodnot E_d v čase v závislosti na obsahu vody resp. na způsobu uložení vzorků.

V kapitole 4.1.2 jsou hodnoty E_d srovnány se statickými moduly pružnosti určenými na základě zkoušky pevnosti v tlaku. Průběhy hodnot E_d a G_d jsou navzájem ve shodě. V případě vzorků uložených po výrobě v laboratorním prostředí je charakteristický nárůst hodnot E_d (G_d) druhý až pátý den téměř o 50 %. Pro sádrové vzorky z vodní lázně je charakteristický mírný pokles hodnot E_d a hodnoty E_d vzorků uložených v sušárně jsou relativně konstantní. Pro sadu vzorků, které byly od výroby uloženy ve vodní lázni, odpovídají hodnoty E_d zhruba 90 % hodnoty E_d sádrového vzorku, který byl uložen dlouhodobě v sušárně nebo v laboratorním prostředí. Hodnoty E_d vzorků uložených ve vodní lázni klesají až na pouhých 30 % hodnot E_d ostatních sad vzorků.

Hodnoty Poissonova čísla pro všechny soubory zkušebních těles se pohybují většinou v rozmezí 0,2 až 0,3. Pro podrobné popsání vývoje hodnot E_d , G_d a ν byly zkoušky doplněny o testování vzorků uložených v laboratorním prostředí každou hodinu v prvních 60 hodinách od jejich výroby. Průběhy hodnot jsou ve shodě s výsledky v kapitole 4.1.1. Úbytek vlhkosti v objemu jedné čtvrtiny hmotnosti sádrového vzorku nemá vliv na sledované mechanické vlastnosti. Při dalším úbytku vlhkosti a zrání sádrového vzorku dochází k nárůstu hodnot E_d .

V kapitole 4.1.2 byly hodnoty dynamického modulu pružnosti srovnány s hodnotami statických modulů pružnosti stanovených ze zkoušek pevnosti v tlaku. Hodnoty E_d a E_c byly srovnány v tabulce (Tabulka 9). Průměrná hodnota E_d odpovídá 1,5 násobku E_c .

Druhá část zkoušek sádrových pojiv je zaměřena na materiálové vlastnosti Energosádry Počerady. Bylo vyrobeno 48 zkušebních těles ze sádrové tvárnice, která byla jednostranně zatížena po dobu 4 let vnějším prostředím, přičemž nebyla vůči vnějším vlivům ošetřena. Provedené destruktivní i nedestruktivní zkoušky neprokázaly negativní vliv vnějšího prostředí na materiálové charakteristiky Energosádry. Všechny hodnoty E_d a E_c stanovené různými zkušebními metodami vykazují shodné trendy, přičemž E_d je zhruba o 25 % vyšší.

Experimentální zkoušení betonových vzorků v kapitole 5 probíhalo z důvodu prokázání vhodnosti zvolených betonových směsí s krystalizační přísadou pro konstrukce spodní stavby popsanych pozemních staveb (kapitola 3.3). Soubory zkušebních těles ze dvou projektů byly ve většině případů testovány v čase od 28 dní do jednoho roku od výroby vzorků. Pro stanovení mechanických vlastností bylo využito především destruktivních zkušebních metod. Destruktivní zkoušky byly v několika případech doplněny o zkoušky nedestruktivní.

Průměrná hodnota krychelné pevnosti betonu třídy C 30/37 s krystalizační přísadou v 90 dnech od výroby vzorků je o 50 vyšší než je hodnota požadovaná. Hodnota f_c betonu třídy C 30/37 s krystalizační přísadou v čase 28 dní od výroby je 48,9 MPa, ale pro shodnou třídu betonu bez krystalizační přísady pouze 43,1 MPa.

