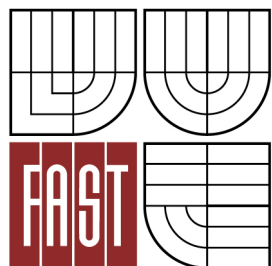




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV OBSAHU VZDUCHU VE ZTVRDLÉM BETONU  
NA STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI  
PROVZDUŠNĚNÉHO BETONU A PEVNOST  
BETONU V TLAKU STANOVENOU  
NEDESTRUKTIVNĚ

EFFECT OF AIR VOID CONTENT IN HARDENED CONCRETE ON STATIC MODULUS OF  
ELASTICITY OF AERATED CONCRETE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE  
EXAMINATED NONDESTRUCTIVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PETR JANOUŠEK

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ VYMAZAL, Ph.D.

BRNO 2011

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá simulací reálné výroby provzdušněného betonu s různým obsahem provzdušňovacích přísad. Experimentální část je soustředěna zejména na měření obsahu vzduchu v čerstvém a ztvrdlém betonu při stabilním množství vybraných složek v receptuře. Výsledky jsou vztaženy k referenčnímu (neprovzdušněnému) betonu. Při výrobě čerstvého betonu bylo prováděno vzorkování a zkoušky konzistence (ČSN EN 12350), následně pak zkoušky objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku (ČSN EN 12390), statického modulu pružnosti (ČSN ISO 6784), stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu (ČSN EN 480-11) a stanovení tvrdosti – nedestruktivní stanovení pevnosti betonu v tlaku (ČSN EN 12504-2, ČSN 73 1373). Téma bakalářské práce vzniklo na přímý požadavek z praxe.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with simulation of the real production of aerated concrete with different volume of aerating agents. Experimental part is focused mainly on measuring the air content in fresh and hardened concrete at a steady volume of selected ingredients in the recipe. Results are related to the reference (non-aerated) concrete. During the production of fresh concrete was carried out sampling and testing consistency (ČSN EN 12350), and then tests of density and compressive strength (ČSN EN 12390), static modulus of elasticity (ČSN ISO 6784), determining of the characteristics of air voids in hardened concrete (ČSN EN 480-11) and the determination of hardness - non-destructive determination of concrete compressive strength (ČSN EN 12504-2, ČSN 73 1373). Topic of the bachelor thesis was founded on a direct request from the practice.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Provzdušněný beton, modul pružnosti, pevnost v tlaku, konzistence čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu, obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu, mrazuvzdornost, spacing factor

## **KEY WORDS**

Aerated concrete, modulus of elasticity, compressive strength, consistenci of fresh concrete, air void content in fresh concrete, air void content in hardened concrete, frost resistance, spacing factor

## **Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690**

JANOŠEK, Petr. *Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na statický modul pružnosti provzdušněného betonu a pevnost betonu v tlaku stanovenou nedestruktivně*. Brno, 2011. 45 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....  
podpis diplomanta

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na tvorbě této bakalářské práce, a zejména pak vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Vymazalovi, Ph.D., a Ing. Oldřichu Žaludovi, za vedení, poskytnuté rady a věnovaný čas při zpracování a akreditované laboratoři firmy Betotech, s.r.o., za provedení zkoušek.

# OBSAH

1 ÚVOD.....	9
2 CÍL PRÁCE.....	9
3 TEORETICKÁ ČÁST.....	9
3.1 Úvod.....	9
3.2 Deformace betonu a modul pružnosti .....	9
3.2.1 Modul pružnosti .....	9
3.3 Pevnost betonu .....	12
3.3.1 Technologické ovlivňování pevnosti betonu .....	13
3.4 Pórovitost betonu .....	16
3.4.1 Druhy pórů v betonu.....	16
3.5 Vztah mezi modulem pružnosti a pevností betonu .....	17
3.5.1 Teoretické úvahy.....	17
3.5.2 Empirický přístup.....	17
3.6 Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na modul pružnosti a pevnost v tlaku .....	18
3.7 Provzdušněné (mrazuvzdorné) betony.....	19
3.7.1 Oblast použití .....	19
3.7.2 Suroviny pro výrobu provzdušněných betonů .....	20
3.7.3 Faktory ovlivňující obsah vzduchu v čerstvém betonu.....	20
3.7.4 Provzdušňovací přísady .....	21
3.7.5 Porušení struktury betonu mrazem .....	21
3.7.6 Dosažení mrazuvzdornosti bez provzdušnění.....	24
3.8 Konzistence betonu .....	24
3.9 Tvrdoměrné metody.....	25
3.9.1 Přehled tvrdoměrných metod.....	25
3.9.2 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu.....	26
3.10 ČSN EN 206-1 Beton – část 1: specifikace, vlastnosti výroba a shoda .....	28
3.10.1 Stupně vlivu prostředí.....	28
3.10.2 Pevnostní třídy betonu v tlaku.....	29
3.11 ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby .....	29
4 METODIKA ŘEŠENÍ.....	31

4.1 Vývojový diagram.....	31
4.1.1 Výroba čerstvého betonu.....	32
4.1.2 Odběr vzorků, zkoušky na čerstvém betonu.....	32
4.1.3 Plnění forem, hutnění.....	32
4.1.4 Odformování, označení, převoz na FAST VUT v Brně, uložení vzorků.....	33
4.1.5 Zjištění objemové hmotnosti.....	33
4.1.6 Zkoušky na krychlích.....	33
4.1.7 Zkoušky na válcích.....	33
4.1.8 Vyhodnocení.....	34
4.2 Postupy provedených zkoušek.....	34
4.2.1 Zkoušky čerstvého betonu.....	34
4.2.2 Zkoušení ztvrdlého betonu.....	37
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	40
6 ZÁVĚR.....	43
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	45
8 SEZNAM ILUSTRACÍ.....	46
9 SEZNAM TABULEK.....	46
10 SEZNAM ZKRATEK.....	47



# 1 ÚVOD

Provzdušněné betony se v hojně míře používají jako mrazuvzdorné betony, například v konstrukcích dopravních staveb, jako jsou mostní pilíře nebo protihlukové stěny. Při návrhu provzdušněných betonů se musí počítat také s vlivem obsahu vzduchu v čerstvém i ztvrdlém betonu na jeho fyzikální a mechanické a trvanlivostní vlastnosti.

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce je ověřit vliv obsahu vzduchu v čerstvém a ztvrdlém betonu na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, zejména na modul pružnosti, pevnost a tvrdost.

## 3 TEORETICKÁ ČÁST

### 3.1 ÚVOD

Teoretická část se zabývá problematikou deformací betonu, modulu pružnosti, pevnostmi betonu a jejich vzájemnými vztahy. Dále také pojednává o problematice provzdušněných betonů, surovinách pro jejich výrobu a mrazuvzdornosti betonu. V této části jsou také rozebírány souvislosti mezi obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu a vlastnostmi betonu, jako jsou modul pružnosti, tvrdost, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost a odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám. Dále tato část pojednává o požadavcích normy ČSN EN 206-1 [5] a ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] na použití provzdušněných betonů.

### 3.2 DEFORMACE BETONU A MODUL PRUŽNOSTI

Beton se deformuje pružně neboli elasticky, to znamená, že po odtížení se beton vrátí do stavu před zatížením, a také plasticky, tedy nevratně. Tyto deformace tedy lze rozdělit na změny reversibilní, čili vratné, a na ireversibilní, čili nevratné. Mezi reversibilní objemové změny můžeme zařadit například tepelné dilatace, nebo pružné deformace. Mezi ireversibilní objemové změny lze zařadit dotvarování a smršťování.

#### 3.2.1 Modul pružnosti

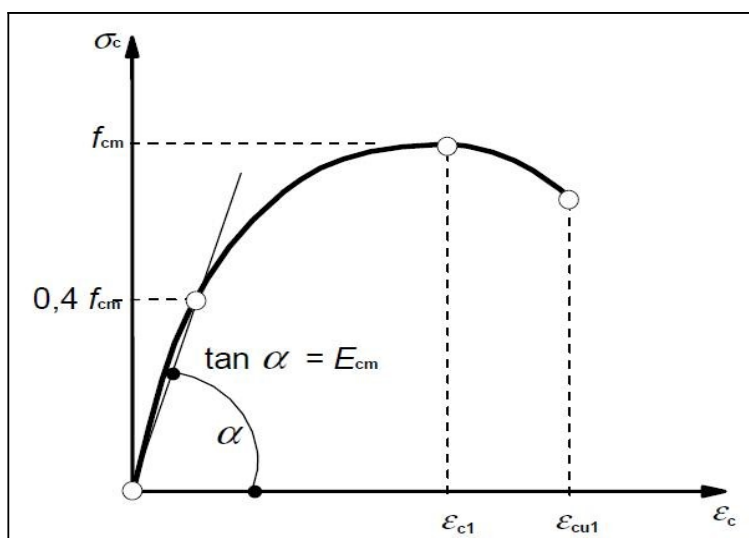
Modul pružnosti je materiálová charakteristika, kterou používáme při studiu pružnosti, a úzce souvisí s deformacemi (viz Přehled středoškolské fyziky [9]). Deformace betonu lze nejlépe charakterizovat pomocí pracovního diagramu (viz Ilustrace 1: Pracovní diagram betonu [7]). Obecně lze říci, že čím vyšší modul pružnosti materiál vykazuje, tím nižší budou jeho deformace. Velký význam má modul pružnosti při stavbě velkých konstrukcí, jako jsou mosty, estakády, velkorozponové střechy a konstrukce, které vyžadují minimální průhyby a deformace.

Modul pružnosti je definován jako směrnice tečny křivky pracovního diagramu ( $\tan \alpha$ ). Při malých zatíženích je závislost napětí na přetvoření lineární, což znamená, že v této oblasti je modul pružnosti konstantní. Můžeme tedy říci, že v této oblasti platí Hookův zákon, který říká, že deformace je úměrná napětí materiálu. Hookův zákon lze tedy matematicky vyjádřit jako:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad [-]$$

Kde: $\sigma$	napětí materiálu	$[N/mm^2]$
$E$	modul pružnosti	$[N/mm^2]$
$\epsilon$	poměrné přetvoření	$[-]$

Pytlík v knize Technologie betonu I [8] vysvětluje, že při vyšším zatížení modul pružnosti již není konstantní. V této oblasti pracovního diagramu je modul pružnosti závislý na rychlosti zatěžování a na intenzitě napětí materiálu. V této oblasti už nemluvíme o pružné deformaci, ale o plastické deformaci. Se zvyšujícím se napětím modul pružnosti klesá, to souvisí s rozdělením deformací na deformace pružné ( $\epsilon_{el}$ ) a deformace plastické ( $\epsilon_{pl}$ ). Plastické deformace jsou provázeny tvorbou mikrotrhlinek, proto se modul pružnosti zkouší jen v oblasti 20 až 30 % krychelné pevnosti betonu.



*Ilustrace 1: Pracovní diagram betonu [7]*

Jelikož beton je kompozit ztvrdlé cementové pasty a kameniva, tak modul pružnosti betonu je závislý na modulu pružnosti samotného cementového kamene a samotného kameniva a na podílu cementového kamene a kameniva v betonu (viz Ilustrace 2: Deformace ztvrdlé cementové pasty, kameniva a betonu [10]). Collepardi v knize Moderní beton [10] uvádí, že závislost napětí a deformací kameniva i cementové pasty je lineární, kdežto závislost napětí a deformace

kompozitu, tedy betonu, lineární není. Příčinou této nelinearity je existence vzájemných vazeb mezi povrchem kameniva a ztvrdlé cementové pasty. To vede ke vzniku lokálních napětí na rozhraní zrna kameniva a ztvrdlé cementové pasty. V důsledku těchto napětí roste přetvoření rychleji než napětí ve vzorku a závislost napětí a přetvoření získává charakteristické zakřivení (viz Ilustrace 2: Deformace ztvrdlé cementové pasty, kameniva a betonu [10]).

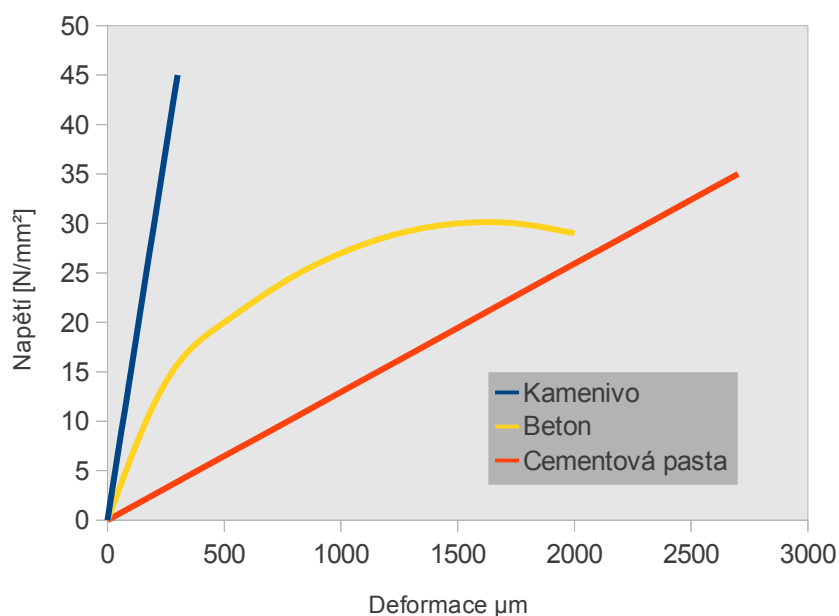
Modul pružnosti kameniva není na okolních podmínkách závislý, kdežto modul pružnosti ztvrdlé cementové pasty je silně závislý na teplotních a vlhkostních podmínkách zrání, proto je nutné dbát na správné ošetřování betonu.

