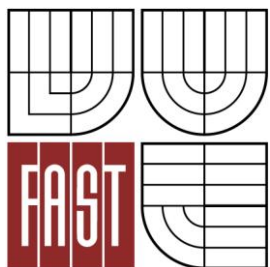




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

STUDIUM VLIVU SUPERPLASTIFIKAČNÍCH A PROVZDUŠŇOVACÍCH PŘÍRAD NA VLASTNOSTI ČERSTVÝCH A ZATVRDLÝCH BETONŮ

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUPERPLASTICISING AND AIR ENTRAINING ADMIXTURES ON
THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MONIKA KODEŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Monika Kodešová
Název	Studium vlivu superplastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2014

Zásady pro vypracování

Problematika nedefinovaného kolísání statických či dynamických modulů pružnosti na typu a dávce plastifikačních přísad a jejich případné kombinace s provzdušňovacími přísadami je v současné době velmi aktuální, neboť se na trhu rychle objevují nové typy přísad bez dlouholetých praktických ověření. Cílem bakalářské práce bude prověřit vliv superplastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti ČB a ZB. V teoretické části provedete podrobnou rešerši zahraniční i domácí literatury na toto téma s cílem zjistit zejména dopady různých typů plastifikačních přísad a v případě provzdušňovaných betonů na hodnoty modulů pružnosti ve stáří 28 dnů, souvislosti s hodnotami pevností, konzistence a obsahu vzduchu v čerstvém a zatvrdlém betonu

V praktické části navrhnete 10 receptur betonu, kdy se bude měnit pouze typ či dávka plastifikační přísady a míra provzdušnění. Na směsích ověřte konzistenci a obsah vzduchu v ČB. Na vyrobených zkušebních tělesech stanovte ve stáří 28 dnů pevnosti v tlaku, objemovou hmotnost a statické i dynamické moduly pružnosti betonu.

Rozsah : min 40 stran

Struktura bakalářské/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).

.....

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je studium vlivu superplastifikační a provzdušňovací přísady na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Tato práce je konkrétně zaměřená na modul pružnosti statický a dynamický a jejich vzájemný vliv.

Klíčová slova

Beton, superplastifikační přísada, provzdušňovací přísada, statický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti

Abstract

The theme of this thesis is study of the influence of superplasticising and air entraining admixtures on the properties of fresh and hardened concrete. This work is particularly focused on the modulus of elasticity of static and dynamic, and their mutual influence.

Keywords

Concrete, superplasticising admixtures, air entraining admixtures, elasticity modulus, dynamic modulus

Bibliografická citace VŠKP

Monika Kodešová *Studium vlivu superplastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů*. Brno, 2015. 59 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20.5.2015

.....

podpis autora
Monika Kodešová

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

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

V Brně dne 20.5.2015

.....
podpis autora
Monika Kodešová

Poděkování

V této části bakalářské práce bych chtěla poděkovat vedoucímu své práce za poskytnuté rady a věnovaný čas panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za poskytnutí zkušební laboratoře, materiálů a rad děkuji firmě STACHEMA CZ s. r. o. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu během celé doby studia.

Obsah

1. Úvod	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 Složení betonu.....	11
2.1.1 Kamenivo	11
2.1.1.1 Petrografie kameniva	11
2.1.1.2 Granulometrie kameniva	12
2.1.2 Cement	13
2.1.2.1 Suroviny pro výrobu cementu	14
2.1.2.2 Slinkové minerály	14
2.1.2.3 Vlastnosti cementu.....	15
2.1.3 Voda	16
2.1.4 Přísady do betonu	16
2.1.4.1 Plastifikační přísady	16
2.1.4.2 Superplastifikační přísady	18
2.1.4.3 Provzdušňovací přísady.....	22
2.1.4.4 Těsnící přísady	23
2.1.4.5 Přísady zpomalující tuhnutí.....	23
2.1.4.6 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí	23
2.1.4.7 Stabilizační přísady	24
2.1.4.8 Ostatní přísady.....	24
2.2 Modul pružnosti	25
2.2.1 Statický modul pružnosti	27
2.2.2 Dynamický modul pružnosti	28
2.2.2.1 Rezonanční metoda	28
2.2.2.2 Ultrazvuková metoda.....	29
2.2.3 Vlivy ovlivňující modul pružnosti	31
2.2.4 Poissonova konstanta	32
2.2.5 Souvislost mezi modulem pružnosti a pevností betonu v tlaku	32
2.2.6 Spojitost mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti.....	33
3. Praktická část	35
3.1 Složení jednotlivých záměsí	36

3.2	Výsledky zkoušek	40
3.2.1	Stanovení konzistence	40
3.2.2	Stanovení obsahu vzduchu tlakovou metodou	42
3.2.3	Stanovení objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu	44
3.2.4	Pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti.....	47
4.	Závěr	52
5.	Seznam použité literatury	55

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Ideální křivky zrnitosti kameniva pro max. zrno 4 mm, 16 mm a 32 mm. Oblast 1 a 5 - nevhodná zrnitost kameniva, oblast 3 - dobrá zrnitost kameniva, oblast 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva a křivka 2 - křivka přerušené zrnitosti. [8].....	13
Obrázek 2:	Flokulovaný stav cementových částic [2]	17
Obrázek 3:	Závislost doby výtoku na dávce superplastifikátoru se znázorněným bodem nasycení [5]	21
Obrázek 4:	Modul pružnosti betonu [23]	26
Obrázek 5:	Závislost mezi napětím σ a poměrným přetvořením ε [23]	27
Obrázek 6:	Sednutí kužele	40

Seznam tabulek

Tabulka 1:	Hodnoty zmenšovacích koeficientů pro přepočet dynamických modulů ultrazvukovou metodou κ_u a rezonanční metodou κ_r pro získání statického modulu pružnosti pro jednotlivé třídy betonu. [34]	34
Tabulka 2:	Označení jednotlivých záměsů a jejich specifikace	36
Tabulka 3:	Záměs I	36
Tabulka 4:	Záměs II	37
Tabulka 5:	Záměs III	37
Tabulka 6:	Záměs IV	37
Tabulka 7:	Záměs V	38
Tabulka 8:	Záměs I - P	38

Tabulka 9: Záměs II - P	38
Tabulka 10: Záměs III - P	39
Tabulka 11: Záměs IV - P	39
Tabulka 12: Záměs V - P	39
Tabulka 13: Sednutí kužele.....	40
Tabulka 14: Konzistence betonu ihned po zamíchání a po 30 minutách	41
Tabulka 15: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi ihned po zamíchání a 30 minut po zamíchání	43
Tabulka 16: Objemová hmotnost čerstvého a ztuhlého betonu	45
Tabulka 17: Pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti statický a dynamický, zmenšovací koeficient κ_u	48

Seznam grafů

Graf 1: Konzistence čerstvé betonové směsi – záměsi bez provzdušnění	41
Graf 2: Konzistence čerstvé betonové směsi – záměsi s provzdušněním	42
Graf 3: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi – záměsi bez provzdušnění	43
Graf 4: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi – záměsi s provzdušněním	44
Graf 5: Objemová hmotnost betonové směsi – záměsi bez provzdušnění	46
Graf 6: Objemová hmotnost betonové směsi – záměsi s provzdušněním	46
Graf 7: Pevnost betonu v tlaku	48
Graf 8: Statický modul pružnosti – bez provzdušnění	49
Graf 9: Statický modul pružnosti – s provzdušněním	49
Graf 10: Dynamický modul pružnosti – ultrazvuková metoda	50
Graf 11: Zmenšovací koeficient κ_u	50

1. Úvod

Beton, který známe dnes, si prošel nesčetnými změnami ve svém složení. První zmínky o betonu jako o slepenci pocházejí z doby 1 000 př. n. l. Od té doby se složení a požadavky kladené na beton mění.

V této práci jsou postupně popsány jednotlivé složky betonu. Každá z nich má vliv na vlastnosti betonu. Do moderních betonů se již běžně používají přísady různého chemického složení a s různou funkcí, které ovlivňují vlastnosti betonu. Nejčastěji jsou používány ztekucující a provzdušňující přísady. Superplastifikační přísady mají vliv na konzistenci čerstvé betonové záměsi a díky eliminování nadbytečné vody jsou kladně ovlivněny vlastnosti ztvrdlého betonu. Provzdušnění betonu má největší vliv na vlastnosti ztvrdlého betonu. Konkrétně se provzdušněné betony používají pro prostředí XF.

V další části práce je popsán modul pružnosti. Modul pružnosti vypovídá o vlastnostech ztvrdlého betonu a to konkrétně jeho chování pod určitým zatížením. Statický modul je ovlivněn spoustou vlivů, od samotného složení betonové směsi po její uložení až po tvar samotných zkušebních vzorků. Existují vztahy pro přepočet dynamického modulu na statický. Pro přepočet byly zjištěny zmenšovací koeficienty, které byly známy pro běžné betony, pro moderní betony je potřeba zjistit, jak jsou tyto koeficienty ovlivněny složením betonu.

2. Teoretická část

Na úvod je stručně popsáno, co je beton a z čeho je složen, jaké jsou požadavky na jednotlivé složky pro výrobu betonové směsi, aby bylo dosaženo požadované reologie čerstvého betonu a požadovaných mechanických vlastností u ztvrdlého betonu i s postupy jednotlivých zkoušek a požadavky platných českých státních norem.

2.1 Složení betonu

Beton tak, jak ho známe dnes je směsí drobného a hrubého kameniva, cementu, vody, přísad a případně i příměsí. V této kompozitní látce plní kamenivo funkci kostry s minimální mezerovitostí, další důležitou složkou je cement, který obaluje jednotlivá zrna kameniva a po přidání vody tato zrna k sobě pojí. V současné době jsou neodmyslitelnou součástí této směsi i přísady, které upravují vlastnosti čerstvého, ale i ztvrdlého betonu. Příměsí se do betonu přidávají za účelem zlepšení reologie a vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu nebo získání některých speciálních vlastností. Dalším možným důvodem k použití příměsí je možnost snížení nákladů, které s výrobou betonové směsi souvisejí tím, že se nahradí část nejnákladnější položky, tedy cementu. [1], [2], [3]

2.1.1 Kamenivo

Nejdůležitější složkou při výrobě betonu je kamenivo, které plní jeho nosnou funkci s minimální mezerovitostí. V betonové směsi zaujímá největší zastoupení, přibližně 75 – 80 % objemu celé směsi. Vlastnosti kameniva, které je vhodné pro výrobu betonu jsou uvedeny v ČSN EN 12 620 v Národní příloze NA 1. Kamenivo má pozitivní dopad pro beton, například lepší objemovou stabilitu, trvanlivost, pevnost, ovlivní i mrazuvzdornost a zpracovatelnost betonu. [1], [3], [5]

2.1.1.1 Petrografie kameniva

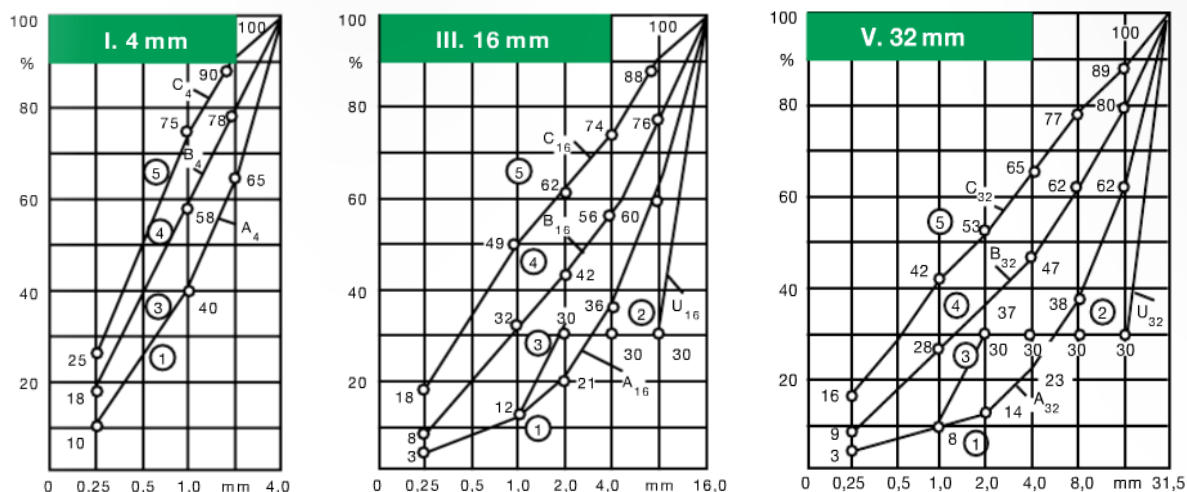
Hornina je složena z minerálů, které svým podílem a vlastnostmi určují její barvu, tvrdost (určuje se Mohsovou stupnicí), trvanlivost, chemické chování, teplotní roztažnost. Důležitým prvkem, který má velký vliv na vhodnost horniny, pro použití do betonu je i její původ. Horniny podle původu dělíme na magmatické (vytvořené krystalizací přirozené silikátové taveniny, dělí se na hlubinné – vyznačující makroskopicky zrnitou hmotou vlivem dlouhotrvající krystalizace; žilné se vyznačují

okem patrnými krystalky minerálů, které jsou obklopené jemně zrnitou hmotou; výlevné mají makroskopicky celistvý vzhled vlivem rychlejší ochlazování magmatu na povrchu. Sedimentární horniny patří mezi nejrozšířenější skupinu, dělí se klastické, chemické a organogenní, vznikají zvětráváním, transportem částic, sedimentací, diagenézí. Metamorfované horniny vznikají přeměnou magmatických sedimentárních nebo i starších metamorfovaných hornin. Přeměna hornin je ovlivněna nejčastěji vyšší teplotou a tlakem.) V hornině je důležité i uspořádanost minerálů. Pokud je uspořádání pravidelné, má větší nebo menší vliv na štěpnost horniny, příkladem takových hornin je rula, břidlice. Pokud je v hornině víc minerálů nepravidelně uspořádaných, tím větší je pevnost horniny, příklad takto nepravidelných struktur se nalezne u čediče, žuly, dioritu, křemence. Tyto horniny s nepravidelnou strukturou uspořádání minerálů jsou nejvhodnější při použití do betonu. [3], [4], [6]

2.1.1.2 Granulometrie kameniva

Zrnitost kameniva je vyjádřena skladbou různě velkých zrn o různém tvaru tak, aby se dosáhlo co největší hutnosti. Čím vyšší hutnost skladby, tím nižší mezerovitost ve skladbě zrn. Optimální skladba se určí pomocí síťového rozboru na normalizované sadě sít, kde zrna zachycená na síti se nazývají frakce. Normová základní řada sít se čtvercovými otvory je 0,063 – 0,125 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 63 – 125 mm. [1], [3], [4]

