

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU JEMNOZRNNÝCH KOMPOZITŮ NA BÁZI SILIKÁTOVÝCH POJIV

THE EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MODULUS OF ELASTICITY OF FINE GRAINED
COMPOSITES BASED ON SILICATE BINDERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Hoduláková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Michaela Hoduláková
Název	Experimentální ověření modulu pružnosti v tlaku jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Neville, A.M.: Properties of concrete.

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

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

Hansen, T.C. et al: Cement paste and concrete.

Odborné články pojednávající o zadané problematice.

Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k řadám ČSN EN 196 a ČSN EN 197.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: Rešerše pramenů – jemnozrnné kompozity na bázi silikátových pojiv a jejich vlastnosti, především modul pružnosti v tlaku/tahu. Vlivy na výslednou hodnotu modulu pružnosti těchto kompozitů, popis jednotlivých metod zkoušení modulu pružnosti. Praktická část: Zpracování plánu experimentu – sledování vlivu složení jemnozrnných kompozitů na jejich modul pružnosti. Výroba několika kompozitů (referenční receptura, poté úprava vodního součinitele alespoň v jedné variantě, dále použití různých pojiv, vysocepevnostní cementová zálivková hmota pro helikální výztuž). Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové a rezonanční metody pro zjištění dynamických modulů pružnosti a poté stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Tabelární, statistické a grafické zpracování výsledků zkoušek, vyhodnocení výsledků zkoušek. Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Stavební materiály se od počátku svého vzniku neustále vyvíjí a také se stále hledají nové možnosti pro poznávání a zdokonalování jejich vlastností (zejména zlepšení mechanických a deformačních charakteristik). Tato diplomová práce je zaměřena zejména na zjištění a vyhodnocení hodnot modulů pružnosti jemnozrnných kompozitů s ohledem na hodnotu vodního součinitele, stáří a pevnost v tlaku zkoumaných materiálů. Dále pak jsou hodnoty modulů pružnosti porovnány mezi různými druhy zkoušených materiálů navzájem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, kamenivo, modul pružnosti, pevnost v tlaku, statická zatěžovací zkouška, rezonanční metoda, ultrazvuková metoda, cement, alkalicky aktivovaný beton, jemnozrnné kompozity, PCC malta, vodní součinitel.

ABSTRACT

Since their inception, building materials are constantly improving. New ways to explore and improve the material's properties are constantly investigated (especially to improve the mechanical and deformation characteristics of the materials). This thesis is focused on identifying and comparing values of the modulus of elasticity of fine-grained composites. These features are compared with respect to water cement ratio, ageing and compressive strength of the investigated materials. Afterwards, the values of the modulus of elasticity are studied in the relation to the tested materials.

KEYWORDS

Concrete, aggregate, modulus of elasticity, compressive strength, static load test, resonance method, ultrasonic pulse velocity test, cement, alkali activated concrete, fine-grained composites, polymer cement concrete (PCC) mortars, water cement ratio.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Michaela Hoduláková *Experimentální ověření modulu pružnosti v tlaku jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv*. Brno, 2017. 87 s., 10 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Michaela Hoduláková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, cenné rady, za zapůjčení odborné literatury a za čas, který mi věnoval. Dále bych ráda poděkovala Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za profesionální vedení výzkumného projektu, v jehož rámci byla tato diplomová práce zpracována, a i všem dalším lidem, kteří se dále na projektu podíleli. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, bratrům a přátelům za jejich podporu a důvěru po celou dobu mého studia.

Tato diplomová práce vznikla za finanční podpory standardního specifického projektu VUT v Brně s názvem „Objemové změny jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv“ a s označením: FAST-S-16-3125.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Michaela Hoduláková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Michaela Hoduláková
autor práce

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	CÍLE PRÁCE.....	11
3	TEORETICKÁ ČÁST.....	12
3.1	Modul pružnosti v tahu a tlaku.....	12
3.1.1	Co to je	12
3.1.2	Jak se zjišťuje	15
3.1.3	Dynamický x statický.....	18
a)	Statický modul pružnosti.....	18
b)	Dynamický modul pružnosti.....	23
3.1.4	Vlivy na modul pružnosti	29
3.2	Kompozitní materiály.....	32
3.2.1	Co to jsou malty	33
3.2.2	Vlastnosti malt	33
3.2.3	Složení malt	33
3.2.4	Zvláštní typy kompozitů.....	37
3.3	Další zkušební postupy využití při zkoušení kompozitů	38
3.3.1	Akustická emise	38
3.3.2	Smršťování	39
4	PRAKTICKÁ ČÁST	41
4.1	Akustická emise	41
4.2	Smrštění	44
4.3	Složení a číslování kompozitů.....	50
4.3.1	Složení kompozitů.....	51
4.3.2	Příprava výrobních zařízení a způsob míchání	52
4.3.3	Zhotovení a přehled zkušebních těles.....	54
4.4	Zkoušení	58
4.4.1	Zkoušky na čerstvé směsi.....	58
4.4.2	Zkoušky na ztvrdlém kompozitu	60
	Ultrazvuková impulzová metoda.....	60
	Rezonanční metoda	61
	Statická zkouška	62
4.5	Výsledky	63
4.6	Diskuze výsledků	76
5	ZÁVĚR.....	79
6	SEZNAMY.....	80
6.1	Seznam použitých zdrojů	80
6.2	Seznam použitých zkratk a symbolů	83
6.3	Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	84
6.3.1	Seznam obrázků	84
6.3.2	Seznam grafů	85
6.3.3	Seznam tabulek	86
7	PŘÍLOHY	88
7.1	Příloha 1 – Fotografická dokumentace.....	88
7.2	Příloha 2 – Grafy.....	91

1 ÚVOD

Maltoviny se začaly používat již před mnoha lety. S pálenou sádrrou se setkali například obyvatelé starověkého Egypta. Řekové a Římané, kteří používali pálený vápenec, se později naučili s tímto materiálem vytvářet i kompozity, které dnes můžeme považovat za vůbec první betony v historii [1]. Dnes je pravděpodobně každý schopný vytvořit směs například z cementu, kameniva a vody, ale udělat kompozitní materiál, který splňuje určité dané požadavky, stále vyžaduje značnou míru zkušeností a znalostí.

Obecně se dá říct, že stavební materiály se od počátku svého vzniku neustále vyvíjí a stále se hledají nové možnosti pro poznávání a zdokonalování jejich vlastností (zejména zlepšení mechanických a deformačních charakteristik). V současnosti je stále více v popředí zájmu stavebních odborníků jedna přetvárná vlastnost materiálů, modul pružnosti, který udává schopnost materiálu přetvořit se pod působícím napětím. Tato schopnost je ovlivněna velkou řadou faktorů, mezi které můžeme (mimo jiné) řadit například druh pojiva či plniva, velikost a způsob ošetřování těles, vodní součinitel nebo stáří materiálu při zatížení [2], [3].

Jelikož kvalita životního prostředí významně ovlivňuje zdraví člověka a celé populace, zamýšlí se odborníci i nad možnostmi produkce a likvidace materiálů ve vztahu k šetrnosti k životnímu prostředí. Pokud bychom se tedy zaměřili třeba na výroby z cementu, můžeme brzy zjistit, že s ohledem na únik CO₂ do ovzduší se jako vhodná ekologická alternativa jeví výroba tzv. alkalicky aktivovaných materiálů, které navíc zužitkují odpadní materiály (jako je například vysokopecní struska, která vzniká při výrobě oceli) [4].

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce bude rozšíření znalostí v oboru stavebních materiálů. Na základě zadání se provede experimentální ověření modulu pružnosti v tlaku několika vyrobených jemnozrnných kompozitních materiálů na bázi silikátových pojiv, a to zejména zjištěním a porovnáním hodnot modulů pružnosti těles mezi sebou.

Práce bude rozdělena na část teoretickou a část praktickou. Teoretická část vymezí hlavní pojmy zmíněné v zadání diplomové práci a podrobněji je rozebere na základě rešerše literatury. V praktické části bude přehledně popsán postup provedení experimentu, na základě kterého bylo vyrobeno a odzkoušeno několik jemnozrnných kompozitů. Zkušební tělesa byla zhotovena z cementové malty (příčemž alespoň v jedné variantě se od sebe lišila vodním součinitelem), z vysocepevnostní cementové zálivkové hmoty pro helikální výztuž, která je běžně dostupná na trhu, a z alkalicko aktivované směsi. V této části práce bude dále provedeno zpracování výsledků modulů pružnosti ze zkoušek dynamických a zkoušky statické. Na základě statické (destruktivní) zkoušky bude stanoven statický modul pružnosti v tlaku zkušebních těles a na základě dvou dynamických (nedestruktivních) zkoušek, které statické zkoušce předcházejí, bude stanoven dynamický modul pružnosti zkušebních těles. Změny hodnot modulů pružnosti jednotlivých kompozitů budou následně porovnány a bude provedena diskuze výsledků.

Po vyhodnocení výsledků zkoušek bude učiněn závěr o chování různých druhů kompozitů v závislosti na jejich vodním součiniteli, pevnosti v tlaku i na jejich stáří.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Modul pružnosti v tahu a tlaku

Schopnost látky vracet se po odstranění zatížení do původního stavu je definována jako lineární pružnost, ve které platí ve všech fázích působení (odlehčování i zatěžování) jednoznačná závislost mezi napětím a deformacemi. Přičemž napětí lze chápat jako intenzitu vnitřních sil v tělese a deformaci jako množinu posunů všech bodů tělesa. V této oblasti bude dále charakterizován Youngův modul pružnosti (dále v textu také jako MP) [5].

3.1.1 Co to je

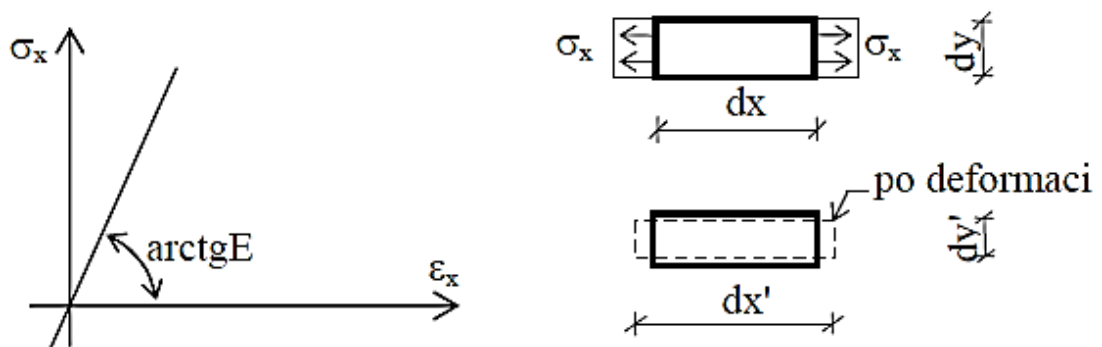
Modul pružnosti je přetvárná vlastnost materiálu, jenž popisuje schopnost materiálu chovat se pod určitým zatížením do jisté míry pružně a dává nám tzv. přehled o tuhosti materiálu. Pokud má některý materiál vyšší MP než jiný, znamená to, že bude méně náchylný na deformace a naopak. Tato materiálová charakteristika se označuje velkým písmenem E a udává se v MPa, případně v GPa. Hodnoty modulů pružnosti se využívají u spousty statických výpočtů. Je tedy možné se s nimi setkat například při počítání deformací (výpočty průhybu, při návrhu desek a při výpočtech předpjatých konstrukcí), ale jsou využívány také při výpočtech vnitřních sil u staticky neurčitých konstrukcí atd. Protože hodnota modulu pružnosti závisí do jisté míry na tom, jak je definován, je důležité správně vymežit pojem MP a zkušební postup pro jeho zkoušení [2], [6], [7], [8], [9].

V mezích Hookova zákona (který říká, že napětí je přímo úměrné poměrnému přetvoření) lze MP v tahu a tlaku charakterizovat jako koeficient přímé úměrnosti mezi normálovým napětím σ_x a poměrným přetvořením ϵ_x , které vzniká při jednoosé napjatosti působením napětí na elementární kvádr ve směru osy x (viz Obr. 3-1). Jinými slovy je modul pružnosti fyzikální konstantou, jež má rozměr napětí a definuje úhel sklonu lineární závislosti na deformačním diagramu.

Pro názornost je možné modul pružnosti vyjádřit vztahem:

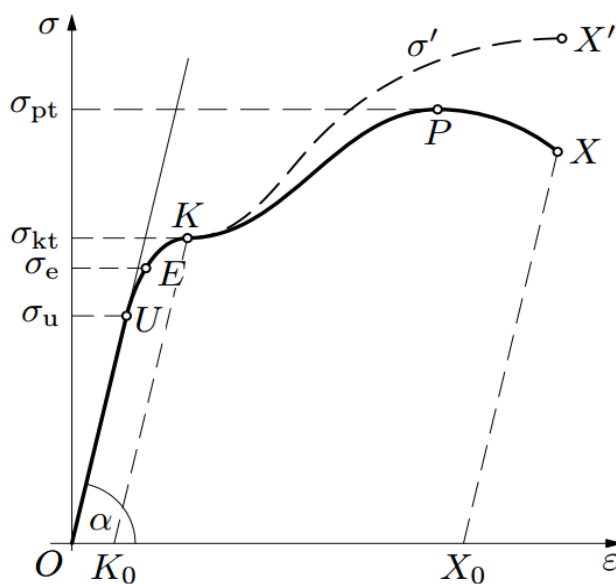
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti [MPa],
 σ je napětí [MPa],
 ε je poměrné přetvoření [-] [5].



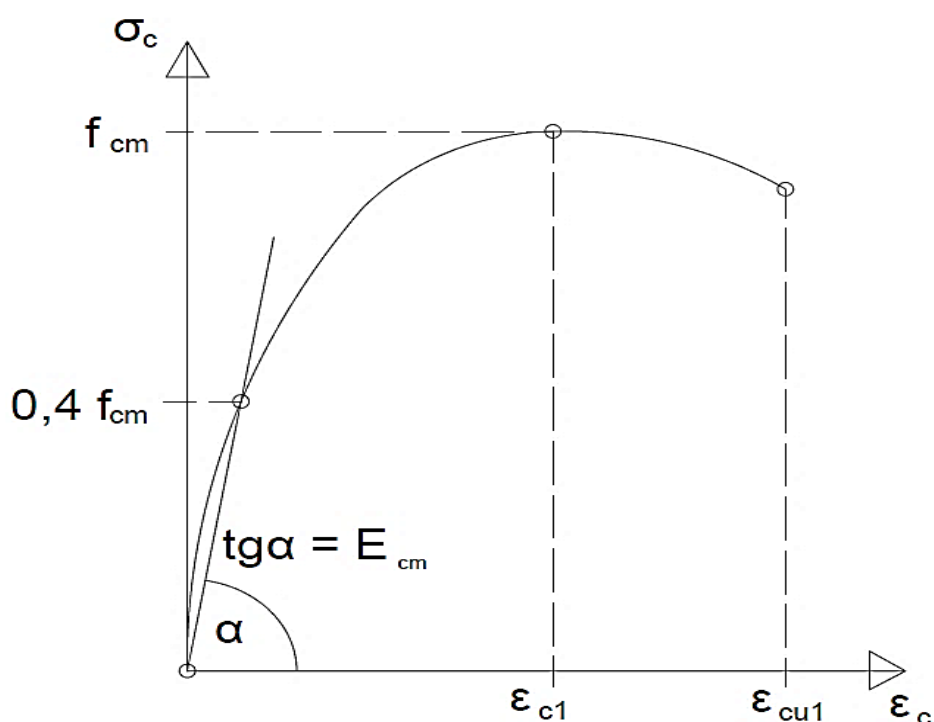
Obr. 3-1 Hookův zákon v tahu a tlaku [5].

U skutečných látek bývají zaznamenány průběhy deformací vzhledem k napětí mnohem složitější (viz Obr. 3-2), a tak se za použití různých idealizovaných diagramů různě aproximují a nahrazují, aby bylo prakticky možné spekulovat nad platností Hookova zákona [9]. Na deformačním diagramu houževnaté oceli můžeme vidět jasně definovaný Youngův modul pružnosti jako směrnici úsečky OU ($\text{tg } \alpha$) [10].



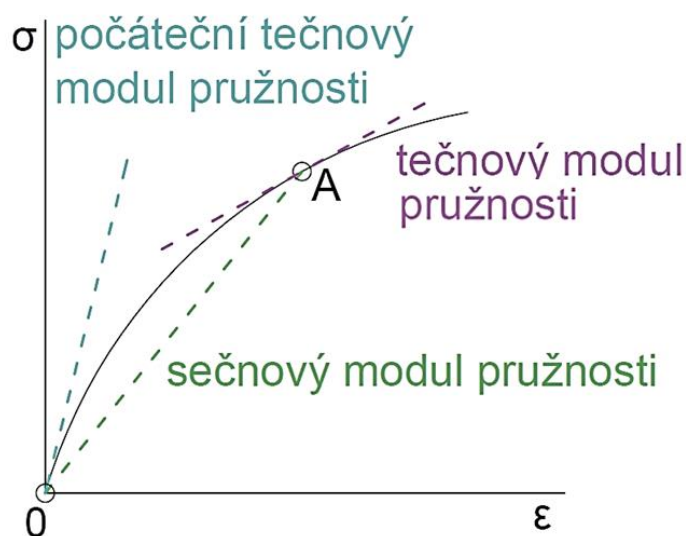
Obr. 3-2 Schéma deformačního diagramu houževnaté oceli [10].

Oproti tomu na deformačním (podle normy [11] též „pracovním“) diagramu betonu v tlaku (viz Obr. 3-3), který je uveden v normě ČSN EN 1992-1-1 [11], bylo prvně nutné proložit přímkou počáteční fázi diagramu ($\sigma_c = 0$) a hodnotou napětí $0,4 f_{cm}$ (průměrné hodnoty pevnosti betonu v tlaku ve stáří 28 dní), aby bylo možné definovat modul pružnosti E_{cm} jako směrnicí této přímky [9], [11]. Takto definovaný MP betonu v tlaku se nazývá sečnovým modulem pružnosti. Vzhledem k tomu, že jeho hodnota závisí na tom, při jakém napětí se stanoví (tedy jaká je pevnost betonu), je jeho hodnota pouze přibližná [11].



Obr. 3-3 Schéma deformačního diagramu betonu [11].

Kromě sečnového MP existují i další dva typy modulu pružnosti betonu v tlaku, které je možné vyčíst z grafu závislosti napětí na poměrném přetvoření v souvislosti se skutečností, v jaké fázi deformačního diagramu se nacházíme a zda jím prokládáme tečnu nebo sečnu. Dalšími typy MP jsou tečnový modul pružnosti a počáteční (tečnový) modul pružnosti (viz Obr. 3-4), jehož hodnotu uvádí norma [11] jako 1,05 násobek sečnového modulu pružnosti E_{cm} [9]. Každý modul pružnosti zjištěný ze zatěžování zkušebních těles, tedy ze závislosti mezi napětím a poměrným přetvořením se označuje jako statický modul pružnosti [12].



Obr. 3-4 Závislost mezi napětím a poměrným přetvořením betonu a znázornění různých druhů MP [7].

3.1.2 Jak se zjišťuje

Hodnoty MP různých materiálů je možné vyčíst z tabulek, které jsou běžně dostupné na internetu (viz Tab. 3-1), v knihách, v odborných časopisech nebo v normách, kde jsou uvedeny většinou i výpočetní vztahy.

Tab. 3-1 Průměrné hodnoty MP některých materiálů [13].

Materiál	Modul pružnosti [GPa]
hliník a jeho slitiny	65 - 73
keramika	8 - 12
měď	125
diamant	1000
lehký beton	0,8 - 2
jednoduché slitiny oceli	200 - 210
polystyrén	3,2 - 3,5
křemičité sklo	60 - 90
dřevo	11 - 16

Pokud bychom se ale více začetli například do normy ČSN EN 1992-1-1 [11], zjistili bychom, že hodnoty MP mají význam pouze při obecném použití a že u návrhů konstrukcí citlivých na odchylky, což jsou třeba velkorozponové stropní nebo střešní konstrukce průmyslových nebo sportovních hal, mosty a estakády, jej bude nutné stanovit přesněji. Norma [11] pro navrhování betonových konstrukcí totiž uvádí pouze směrné průměrné hodnoty E_{cm} (viz Tab. 3-2), které však mnohým reálným betonům

neodpovídají. Vztah pro výpočet hodnoty E_{cm} v závislosti na třídách betonu vychází z pevnosti v tlaku a je definován:

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (2)$$

kde f_{cm} je hodnota charakteristické válcové pevnosti v tlaku ve stáří 28 dní zvýšená o 8 MPa [11].

Tato závislost MP na pevnosti betonu v tlaku ale bývá od minulého století celkem zavádějící, protože dochází k výrazné rozmanitosti receptur betonu používaných výrobcí a to s sebou nese vysoké variability modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy. Norma [11] sice uvádí, že modul pružnosti nějakého kompozitního materiálu závisí ve velké míře na modulu pružnosti jeho složek (pro tři další hojně používané typy kameniva – vápencové, pískovcové a čedičové – doporučuje drobné početní změny). Bere také v úvahu i změnu MP s ohledem na čas, kdy zmiňuje další vzorec, díky němuž je možné normové hodnoty modulu pružnosti přiblížit skutečnosti, ale ani zdaleka nepostihuje všechny činitele, které podle článku [2] ovlivňují MP a jsou více či méně známé [7], [11], [14], [15].

Tab. 3-2 Přibližné hodnoty statického MP betonu v závislosti na jeho třídách [11].

f_{ck} [MPa] / $f_{ck, cube}$ [MPa]	12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35
f_{ck} [MPa] / $f_{ck, cube}$ [MPa]	45/55	50/60	55/67	60/75	70/85	80/95	90/105
E_{cm} [GPa]	36	37	38	39	41	42	44

Pro přesnější (prakticky řečeno i nejdoporučovanější a nejuznávanější) určení modulu pružnosti se častokrát přistupuje k fyzicky náročnějšímu úkonu, a to jsou zkoušky prováděné na zkušebních tělesech nebo přímo na konstrukci [15].

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (3. 1. 1), existuje tzv. statický modul pružnosti, který získáváme zatěžováním zkušebních těles (jedná se o destruktivní metodu měření). Nejde však o jediný známý MP, který je v praxi zjišťován. Kromě tohoto modulu pružnosti je známý i dynamický modul pružnosti, jehož měření probíhá zcela nedestruktivně (prostřednictvím přístrojů, které využívají kmitání částic tělesa při aplikaci pouze zanedbatelného napětí). Tohoto měření se využívá třeba v případě, že máme nějaké prvky přímo zabudované v konstrukci a je u nich obtížné stanovit hodnotu statického modulu pružnosti [1], [16].

Zde je nutné podotknout, že hodnoty statických modulů pružnosti se od těch dynamických velikostně liší. Uvádí se, že hodnota statického MP u běžného betonu bývá v rozmezí 20 000 až 40 000 MPa a hodnota dynamického modulu pružnosti (u stejného druhu betonu) bývá vyšší, tedy v rozmezí 30 000 až 50 000 MPa. Je to dané zejména tím, že při měření nedestruktivní cestou nevnášíme do zkoušených těles žádné významné napětí, kvůli kterému by v tělesech vznikaly mikrotrhliny nebo by docházelo k dotvarování betonu [1], [9]. Odborná literatura kvůli rozdílům mezi těmito moduly uvádí různé převodní vztahy pro přepočet dynamických modulů pružnosti na statické, protože ty se převážně využívají při dalších výpočtech. Je však nutné zmínit, že jednoznačný fyzikální vztah mezi těmito 2 moduly prakticky neexistuje z důvodu rozdílného principu stanovení modulů pružnosti a také toho, že beton je heterogenní materiál různého složení a například norma ČSN 73 2011 [17] z roku 2012 stanovuje zmenšovací koeficienty pouze pro tradiční betony. V praxi lze ovšem získat velice přesné hodnoty přepočtu pro jakýkoliv beton konkrétního složení pomocí zmenšovacích součinitelů, pokud jsou k dispozici zkušební tělesa, na nichž lze provést stanovení jak dynamického, tak statického modulu pružnosti, a následně je určen vzájemný poměr mezi nimi [7], [16].

Vztahy pro přepočet potom vypadají následovně:

$$E_c = \kappa_u \cdot E_{cu} \quad (3)$$

$$E_c = \kappa_r \cdot E_{cr} \quad (4)$$

kde E_c je statický modul pružnosti [MPa],
 E_{cr}, E_{cu} jsou dynamické moduly pružnosti [MPa], kde E_{cr} je zjištěné z rezonanční metody měření a E_{cu} z ultrazvukové metody měření,
 κ_u, κ_r jsou orientační zmenšovací součinitelé pro přepočet příslušných dynamických modulů pružnosti [-] [7].

Dalšími možnostmi jak získat moduly pružnosti je využití tzv. kalibračních vztahů nebo teoretických vztahů (což jsou výpočty vycházející z různých modelů) [9].

3.1.3 Dynamický x statický

Jak již bylo řečeno výše, zkušebních postupů, pomocí kterých je možné stanovit modul pružnosti, je hodně. Na základě způsobu jejich měření je možné rozlišit 2 druhy modulů pružnosti, modul statický a modul dynamický. Experiment, který byl v rámci této diplomové práce proveden, využil obě tyto metody měření. Postupy pro zkoušení MP v rámci tohoto specifického výzkumu byly zvoleny na základě platných českých norem pro stanování modulu pružnosti u prvků z betonu (v současné době existují 4 metodiky) a budou dále podrobněji popsány.

a) Statický modul pružnosti

Než se však tento text bude věnovat samotné problematice zjištění statického MP, bude nutné začít u částečného vysvětlení pojmu „pevnost v tlaku“, neboť hodnota pevnosti v tlaku je důležitým kritériem pro správné nastavení zatěžovacích hladin, které budou v diplomové práci o pár řádků níž zmíněny [18].

Pevnost v tlaku

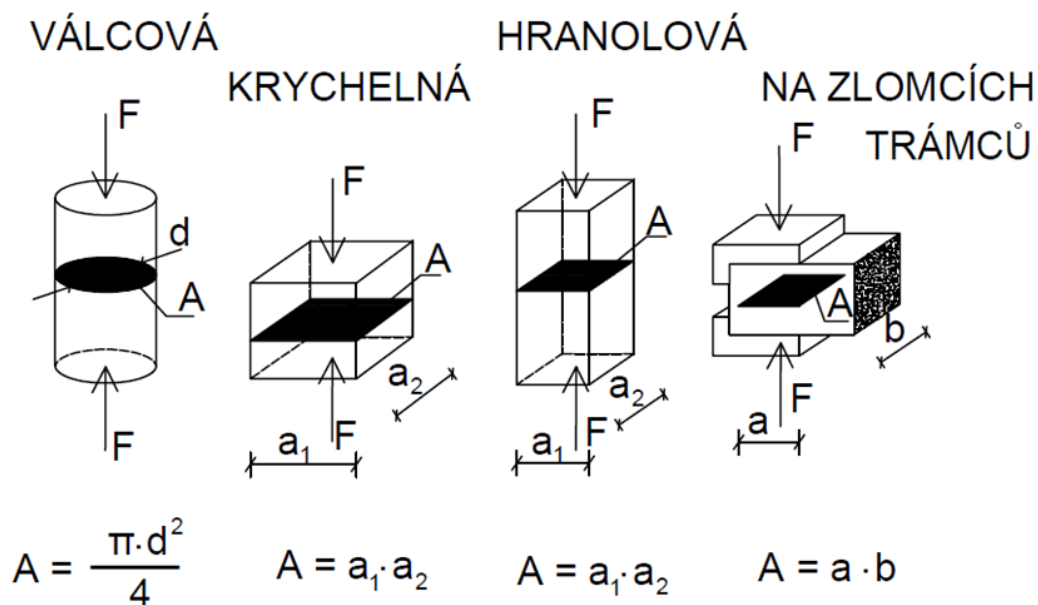
Pevnost bývá všeobecně definována jako schopnost materiálu vzdorovat vzniklým napětím, jinými slovy jde o stav, kdy je napětí tak velké, že dojde ke zlomu (globálnímu porušení soudržnosti). Pokud je tedy pevnost v tlaku (f_c) měřena na základě této teorie, určuje se její hodnota na základě zjištění velikosti takové tlakové síly, která působí na příslušnou plochu (viz Obr. 3-5) a způsobí porušení zkušebního tělesa. Pro výpočet f_c se potom použije vzorec:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (5)$$

kde F je síla při porušení zkušebního tělesa [N],
 A je průřezová plocha vzorku [mm^2] [7].

Takto zjištěná pevnost může být ovlivněna různými činiteli. Jedním z příkladů může být například tvar zkušebního tělesa, kdy je například nesporné, že krychelná pevnost bývá vyšší než pevnost zjištěná na hranolech nebo válcích. Tento jev je přisuzován zejména tření, které vzniká mezi tlačnými deskami stroje a tlačnými plochami zkušebního vzorku a zabraňuje příčnému roztahování tlačného tělesa,

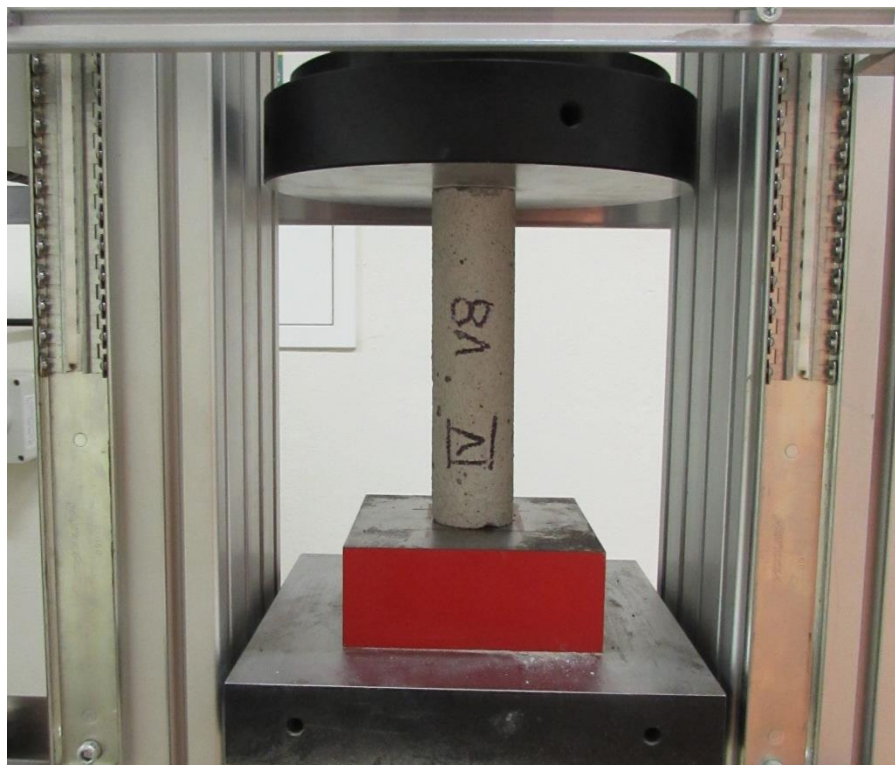
příčemž dochází k sevření tělesa na obou stranách vzorku a dochází ke zvyšování únosnosti [7], [19].



Obr. 3-5 Určení plochy A pro stanovení pevnosti v tlaku [19].

Podle normy pro určování statického MP v tlaku (ČSN EN 12390-13 [20]) je k zjištění předpokládané pevnosti betonu v tlaku (f_c) nejlepší použít srovnávací zkušební tělesa (vyrobená ze stejného materiálu), která mají stejný tvar a velikost (viz Obr. 3-6), ale nevylučuje se podle této normy ani možnost měření pevnosti na zkušebních tělesech, která se tvarově či rozměrově od zkoušených odlišují, pokud se potom tento fakt zohlední.

Další možností, kterou norma toleruje, ale pro účely experimentu nebyla využita, je zjištění pevnosti v tlaku pomocí nedestruktivních metod měření, které mohou být založeny na měření tvrdosti povrchu materiálu a následného stanovení korelačního vztahu mezi tvrdostí materiálu a jeho pevností (viz např. norma ČSN 73 1373 [21]) [2], [22].