Modul pružnosti je také závislý na stáří betonu. Tuto závislost lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{E_{BI}}{E_B} = \sqrt{1,36 \cdot \frac{t}{t+10}} \quad [-]$$

<i>Kde:</i>	$E_B$	<i>normový modul pružnosti</i>	$[N/mm^2]$
	$E_{BI}$	<i>modul pružnosti při stáří <math>t</math></i>	$[N/mm^2]$
	$t$	<i>stáří betonu</i>	$[dny]$

Modul pružnosti se také mění působením prostředí na ztvrdlý beton. Při tepelném urychlování tvrdnutí betonu se modul pružnosti snižuje až o 10% hodnoty při normálním zrání. Při uložení ve vodě je modul pružnosti relativně vyšší než při uložení na vzduchu a relativní vlhkosti 50%.



Ilustrace 2: Deformace ztvrdlé cementové pasty, kameniva a betonu [10]

Hodnotu modulu pružnosti lze tedy ovlivňovat mnoha způsoby. Kromě již uvedeného způsobu ošetřování betonu se dá modul pružnosti ovlivnit například vodním součinitelem, přidavkem minerální příměsí (viz [21], [24]) nebo typem hrubého kameniva (viz [12]).

Moduly pružnosti a pevnosti výrazně rostou při použití minerálních příměsí, kterými mohou být například mikrosilika nebo metakaolín, které ovlivňují pevnost ztvrdlé cementové pasty a také rozhraní mezi ztvrdlou cementovou pastou a kamenivem.

Velice výrazně modul pružnosti ovlivňuje kvalita použitého kameniva. Jelikož samotný modul pružnosti kameniva výrazně ovlivňuje modul pružnosti betonu, je dobré pro zvýšení modulu pružnosti betonu použít kamenivo s vyšším modulem pružnosti.

### 3.3 PEVNOST BETONU

Pevnost betonu se zkouší destruktivním způsobem na zkušebních vzorcích podle předepsaného způsobu, to je velikost vzorku, stáří a ošetřování betonu, úprava vzorku a rychlost zatěžování. Výsledkem je statistický průměr, který charakterizuje pevnost hodnotou, pod kterou může být maximálně 5 % všech možných výsledků zkoušek pevnosti základního souboru daného betonu. Základním zkušebním tělesem je válec o průměru 150 mm a výšky 300 mm nebo krychle o hraně 150 mm. Zkušební tělesa musí být uložena v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu vyšší nebo rovnou 95% nebo ve vodě o teplotě  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Základní doba zkoušení je 28 dnů od výroby zkušebních těles, pokud se nestanovuje pevnost za jiné časové období (např. 3, 7, 90 dnů). Podmínkou reprodukovatelnosti měření je úprava tlačných ploch (styk plochy vzorku s tlačnou plochou lisu), jejich rovinnost (zajišťuje se broušením nebo koncováním pomocí sádrové nebo cementové kaše), souběžnost působících sil a v neposlední řadě rychlost zatěžování.

Pytlík v knize Technologie betonu I [8] pevnost popisuje obecně jako schopnost vzdorovat vzniklým napětím. Pevností betonu rozumíme mezní hodnotu napětí v betonu, při které dojde ke zlomu, to je globálnímu porušení soudržnosti. Většina konstrukcí je namáhána kombinací tlakových, tahových nebo smykových napětí, a to buď přímo zatížením anebo vlivem upnutí do okolních částí konstrukce. V průřezu konstrukce tedy vznikají různě veliká napětí, různě lokalizovaná a rozdílného působení. V určitém místě konstrukce vznikají hlavní napětí, která mají maximální hodnotu při jejich absolutním vyjádření. Jestliže některé z těchto hlavních napětí překročí mez pevnosti betonu, dojde k porušení soudržnosti. Toto může být pouze lokální, nezasahující celý průřez, přičemž vzniká trhlinka. Nastane-li porušení soudržnosti v celém průřezu, mluvíme o zlomu, neboli destrukci, celé konstrukce.

Při zvyšování napětí v betonu (zvyšování zatížení) dochází při překročení 40 až 50 % lomové pevnosti v betonu k lokálnímu porušení soudržnosti, charakterizovanému vznikem malých trhlin,

jejichž rozměr i počet se se zvyšujícím napětím zvyšuje až do překročení mezní hodnoty hlavního napětí (pevnosti betonu). Pak nastává náhlé globální porušení soudržnosti a dochází k destrukci konstrukce.

Beton vzdoruje rozdílnou mírou všem druhům napětí, které v betonové konstrukci vznikají. Je však charakterizován jako látka křehká, která vzdoruje napětím v tahu a ve smyku podstatně méně než napětí v tlaku. Podle toho, kterému druhu napětí je beton vystaven až do mezní (lomové) hodnoty, označujeme i pevnosti. Při statickém působení zatížení rozeznáváme následující pevnosti:

- Pevnost v tlaku (prostém, v sevřeném tlaku, soustředěném tlaku)
- Pevnost v tahu (prostém, v tahu za ohybu, příčném)
- Pevnost ve smyku (stříhu, propichování) a kroucení
- Metoda místního porušení pro stanovení pevnosti betonu

V mikroskopické hladině pozorování studujeme otázky defektů struktury, vliv rozhraní složek betonu a sledujeme pak mikronapětí, deformační energii, projevující se v tvorbě mikrotrhlin a rychlosti jejich šíření. Prvopočátkem je iniciace mikrotrhlin, které se spojují do růstuschopných malých trhlin, až se vytvoří makrotrhlina (viditelná pouhým okem, šířky nad 0,1 mm), která, pokud dosáhne kritické hodnoty, přechází v lom (destrukci konstrukce).

Složitost rozdělení napětí v konstrukci z nehomogenní látky, různost a nedostatečná znalost podstaty soudržných sil v betonovém kompozitu nedovolují, abychom vyjádřili vztah mezi strukturou a pevností fyzikálním způsobem. Proto tento vztah modelujeme usančními zkušebními betonovými tělesy a způsobem zatěžování a hovoříme o pevnostech betonu, které jsou pouze modelovými mezními hodnotami fyzikálních veličin mezních napětí v tlaku, v tahu, ve smyku. Výsledné a v technologické praxi užívané hodnoty zjištěných pevností představují pravděpodobnou hodnotu skutečné pevnosti, proto mají statistický charakter.

### **3.3.1 Technologické ovlivňování pevnosti betonu**

Beton jako kompozitní materiál vykazuje vlastnosti, které jsou dány vlastnostmi jeho složek, jejich poměrným zastoupením v kompozitu a také vlastnostmi rozhraní. Kvalitní kamenivo s pevností 60 - 300 N/mm<sup>2</sup> převyšuje několikanásobně pevnost betonu, a tudíž dosažené vlastnosti negativně neovlivňuje. Při předpokladu použití kvalitního kameniva tedy můžeme říci, že o pevnosti betonu rozhoduje kvalita a množství ztvrdlé cementové pasty a pevnosti rozhraní ztvrdlé cementové pasty a kameniva.

### **3.3.1.1 Pevnost rozhraní ztvrdlé cementové pasty a kameniva**

Rozhraní mezi ztvrdlou cementovou pastou a kamenivem silně ovlivňuje mechanické vlastnosti betonu a je nejslabším místem v kompozitním systému betonu. Spojení složek kompozitu závisí na jejich vzájemné adhezi (přilnavosti) a kohezi (soudržnosti). Tyto vlastnosti lze rozdělit na několik složek:

- Adheze mechanická. Krystaly hydratovaných minerálů prorůstají do pórů a mezerovitosti kameniva. Takto vytvořená obálka ztvrdlé cementové pasty kolem povrchu kameniva se smršťuje a tím je přitlačována k povrchu kameniva.
- Adheze v krystalických mřížkách. Vzniká přímou vazbou mezi podobnými (uspořádáním i rozměry) krystalickými mřížkami ztvrdlé cementové pasty a kameniva.
- Adheze kapilární. Vzniká přítomností vlhkosti v betonu. Kapilární voda působí svým povrchovým napětím na částice ztvrdlé cementové pasty a kameniva soudržně.
- Přilnavost chemická. Vzniká mezi hydratačními produkty cementu a chemicky aktivním kamenivem, například mezi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a kamenivem s obsahem  $\text{SiO}_2$ .

Přilnavost a soudržnost ztvrdlé cementové pasty s kamenivem je závislá na mnoha technologických vlastnostech, jako jsou například:

- Měrný povrch cementu.
- Jakost povrchu kameniva. Přilnavost cementového kamene k povrchu kameniva je silně ovlivněna čistotou povrchu kameniva a také drsností povrchu kameniva.
- Rozdílná tepelná roztažnost ztvrdlé cementové pasty a kameniva.
- Obsah vody v čerstvém betonu. Zvyšuje-li se obsah vody v čerstvém betonu nad optimální mez smáčitelnosti kameniva, projeví se to snížením adheze cementového kamene k povrchu kameniva.

### **3.3.1.2 Pevnost ztvrdlé cementové pasty**

Pevnost ztvrdlé cementové pasty závisí na mnoha činitelích, například na:

- Stupni hydratace cementu. Čím více cementu je zhydratováno, tím vyšší pevnost ztvrdlá cementová pasta bude mít.
- Mineralogickém složení cementu.
- Velikosti částic cementu. S rostoucím měrným povrchem se zvyšuje i pevnost ztvrdlé cementové pasty, ale také množství záměsové vody.
- Vodním součiniteli. Pevnost ztvrdlé cementové pasty je funkcí vodního součinitele, přičemž pevnost klesá se stoupajícím vodním součinitelem. Voda použitá k tvorbě cementového

tmele se dělí na vodu hydratační (chemická vazba minerálů), vodu adsorbovanou v gelové struktuře a kapilární vodu. Právě kapiláry vytvořené přebytečnou vodou velice silně ovlivňují pevnost cementového kamene.

- Celkové pórovitosti ztvrdlé cementové pasty. Fagerlund odvodil empirické vzorce pro výpočet pevnosti ztvrdlé cementové pasty v tlaku  $f_{ck}$  v závislosti na celkové pórovitosti  $P_C$ :

$$f_{ck} = 660(1 - P_C)^{5,54} \quad \text{pro } P_C > 0,34$$

$$f_{ck} = konst \cdot \ln(P_{KR} / P_C) \quad \text{pro } P_C \leq 0,34$$

*kritická pórovitost*

$$P_{KR} = 0,913 \cdot V'_{VCK} + V'_{ZCK}$$

*celková pórovitost*

$$P_C = \left[ \left( 1 - \frac{\rho_{CB}}{\rho_0} \right) + \frac{m_c}{\rho_v} \cdot (w - 0,1825 \cdot \alpha_H) \right] \cdot 100 \quad [\% \text{ objemově}]$$

<i>Kde <math>f_{ck}</math></i>	<i>char. pevnost ztvrdlé cementové pasty</i>	<i>[N/mm<sup>2</sup>]</i>
$P_C$	<i>celková pórovitost ztvrdlé cementové pasty</i>	<i>[% objemově]</i>
$P_{KR}$	<i>kritická pórovitost</i>	<i>[% objemově]</i>
$V'_{VCK}$	<i>objem vody ve ztvrdlé cementové pastě</i>	<i>[-]</i>
$V'_{ZCK}$	<i>objem vzduchu ve ztvrdlé cementové pastě</i>	<i>[-]</i>
$\rho_{cb}$	<i>objemová hmotnost čerstvého betonu</i>	<i>[kg/m<sup>3</sup>]</i>
$\rho_0$	<i>měrná hmotnost čerstvého betonu</i>	<i>[kg/m<sup>3</sup>]</i>
$m_c$	<i>hmotnost cementu</i>	<i>[kg/m<sup>3</sup> betonu]</i>
$\rho_v$	<i>objemová hmotnost vody</i>	<i>[kg/m<sup>3</sup>]</i>
$w$	<i>vodní součinitel</i>	<i>[-]</i>
$\alpha_H$	<i>stupeň hydratace</i>	<i>[-]</i>

### 3.4 PÓROVITOST BETONU

Beton dnes používaný ve stavebnictví je pórovitým materiálem. Pórovitost je jednou z dominantních vlastností, která ovlivňuje zásadním způsobem pevnost, modul pružnosti, permeabilitu a trvanlivost betonu.