Dalším důležitým parametrem při posouzení vhodnosti betonové směsi je hloubka průsaku tlakovou vodou. Všechny betonové vzorky vykazují v čase 90 dní od výroby nižší hodnoty průsaku než 35 mm, přičemž v jednom roce od výroby vzorků téměř 90 % testovaných betonových vzorků třídy C 30/37 s krystalizační přísadou vykazuje hloubku průsaku tlakovou vodou nižší nebo rovnu 5 mm.

V kapitole 5.1.3 jsou v čase jednoho roku od výroby betonových vzorků srovnány statické a dynamické moduly pružnosti na základě výsledků ze zkoušek pevnosti v tlaku a ultrazvukové průchodové metody. Závislost E_d a E_c se v čase výrazně mění. Hodnota E_d odpovídá zhruba od 1,3 až 1,1 násobku E_c a je znázorněna v grafu Obrázek 5-9.

Provedenými experimentálními zkouškami na betonových vzorcích je prokázáno, že zvolené betonové směsi jsou v kombinaci s krystalizační přísadou vhodné k použití na konstrukce spodní stavby a použitá krystalizační přísada má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti betonů. Provedené zkoušky mají funkci ověřovacího dokladu a plní funkci protokolu „o ověřovací zkoušce úpravy receptury“.

7. POUŽITÁ LITERATURA, PODKLADY

- [1] **ČSN EN 206 + A1**, *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [2] **ČSN EN 12390-1**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [3] **ČSN EN 12390-2**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [4] **ČSN EN 12390-3**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [5] **ČSN EN 12390-4**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [6] **ČSN EN 12390-6**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [7] **ČSN EN 12390-7**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [8] **ČSN EN 12390-8**, *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [9] **ČSN EN 13670**, *Provádění betonových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [10] **ČSN 73 0601**, *Ochrana staveb proti radonu z podloží*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [11] **ČSN 12 504-4**, *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] **Zákon č. 91/2016 Sb.**, *kterým se mění zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky*.
- [13] **Nařízení vlády č. 163/2002 Sb.**, *kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky*.
- [14] **ASTM C215**, *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1991.

- [15] **ASTM E1876-01**, *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2006
- [16] **ČSN 72 2301**, *Sádrová pojiva*, Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [17] **ČSN ISO 1920-10 (73 1319)**, *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [18] **ČSN EN 1992-1-1**, *Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [19] **ČSN EN 843-2**, *Speciální technická keramika - mechanické vlastnosti monolitické keramiky při pokojové teplotě - část 2: stanovení Youngova modulu, modulu pružnosti ve smyku a Poissonova poměru*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [20] **ČSN EN 14146**, *Zkušební metody přírodního kamene - stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence)*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [21] **ČSN 73 1371**, *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [22] **ČSN EN ISO 12680-1 (72 6040)**, *Zkušební metody pro žárovzborné výrobky - část 1: Stanovení dynamického Youngova modulu (MOE) z vibrace vybuzené úderem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [23] **ČSN ISO 6784 (73 1319)**, *Beton - stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*, Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [24] **ČSN ISO 18437-2**, *Vibrace a rázy - určování dynamických mechanických vlastností viskoelastických materiálů - část 2: Rezonanční metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [25] **ČSN EN 1097-6**, *Stanovení nasákavosti*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [26] **Protokoly o zkoušce**, *Protokol č. 484/17/AL*. Praha: Kloknerův ústav, 2017, 5 protokolů.
- [27] **Mraček, T.:** *Zkoušení stavebních materiálů destruktivními metodami: diplomová práce*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2010. 74 s.
- [28] **Plachý, T., Tesárek, P., Ťoupek, R., Polák, M.;** Nondestructive Determination of Young's Modulus of ν Specimens Using Impulse Excitation Method, *Experimental Stress Analysis 2010*, May 31 - June 3, 2010 Velké Losiny. Czech Republic, s. 339 - 344.