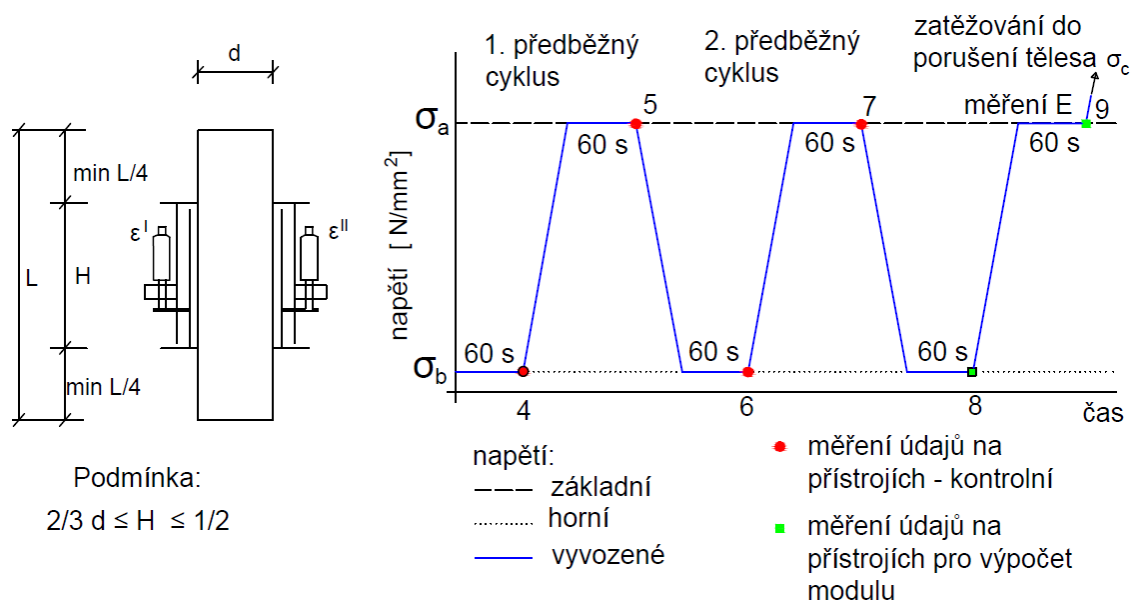
Obr. 3-6 Zkušební těleso připravené ve zkušebním lisu ke zkoušce pevnosti v tlaku.

Statický modul pružnosti v tlaku

Pro stanovení statického MP betonu v tlaku je momentálně platná například norma ČSN ISO 1920-10 [18] nebo již zmíněná ČSN EN 12390-13 [20]. V praktické části byla výhradně použita norma ČSN ISO 1920-10 [18]. Další popis tedy řeší metodiku zkoušení vycházející z této normy [18], která je založená na zatěžování zkušebního tělesa mezi základním napětím (je vždy $0,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$) a horním napětím v třetinové hodnotě pevnosti betonu v tlaku v určitých cyklech, přičemž jsou na tomto tělese zároveň sledovány a zapisovány změny pružného poměrného přetvoření [18].

Vlastní zkouška probíhá tak, že se na zkušební těleso osadí přístroje pro měření deformací, jak je zobrazeno na Obr. 3-7 vlevo. Celá tato soustava se potom vloží do zkušebního lisu (viz Obr. 3-8), kde je vystavena počátečnímu napětí $0,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ a jsou zaznamenány počáteční údaje naměřené na všech přístrojích. Následuje plynulé zvyšování zatížení do hodnoty horního napětí, které se udržuje po dobu 60 s, a potom se opět zapíší údaje z přístrojů. Poté je nutné zkontrolovat, zda se jednotlivá poměrná přetvoření ϵ neliší o více jak 20 % od své průměrné hodnoty a pokud ne, vzorek se opět odtíží na hodnotu základního zatížení a celý zmíněný

postup zatěžování se opakuje. Jsou provedeny další minimálně 2 předběžné cykly. Následně se soustava odtíží a potom znovu zatíží za současného měření údajů pro výpočet E. Celý tento postup je zobrazen na Obr. 3-7 vpravo. Nakonec se musí porovnat zjištěná pevnost zkušebního tělesa s pevností na srovnávacích tělesech, a pokud se liší o více jak 20 %, tak se tato okolnost uvede do protokolu.



Obr. 3-7 (vlevo) Grafické znázornění umístění měřícího zařízení na zkušebním tělese, (vpravo) grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa [23].

Statický MP v tlaku E_c se vypočítá ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6)$$

kde $\Delta\sigma$ je rozdíl napětí při zatěžování v N/mm^2 ,
 $\Delta\varepsilon$ je průměrná změna poměrného přetvoření mezi horním a základním napětím [-] [23].

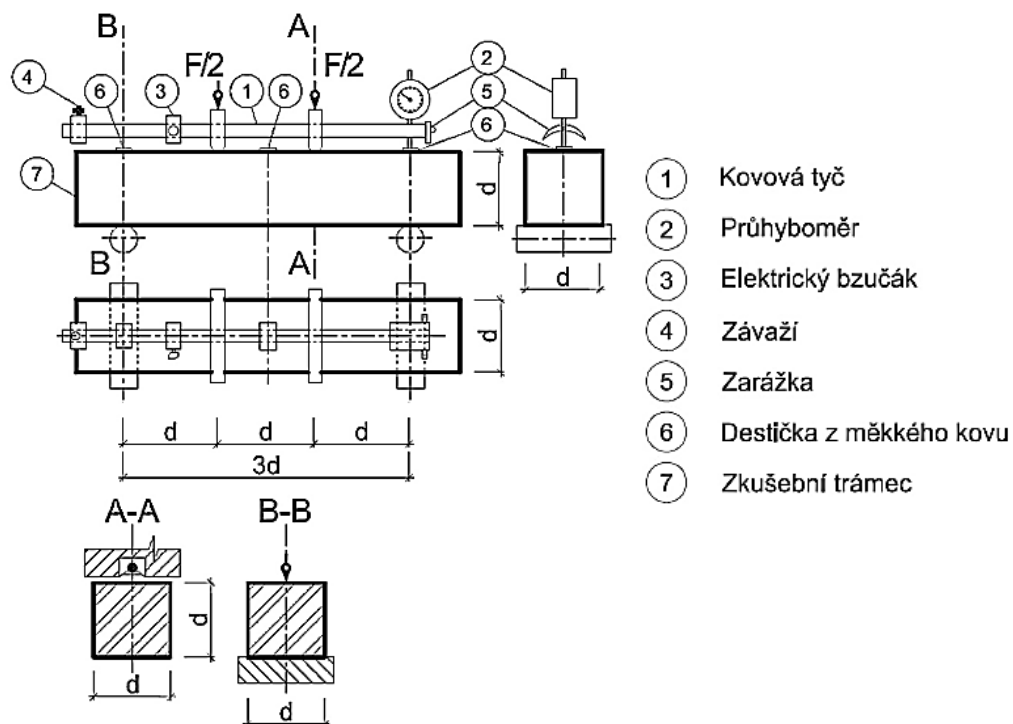


Obr. 3-8 Zkušební těleso s osazenými tenzometry připravené ve zkušebním lisu.

Tento postup určení statického MP není jediný. Další možností, jak zjistit statický modul pružnosti je provést zkoušku statického MP ze zkoušky v tahu ohybem, při níž je potřeba prvně zjistit pevnost v tahu ohybem [23].

Statický modul pružnosti ze zkoušky v tahu ohybem

Postup této zkoušky definuje další vydaná a momentálně platná norma ČSN 73 6174 [24]. Principem je zatěžování zkušebního tělesa dle čtyřbodového ohybu (viz Obr. 3-9). MP betonu namáhaného v tahu ohybem se potom stanoví výpočtem z naměřených průhybů trámce [23].



Obr. 3-9 Grafické znázornění osazení průhyboměru a zkušební tělesa v průběhu zatěžování [9], [24].

b) Dynamický modul pružnosti

K měření dynamického modulu pružnosti se nejčastěji využívá metoda ultrazvuku nebo rezonance [7]. Obě tyto metody patří do nedestruktivních metod měření, protože nepoškozují zkušební těleso (případně ani povrch konstrukce) na rozdíl od výše zmíněné statické (destruktivní) metody. Podle fyzikálního účinku, na kterém jsou založeny se společně s metodou akustické emise, mechanické impedance, tlumeného rázu či impakt – echo metody řadí do skupiny elektrodynamických metod, které snímají a vyhodnocují účinky mechanického vlnění, které je vyvolané ve zkoušeném materiálu na základě nějakého mechanického podnětu [22].

1. Ultrazvuková metoda

Ve stavebnictví se využívají 2 typy ultrazvukových metod. Jsou to:

- **impulzová odrazová metoda,**
- **impulzová průchodová metoda.**

První z nich nese název **impulzová odrazová metoda (Echolot)**. Obecně se tato metoda využívá zejména tehdy, když jsou konstrukce přístupné jen z jedné strany.

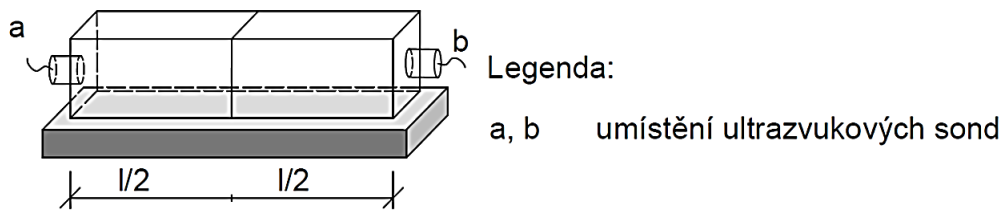
Dokáže na nich odhalit různé defekty, cizorodá tělesa nebo možné nehomogenity. Pracuje nejčastěji pouze s jednou sondou, která plní funkci jak budiče, tak i snímače ultrazvukového signálu (viz Obr. 3-10 vpravo). Tento způsob měření je jednodušší na provádění a manipulaci, ale je vhodný spíše jen na masivní konstrukce (z důvodu tzv. „zarušení“ sondy). Druhou metodou je **impulzová průchodová metoda**, která (oproti odrazové metodě) pracuje vždy se dvěma sondami, jak je zobrazeno na Obr. 3-10 vlevo. Jedna sonda je potom budičem a ta druhá snímačem. Tato metoda je v oboru betonových konstrukcí velice oblíbená a také slouží pro stanovení vlastností materiálů nebo k jejich defektoskopii [22] [25].



Obr. 3-10 (vlevo) Ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200 firmy Proceq se sondami pro přímé prozvučování, (vpravo) Ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200PE firmy Proceq s odrazovou sondou [26]

Pro zkoušení modulu pružnosti betonu na základě ultrazvukových metod jsou zavedené normy ČSN 73 1371 [27] a ČSN EN 12504-4 [28].

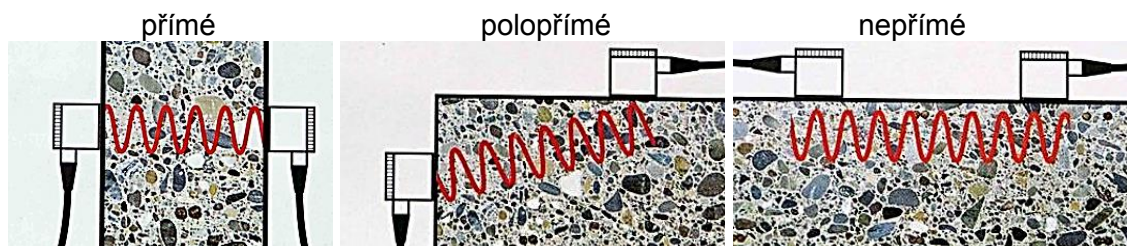
Impulzová průchodová metoda je založena na principu měření doby průchodu pravidelně se opakujících impulzů ultrazvukového vlnění materiálem. Magnetostrikčním nebo piezoelektrickým budičem jsou vysílány mechanicky tlumené vlny, které putují materiálem měřeného prvku po známé dráze L (viz Obr. 3-11) do piezoelektrického snímače, který mění přicházející mechanické vlnění na jeho elektrický obraz. Doba průchodu t je zachycena časoměrným zařízením a na základě znalosti dráhy a doby průchodu se vypočítá rychlost šíření ultrazvukového impulzu. Pracovní kmitočet budiče je volen v závislosti na nejmenším bočním rozměru tělesa, pevnosti materiálu a délce měřicí základny. Ve stavebnictví se frekvence budiče běžně pohybují od 20 kHz do 150 kHz (výjimečně mohou být až 500 kHz) [7].



Obr. 3-11 Ukázka možného uspořádání UZ sond při zkoušce na trámci [8].

U průchodové metody mohou být zkušební tělesa prozvučována 3 možnými způsoby (viz Obr. 3-12), které závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na tomto objektu, přičemž uspořádání sond má vliv na čas šíření čela impulzů ultrazvukových vln [25]. Prozvučování se dělí na:

- **přímé** (budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách proti sobě),
- **polopřímé** (budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách ne přímo proti sobě, anebo na sousedních stranách),
- **nepřímé** (budič a sonda jsou na stejné straně) – měří se povrchové vlny [7].



Obr. 3-12 Způsoby prozvučování konstrukce [22].

Rychlost šíření impulzu ovlivňuje i volba akustické vazby, která se dá charakterizovat jako prostředí, ve kterém se převedou ultrazvukové vlny z měniče do zkoušeného materiálu. Špatnou volbou akustické vazby mohou být výsledky měření nepříznivě ovlivněny [29]. U přímého a polopřímého prozvučování se rychlost šíření vypočítá ze vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (7)$$

kde v_L je rychlost impulzu [km/s],
 L je délka měřící základny [mm],
 T je čas včetně t_{kor} , který uplyne při průběhu impulzu měřící základnou [μs], tj.

$$T = T_L \pm t_{kor} \quad (8)$$

t_{kor} je korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulzů UZ vln, který se zjistí při kalibraci přístroje [μ s] [27].

Po zjištění rychlosti šíření impulzu a po vypočítání hodnoty koeficientu rozměrnosti prostředí (k), který je závislý na hodnotě Poissonova poměru, je možné dosadit do vzorce pro výpočet dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu E_{cu} (jednotky v [MPa]):

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (9)$$

kde ρ je objemová hmotnost betonu [kg/m^3],
 v_L je impulzová rychlost podélného UZ vlnění [km/s],
 k je součinitel rozměrnosti prostředí [-] [27].

Mezi výhody ultrazvukové metody se obecně řadí její snadná proveditelnost, opakovatelnost měření, možnost použití jak v laboratoři, tak v terénu a možnost sledování vývoje vlastností betonu (včetně pevnosti v tlaku) v čase, např. při jeho zrání v různých klimatických podmínkách. Do hlavních nevýhod této metody patří zejména citlivost na spoustu vnějších vlivů a obtížná interpretace výsledků, pokud se jedná o složitější případy zkoumání [22], [25], [30].

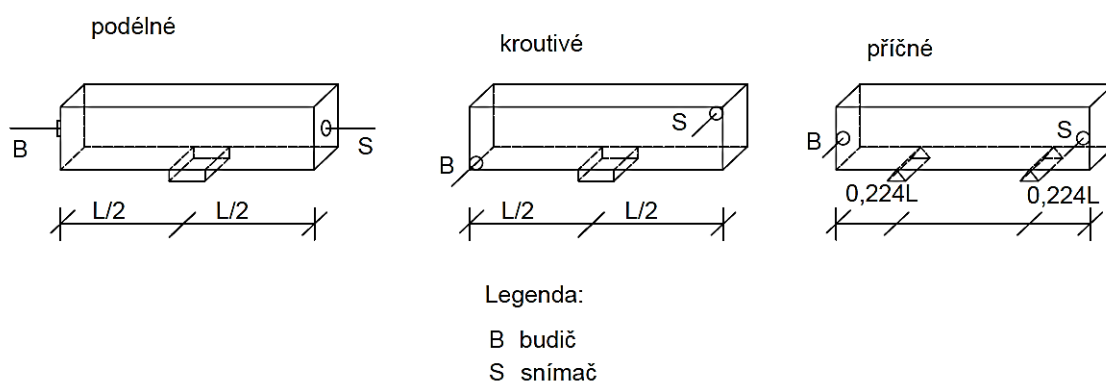
2. *Rezonanční metoda*

Rezonanční metoda je založená na poznatku, že se každý předmět z tuhého materiálu po mechanickém impulzu rozkmitá. Při zkoumání vlastností těles na základě této metody je nejdůležitější jev zvaný rezonance (vlastní kmitočet). Tento jev nastává v okamžiku, kdy je kmitočet vnější budící síly roven vlastnímu (rezonančnímu) kmitočtu tělesa a amplituda vynucených kmitů zkoušeného tělesa tak výrazně roste na maximum. Pro určení základní rezonanční frekvence podle způsobu kmitání je možné rozdělit rezonanční metody na metody založené na:

- **nepřerušovaném (spojitém) kmitání** (jedná se o tzv. původní metodu),
- **přerušovaném (impulzním) kmitání** – nová metoda [7], [8].

Principem měření první zmíněné metody je plynulé měnění frekvence buzení a hledání maximální amplitudy. Budící frekvenci v tomto případě zajišťuje rezonančního přístroj, který vysílá do materiálu zkušební tělesa spojitě mechanické kmitání. Toto kmitání je laditelné s frekvenčním rozsahem obvykle od 30 Hz do minimálně 20 kHz [7].

Druhou zmíněnou metodou je novější metoda, která je považována za výrazně jednodušší z hlediska potřebné techniky pro měření, a jsou u ní výrazně snížena rizika hrubých chyb. V této metodě se zkušební těleso umístí na pružnou podložku (třeba z molitanu), nebo se podepře v přesně daných místech, aby nedošlo k ovlivnění vlastní frekvence tohoto tělesa. Poté se pomocí přilnavého materiálu, který zajistí správný akustický kontakt, přilepí snímač na povrch tělesa do jedné z poloh pro zjišťování vlastní frekvence a v jiném místě (viz Obr. 3-13) se do zkušební tělesa pomocí impulzního kladívka lehce udeří, načež se zkoušené těleso rozkmitá na svých rezonančních frekvencích. Přes snímače zrychlení se vzniklá informace přenesou do Fourierova analyzátoru, což je v podstatě software v libovolném počítači, kde proběhne vyhodnocení. Výstupem měření je diagram (viz Obr. 3-14), na jehož vodorovné ose je zvolené frekvenční spektrum a na jehož svislé ose je vidět relativní amplituda kmitání. Následuje správné určení a zaznamenání zjišťované frekvence, která se zapíše s přesností 10 Hz. Zkouška je poté ještě nejméně dvakrát opakována za účelem získání průměrné hodnoty a směrodatné odchylky max. 100 Hz. Hodnota vlastní frekvence svědčí o kvalitě materiálu, kdy např. u betonu platí, že čím je lepší z hlediska modulu pružnosti, tím vychází jeho vlastní frekvence kmitání vyšší. Poruchy ve struktuře materiálu tedy snižují vlastní frekvenci kmitání tělesa a ve výstupním diagramu je v tomto případě možné pozorovat zaoblení vrcholů u měřených křivek [7], [8].



Obr. 3-13 Způsob přiložení budiče a snímače a způsob podepření u měření podélného, kroutového a příčného kmitání [23].

Rezonanční metoda je vhodná pro laboratorní zkoušení (menších) prvků, které nejsou nikde zabudované. Na druhou stranu se tato metoda nedá moc dobře použít v případě, pokud je zkoušené těleso nespojitě nebo je složené z rozdílně hutných oblastí [8], [25].

Zjištění modulu pružnosti betonu se za pomoci rezonanční metody provádí podle normy ČSN 73 1372 [31], která uvádí vztahy pro výpočet dynamického modulu pružnosti v tahu – tlaku E_{crL} a E_{crF} a dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr} .

Dynamický modul pružnosti E_{crL} zjišťovaný z podélné rezonanční frekvence se vypočítá ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (10)$$

Dynamický modul pružnosti E_{crF} určovaný z příčné rezonanční frekvence je dán vztahem:

$$E_{crf} = \frac{0,0789 \cdot c_1 \cdot f_f^2 \cdot L^4 \cdot \rho}{i^2} \quad (11)$$

Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} se z kroutivé rezonanční frekvence dá určit ze vztahu:

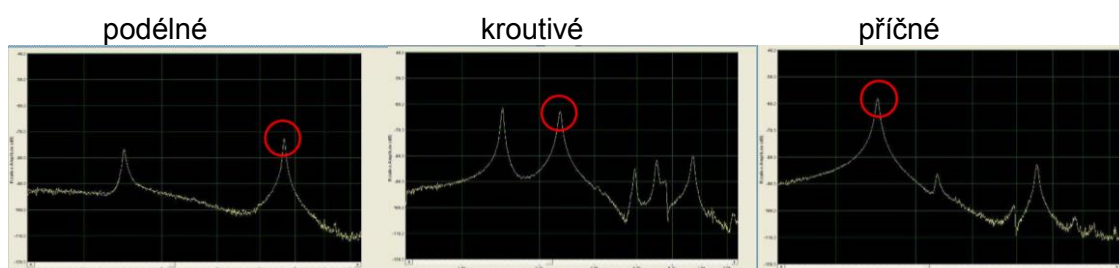
$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (12)$$

kde E_{crL} , E_{crf} jsou dynamické moduly pružnosti v tahu a v tlaku [MPa],
 G_{cr} je dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa],
 f_l , f_f jsou naměřené vlastní frekvence podélného nebo příčného kmitání [kHz],
 L je délka vzorku [m],
 ρ je objemová hmotnost [kg/m^3],
 k je součinitel, závislý na tvaru průřezu vzorku [-],
 c_1 je korekční součinitel, zahrnující vliv smyku a setrvačnosti [-],
 i je poloměr setrvačnosti příčného řezu vzorku k ose kolmé na rovinu kmitání [m],
 k je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku [-] [23].

Poměr mezi těmito moduly udává dynamický Poissonův součinitel ν_{cr} :

$$\nu_{cr} = \frac{E_{crL}}{2 \cdot G_{cr}} - 1 \quad (13)$$

Obecně je Poissonův koeficient v kladné a bezrozměrné číslo, které nabývá hodnot v intervalu (0; 0,5) a jedná se o poměr pružné deformace kolmo k zatížení a pružné deformace ve směru zatížení. Pokud by tedy jeho hodnota byla vyšší než 0,5 znamenalo by to, že by např. všestranně tlačené těleso zvětšovalo svůj objem [23], [32].



Obr. 3-14 Výstup z měření (impulzní kmitání podélné, kroutivé a příčné) [33].

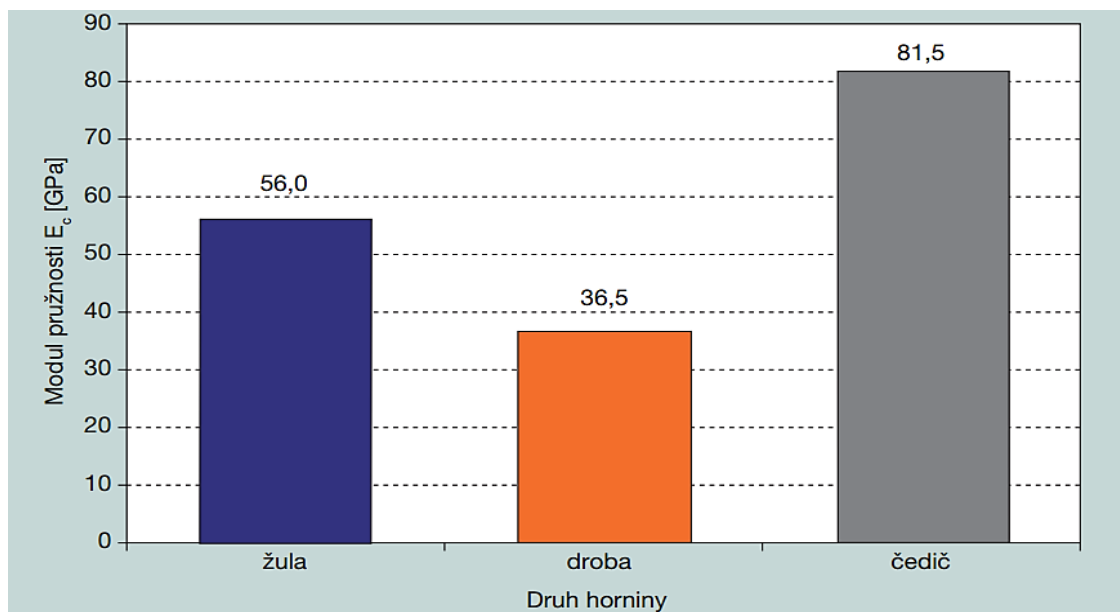
3.1.4 Vlivy na modul pružnosti

Jak již bylo zmíněno výše, existují činitelé, kteří mění hodnotu modulu pružnosti, přičemž někteří jsou více, jiní méně známí. Momentálně stále dochází ke snaze všechny možné činitele co nejvíce a nejpodrobněji popsat, aby bylo možné jejich vlastnosti dále lépe využívat, nebo se vliv jejich působení mohl brát alespoň v úvahu, protože ne všechny dosud známé činitele je možné ovlivnit.

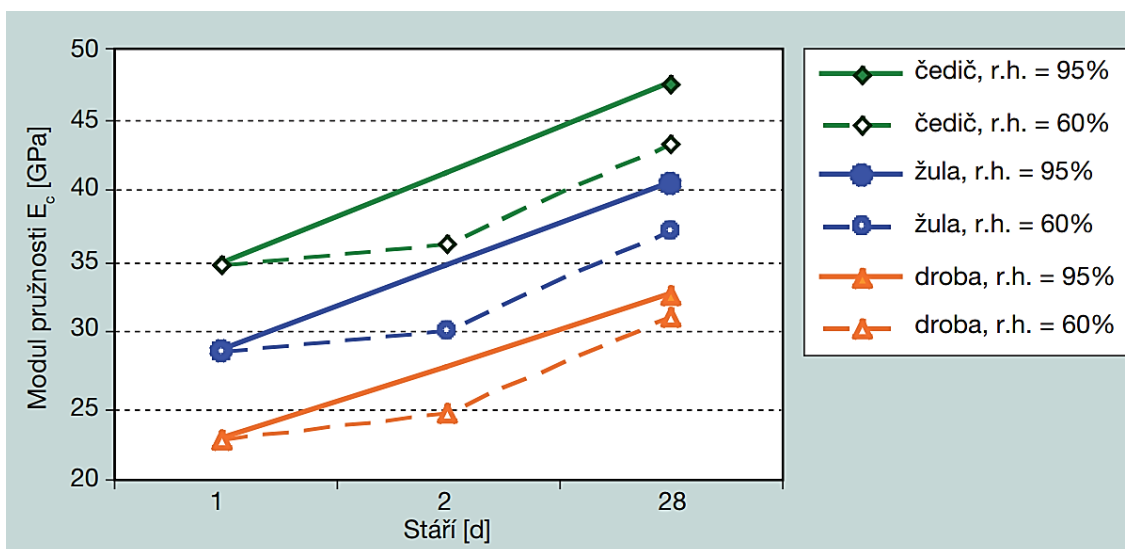
Pokud by se jednalo o beton či kompozitní materiál složením podobný betonu, záležela by výsledná hodnota modulu pružnosti na různých faktorech, které by bylo možné rozdělit na vlivy technologické a na vlivy zkušební, přičemž některé faktory by šlo přiřadit do obou skupin zároveň [6].

Mezi **technologické vlivy**, které ovlivňují moduly pružnosti tělesa a konstrukce z betonu, se řadí zejména složení, neboť hodnota modulu pružnosti kompozitu je determinována moduly pružnosti složek v něm obsažených, což je dobře vidět například na grafech na Obr. 3-15 a Obr. 3-16. Podle normy pro beton ČSN EN 1992-1-1 [11] ovlivňuje MP zejména kamenivo (jeho druh). Při použití vápencového či pískovcového kameniva (s porovnáním s kamenivem silikátovým) doporučuje norma

směrodatné hodnoty modulů pružnosti snížit o 10 %, resp. až o 30 % a naopak při použití čedičového kameniva by se měl modul pružnosti v porovnání se silikátovým kamenivem zvýšit o 20 %, protože čedič vykazuje vysoké hodnoty modulu pružnosti při samostatném zkoušení (viz Obr. 3-15) [7], [11], [34], [35]. Nelze opomenout také vliv kameniva ve smyslu jeho množství, plynulosti jeho granulometrie, lokality odkud je získáváno a velikosti největší použité frakce [6].



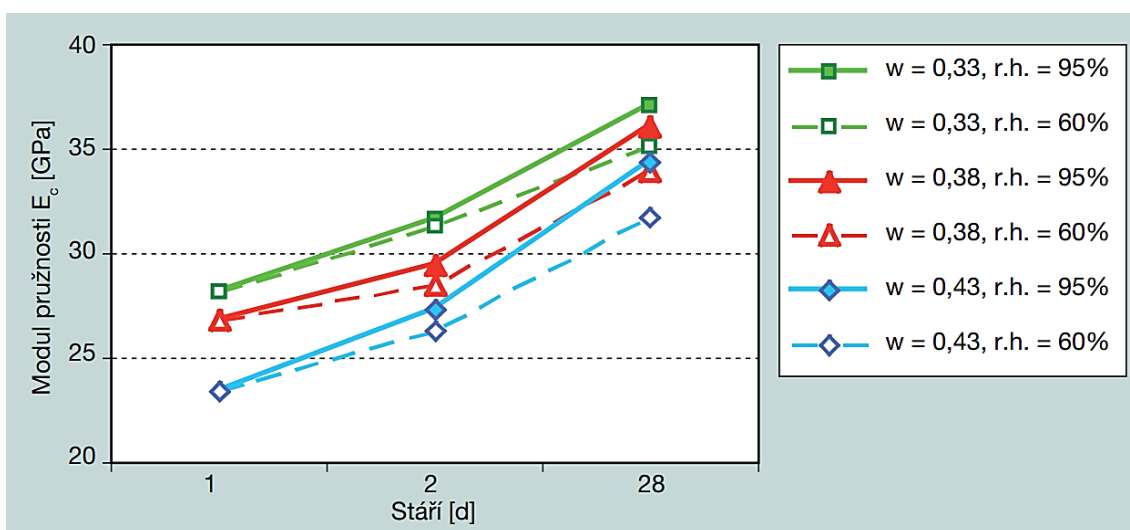
Obr. 3-15 Srovnání hodnot modulu pružnosti hornin používaných k výrobě kameniva [34].



Obr. 3-16 Srovnání hodnot MP pro betony s kamenivem z různých hornin, kdy betony s r.h. = 95 % nebyly po 2 dnech zkoušeny, z toho plynou odlišné tvary křivek [34].

Dalšími složkami betonu, které MP ovlivňují, jsou typ a množství cementu (přičemž vliv cementu nemá na výsledný modul tak velký dopad, jako kamenivo) a

volba přísad (například plastifikačních nebo provzdušňovacích) a příměsí (např. elektrérenský popílek), kterých s nástupem samozhutnitelných betonů vznikla celá řada. Neodmyslitelnou složkou betonu, která MP ovlivňuje, je i množství vody, které úzce souvisí s vodním součinitelem a ošetřováním betonu. Z Obr. 3-17 je patrné, že nízká hodnota vodního součinitele betonu se projeví zejména na hodnotách modulu pružnosti v prvních dnech zrání, kdy i vhodné ošetřování má s nízkým vodním součinitelem na modul pružnosti markantní vliv, neboť právě díky dobrému ošetřování je zabráněno vzniku mikrotrhlin, které modul pružnosti snižují [9], [34].