#### 3.4.1 Druhy pórů v betonu

Collepari v knize Moderní beton [10] rozděluje póry na několik skupin:

- Póry vzniklé **nedokonalým zhutněním čerstvého betonu** a nedokonalým vypuzením zachyceného vzduchu v betonu. Tyto póry mají tvar nepravidelných makrodutin (kaveren). V nedokonale zhutněném betonu jsou zastoupeny v hojném počtu.
- **Póry přítomny v zrnech kameniva**. Pórovitá kameniva se používají pro zlepšení tepelně a akusticky izolačních vlastností a mají za následek snížení mechanických vlastností betonu.
- **Pórovitost ve formě provzdušnění**. Jedná se o sférické uzavřené póry velikosti 100  $\mu\text{m}$  - 300  $\mu\text{m}$ . Tyto póry se do betonu vnáší za účelem zvýšení mrazuvzdornosti. Tyto póry lze sledovat optickým mikroskopem.
- **Póry vzniklé mezi zrny hydratujícího cementu**. Jejich tvar je nepravidelný a jejich velikost se pohybuje od 0,1  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Tyto póry jsou někdy označovány jako **kapilární póry**. Výskyt těchto pórů je silně ovlivněn množstvím záměsové vody, způsobem ošetřování betonu a stupněm hydratace. Tyto póry jsou pozorovatelné jen elektronovým mikroskopem.
- Póry uvnitř pevných hydrátů vyskytující se hlavně v C-S-H tobermoritickém gelu. Tyto póry označujeme jako gelové póry. Jejich velikost se pohybuje od 1 nm do 10 nm. Tyto póry označujeme jako **gelové póry**. Jejich velikost znemožňuje pozorování jakýmkoli mikroskopem, proto jsou zjišťovány nepřímo, prostřednictvím adsorpce plynů, jako jsou dusík a hélium, nebo vodní páry.

Pórovitost ztvrdlé cementové pasty, potažmo pórovitost betonu silně ovlivňuje modul pružnosti cementového kamene a tedy i betonu. Vztah mezi modulem pružnosti a celkovou pórovitostí lze vyjádřit následujícím vztahem (viz článek ze serveru [www.betonracio.sk](http://www.betonracio.sk) [18]):

$$E_p = E_g (1 - P_c)^3 \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $E_p$                     *modul pružnosti ztvrdlé cementové pasty*                     $[N/mm^2]$

$E_g$                     *modul pružnosti ztvrdlé cementové pasty při nulové*  
*pórovitosti*                     $[N/mm^2]$

$P_c$                     *celková pórovitost cementového kamene*                     $[-]$



## 3.5 VZTAH MEZI MODULEM PRUŽNOSTI A PEVNOSTÍ BETONU

Ařtin v knize Vysokohodnotný beton [23] uvádí dva přístupy k „předpovědění“ modulu pružnosti, a to pomocí teoretických úvah a pomocí empirických dat.

### 3.5.1 Teoretické úvahy

Teoretickým způsobem lze modul pružnosti vypočítat z mnoha různých modelů, které nějakým způsobem vystihují elastický charakter betonu. Nejjednodušší model (Illston a kol., 1987) zahrnuje jen kamenivo a ztvrdlou cementovou pastu. V tomto modelu se předpokládá, že obě složky buď přenášejí stejné napětí (Voightův model), nebo vyvíjejí stejnou deformaci (Reussův model).

Podle Voightova modelu potom modul pružnosti vyjadřujeme vztahem:

$$E_c = E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2 \quad [N/mm^2]$$

Přičemž platí:

$$g_1 + g_2 = 1$$

Reussův model vyjadřuje modul pružnosti podle vztahu:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{g_1}{E_1} + \frac{g_2}{E_2}$$

Kde:  $E_1, E_2$             *modul pružnosti cementového kamene a kameniva*  $[N/mm^2]$

$g_1, g_2$             *relativní objem cementového kamene a kameniva*  $[-]$

Dále známe mnohem komplikovanější a komplexnější modely výpočtu modulu pružnosti, které ve výpočtu používají i Poissonovy konstanty betonu, malty a hrubého kameniva (Hansen, 1965). Další známý model vytvořili v roce 1992 Larrad a DeRoy, v němž používají také hutnost uspořádání suchého kameniva.

Ukazuje se, že ani tyto velice sofistikované modely nedokážou poskytnout přesné hodnoty, a to hlavně z toho důvodu, že jsou založeny na předpokladech, které často nebývají splněny. Těmi jsou:

- Působení zatížení zůstává jednoosé a tlakové.
- Zanedbává se vliv kontinuity mezi jednotlivými vrstvami, které tvoří model.
- Žádné lokální porušení vazeb nebo drcení neovlivní deformaci.

### 3.5.2 Empirický přístup

Nejčastěji se používá toho, že modul pružnosti je ovlivňován stejnými parametry jako pevnost betonu v tlaku. Zkušenosti ukazují, že tato představa platí pro běžný beton, kde hlavní roli hraje ztvrdlá cementová pasta, ta je nejslabším článkem betonu a její pevnost a potažmo i modul pružnosti jsou dány vodním součinitelem. Proto jsou modul pružnosti betonu a pevnost v tlaku

betonu vyjadřovány pomocí vlastností ztvrdlé cementové pasty. Většina národních norem udává vztah:

$$E'_c = \psi (f'_c)^{1/n} \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $\psi, n$  empiricky zjištěné konstanty [-]

$f_c$  pevnost betonu v tlaku  $[N/mm^2]$

Například Collepardi v knize Moderní beton [10] uvádí závislost, která je určena podle vztahu:

$$E = K_E \cdot f_c^{1/2} \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $E$  modul pružnosti  $[N/mm^2]$

$K_E$  konstanta, která zohledňuje použitou metodu zjišťování pevnosti a použité jednotky [-]

$f_c$  pevnost betonu v tlaku  $[N/mm^2]$

Norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] používá pro určení modulu pružnosti vztah:

$$E_m = 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $f_{cm}$  charakteristická válcová pevnost v tlaku zvýšená o 8 N/mm<sup>2</sup>, například pro C30/37 je  $f_{cm} = 30 + 8 = 38$   $[N/mm^2]$

Podle Pytlíka [12] modul pružnosti betonu roste s jeho pevností dle empiricky zjištěné rovnice:

$$E_B = \frac{E_m \cdot R_B}{k + R_B} \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $E_B$  modul pružnosti  $[N/mm^2]$

$E_m, k$  empiricky zjištěné konstanty  $[N/mm^2]$

$R_B$  krychelná pevnost v tlaku  $[N/mm^2]$

Ve světě je používáno mnoho podobných rovnic, které se liší často jen hodnotami empirických konstant. Všechny tyto rovnice dávají podobné výsledky. Nutno podotknout, že všechny tyto rovnice jsou pouze orientační, nicméně z nich lze vyvodit závěr, že vztah mezi modulem pružnosti a pevností v tlaku je takový, že s rostoucí pevností v tlaku roste také modul pružnosti betonu a naopak s klesající pevností v tlaku klesá i modul pružnosti.

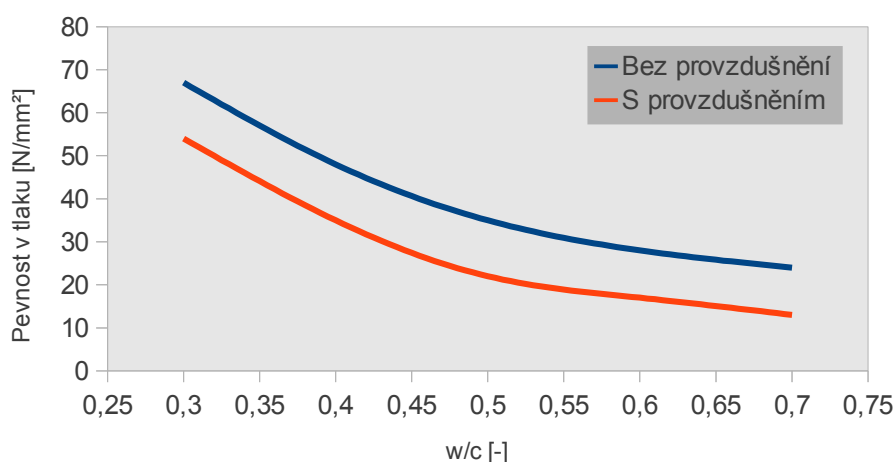
### 3.6 VLIV OBSAHU VZDUCHU VE ZTVRDLÉM BETONU NA MODUL PRUŽNOSTI A PEVNOST V TLAKU

Z předchozích kapitol vyplývá, že pevnost betonu v tlaku potažmo i modul pružnosti je silně ovlivněn mimo jiné celkovou pórovitostí  $P_c$  ztvrdlé cementové pasty a to tak, že s rostoucí celkovou pórovitostí klesá pevnost betonu v tlaku, potažmo tedy klesá i modul pružnosti betonu.

Vyšší obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu tedy snižuje pevnost samotného cementového kamene tím, že zvyšuje jeho pórovitost, a dá se předpokládat, že bude snížena i soudržnost mezi cementovým kamenem a povrchem kameniva.

Collepari v knize Moderní beton [10] uvádí, že vnesením pórů provzdušnění do struktury cementového kamene se pevnost betonu v tlaku sníží až o 20% oproti betonu bez provzdušnění (viz Ilustrace 3: Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na pevnost v tlaku [10]). Tento fakt potvrzuje i Aïctin v knize Vysokohodnotný beton [23], který uvádí, že v rozsahu od 4 % do 6 % se zvýšením obsahu vzduchu o 1% sníží pevnost v tlaku o 4 % až 6 %.

Je tedy zřejmé, že s rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu klesá i jeho modul pružnosti.



Ilustrace 3: Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na pevnost v tlaku [10]

## 3.7 PROVZDUŠNĚNÉ (MRAZUVZDORNÉ) BETONY

### 3.7.1 Oblast použití

V současné době nacházejí provzdušněné betony široké uplatnění zejména v konstrukcích vystavených vlivům agresivních prostředí, jedná se především o části konstrukcí vystavené povětrnosti a působení rozmrazovacích solí. Nejen z těchto důvodů jsou hlavní oblasti použití tohoto typu betonu hlavně dopravní plochy vystavené povětrnosti, části vozovek vystavené působení rozmrazovacích solí, betonové přehradní zdi a další dopravní konstrukce. [11]

### 3.7.2 Suroviny pro výrobu provzdušněných betonů

Hela a Hubáček v článku Problematika provzdušněných betonů [11] uvádějí, že nejvhodnější cement pro provzdušněné betony je čistý portlandský cement, který vykazuje lepší spolupůsobení cementové pasty s plastifikačními a provzdušňovacími přísadami. Dále také uvádějí, že je lepší použít kamenivo s minimální nasákavostí. Upřednostňováno má být kamenivo těžené před drceným a těžný písek před kopaným, zejména vzhledem k vyšší čistotě povrchu a menšímu obsahu jílovitých částic. Tyto částice nepříznivě ovlivňují vlastnosti ztvrdlých provzdušněných betonů. Dále je nutné dbát na správné spolupůsobení plastifikačních a provzdušňujících přísad, kdy při jejich nesprávné kombinaci může dojít k napěnění betonu. Tento fakt nepříznivě ovlivňuje mrazuvzdornost betonu, protože dochází k odlupování povrchových vrstev. Je také důležité dbát na správné dávkování vstupních surovin během míchání. Po přidání a zamíchání sypkých surovin se do míchačky přidává voda, plastifikační přísady se dávkuje až s poslední třetinou vody a provzdušňovací přísady se dávkuje až jako poslední, aby se nevsákly do ještě suché směsi a neztratily tím svoji účinnost. Doba míchání provzdušněných betonů by měla být alespoň 120 sekund, aby bylo dosaženo potřebného provzdušnění.

### 3.7.3 Faktory ovlivňující obsah vzduchu v čerstvém betonu

Obsah vzduchu v čerstvém betonu je závislý hlavně na množství provzdušňující přísady a na její kvalitě. Je ale nutno počítat s tím, že každá provzdušňující přísada má svoji maximální dávku, která když je překročena, tak se obsah vzduchu v betonu již nezvyšuje. Dávka provzdušňující přísady je ovlivněna mnoha činiteli, které je nutno při návrhu betonu uvažovat. Dávku provzdušňující přísady je nutno zvýšit zejména při (viz Unčík, odborný článek Prísady do betónu – klasifikácia, princíp pôsobenia, vplyv na vlastnosti betónu [19]):

- použití cementu jemnějšího mletí
- použití cementu s nižším obsahem alkálií
- použití popílku
- použití kameniva s vysokým podílem jemných částic
- použití pigmentů
- vyšších teplotách betonu
- tužších konzistencích betonu
- použití tvrdé záměsové vody

Dále Unčík uvádí, že poměrně výrazný vliv na stupeň provzdušnění má konzistence čerstvého betonu, přičemž množství vzduchu v betonu při stejné dávce narůstá s její zpracovatelností.

Při použití popílků a jiných jemných podílů naopak účinnost provzdušňovací přísady klesá. Použití provzdušňovací přísady spolu s plastifikační přísadou zpravidla vede ke zvýšení obsahu vzduchu v betonu. Při aplikaci provzdušňovacích přísad s některými superplastifikátory vede k mírnému zvětšení velikosti pórů, v tomto případě se doporučuje zvýšit dávku provzdušňovací přísady.