Zrnitost je dána čarou zrnitosti a pro její plynulost jsou uváděny nejčastěji tři typy křivek, které se mohou označit za ideální. Na obr. 2 jsou znázorněny příklady optimálních křivek zrnitosti pro některé frakce. Ideální čáry zrnitosti mohou být popsány rovnicemi podle Fullera, EMPA I a EMPA II. Zrnitost je závislá na třech podmínkách, které spolu souvisejí. Nejprve se přes síťový rozbor zjistí zrnitost kameniva, následně je nutné zvolit vhodnou zrnitost a posledním bodem je skladba kameniva tak, aby bylo dosaženo ideální křivky zrnitosti. Pro výpočet čáry zrnitosti je nutné znát maximální velikost zrna kameniva. Největší možné zrno kameniva k betonové směsi je ovlivněno vzdáleností mezi pruty výztuže zmenšené o 5 mm; 1,3 násobek krycí vrstvy výztuže nebo čtvrtinou nejmenšího rozměru konstrukce betonové konstrukce. [1], [4], [5]



Obrázek 1: Ideální křivky zrnitosti kameniva pro max. zrno 4 mm, 16 mm a 32 mm. Oblast 1 a 5 - nevhodná zrnitost kameniva, oblast 3 - dobrá zrnitost kameniva, oblast 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva a křivka 2 - křivka přerušené zrnitosti. [8]

Granulometrie je udávána křivkou, která se nazývá čarou zrnitosti. Plynulost křivky je dána podílem kameniva na síti tak, aby bylo dosaženo nejnižší mezerovitosti. Křivka zrnitosti se popisuje pomocí modulů kameniva, které vyjadřují jeho jemnost. Modul zrnitosti se zjistí pomocí síťového rozboru na normové sadě sít. Existují dva moduly zrnitosti: k modul (číslo zrnitosti) – je součet veškerých procentních zůstatků směsi kameniva na sítích od 4 mm, který je dělený 100. Druhým je d modul (součet propadů) – je součet veškerých procentních propadů směsi kameniva pod 4 mm. Předpokladem pro dosažení stejné pevnosti betonu, díky stejnému množství vody, které je potřeba na ovlhčení povrchu kameniva, je směs se stejným modulem. Tyto moduly zároveň slouží k návrhu poměrů dvou a více kameniv o rozdílné zrnitosti. [1], [4]

2.1.2 Cement

Dalším důležitým komponentem betonové směsi je cement, který plní funkci pojivové složky, kdy spolu s vodou tvoří cementový tmel a po tuhnutí a tvrdnutí vznikne cementový kámen. Cement se řadí mezi hydraulické pojivo anorganického původu, které pojí plniva ve větší celky a tuhne, tvrdne, nabývá vaznost a je stabilní i pod vodou. Pro složení, specifikaci a kritéria shody cementů platí norma ČSN EN 197 – 1. [2], [7]

2.1.2.1 Suroviny pro výrobu cementu

Mezi hlavní zástupce cementů patří portlandský cement, který je kromě hlinitanového cementu složkou všech hydraulických pojiv. Důležitým krokem výroby portlandského cementu je příprava surovinové směsi o vhodném poměru surovin potřebných k výrobě slinku. Suroviny pro jeho výrobu se dělí na základní, korigující a zušlechťující. Základní suroviny musí obsahovat vhodný poměr čtyř hlavních oxidů - CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , který je označován, jako moduly. Moduly jsou poměry obsahu oxidů ve vstupní surovině. Jsou známy tři druhy modulů: silikátový modul M_S – jeho hodnota je v rozmezí 2,4 až 2,7. Cementy, které mají M_S vyšší, jsou charakterizovány pomalejším tuhnutím a odolností vůči agresivnímu prostředí. Hodnota hydraulického modulu M_H se pohybuje v rozmezí 1,9 až 2,2. Pokud je M_H vyšší než 2,4, jde o cementy se zvýšenou tvorbou alitu a trikalciumaluminátu a je pro ně typické vyšší hydratační teplo a vyšší počáteční pevnosti, zároveň jsou méně odolné vůči agresivním látkám. Posledním modulem je aluminátový M_A , který je vymezen hodnotami 1,5 – 2,5. [1], [7]

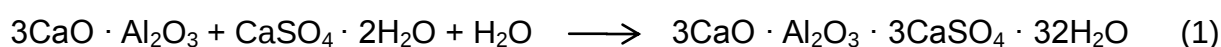
Surovinová moučka bývá složena z vápence, který je hlavním zdrojem CaO , z jílu a lupku pro získání SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Je velmi časté, že vznikající surovinová moučka nemá požadované poměry jednotlivých prvků a proto se používají korigující suroviny, kterými se dá složení upravit. Korigujícími složkami jsou křemičitý písek, pro úpravu množství SiO_2 , bauxit jako zdroj Al_2O_3 a oxid železitý pro Fe_2O_3 . Zušlechťujícími surovinami jsou intezifikátory výpalu (snižují viskozitu taveniny, reagující tavenina se získá při nižší teplotě), mineralizátory (dokážou upřednostnit vznik jednoho minerálu během výpalu na úkor druhého) a legující přísady (zlepšují melitelnost slinku). Další složka, která vznikla vlivem působení vysokých teplot, je skelná fáze, která může být v cementu obsažena až z 25 % a zajišťuje objemovou stálost cementu. [7], [8]

Doplňující složky nesmí zvyšovat obsah vody během zpracování cementu, nesmí snižovat odolnost betonu a ochranu výztuže vůči korozi. [8]

2.1.2.2 Slinkové minerály

Po získání potřebných složek k dosažení správného poměru prvků v surovinové moučce se vzniklá směs nechá vypálit v dlouhé rotační peci až na mez slnutí (při teplotě 1 250 – 1 350 °C) a následně se musí intenzivně zchladit, aby nedošlo k rozpadu C_3S a C_2S . Ve slinku se během výpalu vytvoří slinkové minerály: alit, který

ovlivňuje nárůst počátečních pevností, dalším minerálem je belit, tento minerál má nízké počáteční pevnosti, ale konečné pevnosti jsou srovnatelné s alitem, pro belit je typické, že dosahuje nízkého hydratačního tepla, proto je hlavní složkou cementů pro stavbu masivních konstrukcí. Trikalciumaluminát má velmi rychlý nárůst počátečních pevností, tuhne ihned po zamíchání s vodou, a proto se musí při mletí slinku přidávat regulátor tuhnutí, kterým je sádrovec. Trikalciumaluminát spolu se sádrovcem vytvoří primární ettringit (1), který zpomalí okamžitý průnik vody do jádra. Posledním slinkovým minerálem je brownmillerit, který má velmi nízké počáteční pevnosti. [2], [7]



Po zchlazení se vzniklý slínek rozemele i se síranem vápenatým, používá se jako regulátor tuhnutí a jeho maximální obsah má být 5 – 6 %. Konečná směs je jemný prášek o měrném povrchu minimálně $220 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. [7], [8]

2.1.2.3 Vlastnosti cementu

Sledované vlastnosti cementů jsou definovány v normě ČSN EN 196. Mezi důležité vlastnosti se řadí počátek a doba tuhnutí, zjišťuje se Vicatovým přístrojem a minimálně za 45 až 60 minut, běžně však až za 3 – 5 hodin, začne docházet k tuhnutí, doba tuhnutí má být maximálně 12 hodin (bývá 4 – 6 hodin). Čím více vody v záměsi, tím se doba tuhnutí prodlužuje. Další vlastností je objemová stálost, způsobená nadměrným množstvím volného CaO, MgO a CaSO₄, se prokazuje po 24 hodinách při laboratorní teplotě 20°C. Zkouší se pomocí Le Chatelierovy objímky, kdy její roztažení nesmí být větší než 10 mm. U portlandského cementu se udává objemová hmotnost $3\,050 - 3\,150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a sypaná hmotnost volně loženého cementu je v rozmezí 900 až 1 300 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Měrný povrch cementu bývá 250 – 400 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, čím větší je měrný povrch cementu, tím rychleji a dokonaleji hydratuje, ale výroba takového cementu je energeticky náročná. K dokonalejší hydrataci cementových zrn je potřeba větší množství vody. Další důležitou sledovanou vlastností je hydratační teplo, které cement vyvíjí během hydratace cementových zrn. Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku je zjišťována na cementových trámečcích o rozměrech 40 · 40 · 160 mm, které jsou vyrobeny z 1 350 g normovaného písku, 450 g cementu a 225 ml vody. Pevnost v tahu a následně v tlaku se zjišťuje po 1, 7 a po 28 dnech. [4], [8], [9], [10]

2.1.3 Voda

Voda použitá při výrobě betonu musí splňovat požadavky dané ČSN EN 1008. Voda v technologii betonu plní dvě funkce. Reologickou, kde díky vodě vznikne tvárný beton. Viskozitou betonu je ovlivněna plasticita a koheze kapilárními silami. Druhou funkcí je funkce hydratační, kde spolu s cementem vytváří strukturu cementového kamene. K hydrataci cementu je potřeba minimálně 23 – 25 % vody z hmotnosti cementu. [1], [4]

V rámci výroby betonu a jeho následného zrání je tato složka dělena na vodu záměsovou, která se dávkuje při míchání čerstvého betonu a vodu ošetřovací, která je důležitá po zatuhnutí betonu, který se několik dní musí držet ve vlhkém prostředí, aby veškerá cementová zrna stihla plně zhydratovat a tím nedošlo k poškození ztvrdlého betonu vzniklými smršťovacími trhlinami. [1], [4]

Veškerá voda používaná při výrobě betonu musí splňovat kvalitativní požadavky. Použitelnost vody při výrobě závisí na zdroji. Voda může být použita pitná z vodovodního řadu, studniční, recyklovaná z uzavřeného technologického okruhu při výrobě transport betonu, maximální objemová hmotnost má být do $1\,010\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Dalšími zdroji může být průmyslová odpadní voda a mořská voda. [1], [11]

Při použití vody je kladen velký důraz na to, jaký beton bude vyráběn, jestli prostý, vyztužený nebo předpjatý. Druh betonu ovlivní sledované vlastnosti vody a jejich mezní hodnoty. Sledovanými vlastnostmi jsou barva, pH, obsah chloridů, síranů, fosforečnanů, dusičnanů, siřičků, zinku, glukózy a sacharózy, alkálií, humínové látky, oleje a tuky, detergenty, suspendované látky a zápach. [1], [11]

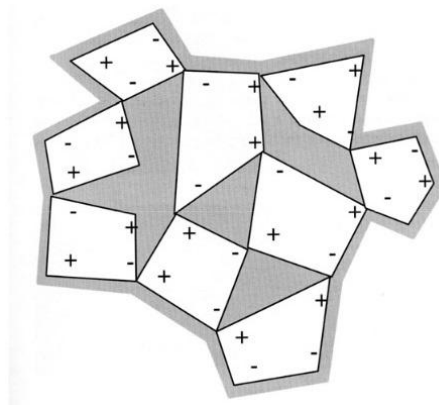
2.1.4 Přísady do betonu

Kromě základních složek betonu jako jsou cement, kamenivo a voda patří i přísady, které jsou už považovány za běžnou součást betonové směsi. Přísady jsou chemické látky upravující reologii čerstvého betonu a následně vlastnosti ztvrdlého betonu. Přísady jsou používány zejména v kapalném stavu, kdy dojde k lepšímu rozmísení ve vyráběné směsi. Přísady působí především na cement a jejich působení je závislé na druhu použitého cementu, měrném povrchu cementu, koncentraci přísady, která je vztažena na hmotnost cementu. [1], [3]

2.1.4.1 Plastifikační přísady

U nás se ve větším měřítku začaly první plastifikační přísady používat v druhé polovině 50. let minulého století. Tehdy se zjistilo, že k neutralizaci nábojů na povrchu

cementových zrn je možné použít určité organické molekuly, známé pro své dispergační účinky. Tím dochází k eliminaci flokulace. Na obrázku č. 2 je znázorněn flokulovaný stav cementových zrn. [2], [3]



Obrázek 2: Flokulovaný stav cementových částic [2]

Plastifikační přísady se řadí mezi chemické látky, které svým složením a principem ovlivňují reologické vlastnosti betonu a zároveň nedochází ke zhoršení ostatních vlastností betonové směsi. Ztekucující přísady se dělí jak podle složení, tak i podle kapilární aktivity, která úzce souvisí s chemickou strukturou. [12]

Přísady redukující množství vody se využívají především pro redukci záměsové vody a tím dojde ke snižování vodního součinitele a to vede ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku a ke zlepšení trvanlivosti. Redukce množství vody a cementu, při zachování vyhovující zpracovatelnosti, vede k eliminaci dotvarování a smrštění. Zlepšením zpracovatelnosti čerstvého betonu lze omezit intenzivních vibrací při zhutňování betonu. [1]

Z fyzikálně chemického hlediska lze tento proces popsat jako adsorbce na rozhraní tuhá látka – kapalina. Při adsorbci z kapalného prostředí se můžou povrchy zrn v betonu posuzovat ze dvou hledisek. Prvním lze celý proces přisoudit působení chemických sil nebo molekulární přitažlivosti. Druhým způsobem je možné na něj pohlížet jako na útvar s velkou plochou mezi povrchy zrn, na které může dojít k hromadění rozpuštěných přísad schopných snížení mezipovrchového napětí. Oba uvedené vlivy mohou být uplatněny v závislosti na složení, vlastnostech přísady a pevných složkách betonu. [12]

K výrazné změně fyzikálně chemických podmínek vazby molekul vody na povrchu cementového zrna dochází zejména v počátečním stádiu hydratace.