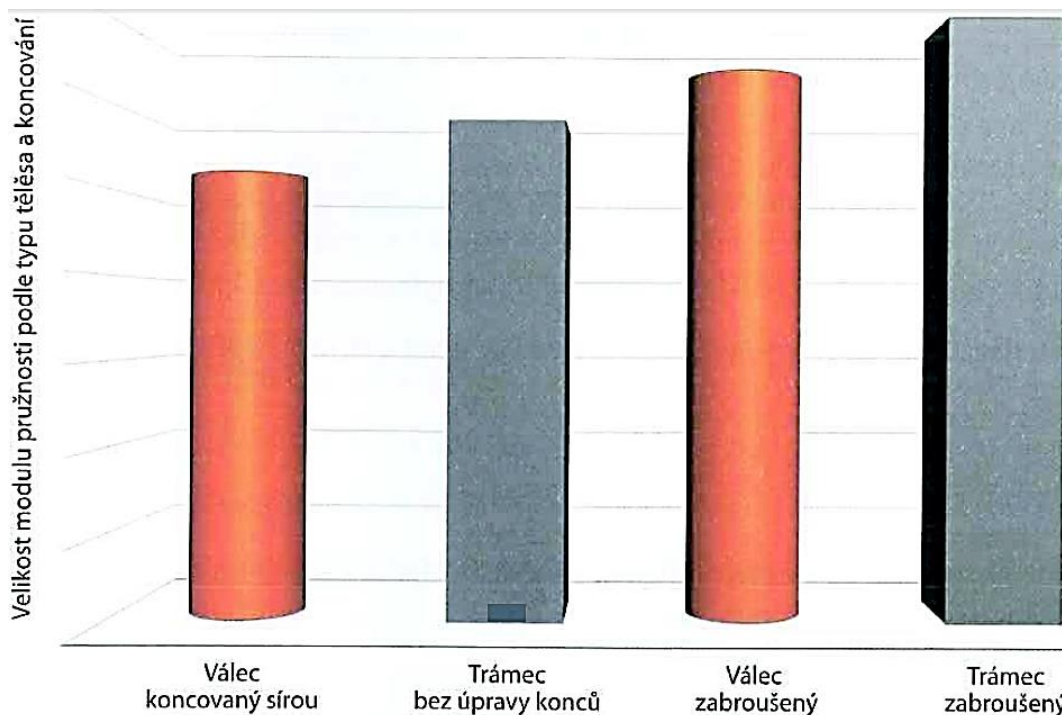


Obr. 3-17 Srovnání hodnot modulu pružnosti pro betony s různým vodním součinitelem [34].

Dalšími technologickými vlivy jsou způsob a míra provzdušnění, technologie výroby a zpracování čerstvé směsi (především míra zhutnění), teplota, vlhkost a kvalita tranzitní zóny [6].

Do druhé skupiny, která nese název **zkušební vlivy**, patří zvolená metoda pro určení MP (statická nebo dynamická), kdy je prokázáno, že dynamický modul pružnosti bývá vyšší asi o 15 až 30 % než modul statický (zdůvodnění viz kapitola 3. 1. 2) [7]. Za další zkušební vliv je považován použitý výpočetní vztah, zvolená zatěžovací úroveň, tvar a velikost zkušební tělesa, jestli je zjištěný modul pružnosti E_c na zkušebním tělese nebo na vývrtnu z betonu zabudovaného v konstrukci (beton těles zraje jiným způsobem než beton v konstrukci, zjištěné moduly pružnosti přímo z konstrukce naráží na limity regresních vztahů a použitých metod samotných), samotný způsob získání zkušební tělesa (jak v laboratoři, tak z konstrukce), prostředí během zkoušky (teplota, vlhkost), typ použitého snímače, vliv zkušební lisu, excentricita vzorku, rychlost zatěžování, cyklické zatěžování, způsob zakoncování tlačných ploch

(zakoncování broušením dává vyšší modul pružnosti než zakoncování sírnou maltou, viz Obr. 3-17), stáří zkušebního tělesa, vícenásobné zatěžování, kvalita použitých forem (materiál, tuhost, rovinnost i kolmost) a další [2], [6], [9], [35].



Obr. 3-18 Idealizované zobrazení ukazující relativní vztahy výsledků měření statického MP betonu na různých tělesech s různým zakončováním [35].

Z výše uvedeného je zřejmé, že je třeba věnovat zvýšenou pozornost parametrům zkoušení při zkouškách samotných a při komunikaci mezi dodavatelem a objednavatelem betonu modul pružnosti blíže specifikovat, aby se zamezilo nedostatkům reálné konstrukce [6].

3.2 Kompozitní materiály

V rámci experimentu bylo pro zkoušení modulů pružnosti zhotoveno několik kompozitů (v průmyslu výroby stavebních hmot jsou tak označovány větší celky, které vznikají spolupůsobením nejčastěji tří skupin látek, které se nazývají **pojiva**, **plniva** a **přísady** [36]), o kterých by se za jistých okolností (v závislosti na jejich vzhledu a charakteru) dalo tvrdit, že jsou to všechno malty. V následujících odstavcích bude teoreticky pojednáno zejména o jemnozrnných silikátových kompozitech, které tvořily podstatnou část experimentálního zkoušení.

3.2.1 Co to jsou malty

Existuje mnoho typů jemnozrnných silikátových kompozitů, které figurují v různých knihách (například jemnozrnný beton). Experiment vycházel zejména z norem pro cementové malty.

Jemnozrnný (drobnozrnný) beton

Je to beton, jehož maximální zrno kameniva je 4 mm. Tento typ betonu má tedy velký vnitřní povrch kameniva a pro výrobu těchto betonů je tedy potřeba daleko vyšší obsah cementového kamene než u obvyklého betonu s větší frakcí kameniva. Pro vlastnosti těchto betonů platí stejné zákonitosti jako pro obvyklé betony. Udává se, že nejvyšších pevností je dosaženo při poměru písku a cementu v poměru 1 : 1 s vodním součinitelem $w = 0,3$ (podmínka hutnosti betonu $H \geq 0,97$). Jemnozrnné betony mají vyšší pevnost v tahu za ohybem, dobrou vodotěsnost i mrazuvzdornost [3].

Cementová malta

Tato malta se od jemnozrnného betonu moc neliší. Čerstvou směs cementové malty je možné popsat jako složení cementu, písku a vody. Podle normy [37] je blíže specifikovaná pro účely zkoušení, jako jeden hmotnostní díl cementu na tři hmotnostní díly písku a půl dílu vody, kdy vodní součinitel dosahuje hodnoty 0,5.

3.2.2 Vlastnosti malt

Na cementových směsích a maltách je možné provádět různé zkoušky. Je to zejména stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, konzistence za použití Vicatova přístroje, doby tuhnutí, objemové stálosti s pomocí Le Chatelierovy objímky, jemnosti mletí, hydratačního tepla (rozpuštěcí metoda a semiadiabatická metoda), dále je možné provádět zkoušku pucolanity pucolánových cementů a celkový chemický rozbor cementu [37].

3.2.3 Složení malt

Kamenivo

Kamenivo je nesoudržný zrnitý anorganický materiál přírodního nebo umělého původu, určený pro stavební účely, který je možný rozdělit podle několika hledisek. Podle

původu se rozděluje na kamenivo **přírodní**, **umělé** nebo **recyklované**. Podle vzniku je možné třídit kamenivo na **drcené** (získané předrcením přírodního kamene), **těžené** (získané těžením přírodní rozpadlé horniny) a **těžené předrcené** (získané drcením zrn těženého kameniva nad 2 mm s podílem drcených zrn nad 40 % hmotnosti). Dalším typem třídění kameniva může být například rozdělení podle objemové hmotnosti nebo podle velikosti největších zrn, kdy dostáváme kamenivo **jemné** (do 0,063 mm, kamenná moučka), **drobné** (do 4 mm včetně) a **hrubé** (od 2 do 63 mm) [19]. Podle velikosti zrn je potom ještě možné kamenivo dělit na tzv. frakce, které jsou dány rozmezím minimálního a maximálního zrna. Běžně se v praxi vyrábí frakce kameniva: 0/4, 4/8, 8/16, 11/22 a 16/32 mm [40], [41].

Do malty, jak již bylo zmíněno, se dává písek. Toto kamenivo je striktně definované normou pokud se jedná například o stanovení pevnosti cementu, kdy musí odpovídat požadavkům normy a zároveň se musí vyrábět v různých zemích [37].

Cement

Cement (zkráceně též jako CEM) je podle normy ČSN EN 197-1 [38] definován jako hydraulické pojivo (tzv. svoji stálost si po zatvrdnutí zachovává též pod vodou) [38]. Je to jemně mletá anorganická látka, která vzniká pálením vhodných surovin na vysokou teplotu, přičemž často dochází až k mezi slinutí. Po pálení následuje rozemletí či vyhašení [19]. Po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku hydratačních reakcí a procesů tuhne a tvrdne. Takto definovaný cement CEM musí umožňovat výrobu betonu či malty (při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou), která bude mít po dostatečně dlouhou dobu vhodnou zpracovatelnost a po předepsané době musí dosáhnout předepsané pevnosti a dlouhodobé objemové stálosti [38].

Cementy se dají rozdělovat podle různých kritérií. Jedním z nich je rozdělení podle normalizované pevnosti, což je pevnost v tlaku stanovená podle ČSN EN 196-1 [37] po 28 dnech, na 3 třídy:

- 32,5,
- 42,5,
- 52,5 [38].

Dalším možným rozdělením je rozdělení podle tříd počátečních pevností, které jsou charakterizovány jako pevnosti v tlaku stanovené podle ČSN EN 196-1 [37] po 2

nebo 7 dnech a které vyhovují požadavkům normy [38] pro každou třídu normalizované pevnosti. Cementy s vysokými počátečními pevnostmi se zde značí písmenem R a cementy s normálním nárůstem pevnosti se označují písmenem N. Cementy pro obecné použití s nízkým hydratačním teplem se musí navíc označit písmeny LH. V Tab. 3-3 jsou uvedeny některé stanovené požadavky (uvedené v normě [38]) na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu, přičemž cementy podle této normy musí splňovat dále i požadavky na chemické vlastnosti, trvanlivost a objemovou stálost.

Tab. 3-3 Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti [38].

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa]			Počátek tuhnutí [min]	
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost 28 dnů		
	2 dny	7 dnů			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	-			

Důležitou částí cementu jsou tzv. účinné složky, díky jejichž hydrataci nastává hydraulické tvrdnutí cementu. Za tyto složky jsou považovány zejména sloučeniny CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃, popřípadě jiné sloučeniny podobného typu. Chemické vlastnosti cementů jsou závislé na mineralogickém složení, které má také vliv na rychlost hydratace a výslednou pevnost. Podle chemického hlediska je možné rozdělit cementy do 3 skupin. Jsou to křemičitanové cementy (např. cement portlandský), hlinitanové cementy (s převahou hlinitanů vápenatých) a jiné cementy (např. železitanový nebo chromitanový) [38], [39].

Norma [38] uvádí 27 různých druhů cementů (dle obsahu hlavních a doplňujících složek, viz Tab. 3-4), které jsou zde rozděleny do 5 hlavních skupin podle směsnosti na:

- CEM I Portlandský cement,
- CEM II Portlandský cement směsný,
- CEM III Vysokopeční cement,
- CEM IV Pucolánový cement,
- CEM V Směsný cement [38].

Tab. 3-4 Výrobky skupiny cementů pro obecné použití dle normy [38].

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro všeobecné použití)		Složení (poměry složek podle % hmotnosti) ^a			
			Hlavní složky			Doplňující složky
			Slínek			
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100			0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	Vysokopecní struska (S)	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	6-10	Křemičitý úlet (D) ^b	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	6-20	Přírodní pucolán (P)	0-5
		CEM II/B-P	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	Přírodní kalcinovaný pucolán (Q)	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35		0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	6-20	Křemičitý popílek (V)	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	Vápenatý popílek (W)	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s kalc. břidlicí	CEM II/A-T	80-94	6-20	Kalcinovaná břidlice (T)	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	6-20	Vápenec (L)	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	Vápenec (LL)	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	21-35		0-5
	Portlandský směsný cement ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20	S+D+P+Q+V+W +T+L+LL	0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35		0-5
	CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	Vysokopecní struska (S)
CEM III/B			20-34	66-80	0-5	
CEM III/C			5-19	81-95	0-5	
CEM IV	Pucolánový cement ^c	CEM IV/A	65-89	11-35	D+P+Q+V+W	0-5
		CEM IV/B	45-64	36-55		0-5
CEM V	Směsný cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	S+(P+Q+V) ^d	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50		0-5

^a Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

^b Obsah křemičitého úletu je omezený do 10 %.

^c Hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarované v označení cementu.

^d Směsný cement obsahuje 18 – 30 resp. 31 – 50 % S a 18 – 30 resp. 31 – 50 % P+Q+V.

Voda

Podle normy ČSN EN 196-1 [37] se používá voda destilovaná nebo deionizovaná, pokud je nutné provádět zkoušky vhodnosti u cementových malt, jinak je vhodná i voda pitná.

3.2.4 Zvláštní typy kompozitů

Cementový tmel

Cementový tmel se skládá z tuhých částic do 0,25 mm, vody a chemických přísad. Voda hraje v tomto tmelu velkou roli a plní funkci:

- chemickou (způsobuje hydrataci cementu, kdy na počátku procesu je spotřebováno 1-2 % vody, v době tuhnutí 4-5 % a na celkovou hydrataci 23 %, kde tato procenta jsou vztažena na hmotnost cementu),
- fyzikálně-chemickou (kdy na rozhraní dvou fází (cementu a vody) dochází k adsorpci vodní obálky na povrch částic),
- mechanickou (voda vyplňuje kapiláry a póry a vzniklými kapilárními silami se stává soudržnou) [3].

Cementová zálivka

Zálivkové hmoty na silikátové (cementové) bázi jsou většinou tekuté konzistence a slouží k podlévání základů strojů, jeřábových drah, k zalévání kotev, šroubů či svorníků [42]. Pokud jde o zkoušení zálivkové hmoty určené pro kotvení, musí malta po vytvrdnutí spolehlivě přenést tahovou sílu z výztuže do okolního materiálu. Dále by měla být dobře zpracovatelná, tedy měla by být tixotropní a dobře přiléhat k podkladu v jakékoliv poloze vůči místu aplikace. Zároveň musí mít vhodnou konzistenci pro aplikaci montážní pistolí. Důležitou vlastností těchto malt je jejich nesmrštitelnost. Na maltě je možné provádět zkoušky pevnosti v tlaku, tahu za ohybu a modulů pružnosti stejně jako na každé jiné maltě [43].

Alkalicky aktivované jemnozrné betony

U alkalicky aktivovaných betonů (AAB) nebo systémů (AAS) se namísto cementového pojiva používá odpadní materiál vznikající při výrobě materiálu jiného, kdy typickým příkladem odpadního materiálu může být vysokopecní struska, která vzniká při výrobě

oceli. Při srovnání těchto materiálů s betony na bázi portlandského či směsného cementu jsou daleko šetrnější k životnímu prostředí v rámci jejich výroby, zároveň jsou odolnější proti ohni, mají lepší chemickou odolnost či mrazuvzdornost a splňují přísné požadavky na co nejchopodárnější produkci. Mají však i jisté nevýhody, do kterých se řadí zejména vysoké smršťování (což je hlavní faktor, který je momentálně limituje v praxi), jejich složité zlepšení zpracovatelnosti pomocí běžných plastifikátorů určenými pro portlandský beton a rychlé tunutí [44], [45], [46].

Princip alkalické aktivace spočívá v chemické reakci mezi tzv. aktivátory a materiálem k aktivaci, kdy za aktivátory jsou považovány uhličitany, hydroxidy a křemičitany alkalických kovů (nejčastěji sodík či draslík) a aktivačním materiálem jsou odpadní materiály (struska či elektrárenský popílek) [44], [45].

3.3 Další zkušební postupy využité při zkoušení kompozitů

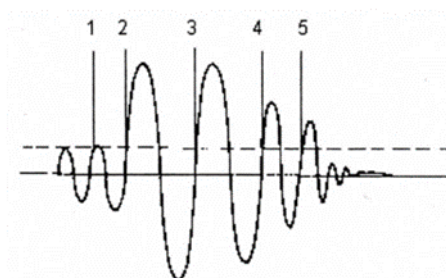
V rámci celého experimentu, jehož je obsah této diplomové práce pouze součástí, bylo na zkušebních tělesech měřeno i smršťování a akustická emise. Následující odstavce se tedy budou zabývat částečným přiblížením této problematiky.

3.3.1 Akustická emise

Akustická emise (dále v textu též AE) je fyzikální jev, který se projevuje v materiálech. Při tomto jevu dochází k uvolňování částí nahromaděné elastické energie v důsledku dynamických procesů (vyvolaných vnějšími nebo vnitřními silami) [47].

Nedestruktivní metoda, která je na tomto jevu založená, se nazývá metoda AE. Princip této metody je založen na snímání mechanických impulzů dilatačních vln (vyvolaných mikroporušením vzniklým od zatížení), které se šíří prostředím jako UZ signály. Velkou výhodou této metody je například možnost určení vznikající trhliny dříve, než ji lze lokalizovat okem nebo mikroskopem. Tato metoda je v praxi velice oblíbená zejména díky tzv. Kaiserovu efektu, který spočívá v tom, že zatěže-li se určitý materiál, který se odtíží a následně znovu zatíží, tak při tomto dalším zatěžování je detekce pomocí AE možná teprve až při zatěžování nad maximální úroveň předchozího zatížení, protože do té doby nedochází k dalšímu rozvoji vnitřních mikrodefektů. Na základě stanovení této historie zatěžování lze odhadnout rezervu únosnosti prvku před jeho destrukcí z průběhu intenzity rozvoje vnitřních trhlin [22].

Výstupy měření zobrazují počet překmitů signálů AE, které určují takovou kvantitu překmitů signálu akustické emise, jenž při daném časovém intervalu překročí přesně nastavenou prahovou hodnotu (Obr. 3-19). Tento parametr je jednoduchým měřítkem určení velikosti signálu, neboť silnější signály dávají větší počet překmitů. Při současném stupni poznání AE se předpokládá, že počet překmitů odhaluje množství vznikajících mikrotrhlin (trhlin) v materiálu, ale neříká nic o jejich velikosti ani orientaci [47], [48], [49], [50].



Obr. 3-19 Počet překmitů signálu akustické emise [48]

Amplituda signálů AE je maximální elektrické napětí dosažené událostmi akustické emise. Amplituda je užitečný parametr, protože ukazuje velikost detekovatelné události akustické emise (odhalení závisí na rozkmitu, které překoná prahovou hodnotu). Stejně jako počet překmitů, tak i amplituda jsou vhodnými parametry pro určení velikosti signálu, a je tedy vhodnou proměnnou pro zpřesnění měření. Předpokládá se, že amplituda ukazuje na velikost vznikajících mikrotrhlin (trhlin) v materiálu při zátěžové zkoušce [48], [49], [50].

3.3.2 Smršťování

Při smršťování dochází k objemovým změnám materiálů. Z pohledu projevu tohoto jevu je popis docela jednoduchý, pokud jde ale o pochopení příčin tohoto jevu, je to již složitější problém [51]. Jestli smrštění betonu (a kompozitů na podobné bázi) souvisí s molekulami vody, které jsou mezi zrny hydratujícího cementu, přičemž důležitou roli hraje kapilární kondenzace a povrchové napětí, nebo za něj mohou molekuly vody, které se nacházejí ve struktuře C-S-H gelu (mezi jeho vrstvami), odkud během vysychání unikají, se různí autoři neshodli [52].

Smrštění se dělí na tři základní typy:

- plastické smrštění (vyvíjí se, když se z povrchu čerstvého betonu odpařuje nebo odvádí voda),
- smrštění vysycháním (je vyvoláno úbytkem vody v zatvrdlém betonu během odpařování záměsové vody),
- autogenní smrštění (též smrštění od samovysychání nebo chemické smrštění, které se projevuje v důsledku hydratace cementu) [52].

Na tyto typy smršťování celkově může mít vliv mnoho faktorů. Za nejvýraznější z nich se dá pokládat doba a způsob ošetřování, vlhkost a teplota okolního prostředí a směsi, rozměry i tvar těles či konstrukcí, množství výztuže a hutnost i složení kompozitu, kdy kromě obsahu vody hraje důležitou roli i pojivo a plnivo. Cementy vyšších tříd (zejména jemně mleté) zvyšují smršťování stejně jako vyšší dávky cementu. Použitá frakce kameniva například způsobuje, že jemnozrnné betony se smršťují více než hrubozrnné [53], [54].

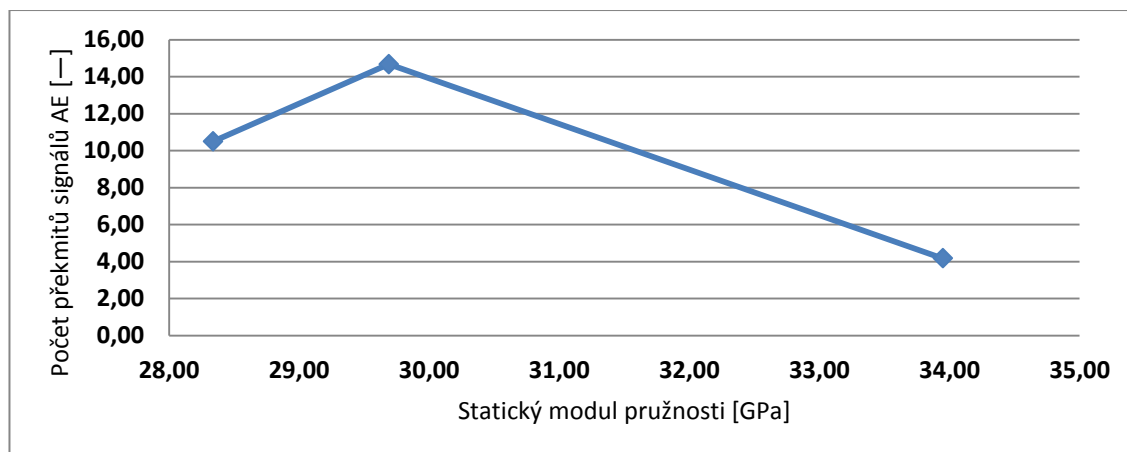
4 PRAKTICKÁ ČÁST

Jak již bylo zmíněno výše, obsah diplomové práce, který je zaměřen na cíl zjistit a porovnat moduly pružnosti v tlaku kompozitních materiálů, je pouze jednou z částí rozsáhlejšího experimentu, konkrétně standardního specifického projektu VUT v Brně. Tento projekt, který se zabýval zejména smrštěním materiálů, akustickou emisí a moduly pružnosti, nese název „Objemové změny jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv“ a je označen: FAST-S-16-3125. Probíhal od 1. 1. 2016 do 31. 12. 2016 pod odborným vedením Ing. Barbary Kucharczykové, Ph.D.

Úvod této praktické části tedy bude věnován stručným závěrům z měření AE a smršťování, protože je možné mezi nimi a moduly pružnosti najít určitou souvislost, neboť výsledky těchto dalších měření, stejně jako moduly pružnosti, vypovídají o vlastnostech materiálů. Dále bude tato praktická část práce zaměřena již na samotný popis experimentu související s touto diplomovou prací.

4.1 Akustická emise

Na následujících dvou grafech (viz Graf 4-1 a Graf 4-2) jsou hodnoty získané v průběhu třetího zatěžovacího cyklu, což je období, kdy se určuje statický modul pružnosti.



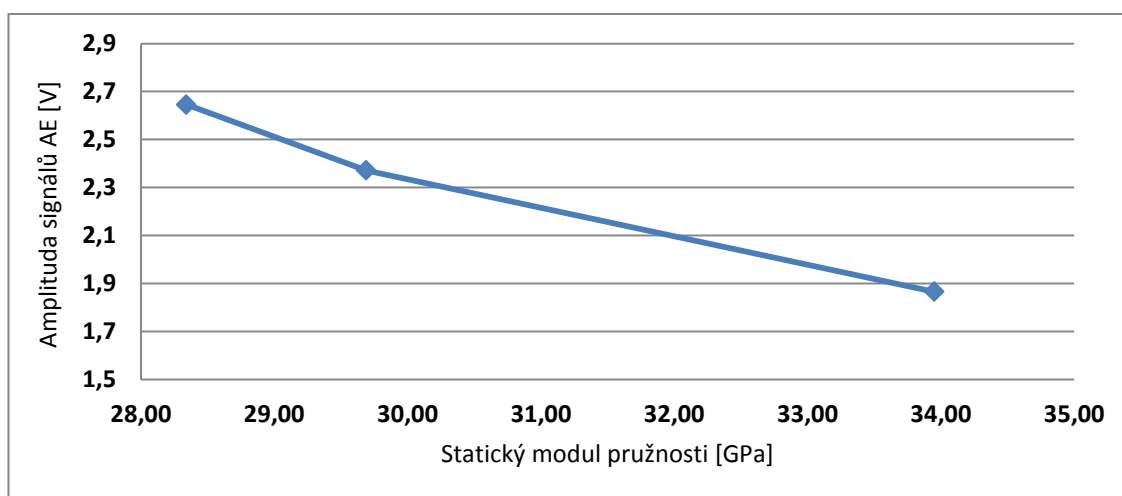
Graf 4-1 Graf závislosti počtu překmitů na statickém modulu pružnosti.

Tento graf vychází z hodnot uvedených v tabulce (viz Tab. 4-1).

Tab. 4-1 Hodnoty počtu překmitů v závislosti na statickém MP.

Statický modul pružnosti [GPa]	Počet překmitů signálů AE [—]
28.34	10.50
29.69	14.67
33.95	4.17

Ze závislosti počtu překmitů na statickém modulu pružnosti je vidět, že rozdíl v počtu překmitů, a tedy i v množství vznikajících mikrotrhlin (trhlin), je u blízkých hodnot statického modulu pružnosti podobný. U vzorků s větší hodnotou modulu pružnosti se ovšem počet překmitů sníží o téměř třetinu.



Graf 4-2 Graf závislosti velikosti amplitudy signálů na statickém modulu pružnosti.

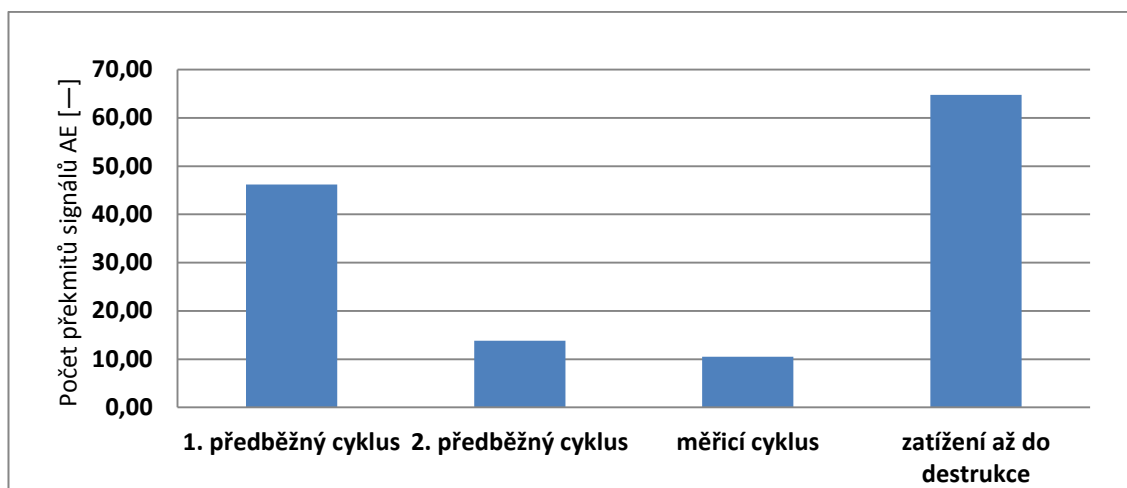
Z grafu (viz Graf 4-2) je patrné, že se vzrůstajícím statickým modulem pružnosti klesá velikost amplitudy, a tedy i velikost vznikajících mikrotrhlin v materiálu.

Přesné hodnoty velikosti amplitudy signálů v závislosti na statickém modulu pružnosti jsou znázorněny v tabulce (viz Tab. 4-2).

Tab. 4-2 Velikost amplitudy signálů v závislosti na MP.

Statický modul pružnosti [GPa]	Amplituda signálů AE [mV]
28.34	2645.33
29.69	2371.33
33.95	1865.80

Na následujících dvou grafech (viz Graf 4-3 a Graf 4-4) jsou hodnoty získané v průběhu celé zkoušky.

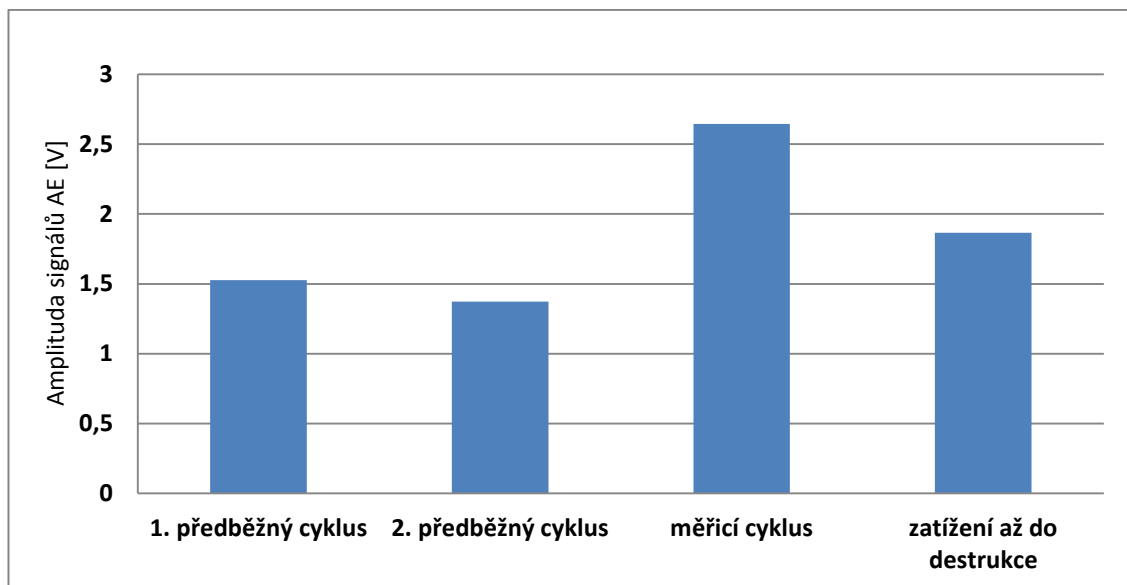


Graf 4-3 Graf znázorňující počet překmitů v průběhu zkoušky.

Tab. 4-3 Hodnoty počtu překmitů v průběhu zkoušky.

Průběh zkoušky	Počet překmitů signálů AE [-]
1. předběžný cyklus	46.2
2. předběžný cyklus	13.8
měřicí cyklus	10.5
zatížení až do destrukce	64.8

Z hodnot v tabulce (Tab. 4-3) je zřejmé, že nejvíce vznikajících mikrotrhlin (trhlin) je během posledního zatěžovacího cyklu (při náběhu síly až do porušení). Velké množství vznikajících mikrotrhlin (trhlin) se také objevuje i při prvním předběžném cyklu. Při druhém předběžném a třetím měřicím cyklu pak zřejmě nastupuje určitý paměťový efekt materiálu, protože vznikajících mikrotrhlin je cyklu méně a je jich podobný počet.



Graf 4-4 Graf znázorňující velikosti amplitudy signálů v průběhu zkoušky.

Přesné hodnoty velikosti amplitudy signálů jsou pro lepší představu uvedeny i v tabulce (viz Tab. 4-4).

Tab. 4-4 Velikost amplitudy signálů v průběhu zkoušky.