Výrazný vliv na množství vzduchu v betonu má také doba a intenzita míchání. Při krátkém nebo málo intenzivním míchání je provzdušňovací přísada málo rozptýlená ve směsi a její potenciál zůstává nevyužit. Při příliš dlouhém míchání naopak část vzduchu ze směsi uniká.

### **3.7.4 Provzdušňovací přísady**

Jako provzdušňovací přísady používáme:

- produkty na bázi přirozených pryskyřic (abietát sodný)
- soli mastných kyselin (většinou sodné soli, pěnicí mýdla)
- sulfonové deriváty organických kyselin (lignosulfonan Ca nebo Na)
- hydrolyzované albuminoidy a bílkoviny
- etoxilované organické třísloviny
- soli etanolaminu

Provzdušnění také vyvolávají pěnotvorné přísady, u kterých lze porušit stabilitu pěny přidávkem nepatrného nadbytku povrchově aktivní látky, která naruší stabilitu lamely pěny. Jako odpěňovače můžeme použít etanol, tributylfosfát nebo dibutylftalát.

#### **3.7.4.1 Vedlejší účinky provzdušňovacích přísad**

Provzdušňovací přísady působí mírně plastifikačně, což vede ke snížení vodního součinitele. Bubliny provzdušnění udržují pevné částice v suspenzi, takže ty neklesají a nesedimentují. Provzdušnění také zvyšuje kohezi směsi, takže ta během přepravy nesegreguje.

### **3.7.5 Porušení struktury betonu mrazem**

Základní podmínkou pro porušení betonu mrazem je jeho nasycení vodou (poměr objemu vody/objem pórů). Nasycení betonu vodou je způsobeno přítomností kapilárních pórů, které do sebe na základě kapilární elevace, tedy vztlínání, vtahují vodu.

Pokud je beton vyschlý, nemůže dojít k jeho porušení mrazem, protože toto porušení je způsobeno zvětšením objemu vody při změně z kapalného do pevného skupenství. K porušení tedy dojde, až pokud je stupeň nasycení vyšší než prahová hodnota zvaná **kritické nasycení**. Kritické nasycení při uvažovaném objemovém přírůstku vody 9% má hodnotu 91,7% (odvozeno v Moderní beton, Collepardi [10]). Pokud je tedy v určitém místě konstrukce stupeň nasycení (lokální stupeň

nasycení) vyšší než 91,7%, vyvolá objemový přírůstek vody tahové napětí ve ztvrdlé cementové pastě, a pokud je toto napětí vyšší než pevnost v tahu ztvrdlé cementové pasty, dojde k porušení struktury betonu.

### 3.7.5.1 Požadavky pro dosažení mrazuvzdornosti

V praxi lze dosáhnout mrazuvzdornosti dodržáním těchto požadavků

- snížení objemu kapilárních pórů, čehož dosáhneme snížením vodního součinitele
- provzdušnění betonu
- použití hutného mrazuvzdorného kameniva

Bylo zjištěno, že betony, které obsahují 4% až 6% pórů o průměru 100 až 300  $\mu\text{m}$ , jsou odolnější vůči působení mrazu. Tyto póry totiž představují expanzní prostor pro objemové změny vody při změně skupenství a také přerušují kapilární strukturu, čímž zamezí kapilární elevaci dále do struktury betonu. Aby tento mechanismus byl účinný, musí být součinitel prostorového rozložení pórů (spacing factor AF)  $L \leq 0,2 \text{ mm}$  a  $A_{300}$  (obsah mikropórů do 300  $\mu\text{m}$ )  $\geq 1,5\%$  (viz ČSN EN 206-1 Z3). Součinitel prostorového rozložení pórů  $L$  je vypočítaný parametr vyjadřující maximální vzdálenost jakéhokoli bodu v cementovém kameni od kraje vzduchového póru v mm. Faktor  $L$  lze vypočítat podle vztahů:

$$L = \frac{30}{\alpha} \cdot \left[ 1,4 \cdot \left( \frac{V_{CT}}{V_z} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad [mm]$$

$$\text{Parametr } \alpha = \frac{400 \cdot n}{V_z \cdot (S_T + S_P)} \quad [cm^{-1}]$$

$$V_{CT} = 0,032 \cdot m_c + 0,1 \cdot m_v \quad [kg]$$

$$\frac{V_{CT}}{V_z} > 4,33 \quad [-]$$

<i>Kde</i>	$n$	<i>počet měřených pórů</i>	$[ks]$
	$V_{CT}$	<i>objem cementového kamene</i>	$[m^3]$
	$m_c$	<i>hmotnost cementu</i>	$[kg]$
	$m_v$	<i>hmotnost vody</i>	$[kg]$
	$V_z$	<i>objem vzduchových pórů</i>	$[m^3/m^3 \text{ betonu}]$

### 3.7.5.2 Porušení struktury betonu současným působením mrazu a chemických rozmrazovacích látek

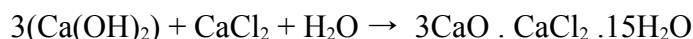
U vodorovných konstrukcí, jako jsou mostovky, vozovky nebo venkovní podlahy, je nutno počítat také s účinkem rozmrazovacích solí (NaCl a CaCl<sub>2</sub>), které mají negativní vliv na konstrukce z prostého betonu i železobetonu.

Použití NaCl jako rozmrazovací soli má dva následující efekty:

- Reakce chloridových iontů Cl<sup>-</sup>, které způsobují korozi výztuže. Ta vede ke zvětšování objemu výztuže a odprýsknutí krycí vrstvy betonu a obnažení výztuže. Toto vede k další korozi a následně ke snížení únosnosti konstrukce.
- Reakce Na<sup>+</sup> iontů se zrny kameniva při takzvané alkalicko-křemičité reakci. Ta je způsobena současnou přítomností amorfního SiO<sub>2</sub>, například z mikrosiliky nebo elektrárenských popílků, a alkalických iontů Na<sup>+</sup> a K<sup>+</sup>. Při této reakci z amorfního SiO<sub>2</sub> a alkalických iontů za přítomnosti vody vzniká hydratovaný křemičitan sodný, respektive draselný, což je doprovázeno markantním zvětšením objemu.

Při styku betonu s roztokem s CaCl<sub>2</sub> dochází k těmto následujícím reakcím:

- Napadení výztuže Cl<sup>-</sup> ionty stejně jako při reakci s NaCl
- Reakce mezi CaCl<sub>2</sub> a cementovou pastou, což vede odlupování a vyluhování betonu díky vzniku oxychloridu vápenatého podle rovnice



### 3.7.5.3 Součinitel mrazuvzdornosti

Jelikož všechna tato porušení způsobují mimo jiné pokles pevnosti betonu v tahu a tlaku, respektive modulu pružnosti, byl zaveden jako ukazatel odolnosti proti působení mrazu a trvanlivosti betonu součinitel mrazuvzdornosti.

Součinitel mrazuvzdornosti je v ASTM C 666 [22] založen na měření dynamického modulu pružnosti na vzorcích před a po podstoupení určitého počtu zmrazovacích cyklů. Hodnota modulu pružnosti je zjišťována nejprve na vzorcích starých 28 dnů, poté se vzorky podrobí předepsanému počtu zmrazovacích cyklů a zjišťuje se znovu hodnota modulu pružnosti. Součinitel mrazuvzdornosti se pak vypočte ze vztahu:

$$f_d = 100 \cdot \frac{E_n}{E_0} \cdot \frac{n}{300} \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde:	$E_n$	dynamický modul pružnosti po $n$ cyklech	$[N/mm^2]$
	$E_0$	dynamický modul pružnosti před začátkem zkoušky	$[N/mm^2]$
	$n$	počet cyklů, maximálně však 300 cyklů	$[-]$

Pokud hodnota  $E_n$  klesne pod 60 %  $E_0$  ještě před proběhnutím 300 cyklů, vypočítá se součinitel mrazuvzdornosti následovně:

$$f_d = \frac{60 \cdot n}{300} \quad [N/mm^2]$$

Kde:  $n$  počet proběhnutých cyklů [-]

V České republice se používá ČSN 73 1322, která určuje index mrazuvzdornosti buď pomocí dynamického modulu pružnosti, nebo pevnosti betonu v tahu a tlaku. Jako kritérium mrazuvzdornosti se bere hodnota 75%, tedy beton s indexem mrazuvzdornosti vyšším než 75% je považován za mrazuvzdorný.

### 3.7.6 Dosažení mrazuvzdornosti bez provzdušnění

Experimentálně bylo zjištěno, že mrazuvzdornosti betonu lze dosáhnout i jiným způsobem, než je vnesení vhodných pórů do struktury betonu. Mrazuvzdornosti se dá dosáhnout také použitím vyššího obsahu alternativních silikátových pojiv, jako jsou struska, popílek či metakaolín, které nejen zvyšují hutnost betonu jako jemné kamenivo (vykazují měrný povrch v řádech desítek tisíců  $m^2/kg$ ), ale vykazují také pucolánové, respektive latentně hydraulické vlastnosti, což má za následek tvorbu C-S-H gelů, které zaplňují kapilární póry (viz článek [15] a [16]).

Použitím těchto alternativních pojiv se struktura betonu stává velice hutnou. Tato hutná struktura obsahuje minimální podíl pórů a vykazuje velice nízké hodnoty nasákavosti a propustnosti plynů a kapalin. To má za následek to, že ve struktuře betonu není dosaženo kritického nasycení, a tak tedy nedochází k porušení struktury betonu přeměnou kapalné vody na led.

## 3.8 KONZISTENCE BETONU

Reologické vlastnosti čerstvého betonu definujeme technologickými veličinami, které měříme na přístrojích, které zjišťují pouze relativní hodnoty pro vzájemné srovnání čerstvých betonů. Technologické reologické vlastnosti dělí Pytlík v knize Technologie Betonu I [8] na:

- **Fenomenologické** (popisné), nevyjadřují podstatu a nelze je měřit. Popisujeme je jako zpracovatelnost čerstvého betonu, která zahrnuje míchatelnost, dopravovatelnost, ukladatelnost, zhutňovatelnost, plastičnost, pohyblivost.
- **Zvláštní**, definované pojmem konzistence čerstvého betonu. Je to schopnost přetváření čerstvého betonu při působení vnějších sil. Hodnotové vyjádření konzistence má usanční charakter, vyplývající z použitého měřicího zařízení a zkušební postupu. Zkušební metody jsou většinou označeny podle autora a lze je zařadit do devíti skupin: sednutí, rozlité, penetrace, přetvárná práce, zhutnění, výtok, deformace, přetvoření při pádu, směšování. Každá metoda není vhodná pro celé spektrum konzistencí a má své vlastní jednotky.



Nedoporučuje se provádět převody hodnot jednotlivých zkušebních metod na jiné metody, i když lze v určitých mezích usuzovat na shodné reologické vlastnosti.

V evropských normách jsou zavedeny čtyři zkušební metody a v praxi se neuvádí číselných hodnot, ale pouze označení. Těmito metodami jsou zkouška sednutím kužele, zkouška rozlitím, zkouška stupně zhutnitelnosti a zkouška VEBE. (vše z ČSN EN 12350 [1]). Pro zkoušení konzistence samozhutnitelného betonu norma ČSN EN 12350 [1] uvádí zkoušky V-nálevkou, zkoušku L-truhlíkem, zkoušku segregace při prosévání a zkoušku J-kroužkem..

### 3.9 TVRDOMĚRNÉ METODY

Tvrdoměrné metody jsou využívány pro nedestruktivní určení tvrdosti materiálu, potažmo jeho pevnosti, a to jak přímo na zkoušené konstrukci, na vzorcích odebraných ze stávající konstrukce, nebo i na vzorcích vyrobených v laboratoři.

#### 3.9.1 Přehled tvrdoměrných metod

Schmid v modulu BI01-M02 – Zkušebnictví a technologie [14] dělí tvrdoměrné, neboli sklerometrické metody podle způsobu vyvození síly na statické, které jsou používány nejčastěji v laboratořích, a dynamické, které se velmi často používají i na konstrukcích. Dále je také dělí podle druhu zkoušeného materiálu na tvrdoměrné zkoušky betonu a malt, kovů, dřeva a kusových staviv.

Tvrdomost materiálu můžeme zjišťovat těmito metodami:

- vrypovými
- vtiskovými
- vnikacími
- odrazovými
- a dalšími

Při vrypové metodě se určuje tvrdost pomocí vrypu jednoho materiálu do druhého. Tímto vznikla Mohsova stupnice tvrdosti.

Vtiskové metody určují tvrdost na základě velikosti vtisku vytvořeného v materiálu zatlačením předepsaného vnikajícího tělíska určenou silou zkušebního zařízení. Mezi tyto metody lze zařadit zkoušení tvrdosti dle Brinella, Janky, Vickerse, Waitzmanna a další.