Hydrofilní póly přísady, úměrné počtu adsorbovaných molekul, vážou přiměřený počet molekul vody. Tím dochází ke změně poměru mezi vodou volnou a vázanou, to je způsobeno při použití polárních přísad, dochází k redukci odlučování vody z betonové směsi a snižuje se sklon směsi k rozměšování. [12]

Aby mohla být v betonu použita ztekucující přísada, musí splňovat nejdůležitější kritéria. Nesmí s hydratačními produkty vytvářet nerozpustné sloučeniny, které by obalovaly cementová zrna a zabraňovaly by tak další hydrataci. Musí být stabilní v zásaditém prostředí, především v přebytku Ca^{2+} . Při míchání se nesmí vytvářet mikropěna aby nedošlo ke zvyšování pórovitosti cementového tmele. Tuhnutí cementu může pro praxi zanedbatelným způsobem ovlivňovat, pokud je nežádoucí polyfunkční princip působení. Nesmí dojít k nežádoucímu ovlivnění vlastností betonu po zatvrdnutí a ke korozivnímu působení na výztuž. [12]

Stěžejní výhodou těchto přísad je jejich výrazná redukce vody minimálně o 5 %, při dosažení stejné zpracovatelnosti nebo při zachování vodního součinitele zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu, této výhody lze využít u vodostavebních betonů, kde je potřeba dosáhnout nižší pórovitosti ztvrdlého cementového kamene. Stejný vodní součinitel s použitím ztekucujících přísad vede k úspoře cementu v betonové směsi a ta je následně vhodná pro betonáž masivních konstrukcí, protože dojde ke snížení vývinu hydratačního tepla. [3], [5]

Redukce vody má pozitivní vliv na vlastnosti ztvrdlého betonu. Beton díky eliminaci vody dosáhne nižšího množství vzduchových pórů, které vznikají vypařením vody, vzniká hutnější struktura, která má za následek vyšší objemové hmotnosti betonu a i pevnosti v tlaku. V normě ČSN EN 434 – 2 v Národní příloze NA 1 se uvádí, že pevnosti v tlaku u betonové směsi s použitou ztekucující přísadou mají být po 7 a 28 dnech minimálně o 10 % vyšší než pevnosti v tlaku zjištěné u referenčního betonu. [3], [13]

Upravená reologie betonu má význam i v oblasti transportbetonu a to zlepšení čerpatelnosti betonu a následně jeho zpracování. [3]

2.1.4.2 Superplastifikační přísady

První superplastifikační přísady byly používány spíše pro ztekucování betonových směsí, než ke snižování vodního součinitele. Hlavními důvody ke ztekucování betonu bylo pro jeho snadnější ukládání do bednění bez rizika k segregaci a ztráty pevností, které vznikaly dodatečným přidáváním vody. Tyto

přísady byly používány jako doplňující, kde se přidávaly v průběhu výroby transportbetonu k plastifikátorům na bázi lignosulfonanu. Během 80. let 20. století se zjistilo postupným zvyšováním dávek přísady silně redukující obsah vody nad limitní hodnoty uvedené výrobcí. Bylo zjištěno, že tyto přísady jsou účinnější než lignosulfonany a mohly být použity ve vyšších dávkách bez významnějších vedlejších účinků, kterými bylo zpomalování tuhnutí a zvýšení provzdušnění čerstvé betonové směsi. [2]

K velkým pokrokům patřilo snížení vodního součinitele až k hodnotě 0,3 a to i při zachování počáteční konzistence 200 mm sednutí kužele. Hodnota vodního součinitele 0,3 byla považována za bezpečnou pro zajištění dostatečné hydratace cementu. V laboratorním prostředí, při specifických podmínkách ošetřování, s intenzivnějšími vnějšími vibracemi bylo díky H. H. Bachemu dosaženo betonu o vodním součiniteli 0,16 a s pevností v tlaku až 280 MPa. Těchto hodnot bylo možné dosáhnout pomocí velmi jemně mletých plniv. Cementová zrna nezhydratují celá, pouze ta nejjemnější, nezhydratovaný cement v tomto případě již neslouží jako pojivo, ale plní funkci mikroplniva. [2], [4], [14]

Žádný plastifikátor nemá stejnou účinnost, proto je důležitý i jeho výběr. Minimum superplastifikátorů má stejný vliv na disperzi cementových zrn ve směsi, ovlivnění zpracovatelnosti směsi a redukci vody. Důvodem těchto rozdílů jsou takové, že platné normy jsou vyhotoveny tak, aby vyhovovaly dřívějším požadavkům, tedy redukce vody a zpracovatelnost u běžných betonů a vyvinuté superplastifikátory sloužily pouze ke zlepšení těchto vlastností. Podmínky užívání superplastifikátorů ve vysokohodnotných betonech jsou vzdáleny těm, které jsou uvedeny v platných normách. [3], [5]

Komerční superplastifikátory se podle chemického složení dělí do čtyř skupin:

- Superplastifikátory na bázi melaminů jsou běžně vyráběny jako číré kapaliny s obsahem sušiny od 22 % - 40 % u těch nejmodernějších. Z chemického hlediska jde o sodné soli sulfonovaných melaminů. Mezi jejich výhody se dá zařadit nižší zpoždění tuhnutí betonu, které mohou vyvolávat superplastifikátory na bázi naftalenu. Na rozdíl od naftalenu je nižší riziko předávkování, protože obsahuje poloviční množství sušiny. Melaminy se řadí mezi první používané superplastifikátory a přes stále dobré výsledky se používají dál. Na povrchu betonových dílců je vytvořeno méně vzduchových bublin, u architektonického betonu není

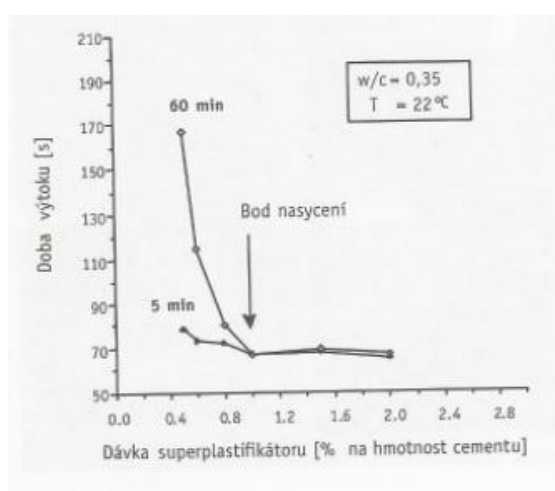
ovlivněna barva betonu, zachycují méně vzduchu než naftalenové superplastifikátory. Je snadné udržet stabilní a vhodné provzdušnění, mají ve většině případů velmi stálou kvalitu a účinnost. Tento druh čínidla redukuje obsah záměsové vody až o 20 %. [5], [15], [16]

- Naftalenové superplastifikátory jsou ve výrobě od roku 1960. Vyrábí se hnědé kapaliny s obsahem sušiny mezi 40 – 42 % nebo nahnědlý prášek. Obě tyto formy jsou sodné nebo vápenaté soli. Mezi jejich výhody patří snazší udržení vhodné reologie betonu (redukce vody až o 20 %), jsou ekonomicky výhodnější díky vyšší konkurenci výrobců. [5], [15], [16]
- U superplastifikátorů na bázi lignosulfonanů nesmí být překročena maximální mez, protože přítomnost některých příměsí v roztoku způsobuje vedlejší účinky přísady. Tento typ přísady se nepoužívá samotný k výrobě vysokohodnotných betonů, ale nejčastěji jsou použity s jinými ztekucujícími přísadami na bázi melaminu nebo naftalenu. Přísady na bázi naftalenu a lignosulfonanů mají jen nepatrné rozdíly v barevnosti, obsahu sušiny i viskozity. [5], [15]
- Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů se na trhu objevily na konci 90. let. Pro tyto plastifikační přísady je typická aktivní karboxylová skupina COOH. Tento typ ztekucovadla ve srovnání s polysulfonátem je účinnější a i potřebná dávka je nižší (o polovinu – třetinu). V současné době dokáží snížit vodní součinitel i pod hodnotu 0,25. [16] Skladba molekuly je tvořena z řetězců, z páteřního řetězce nesoucího záporný náboj a z bočních řetězců, které jsou nositeli elektricky neutrálních nábojů. Vlastnosti superplastifikátorů lze měnit a to tak, že účinnost roste s délkou bočních řetězců a naopak, kratší boční řetězce znamenají kratší dobu zpracovatelnosti betonu. Struktura připojených řetězců má vliv na adsorpci molekul na disperzní schopnosti, na pevné částice a na celkové schopnosti superplastifikátorů. Tento typ ztekucujících přísad je vhodný použít tehdy, bude-li vyráběn samozhutnitelný beton nebo pro jejich vysokou účinnost. [5], [15]

V rámci srovnání různých typů superplastifikátorů bylo prokázáno, že ztekucovadla na bázi polykarboxylátů vykazují vyšší provzdušnění a pro dosažení srovnatelných pevností postačí 4x nižší dávka. Zároveň je

dosaženo prodloužení zpracovatelnosti dvojnásobně až pětinasobně. [17], [18]

Dávkování superplastifikátoru do betonové směsi závisí na bodu nasycení. Bod nasycení je mez, ve které zvyšování dávky superplastifikátoru téměř nemá vliv na reologii betonové směsi. Tento bod je znázorněn na obr. č. 3. V určitých časových intervalech je měřen výtok betonové směsi s různou dávkou superplastifikátoru, vyjádřených jako procento sušiny k hmotnosti cementu, toto znázornění vede k získání křivky, která je složena ze dvou přímků různých sklonů. Bod nasycení je ovlivněn způsobem míchání. [2], [5]



Obrázek 3: Závislost doby výtoku na dávce superplastifikátoru se znázorněným bodem nasycení [5]

Optimální dávka superplastifikátoru závisí na tom, co za nejkritičtější požadavek je kladený na beton. Pokud to je pevnost v tlaku po delší době tak, pokud nejsou žádné komplikace s reologií, je vhodné použít vyšší dávku ztekucovadla a co možná nejnížší dávku vody. Jestliže jsou nejkritičtější požadavky v rámci reologie, je lepší když je do betonové záměsi přidáno takové množství vody, se kterým je možné dosáhnout požadovaných pevností a dávka plastifikátoru se následně upraví. V ostatních případech je nutné nalézt vhodný kompromis mezi množstvím ztekucovadla a vody tak, aby nebyly záporně ovlivněny pevnostní požadavky. [5]

Specifické požadavky pro silně vodoredukující přísady podle normy ČSN EN 934 – 2 v Národní příloze NA 1 se rozlišují podle stejné konzistence nebo stejného vodního součinitele. Při stejné konzistenci je redukce minimálně o 12 % ve srovnání s referenční betonovou směsí. Pevnost v tlaku po 1 dnu má být alespoň o 140 % vyšší a po 28 dnech vyšší než 115 % než je pevnost v tlaku u kontrolních směsí.

Pokud výrobce nestanoví jinak, má být obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi maximálně o 2 objemová % vyšší. Při stejném vodním součiniteli má být sednutí kužele minimálně 120 mm v porovnání s referenčním betonem, u kterého se bere sednutí kužele (30 ± 10 mm). Pevnost u betonu se stejným vodním součinitelem má být po 28 dnech minimálně 90 % z pevnosti tlaku po 28 dnech u referenčního betonu. [13], [19]

2.1.4.3 Provzdušňovací přísady

Provzdušňovací přísady se dají považovat za jeden z nejdůležitějších technologických pokroků ve stavebnictví v minulém století. Jde o chemické látky (přírodní pryskyřice, sodné soli mastných kyselin, sulfonované deriváty mastných kyselin a organické třísloviny) vytvářející stabilní uzavřené vzduchové póry, které zůstávají v betonové směsi i po jejím zatvrdnutí. Optimální průměr vzduchových bublin je $0,025 - 0,300 \mu\text{m}$. Póry mění pórovitou strukturu cementového tmele a výrazně ovlivňují trvanlivost betonu. Vlivem vzduchových bublin dochází k rozrušování sítě kapilár. Vzduch uzavřený v dutinách zlepšuje chování betonu proti účinkům mrazu a rozmrazování. [1], [3], [4], [20]

K získání významného množství dostatečně velkých vzduchových pórů se musí brát v úvahu faktory ovlivňující celkové provzdušnění betonu. Vliv mají velikost vodního součinitele, zpracovatelnost, podíl jemného kameniva, dávka a druh cementu, kvalita vody, teplota, vibrace, dávka provzdušňovače a způsob jeho dávkování. [4], [20]

Pozitivní nebo negativní vliv na pěnivost, povrchovou aktivitu nebo migraci bublin v betonové směsi mohou mít ionty obsažené v záměsové vodě obklopující vzduchové bubliny. Záměsová voda se neustále mění vlivem rozpouštěných látek a jejich koncentrace. Ve vodě mohou být obsaženy kationty (Ca^{2+} , Al^{3+} , Na^+ , K^+) a anionty (OH^- , SO_4^{2-}). [20]

Odolnost betonu je potřeba zvýšit vůči účinkům ledu, který vzniká v kapilárách cementového kamene z důvodu přechodu kapalného skupenství vody na pevné skupenství, který je doprovázen nárůstem objemu o cca 9 %. V případě používání rozmrazovacích prostředků je potřeba zajistit odolnost betonu i proti růstu krystalů chemických solí. Při použití provzdušňovací přísady dochází k hydrofobnímu účinku, kde díky jejímu působení zůstávají póry zaplněny vzduchem. Vlivem expandující vody v kapilárách dochází ke zvýšení hydrostatického tlaku, který působí na strukturu

cementového tmele a zvyšuje riziko vzniku trhlin. Pro eliminování vzniku trhlin vlivem hydrostatického tlaku se využívají právě uměle vyrobené vzduchové póry, které slouží jako pomyslný úložný prostor. [1], [4]

Požadavkem na provzdušněné betony je kromě jejich trvanlivosti během zmrazování a odmrazování především i na jejich pevnost v tlaku. Udává se, že s každým procentem vzduchu navíc v zatvrdlém betonu, se snižuje jeho pevnost v tlaku přibližně o 4 – 5 %. Minimální hodnota vzduchu v čerstvém betonu je podle normy ČSN EN 934 – 2 v Národní příloze NA 1 uvedena 4 – 6 objemových %. Pevnost v tlaku po 28 dnech u provzdušněného betonu nesmí klesnout o více než 25 % proti pevnostem v tlaku u referenčního betonu. [3]

2.1.4.4 Těsnící přísady

Tyto přísady snižují pórovitost betonu a zvyšují hutnost cementového kamene. Principem je zmenšení nebo úplné přerušení kapilár tím, že tyto přísady vytvářejí nerozpustné krystalické sloučeniny. Existují i takové typy těsnících přísad, které se dají použít dodatečně. Jsou to přípravky na cementové bázi a aplikují se nátěrem na ztvrdlý beton, pro zabezpečení jeho vodotěsnosti nebo plynotěsnosti. [1], [3], [4]

2.1.4.5 Přísady zpomalující tuhnutí

Látky, které prodlužují dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu. Prodlužují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do stavu tuhé látky. Tato přísada se používá zejména v letních měsících, při dopravě betonu na velké vzdálenosti.

Mezi takto účinné složky patří látky organické – sacharóza, celulóza, glycerin, huminové kyseliny; látky anorganické na bázi solí mědi, zinku a fosfáty.