- [29] **Žoupek, R.:** *Stanovení materiálových vlastností materiálů na bázi sádry nedestruktivní metodou: diplomová práce.* Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2011. 97 s
- [30] **Tesárek, P.:** *Tepelné, vlhkostní a mechanické vlastnosti upravených variant sádry.* Praha: 2007.
- [31] **Tesárek, P.:** *Vlastnosti energosádry a její využití ve stavebnictví: disertační práce.* Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2008. 135 s.
- [32] **Žoupek, R., Plachý, T., Tesárek, P., Polák, M.;** Rozložení hodnot dynamického modulu pružnosti v sádrovém bloku, *Nano a makro mechanika 2010*, October 21 - October 22, 2010 Bratislava, Slovakia, s. 213 - 216.
- [33] **Žoupek, R., Plachý, T., Tesárek, P., Polák, M.;** Změna dynamického modulu pružnosti při vysychání sádry, *New Trends in Statics and Dynamics 2010*, 14. září 2010, Praha, 4 s.
- [34] <http://www.proinex.cz/cs/107-originalni-schmidtova-kladivka-proceq.html>
- [35] **Žoupek, R., Plachý, T., Tesárek, P.;** Development of Mechanical Properties of Gypsum During Its Hardening, *Nano a Macro Mechanics 2012*, 2012, Praha, 6 s.
- [36] **Protokoly;** Labbet – zkušební laboratoř, 2017, Praha, 13 protokolů.
- [37] **Zkušební protokoly;** Skanska Transbeton – zkušební laboratoř Letňany, 2016 – 2017, Praha, 9 protokolů.
- [38] **Šibrava, M.;** Stavebně konstrukční část: Technická zpráva, únor 2017, Praha, 32 s.
- [39] **JCA a.s.;** Architektonicko-stavební část: Technická zpráva, prosinec 2016, Praha, 97 s.
- [40] **ČSN 03 8372,** *Zásady ochrany proti korozi neliniových zařízení uložených v zemi nebo ve vodě.* Praha: Český normalizační institut, 1978.
- [41] **Žoupek, R., Plachý, T., Polák, M., Tesárek, P.;** Changes of the Dynamic Modulus of Elasticity in Dependence on the Number of the Freeze-Thaw Cycles, *In: Proceedings of the 4th Conference Nano & Macro Mechanics.* Praha: Czech Technical University in Prague, 2013, p. 211-214. ISBN 978-80-01-05332-4.
- [42] **Plachý, T., Tesárek, P., Žoupek, R., Nežerka, V., Polák, M.;** The Changes of the Gypsum Mechanical Properties in Dependence on the Number of the Freeze-Thaw Cycles, *In: Proceedings of the 51st Conference on Experimental Stress Analysis.* Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2013, ISBN 978-80-7414-579-7.
- [43] **Němcová, H., Plachý, T., Žoupek, R., Tesárek, P., Polák, M.;** Influence of Moisture to Mechanical Properties of Materials, *In: Engineering Mechanics 2011.* Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2011, p. 411-414. ISBN 978-80-87012-33-8.

- [44] **Brožovský, J., Zach, J.;** Gypsum Free Cements and Concretes Made with Them: Strength Determination Using Nondestructive Testing Methods, *IV Conferencia Panamericana de END*, Buenos Aires: 2007.
- [45] **ČSN 12 504-2,** *Zkoušení betonu – Část 2: Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem.* Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [46] **Singh, M., Garg, M.:** Retarding Action of Various Chemicals on Setting and Hardening Characteristics of Gypsum Plaster at Different pH. *Cement and Concrete Research*, 1997, pp. 947-950.
- [47] **Colak, A.:** Density and Strength Characteristics of Foamed Gypsum. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, 2000, pp. 193-200.
- [48] **ČSN EN 12390-5,** *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.* Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [49] **TP ČBS 02,** *Bílé vany – vodonepropustné betonové konstrukce.* Praha: ČBS, 2007.