Průběh zkoušky	Amplituda signálů AE [mV]
1. předběžný cyklus	1526.8
2. předběžný cyklus	1373.0
měřicí cyklus	2645.3
zatížení až do destrukce	1866.0

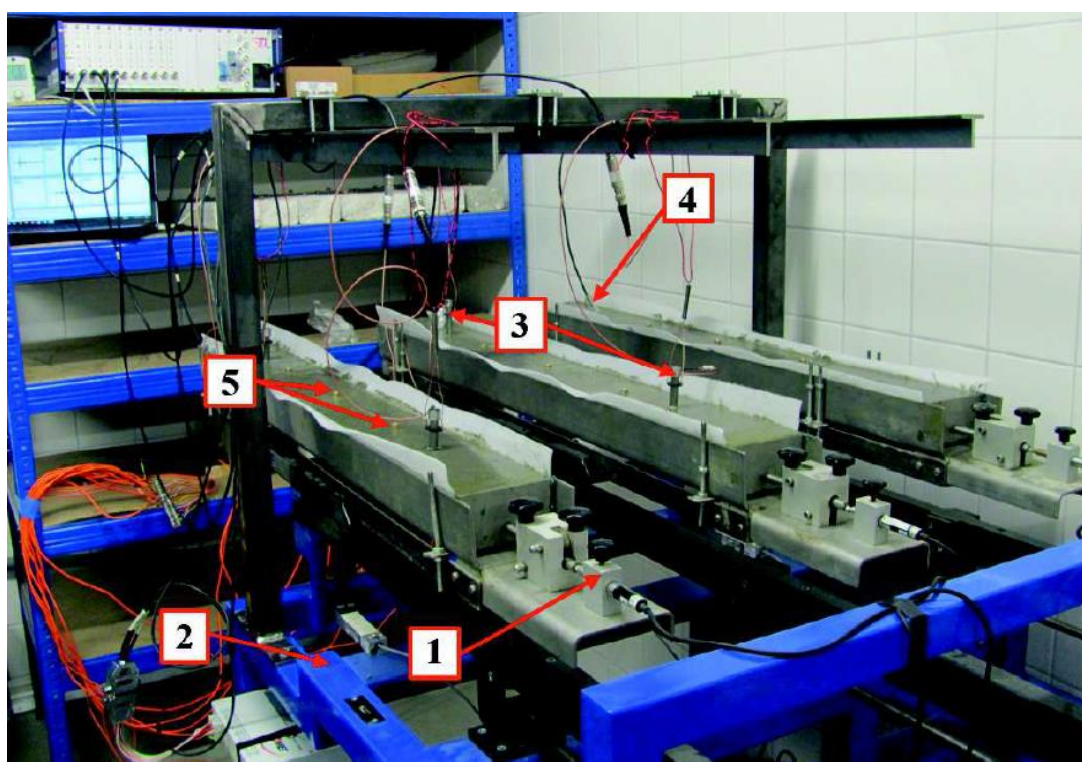
Z hlediska velikosti vznikajících mikrotrhlin (trhlin) se největší mikrotrhliny objevují v období třetího měřicího zatěžovacího cyklu. Co se prvních dvou předběžných cyklů týče, vznikají zde mikrotrhliny menší. Při zatížení až do destrukce je to kombinace malých i velkých mikrotrhlin a později i trhlin.

4.2 Smrštění

Experiment týkající se smrštění se zabýval kompozity na bázi silikátových pojiv s ohledem na jejich smrštění v čase. Tato část je v diplomové práci popsána pouze stručně.

Pro účely měření smršťování v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí cementového kompozitu byly speciálně upraveny formy (100 × 60 × 1000 mm), které se naplnily vyrobenou směsí. Charakteristiky vybraných kompozitů 0, III a IV jsou uvedeny v

tabulce (viz Tab. 4-5). Tyto formy byly následně uloženy na váhový stůl (viz Obr. 4-1), který umožňoval kontinuální záznam hmotnostních ztrát způsobených volným vysycháním vzorku v prostředí (vrchní část forem nebyla ničím kryta). Kromě již zmíněných hmotnostních ztrát byly měřeny i délkové změny cementového kompozitu, teplota uvnitř kompozitu i v okolním prostředí a relativní vlhkost prostředí. Teplota okolního prostředí se udržovala na $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost prostředí byla $(60 \pm 10) \%$. Po 3 dnech byly vzorky vytaženy z forem a byly uloženy na stůl ve stejném teplotním i vlhkostrním prostředí. Měření smrštění na nich pokračovala v daných časových intervalech pomocí tenzometrů a vah.



Obr. 4-1 Uspořádání měřicího zařízení (1 – smršťovací rýna, 2 – váhový stůl, 3 – snímač akustické emise, 4 – čidlo pro měření teploty, 5 – měřicí terče pro deformetr) [55].

Tab. 4-5 Složení a vlastnosti čerstvých kompozitů [56].

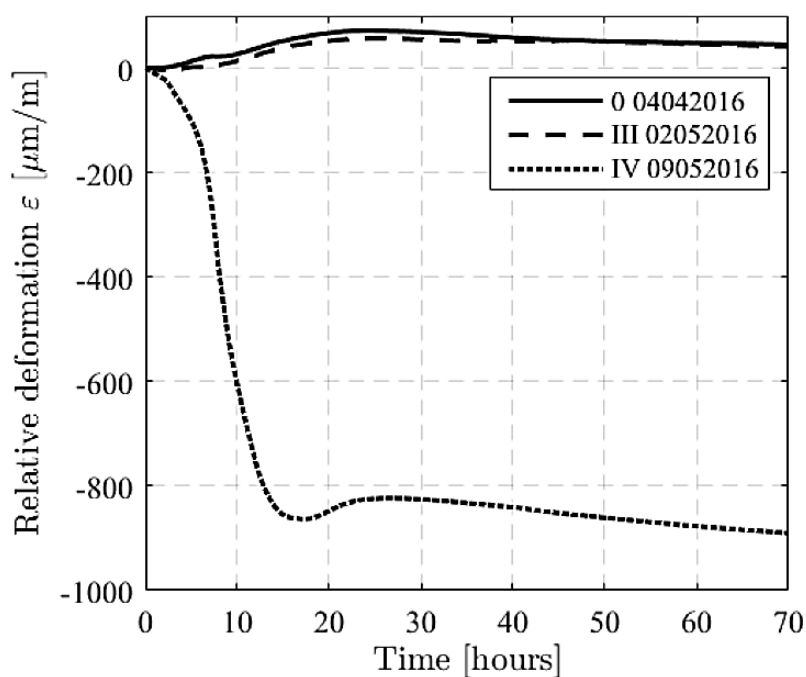
Označení směsi		0	III	IV
Písek	[kg]	45,9	45,9	45,9
Cement I 42,5 R	[kg]	15,3	15,3	15,3
Voda	[kg]	7,65	7,16	5,35
Vodní součinitel w/c	[-]	0,5	0,47	0,35
Plastifikátor	% z cementu	-	-	1%

Ze zkoušení vyplynulo, že u měřených kompozitů bez plastifikátoru došlo k jevu, který se nazývá „krvácení“. Čerstvě po výrobě a uskladnění těles se relativně

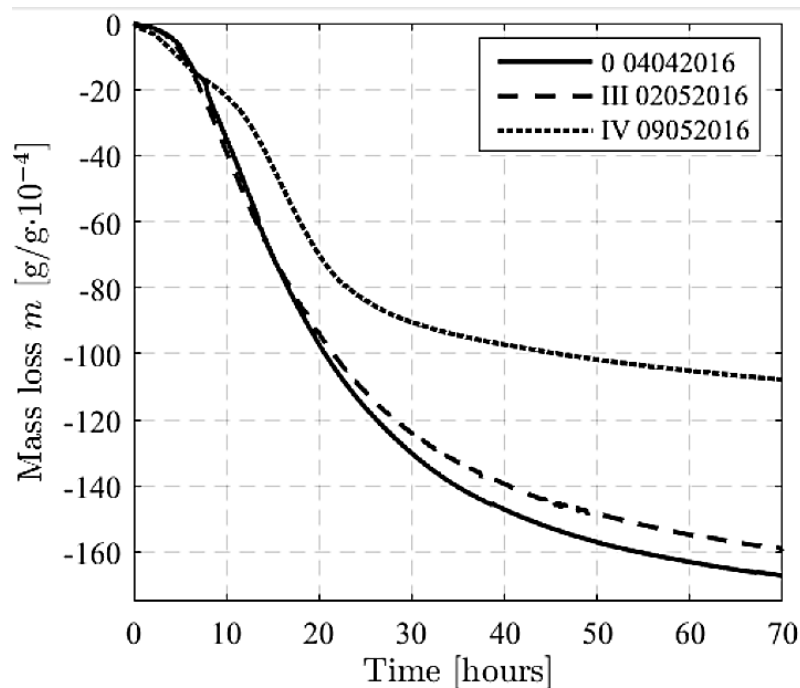
velká část vody dostala na svrchní povrch kompozitu. Postupem času se část vody z povrchu odpařila (což způsobilo hmotnostní ztrátu) a jiná část vody byla nasávána zpět do struktury tělesa, což přispělo k nabývání [56].

U kompozitu s plastifikátorem se tento jev moc neprojevil, protože plastifikátor snížil obsah vody (nízký vodní součinitel).

Na následujících dvou obrázcích je zobrazena závislost poměrné deformace na čase (viz Obr. 4-2) a hmotnostní úbytek v závislosti na čase (viz Obr. 4-3) v prvních 3 dnech měření.



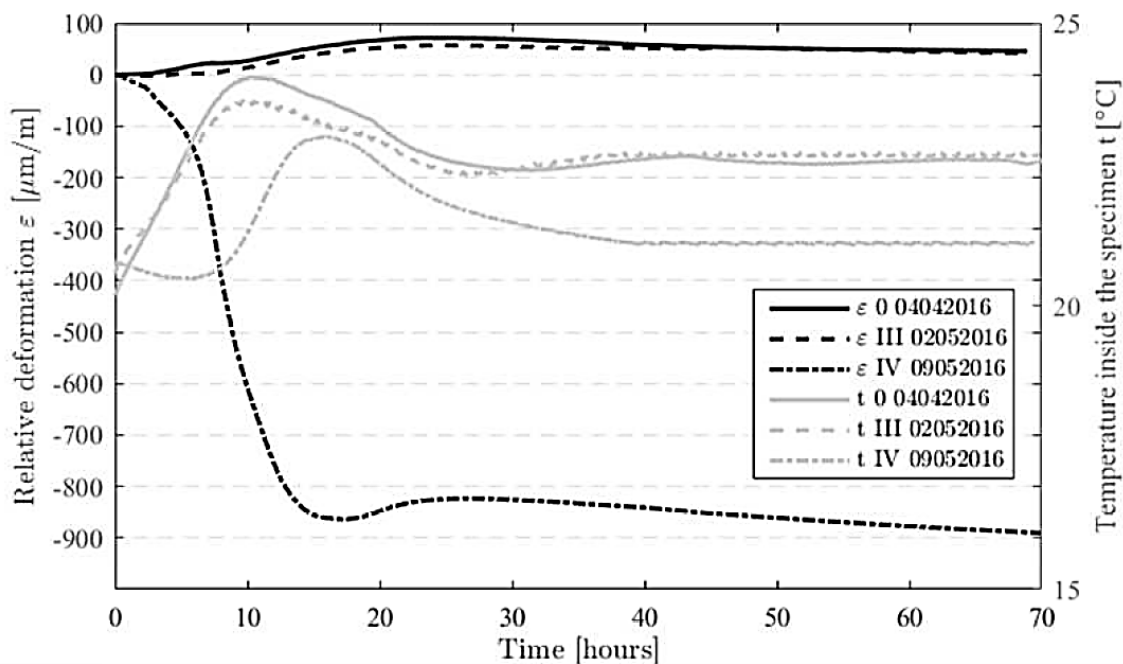
Obr. 4-2 Graf závislosti poměrné deformace kompozitů 0, III a IV na čase ve stáří prvních 72 hodin [56].



Obr. 4-3 Graf závislosti hmotnostní ztráty kompozitů 0, III a IV na čase ve stáří prvních 72 hodin [56].

Z prvního uvedeného grafu vyplývá, že krátce po zahájení měření vykazovaly obě směsi bez plastifikátoru poměrné prodloužení oproti kompozitu IV (s plastifikátorem), který se naopak zkracoval. Z druhého grafu je patrné, že kompozit s plastifikátorem se opět chová jinak, jelikož u něj dochází k výrazně menším objemovým změnám, než jaké jsou u kompozitů bez plastifikátoru.

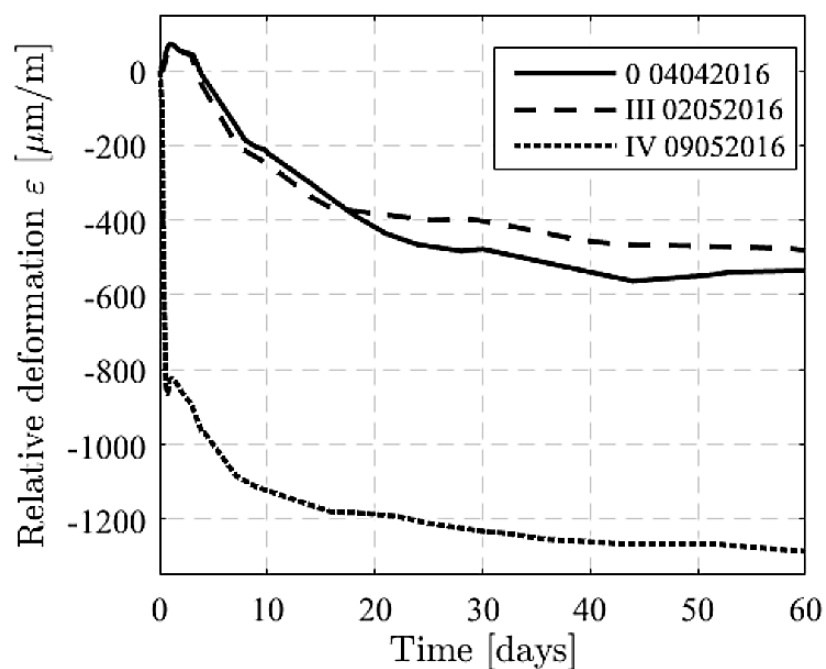
Je známo, že přidání plastifikátoru má podstatný vliv na hydrataci cementu. Pokud jde o velikost zpomalení hydratace, bývá ovlivněna zejména množstvím a vlastnostmi cementu a plastifikátoru.



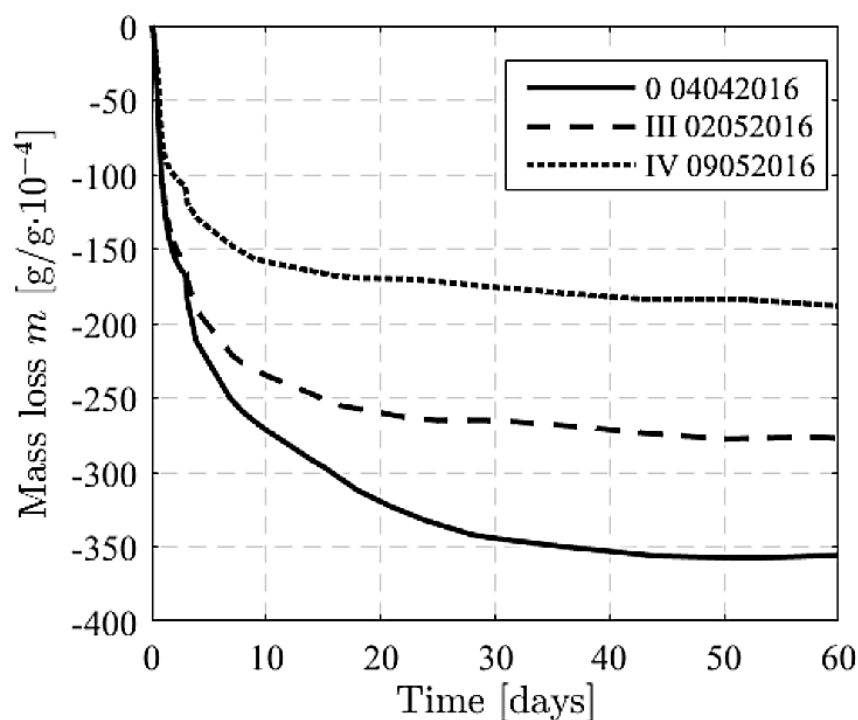
Obr. 4-4 Graf závislosti poměrné deformace a teploty u kompozitů 0, III a IV na čase [56].

Na grafu z Obr. 4-4 je hezky vidět, že průběh smrštění dobře koresponduje s průběhem teploty naměřené uvnitř zkušebního tělesa. V případě kompozitu bez plastifikátoru byla nejvyšší teplota zaznamenána přibližně v 11 hodin po začátku měření a ve stejné době došlo i k nárůstu délky (toto prodloužení je připisováno tepelné roztažnosti cementových kompozitů). Podobný vývoj byl zaznamenán i u kompozitů s plastifikátorem. Přítomnost plastifikátoru (ve srovnání s kompozity bez plastifikátoru) způsobila opoždění hydratace a růst teploty cca o 5 hodin [56].

Pokud jde o výsledky dlouhodobého měření, je možné konstatovat, že přidavek plastifikátoru má podstatný vliv i na celkový průběh poměrných deformací a hmotnostních ztrát (viz Obr. 4-5 a Obr. 4-6).



Obr. 4-5 Graf závislosti poměrné deformace u kompozitů (0, III a IV) na delším časovém období [56].

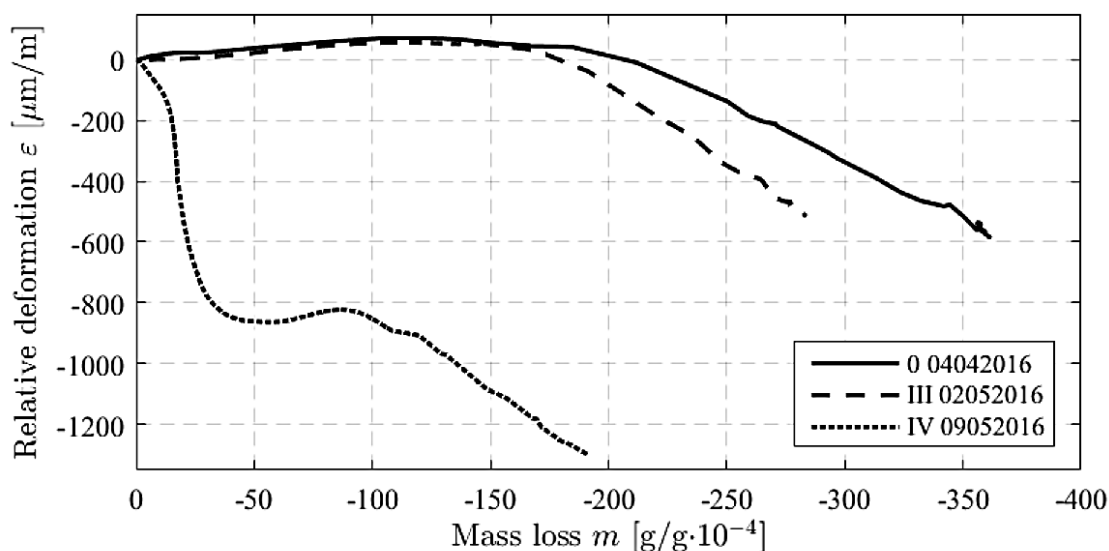


Obr. 4-6 Graf závislosti hmotnostních ztrát u kompozitů (0, III a IV) na delším časovém období [56].

Z grafu (viz Obr. 4-5) je vidět, že počáteční rychlý růst smrštění (kompozitu IV) ovlivnil i jeho konečnou hodnotu smrštění, která je více než dvakrát vyšší než hodnoty zaznamenané u cementového kompozitu 0 (bez přidaného plastifikátoru, s vodním

součinitelem 0,5). Období nabývání kompozitů bez plastifikátoru sice není moc významné, pokud jde o jeho velikosti, avšak počáteční expanze zpozdily začátek smrštění o více než 20 hodin, což může být velkým přínosem pro pozdější vývoj fyzikálních a mechanických vlastností těchto cementových kompozitů.

Z grafu (viz Obr. 4-7) je patrné, že celkový průběh objemových ztrát dobře koresponduje s obsahem vody použité ve směsích, kdy nejnižší hmotnostní ztráta byla zaznamenána pro kompozit s plastifikátorem [56].



Obr. 4-7 Graf závislosti poměrného přetvoření na hmotnostních úbytcích u kompozitů 0, III a IV v celém zkušební období [56].

4.3 Složení a číslování kompozitů

Pro tuto diplomovou práci bylo v laboratoři SZK Fakulty stavební VUT v Brně vytvořeno 10 různých druhů kompozitů s označením 0, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII a IX. Pro účely určení hodnot modulu pružnosti (v rámci této diplomové práce) byly stanoveny kompozity I, III, IV, V, VII, VIII a IX, ze kterých se vyrobila tělesa ve tvaru válečků a trámečků. Kompozit 0 plnil funkci tzv. pilotního kompozitu vyrobeného za účelem ověření proveditelnosti a vylepšení plánu výzkumu. Ze směsí II a VI se nakonec zhotovila pouze tělesa ve tvaru trámečků, která se využila výhradně pro ověření lomových parametrů. Údaje o receptuře, vodním součiniteli (byl volen podle potřeby experimentu pro každý kompozit zvlášť) a rychlosti míchání jednotlivých směsí jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 4-6).

Tab. 4-6 Složení jednotlivých kompozitů včetně hodnot jejich vodních součinitelů a informace o rychlosti míchání směsi.

označení kompozitu		0	I	II	III	IV
receptura	P:C:W	3:1:0,5	3:1:0,5	3:1:0,46	3:1:0,47	3:1:0,35
vodní součinitel	w/c	0,5	0,5	0,46	0,47	0,35
plastifikátor	% z hmotnosti cementu	-	-	-	-	1 %
rychlost míchání	otáčky/min	20	25	30	30	40
označení kompozitu		V	VI	VII	VIII	IX
receptura	P:C:W	PCC malta 1	3:1:0,35	PCC malta 2	AAS (3:1:0,42) ^a	AAS (3:1:0,42) ^a
vodní součinitel	w/c	-	0,35	-	0,42	0,42
plastifikátor	% z hmotnosti cementu	-	1 %	-	-	2 % ^b
rychlost míchání	otáčky/min	ruční míchadlo	40	ruční míchadlo	30	30

^a Místo cementu (C) byla použita vysokopecní struska (S).

^b Místo plastifikátoru byla použita protismršťovací přísada,

Pozn.: U kompozitu VIII a IX byla dávka vodního skla navržena tak, aby složka Na₂O odpovídala 10 % hmotnosti strusky.

4.3.1 Složení kompozitů

Kompozity 0, I, II, III, IV a VI byly vyrobeny jako cementové malty s různým poměrem písku (P), cementu (C) a vody (W). Složky kompozitu odpovídaly normě ČSN EN 196-1 [37] pro zkoušení cementu, kdy byly zvoleny tyto suroviny:

- cement CEM I 42,5 R dovezený z cementárny Mokrá,
- normalizovaný křemenný písek CEN, frakce 0–2 mm, dodán v polyethylenových obalech (pro udržení svých kvalitativních parametrů),
- destilovaná voda.

Pozn.: Všechny plniva, pojiva, voda i přísady (figurující navíc v kompozitu IV a VI) byly nadávkovány hmotnostně dle vypočtených receptur.

Kompozit V (PCC (polymercementová) malta 1) byl vyroben z průmyslově vyráběné dvousložkové směsi, kde bílá tekutá složka byla vodná disperze kopolymerů a šedá prášková složka byla směs portlandských cementů a minerálních plniv.

Kompozit VII (PCC (polymercementová) malta 2) byl vyroben opět z průmyslově vyráběné dvousložkové směsi, kde složkou A byla polymerová disperze a suchou složku B tvořil jemné křemité písek, portlandský cement, antikorozi aditiva, mikroarmovací vlákna a další speciální dodatky, které již výrobce neuvádí.

Kompozity VIII a IX (AAS (alkalicky aktivované betony)) byly vyrobeny jako malty s různým poměrem písku (P), vysokopecní strusky (S) a vody (W) s použitím těchto surovin:

- granulovaná vysokopecní struska,
- vodní sklo ($\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{voda}$),
- normalizovaný křemenný písek CEN, frakce 0–2 mm, dodán v polyethylenových obalech (pro udržení svých kvalitativních parametrů),
- destilovaná voda,
- protismršťovací přísada.

Pozn.: Všechny tyto plniva, pojiva, voda i přísady byly nadávkovány hmotnostně dle vypočtených receptur.

Všechny výše zmíněné suroviny pro výrobu kompozitů byly skladovány podle doporučení výrobce a použity v době jejich deklarované doby použitelnosti.

4.3.2 Příprava výrobních zařízení a způsob míchání

Před samotnou výrobou směsí 0, I, II, III, IV, VI, VIII a IX bylo potřeba připravit míchací zařízení s nuceným oběhem, které se před výrobou navlhčilo tak, aby nedocházelo ke snižování množství záměsové vody vlivem smáčení stěn míchacího zařízení. Následné míchání probíhalo v několika krocích tak, aby došlo k dokonalé homogenizaci všech složek vyráběných kompozitů. Nejprve se do míchacího zařízení dalo kamenivo, následovalo vsypání cementu a potom se míchalo po dobu 120 sekund tak, aby došlo k dokonalému promísení sypkých materiálů. Po uplynutí tohoto času bylo přilito do míchacího zařízení:

- **v případě kompozitů bez přísad** celé množství záměsové vody. Poslední fází tohoto procesu bylo míchání do doby, dokud se všechny složky řádně nespojily (viz Obr. 4-8).
- **v případě kompozitů s přísadami** pouze 2/3 záměsové vody (tak, aby na povrchu zrna kameniva vznikla solvatační obálka, která má funkci zajistit důkladné propojení všech složek směsi) a do zbylé třetiny záměsové vody byla nadávkována plastifikační (protismršťovací) přísada, se kterou se tato voda postupně vlila do míchacího zařízení k ostatním složkám kompozitu. V případě přidání plastifikační přísady se poté míchalo do doby stanovené v jejím technickém listě.



Obr. 4-8 (vlevo) Kompozit I a (vpravo) kompozit VIII.

Rozdílný průběh míchání měly kompozity V a VII.

V případě kompozitu V bylo míchání provedeno pomaloběžnou míchačkou s lopatkovým příslušenstvím tak, že se důkladně rozmíchala prášková a kapalná složka přímo v originálním kbelíku (viz Obr. 4-9) a nechala se chvíli ležet. Po cca 5 minutách se směs znovu promíchala, a tak vznikla malta na výrobu těles. Při tomto postupu bylo zpracováno celé dodané balení.



Obr. 4-9 *Výroba kompozitu V.*

Popis způsobu práce míchání směsi VII vypadal tak, že do 10l prázdného kyblíku se vsypalo celé balení suché složky B a potom se na ni vlilo celé balení disperze A. Míchalo se míchacím nástavcem na vrtačku s minimálními otáčkami až do dosažení homogenní plastické konzistence bez hrud. Konzistence malty nebyla dále upravována pomocí přidání vody.

4.3.3 Zhotovení a přehled zkušebních těles

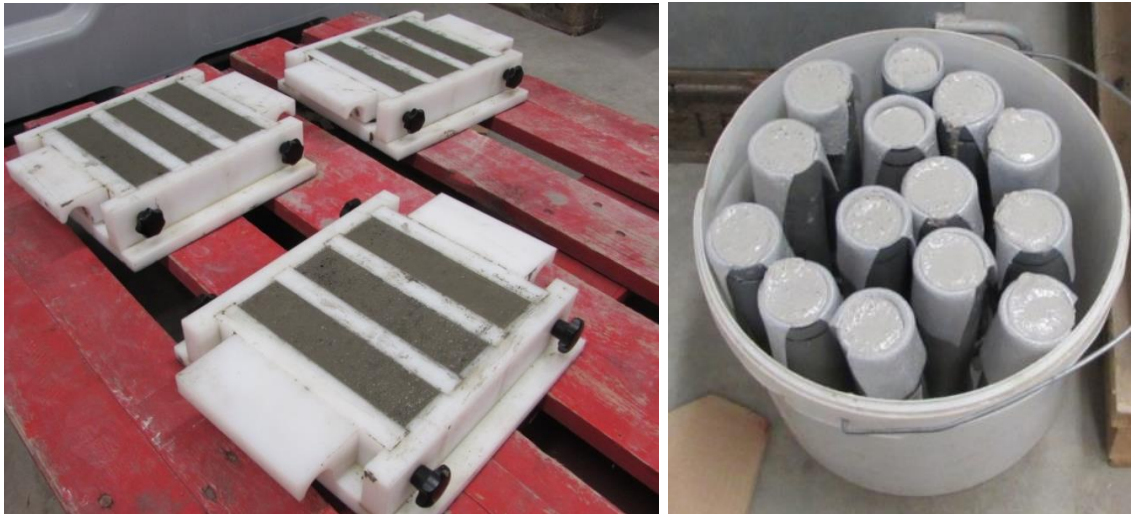
První tělesa (z kompozitního materiálu 0) byla vyrobena 4. 4. 2016, další tělesa byla vyrobena 18. 4. 2016 (I), 25. 4. 2016 (II), 2. 5. 2016 (III), 9. 5. 2016 (IV), 16. 5. 2016 (V), 30. 5. 2016 (VI), 20. 6. 2016 (VII), 9. 8. 2016 (VIII) a poslední tělesa (z kompozitního materiálu IX) byla vyrobena 22. 8. 2016.

Zkušební tělesa byla zhotovena ihned po přípravě malt, na nichž byly souběžně provedeny i zkoušky konzistence a objemové hmotnosti. Formy vymazané odbedňovacím přípravkem (nebo se separační fólií z mirelonu u válcových těles) byly (pomocí vhodné lžice) asi do poloviny rovnoměrně naplněny čerstvě vyrobenou směsí. Poté se tato první vrstva zhutnila na vibračním stolku a následně se do formy přidala druhá vrstva malty s mírným přebytkem směsi (viz Obr. 4-10), která se rozprostřela a opět stejným způsobem zhutnila. Následně se forma opatrně sejmula ze zhutňovacího stolku a pomocí stěrky se otřela přebytečná vrstva malty, povrch se uhladil a jednotlivé vzorky se označily za účelem následné identifikace.



Obr. 4-10 *Výroba těles (Kompozit VII).*

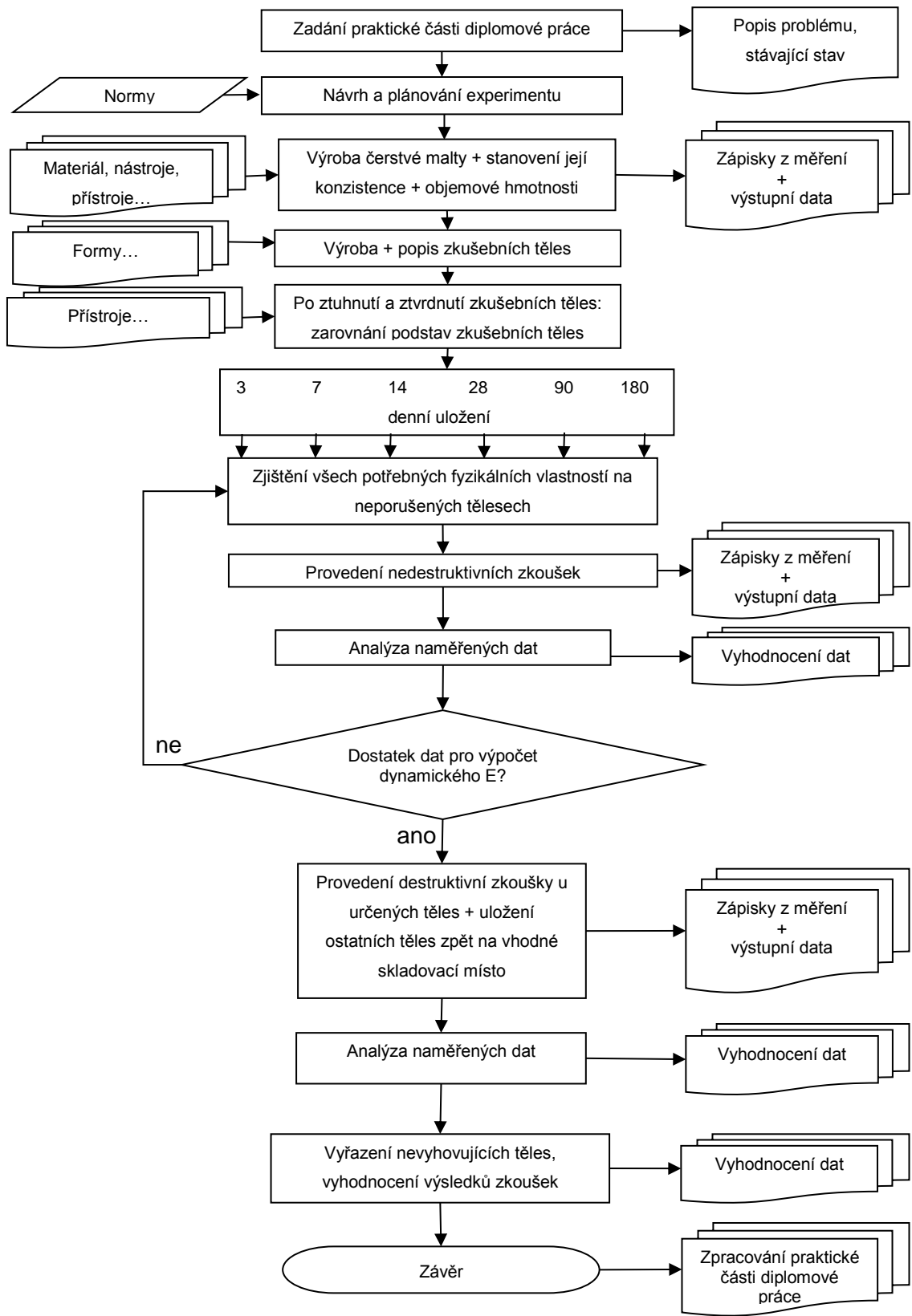
Vyrobená zkušební tělesa (viz Obr. 4-11) byla jak ve tvaru trámečků (o rozměrech 40 × 40 × 160 mm), tak ve tvaru válečků (s průměrem přibližně 42 mm a výškou přibližně 160 mm). Vyrobená zkušební tělesa byla uložena na dobu tří dnů na vhodné místo s 55% relativní vlhkostí okolního prostředí (pouze u kompozitu I byla po dobu prvních tří dnů relativní vlhkost okolního prostředí 75 %).