V současné době je kladen důraz na betonáře v podobě nových environmentálních nařízení, která se mají zabývat odpadním betonem. K tomuto účelu byly vyvinuty superzpomalovače, které mají ovlivnit znovuoživení nespotřebovaného betonu. [3], [4], [5]

2.1.4.6 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí

Jsou to přísady, které zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do tuhé látky. Jejich využití je především tam, kde jsou potřeba vysoké počáteční pevnosti betonu (např. u stříkaných betonů, ochrana proti zmrznutí povrchu, nebo u prefabrikovaných výrobků k rychlejšímu odformování). [3], [4], [5]

Urychlovače patří mezi chemické přísady, které svým působením ovlivňují stupeň hydratace cementu. V průběhu prvních minut hydratace cementu působí urychlovače tuhnutí, ale v průběhu prvních dní působí urychlovače tvrdnutí. [3], [5]

Jsou vyráběny dva druhy urychlovačů tuhnutí, buď přísady na bázi křemičitanu sodného, které dokážou snížit dobu tuhnutí na 5 – 10 minut, pokud se místo portlandského cementu použije směsný cement, dochází ke snížení dlouhodobé pevnosti. Druhý druh urychlovače je na bázi vodné emulze síranu hlinitého, není natolik účinný ve zkracování doby tuhnutí, ale i při použití směsných cementů není snižována dlouhodobá pevnost betonu. [3], [5]

Urychlovače tvrdnutí jsou využívány tehdy, když je potřeba dosáhnout vyšších počátečních pevností, zejména 1 až 3denní. Urychlovačů je zapotřebí v zimě, kdy dochází k prodloužení doby potřebné k odbednění vlivem nízkých teplot nebo k získání manipulačních pevností u prefabrikovaných výrobků. [3]

2.1.4.7 Stabilizační přísady

Tyto přísady jsou používány tak, aby se zvýšila kvalita povrchu betonu a soudržnost betonu s výztuží tím, že redukují chemicky nevázanou vodu z cementové kaše a tak nedochází k sedimentaci tuhých částic tmelu. [3]

Původ těchto látek je anorganický nebo organický a dokážou svým účinkem vázat fyzikálně nebo chemicky volnou vodu tím, že s ní reagují, nebo v jednotce objemu zvětšují měrný povrch tuhých částic. [3]

Oproti referenčnímu betonu, který je vyroben podle ČSN EN 480 – 1, musí být dosaženo redukce odlučování vody až o 50 % a zároveň se nesmí snížit pevnost v tlaku betonu s použitou stabilizační přísadou po 28 dnech o více než 20 %. [19]

2.1.4.8 Ostatní přísady

Pod ostatní přísady lze zahrnout inhibitory koroze, používají se k oddálení vzniku koroze, případně zpomalení postupující koroze výztuže v betonech tím, že na povrchu výztuže vzniká pasivační vrstva. Inhibitory jsou složky na bázi dusitanu vápenatého, tento inhibitor se řadí mezi katodový, který se dává v dávce přibližně v 2 – 3 %. Ekonomicky výhodnější je dusičnan vápenatý, působící jako anodový inhibitor koroze. Dalšími inhibitory jsou organické sloučeniny, jakými jsou například tetra-butyl, tetra-fenyl fosfin, dusitan tetra-metyl. [1], [3], [4], [5]

Inhibitory alkalicko-křemičité reakce, tato reakce probíhá mezi alkalickými solemi sodíku nebo draslíku s danými formami reaktivního oxidu křemičitého

v kamenivu, který vyvolává vznik trhlin a vede až k místním rozpadům betonu. Inhibitorem proti alkalicko-křemičité reakce jsou soli na bázi solí lithia. Aplikace těchto solí je nejvhodnější hned od počátku vzniku alkalicko-křemičité reakce, škody jdou následně opravit bez dalšího nastartování alkalicko-křemičité reakce. [1], [3], [4], [5]

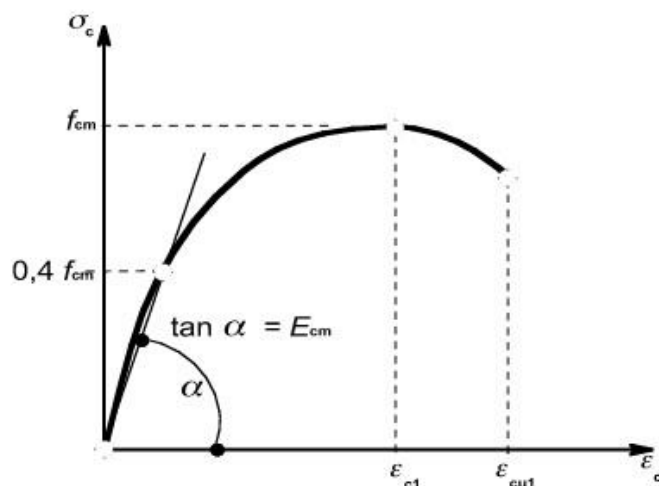
Hydrofobizační látky jsou aplikovány na povrch betonu, aby byla voda odpuzována. Tuto přísadu lze přimíchat i jako přísadu do betonové směsi. Odpuzování vody je způsobeno přeměnou ($\text{CH}_3 - \text{O} - \text{Si}$) skupiny na novou skupinu ($\text{HO} - \text{Si} -$). [1], [3], [4], [5]

Dalšími přísadami jsou biocidní eliminující biologické koroze betonu, plynotvorná nakypřuje beton díky chemické reakci s cementem, pěnотvorná přísada do betonu dostává velké množství stálých bublin, odpěňovací přísada má opačný účinek než předcházející, z betonu odstraňuje přebytečné množství bublin, které se v něm mohou vyskytnout účinkem jiné přísady, například plastifikační. [1], [3], [4], [5]

2.2 Modul pružnosti

Jednou z nejdůležitějších sledovaných vlastností u ztvrdlého betonu je z hlediska návrhu betonových konstrukcí modul pružnosti. Modul pružnosti popisuje schopnost betonu chovat se pod určitým zatížením pružně a určuje, do jaké míry se daný beton bude pod zatížením deformovat. Rozlišují se dva druhy deformací vratné (reversibilní) a plastické (irreversibilní). Vratné deformace jsou definovány krom modulu pružnosti i teplotní roztažností a částečně smrštěním betonu, které je způsobeno migrací vlhkosti. Druhým typem deformací objevující se v betonu jsou ovlivněny částečně smrštěním, zapříčiněné hydratací a karbonatací a dotvarování způsobené dlouhotrvajícím zatížením. [1], [2], [21]

Modul pružnosti je závislost napětí na přetvoření. Průběh zatěžování je znázorněn na obr. č. 4. Z počátku zatěžování je přetvoření lineární, uvádí se do hodnoty 30 % napětí při zlomu. Tato část křivky se posuzuje podle pevnosti betonu a Hookova zákona. Při dosažení napětí asi 30 % zlomového napětí dochází k trvalým deformacím a vznikají trhlinky. Záznamem měření jsou dvě veličiny – zatížení a deformace tímto zatížením vyvolaná. [1], [2]



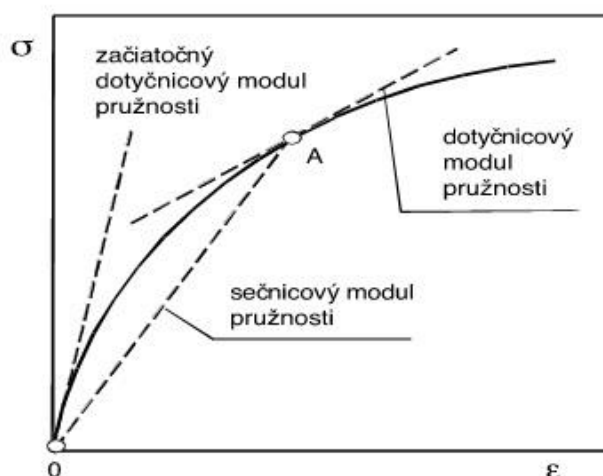
Obrázek 4: Modul pružnosti betonu [23]

Vlivy ovlivňující stanovení modulu pružnosti jsou rozděleny do dvou skupin, kde první skupinu tvoří vlivy technologické a zkušební. Do první skupiny se dá zařadit složení čerstvého betonu, technologie výroby, ošetřování betonu, kdy se modul pružnosti zvyšuje, pokud jsou vzorky uloženy po celou dobu zrání ve vodě a naopak se snižuje, pokud jsou vystaveny působení suchého vzduchu. Za použití tepelného urychlování tvrdnutí betonu, snižuje se hodnota modulu pružnosti až o 10 %. Posledními položkami v této skupině jsou zpracování čerstvé betonové směsi a na závěr i přeprava čerstvého betonu. Ve druhé skupině jsou zařazeny tvar a velikost zkušebního tělesa, způsob získání tělesa, zakončení tlačných ploch tělesa, druh použité zkušební metody, výpočetní vztah, rychlost zatěžování, prostředí během zkoušky. [1], [22]

Z vypsání vlastností vyplývá, že největší podíl na výsledný modul pružnosti mají vlivy technologické, kdy změnou složení betonu nebo jeho zpracováním, vedou k výraznějším změnám modulu pružnosti. Naopak vlivy zkušební mají oporu v normách, kde jsou definovány okrajové podmínky jednotlivé postupy pro vykonávání zkoušek a následně jejich vyhodnocení. [22]

Modul pružnosti se dělí na statický a dynamický (viz následující kapitoly) a podle čtení z grafu (obr. č. 5) se modul pružnosti dělí na tečnový a sečnový. Tečnový modul pružnosti má vyšší hodnoty na počátku, tedy $\epsilon = 0$ a $\sigma = 0$, kde je přímka strmější. Sečnový modul pružnosti je spojnice bodů 0 a A. Pokud není přetvoření betonu lineární, je modul pružnosti závislý na napětí. Tento modul je definovaný

Hookovým zákonem (3). Tečnový modul pružnosti je získán z nedestruktivních měření a sečnový odpovídá hodnotám získaných z lisu. [1], [23]



Obrázek 5: Závislost mezi napětím σ a poměrným přetvořením ϵ [23]

2.2.1 Statický modul pružnosti

Stanovují se dva typy modulu pružnosti a to buď statický, nebo dynamický. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku je prováděno na tělesech vyhovujících požadavkům ČSN ISO 1920, tedy pouze za předpokladu, že poměr délky k průměru je vyšší než 2 a zároveň nižší než 4. Vyhovující zkušební tělesa jsou válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm, nebo hranoly o rozměrech 100 · 100 · 400 mm. Norma zabývající stanovením statického modulu pružnosti v tlaku ČSN ISO 6784 upřednostňuje zkušební tělesa v podobě válců i přes to, že bylo dokázáno, že na zkušebních tělesech mající tvar trámce 100 · 100 · 400 mm byly naměřeny vyšší hodnoty modulu pružnosti přibližně až o 23 % než jsou hodnoty modulu pružnosti naměřené na válcových zkušebních tělesech. [21], [22], [24], [25]

Zkušební zařízení - zkušební lis, kterým je možné vyvodit vyhovující zatížení se stanoveným časovým nárůstem napětí a následnou výdrží na dané hodnotě. Na dvou protilehlých stranách zkušebního tělesa je umístěno měřicí zařízení zachycující změny délky. Měřicím přístrojem může být odporový tenzometr, indukční tenzometr, strunový tenzometr, zrcátkový nebo hodinkový deformometr. [25]

Zkušební těleso osazené měřicím zařízením se umístí do středu zkušebního lisu a zatíží se základním napětím $0,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a zaznamenají se veškeré údaje na všech přístrojích. Následně se napětí plynule zvyšuje $(0,6 \pm 0,4) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ za sekundu do $1/3$ pevnosti tlaku betonu. Toto napětí se udržuje 60 s a během

následujících 30 s se zaznamenají naměřené hodnoty. Pokud se jednotlivá přetvoření o více než 20 % liší, je nutné opravit centraci zkušebního vzorku ve zkušebním zařízení. Pokud nelze snížit rozdíly pod 20 % nelze výsledek zkoušky uvažovat z důvodu velmi výrazně ovlivněných výsledků. [22], [25]

Po srovnání centrace zkušebního vzorku se zatížení na základní napětí snižuje stejnou rychlostí, jako byla při zatěžování. Předběžný cyklus se opakuje dvakrát. Po dokončeném posledním měření se vyčká 60 s při napětí $0,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a během následujících 30 s se zaznamenají poměrná přetvoření. [25]

Vyhodnocení statického modulu pružnosti v tlaku E_c je dán Hookovým zákonem (3).

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Kde je E_c - modul pružnosti, σ - vyvozené napětí a ε - poměrné přetvoření.

Výsledek měření se zaokrouhlí na 100 MPa, pokud je $E_c > 10 \text{ GPa}$ zaokrouhluje se na 500 MPa. [25]

2.2.2 Dynamický modul pružnosti

Stanovení dynamického modulu pružnosti je nedestruktivní zkouškou, kde beton není vystavený reálnému zatížení, a tedy ve vzorku nepůsobí žádné napětí, které by způsobovalo případný vznik mikrotrhlin na rozhraní cementového tmele a kameniva. Proto dynamický modul odpovídá tečnovému modulu pružnosti. Mezi nejčastější metody zkoušení patří metoda ultrazvuková, nebo rezonanční. [1], [23]

Ve srovnání se statickým modulem jsou výhodami u dynamického modulu pružnosti jednoduchost a rychlost. Naopak mezi nevýhody se dá zařadit nepřesnost naměřených hodnot. [23]

2.2.2.1 Rezananční metoda

Rezananční metoda zkoušení betonových vzorků je založena na principu měření některé z vlastních frekvencí kmitání zkušebního tělesa. Naměřené hodnoty spolu s ostatními veličinami zkušebního tělesa mohou sloužit k určení ostatních fyzikálně mechanických vlastností. Na základě odvozených vztahů lze vyjádřit závislost mezi kmitočtem kmitání a pružností betonu. Kmitočet zkušebního vzorku je závislý na objemové hmotnosti, tvaru, velikosti a modulu pružnosti. [26]

Zkušební zařízení pro zkoušení rezonanční metodou musí umožňovat zjištění rezonančních kmitočtů mechanického kmitání zkušebního tělesa. Použitý budič a snímač nesmí ovlivňovat kmitání zkušebního tělesa. Na materiálovém tlumení a přesnosti zjištění kmitočtu na přístroji závisí stanovení některého vlastního rezonančního kmitočtu. [26]

Zkušební těleso, mající zpravidla tvar válců nebo hranolů s délkou nejméně dvojnásobku rozměru delší strany základny, se umístí na podložku z pružného materiálu, aby nedošlo k útlumu kmitání vzorku. V dalším případě se může zkušební vzorek podložit v předpokládaných uzlech kmitání, které se nepohybují. V místech předpokládaných maximálních amplitud kmitání, podle druhu a cíle zkoušky může jít o příčné, podélné, kroutivé. K rozkmitání zkušebního tělesa dojde plynulou změnou frekvence budícího zařízení. Vzniklé kmitání se snímá snímačem, který zaznamenává velikost amplitudy. Zkušební těleso rezonuje, pokud je frekvence budícího zařízení totožná s vlastní frekvencí tělesa. [26]

Dynamický modul pružnosti betonu E_{crf} se vypočítá podle následujícího vztahu (4).