8. SEZNAMY

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1	Těleso připravené pro rezonanční zkoušku (torzní kmitání)	10
Obrázek 2-2	Rázové kladívko Brüel&Kjær typ 8206	12
Obrázek 2-3	Těleso připravené pro rezonanční zkoušku (podélné kmitání)	12
Obrázek 2-4	Proces stanovení Poissonova čísla podle ASTM 1876-01	16
Obrázek 2-5	Poloha senzoru a impulsu pro podélné kmity	18
Obrázek 2-6	Pozice senzoru a impulsu a základní mód pro torzní kmity	18
Obrázek 2-7	Pozice senzoru a impulsu pro ohybové kmity	18
Obrázek 2-8	Schmidtovo kladívko Proseq typ N	22
Obrázek 2-9	Schéma porušení vzorku při zatěžovací zkoušce pevnosti v tlaku	23
Obrázek 2-10	Příklad pracovního diagramu pro stanovení E_c	24
Obrázek 2-11	Provedení zatěžovací zkoušky pevnosti v příčném tahu	25
Obrázek 2-12	Schéma zkoušky při stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou	26
Obrázek 2-13	Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou – laboratoř	27
Obrázek 2-14	Hloubka průsaku na vnitřních plochách zkušební tělesa	27
Obrázek 3-1	Půdorys formy pro výrobu sádrových těles dle ČSN 72 2301	31
Obrázek 3-2	Řez formou pro výrobu sádrových těles dle ČSN 72 2301	31
Obrázek 3-3	Sádrová tvárnice osazená do fasády objektu D FSv ČVUT v Praze	33
Obrázek 3-4	1. část tvárnice vyjmuté z fasády (pohled z interiéru – vrstva VI)	33
Obrázek 3-5	2. část tvárnice vyjmuté z fasády (pohled z exteriéru – vrstva A)	33
Obrázek 3-6	Schéma přípravy vzorků z původní tvárnice	34
Obrázek 3-7	Dokončené armování základové desky (záběr 5A) před betonáží	38
Obrázek 3-8	Dokončené armování základové desky (záběr 4A) před betonáží	38
Obrázek 3-9	Dokončené armování základové desky (záběr 9B) před betonáží	39
Obrázek 3-10	Postup provádění jednotlivých záběrů základové desky	39
Obrázek 3-11	Dokončení armování stěny 3. PP C03 před záklopem bedněním	41
Obrázek 3-12	Dokončení armování stěny 3. PP C10 před záklopem bedněním	41
Obrázek 3-13	Schéma spodní stavby a vnějších vlivů	42
Obrázek 3-14	Těsnící plechy Formax 3000C/B (vlevo) a Bituflex BF 202/0,5	44
Obrázek 3-15	Detail napojení konstrukcí (bentonit a těsnící plechy)	44
Obrázek 3-16	Pohled do armování obvodové stěny (těsnící plechy Bituflex)	45