Obr. 4-11 Zkušební tělesa ve formách.

Zkušební tělesa byla po zatvrdnutí odformována, popsána, nafocena a rovnoměrně rozdělena do zkušebních sad. Zkušební válečky byly kotoučovým řezáním upraveny na požadovanou délku a korundovým práškem byl zarovnán jejich povrch u horní i dolní podstavy (z důvodu docílení korektních výsledků u zkoušek).

Zkušební tělesa tvaru trámečku byla zkoušena vždy ve stáří 3, 7, 14, 28, 90 a 180 dní po jejich výrobě, a to pouze nedestruktivně. Naopak zkušební tělesa tvaru válečku byla zkoušena nedestruktivně i destruktivně ve stáří 3 dny (jedna polovina všech zkušebních válečků) a 28 dní (druhá polovina zkušebních těles). Výsledky byly přehledně zapisovány do tabulky a na základě vyhodnocení a následného porovnání výsledků fyzikálně mechanických vlastností byla provedena diskuze. Grafické zobrazení celého postupu práce je znázorněno na obrázku (viz Obr. 4-12).



Obr. 4-12 Grafické zobrazení postupu experimentu.

4.4 Zkoušení

Laboratorní zkoušky byly prováděny nad rámec metodiky jedné ČSN. Pro zvolený experiment byly provedeny zkoušky popsané v následujících podkapitolách.

4.4.1 Zkoušky na čerstvé směsi

- Stanovení konzistence dle normy ČSN EN 1015-3 [57]
- Stanovení objemové hmotnosti dle normy ČSN EN 1015-6 [58]

Ihned po výrobě čerstvých maltových směsí byly stanoveny jejich konzistence. Dle normy ČSN EN 1015-3 [57] byla zvolena metoda, která využívá střešací stolek, komolý kovový kužel vysoký 60 mm s vnitřním průměrem 100/70 mm s nástavcem a dusadlo o průměru 40 mm.

Před každou zkouškou se deska a vnitřní povrch (včetně okraje kovového kužele) očistili vlhkou tkaninou. Potom se do středu desky střešacího stolku umístil kovový kužel a naplnil se maltou ve dvou vrstvách, přičemž obě vrstvy se zhutnily 10 lehkými údery dusadla tak, aby bylo naplnění kužele rovnoměrné. Přebytková malta se následně (po odstranění nástavce) seřízla a potom se pomocí špachtle setřela. Otřela se i volná plocha desky do čista a sucha. Asi po 15 s následovalo opatrné zvednutí kužele kolmo vzhůru a malta se ihned na desce stolku rozlila 15 nárazy rovnoměrnými zdvihy stolku s frekvencí jeden zdvih za sekundu (viz Obr. 4-13). Průměr koláče malty byl poté změřen ve dvou na sebe kolmých směrech pomocí měřidla s přesností na 1 mm a výsledné hodnoty byly zprůměrované a zaznamenané do tabulky (Tab. 4-7). Výsledky měření se nelišily o více než 10 %.



Obr. 4-13 Zkouška stanovení konzistence (střásací stolek).

Tab. 4-7 Výsledky ze zkoušení konzistence čerstvé malty.

označení kompozitu	0	I	II	III	IV
rozlití [mm]	140	150	115	127,5	135
označení kompozitu	V	VI	VII	VIII	IX
rozlití [mm]	150 (160)	120	-	180	160

Po této zkoušce se stanovila i objemová hmotnost čerstvé malty podle normy ČSN EN 1015-6 [58]. Postup pro stanovení objemové hmotnosti malt závisel na jejich konzistenci, kdy malty s hodnotou rozlití < 140 mm byly hutněny vibrační metodou a malty, jejichž rozlití bylo mezi 140 mm a 200 mm včetně, se hutnily rázovou metodou. Řídké malty nebylo třeba hutnit. Objemová hmotnost byla určena jako poměr hmotnosti a objemu, který zaujímá, je-li vnesena (či vnesena a zhutněna daným způsobem) do měřicí nádoby určitého objemu. Výsledky byly zaznamenány do tabulky (Tab. 4-8).

Tab. 4-8 Výsledky ze zkoušení objemové hmotnosti čerstvé malty.

označení kompozitu	0	I	II	III	IV
objemová hmotnost [kg/m ³]	2200	2190	2240	2210	2280
označení kompozitu	V	VI	VII	VIII	IX
objemová hmotnost [kg/m ³]	1830	2250	1850	2310	2300

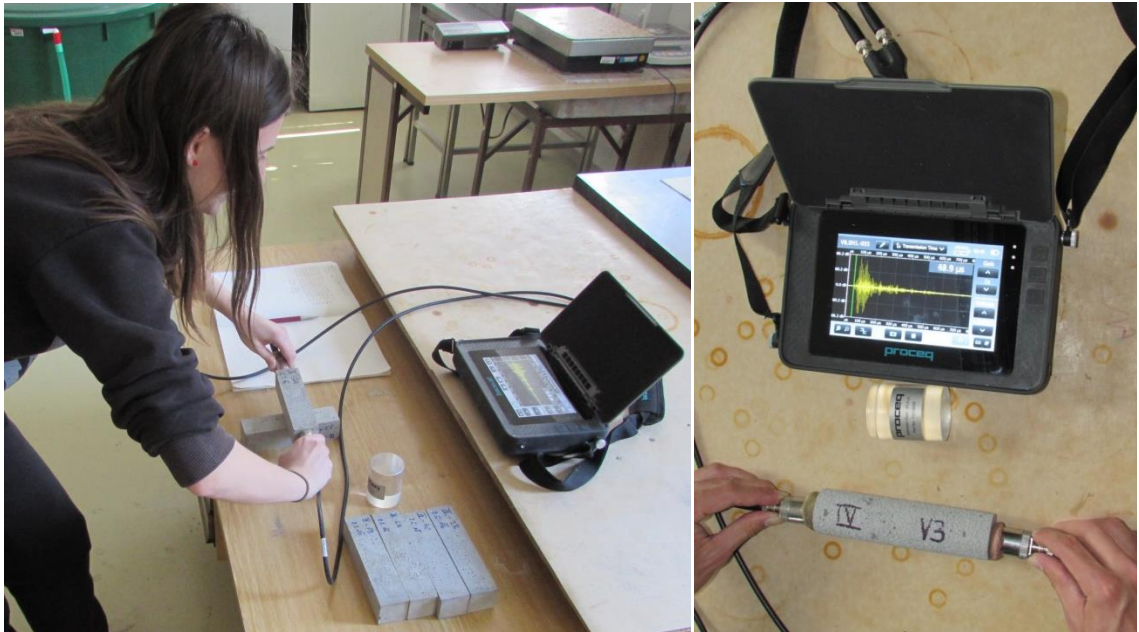
4.4.2 Zkoušky na ztvrdlém kompozitu

- Stanovení objemové hmotnosti, jejíž hodnota je důležitá pro výpočet dynamického modulu pružnosti,
- ultrazvuková impulzová metoda - stanovení dynamického modulu pružnosti zkušebních těles bylo provedeno podle norem ČSN 73 1371 [27] a ČSN EN 12504-4 [28],
- rezonanční metoda - stanovení dynamického modulu pružnosti zkušebních těles bylo provedeno před statickou zkouškou dle normy pro beton ČSN 73 1372 [31],
- pevnost v tlaku, jež je důležitá pro správné stanovení statického modulu pružnosti,
- statická zkouška - stanovení statického modulu pružnosti zatěžovací zkouškou bylo provedeno dle normy ČSN ISO 1920-10 [18].

Stanovení dynamického modulu pružnosti zkušebních těles proběhlo před statickou zkouškou.

Ultrazvuková impulzová metoda

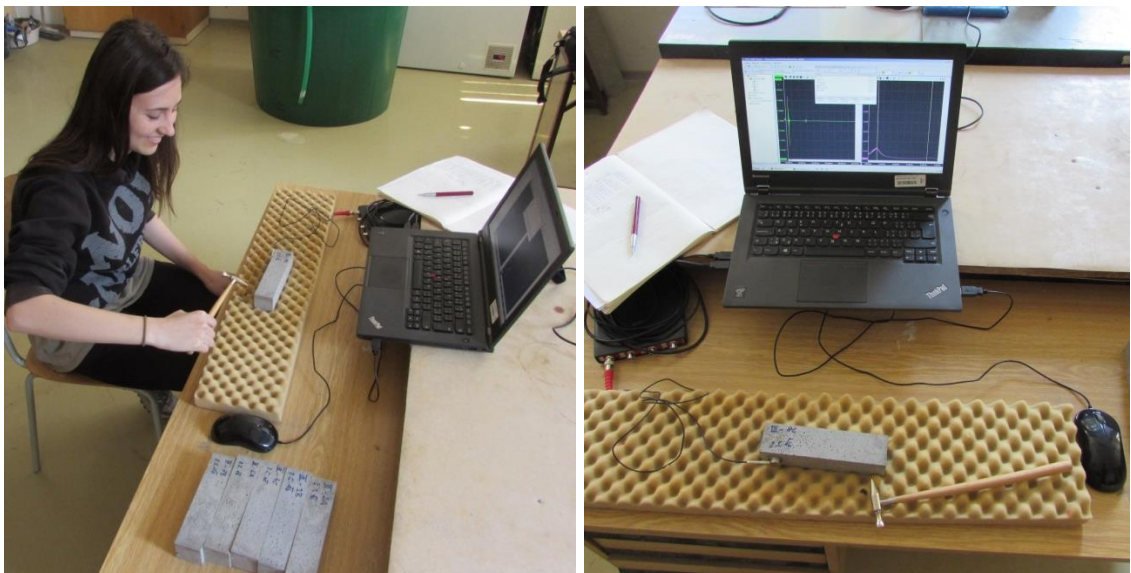
Pro stanovení dynamického modulu pružnosti kompozitů pomocí ultrazvukové impulzové metody byl využit ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200 od firmy Proceq (viz Obr. 4-14), dvě sondy s frekvencí 150 kHz a vazebný akustický prostředek ve formě plastelíny, který se připevnil k sondám. Před testováním každého zkušební tělesa se pomocí etanolu (s charakteristikou 25,4 μ s) provedla kalibrace přístroje a mrtvý čas t_0 byl nulový. Všechna zkušební tělesa byla prozvučena přímo a výsledné hodnoty byly zapsány do tabulky. Měření se provádělo třikrát u každého kompozitu.



Obr. 4-14 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou zkouškou.

Rezonanční metoda

Pro měření tohoto dynamického modulu pružnosti byl použit Fourierův analyzátor, handyscope, impulzní kladívko, snímač zrychlení, akustický vazebný prostředek (plastelína) a pružná molitanová podložka (viz. Obr. 4-15).



Obr. 4-15 Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou.

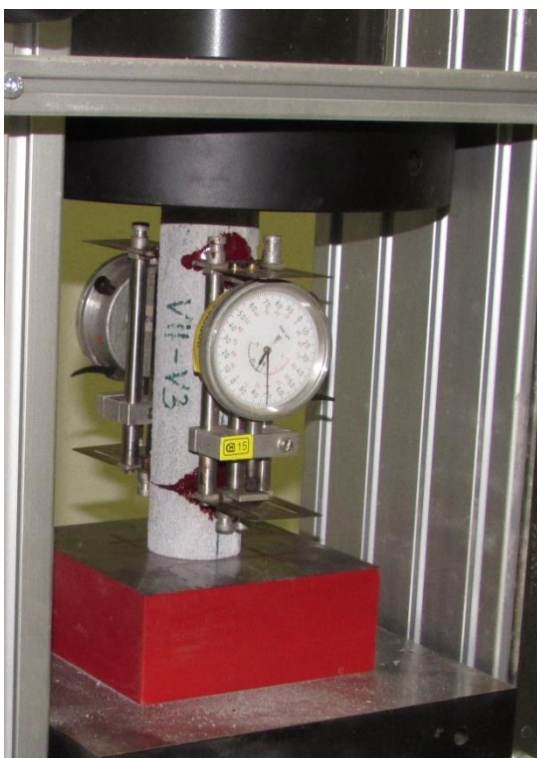
V této metodě se zkušební těleso umístilo na podložku a byly postupně zjišťovány jednotlivé vlastní frekvence tělesa (podélného, příčného a krouťového

kmitání) tak, že se na povrch zkušební vzorku do polohy pro zjišťování dané vlastní frekvence přilepil snímač a v dalším přesně určeném místě se do tělesa vnesl pomocí impulzního kladívka mechanický impulz. Zjišťovaná frekvence se odečetla z monitoru počítače s přesností 1 Hz.

Statická zkouška

Než se uskutečnilo stanovení modulu pružnosti zatěžovací zkouškou, bylo provedeno určení pevnosti v tlaku na srovnávacích tělesech. Na základě jejich pevnosti v tlaku a z výsledků nedestruktivních UZ zkoušek (provedených na všech tělesech) se určily zatěžovací meze pro zkoušku statického MP. Zkušební vzorky byly osazeny Hollanovými můstky délky 100 mm a vloženy do lisu s názvem FORM+TEST 200 kN. Bylo nutné provést centraci každého tělesa a po zkoušce MP se tyto kompozity zatěžovaly až do úplného rozdrčení. Lis následně vyhodnotil maximální sílu F_{max} .

Na fotografiích je zobrazeno osazení tělesa v lisu (viz Obr. 4-16) a vzorek po provedené zkoušce (viz Obr. 4-17).



Obr. 4-16 Zkušební těleso uložené v lisu s osazenými měřicími přístroji.



Obr. 4-17 Zkušební těleso po statické zkoušce.

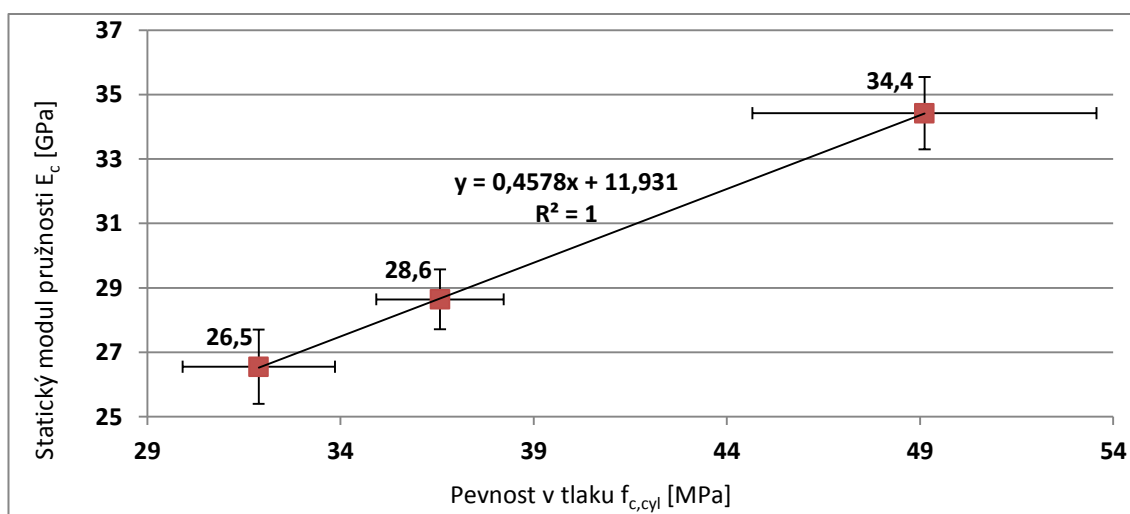
4.5 Výsledky

U většiny betonů obecně platí, že čím vyšších pevností dosahují, tím vyšších modulů pružnosti u nich bývá i naměřeno. Závislost těchto charakteristik betonu je ovšem jen relativní, o čemž je podrobně pojednáno v nejedné odborné literatuře [6], [15]. Na základě znalosti pevnosti v tlaku je tedy možné modul pružnosti u betonů (a jim podobných kompozitů) pouze odhadnout, o čemž svědčí následující grafy (viz Graf 4-5, Graf 4-6), ze kterých je patrné, že vyšší pevnosti v tlaku zákonitě neznamenají vyšší dosažené hodnoty modulu pružnosti.

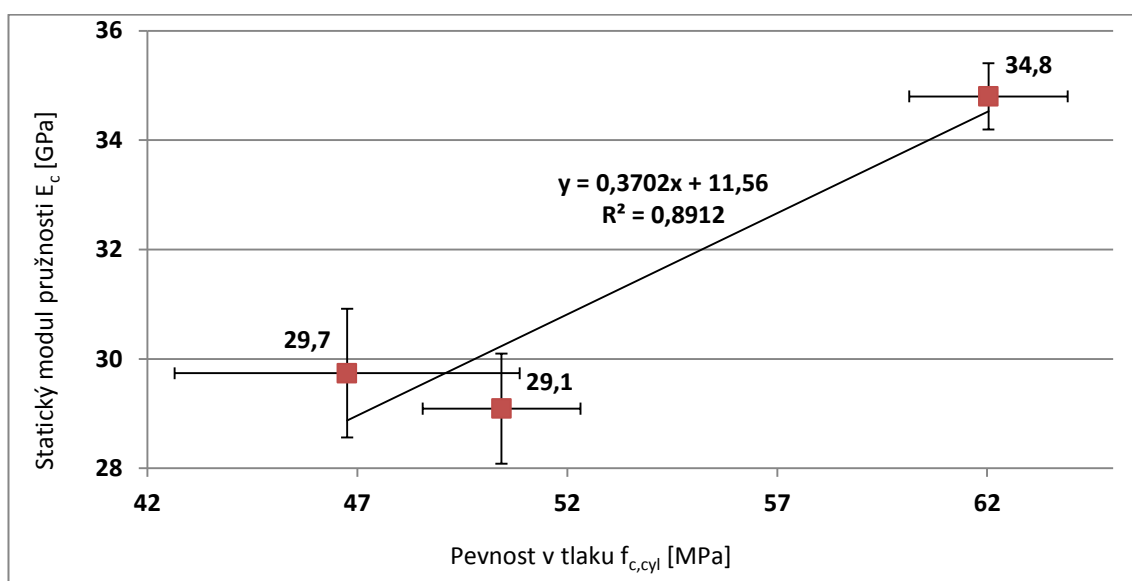
V následující tabulce (viz Tab. 4-9) jsou uvedeny průměrné hodnoty statických modulů pružnosti a pevností v tlaku zkušebních těles cementových malt, které byly ve zkušebním lisu zatěžovány až do porušení prvku. Graf (viz Graf 4-5) znázorňuje závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku těchto kompozitů ve stáří 3 dny, která je pro názornost proložena lineární přímkou. Další graf (viz Graf 4-6) znázorňuje stejnou závislost (stejných druhů kompozitu) po 28 dnech jejich zrání.

Tab. 4-9 Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti a pevností v tlaku.

Stáří kompozitu	Charakteristiky materiálu	Označení kompozitu		
		I	III	IV
3 dny	Pevnost v tlaku $f_{c,cyl}$ [MPa]	35,9	31,6	48,6
	Modul pružnosti E_c [GPa]	28,6	26,5	34,4
28 dní	Pevnost v tlaku $f_{c,cyl}$ [MPa]	50,2	46,8	61,5
	Modul pružnosti E_c [GPa]	29,1	29,7	34,8



Graf 4-5 Graf „závislosti“ statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, III a IV ve stáří 3 dny), chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

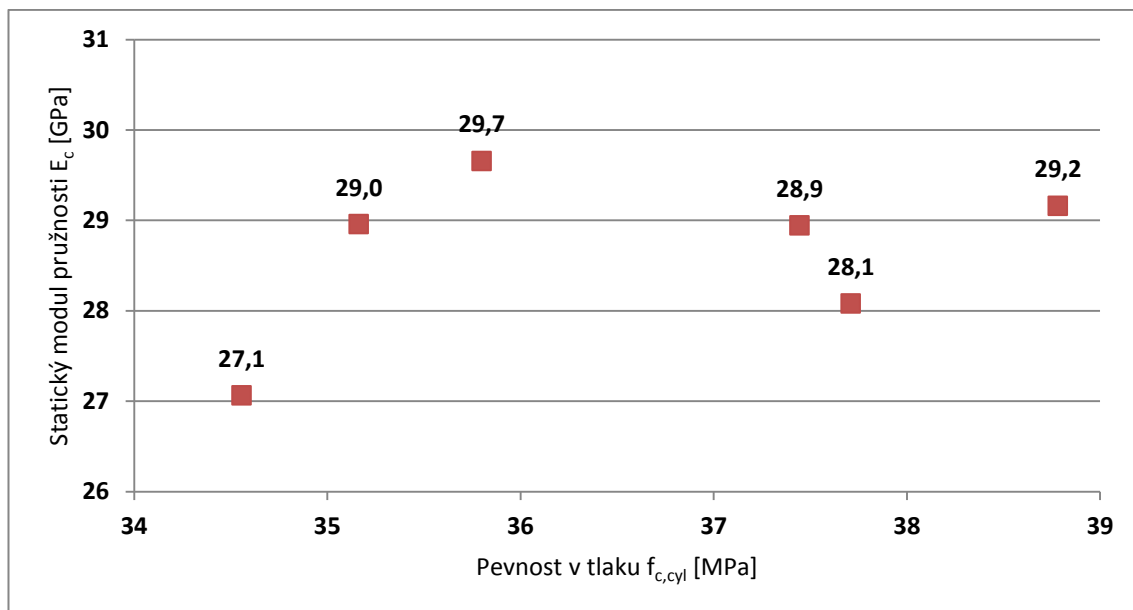


Graf 4-6 Graf „závislosti“ statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, III a IV ve stáří 28 dní), chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

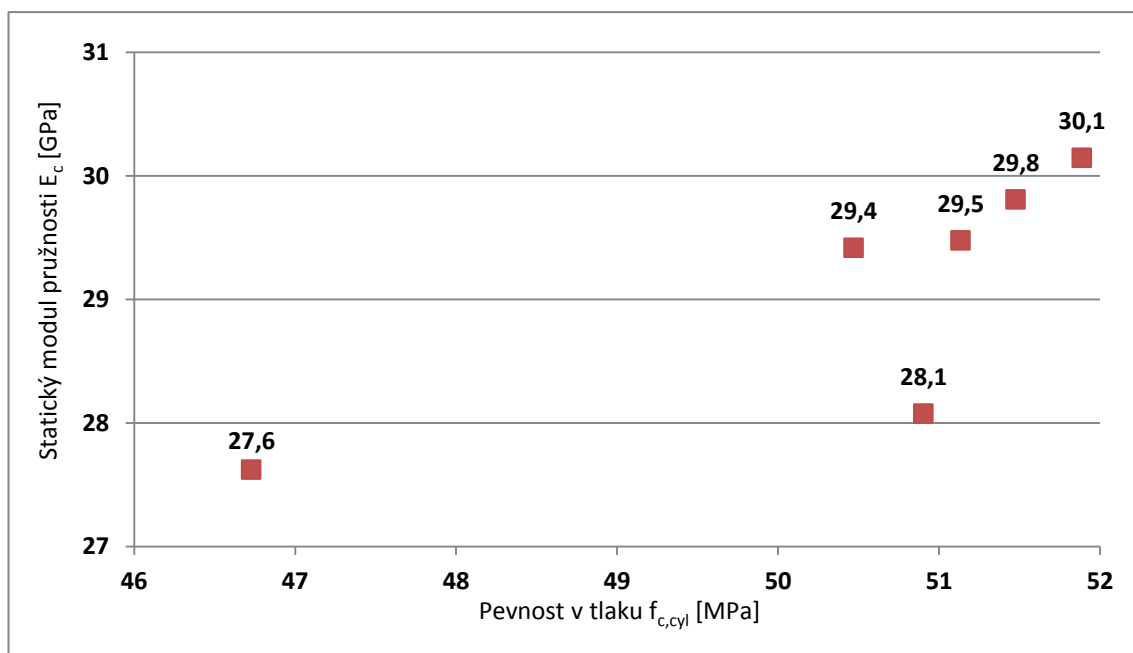
V následující tabulce (Tab. 4-10) jsou pro ukázkou zobrazeny hodnoty ze zkoušek statických modulů pružnosti a pevností v tlaku pouze u kompozitu I, kde jsou podrobně zaznamenány hodnoty všech zkoušených zkušebních těles této cementové malty a pro přehlednost jsou tyto hodnoty vyneseny i v grafech (Graf 4-7 a 4-8).

Tab. 4-10 Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti a pevností v tlaku.

Kompozit I						
Stáří 3 dny						
Označení kompozitu	I - V2	I - V3	I - V4	I - V5	I - V6	I - V7
Pevnost v tlaku $f_{c,cyl}$ [MPa]	35,8	37,7	38,8	34,6	35,2	37,4
Modul pružnosti E_c [GPa]	29,7	28,1	29,2	27,1	29,0	28,9
Stáří 28 dní						
Označení kompozitu	I - V9	I - V10	I - V11	I - V12	I - V13	I - V14
Pevnost v tlaku $f_{c,cyl}$ [MPa]	51,1	46,7	51,9	50,5	50,9	51,5
Modul pružnosti E_c [GPa]	29,5	27,6	30,1	29,4	28,1	29,8



Graf 4-7 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, stáří 3 dny).

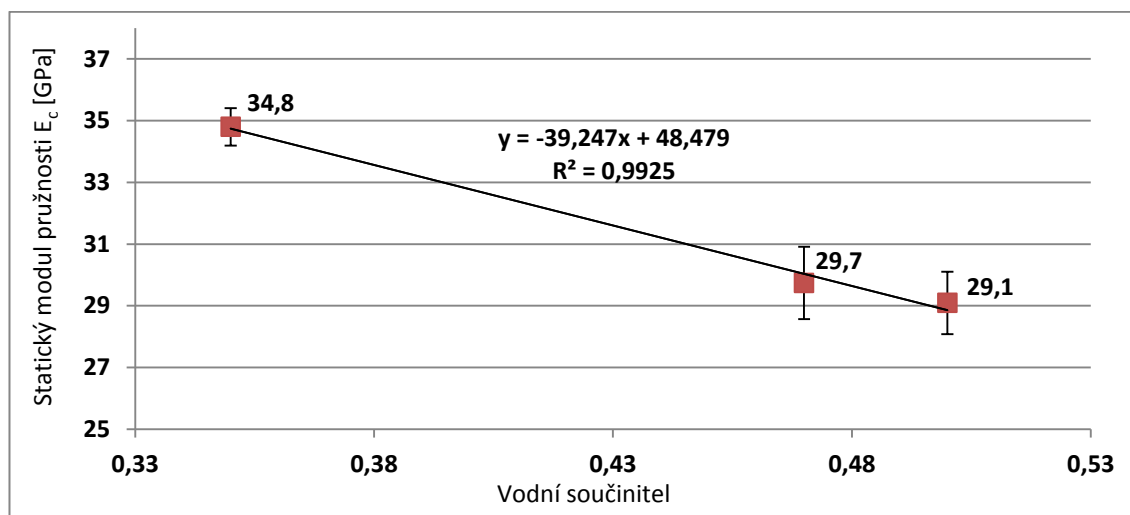


Graf 4-8 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, stáří 28 dní).

V tabulce (viz Tab. 4-11) jsou opět uvedeny výsledky z měření statického modulu pružnosti různých druhů cementových malt. Místo hodnot pevností v tlaku zde figurují hodnoty vodního součinitele. V grafu (viz Graf 4-9) je potom znázorněna závislost modulu pružnosti na vodním součiniteli, kde je vidět, že s větším vodním součinitelem klesá hodnota modulu pružnosti.

Tab. 4-11 Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti.

	Stáří kompozitu	Označení kompozitu		
		I	III	IV
Vodní součinitel		0,5	0,47	0,35
Průměrná hodnota modulu pružnosti E_c [GPa]	3 dny	28,6	26,5	34,4
	28 dní	29,1	29,7	34,8



Graf 4-9 Graf statického MP v tlaku v závislosti na vodním součiniteli u cementových malt po 28 dnech jejich zrání; chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

Další uvedené výsledky se týkají porovnání všech zkoušených kompozitů ve tvaru válečku.

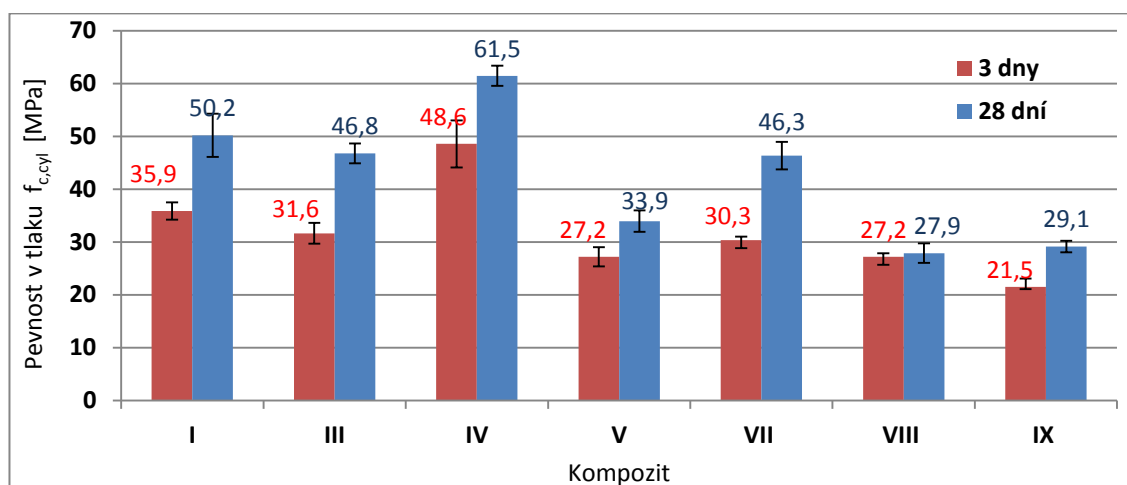
Tab. 4-12 Výsledky ze zkoušek u těles ve tvaru válečku.