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

Kde je E_{crf} – dynamický modul pružnosti, c_1 - korekční součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů při kmitání zkušebního tělesa a závisí na poloměru setrvačnosti hranolu (5), nebo válce (6) - i k délce zkušebního tělesa - L , f_f - první vlastní kmitočet příčného kmitání, ρ - objemová hmotnost betonu.

$$i = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

$$i = \frac{d}{4} \quad (6)$$

Kde je a – délka strany základny hranolu, d – průměr válce. [26]

2.2.2.2 Ultrazvuková metoda

Druhou nedestruktivní metodou pro zjištění modulu pružnosti betonu je metoda ultrazvuková impulzová. Touto metodou se zjišťují i případné poruchy betonových dílců, nebo konstrukcí. U této metody existují dva způsoby vyšetřování vlastností konstrukce. První je stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu zkoumaným

prostředím. Tento způsob naznačuje fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu a případné jeho defekty. Rychlost šíření má úzkou vazbu na hutnost a modul pružnosti materiálu, konkrétně na vlastnostech kameniva. Druhým způsobem vyšetřování je metoda odrazová, která je vhodná k zachycení odrazu ultrazvukového signálu od defektu, cizího tělesa případně od nehomogenity v konstrukci. Velký význam této metody spočívá ve zjišťování homogenity zkoušeného materiálu a snadno dopočitatelné hodnoty dynamického modulu pružnosti. Tato metoda spočívá ve stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění. Ke zkušebnímu zařízení patří i kalibrační prvek pro ověření přesnosti měření doby průchodu ultrazvukového vlnění. V závislosti na nejmenším rozměru tělesa, délce základny a pevnosti betonu se volí pracovní kmitočet v rozmezí 20 kHz – 150 kHz. Měření musí být uskutečněno při teplotě v rozmezí 10 °C – 30 °C. [27], [28], [29]

Při stanovení rychlosti šíření impulsu je nutné dodržení teploty a rozmezí pracovních kmitočtů. Budiče se volí s ohledem na vlivy, které mohou ovlivnit rychlost šíření impulsu. Velký důraz je kladen na délku vlny λ ve vztahu k rozměrnosti. Prioritně je měření prováděno v trojrozměrném prostředí, pokud tomu tak není, je nutné provést přepočet z jednorozměrného nebo dvourozměrného prostředí na trojrozměrné. Čas šíření čela impulsů je závislý na uspořádání sond (budiče, snímače). Prozvučování se dělí na nepřímé, polopřímé a přímé. [27]

Dynamický modul pružnosti E_{cu} lze vyvodit z následujícího vztahu (7).

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (7)$$

Kde je E_{cu} – dynamický modul pružnosti ρ - objemová hmotnost betonu, v_L - impulzová rychlost podélného ultrazvukového vlnění (8), k - součinitel rozměrnosti prostředí (9, 10).

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (8)$$

Kde je T – čas, který uplyne při průběhu impulsu měřící základnou. [27]

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - v_{cu}^2}} \quad (9)$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - v_{cu}}{(1 - v_{cu}) \cdot (1 - 2v_{cu})}} \quad (10)$$

Kde je $k_{2,3}$ – součinitel rozměrnosti prostředí (jednorozměrné k_1 : a, b nebo $d < 0,2 \cdot \lambda_L$; k_2 : pro tenké desky, kde tloušťka desky je menší nebo rovna $0,2 \cdot \lambda_L$; k_3 : a, b nebo $d > 2 \cdot \lambda_L$), v_{cu} – Poissonova konstanta. [26], [27]

2.2.3 Vlivy ovlivňující modul pružnosti

V první řadě nejvíc ovlivňuje modul pružnosti vodní součinitel. Je důležité stanovit optimální vodní součinitel. Udává se, že hodnota 0,21 zajistí dostatečné množství vody pro hydrataci cementu. Pokud by byla hodnota vodního součinitele nižší, nebyl by dostatek vody pro hydrataci cementu. Dodatečným ošetřováním betonových vzorků se dostává voda z vnějšku do hutné struktury těžko. Nedostatek vody ve struktuře betonu vede k tzv. samovysychání betonu, kterým by mohlo dojít ke vzniku mikrotrhlin a tím k nižším hodnotám modulu pružnosti. Nižší hodnoty modulu pružnosti jsou zapříčiněny i naopak vysokým vodním součinitelem, kdy se nadbytečná voda ze struktury vypaří a ve ztvrdlém betonu zůstanou vzduchové póry. [4], [30]

Je známo, že největší vliv na modul pružnosti betonu má kamenivo. Modul pružnosti samotného kameniva je mnohem vyšší než modul pružnosti cementového tmele. Záleží ovšem na druhu kameniva a hutnosti cementového kamene. Nižší hodnoty modulu pružnosti se v tomto případě objevují na rozhraní kameniva a cementového tmele, kde je nejvyšší riziko ke vzniku mikrotrhlin. Naopak, pokud bude požadován vyšší modul pružnosti, je nutná pečlivá volba vhodného kameniva s minimálním podílem jemných částic na povrchu zrn, které způsobují špatnou soudržnost s cementovým tmelem. [23], [30]

Dalším významným faktorem ovlivňujícím hodnoty modulu pružnosti je pórovitost. Zvýšené pórovitosti dosáhneme, aniž by se přidala provzdušňovací přísada, vyšším vodním součinitelem nebo špatným zhutněním. Eliminovat pórovitost lze buď úpravou vodního součinitele, jak již byl zmíněno v předchozích odstavcích nebo důkladným vibrováním. Udává se, že modul pružnosti je úměrný třetí mocnině z poměru cementový tmel / vzduchové bubliny (11). [23]

$$E_p = E_g \cdot (1 - P_c)^3 \quad (11)$$

Kde je E_p – modul pružnosti zatvrdlé cementové pasty, E_g – modul pružnosti zatvrdlé cementové pasty při nulové pórovitosti, P_c – kapilární pórovitost. [23], [31]

2.2.4 Poissonova konstanta

Poissonova konstanta je charakterizována poměrem příčné a podélné deformace. Deformace se projevuje podélným protažením a stlačením. Měření Poissonovy konstanty není jednoduché, je nutné současné měření axiálního zatížení, axiální deformace a příčné deformace při konstantním zatěžování. [1], [2]

Hodnoty pro výpočet Poissonovy konstanty vycházejí ze zjišťování modulu pružnosti rezonanční metodou. Jsou dva způsoby výpočtů, první vychází z dynamického modulu pružnosti v tlaku / tahu a dynamického modulu pružnosti ve smyku (12). Druhý způsob výpočtu je založen na prvních vlastních kmitočtech podélného a kroutivého kmitání (13). [26]

V české státní normě ČSN 73 1372 se udává hodnota pro betony 0,2.

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (12)$$

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (13)$$

Kde je ν_{cr} – Poissonova konstanta, E_{cr} – dynamický modul pružnosti v tlaku / tahu, G_{cr} – dynamický modul pružnosti ve smyku, k – koeficient závislý na tvaru průřezu vyjádřený jako poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti kroucení, f_L – první vlastní kmitočet podélného kmitání zkušební tělesa, f_t – první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušební tělesa. [26]

2.2.5 Souvislost mezi modulem pružnosti a pevností betonu v tlaku

Nejčastěji je modul pružnosti vztahován k pevnosti betonu v tlaku. Tedy že modul pružnosti narůstá se zvyšováním pevnosti betonu v tlaku. Závislost mezi těmito mechanickými vlastnostmi není lineární. Pro běžný beton, kde hraje velkou roli zatvrdlá pasta, která je ovlivňována hodnotou vodního součinitele, je udáván vztah (14). [2], [23]

$$E'_c = \psi \cdot (f_c^{1/n}) \quad (14)$$

Kde je ψ – konstanta závislá na použitých jednotkách a na způsobu měření pevnosti (zda krychelná nebo válcová), f_c – pevnost betonu v tlaku. [2], [5], [23]

V důsledku používání vysokohodnotných betonů se ukázalo, že co je vhodné pro běžný beton není vhodné pro vysokohodnotný beton. To vedlo k odvozování nových výpočtových vztahů, protože jednoduché vztahy, které doposud stačily, nevystihovaly mechanismy ve vysokohodnotném betonu. Největší vliv na tuto skutečnost mají zrna kameniva, která ve velké míře ovlivňují vlastnosti „nových“ betonů. Nielsen a Aitcin uvádějí, že betony stejných pevností z kameniv o různých modulech pružnosti zásadně ovlivní modul pružnosti ztvrdlého betonu (15). [2], [32]

$$E_c = K_0 + 0,2 \cdot f_c \quad (15)$$

Kde je E_c - modul pružnosti, K_0 – faktor závislé na typu kameniva, f_c – pevnost betonu v tlaku. [2]

Souvislost mezi pevností betonu v tlaku a modulem pružnosti betonu je podle Nevilla pro běžné betony vzorec vycházející ze vztahu (14), kdy koeficient ψ je konkretizován hodnotou 4,73 a exponentem je $\frac{1}{2}$. Pro ostatní betony obdobného složení s pevností do 83 MPa platí vztah (16). [23]

$$E_c = 3,32 \cdot (f_c)^{0,5} + 6,9 \quad (16)$$

Kde je E_c – modul pružnosti a f_c – pevnost betonu v tlaku. [23]

Pro betony s většími rozdíly ve složení betonu, typem použitého kameniva, druhu cementu, použitých příměsí i přísad, mohou být tyto souvislosti zcela odlišné. [23]

2.2.6 Spojitost mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti

Mezi dynamickým a statickým modulem se uvádí několik výpočetních vztahů, které jsou kvůli různé heterogenitě betonové směsi nejednoznačné. Podle české normy ČSN 73 2011 vychází statický modul pružnosti nižší než dynamický modul pružnosti. Pro častější využívání nedestruktivních metod ke zjištění statických modulů je nutné znát zmenšovací součinitele. Pro již výše zmíněné metody měření

existují „převáděcí“ vzorce i se zmenšovacími součiniteli, tedy pro měření ultrazvukovou (17) nebo rezonanční metodou (18). [23], [33]

$$E_c = \frac{E_{cu}}{n} \cdot K_u \quad (17)$$

$$E_c = \frac{E_{cr}}{n} \cdot K_r \quad (18)$$

Kde je E_c – statický modul pružnosti, E_{cu} – dynamický modul pružnosti ultrazvukovou metodou, E_{cr} – dynamický modul pružnosti rezonanční metodou, n – počet zkušebních míst, K_u – součinitel pro přepočet dynamického modulu pružnosti z měření ultrazvukovou metodou na statický modul pružnosti, K_r – součinitel pro přepočet dynamického modulu pružnosti z měření rezonanční metodou na statický modul pružnosti. [33]

Pro běžné betony jsou hodnoty zmenšovacích součinitelů uvedeny v tabulce č. 1. Je nutné si uvědomit, že hodnoty v tabulce č. 1 byly uvedeny pro betony vyrábějící se před 30–ti lety. V současné době, kdy se betony vyrábějí odlišnými způsoby za pomoci moderních přísad upravujících konečné vlastnosti ztvrdlého betonu, jsou závislosti již neplatné. Hodnoty zmenšovacích součinitelů jsou ovlivňovány stejnými faktory jako u modulu pružnosti. [34]

Tabulka 1: Hodnoty zmenšovacích koeficientů pro přepočet dynamických modulů ultrazvukovou metodou K_u a rezonanční metodou K_r pro získání statického modulu pružnosti pro jednotlivé třídy betonu. [34]

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

Balendran a Lydon uvádějí nejjednodušší empirický vztah (19) pro převedení dynamického modulu na statický. [35]

$$E_c = 0,83 \cdot E_d \quad (19)$$

Kde je E_c – statický modul pružnosti a E_d – dynamický modul pružnosti. [35]

3. Praktická část

Praktickou část je možno rozdělit do několika fází. Prvním krokem byl návrh receptury pro beton C 30/37, hodnota vodního součinitele pro tuto třídu betonu byla navržena 0,45, ve všech případech byl použit cement Prachovice, kamenivo frakce 8 – 16 a 4 – 8 z lokality Plaňany a drobné kamenivo frakce 0 – 4 Kolín, veškeré přísady byly vyrobeny ve firmě STACHEMA CZ s. r. o. Různými dílčími úpravami vzniklo 10 variant.

První záměs byla referenční bez veškerých přísad (viz. tab. č. 2), další 4 byly navrženy s různými druhy superplastifikátorů o stejných dávkách. Konkrétními typy byly superplastifikátory na bázi polykarboxilátu, modifikované pryskyřice, sulfonovaný polykondenzát a posledním typem byly melaminové polymery (tab. č. 3 - 6). Následně byla navržena receptura pouze s provzdušňovací přísadou (tab. č. 7), a poslední čtyři receptury byly navrženy tak, že k jednotlivým superplastifikátorům byla přidána provzdušňující přísada (tab. č. 8 – 11).

Dalším krokem byla výroba čerstvé betonové směsi. Veškeré záměsi byly vyrobeny během dvou dnů, aby došlo k eliminování změn vlastností, způsobené vlhkostí obsažené v kamenivu frakce 0 – 4. Na čerstvém betonu byla zkoušena konzistence sednutím kužele podle normy ČSN EN 12 350 - 2, měření obsahu vzduchu tlakovou metodou podle ČSN EN 12 350 - 7 a objemová hmotnost dle normy ČSN EN 12 350 - 6. Formy byly (krychle 150 · 150 · 150 mm a trámce 100 · 100 · 400 mm) plněny podle normy ČSN EN 12 390 – 2.

Následující fází bylo odformování všech zkušebních těles po 24 hodinách a jejich uložení do vlhkého prostředí (krychle) a vodního prostředí (trámce). Po (28 ± 1) dnech proběhly zkoušky na ztvrdlých betonových vzorcích. Na krychlích byla zjištěna objemová hmotnost betonu podle normy ČSN EN 12 390 – 7 a následně měřena pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12 390 – 3. Na trámcích proběhly zkoušky ke

stanovení dynamického modulu ultrazvukovou metodou (ČSN 73 1371) a následně pro stanovení statického modulu pružnosti (ČSN EN 12 390 – 13).

Posledním krokem bylo následné vyhodnocení naměřených hodnot.

3.1 Složení jednotlivých záměsí

Tabulka 2: Označení jednotlivých záměsí a jejich specifikace

Označení	Specifikace
Záměs I	referenční beton
Záměs II	přísada na bázi polykarboxylátu
Záměs III	přísada na bázi modifikované pryskyřice
Záměs IV	přísada na bázi sulfonovaného polykondenzátu
Záměs V	přísada na bázi melaminových polymerů
Záměs I – P	provzdušňovací přísada
Záměs II – P	přísada na bázi polykarboxylátu a provzdušňovadlo
Záměs III – P	přísada na bázi modifikované pryskyřice a provzdušňovadlo
Záměs IV – P	přísada na bázi modifikované pryskyřice a provzdušňovadlo
Záměs V – P	přísada na bázi sulfonovaného polykondenzátu ,provzdušňovadlo

Tabulka 3: Záměs I

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197

Tabulka 4: Záměs II

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi polykarboxilátu	3,8

Tabulka 5: Záměs III

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi modifikované pryskyřice	3,8

Tabulka 6: Záměs IV

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi sulfonovaného polykondenzátu	3,8

Tabulka 7: Záměs V

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi melaninových polymerů	3,8

Tabulka 8: Záměs I - P

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
Voda	197
přísada provzdušňovací	0,76

Tabulka 9: Záměs II - P

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
Voda	197
přísada na bázi polykarboxilátu	3,8
přísada provzdušňovací	0,76

Tabulka 10: Záměs III - P

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi modifikované pryskyřice	3,8
přísada provzdušňovací	0,76

Tabulka 11: Záměs IV - P

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi sulfonovaného polykondenzátu	3,8
přísada provzdušňovací	0,76

Tabulka 12: Záměs V - P

Složky	1 m ³ [kg]
CEM I 42,5 R (Prachovice)	380
drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Kolín	933
hrubé těžené kamenivo 4 – 8 mm, Plaňany	273
hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Plaňany	637
voda	197
přísada na bázi melaninových polymerů	3,8
přísada provzdušňovací	0,76

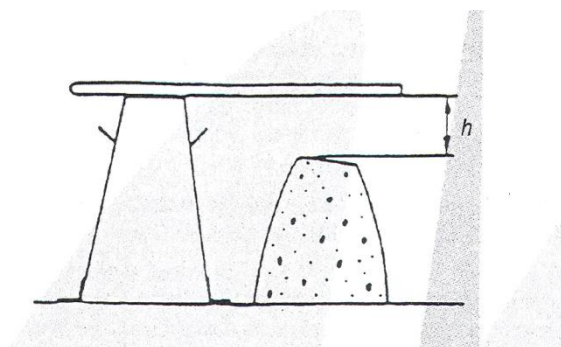
3.2 Výsledky zkoušek

3.2.1 Stanovení konzistence

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12 350 - 2. Na podložku se postaví Abramsův kužel, přišlápne se k podložce a naplní se ve 3 vrstvách. Každá vrstva se zhutní rovnoměrně 25 vpichy hutnící tyčí. Druhá a třetí vrstva se zhutní přes celou výšku vrstvy tak, aby vpichy zasahovaly do předchozí vrstvy. Poslední vrstva se plní přes okraj. Odstraní se násypka, zarovná se hutnící tyčí a podložka se očistí od betonu. Kužel se přitlačí k podložce a pak se plynule svisle zvedá, doba zvedání je 2 – 5 s. Provede se odečtení rozdílů výšek nejvyššího bodu sednutého kužele a formy (obr. č. 6) se zaokrouhlením na 10 mm a určí se konzistence (tab. č. 12). Celá zkouška, od plnění formy až po její zvednutí, musí proběhnout do 150 s. Zkouška se provede dvakrát.