Obrázek 3-17	Provádění zkoušky sednutí kužele	49
Obrázek 4-1	E_d vzorků uložených v laboratorním prostředí (7 dní od výroby)	52
Obrázek 4-2	E_d vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)	52
Obrázek 4-3	E_d vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)	53
Obrázek 4-4	G_d vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)	54
Obrázek 4-5	Hodnoty ν vzorků z laboratorního prostředí (28 dní od výroby)	54
Obrázek 4-6	E_d vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)	55
Obrázek 4-7	G_d vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)	56
Obrázek 4-8	Hodnoty Poissonova čísla vzorků z vodní lázně (28 dní od výroby)	56
Obrázek 4-9	Dynamický modul pružnosti vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)	57
Obrázek 4-10	E_d ve smyku vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)	58
Obrázek 4-11	Hodnoty Poissonova čísla vzorků ze sušárny (28 dní od výroby)	58
Obrázek 4-12	Komparace E_d a E_c vybraných vzorků	61
Obrázek 4-13	Dynamický modul pružnosti 60 hodin od výroby	63
Obrázek 4-14	Dynamický modul pružnosti ve smyku 60 hodin od výroby	63
Obrázek 4-15	Hodnoty Poissonova čísla 60 hodin od výroby	64
Obrázek 4-16	Objemová hmotnost vzorků 1. části tvárnice	67
Obrázek 4-17	Základní rezonanční frekvence podélného kmitání 1. části tvárnice	67
Obrázek 4-18	Dynamický modul pružnosti sádrových vzorků 1. části tvárnice	68
Obrázek 4-19	Statický modul pružnosti 1. části tvárnice	69
Obrázek 4-20	Objemová hmotnost vzorků 2. části tvárnice	70
Obrázek 4-21	Základní rezonanční frekvence podélného kmitání 2. části tvárnice	71
Obrázek 4-22	Dynamický modul pružnosti 2. části tvárnice	72
Obrázek 4-23	Doba průchodu signálu vzorky 2. části tvárnice	73
Obrázek 4-24	E_d vzorků 2. části tvárnice určený ultrazvukovou metodou	73
Obrázek 5-1	Hloubka průsaku vzorků z betonu C 30/37 s přísadou	77
Obrázek 5-2	Hloubka průsaku betonu C 30/37 s přísadou v čase 360 dní	77
Obrázek 5-3	Hodnoty pevnosti v tlaku f_c betonu C 30/37 s přísadou	79
Obrázek 5-4	Srovnání hodnot pevnosti v tlaku f_c 28 dní od výroby	80
Obrázek 5-5	Pevnost v tlaku betonu C 30/37 s přísadou v čase 90 dní od výroby	81
Obrázek 5-6	Pevnosti v tlaku f_c pro ostatní třídy betonu	82
Obrázek 5-7	Hodnoty pevnosti v příčném tahu f_{ct} betonu C 30/37 s přísadou	83
Obrázek 5-8	Srovnání hodnot statického a dynamického modulu pružnosti	84

Obrázek 5-9	Rozdíl hodnot statického a dynamického modulu pružnosti v čase	85
Obrázek 5-10	Objemová hmotnost betonových vzorků C 30/37	85
Obrázek 5-11	Objemová hmotnost betonových vzorků	86
Obrázek 5-12	Sady vzorků z projektu Corso Court	87
Obrázek 5-13	Hodnoty E_d pro vzorky z projektu Corso Court	88
Obrázek 5-14	Hodnoty G_d pro vzorky z projektu Corso Court	89
Obrázek 5-15	Hodnoty Poissonova čísla pro vzorky z projektu Corso Court	90
Obrázek 5-16	Stavební jáma projektu Corso Court	90
Obrázek 5-17	Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku v čase (beton C 30/37 s přísadou)	92
Obrázek 5-18	Průměrná hloubka průsaku v čase (beton C 30/37 s přísadou)	92

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Vliv chyb měření proměnných na vypočítaný E_d dle ČSN ISO 12680-1	17
Tabulka 2	Mezní hodnoty pro stupně působení rostlé zeminy a podzemní vody	35
Tabulka 3	Stupně pro zkoušku sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2	48
Tabulka 4	Pevnostní a deformační charakteristiky betonu dle ČSN EN 1992-1-1	49
Tabulka 5	E_d – tabulka hodnot a odchylek (2 dny od výroby)	59
Tabulka 6	E_d – tabulka hodnot a odchylek (7 dní od výroby)	59
Tabulka 7	E_d – tabulka hodnot a odchylek (28 dní od výroby)	59
Tabulka 8	Poissonovo číslo - tabulka hodnot a odchylek	60
Tabulka 9	Srovnání E_c a E_d pro soubor sádrových vzorků	61
Tabulka 10	Komparace E_c a E_d 1. části tvárnice	69
Tabulka 11	Komparace E_c a E_d 1. části tvárnice	74
Tabulka 12	Srovnání hloubky průsaku betonu C 30/37 s krystalizační přísadou	78
Tabulka 13	Srovnání hodnot pevnosti v tlaku betonu C 30/37	80