Vnikací metody jsou založeny na míře vniknutí tvrdého tělesa do měkčího materiálu, jako jsou beton, malta, nebo dřevo, způsobeném opakovanými rázy. Měří se buď hloubka vniku špičáku do zkoušeného materiálu při daném počtu specifikovaných úderů, nebo naopak nutný počet úderů na zaražení špičáku do dané hloubky. Mezi tyto metody řadíme například špičákovou metodu

Ing. J. Maška, špičákovou metodu prof. Cigánka nebo špičákovou metodu Baumannovým kladívkem.

Odrazové metody jsou založeny na měření odrazu standardního tělesa padajícího z určené výšky nebo vrženého danou energií od povrchu zkoušeného tělesa. Mezi odrazové metody řadíme pro zkoušení tvrdosti kovů metodu dle Shora a pro měření tvrdosti betonů, malt a cihel metodu Schmidtových sklerometrů.

### **3.9.2 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu**

V současné době jsou nejvíce používanými nedestruktivními metodami pro zkoušení betonu právě tvrdoměrné metody. Tyto metody mají velkou výhodu v jednoduchosti a rychlosti měření, ale mají také určitá omezení, jako například:

- zkouší se jen povrchová vrstva materiálu
- zkouší se vlastnosti betonu (tvrdost, pružnost, lokální porušení), o kterých se předpokládá, že jsou v těsném korelačním vztahu ke sledované vlastnosti, jako jsou pevnost betonu v tlaku nebo modul pružnosti
- přesnost a spolehlivost výsledků, které jsou závislé na přesnosti měření a velikosti chyb
- četnost zkušebních míst, která nesou riziko omylu
- přístupnost konstrukce, její stáří, vlhkostní stav konstrukce, homogenita konstrukce a jiné

#### **3.9.2.1 Společné zásady pro tvrdoměrné zkoušení betonu**

Pro odpovědné provádění zkoušek a jejich vyhodnocování je třeba se řídit příslušnými ustanoveními platných ČSN.

Při hodnocení pevnosti betonu v tlaku tvrdoměrnými metodami lze použít obecného kalibračního vztahu, který dává pouze informativní hodnoty, které nazýváme pevnost betonu v tlaku s nezaručenou pevností. Objektivních výsledků lze dosáhnout upřesněnými zkouškami na základě:

- vyhodnocení podle určujícího kalibračního vztahu, který se vypracovává pro každý beton zvlášť a zohledňuje jeho stáří, vlhkost a ošetřování
- odvození součinitele  $\alpha$ , který upřesňuje obecný, případně směrný, kalibrační vztah

*Obecný kalibrační vztah je uveden v příslušné ČSN dané zkušební metody.*

*Směrný kalibrační vztah je vypracován pro ty betony, které se obvykle používají pro sledovanou vlastnost a zvolenou technologii. Pro jeho odvození zpravidla stačí vyzkoušení nejméně 100 zkušebních těles.*

*Určující kalibrační vztah slouží pro stanovení upřesněných hodnot vlastnosti daného betonu, např. pevnosti v tlaku, určitého druhu. Je buď úzký pro rozsah pevností v rámci jedné třídy betonu,*

nebo široký pro rozsah pevností dvou nebo více tříd betonů zhotovených stejnou technologií výroby ze stejných složek. [14]

Upřesnění obecného nebo směrného kalibračního vztahu se provádí vynásobením hodnoty určené pomocí kalibračního vztahu součinitelem  $\alpha$ , který se vypočte podle vzorce:

$$\alpha = \frac{R_b}{R_{be}} \quad [-]$$

kde  $R_b$  krychelná pevnost betonu v tlaku  $[N/mm^2]$   
 $R_{be}$  pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností určená nedestruktivní metodou na stejném vzorku  $[N/mm^2]$

Zkušební místa se volí tak, aby reprezentovala zkoušený beton, nevolí se nad probíhající výztuží. Jejich velikost je dána použitou tvrdoměrnou metodou. Z povrchu každého zkušební místa je potřeba odstranit zkarbonatovanou vrstvu betonu. O tom, zda je vrstva betonu zkarbonatovaná se lze přesvědčit ovlhčením roztokem fenolftaleinu, který se při překročení pH 9,6 mění z bezbarvého roztoku na fialový. Zkarbonatovaná vrstva tedy zůstane bezbarvá, protože má pH nižší než 9,6, kdežto nezkarbonatovaná vrstva se zbarví do fialova.

V ČSN 73 1373 [4] jsou popsány následující metody:

- metoda Waitzmannova tvrdoměru (W)
- metoda kuličkového tvrdoměru (K)
- metoda Schmidových tvrdoměrů N, L, M (S)
- metoda špičákového tvrdoměru (ŠT)

### **3.9.2.2 Metoda Schmidových tvrdoměrů**

Nejčastěji používanou sklerometrickou metodou pro zkoušení betonů je v dnešní době metoda Schmidových tvrdoměrů. Mechanismus všech Schmidových tvrdoměrů je stejný. Jedná se o pružinové tvrdoměry sestávající z razníku, beranu, pružin a vlečného ukazatele s měřítkem. Při zatlačení razníku a uvolnění závěsu dopadne beran na razník a odrazí se od něj. Beran při zpětném pohybu posune vlečný ukazatel na měřítku do místa, které odpovídá velikosti odrazu. Velikost odrazu je závislá na směru tvrdoměru, přičemž základní poloha je vodorovná. Pro zkoušení betonu se používají různé tvrdoměry, které se dělí podle vyvozené energie na (viz [25]):

- typ N - s energií 2,25 J – rozmezí od 17 do 60 N/mm<sup>2</sup> a nejmenší tloušťka 100 mm
- typ L - s energií 0,75 J – rozmezí od 15 do 50 N/mm<sup>2</sup> a nejmenší tloušťka 60 mm
- typ M - s energií 30,00 J – rozmezí od 25 do 60 N/mm<sup>2</sup> a nejmenší tloušťka 200 mm

### 3.10 ČSN EN 206-1 BETON – ČÁST 1: SPECIFIKACE, VLASTNOSTI VÝROBA A SHODA

Tato norma platí pro betony, které jsou použity pro konstrukce betonované na staveništi, pro montované konstrukce a pro prefabrikované konstrukční dílce pozemních a inženýrských sítí. V normě jsou předepsány požadavky například pro složky betonu, pro vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu a jejich ověřování nebo třeba pro dodávání čerstvého betonu. Norma taky předepisuje kritéria pro klasifikaci betonu. Dále se budeme zabývat jen tím, jaké požadavky má tato norma na provzdušněné betony a jejich použití.

#### 3.10.1 Stupně vlivu prostředí

Norma zavádí jako jedno z kritérií klasifikace betonu stupně vlivu prostředí (ČSN EN 206-1 Z3 [6] Tabulka NA.1). Na základě této tabulky rozeznáváme sedm prostředí, jako jsou například X0, což je prostředí bez nebezpečí koroze nebo narušení, nebo XF1 až XF4, které označuje prostředí se střídavým působením mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich.

Požadavky na odolnost betonu vůči působení prostředí jsou dány buď mezními hodnotami pro složení betonu a stanovenými vlastnostmi betonu, nebo mohou být požadavky odvozeny z návrhu složení betonu s požadovanou vlastností.

##### 3.10.1.1 Mezní hodnoty pro složení betonu

Mezní hodnoty pro složení betonu jsou specifikovány:

- dovolenými druhy a kategoriemi složek betonu
- maximálním vodním součinitelem
- minimálním obsahem cementu
- minimální pevnostní třídou betonu v tlaku (doporučené)
- případně minimálním obsahem vzduchu

V případě, že hodnoty jsou v souladu s mezními hodnotami, předpokládá se, že beton zabudovaný v konstrukci splňuje trvanlivostní požadavky pro použití v daném prostředí, pokud jsou splněny tyto podmínky:

- beton je správně uložen, zhutněn a ošetřen
- beton má minimální tloušťku krycí vrstvy výztuže, kterou požaduje
- byl vybrán příslušný stupeň vlivu prostředí
- provádí se předpokládaná údržba

Doporučené mezní hodnoty pro složení betonu jsou uvedeny v ČSN EN 206-1 [5] Tabulka F.1. Z této tabulky vyplývá, že betony třídy XF2 až XF4 musí obsahovat minimálně 4 % vzduchu.

Dále také norma stanovuje mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu platné v ČR pro dopravní a jiné významné stavby s předpokládanou životností 100 let (ČSN EN 206-1 Z3 [6] Tabulka F.2), kde pro třídy od XF1 do XF4 stanovuje minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu v závislosti na zrnitosti od 2,5% do 5,5%, přičemž maximální obsah vzduchu může být nejvýše o 3% vyšší než stanovené minimum. Dále stanovuje pro třídy XF2 až XF4 minimální obsah mikropórů  $A_{300}$  ve ztvrdlém betonu dle ČSN 480-11 [10] od 1,0% do 1,8% a maximální součinitel rozložení vzduchových pórů (L) podle ČSN 480-11[10] od 0,20 mm do 0,24 mm.

### **3.10.1.2 Návrhy složení betonu s požadovanou vlastností**

Norma dovoluje stanovit požadavky na složení pomocí návrhu betonu s příslušnými parametry vlastnosti, například odlupování betonu při zkoušce střídavým zmrazováním a rozmrazováním. Pokyny pro tento postup stanovuje ČSN EN 206-1 [5] příloha J, ta je ale pouze informativní. Tato metoda je alternativní a její použití závisí na předpisech platných v místě použití.

### **3.10.2 Pevnostní třídy betonu v tlaku**

Jako další z kritérií pro klasifikaci betonu norma zavádí pevnostní třídy betonu v tlaku. Pro klasifikaci se použije charakteristická pevnost tlaku na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm ( $f_{ck,cyl}$ ) nebo charakteristická pevnost v tlaku na krychlích o hraně 150 mm ( $f_{ck,cube}$ ). Obojí se zkouší na vzorcích stáří 28 dní.

Norma zavádí pro obyčejný (objemová hmotnost od 2000kg/m<sup>3</sup> do 2600 kg/m<sup>3</sup>) a těžký beton (od 2600 kg/m<sup>3</sup>) osmnáct tříd (ČSN EN 206-1 Z3 [6] Tabulka NA.7) od C-/5 do C100/115, kde písmeno C značí, že se jedná o obyčejný nebo těžký beton, číslo před lomítkem značí minimální charakteristickou válcovou pevnost v N/mm<sup>2</sup> ( $f_{ck,cyl}$ ) a číslo za lomítkem značí minimální charakteristickou krychelnou pevnost ( $f_{ck,cube}$ ) v N/mm<sup>2</sup>.

Pro lehké betony zavádí norma čtrnáct tříd (ČSN EN 206-1 [5] Tabulka 8) od LC8/9 po LC80/88. Písmena LC značí, že jde o lehký beton (objemová hmotnost od 800 kg/m<sup>3</sup> do 2000 kg/m<sup>3</sup>) a následující čísla značí stejně jako u obyčejného a těžkého betonu minimální charakteristické válcové a krychelné pevnosti v N/mm<sup>2</sup>.

## **3.11 ČSN EN 1992-1-1 EUROKÓD 2: NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ – ČÁST 1-1: OBECNÁ PRAVIDLA A PRAVIDLA PRO POZEMNÍ STAVBY**

Tato norma se zabývá navrhováním betonových konstrukcí a uvádí základní výpočtové vztahy používané při navrhování betonových konstrukcí. Tato norma nijak zvlášť neurčuje požadavky na provzdušnění betonu.

Při navrhování betonových konstrukcí hraje velkou roli hlavně pevnost betonu v tlaku a dále moduly pružnosti betonu. Pro označení pevnosti betonu v tlaku tato norma používá pevnostní třídy podle ČSN EN 206-1 [5]. Do výpočtů potom vstupují charakteristické hodnoty  $f_{ck,cyl}$  a  $f_{ck,cube}$ , přičemž první zmiňovaná značí válcovou pevnost v tlaku a druhá zmiňovaná krychelnou pevnost v tlaku.

Dále norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] používá pro zjištění modulu pružnosti empirické vztahy (tabulka 3.1 v ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7]). Tyto moduly pružnosti vstupují do výpočtu mezního stavu porušení, hlavně potom při výpočtu deformací konstrukce. Tyto empirické vztahy zřejmě nepočítají s provzdušněním betonu a tedy se snížením jeho modulu pružnosti.

Hodnoty uvedené v tabulce 3.1 v ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] se mají považovat za směrné pro obecné použití. Pokud je ale konstrukce citlivá na odchylky od těchto obecných hodnot, mají se tyto hodnoty stanovit přesněji. Pro vápencové a pískové kamenivo se mají hodnoty snížit o 10 %, respektive o 30 %, pro čedičové kamenivo naopak zvýšit o 20 %.