Tabulka 13: Sednutí kužele

Sednutí kužele [mm]	
S1	10 - 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	220 +

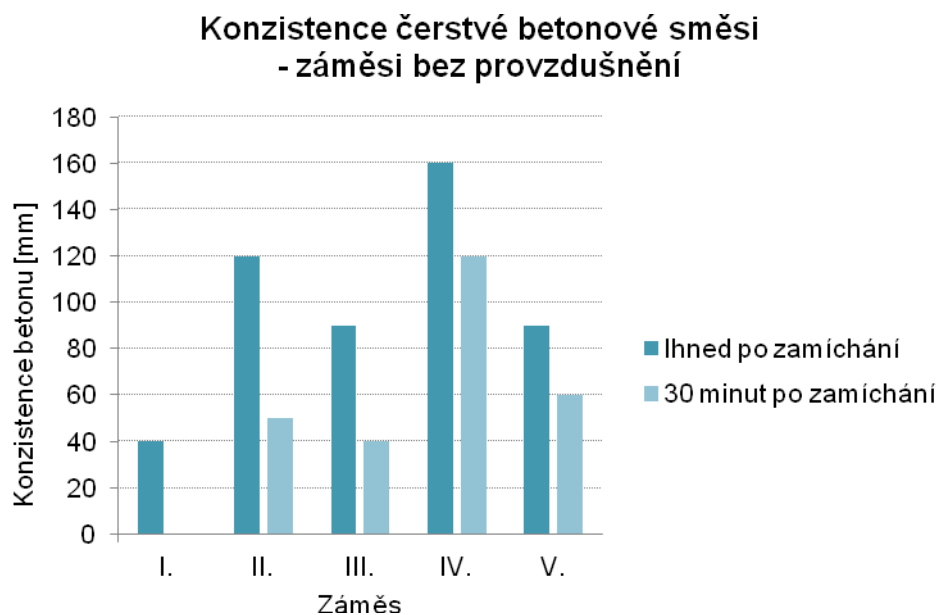


Obrázek 6: Sednutí kužele

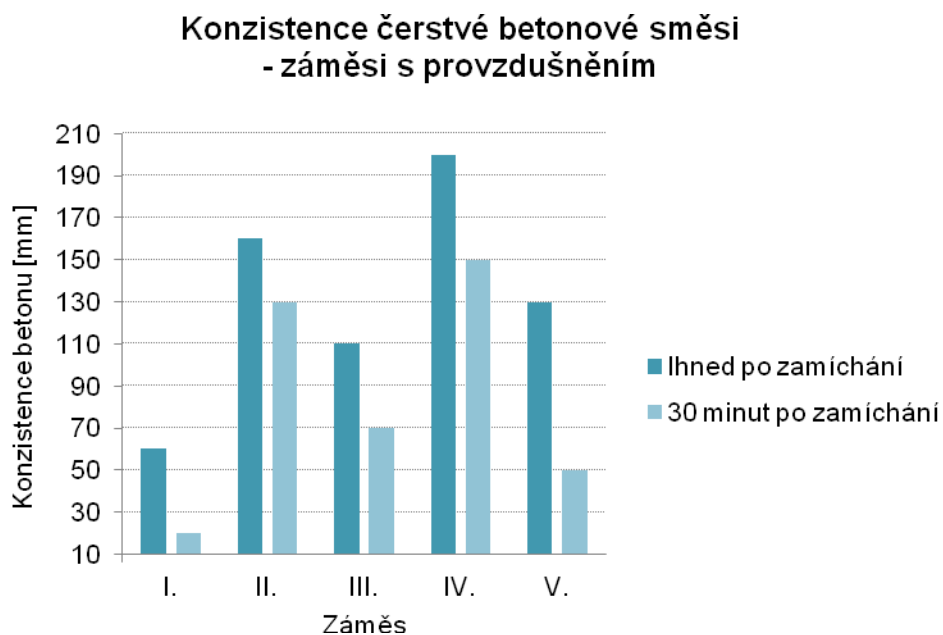
Naměřené hodnoty:

Tabulka 14: Konzistence betonu ihned po zamíchání a po 30 minutách

Záměs	Sednutí kuželu ihned po zamíchání [mm]	Zařazení	Sednutí kuželu po 30 minutách [mm]	Zařazení
I	40	S1	0	-
II	120	S3	50	S2
III	90	S2	40	S1
IV	160	S4	120	S3
V	90	S2	60	S2
I P	60	S2	20	S1
II P	160	S4	130	S3
III P	110	S3	70	S2
IV P	200	S4	150	S3
V P	130	S3	50	S2



Graf 1: Konzistence čerstvé betonové směsi – záměsi bez provzdušnění



Graf 2: Konzistence čerstvé betonové směsi – záměsi s provzdušněním

Vyhodnocení:

Na jednotlivých grafech je vidět výrazný vliv superplastifikační a provzdušňovací přísady na konzistenci betonu. Ihned po zamíchání je dosaženo 2x – 4x vyššího ztekucení než u referenčního betonu. Na grafu č. 2 je vidět, že i provzdušnění má vliv na konzistenci betonu. V obou případech je vidět výrazný pokles zpracovatelnosti v průběhu 30 minut, avšak u provzdušněných vzorků je tento pokles nižší.

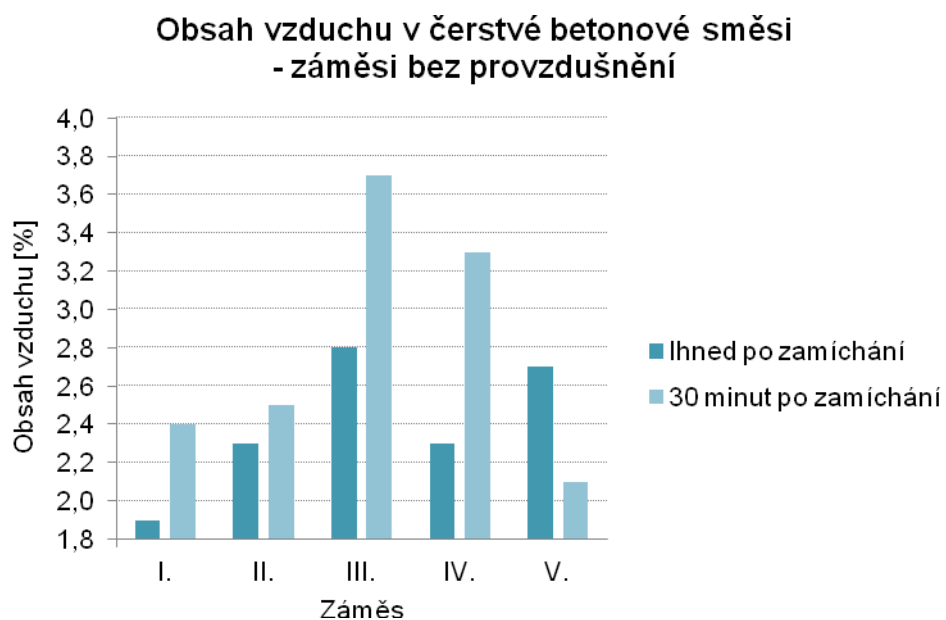
3.2.2 Stanovení obsahu vzduchu tlakovou metodou

Tlaková nádoba se naplní ve třech vrstvách a každá vrstva se zhutní 25 vpichy hutnící tyčí. Po naplnění nádoby se odstraní přebytečný beton, očistí se horní hrana nádoby, zamezí se vzniku nepřesností. Okraje se poklepou gumovou paličkou.

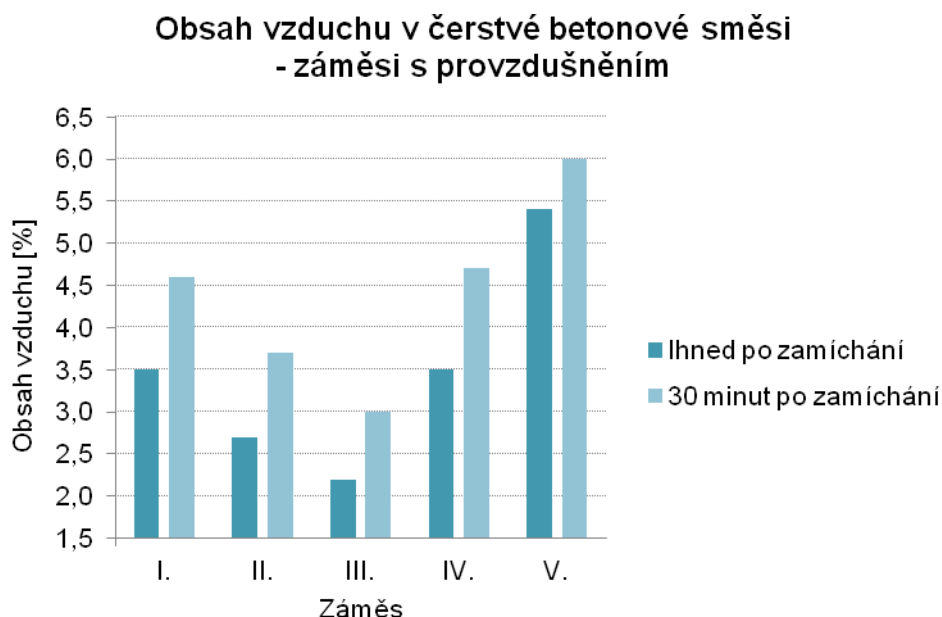
Po uzavření nádoby se vytlačí vzduch přes ventil pomocí stříčky dokud z druhého ventilu nebude souvisle vytékat čirá voda bez bublin. Uzavřou se ventily a natlakuje se nádoba. Upouštěním ventilem se vyrovná tlak, aby rafička ukazovala nulu. Po převedení tlaku do komory je výsledná hodnota obsah vzduchu v pórech, při měření se musí poklepávat na ciferník. Tato metoda se provádí podle české státní normy ČSN EN 12 350 – 7.

Tabulka 15: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi ihned po zamíchání a 30 minut po zamíchání

Záměs	Obsah vzduchu ihned po zamíchání [%]	Obsah vzduchu po 30 minutách [%]
I	1,9	2,4
II	2,3	2,5
III	2,8	3,7
IV	2,3	3,3
V	2,7	2,1
I – P	3,5	4,6
II – P	2,7	3,7
III – P	2,2	3,0
IV - P	3,5	4,7
V – P	5,4	6,0



Graf 3: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi – záměsi bez provzdušnění



Graf 4: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi – záměsi s provzdušněním

Vyhodnocení:

Obsah vzduchu u neprovzdušněného betonu je normou limitován do 2 % a u provzdušněných betonů je horní hranice obsahu vzduchu zvýšená a má se pohybovat od 4 – 6 %. Z neprovzdušněných betonů bylo kritérium splněno pouze u referenčního vzorku. Po 30 minutách došlo ve většině případů ke zvýšení obsahu vzduchu v betonové směsi. Rozdílný obsah vzduchu v čerstvém betonu může být způsoben délkou a způsobem míchání, intenzitou hutnění. Dalším nezanedbatelným vlivem na obsah vzduchu v čerstvém betonu může mít i způsob dávkování během samotného míchání.

Po 30 minutách došlo u všech záměsů ke snížení konzistence a tím ke zvýšení pórovitosti betonu vlivem horšího hutnění.