		Kompozit						
		I	III	IV	V	VII	VIII	IX
3. den								
Modul pružnosti	E_{cu} [MPa]	32 300	31300	39200	19500	20600	25400	25000
	E_{crL} [MPa]	32 300	31800	40100	18100	19400	18500	17600
	E_{crf} [MPa]	31 700	31700	40600	18500	20100	15700	14800
	G_{cr} [MPa]	14 200	13800	17400	8010	8740	6310	6140
	E_c [MPa]	28 600	26500	34400	13400	14500	10900	9100
Pevnost v tlaku	$f_{c,cyl}$ [MPa]	35,9	31,6	48,6	27,2	30,3	27,2	21,5
28. den								
Modul pružnosti	E_{cu} [MPa]	31700	32500	38500	18700	21000	22400	20400
	E_{crL} [MPa]	32800	33400	39600	17500	20400	22600	21200
	E_{crf} [MPa]	32500	34000	40500	17900	21100	21800	19300
	G_{cr} [MPa]	14400	14700	14900	7950	9140	10300	9340
	E_c [MPa]	29100	29700	34800	13700	18100	14600	13200
Pevnost v tlaku	$f_{c,cyl}$ [MPa]	50,2	46,8	61,5	33,9	46,3	27,9	29,1

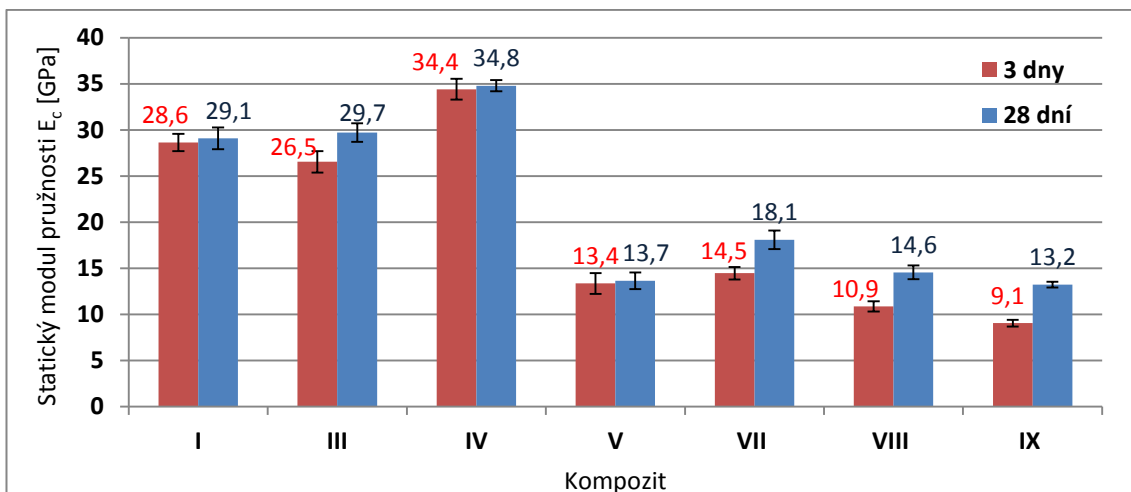
Tabulka (Tab. 4-12) uvádí průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti, statického modulu pružnosti (E_c) a pevnosti v tlaku na válečcích ($f_{c,cyl}$). Dynamický modul pružnosti je zde zaznamenán z ultrazvukové metody (E_{ou}) a z rezonanční metody. Z rezonanční metody jsou hodnoty stanoveny z rezonančních frekvencí podélného (E_{crL}), příčného (E_{crf}) a kroutivého (modul pružnosti ve smyku G_{cr}) kmitání.

Na grafech (Graf 4-10 a Graf 4-11) vynesenech z těchto hodnot je možné vidět, že všechny kompozity dosahují vyšších průměrných hodnot pevnosti v tlaku při zkoušení ve 28 dnech jejich stáří než ve 3 dnech jejich zrání. Stejně tak vychází i jejich průměrné hodnoty statických modulů pružnosti.

Nejvyšší pevnost v tlaku po 28 dnech (61,5 MPa) a nejvyšší hodnotu statického MP (34,8 GPa) má kompozit IV, naopak nejnižší pevnost v tlaku po 28 dnech (27,9 MPa) má kompozit VIII a nejmenší modul pružnosti (13,2 GPa) má kompozit IX. Z tohoto porovnání je zřejmé, že vyšších hodnot pevnosti v tlaku i modulu pružnosti dosahují cementové malty, zatímco cementové zálivky a alkalicko aktivované betony dosahují hodnot nižších. Z cementových malt dosahuje nejvyšší průměrné pevnosti v tlaku i nejvyšší průměrné hodnoty statického modulu pružnosti kompozit IV, který měl díky plastifikátoru nejnižší vodní součinitel.



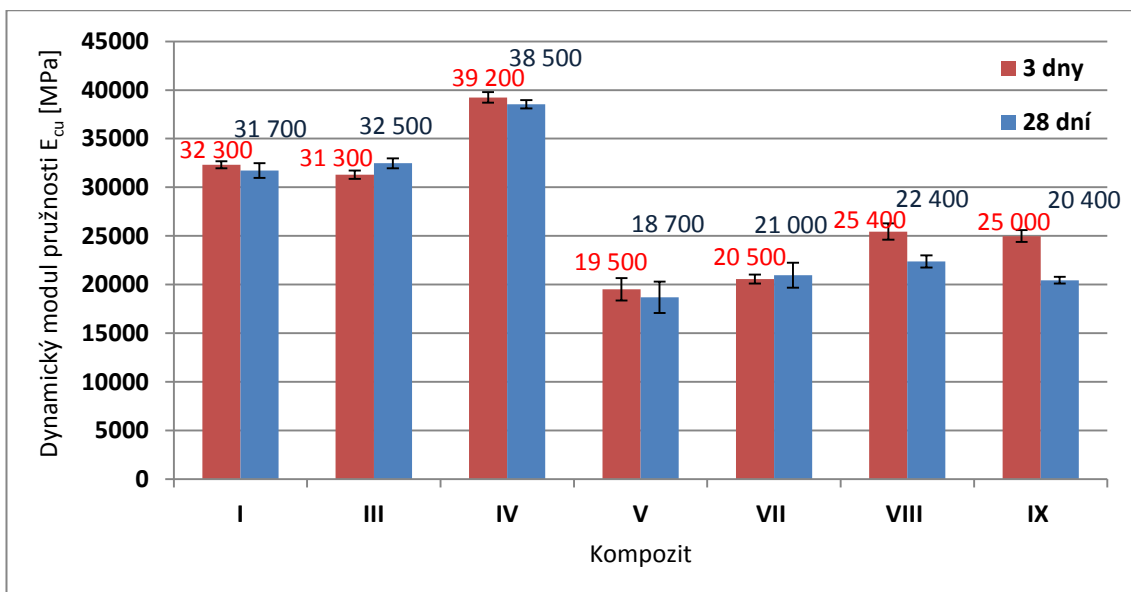
Graf 4-10 Graf zobrazující pevnost v tlaku jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.



Graf 4-11 Graf zobrazující statický MP v tlaku jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchytky.

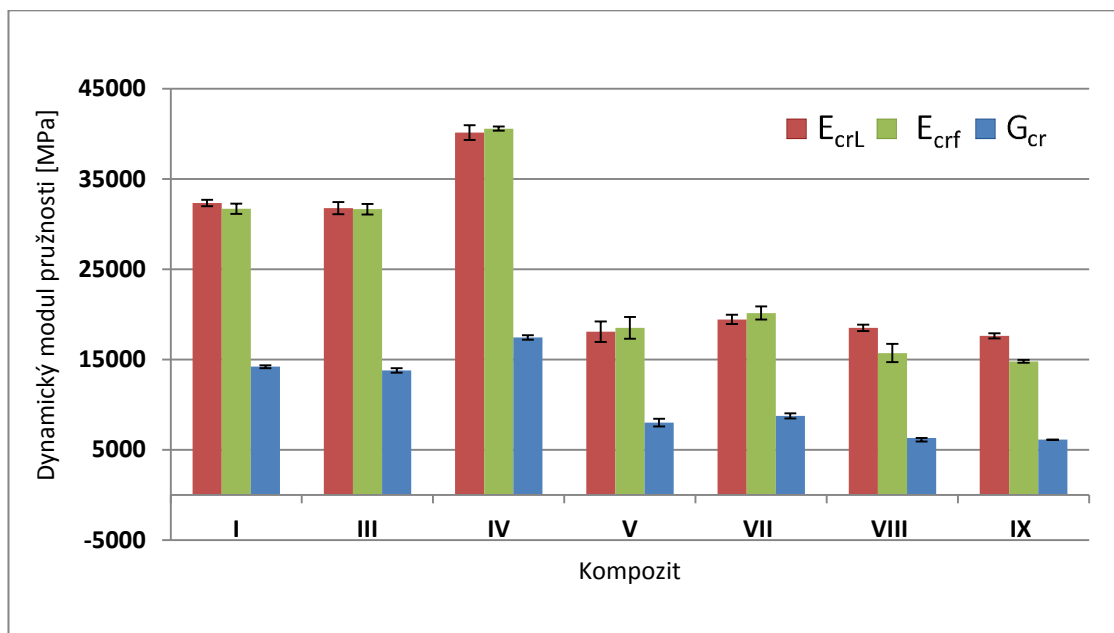
Následující Graf 4-12 porovnává dynamické moduly pružnosti z UZ zkoušky. Zde (s porovnáním se statickými MP) nejsou 28 denní moduly u všech kompozitů vyšší než 3 denní.

Je patrné, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti po 28 dnech (38,5 GPa) dosahuje kompozit IV a celkově (co se týče vyšších hodnot modulu pružnosti) jsou na tom kompozity z cementových malt opět výrazně lépe. Menší dynamické moduly je možné zaznamenat u alkalicko aktivovaných systémů a nejmenší u cementových zálievek.

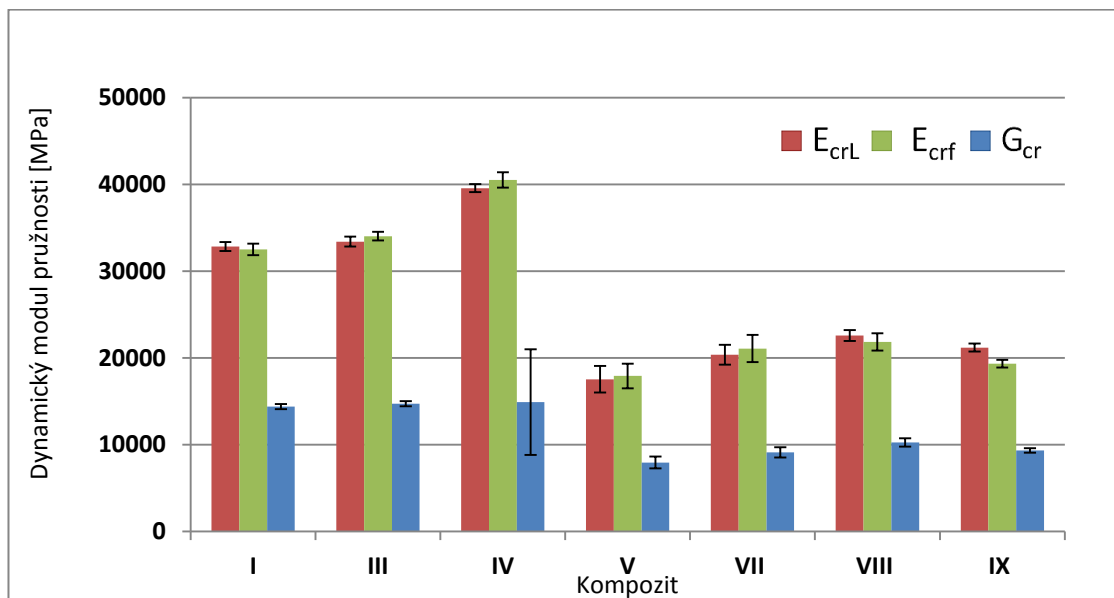


Graf 4-12 Porovnání dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchytky.

Graf 4-13 a Graf 4-14 zobrazuje výsledky vycházející z rezonančního měření. Nejvyšších průměrných hodnot modulů pružnosti znovu dosahují cementové malty (nejvyšší z nich má kompozit IV), nižší hodnoty mají potom cementové zálivky a AAS, které dosahují přibližně stejných hodnot.



Graf 4-13 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku ve stáří 3 dny, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.



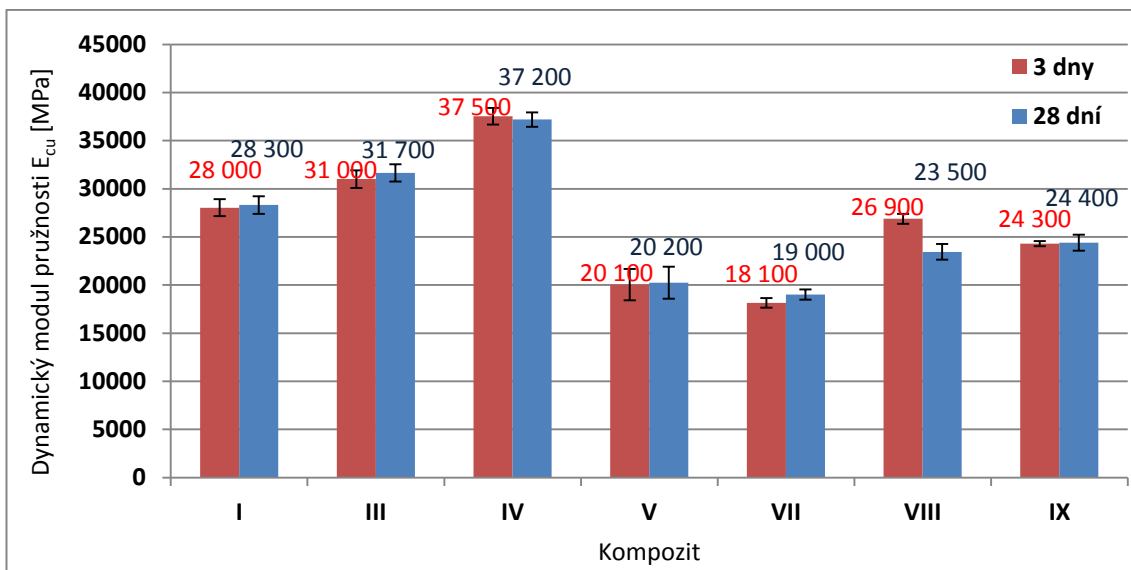
Graf 4-14 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku ve stáří 28 dní, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

Další tabulka (Tab. 4-13) zobrazuje zaznamenané výsledky ze zkoušek modulů pružnosti pro tělesa ve tvaru trámečku. Jsou v ní uvedeny pouze zkoušky dynamické, neboť tato tělesa byla podle plánu experimentu určena pro zkoušky statické až ve stáří 2 roky a do té doby sloužila zejména pro účely stanovení závislosti dynamického modulu pružnosti na stáří materiálu.

Tab. 4-13 Výsledky ze zkoušek u těles ve tvaru trámečku.

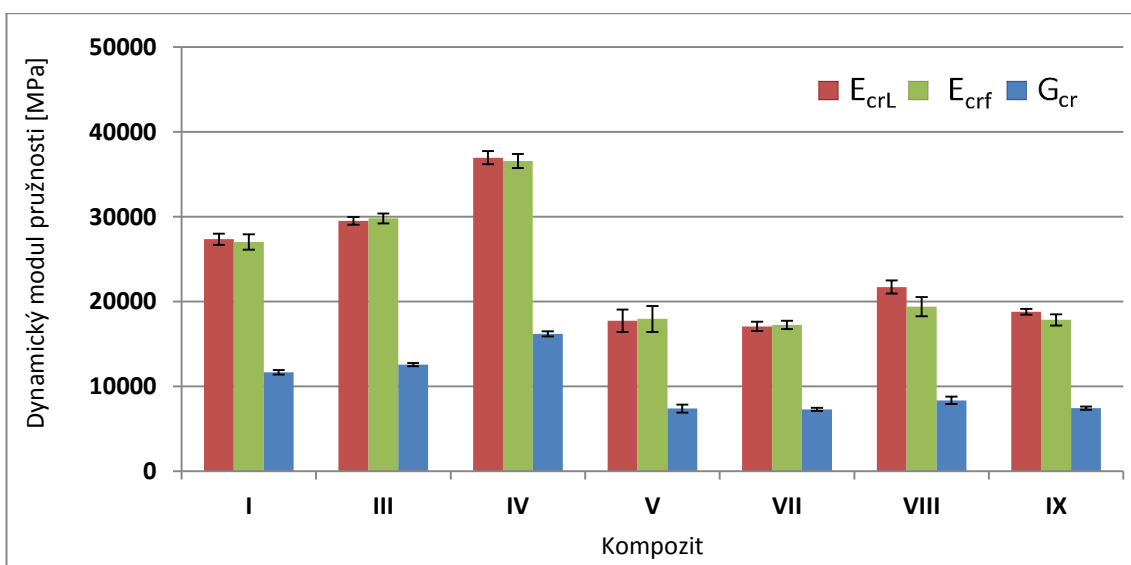
		Kompozit						
		I	III	IV	V	VII	VIII	IX
3. den								
Modul pružnosti	E_{cu} [MPa]	28000	31000	37500	20000	18100	26900	24300
	E_{crL} [MPa]	27300	29500	37000	17700	17100	21700	18800
	E_{crf} [MPa]	2700	29800	36600	17900	17200	19400	17800
	G_{cr} [MPa]	11600	12600	16200	7370	7280	8340	7420
28. den								
Modul pružnosti	E_{cu} [MPa]	28300	31600	37200	20200	19000	23500	24400
	E_{crL} [MPa]	27700	30700	37500	18000	18800	24000	23000
	E_{crf} [MPa]	27900	31100	37900	18400	18500	22800	21300
	G_{cr} [MPa]	12000	13200	16700	7680	8230	11000	10300

Z pohledu na Graf 4-15 je zřetelné, že výsledky získané na trámečcích potvrzují výsledky získané na válečcích, tedy že cementové malty mají daleko vyšší hodnoty modulu pružnosti (vycházející z UZ metody stanovení modulu pružnosti) než cementové zálivky a alkalicko aktivované systémy.

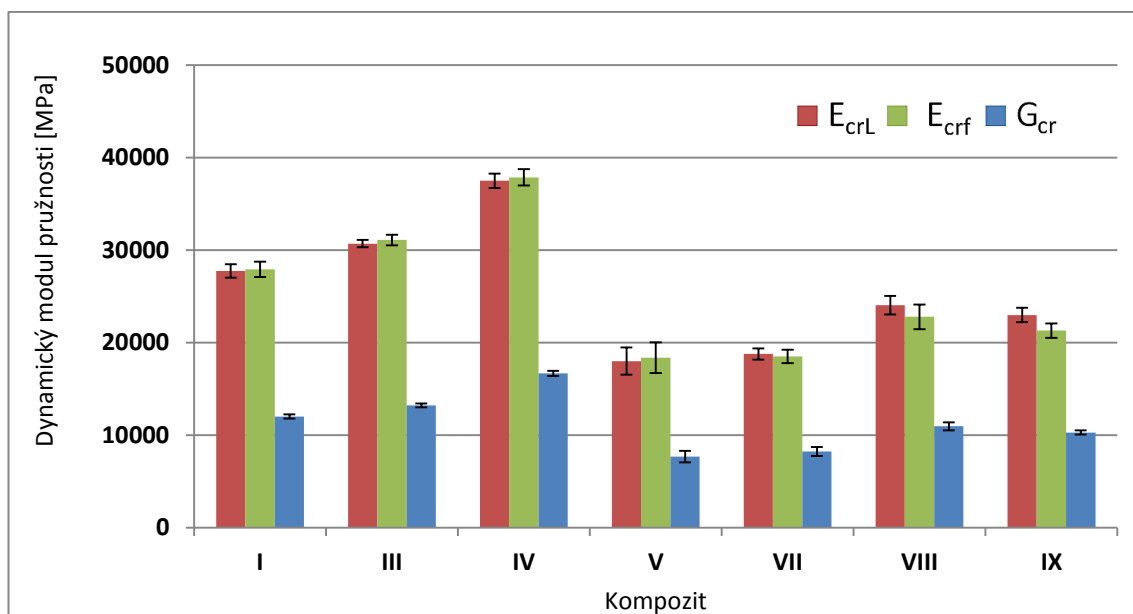


Graf 4-15 Porovnání dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

Moduly pružnosti vycházející z rezonanční metody měření (viz Graf 4-16 a Graf 4-17) se shodují s celkovým velikostním porovnáním kompozitů, které bylo provedeno u UZ metody v případě těles tvaru trámečku.



Graf 4-16 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku ve stáří 3 dny, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.



Graf 4-17 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku ve stáří 28 dní, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.

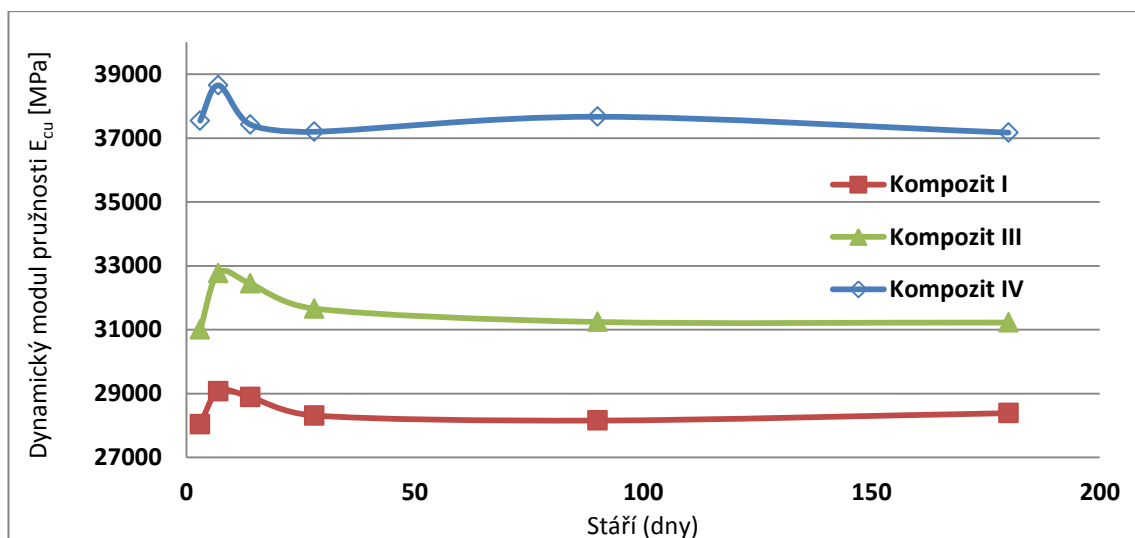
Následující grafy (Graf 4-18 až Graf 4-20) vychází z Tab. 4-14 a zobrazují velikost dynamického modulu pružnosti ve stáří 3, 7, 14, 28, 90 a 180 dní. Kompozity VIII a IX nebyly ve stáří 180 dnů změřeny, neboť stáří 180 dní dosáhnou až v únoru 2017, tedy po odevzdání této diplomové práce, a proto jejich hodnoty chybí. Grafy jsou rozděleny zvlášť pro cementové malty (kompozit I, III a IV), cementové zálivky (kompozit V a VII) a ASS (kompozit VIII a IX).

Tab. 4-14 Výsledné hodnoty modulu pružnosti z ultrazvukové zkoušky (tělesa ve tvaru trámečku).

Charakteristiky materiálu	Stáří [dny]	Kompozit						
		I	III	IV	V	VII	VIII	IX
Modul pružnosti (UZ) E_{cu} [MPa]	3	28000	31000	37500	20100	18100	26900	24300
	7	29100	32800	38700	20100	19100	23800	25300
	14	28900	32400	37400	20400	19800	23200	25000
	28	28300	31700	37200	20200	19000	23500	24400
	90	28200	31200	37700	20000	18700	18100	17200
	180	28400	31200	37200	19600	18200	-	-

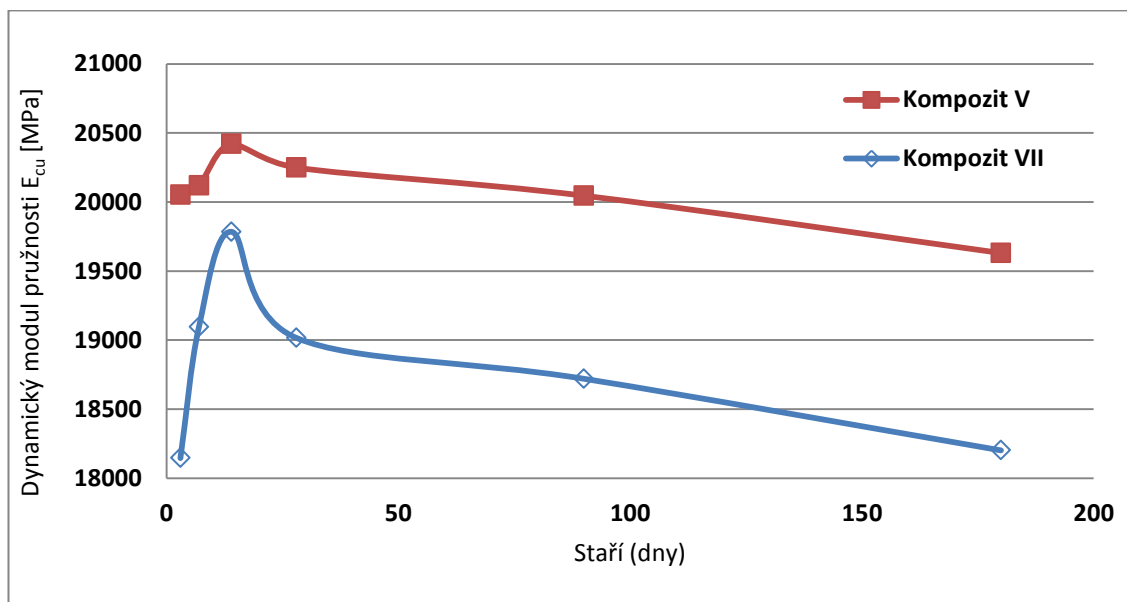
Z Graf 4-18 je patrné, že vývoj hodnot modulu pružnosti je u všech 3 kompozitů podobný. Nejnižší naměřenou hodnotu modulu pružnosti má kompozit I (28,0 GPa). Tato hodnota je naměřena ve stáří 3 dnů. Asi do 7 dne stáří tohoto materiálu nastává mírné zvýšení modulu pružnosti na hodnotu 29,1 GPa, který následně do 28 dne

uložení pozvolna klesá na hodnotu 28,3 GPa. Dále je vývoj modulu pružnosti více méně konstantní a velice blízký 3 denní hodnotě.



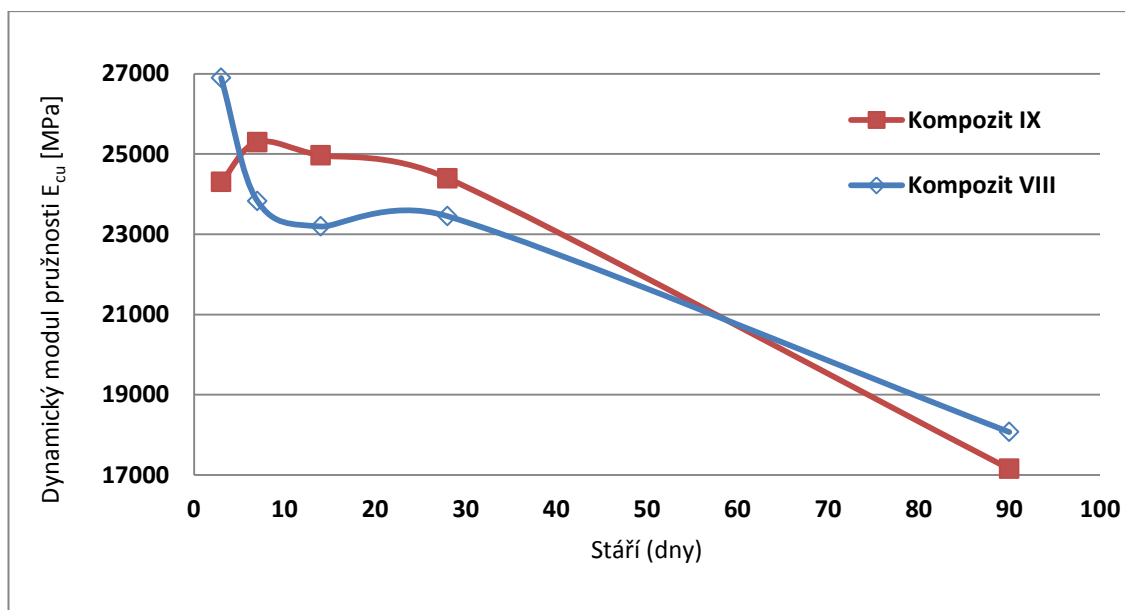
Graf 4-18 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů I, III a IV na stáří těles.

Trochu odlišný průběh mají kompozity V a VII (viz Graf 4-19), kdy nejvyšší hodnoty modulu pružnosti dosahují ve stáří 14 dní a potom je jejich tendence klesající. Hodnoty modulů pružnosti nejsou ve stáří 180 dní o moc odlišné od 3 denních hodnot.



Graf 4-19 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů V a VII na stáří těles.

Alkalicko aktivované betony mají nejstrmější klesající trend (viz Graf 4-20). Hodnoty modulů pružnosti se sníží do stáří 90 dní téměř o 10 GPa.



Graf 4-20 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů VIII a IX na stáří těles.

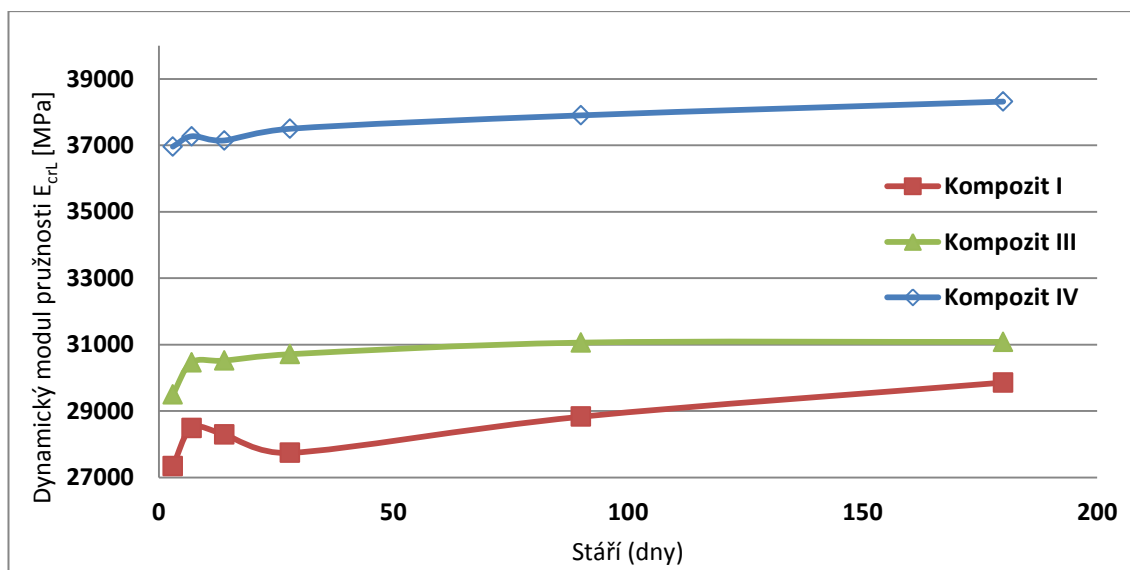
Poslední Tab. 4-15 zachycuje hodnoty modulů pružnosti zjištěné z podélné rezonanční frekvence) u všech kompozitů tvaru trámečku. Na základě této tabulky byly zhotoveny grafy (Graf 4-21, Graf 4-22 a Graf 4-23). Grafy vystihující moduly pružnosti zjištěné z rezonanční frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání jsou uvedeny v příloze této diplomové práce.

Tab. 4-15 Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti z rezonanční zkoušky (tělesa ve tvaru trámečku).

Charakteristiky materiálu	Stáří (dny)	Kompozit						
		I	III	IV	V	VII	VIII	IX
Modul pružnosti (z rezonanční frekvence podélného kmitání) E_{crL} [MPa]	3	27300	29500	37000	17700	17100	21700	18800
	7	28500	30500	37300	17900	18200	23200	21900
	14	28300	30500	37100	18000	18800	23200	22000
	28	27700	30700	37500	18000	18800	24000	23000
	90	28800	31100	37900	18200	18500	18000	16300
	180	29900	31100	38300	18400	18300	-	-

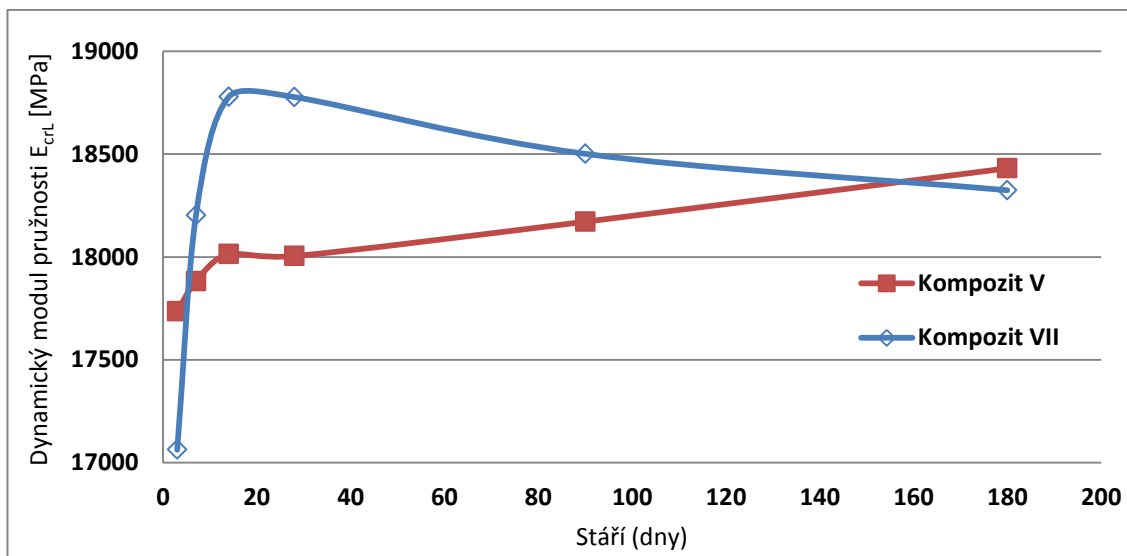
Graf 4-21 zobrazuje kompozit I, III a IV. Stejně jako UZ metoda, i rezonanční metoda ukazuje růst hodnoty modulu pružnosti do stáří 7 dní. Potom mají hodnoty klesající charakter. Někdy kolem 14 dne se však u kompozitu IV a III projevuje mírné

zvýšení modulu pružnosti (u kompozitu I k tomuto zvýšení dochází kolem 28 dne stáří) a dále jsou hodnoty mírně stoupající. U kompozitu III je hodnota téměř konstantní.