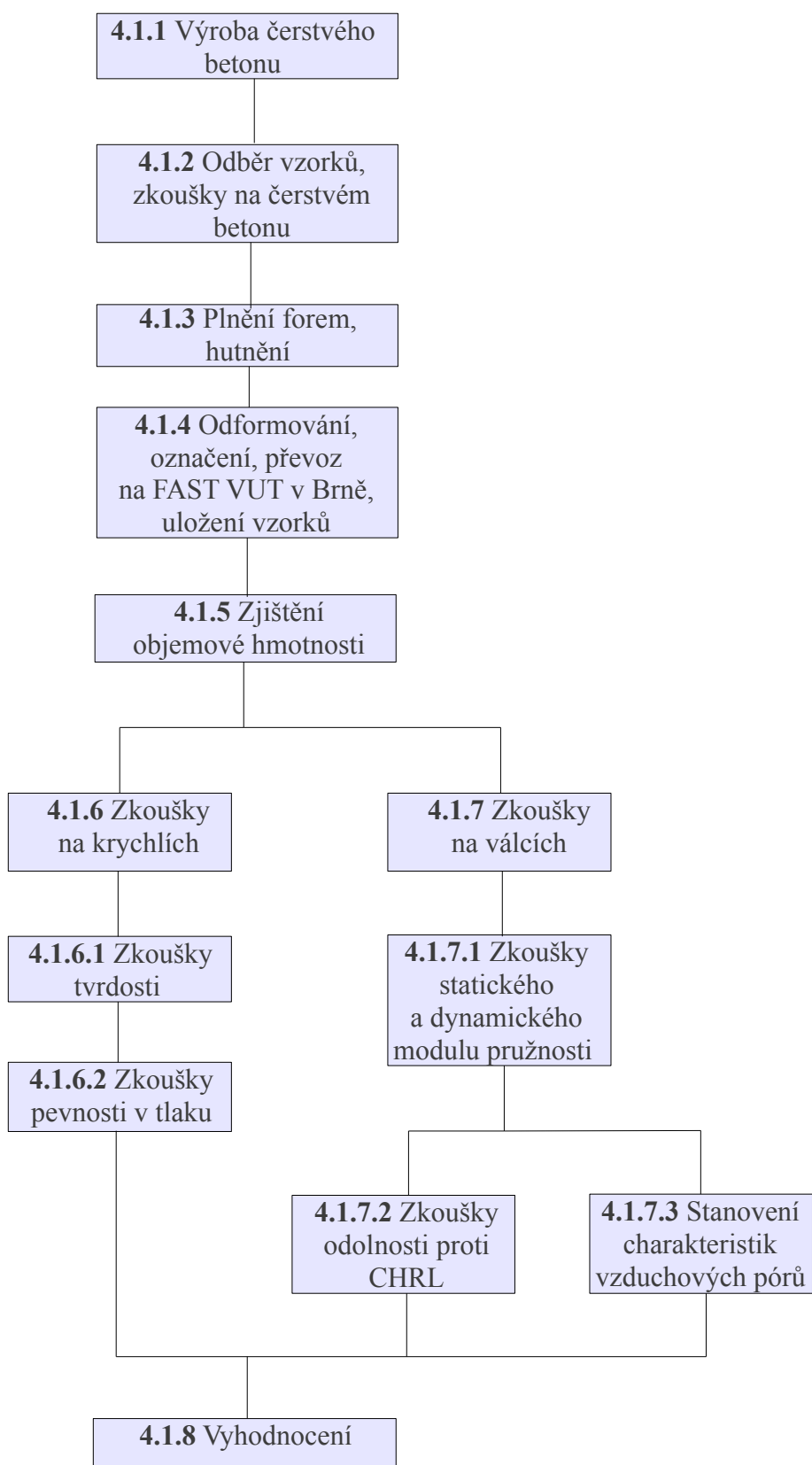
Vašková a kolektiv v článku Modul pružnosti automaticky? [20] ukazují na výpočtu průhybu 18 cm tlusté betonové desky citlivost na hodnotu modulu pružnosti. Provedli výpočet s hodnotou modulu pružnosti použitého betonu z tabulky 3.1 z ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] a výpočet s modulem pružnosti sníženým o 30 %. Bylo zjištěno, že při takovém snížení modulu pružnosti se průhyby desky zvýší až o 75%.

Misák a Vymazal publikovali článek [17], v němž uvádějí experiment, kterým dokázali, že směrné hodnoty modulu pružnosti vyjádřené pomocí pevnosti v tlaku a uvedené v tabulce 3.1 této normy jsou nadhodnoceny ve všech pevnostních třídách. V jednom případě se dokonce průměrný výsledek sady vzorků lišil od směrné hodnoty modulu pružnosti o téměř 63 %.

Norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [7] sice uvádí směrné hodnoty modulu pružnosti a ty bývají často používány při návrhu konstrukce, ale je nutno si uvědomit, že tyto hodnoty mohou být zavádějící a to především z důvodu vysokého rozptylu hodnoty modulu pružnosti v jedné pevnostní třídě. Tento rozptyl je způsoben novými trendy v technologii betonu, jako jsou použití plastifikačních, provzdušňujících a jiných přísad, použití příměsí, jako jsou popílek či metakaolín, a mnoho jiných. Proto nyní vyvstává otázka, zda je relevantní využívat pevnost betonu v tlaku pro určení modulu pružnosti.

## 4 METODIKA ŘEŠENÍ

### 4.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM



### 4.1.1 Výroba čerstvého betonu

Bylo namícháno pět záměsí betonu o objemu 50 l s různým obsahem provzdušňovací přísady a jedna záměs o objemu 40 l bez přídavku provzdušňovací přísady jako referenční záměs. Byla použita receptura uvedená

*Tabulka 1: Složení čerstvého betonu*

Materiál	Množství
CEM I 42,5 R	400 kg/m <sup>3</sup>
Kamenivo 0-4	820 kg/m <sup>3</sup>
Kamenivo 4-8	180 kg/m <sup>3</sup>
Kamenivo 8-16	720 kg/m <sup>3</sup>
Plastifikační přísada	2,000 % z hmotnosti cementu
Voda	140 kg/m <sup>3</sup>
Provzdušňující přísada	Referenční – 0,000 % z hmotnosti cementu Záměs č. 2. - 0,025 % z hmotnosti cementu Záměs č. 3. - 0,050 % z hmotnosti cementu Záměs č. 4. - 0,075 % z hmotnosti cementu Záměs č. 5. - 0,100 % z hmotnosti cementu Záměs č. 6. - 0,125 % z hmotnosti cementu

### 4.1.2 Odběr vzorků, zkoušky na čerstvém betonu

Z každé záměsi byl odebrán vzorek podle ČSN EN 12350 [1]. Na všech odebraných vzorcích čerstvého betonu byly provedeny zkoušky objemové hmotnosti, zkouška sednutím kužele a zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu (Vše podle ČSN EN 12350 [1]).

### 4.1.3 Plnění forem, hutnění

Z první záměsi bylo vytvořeno jedno zkušební těleso tvaru krychle a šest těles ve tvaru válce. Z ostatních pěti záměsí bylo vytvořeno šest zkušebních těles tvaru válce a tři tělesa tvaru krychle. Všechny krychle měly délku hrany 150 mm a všechny válce průměr podstavy 150 mm a výšku 300 mm. Použitý režim hutnění a plnění byl u všech záměsí stejný. Válce i krychle byly plněny ve dvou vrstvách a každá vrstva byla hutněna na vibračním stolku po dobu 10 sekund. Poté byl povrch zarovnan ocelovým hladítkem.



#### **4.1.4 Odformování, označení, převoz na FAST VUT v Brně, uložení vzorků**

Vždy po 24 hodinách po namíchání záměsi byla zkušební tělesa odformována, řádně označena, a uložena do vlhkého prostředí.

Po namíchání všech záměsí byla celá sada těles převezena do zkušební laboratoře Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně. Tam byla tělesa uložena do vlhkého uložení na rošty, tak, aby nebyla ponořena ve vodě.

#### **4.1.5 Zjištění objemové hmotnosti**

Po 28 dnech od výroby těles byla všechna tělesa zvážena a změřena pro zjištění objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.

#### **4.1.6 Zkoušky na krychlích**

##### **4.1.6.1 Zkoušky tvrdosti**

Na tělesech tvaru krychle byly provedeny nedestruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku Schmidovým tvrdoměrem (podle ČSN 73 1373 [4]).

##### **4.1.6.2 Zkoušky pevnosti v tlaku**

Byly provedeny destruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech pro ověření tvrdoměrných zkoušek.

#### **4.1.7 Zkoušky na válcích**

##### **4.1.7.1 Zkoušky statického a dynamického modulu pružnosti**

Na tělesech tvaru válců byly zjištěny moduly pružnosti po 28 dnech podle ČSN ISO 6748 [3]. Dále na těchto tělesech byla zjištěna rychlost průchodu ultrazvuku vzorkem pro zjištění dynamického modulu pružnosti a potvrzení homogenity.

##### **4.1.7.2 Zkoušky odolnosti proti CHRL**

Byla vyřezána tělesa pro stanovení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a ta byla podrobena uvedené zkoušce.

##### **4.1.7.3 Stanovení charakteristik vzduchových pórů**

Byla vyřezána tělesa pro stanovení charakteristiky vzduchových pórů podle ČSN EN 480-11 [13] a provedeno stanovení charakteristiky vzduchových pórů.

## **4.1.8 Vyhodnocení**

Následně byl posouzen vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na statický modul pružnosti a pevnost v tlaku.

## **4.2 POSTUPY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK**

### **4.2.1 Zkoušky čerstvého betonu**

Základní normou pro zkoušení čerstvého betonu je ČSN EN 12350 [1].

#### **4.2.1.1 Odběr vzorků**

Při odběru souhrnného vzorku z transportbetonu při vyprazdňování autodomíchávače, se vyloučí z odběru úplný začátek a úplný konec vyprazdňování. Vždy se odebírá takový vzorek, který reprezentuje celou dopravovanou směs.

Lokální vzorek se odebere lopatkou a uloží do nádoby.

Všechny operace během odběru, manipulace a dopravy vzorků musí být prováděny tak, aby nedošlo ke znehodnocení vzorků znečištěním, přidáním nebo ztrátou vody mimořádnými teplotními změnami. Je nutno dbát na to, aby při odebírání betonu z nádoby nebo nádob zůstala na stěnách pouze co nejtenčí vrstvička malty.

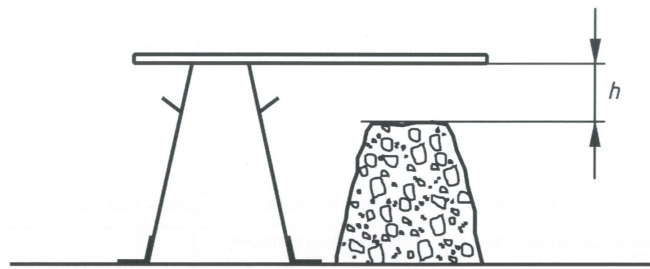
#### **4.2.1.2 Zkouška sednutím**

Podstatou zkoušky je to, že se čerstvý beton zhutní ve formě tvaru komolého kužele. Konzistenci betonu udává pokles kužele po zvednutí formy.

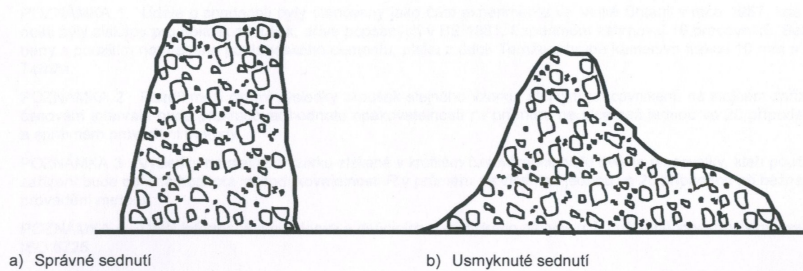
Forma se plní betonem ve třech vrstvách po třetinách výšky kužele. Každá vrstva se hutní 25 vpichy propichovací tyčí tak, aby poslední vrstvou pronikla přes celou výšku, ale nenarážela na dno a při hutnění dalších vrstev pronikla mírně do předchozí vrstvy.

Přebytečný beton se odstraní a zarovná se povrch betonu s horní podstavou kužele. Odstraní se spadlý beton a forma se během 2 až 5 sekund bez otáčení zvedne.

Změří se sednutí ( $h$ ) s přesností na 10 mm zjištěním rozdílu mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého zkušební vzorku podle Ilustrace 4: Měření sednutí, správné a usmyknuté sednutí [1].



Obrázek 1 – Měření sednutí



a) Správné sednutí

b) Usmyknuté sednutí

Ilustrace 4: Měření sednutí, správné a usmyknuté sednutí [1]

#### 4.2.1.3 Objemová hmotnost

Čerstvý beton je zhutněn v tuhé a vodotěsné nádobě známého objemu a hmotnosti a následně je zvážen.