3.2.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu

U čerstvého betonu se objemová hmotnost vypočte tak, že se nádoba známého objemu naplní čerstvou betonovou směsí, zhutní se a následně se zváží. Zjištěná hmotnost betonové směsi se vydělí objemem naplněné nádoby. Podle české státní normy ČSN EN 12 390 – 7 lze objemová hmotnost ztvrdlého betonu stanovit třemi způsoby. Zkušební těleso jak bylo dodáno, nasyceno vodou (alespoň 2 dny ve vodě) nebo vysušeno v sušárně. Stanovení objemu je možné buď pomocí hydrostatického vážení (ponoření zkušební tělesa do vody); výpočtem z kontrolovaných

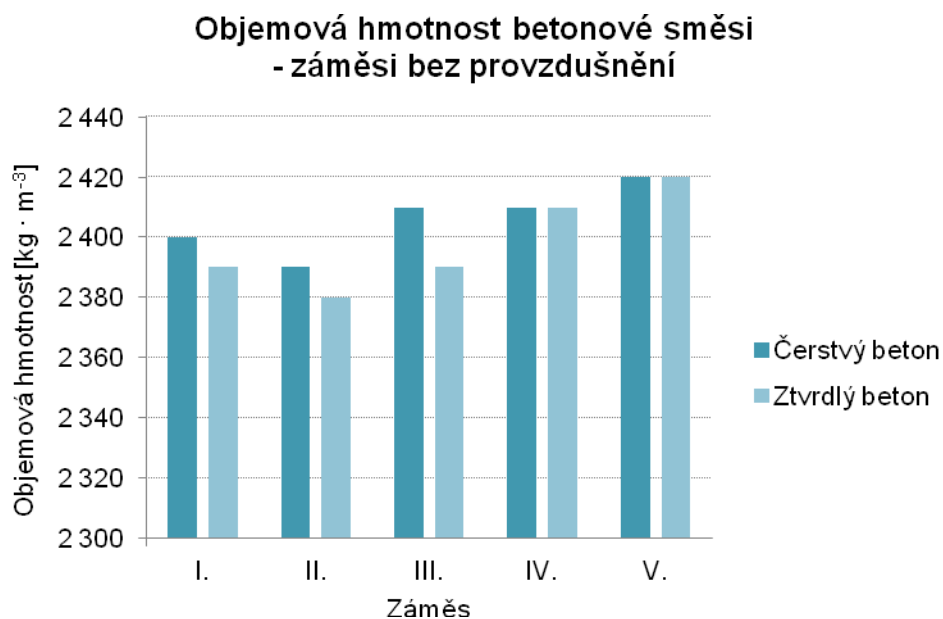
jmenovitých rozměrů (u krychlí); nejčastějším způsobem je výpočet ze změření skutečných rozměrů, následně se tělesa postupně zváží (20).

$$D = \frac{m}{V} \quad (20)$$

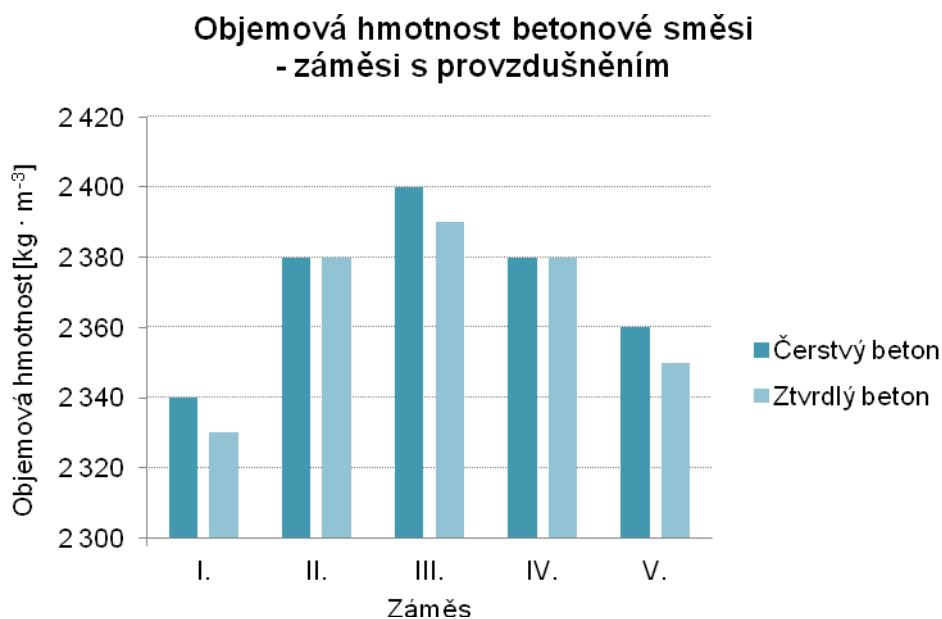
Kde je D – objemová hmotnost, m – hmotnost betonu, V- objem betonu.

Tabulka 16: *Objemová hmotnost čerstvého a ztvrdlého betonu*

Záměs	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg · m ⁻³]	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg · m ⁻³]
I	2 400	2 390
II	2 390	2 380
III	2 410	2 390
IV	2 410	2 410
V	2 420	2 420
I - P	2 340	2 330
II - P	2 380	2 380
III - P	2 400	2 390
IV - P	2 380	2 380
V - P	2 360	2 350



Graf 5: Objemová hmotnost betonové směsi – záměsi bez provzdušnění



Graf 6: Objemová hmotnost betonové směsi – záměsi s provzdušněním

Vyhodnocení:

Objemová hmotnost u neprovzdušněných betonů v čerstvém a ztvrdlém betonu dosahuje přibližně stejných hodnot. Naopak u provzdušněných betonových směsí jsou hodnoty objemových hmotností různé. Rozdíly jsou způsobeny obsahem vzduchu v čerstvé betonové směsi. Čím vyšší obsah vzduchových pórů je obsažen v betonu, tím nižší je objemová hmotnost. U neprovzdušněných betonů neodpovídá

objemová hmotnost vzhledem k jeho provzdušnění. Tyto rozdíly mohou být způsobeny intenzitou zhutnění. Podle obsahu vzduchu u neprovzdušněných betonů by měla být objemová hmotnost nejnižší u záměsi č. 3. Poslední dvě záměsi z této skupiny by měly mít nižší hodnoty objemové hmotnosti než první záměsi.

Mezi čerstvým a ztvrdlým betonem jsou zjištěny malé rozdíly v objemových hmotnostech.

3.2.4 Pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti

Tato zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 12 390 – 3. Nejprve se změří rozměry zkušebního tělesa - rozměry tlačné plochy se pro větší přesnost měřili třikrát ve vždy na sebe kolmých směrech. Očistí se tlačné plochy desek lisu. Zkušební těleso se položí do lisu tak, aby zkouška proběhla kolmo na směr zhutnění. Zkušební krychle se musí uložit do středu tlačné plochy spodní desky s přesností na 1%. Zatěžovací rychlost ($0,4 - 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$) lisu je konstantní plynulá a bez nárazu až do porušení tělesa. Zaznamená se maximální zatěžovací síla, která způsobila porušení. Ideálním tvarem porušení je kónický tvar. Pevnost betonu v tlaku je uvedena následujícím vzorcem (21).

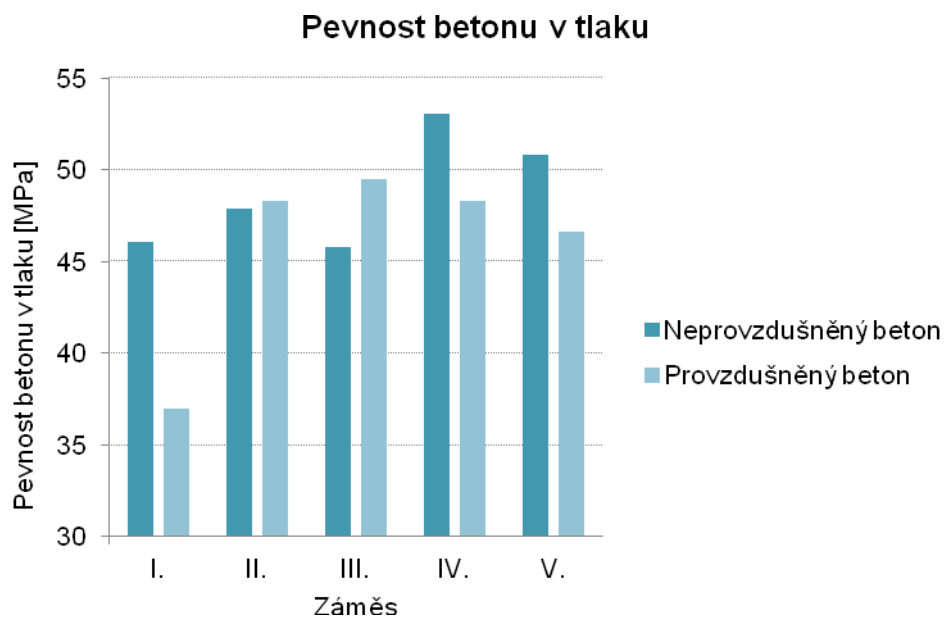
$$F_c = \frac{F}{A} \quad (21)$$

Kde je F_c – pevnost betonu v tlaku, F – maximální zatěžovací síla, A – tlačná plocha.

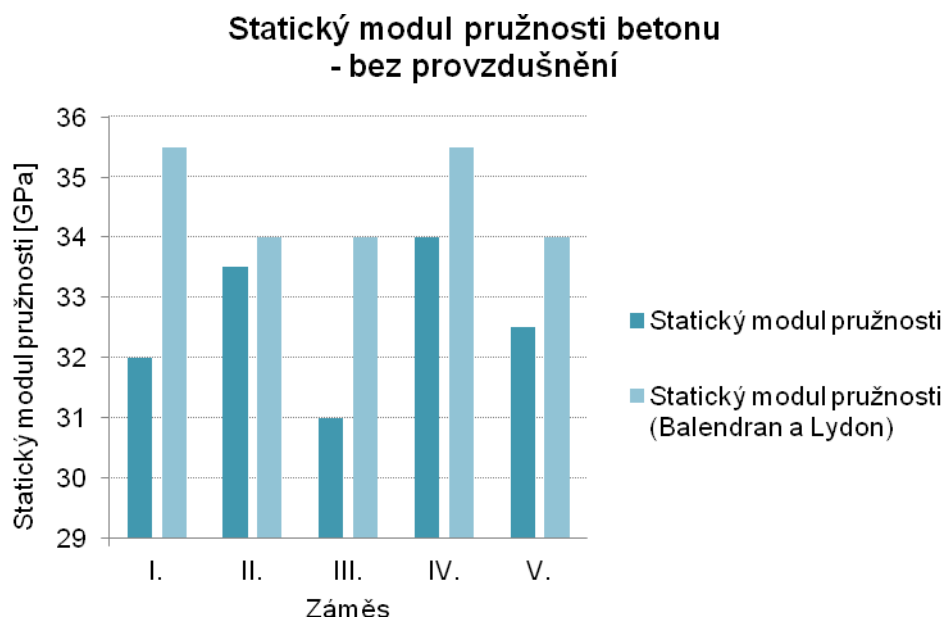
Postupy zkoušek pro stanovení modulu pružnosti statického a dynamického jsou popsány v předchozích kapitolách. Statický modul pružnosti je popsán v kapitole 2.2.1. a dynamický modul ultrazvukovou metodou je popsán v kapitole 2.2.2.2. Zmenšovací koeficient a hodnoty pro běžné betony jsou uvedeny v kapitole 2.2.6 v tabulce č. 1. Zmenšovací koeficient byl odvozen ze vzorce (17). Statický modul pružnosti získaný ze závislosti dynamického modulu pružnosti odvozený Balendranem a Lydonem (19).

Tabulka 17: Pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti statický a dynamický, zmenšovací koeficient κ_u .

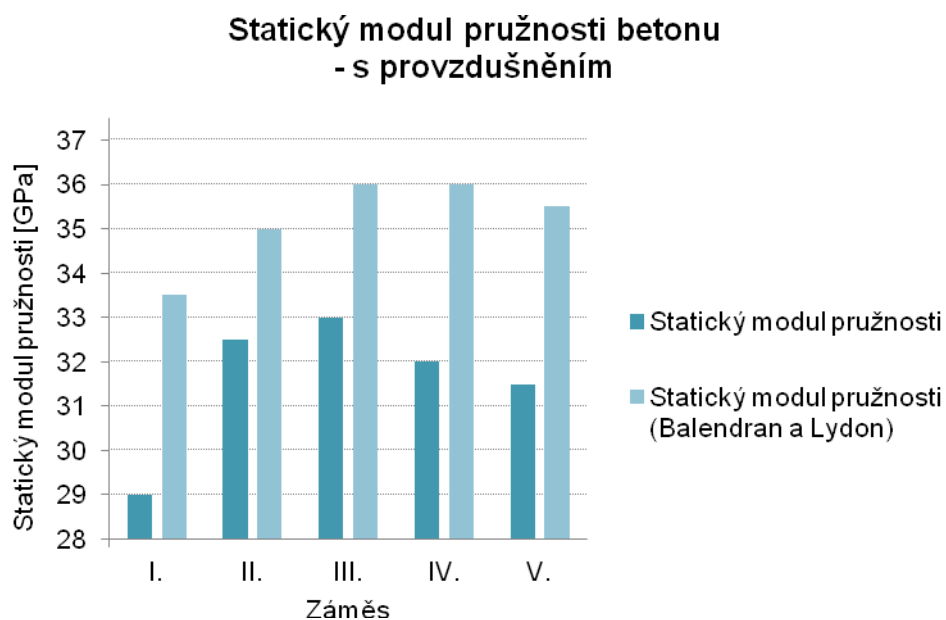
Záměs	Pevnost v tlaku [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]	Dynamický modul pružnosti [GPa]	Statický modul pružnosti (Balendran a Lydon)	Koeficient κ_u
I	46,1	32,0	42,6	35,5	0,75
II	47,9	33,5	41,2	34,0	0,81
III	45,8	31,0	41,1	34,0	0,75
IV	53,1	34,0	42,5	35,5	0,79
V	50,8	32,5	40,9	34,0	0,79
I P	37,0	28,5	39,8	33,0	0,71
II P	48,3	32,0	41,6	34,5	0,77
III P	49,5	32,5	42,9	35,5	0,75
IV P	48,3	31,5	43,0	35,5	0,73
V P	46,6	31,0	42,1	35,0	0,74



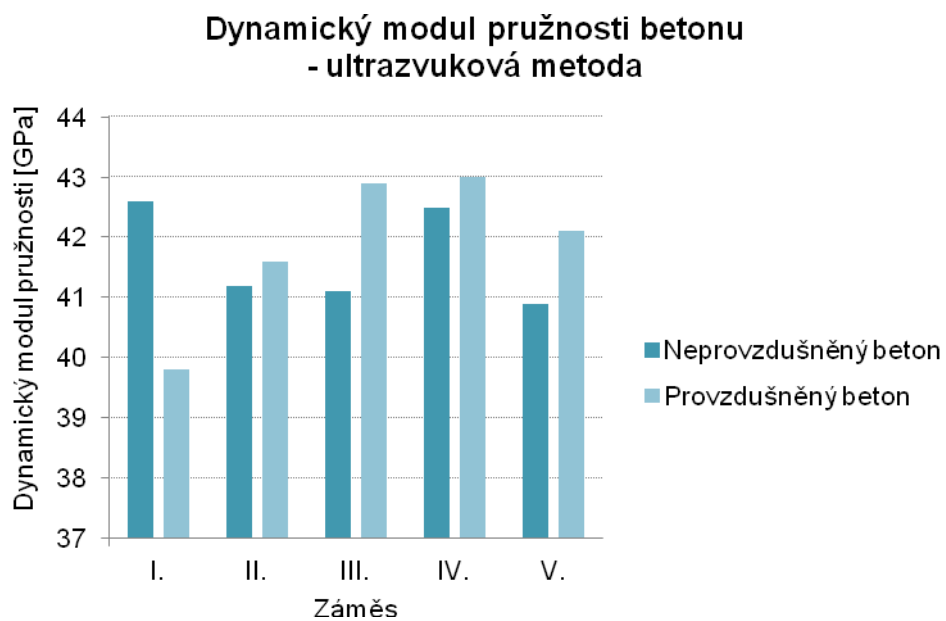
Graf 7: Pevnost betonu v tlaku



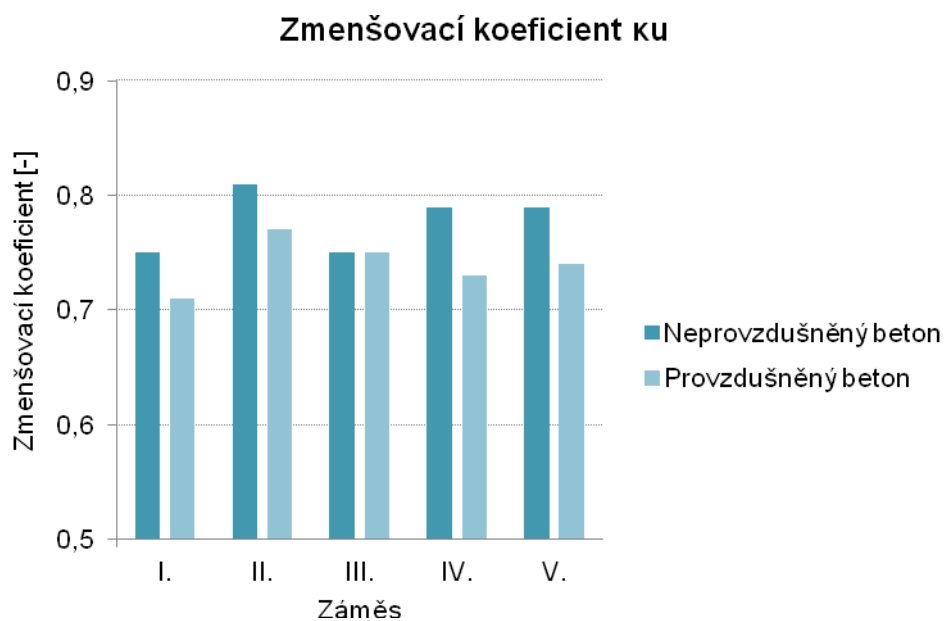
Graf 8: Statický modul pružnosti – bez provzdušnění



Graf 9: Statický modul pružnosti – s provzdušněním



Graf 10: Dynamický modul pružnosti – ultrazvuková metoda



Graf 11: Zmenšovací koeficient κ_u

Vyhodnocení:

Pevnost betonu v tlaku je ve většině případů vyšší u neprovzdušněných betonových směsí (graf č. 7), to je způsobeno obsahem vzduchových pórů. Udává se, že 1 % vzduchových pórů nad mezní hodnoty snižuje pevnost betonu až o 5 MPa.