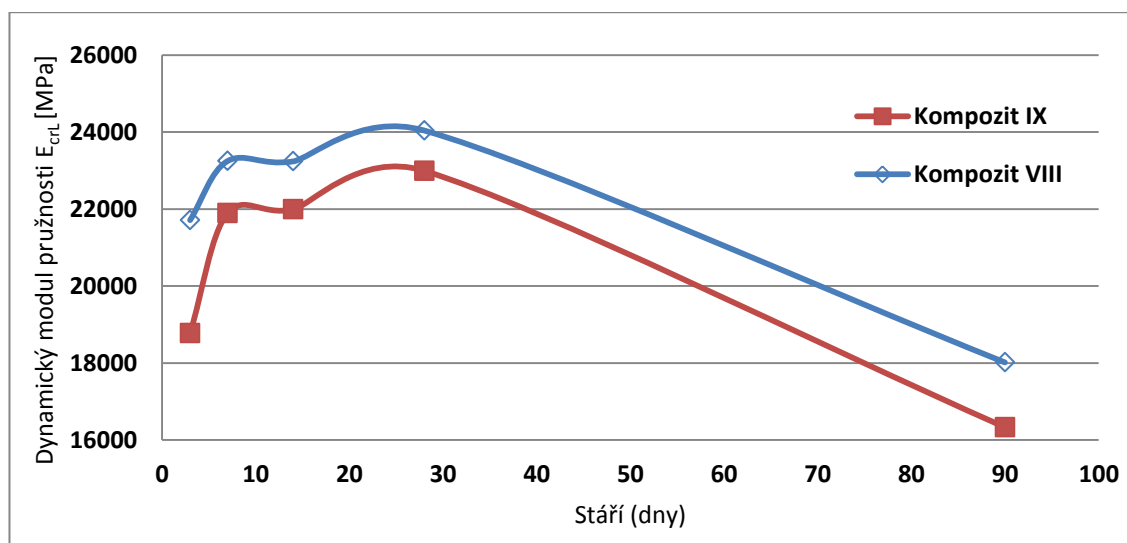
Graf 4-21 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda - rezonanční frekvence z podélného kmitání) kompozitů I, III a IV na stáří těles.

Další graf (viz Graf 4-22) zachycuje vývoj modulu pružnosti u kompozitu V a VII, kdy oba tyto materiály mají zvětšující se modul pružnosti asi od stáří 3 až 14 dní. Poté se u kompozitu VII jeho modul pružnosti snižuje, ale ve stáří 180 dní je jeho hodnota přece jen o 1,5 GPa vyšší než ta, která byla naměřena ve 3 dnech. Kompozitu V se snižuje hodnota modulu pružnosti od 14 do 28 dní po uložení jen minimálně. Od 28. dne jeho stáří tato hodnota mírně stoupá a při poslední zkoušce u něj byla naměřena hodnota 18,4 GPa (ve 3 dnech měl velikost 17,7 GPa).



Graf 4-22 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z podélného kmitání) kompozitů V a VII na stáří těles.

Poslední zkoušené kompozity měly ve stáří 3 dny 21,7 GPa (VIII) a 18,8 GPa (IX). Ve stáří 90 dní byly jejich průměrné hodnoty modulů pružnosti 18,0 GPa (VIII) a 16,3 GPa (IX).



Graf 4-23 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z podélného kmitání) kompozitů VIII a IX na stáří těles.

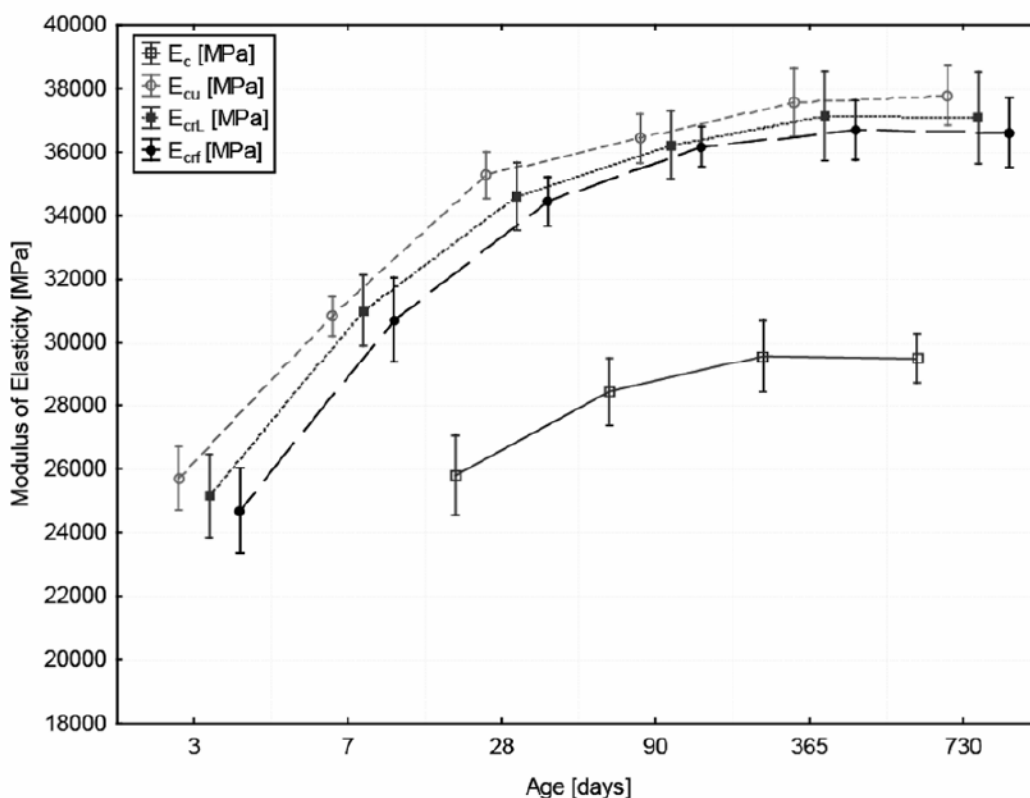
4.6 Diskuze výsledků

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, existuje spousta faktorů ovlivňujících výsledné hodnoty modulu pružnosti betonu (i kompozitů na podobné bázi), kvůli kterým nemusí

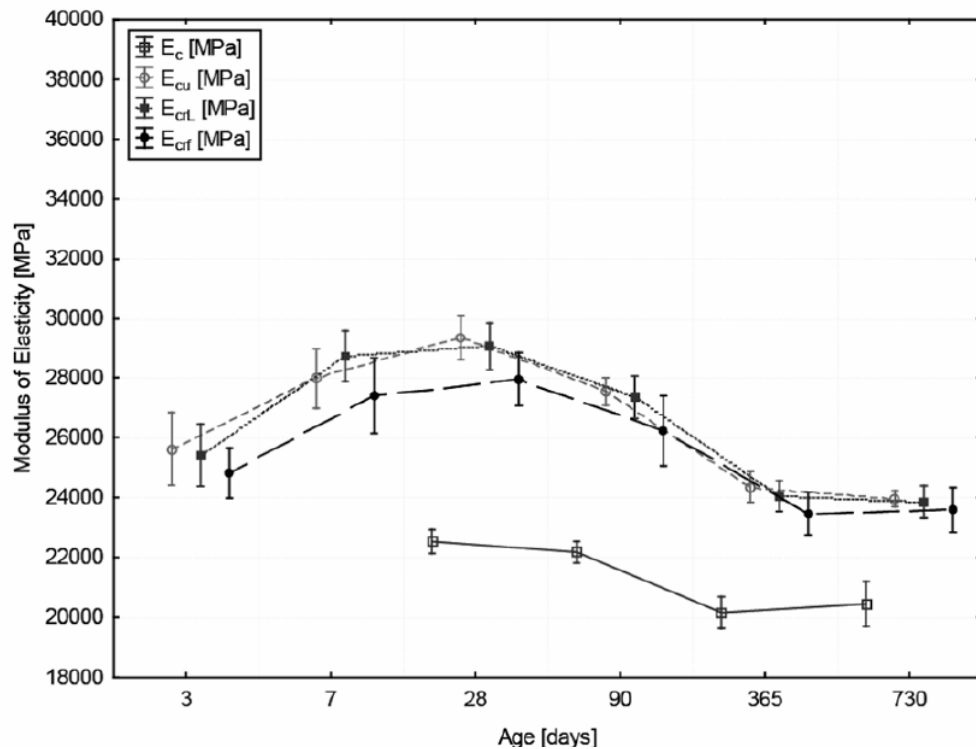
námi zjištěné hodnoty přesně odpovídat hodnotám reálným. V experimentu je tedy možné spekulovat zejména nad vlivy, jako je rychlost zatěžování, nekvalitní centrace, zastavení a opětovné zatěžování z důvodu přesnější centrace tělesa atd.

Oproti hodnotám pevnosti v tlaku AAS zveřejněných v odborné literatuře (např. příspěvek [60]), jsou hodnoty zjištěné v rámci této diplomové práce nižší. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena tím, že pevnost v tlaku byla stanovena na zkušebních tělesech tvaru válečku se štíhlostí 4. Z odborné literatury dále vyplývá i to, že pevnostní charakteristiky AAS bývají výrazně lepší ve stáří větším než 28 dní. V této diplomové práci jsou hodnoty pevnosti v tlaku AAS změřeny pouze v počáteční fázi zrání (3 a 28 dní).

Co se týče výsledků hodnot dynamického modulu pružnosti v závislosti na stáří těles, je možné říct, že klesající hodnota modulu je zapříčiněna neošetřováním těles. Na grafech na Obr. 4-18 a 4-19 je vidět, že křivky popisující vývoj MP betonu ošetřovaného po celou dobu svého uložení měly stále rostoucí tendenci. Naopak u vzorků, které byly ponechány bez ošetření, došlo ve stáří kolem 1 měsíce k mírnému poklesu sledovaných charakteristik [59].



Obr. 4-18 Závislost modulu pružnosti na stáří u ošetřovaného betonu [59].



Obr. 4-19 Závislost modulu pružnosti na stáří u neošetřovaného betonu [59].

V rámci posouzení by bylo dále možné porovnávat i tělesa různých tvarů. Podle různých teorií (zmíněno například v [35]), vycházejí u těles ve tvaru trámců vyšší statické moduly pružnosti než u těles z válců. V našem případě by ale tyto moduly pružnosti byly jistě ovlivněny i tím, že tělesa ve tvaru trámce byla vyráběna ve formách vymazaných odbedňovacím přípravkem a tělesa ve tvaru válečku byla vyráběna ve formách, které obsahovaly separační fólii. Jistou roli by mohla hrát i rozdílná volná plocha zkušebních těles uložených ve formě. Trámečky měly totiž plochu umožňující volné vysychání výrazně větší než zkušební tělesa tvaru válce.

Závěrem diskuze je nutné poznamenat, že průměrné hodnoty MP byly stanoveny na poměrně malém statistickém souboru dat. Aby mohly být provedené závěry statisticky průkaznější, bylo by nutné provádět měření na větším počtu zkušebních těles.

5 ZÁVĚR

Na základě zadání diplomové práce byla pomocí důkladné rešerše alespoň částečně nastíněna problematika modulu pružnosti kompozitů na bázi silikátových pojiv. V teoretické části byl proveden soupis informací získaných z odborné literatury týkající se této diplomové práce a navíc zde byla stručně zmíněna i další měření, která probíhala v rámci celého velkého projektu, jehož součástí je tato práce. V praktické části byl podrobně popsán experiment, byly zjištěny i porovnány moduly pružnosti různých kompozitů, proběhlo vyhodnocení a diskuze výsledků.

Z grafů znázorňujících závislost dynamického modulu pružnosti na stáří kompozitů jednoznačně vyplývá, že v počátečních fázích uložení zkušebních těles moduly pružnosti rostou. Jedinou výjimkou byl kompozit VIII (měřený UZ metodou), u kterého hodnota modulu pružnosti klesala. V další fázi měření se modul pružnosti od 14 dne u každého typu kompozitu vyvíjel jinak. U cementových malt se MP do 28 dne snižoval a s delší časovou dobou uložení byly hodnoty MP nepatrně vyšší nebo velice podobné, cementové zálivky měly pouze klesající trend a u alkalicko aktivovaných systémů docházelo také ke snižování hodnot modulu pružnosti. Při měření rezonanční metodou bylo zjištěno, že v případě kompozitu V modul roste, zatímco u kompozitu VII klesá.

Na základě výsledků je možné říct, že u cementových malt vyšel nejvyšší průměrný statický modul pružnosti ve stáří 28 dní (34,8 GPa) v případě nejnižšího vodního součinitele (0,35) a nejnižší 29,1 GPa v případě nejvyššího vodního součinitele (0,5). Podle očekávání vyšla teoretická „závislost“ statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku, kdy kompozity s větším statickým modulem pružnosti mají i vyšší pevnosti v tlaku.

Při porovnání cementových malt, cementových zálivek a alkalicko aktivovaných kompozitů vychází pokaždé výrazně vyšší MP právě u cementových malt. Cementové zálivky (PCC malty) a AAS dosahují přibližně stejných hodnot MP, a v porovnání s hodnotami cementových malt jsou tyto hodnoty podstatně nižší. Tato problematika tedy zůstává nadále otevřena dalším výzkumům a v budoucnu by bylo vhodné v tomto experimentu pokračovat např. rozšířením zkoumané oblasti o další typy kompozitů.

6 SEZNAMY

6.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. 4th and final ed. Harlow: Longman Group, 1995. ISBN 0582230705.
- [2] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Petr CIKRLÉ, Tereza KOMÁRKOVÁ a Bronislava MORAVCOVÁ. *STATICÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU DLE ČSN ISO 6784 A ČSN EN 12390-13. Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2014, (32014), 74-79.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 8021416475.
- [4] VRBA, Pavel. *Kalibrace nepřímých metod pro zjišťování vlastností alkalicky aktivovaných betonů*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
- [5] NOVÁK, Drahomír a Luděk BRDEČKO. *Pružnost a pevnost: Modul BD02 - M01 Základní pojmy a přepoklady*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- [6] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. *ZKUŠEBNÍ A TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA MODUL PRUŽNOSTI BETONU – REKAPITULACE. Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2012, **12**(42012), 62-67. ISSN 12133116.
- [7] HODULÁKOVÁ, Michaela. *Modul pružnosti přírodního kamene*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.
- [8] CIKRLÉ, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. *Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, 2011, (32011).
- [9] KOCÁB, Dalibor. *Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod*. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
- [10] *MECHANIKA PRUŽNÉHO TĚLESA: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku. FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDA* [online]. Jan Prachař, 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>
- [11] *ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (731201): Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [12] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. 1. české vyd. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 9788087158128.
- [13] *MODULUS OF ELASTICITY. K123-Katedra stavebních materiálů* [online]. Praha: Ing. Lukáš Fiala, 2007 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/BUM1/Chapter15.pdf>
- [14] PROCHÁZKA, David, Klára KŘÍŽOVÁ a Rudolf HELA. *Problematika modulů pružnosti u vysokopevnostních betonů. 17. Betonářské dny 2010*. Hradec Králové: Česká betonářská společnost ČSSI (ČBS), 2010, **17**, 417-420.

- [15] MISÁK, Petr a Tomáš VYMAZAL. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2009, (22009), 58-59. ISSN 1213-3116.
- [16] CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. *Stavba - TzB-info* [online]. Praha: Topinfo, ©2001-2016 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>
- [17] ČSN 73 2011 (732011): *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Český normalizační institut, 2012.
- [18] ČSN ISO 1920-10 (73 1319): *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Český normalizační institut, 2014.
- [19] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006, 49 s.
- [20] ČSN EN 12390-13 (731302): *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Český normalizační institut, 2014.
- [21] ČSN 73 1373 (731373): *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Český normalizační institut, 2011.
- [22] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [23] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 100 s. ISBN 978-80-7204-758-1.
- [24] ČSN 73 6174 (736174): *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Český normalizační institut, 1994.
- [25] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006, 47 s.
- [26] Ultrasonic NDT Inspection Device: Pundit PL-200. *DirectIndustry - The online Industrial Exhibition: sensor - automation - motor - pump - handling - packaging ...* [online]. 2017 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/prod/proceq/product-7242-1354737.html#product-item_1355981
- [27] ČSN 73 1371 (731371): *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Český normalizační institut, 2011.
- [28] ČSN EN 12504-4 (731303): *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Český normalizační institut, 2005.
- [29] ZUZANA, Škrobánková. *MOŽNOSTI VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ IMPULSNÍ METODY VE STAVEBNÍ PRAXI*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Jaromír Láník.
- [30] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *Beton*. b.r., , 75-79.
- [31] ČSN 73 1372 (731372): *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [32] NOVÁK, Drahomír a Luděk BRDEČKO. *Pružnost a pevnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- [33] CIKRLE, Petr. Rezonanční metoda, Moduly pružnosti. In: *Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2010 [cit.

- 2017-01-01]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2550723>
- [34] CIKRLÉ, Petr a Vlastimil BÍLEK. MODUL PRUŽNOSTI VYSOKOPEVNÝCH BETONŮ RŮZNÉHO SLOŽENÍ. *Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, 2010, (52010).
- [35] VÍTEK, Jan L., Jiří KOLÍSKO, Robert COUFAL a Petr HUŇKA. *Modul pružnosti betonu*. 1. vydání. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. Technická pravidla ČBS, 05. ISBN 9788090609754.
- [36] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Jan NOVÁK a Karel DVOŘÁK. *BJ51 Maltoviny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014.
- [37] ČSN EN 196 - 1 (72 2100). Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [38] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 64 s.
- [39] Kamenivo a jeho normy. *EUROVIA Kamenolomy, a.s.: Specialista na beton* [online]. Liberec: EUROVIA Kamenolomy, 2017 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: http://www.euroviakamenolomy.cz/dokument.aspx?dokumenty_id=661
- [40] ČSN EN 197-1 (72 2101). Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [41] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů: celostátní vysokoškolská příručka pro studenty oboru 27-06-8 Technologie silikátů*. 2. upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-816-88.
- [42] Zálivkové hmoty na bázi cementu: Technický list. *Sika Group* [online]. Switzerland: Sika Group, 2017 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/stavebnictvi/02a005/02a005sa01/02a005sa01ssa01.html
- [43] *Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu*. Vydání první. V Praze: Kloknerův ústav ČVUT, 2016. ISBN 9788001060063.
- [44] VRBA, Pavel. *Kalibrace nepřímých metod pro zjišťování vlastností alkalicky aktivovaných betonů*. Brno, 2014.
- [45] Porovnání některých vlastností běžných a alkalicky aktivovaných betonů. *Časopis SILNICE ŽELEZNICE: Rozvoj dopravní infrastruktury v České republice, na Slovensku i ve světě, moderní trendy, stavební postupy, používané materiály a technologie* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2017 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/porovnaní-některých-vlastností-bežných-a-alkalicky-aktivovaných-betonů/>
- [46] BÍLEK, Vlastimil, Lukáš KALINA, Radoslav NOVOTNÝ, Jakub TKACZ a Ladislav PAŘÍZEK. Some Issues of Shrinkage-Reducing Admixtures Application in Alkali-Activated Slag Systems. *Materials*. Switzerland, 2016, **9**(462). DOI: 10.3390/ma9060462.
- [47] Diagnostická metoda akustické emise a její perspektivy. *Techmagazín.cz* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, 2017 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/85>
- [48] PAZDERA, Luboš, Jaroslav SMUTNÝ a Pavel MAZAL. *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004. ISBN 8021428023.
- [49] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. *Technická diagnostika - 4. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [50] POLLOCK, A. *Practical guide to acoustic emission testing*. Physical Acoustic Corporation - Princeton: New Jersey, 1988.
- [51] SHI, Caijun. *Alkali-activated cements and concretes*. London: Taylor, 2006, 376 s.

ISBN 04-157-0004-3.

- [52] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.
- [53] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 8086769399.
- [54] *SYSTÉMY RYCHLE TUHNOUCÍCH SMĚSÍ NA BÁZI PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ*. Brno, 2008. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Prof. Ing. KAREL RUSÍN, DrSc.
- [55] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Libor TOPOLÁŘ, Petr DANĚK, Ondřej KAREL a Petr MISÁK. *The Volume Changes of Cement Composites in the Early Stage of Setting and Hardening*. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 331/95, Brno 602 00, Czech Republic, b.r..
- [56] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Hana ŠIMONOVÁ, Zbyněk KERŠNER, Petr DANĚK, Dalibor KOCÁB, Petr MISÁK a Petr PÖSSL. *Advanced Measurement of Volume Changes of Fine-aggregate Cement-based Composites during Ageing*. Brno: Elsevier, 2017.
- [57] ČSN EN 1015-3 (722400): *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [58] ČSN EN 1015-6 (722400): *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [59] KOCÁB, Dalibor, Monika KRÁLÍKOVÁ, Petr CIKRLE, Petr MISÁK a Barbara KUCHARCZYKOVÁ. *EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CONCRETE CURING ON THE DEVELOPMENT OF ITS ELASTICMODULUS OVER TIME*. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Testing Veveří 95, 602 00 Brno, Czech Republic, b.r..
- [60] RODRÍGUEZ, E., S. BERNAL, R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ a F. PUERTAS. *Alternative concrete based on alkali-activated slag*. Spain: Materiales de Construcción, 2008, 291 s. ISSN 0465-2746. Dostupné také z: DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.104>

6.2 Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam použitých symbolů není úplný, některé veličiny či symboly jsou vysvětleny přímo v textu.

VUT	Vysoké učení technické v Brně
FAST	Fakulta stavební
f_c	Pevnost betonu v tlaku
F	Síla
A	Průřezová plocha vzorku

MP, E	Modul pružnosti
ε	Poměrné přetvoření
σ	Napětí
E_c	Statický modul pružnosti betonu
UZ	Ultrazvuk
v_L	Rychlost šíření impulzu
E_{cu}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený ultrazvukem
E_{crL}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený vyhodnocením kmitočtů z rezonančních frekvencí podélného kmitání
E_{crf}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený vyhodnocením kmitočtů z rezonančních frekvencí příčného kmitání
G_{cr}	Dynamický modul pružnosti betonu ve smyku
ν_{cr}	Poissonův součinitel
κ_u	Orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových
κ_r	Orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů rezonančních
CEM	cement

6.3 Seznam obrázků, grafů a tabulek

6.3.1 Seznam obrázků

- Obr. 3-1** Hookův zákon v tahu a tlaku [5].
- Obr. 3-2** Schéma deformačního diagramu houževnaté oceli [10].
- Obr. 3-3** Schéma deformačního diagramu betonu [11].
- Obr. 3-4** Závislost mezi napětím a poměrným přetvořením betonu a znázornění různých druhů MP [7].
- Obr. 3-5** Určení plochy A pro stanovení pevnosti v tlaku [19].
- Obr. 3-6** Zkušební těleso připravené ve zkušebním lisu ke zkoušce pevnosti v tlaku.
- Obr. 3-7** (vlevo) Grafické znázornění umístění měřicího zařízení na zkušebním tělese, (vpravo) grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa [23].
- Obr. 3-8** Zkušební těleso s osazenými tenzometry připravené ve zkušebním lisu.
- Obr. 3-9** Grafické znázornění osazení průhyboměru a zkušebního tělesa v průběhu zatěžování [9], [24].
- Obr. 3-10** (vlevo) Ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200 firmy Proceq se sondami pro přímé prozvučování, (vpravo) Ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200PE firmy Proceq s odrazovou sondou [26]
- Obr. 3-11** Ukázka možného uspořádání UZ sond při zkoušce na trámci [8].
- Obr. 3-12** Způsoby prozvučování konstrukce [22].
- Obr. 3-13** Způsob přiložení budiče a snímače a způsob podepření u měření podélného, kroutivého a příčného kmitání [23].
- Obr. 3-14** Výstup z měření (impulzní kmitání podélné, kroutivé a příčné) [33].
- Obr. 3-15** Srovnání hodnot modulu pružnosti hornin používaných k výrobě kameniva [34].

- Obr. 3-16** Srovnání hodnot MP pro betony s kamenivem z různých hornin, kdy betony s r.h. = 95 % nebyly po 2 dnech zkoušeny, z toho plynou odlišné tvary křivek [34].
- Obr. 3-17** Srovnání hodnot modulu pružnosti pro betony s různým vodním součinitelem [34].
- Obr. 3-18** Idealizované zobrazení ukazující relativní vztahy výsledků měření statického MP betonu na různých tělesech s různým zakončováním [35].
- Obr. 3-19** Počet překmitů signálu akustické emise [48]
- Obr. 4-1** Uspořádání měřícího zařízení (1 – smršťovací rýna, 2 – váhový stůl, 3 – snímač akustické emise, 4 – čidlo pro měření teploty, 5 – měřící terče pro deformetr) [55].
- Obr. 4-2** Graf závislosti poměrné deformace kompozitů 0, III a IV na čase ve stáří prvních 72 hodin [56].
- Obr. 4-3** Graf závislosti hmotnostní ztráty kompozitů 0, III a IV na čase ve stáří prvních 72 hodin [56].
- Obr. 4-4** Graf závislosti poměrné deformace a teploty u kompozitů 0, III a IV na čase [56].
- Obr. 4-5** Graf závislosti poměrné deformace u kompozitů (0, III a IV) na delším časovém období [56].
- Obr. 4-6** Graf závislosti hmotnostních ztrát u kompozitů (0, III a IV) na delším časovém období [56].
- Obr. 4-7** Graf závislosti poměrného přetvoření na hmotnostních úbytcích u kompozitů 0, III a IV v celém zkušebním období [56].
- Obr. 4-8** (vlevo) Kompozit I a (vpravo) kompozit VIII.
- Obr. 4-9** Výroba kompozitu V.
- Obr. 4-10** Výroba těles (Kompozit VII).
- Obr. 4-11** Zkušební tělesa ve formách.
- Obr. 4-12** Grafické zobrazení postupu experimentu.
- Obr. 4-13** Zkouška stanovení konzistence (střásací stolek).
- Obr. 4-14** Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou zkouškou.
- Obr. 4-15** Měření dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou.
- Obr. 4-16** Zkušební těleso uložené v lisu s osazenými měřicími přístroji.
- Obr. 4-17** Zkušební těleso po statické zkoušce.
- Obr. 4-18** Závislost modulu pružnosti na stáří u ošetřovaného betonu [59].
- Obr. 4-19** Závislost modulu pružnosti na stáří u neošetřovaného betonu [59].

6.3.2 Seznam grafů

- Graf 4-1** Graf závislosti počtu překmitů na statickém modulu pružnosti.
- Graf 4-2** Graf závislosti velikosti amplitudy signálů na statickém modulu pružnosti.
- Graf 4-3** Graf znázorňující počet překmitů v průběhu zkoušky.
- Graf 4-4** Graf znázorňující velikosti amplitudy signálů v průběhu zkoušky.
- Graf 4-5** Graf „závislosti“ statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, III a IV ve stáří 3 dny), chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-6** Graf „závislosti“ statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, III a IV ve stáří 28 dní), chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-7** Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, stáří 3 dny).
- Graf 4-8** Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit I, stáří 28 dní).

- Graf 4-9** Graf statického modulu pružnosti v tlaku v závislosti na vodním součiniteli u cementových malt po 28 dnech jejich zrání; chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-10** Graf zobrazující pevnost v tlaku jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-11** Graf zobrazující statický MP v tlaku jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-12** Porovnání dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-13** Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku ve stáří 3 dny, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-14** Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru válečku ve stáří 28 dní, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-15** Porovnání dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-16** Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku ve stáří 3 dny, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-17** Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) jednotlivých kompozitů tvaru trámečku ve stáří 28 dní, chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky.
- Graf 4-18** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů I, III a IV na stáří těles.
- Graf 4-19** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů V a VII na stáří těles.
- Graf 4-20** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (ultrazvuková metoda) kompozitů VIII a IX na stáří těles.
- Graf 4-21** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda - hodnota z podélné rezonanční frekvence) kompozitů I, III a IV na stáří těles.
- Graf 4-22** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – hodnota z podélné rezonanční frekvence) kompozitů V a VII na stáří těles.
- Graf 4-23** Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – hodnota z podélné rezonanční frekvence) kompozitů VIII a IX na stáří těles.

6.3.3 Seznam tabulek

- Tab. 3-1** Průměrné hodnoty MP některých materiálů [13].
- Tab. 3-2** Přibližné hodnoty statického MP betonu v závislosti na jeho třídách [11].
- Tab. 3-3** Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti [38].
- Tab. 3-4** Výrobky skupiny cementů pro obecné použití dle normy [38].
- Tab. 4-1** Hodnoty počtu překmitů v závislosti na statickém MP.
- Tab. 4-2** Velikost amplitudy signálů v závislosti na MP.
- Tab. 4-3** Hodnoty počtu překmitů v průběhu zkoušky.
- Tab. 4-4** Velikost amplitudy signálů v průběhu zkoušky.

- Tab. 4-5** Složení a vlastnosti čerstvých kompozitů [56].
- Tab. 4-6** Složení jednotlivých kompozitů včetně hodnot jejich vodních součinitelů a informace o rychlosti míchání směsi.
- Tab. 4-7** Výsledky ze zkoušení konzistence čerstvé malty.
- Tab. 4-8** Výsledky ze zkoušení objemové hmotnosti čerstvé malty.
- Tab. 4-9** Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti a pevností v tlaku.
- Tab. 4-10** Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti a pevností v tlaku.
- Tab. 4-11** Výsledky ze zkoušek statických modulů pružnosti.
- Tab. 4-12** Výsledky ze zkoušek u těles ve tvaru válečku.
- Tab. 4-13** Výsledky ze zkoušek u těles ve tvaru trámečku.
- Tab. 4-14** Výsledné hodnoty modulu pružnosti z ultrazvukové zkoušky (tělesa ve tvaru trámečku).
- Tab. 4-15** Výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti z rezonanční zkoušky (tělesa ve tvaru trámečku).