V závislosti na konzistenci betonu a metodě zhutňování se nádoba plní ve dvou nebo více vrstvách, aby se dosáhlo úplného zhutnění, s výjimkou samozhutnitelného betonu, s kterým se plní nádoba v jedné operaci. Takto zhutněná směs se zváží a vypočte se objemová hmotnost podle následujícího vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Kde  $D$  objemová hmotnost betonu  $[\text{kg/m}^3]$

$m_1$  hmotnost prázdné nádoby  $[\text{kg}]$

$m_2$  hmotnost nádoby se zhutněným betonem  $[\text{kg}]$

$V$  objem nádoby  $[\text{m}^3]$

Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších  $10 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.2.1.4 Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Zkušební zařízení sestává z válcové nádoby z oceli nebo jiného tvrdého kovu, víka, tlakoměru a vzduchové hustilky. (Ilustrace 5: Tlakový hrnec [1])

Hutnění probíhá v závislosti na konzistenci betonu a metodě zhutňování v jedné nebo více vrstvách. Zhutňuje se tak, aby bylo dosaženo úplného zhutnění, ale aby nebyly vypuzeny bublinky provzdušnění.

Víko se neprodyšně upevní k nádobě pomocí svorek. Uzavře se hlavní ventil pro přívod vzduchu a otevřou se ventily A a B. Přístroj se za pomoci stříčky plní vodou tak, že se vsřikuje do ventilu A nebo B voda tak dlouho, dokud z druhého ventilu nevytéká voda. Do vzduchové nádoby se pumpuje vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu. Ručička tlakoměru se nastaví na počáteční polohu vypuštěním nebo připumpováním vzduchu. Uzavřou se ventily A a B a otevře se hlavní ventil vzduchu. Ostře se poklepe na boční stěny nádoby a za lehkého poklepávání na tlakoměr se odečte hodnota tlaku, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu  $A_1$  v procentech. Před sejmutím víka se otevřou ventily A a B, aby se uvolnil tlak.

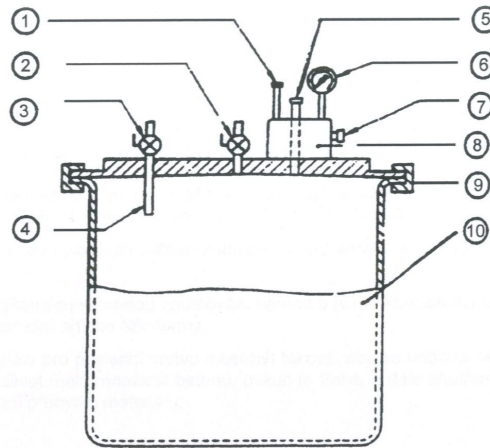
Obsah vzduchu v betonu v nádobě  $A_c$  se vypočítá ze vztahu:

$$A_c = A_1 - G \quad [\%]$$

Kde  $A_1$                     obsah vzduchu ve zkoušeném vzorku                    [%]

$G$                     opravný součinitel pro kamenivo (většinou  $G = 0$ , pokud norma neurčí jinak)

Obsah vzduchu se vyjádří v procentech zaokrouhlený na nejbližší 0,1%.



#### Legenda

1) hustilka (kompresor)	6) tlakoměr
2) ventil B	7) odzdušňovací ventil
3) ventil A	8) vzduchová komora
4) prodlužovací hadička trubice pro kalibrační zkoušky	9) svorky
5) hlavní vzduchový ventil	10) nádoba

Ilustrace 5: Tlakový hrnec [1]

## 4.2.2 Zkoušení ztvrdlého betonu

Pro základní zkoušky na ztvrdlém betonu se používá norma ČSN EN 12390 [2]. Pro zjišťování modulu pružnosti se používá norma ČSN ISO 6784 [3], pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ČSN EN 480-11 [13] a pro tvrdoměrné zkoušky norma ČSN 73 1373 [4].

### 4.2.2.1 Pevnost betonu v tlaku

Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkušební tělesa až do jeho porušení ve zkušebním lisu, který vyhovuje ČSN EN 12390-4 [2]. Zaznamená se maximální zatížení při porušení a vypočte se pevnost v tlaku betonu. Jako zkušební tělesa se používají krychle, válce nebo vývrty, které vyhovují požadavkům příslušných platných norem.

Tlačné plochy lisu i zkušební tělesa musí být čisté. Mezi těleso a desky lisu se nesmí použít žádná podložka, kromě přídatných desek nebo středních bloků podle ČSN EN 12390-4 [2]. Krychle se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění betonu. Těleso se zatěžuje předepsanou rychlostí až do porušení. Výsledná pevnost v tlaku se vypočte podle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [N/mm^2]$$

kde:  $f_c$                       pevnost v tlaku                       $[N/mm^2]$

$F$                               maximální zatížení při porušení                       $[N]$

$A_c$                               zatěžovaná plocha zkušební tělesa                       $[mm^2]$

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.2.2.2 Modul pružnosti

Jako zkušební zařízení se používá zkušební lis vyhovující požadavkům ISO 4012, přístroj pro měření změn délky s měřicí základnou větší než dvě třetiny průměru zkušebního tělesa.

Jako zkušební tělesa se přednostně používají válce o průměru 150 mm a výše 300 mm.

Zkušební těleso se osadí přístroji měřícími deformace, vyvodí se základní napětí 0,5 N/mm<sup>2</sup> a zaznamenají se údaje na všech přístrojích. Zvyšuje se napětí rychlostí (0,6 ± 0,4) N/mm<sup>2</sup>s přibližně do jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku, které se udržuje 60s, poté se zaznamenají údaje na měřicích přístrojích pro ověření centrace tělesa.

Tento předběžný cyklus se opakuje nejméně dvakrát a po dokončení posledního předběžného cyklu se vyčká 60 s při napětí 0,5 N/mm<sup>2</sup> a odečtou se hodnoty na přístrojích. Poté se těleso zatěžuje předepsanou rychlostí na třetinu pevnosti v tlaku a zaznamenají se poměrná přetvoření  $\epsilon_a$ . Výsledný modul pružnosti je dán vzorcem:

$$E_c = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b} \quad [N/mm^2]$$

kde  $\sigma_a$  základní napětí 0,5 N/mm<sup>2</sup> [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_b$  napětí odpovídající 1/3  $f_c$  [N/mm<sup>2</sup>]

$\epsilon_a$  poměrné přetvoření při  $\sigma_a$  [-]

$\epsilon_b$  poměrné přetvoření při  $\sigma_b$  [-]

Při hodnotě vyšší než 10000 N/mm<sup>2</sup> se výsledek zaokrouhlí na nejbližších 500 N/mm<sup>2</sup>, při hodnotách pod 10000 N/mm<sup>2</sup> na nejbližších 100 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.2.2.3 Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Struktura vzduchových pórů se zjišťuje podrobným snímáním povrchu vzorku podél řady měřicích přímek, které jsou rovnoběžné s původním povrchem vzorku. Zaznamenává se počet protnutých vzduchových pórů a jednotlivé délky tětív.

Vzorky musí být vyleštěny a mohou být opatřeny povrchovou úpravou, která zvýrazní vzduchové póry. Vzorek je umístěn na manipulačním stolku s optickým mikroskopem. Pomocí mikroskopu se zaznamenává:

- $T_s$  pevné části povrchu zkušební vzorku
- $T_a$  všechny zachycené póry
- délka každé tětivy na nejbližších 5  $\mu\text{m}$
- celkový počet tětív v každé třídě (rozdělení je uvedeno v tabulce 1 v ČSN EN 480-11 [13])

$T_{\text{tot}}$  udává celkovou měřenou délku.

Celkový obsah vzduchových pórů se vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} \quad [\%]$$

kde  $T_a$  délka všech zachycených pórů [mm]

$T_{tot}$  celková délka měřicí přímky [mm]

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších 0,01%.

Pomocí této zkoušky lze také zjistit měrný povrch pórů, poměr cementový tmel : vzduchové póry, součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů, obsah mikroskopických pórů  $A_{300}$  a rozdělení vzduchových pórů.

#### **4.2.2.4 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu**

Jako zkušební zařízení se používají tvrdoměry vtiskové nebo odrazové. Zejména se používají Schmidty odrazové tvrdoměry typu N, L, M, Waitzmannův tvrdoměr (zkušební kladívko se srovnávací tyčkou), kuličkový tvrdoměr nebo špičákový tvrdoměr.

Pomocí tvrdoměrů se určuje krychelná pevnost v tlaku jako pevnost s nezaručenou přesností, u níž se ukazatel tvrdoměrného zkoušení vyhodnotí podle obecného kalibračního vztahu, a jako upřesněná pevnost betonu, kdy se ukazatel tvrdoměrného zkoušení vyhodnotí buď podle určujícího kalibračního, nebo obecného, případně směrného kalibračního vztahu upřesněného součinitelem  $\alpha$ .

Zkouší se na vybraných a upravených zkušebních místech, která svým rozložením a počtem reprezentují zkoušenou plochu betonu.

Nejpoužívanější tvrdoměrnou metodou je metoda Schmidtových tvrdoměrů. Při této zkoušce se zjišťuje odraz úderného beranu, ze kterého se stanoví pevnost betonu v tlaku. Velikost odrazu se zachycuje na ukazatelem na stupnici umístěné na těle tvrdoměru, na registrační folii nebo na zobrazovací displej.

Razník tvrdoměru se přiloží kolmo na zkušební povrch, přičemž se tvrdoměr stlačuje plynulým pohybem, dokud nevyvodí ráz. Ze všech platných měření na jednom místě se vypočte aritmetický průměr a ten se zaokrouhlí na 1 dílek stupnice.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bylo postupováno podle metodiky uvedené v předchozí kapitole.

Podle kroků 4.1.1 a 4.1.2 bylo namícháno šest záměsí a provedeny příslušné zkoušky.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty zkoušek na čerstvém betonu

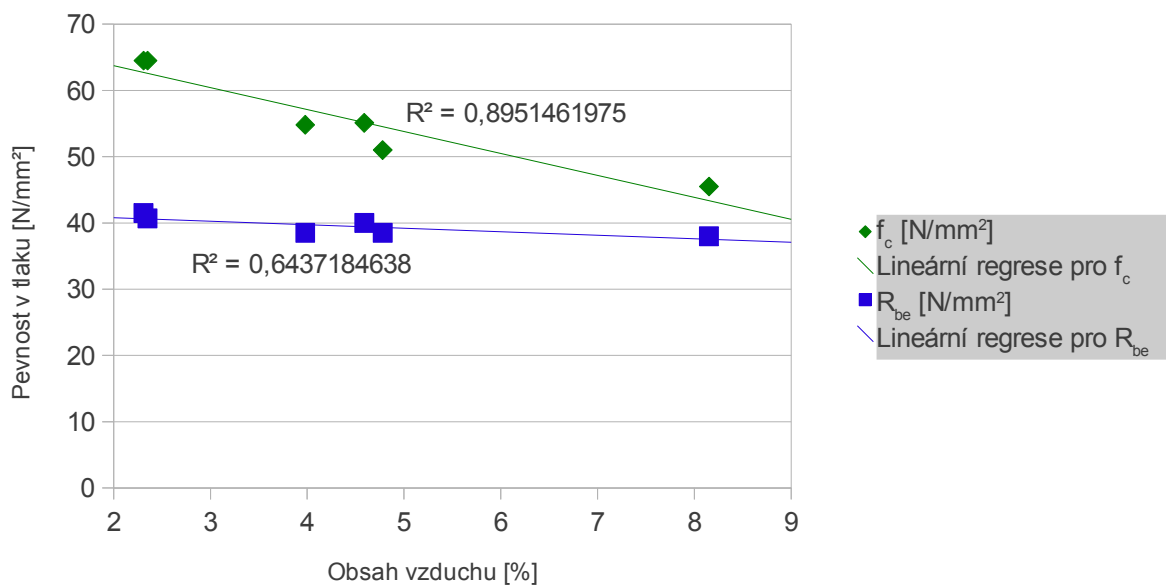
Záměs	Sednutí kužele [mm]	$V_{\text{vzduchu v \u011b b}}$ [%]	D [kg/m <sup>3</sup> ]
1 referenční	200	2,9	2350
2	200	4	2380
3	220	6,5	2260
4	230	5,8	2280
5	180	8	2240
6	190	5	2300

Podle kroků 4.1.6.1 a 4.1.6.2. byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku a tvrdoměrné zkoušky.  $R_{\text{be}}$  je označení pro pevnost v tlaku s nezaručenou přesností podle ČSN 73 1373 [4] a  $f_c$  je pevnost betonu v tlaku podle ČSN EN 12390 [2].