Statický modul pružnosti, který vychází z výpočetního vztahu Balendrana a Lydona (graf č. 8 a 9), byl výrazně vyšší než statický modul zjištěný přímým měřením. Jelikož hodnoty u dynamických modulů pružnosti vychází z homogenity betonu a vzhledem k nižším hodnotám vzduchových pórů, jsou tyto hodnoty vyšší. Proto jsou vyšší i hodnoty statického modulu pružnosti odvozené z výše zmíněného vzorce.

Statické moduly zjištěné přímým mechanickým měřením jsou závislé na mnoha faktorech popsanych v kapitole 2.2.3. V tomto případě může mít velký vliv modul pružnosti kameniva, obsah vzduchu v betonové matrici, kdy čím víc vzduchových pórů je obsaženo, tím je modul pružnosti nižší.

V grafu č. 10 jsou zjištěné hodnoty různorodé. Neprovzdušněné betony by měly mít vyšší naměřené hodnoty než neprovzdušněné betony. To, že nebylo dosaženo těchto výsledků může být způsobeno různorodostí betonu. Ve srovnání se známými hodnotami, které jsou uvedeny v tabulce č. 1 jsou vypočtené hodnoty zmenšovacích součinitelů pro jednotlivé záměsi nižší (graf č.10). Moderní betony, které jsou vyráběny v současné době, mají za cíl dosáhnout maximálně hutné struktury. Vlivem superplatifikačních přísad je dosaženo snížení vodního součinitele při zachování konzistence, to vede k hutnější struktuře betonu eliminováním vzduchových pórů po přebytečné vodě. Naopak při použití provzdušňovací přísady dojde ke snížení hodnot dynamického modulu a tím ke zvýšení zmenšovacího součinitele.

4. Závěr

Cílem této práce bylo posouzení vlivů různých druhů superplastifikačních přísad i v kombinaci provzdušňovací přísadou na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Popisovanými vlastnostmi jsou u čerstvého betonu: konzistence betonu, obsah vzduchu a objemová hmotnost. U ztvrdlého betonu je věnovaná pozornost objemové hmotnosti, pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, statickému a dynamickému modulu pružnosti a zmenšovacímu koeficientu.

V čerstvém stavu byla hodnocena u všech záměsí konzistence zkouškou sednutí kužele a obsah vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou. Hodnota sednutí kužele u referenčního betonu ihned po zamíchání byla naměřena 40 mm a po 30 minutách bylo zjištěno sednutí kužele 0 mm. U ostatních záměsí byly zjištěny hodnoty pohybující se v rozmezí od 90 – 160 mm (S2 – S4) ihned po zamíchání u neprovzdušněných betonů a u provzdušněných betonů od 60 – 200 mm (S2 – S4). Hodnoty konzistencí měřených po 30 minutách po zamíchání se u neprovzdušněných betonů pohybují v rozmezí 40 – 120 mm (S1 – S3) a u provzdušněných záměsí je rozmezí 20 – 150 mm (S1 – S3). Ze zjištěných hodnot je názorně vidět, že každý druh superplastifikační přísady má vliv na ztekucení různý. Měkčí konzistence u provzdušněných betonů je způsobena i provzdušňovací přísadou, která zlepšuje zpracovatelnost betonové směsi.

Provozdušnění čerstvé betonové směsi je limitováno českou státní normou, kdy v neprovzdušněném betonu může být vzduch obsažen v čerstvé betonové směsi do 2 % a u provzdušněných betonů má být obsah vzduchu v rozmezí 4 – 6 %. U namíchaných záměsí neprovzdušněných byl obsah vzduchu splněn pouze u referenční záměsi u zbylých neprovzdušněných záměsí se jeho obsah pohyboval v rozmezí 2,3 – 2,8 % a u provzdušněných betonů se naměřené hodnoty pohybovaly 2,2 – 5,4 %. Obsah vzduchu po 30 minutách byly zjištěny hodnoty u neprovzdušněného betonu od 2,1 – 3,7 % a u provzdušněných betonů 3,0 – 6,0 %. Rozdílný obsah vzduchu v betonové směsi může být způsoben délkou a způsobem míchání, intenzitou hutnění i způsobem dávkování provzdušňovací přísady do čerstvé betonové záměsi a vlivem zpracovatelnosti.

Objemová hmotnost u neprovzdušněných betonů dosahuje u čerstvého a ztvrdlého betonu nepatrných rozdílů. Avšak tyto hodnoty neodpovídají jeho

provzdušnění. Závislost mezi těmato dvěma vlastnostmi je taková, že čím vyšší obsah vzduchových pórů je obsažen v betonu, tím nižší je objemová hmotnost betonu.

Veškeré betonové směsi, které byly navrženy jako beton C 30/37. Pevnost betonu v tlaku se pohybuje u neprovzdušněných betonů po 28 dnech v rozmezí od 45,8 – 53,1 MPa a pevnost v tlaku po 28 dnech u provzdušněných betonů je od 37,0 – 49,5 MPa. Pevnosti v tlaku u provzdušněných betonů jsou nižší, jelikož se udává, že již 1 % vzduchových pórů obsažených v betonové směsi nad mezní hodnoty snižují pevnosti betonu v tlaku až o 5 MPa.

V práci byl statický modul pružnosti zjištěn dvěma způsoby. Prvním způsobem byl „přímý“ mechanický způsob, kde získáme hodnotu statického modulu pružnosti rovnou a druhým způsobem je přepočet z dynamického modulu pružnosti. V tomto případě se pro přepočet z dynamického modulu pružnosti na statický modul pružnosti byl použit nejjednodušší vzorec odvozený pány Balendranem a Lydonem. U prvního způsobu byly hodnoty u neprovzdušněného betonu naměřené v rozmezí 31,0 – 34,0 GPa a u provzdušněných betonů se rozmezí pohybuje od 28,5 – 32,5 GPa. Statický modulu pružnosti je ovlivněn mnoha vlivy popsanych v kapitole 2.2.3. Velký vliv na statický modul pružnosti má kamenivo a obsah vzduchu.

Statický modul přepočítaný z dynamického modulu pružnosti je závislý na jeho hodnotách. Hodnoty z odvozeného vzorce pro neprovzdušněné betony se pohybují v úzkém rozpětí 34,0 – 35,5 GPa u provzdušněných betonů se tyto hodnoty pohybují od 33,0 – 35,5 GPa. Statické moduly odvozené z dynamických modulů dosahují vyšších hodnot. Důvodem je, že dynamický modul je závislý na stejnorodosti betonu.

Dynamický modul pružnosti, zjišťován ultrazvukovou metodou, dosáhl u neprovzdušněných betonů hodnot 40,9 – 42,6 GPa a u provzdušněných betonů 39,8 – 43,0 GPa. Jak již bylo výše zmíněno, dynamický modul závisí na struktuře betonu. Čím hutnější beton, tím by mělo být dosaženo vyšších hodnot než u provzdušněných betonů.

Poslední hodnotou, která byla zjišťována, byl zmenšovací koeficient, díky kterému je možné dynamický modul převést na statický. Do současnosti platily hodnoty uvedené v tabulce č. 1, které platí pro běžné betony. Výsledky v této práci ukazují, že zmenšovací koeficienty pro moderní betony v jednotlivých záměsích byly nižší. U neprovzdušněných betonových záměsí dosahovaly hodnoty 0,75 – 0,81 a u provzdušněných betonových směsí byly tyto hodnoty 0,71 – 0,77. Zmenšovací

koeficienty závisí na hutnosti betonové směsi. Čím hutnější se betonová směs vytvoří, tím nižších hodnot zmenšovacích koeficientů se dosáhne. Moderní betony, které jsou vyráběny v současné době, mají za cíl dosáhnout maximálně hutné struktury. K dosažení hutné struktury výborně poslouží superplastifikátory, které významně eliminují obsah vody v betonové záměsi, S hutnou strukturou betonové směsi roste dynamický modul pružnosti. Naopak, pokud je v záměsi použito provzdušňovacích přísad, dochází ke snižování dynamického modulu pružnosti a tím i k nárůstu zmenšovacích koeficientů.

Pro přesnější a definitivní výsledky doporučuji provést další pečlivější zkoumání tak, aby bylo eliminováno velké množství působících vlivů.

5. Seznam použité literatury

- [1] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] 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, 320 s. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přepracované vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [4] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I. – přednáška*. Brno: 2012
- [5] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [6] BRDEČKOVÁ, Helena. *Geologie – přednáška*. Brno: 2010
- [7] FRIDRICHOVÁ, Marcela. *Maltoviny II – přednáška*. Brno: 2014
- [8] HILDERBERG CEMENT, *Příručka technologa*. Aktualizované vydání, 2013
[Online] [Cit. 2014-03-24] Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/tisk-a-media/publikace-a-prezentace.html>
- [9] PEŘKA, Lukáš. *Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1: TP 2.4 : technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011, 17 s. ISBN 978-80-87438-13-8.
- [10] ČSN EN 196 : Metody zkoušení cementu, 2005
- [11] ČSN EN 1008 : Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárnách, jako záměsové vody do betonu, 2003
- [12] SEBÖK, Tibor. *Přísady a přídavky do malt a betonů*. 2. nezměn. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 160 s.
- [13] ČSN EN 934 – 2 + A1 : Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem, 2012

- [14] BACHE, H. H. *Densified Cement Ultrafine Particle-based Material*, Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, June 10-12, 1981
- [15] TERZIJSKI, Ivailo. *Polyfunkční přísady do betonu - principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace: Multifunctional admixtures for concrete - principles and possibilities of their design according to demands of actual application : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru konstrukce a dopravní stavby*. Brno: VUTIUM, 2011, 34 s. ISBN 978-80-214-4331-0.
- [16] SZKLORZOVÁ, Halina; TĚHNÍK, Vladimír; BRANDŠTETR, Jiří. *Použití plastifikátorů ve stavebnictví – přechod od staré k nové generaci*. Betonářské dny 2004 : 11. konference s mezinárodní účastí. Pardubice: Česká betonářská společnost, [1993]
- [17] HELA, Rudolf. *Studie porovnávající polymerní superplastifikátory*. Betonářské dny 2011 : 18. konference s mezinárodní účastí. Pardubice: Česká betonářská společnost, [1993]
- [18] KOLÁŘ, K.; KLEČKA, T.; HELA R. *Podmínky výroby betonů definovaných vlastností v ČR*. Technologie, provádění a kontrola betonových konstrukcí 2003, ISBN 80-0352-7
- [19] ČSN EN 480 – 1 + A : Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 1: Referenční beton a referenční malta pro zkoušení, 2012
- [20] DU, Lianxiang; FOLLIAND, K. J.; *Mechanisms of air entrainment in concrete*. Cement and Concrete Research [online]. Volume 35, Issue 8, August 2005, Pages 1463-1471. [cit. 2015-03-25]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884604003369>.
- [21] HUŇKA, Petr; KOLÍSKO, Jiří. *Studium vlivu tvaru, velikosti a způsobu přípravy zkušebního tělesa na výsledek zkoušky statického modulu pružnosti betonu v tlaku*. Betonářské dny 2008 : 15. konference s mezinárodní účastí. Pardubice: Česká betonářská společnost, [1993]
- [22] HUŇKA, Petr; KOLÍSKO, Jiří; ŘEHÁČEK Stanislav; VOKÁČ, Miroslav. *Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu – rekapitulace*. Beton: technologie - konstrukce - sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2001- ročník 2012, č. 4. ISSN 1213-3116.

- [23] UNČÍK, Stanislav; ŠEVČÍK, Patrik. *Modul pružnosti betónu*. [online] Trnava : Betón Racio, s. r. o., 2008. 24 s. ISBN 978-80-959182-3-2. [cit. 2015-04-04]. WWW: http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul_pruznosti.pdf
- [24] ČSN ISO 1920 : Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, 2014
- [25] ČSN ISO 6784 : Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [26] ČSN 73 1372 : Nedestruktivní zkoušení betonu – rezonanční metoda zkoušení betonu, 2012
- [27] ČSN 73 1371 : Nedestruktivní zkoušení betonu – ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, 2011
- [28] ČSN 73 2011 : Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí, 2012
- [29] CIKRLE, Petr; KOCÁB, Dalibor; POSPÍCHAL, Ondřej. *Possibilities of ultrasonic method utilization for determinativ of bridge concrete compressive strenght*. Konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2011.: sborník recenzovaných příspěvků konference. Praha: Kloknerův ústav ČVUT, [200-]-.
- [30] BÍLEK, Vlastimil; JUŘINOVÁ, Eva; CIKRLE, Petr. *Modul pružnosti vysokohodnotných betonů různého složení*. Betonářské dny 2009 : 16. konference s mezinárodní účastí. Pardubice: Česká betonářská společnost, [1993]
- [31] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu: zložky betónu*. 3. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1994, 118 s.
- [32] NILSEN, A. V.; AÏTCIN, Pierre-Claude. *Properties of High-Strength Concrete Containing Light-Normal - a Heavyweight Aggregate*. Cement, Concrete a Aggregates, Vol. 14, No. 1, Sumemr 1992, pp. 8 – 12.
- [33] CIKRLE, Petr; KOCÁB, Dalibor. *Dynamické a statické moduly pružnosti* [online]. Topinfo s. r. o. 2001 – 2015. ISSN 1801-4399. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>.