7 PŘÍLOHY

7.1 Příloha 1 – Fotografická dokumentace



Obr. 7-1 *Proces přípravy jedné ze složek pro výrobu cementové zálivky.*



Obr. 7-2 *Zhutňování čerstvé směsi ve formě.*



Obr. 7-3 *Výroba zkušebních těles I.*



Obr. 7-4 *Výroba zkušebních těles II.*

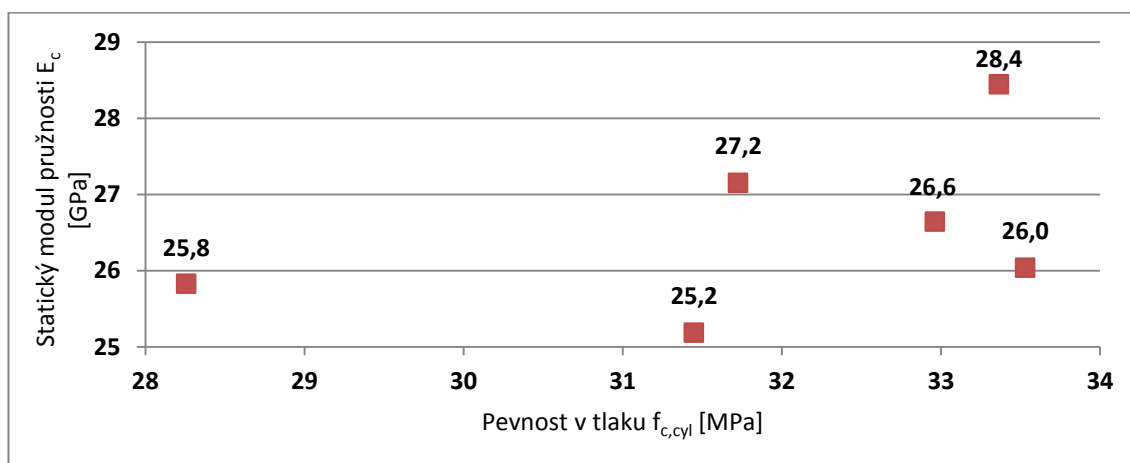


Obr. 7-5 *Lis FORM+TEST 200 kN, na kterém byly provedeny statické zkoušky.*

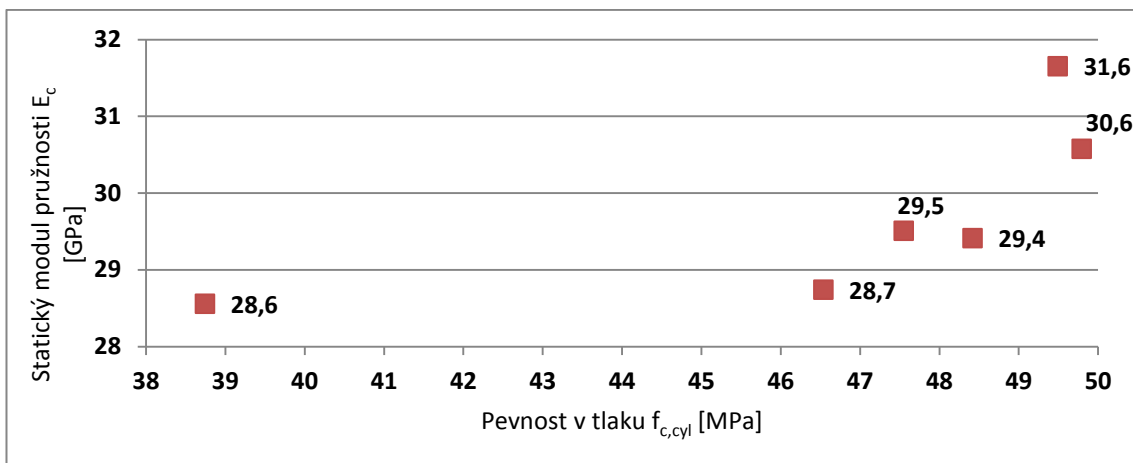


Obr. 7-6 Ukázka měření statického MP a AE.

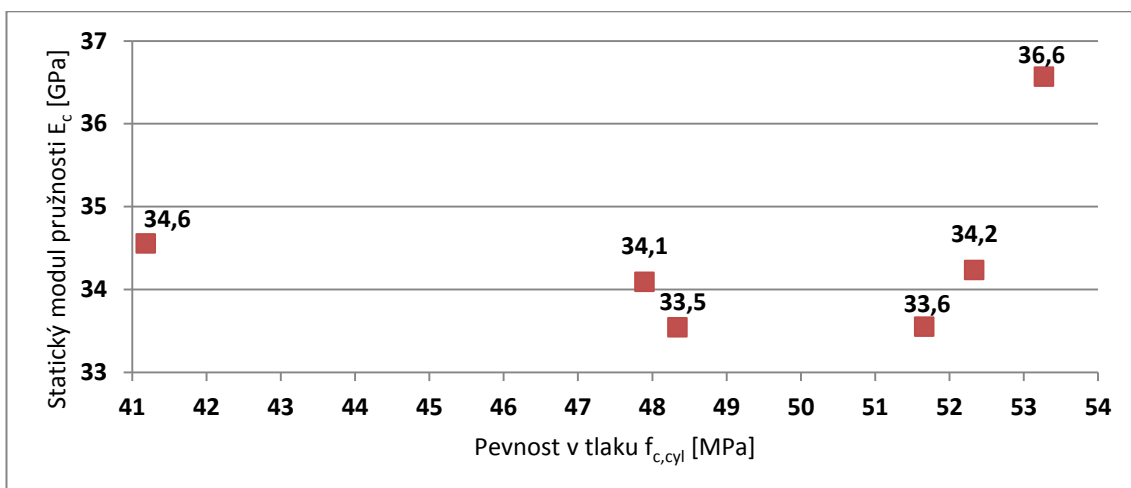
7.2 Příloha 2 – Grafy



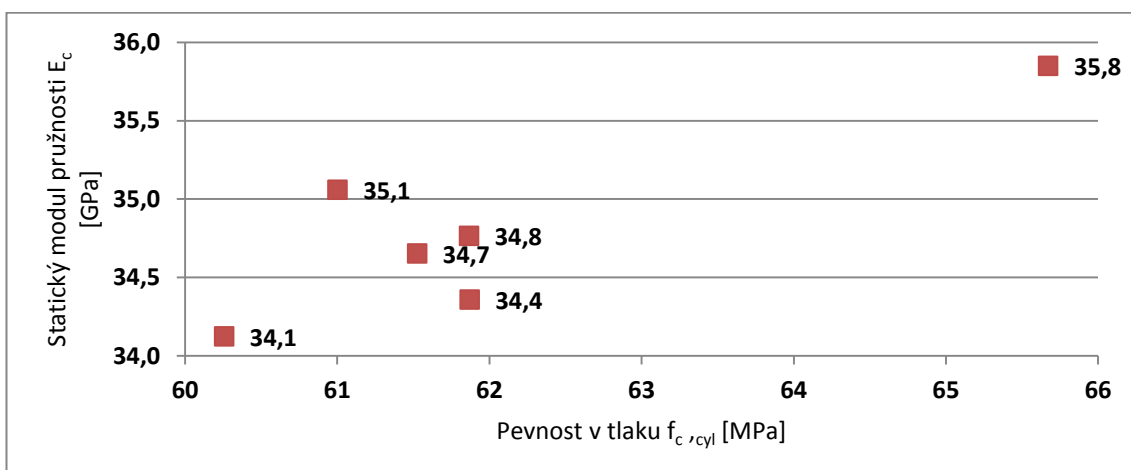
Graf 7-1 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit III, stáří 3 dny).



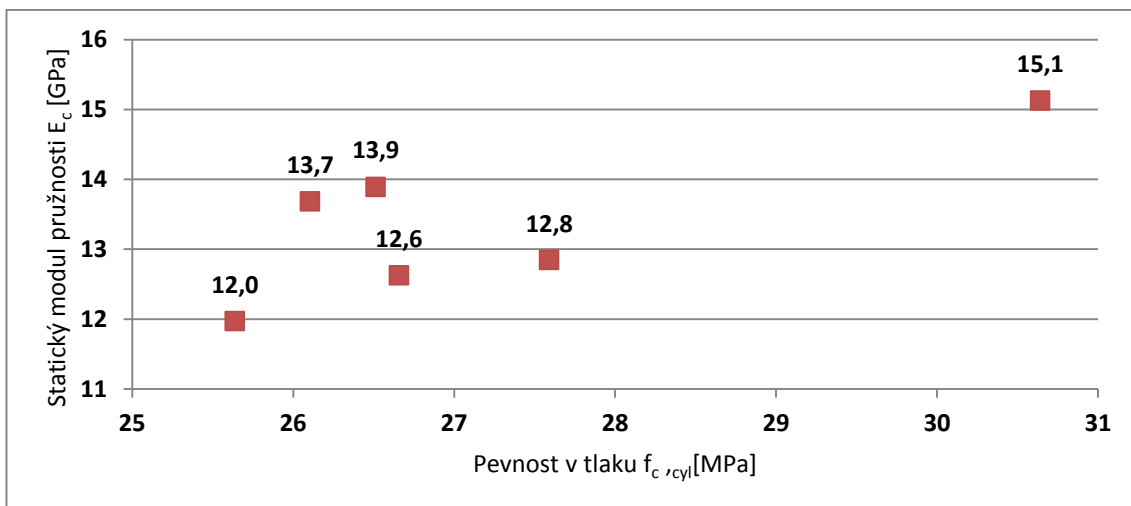
Graf 7-2 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit III, stáří 28 dní).



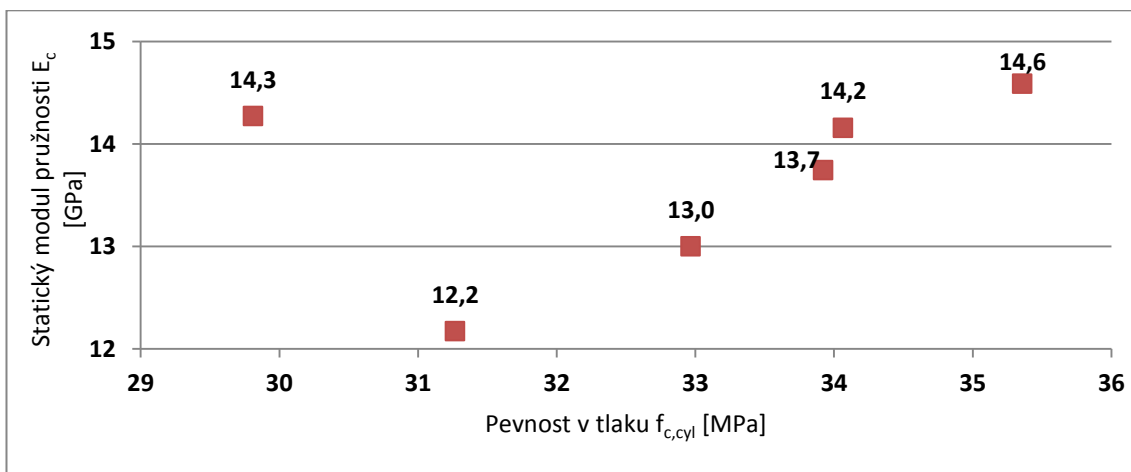
Graf 7-3 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit IV, stáří 3 dny).



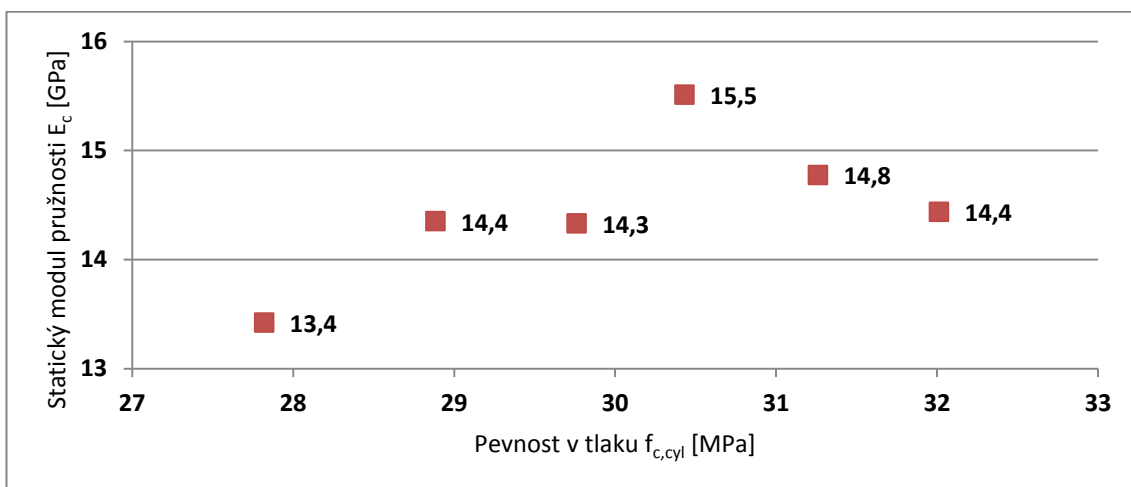
Graf 7-4 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit IV, stáří 28 dní).



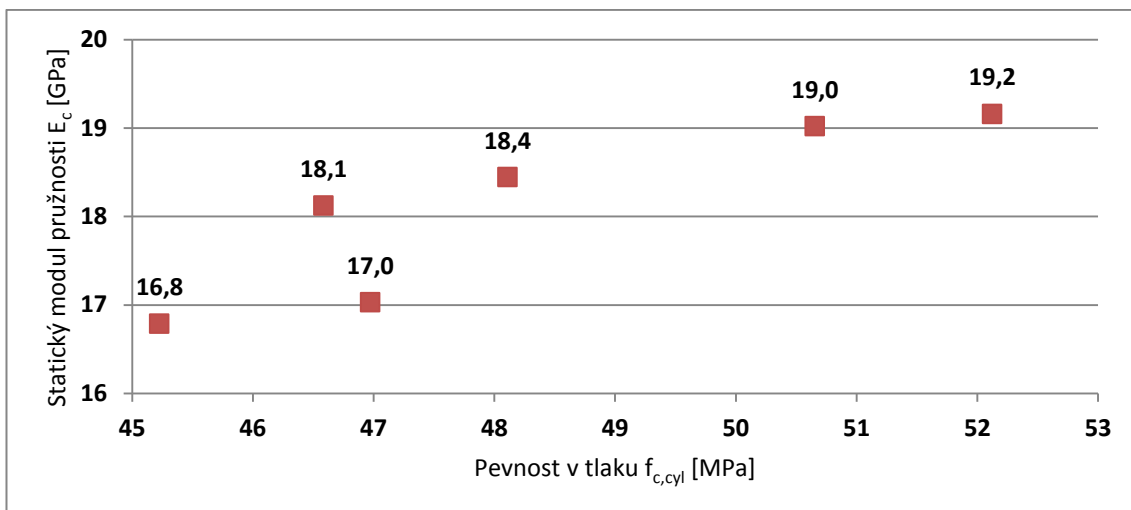
Graf 7-5 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit V, stáří 3 dny).



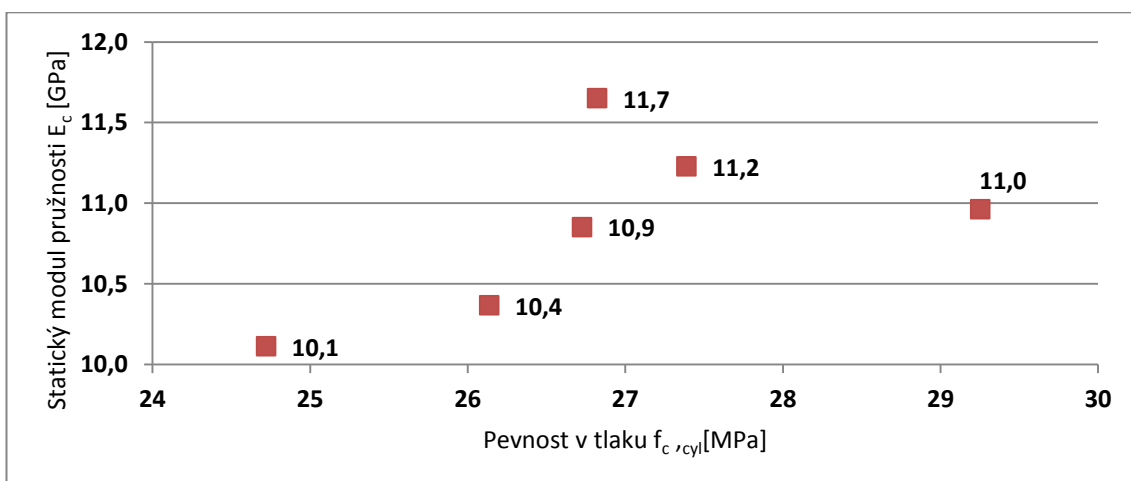
Graf 7-6 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit V, stáří 28 dní).



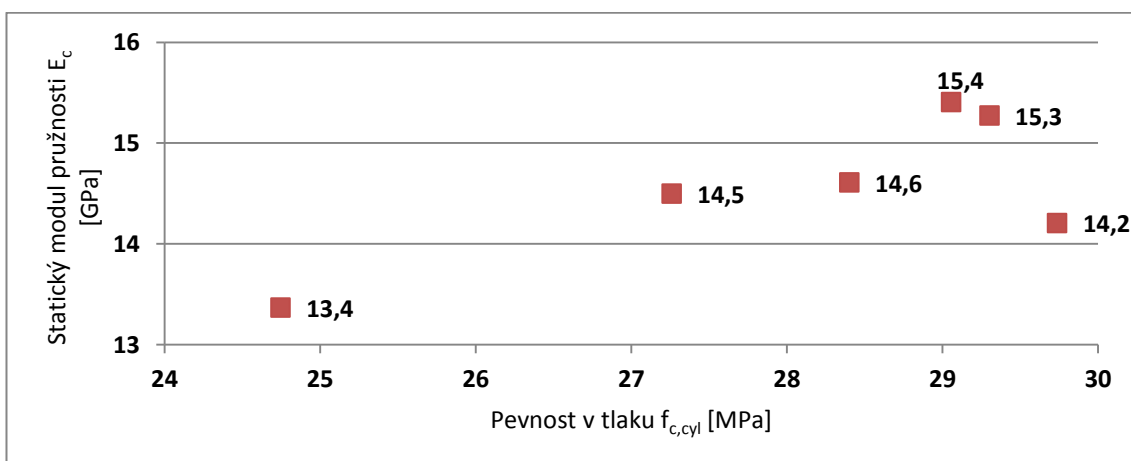
Graf 7-7 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit VII, stáří 3 dny).



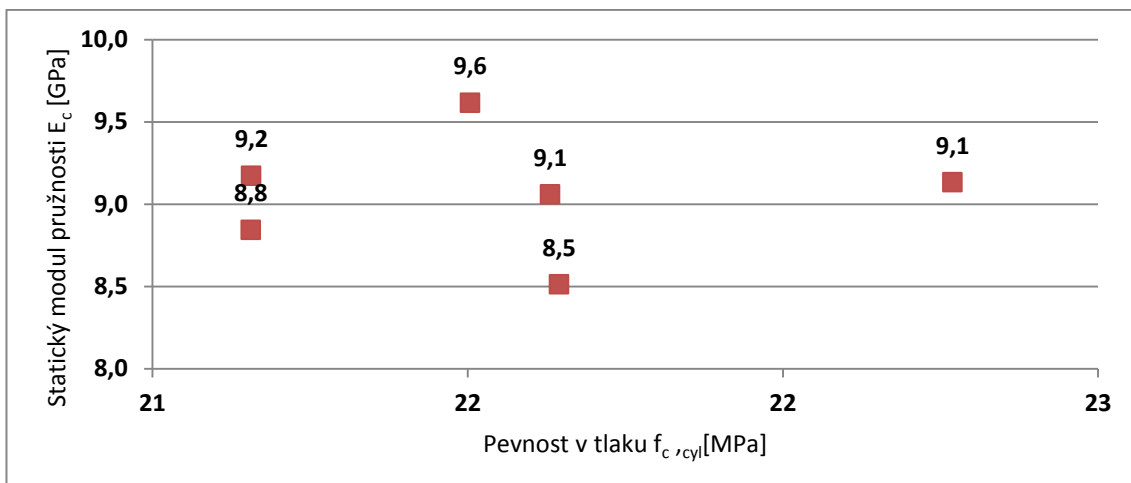
Graf 7-8 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit VII, stáří 28 dní).



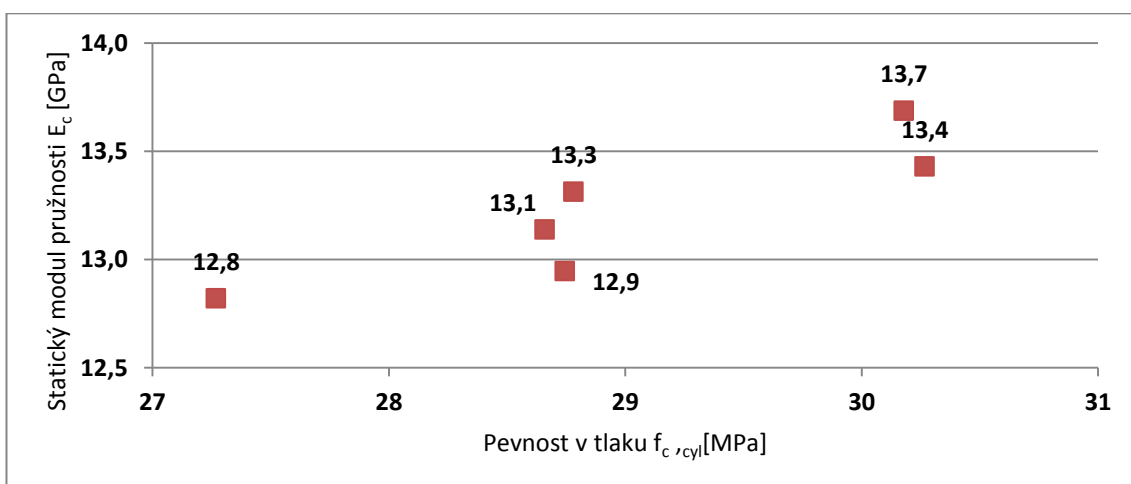
Graf 7-9 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit VIII, stáří 3 dny).



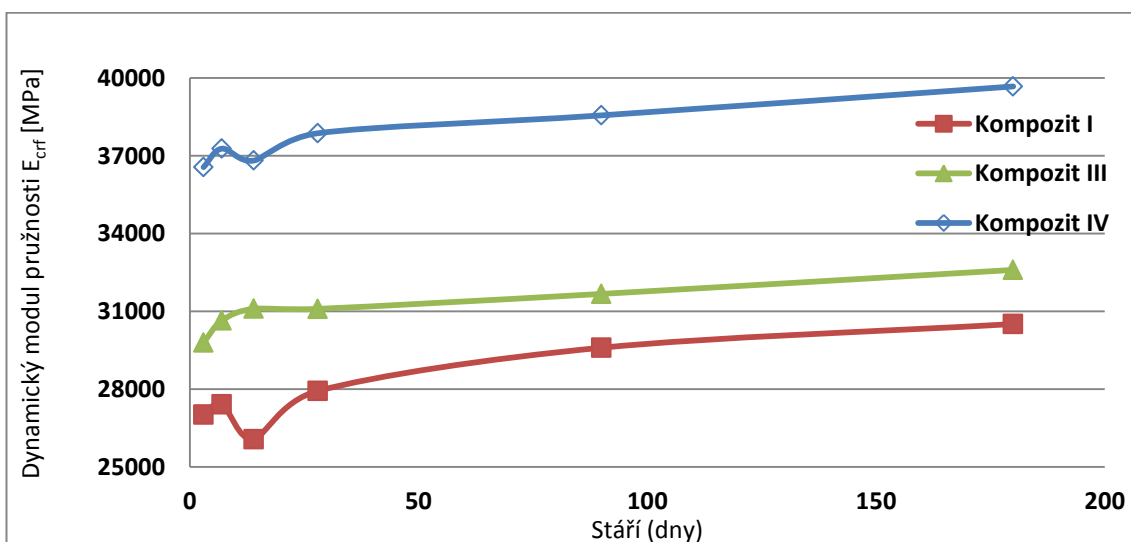
Graf 7-10 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit VIII, stáří 28 dní).



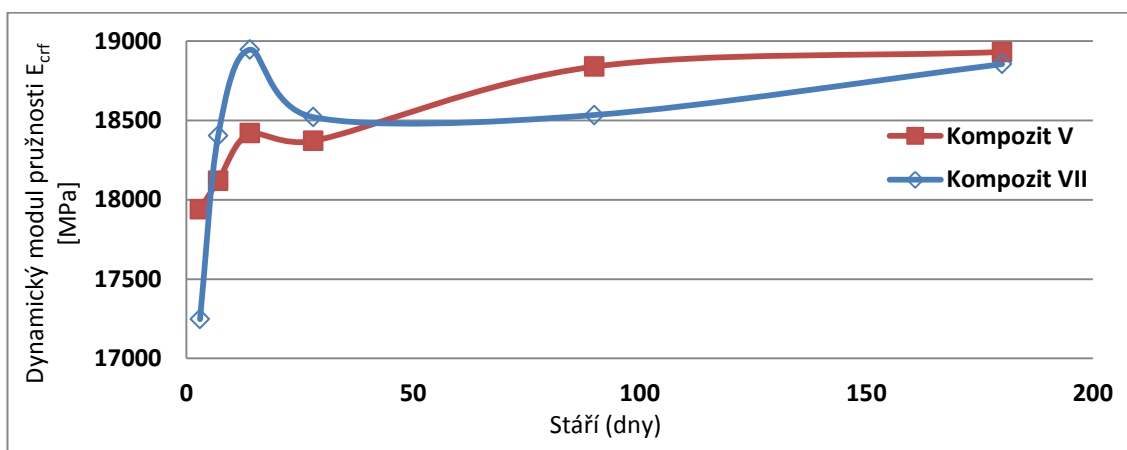
Graf 7-11 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit IX, stáří 3 dny).



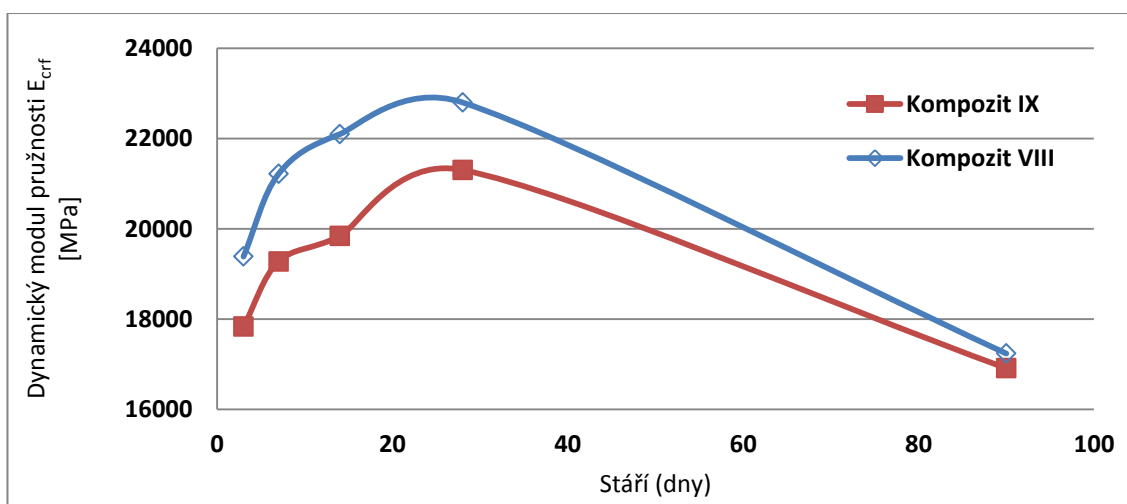
Graf 7-12 Graf závislosti statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (kompozit IX, stáří 28 dní).



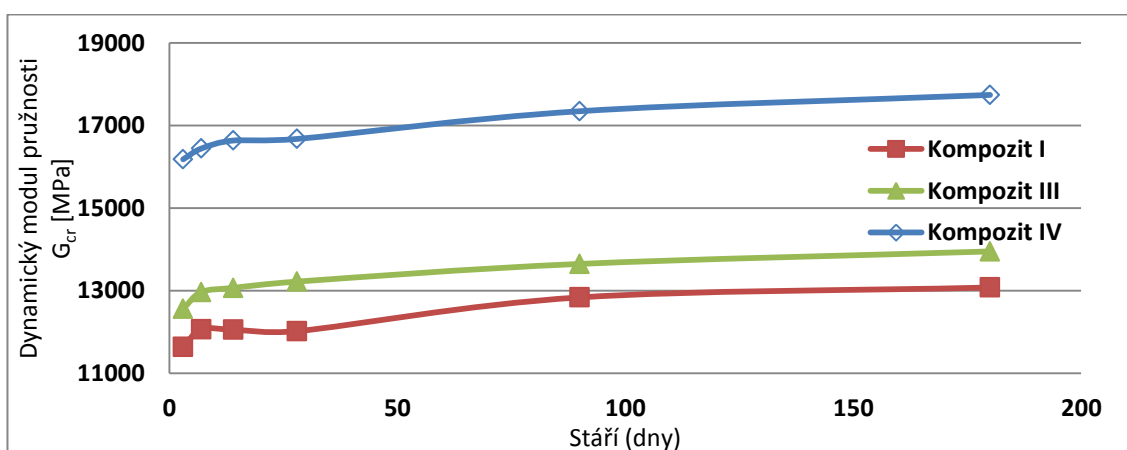
Graf 7-13 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z příčného kmitání) kompozitů I, III a IV na stáří těles.



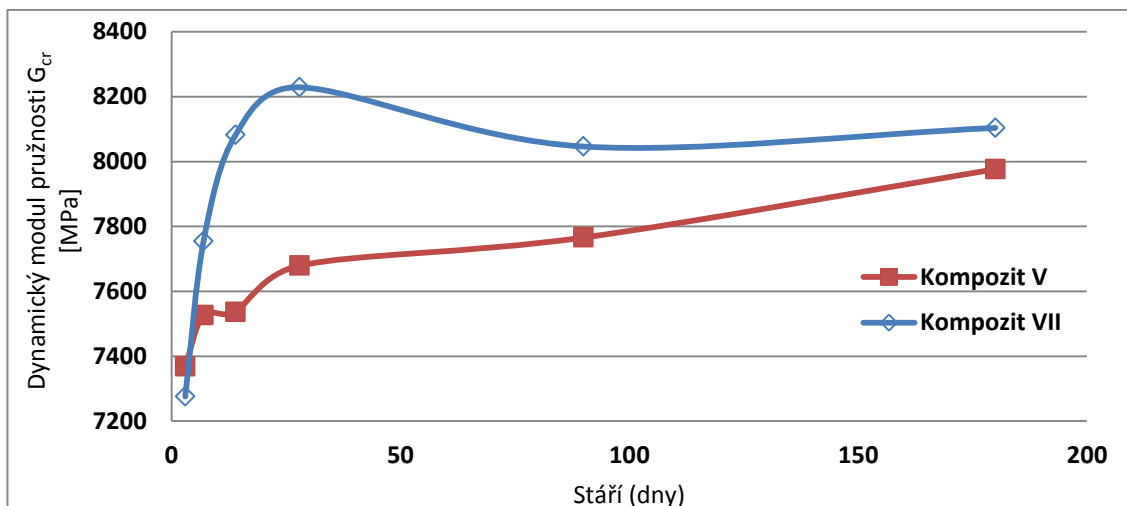
Graf 7-14 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z příčného kmitání) kompozitů V a VII na stáří těles.



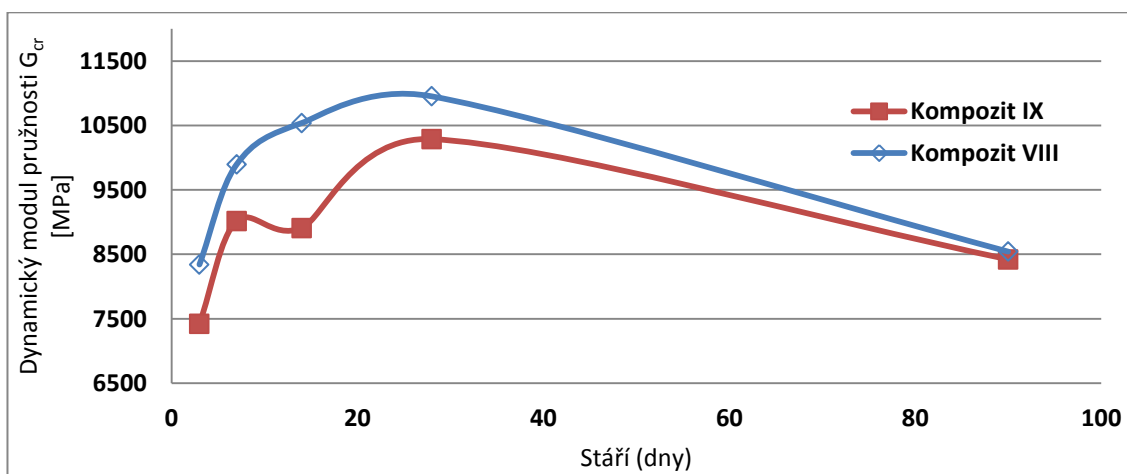
Graf 7-15 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z příčného kmitání) kompozitů VIII a IX na stáří těles.



Graf 7-16 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z krouživého kmitání) kompozitů I, III a IV na stáří těles.



Graf 7-17 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z krouživého kmitání) kompozitů V a VII na stáří těles.



Graf 7-18 Graf závislosti dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda – rezonanční frekvence z krouživého kmitání) kompozitů IX a VIII na stáří těles.