Tabulka 3: Naměřené hodnoty zkoušek pevnosti v tlaku

Záměs	$V_{\text{vzduchu v zb}}$ [%]	Tvrdost	$R_{\text{be}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	2,35	42	40,7	64,5
2	2,31	43	41,5	64,46
3	4,78	38	38,5	51
4	4,59	41	40	55,06
5	8,15	37	38	45,46
6	3,98	38	38,5	54,76



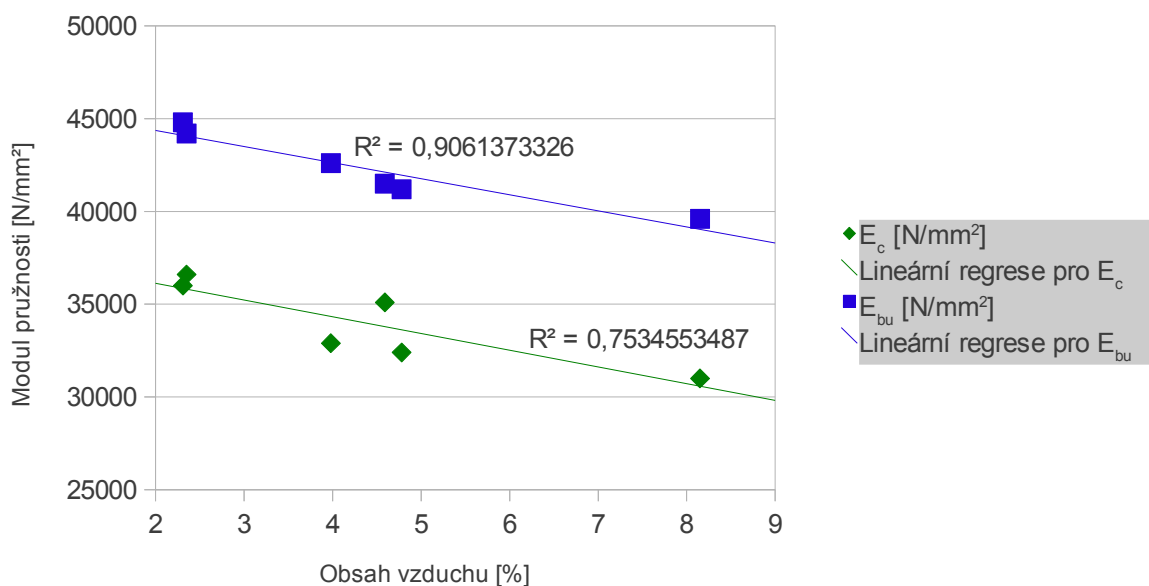


Ilustrace 6: Graf vlivu obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na pevnosti v tlaku

Podle kroku 4.1.5 byla zjištěna objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Podle kroku 4.1.7.1 byly zjištěny dynamické a statické moduly pružnosti.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty při zkouškách objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a modulů pružnosti

Záměs	V <sub>vzduchu v zb</sub> [%]	D [kg/m <sup>3</sup> ]	E <sub>c</sub> [N/mm <sub>2</sub> ]	V <sub>i</sub> [m/s]	E <sub>bu</sub> [N/mm <sub>2</sub> ]
1 referenční	2,35	2360	36500	4373,3	44000
2	2,31	2370	36000	4395,5	45000
3	4,78	2270	32500	4303,3	41000
4	4,59	2300	35000	4294,4	41500
5	8,15	2250	31000	4237,7	39500
6	3,98	2310	33300	4341,1	42500



Ilustrace 7: Graf vlivu obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na moduly pružnosti

Podle kroků 4.1.7.2 a 4.1.7.3 byla provedena zkouška odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám a byly stanoveny charakteristiky vzduchových pórů. Červeně označené hodnoty nevyhovují požadavkům normy ČSN EN 206-1 Z3 [6] Tabulka F.2 pro třídu XF4.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty při zkoušce odolnosti proti CHRL a stanovení charakteristik vzduchových pórů

Záměs	Odpad po 100 cyklech [g/m <sup>2</sup> ]	L [mm]	$A_{300}$ [%]	
1 referenční	41050,58	0,361	1,48	Nevyhovuje
2	35440,16	0,675	0,39	Nevyhovuje
3	1009,64	0,383	1,14	Nevyhovuje
4	1368,65	0,311	1,78	Nevyhovuje
5	635,14	0,196	3,16	Vyhovuje
6	2063,21	0,328	1,39	Nevyhovuje

## 6 ZÁVĚR

Z kapitol v teoretické části je jasné, že modul pružnosti je spolu s pevností betonu v tlaku jednou z nejdůležitějších vlastností betonu. Modul pružnosti a pevnost betonu v tlaku jsou v těsném vztahu a jsou ovlivňovány stejnými proměnnými. Těmi jsou zejména pevnost rozhraní kameniva se ztvrdlou cementovou pastou, pevnost samotné ztvrdlé cementové pasty a pevnost kameniva.

Jelikož pevnost kameniva se nedá nijak technologicky ovlivnit, je tedy nutno věnovat pozornost hlavně pevnosti ztvrdlé cementové pasty a jejího rozhraní s kamenivem. Pevnost rozhraní ztvrdlé cementové pasty a kameniva je ovlivňována například měrným povrchem cementu, kvalitou povrchu kameniva, obsahem vody v čerstvém betonu a mnoha dalšími.

Pevnost samotné ztvrdlé cementové pasty bývá ovlivněna zejména hodnotou vodního součinitele (poměr voda / cement), stupněm hydratace cementu, jeho mineralogickým složením, způsobem ošetřování betonu, pórovitostí ztvrdlé cementové pasty a mnoha jinými faktory.

Je tedy zřejmé, že pevnost betonu v tlaku a potažmo i modul pružnosti může nabývat velice rozdílných hodnot. Otázkou ale je, jakým způsobem se mění modul pružnosti při použití moderních technologií při výrobě betonu. Například použitím provzdušnění v míře kolem 4 % se s přidavkem 1 % vzduchu sníží pevnost v tlaku až o 6 % a potažmo tedy i modul pružnosti.

Provzdušnění sice snižuje pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti, ale při správném rozložení pórů zvyšuje mrazuvzdornost betonu. Správně rozložené póry totiž představují expanzní prostor pro vodu, která se při teplotách nižších než 0°C mění v led a tím zvětšuje svůj objem až o 9 %. Při použití provzdušněného betonu tedy mnohem méně dochází k degradaci konstrukce způsobené zamrznáním vody ve struktuře betonu.

Pevnost betonu v tlaku určujeme buď destruktivně na lisu, nebo nedestruktivně tvrdoměry. Tvrdoměrné metody jsou založeny na měření tvrdosti povrchu materiálu, přičemž pro beton se nejčastěji používají Schmidovy odrazové tvrdoměry. Ty jsou založeny na principu měření velikosti odrazu beranu, který je vržen proti měřenému povrchu. Pomocí kalibračních vztahů se potom určí pevnost v tlaku s nezaručenou pevností, nebo upřesněná pevnost betonu v tlaku.

Na základě zjištěných hodnot pevnosti v tlaku lze zařadit betony do pevnostních tříd podle normy ČSN EN 206-1 [5] (od C-/5 po C100/115). Tato norma také dále uvádí požadavky na mrazuvzdorné betony. Norma ČSN EN 206-1 [5] předepisuje minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu pro třídy XF1 až XF4 od 2,5 do 5,5 % vzduchu v čerstvém betonu.

Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti také vstupují do výpočtů při návrhu betonových konstrukcí a pro jednotlivé pevnostní třídy norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 uvádí empirický vztah pro výpočet modulu pružnosti pomocí pevnosti betonu v tlaku. Je ale zřejmé, že variabilita

hodnoty modulu pružnosti v jedné pevnostní třídě je poměrně vysoká a empirické vztahy používané v této normě ji nemohou postihnout. V takovém případě je tedy nutná komunikace mezi projektantem a technologem již při návrhu konstrukce.

V experimentální části byly ověřeny závěry z teoretické části. Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu se snižuje pevnost betonu v tlaku nezávisle na tom, zda byla použita destruktivní nebo nedestruktivní metoda. Bylo také zjištěno, že s rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu také klesá dynamický i statický modul pružnosti.

Dále také byl ověřen vliv charakteristiky rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu na odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám. Nejnižší odpad ( $635,14 \text{ g/m}^2$ ) při zkoušce odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám měly vzorky vyrobené ze záměsi číslo 5, jejichž parametry rozložení vzduchových pórů  $L$  i obsah mikroskopického vzduchu  $A_{300}$  jako jediné splňovaly požadavky normy ČSN EN 206-1 Z3 [6].

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 12350 Zkoušení čerstvého betonu, ČNI, 2007
- [2] ČSN EN 12390 Zkoušení ztvrdlého betonu, ČNI, 2007
- [3] ČSN ISO 6784 Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, ČNI, 1993
- [4] ČSN 731373 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu, ČNI, 1983
- [5] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ČNI, 2001
- [6] ČSN EN 206-1 ZMĚNA Z3 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ČNI, 2008
- [7] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná ustanovení pro pozemní stavby, ČNI, 2006
- [8] PYTLÍK, Petr. *TECHNOLOGIE BETONU I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM Brno, 1994. 143 s. ISBN 80-85867-07-9.
- [9] SVOBODA, Emanuel, et al. *PŘEHLED STŘEDOŠKOLSKÉ FYZIKY*. 3. vydání. Praha : Prometheus, spol. s r.o., 1998. 497 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [10] COLLEPARDI, Mario. *MODERNÍ BETON : THE NEW CONCRETE*. 1. vydání. Praha : Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [11] HELA, Rudolf; HUBÁČEK, Adam. PROBLEMATIKA PROVZDUŠNĚNÝCH BETONŮ. In *UPLATNĚNÍ POKROČILÝCH MATERIÁLŮ V INTEGROVANÉM NÁVRHU KONSTRUKCÍ* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. Dostupné z WWW: <[http://www.cideas.cz/free/okno/technicke\\_listy/2tlv/2111-1.pdf](http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/2tlv/2111-1.pdf)>.
- [12] PYTLÍK, Petr. *TECHNOLOGIE BETONU*. 2. vydání. Brno : Nakladatelství VUTIUM, 2000. 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [13] ČSN EN 480-11 Příspěvy do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, ČNI, 2006
- [14] SCHMID, Pavel. *MODUL BI02-M02, Zkušebnictví a technologie, část Stavební zkušebnictví*, VUT FAST v Brně
- [15] VEJMELOVÁ, E., et al. Trvanlivostní vlastnosti vysokohodnotného betonu s vyšším obsahem alternativních silikátových pojiv. *Stavební obzor : Civil Engineering Journal*. 2009, Květen 2009
- [16] BARTOŇOVÁ, P. *Příprava a vlastnosti ryzích geopolymérů*. Brno, 2009. 69 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [17] MISÁK, Petr; VYMAZAL, Tomáš. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton TKS*. 2009, 9/2009, s. 58-59. ISSN 1213-3116.

[18] Internetová stránka: [http://www.betonraccio.sk/betonraccio/downloads/modul\\_pruznosti.pdf](http://www.betonraccio.sk/betonraccio/downloads/modul_pruznosti.pdf)

[19] UNČÍK, Stanislav. *www.betonraccio.sk* [online]. 2. 2002. Odborné články. Dostupné z WWW: <[http://www.betonraccio.sk/text/clanky/Uncik\\_Krpacovo.doc](http://www.betonraccio.sk/text/clanky/Uncik_Krpacovo.doc)>.

[20] VAŠKOVÁ, Jitka; ŠTEVULA, Michal; VESELÝ, Vladimír. Modul pružnosti automaticky?. *Beton TKS*. 2007, 2007/06, s. 57-59. ISSN 1213-3116.

[21] VACEK, Vítězslav. Vlastnosti betonu modifikovaného komplexní příměsí na bázi mikrosiliky. *Beton TKS*. 2003, 2003/02, s. 33-35. ISSN 1213-3116.

[22] ASTM Standard C666 / C666M - 03(2008) „Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing,“ ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/C0666\_C0666M-03R08 .

[23] AÏCTIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha : Informační centrum ČKAIT a ČBS, 2005. 320 s. ISBN 80-86769-39-9.

[24] CIKRLE, Petr; BÍLEK, Vlastimil. Modul pružnosti vysokopevnostních betonů různého složení. *Beton TKS*. 2010, 5/2010, s. 40-44. ISSN 1213-3116.

[25] BROŽOVSKÝ, Jiří. Nedestruktivní zkoušení betonu odrazovými tvrdoměry v konstrukcích podle evropských norem a českých technických norem. *Beton TKS*. 2010, 6/2010, s. 75-77. ISSN 1213-3116.

## 8 SEZNAM ILUSTRACÍ

Ilustrace 1: Pracovní diagram betonu [7].....	10
Ilustrace 2: Deformace ztvrdlé cementové pasty, kameniva a betonu [10].....	11
Ilustrace 3: Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na pevnost v tlaku [10].....	19
Ilustrace 4: Měření sednutí, správné a usmyknuté sednutí [1].....	35
Ilustrace 5: Tlakový hrnec [1].....	37
Ilustrace 6: Graf vlivu obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na pevnosti v tlaku.....	41
Ilustrace 7: Graf vlivu obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na moduly pružnosti.....	42

## 9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení čerstvého betonu.....	32
Tabulka 2: Naměřené hodnoty zkoušek na čerstvém betonu.....	40
Tabulka 3: Naměřené hodnoty zkoušek pevnosti v tlaku.....	40
Tabulka 4: Naměřené hodnoty při zkouškách objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a modulů pružnosti.....	41

Tabulka 5: Naměřené hodnoty při zkoušce odolnosti proti CHRL a stanovení charakteristik vzduchových pórů.....	42
---	----

## 10 SEZNAM ZKRATEK

V práci jsou použity standardně užívané zkratky fyzikálních a fyzikálně mechanických veličin a jejich jednotek a tyto zkratky:

C	Pevnostní třída obyčejného a těžkého betonu
ČSN	Česká norma
EN	Evropská norma