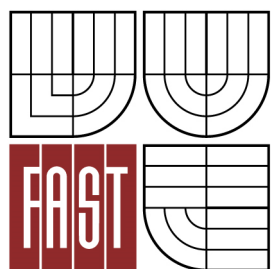




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU S VYUŽITÍM NEDESTRUKTIVNÍCH ZKUŠEBNÍCH METOD

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FACTORS AFFECTING THE STATIC MODULUS OF ELASTICITY
OF CONCRETE USING NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. DALIBOR KOCÁB

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

Klíčová slova

Modul pružnosti, beton, dynamický modul pružnosti, statický modul pružnosti, technologický vliv, zkušební vliv, ultrazvuková impulzová metoda, rezonanční metoda, kalibrační vztah

Keywords

Modulus of elasticity, concrete, dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, technological influence, test influence, ultrasonic pulse method, resonance method, calibration curve

OBSAH

1. ÚVOD	4
2. CÍLE PRÁCE	5
3. TEORETICKÁ ČÁST	6
3.1. Modul pružnosti.....	6
3.2. Technologické vlivy	10
3.3. Zkušební vlivy	12
3.4. Predikce statické hodnoty modulu pružnosti	14
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	15
4.1. Vliv provzdušnění	15
4.2. Vliv způsobu ošetřování	16
4.3. Vliv okolní teploty v počáteční fázi zrání betonu	18
4.4. Vliv použitého postupu.....	19
4.5. Možnost tvorby kalibračních vztahů	20
5. ZÁVĚR	
Literatura	
Životopis	
Abstract.....	

1 ÚVOD

Beton se během své poměrně krátké existence stal jedním z nejhojněji používaných stavebních materiálů. Dynamický vývoj v této oblasti stavebnictví zapříčinil, že jsou na dnešní beton kladeny podstatně vyšší nároky, než tomu bylo před několika desetiletími [1].

V současné době již není u betonu podstatná pouze jeho pevnost v tlaku, jako tomu bylo dříve. Do popředí zájmu se dostaly i jiné charakteristiky betonu, jejichž hodnoty jsou sledovány a především požadovány. Kromě např. velmi diskutované trvanlivosti jsou to především vlastnosti přetvárné, z nichž nejvýznamnější je modul pružnosti [2].

Vývoj nových druhů betonu (SCC, HSC, UHPC, FCC) posouvá hranice jejich materiálových charakteristik a vlastností [3]. Použitím nejmodernějších přísad a příměsí je možné výrazně zvýšit pevnost betonu v tlaku (často převyšující hodnotu 200 N/mm^2), ale už ne tak snadno jeho modul pružnosti. Pomyslné nůžky mezi pevností betonu v tlaku a jeho modulem pružnosti se tak oproti minulosti stále více rozevírají.

2 CÍLE PRÁCE

V poslední době se problematika týkající se modulu pružnosti betonu dostala do popředí zájmu odborné stavařské veřejnosti. Modul pružnosti betonu hraje významnou roli v odborných publikacích a vědecké činnosti, přičemž se jím začíná zabývat stále větší počet výzkumných laboratoří.

Hlavním cílem této práce je postihnout nejdůležitější vlivy na výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu, především pak ty, které je možné při výstavbě (popř. při projektování) snadněji ovlivnit. V první řadě se jedná o způsob ošetřování betonu. Dále je to také vliv provzdušnění betonu, které se začalo masivně používat v posledních dvou až třech dekádách jako důsledek velkého důrazu na trvanlivost konstrukce a tím související mrazuvzdornost.

Pro zjištění míry vlivu jednotlivých faktorů na modul pružnosti disertační práce využívá nedestruktivních metod pro stanovení této charakteristiky ztvrdlého betonu. Výhodou většiny v práci použitých nedestruktivních metod (NDT) je možnost jejich aplikace nejen na zkušebních tělesech při měření v laboratoři, ale také přímo na konstrukci. Jejich velkou devízou je, že beton (zkušební těleso, konstrukci) absolutně nepoškozuje, dají se používat opakovaně, lze pomocí nich sledovat změnu kvality betonu v čase, tedy možný nárůst sledované veličiny, či naopak degradaci betonu (např. při porušování mrazem), a to na jednom zkušebním místě během několika dnů, týdnů, měsíců, anebo dokonce let. Aby tyto metody byly použitelné, musí existovat dostatečná statistická závislost mezi sledovanými vlastnostmi betonu (pevnost v tlaku, modul pružnosti) a parametry nedestruktivních metod (hodnota odrazu, rychlost šíření ultrazvukového vlnění betonem, apod.), kterou představují kalibrační vztahy. Kalibrační vztahy existují, týkají se však téměř výhradně určení pevnosti betonu v tlaku a navíc často nejsou u novějších betonů přesné.

Tato práce se proto pokusí zjistit možnosti vytvoření kalibračních vztahů pro stanovení statické hodnoty modulu pružnosti betonu, v ideálním případě známého složení. Jako nedestruktivní parametry budou využity údaje z ultrazvukového měření a měření Schmidovým tvrdoměrem. Značné naděje se upírají k moderním metodám, které využívají nové, např. energetické veličiny lépe vystihující vlastnosti nových, moderních betonů. Takovým příkladem je nový typ tvrdoměru firmy Proceq, kterým je SilverSchmidt N, jenž pracuje na principu měření vrácené energie.

Výstupy disertační práce snad pomohou rozšířit možnosti nedestruktivního zkoušení přímo na konstrukci a snad také přispějí k doplnění informací odborné veřejnosti o velmi zajímavém tématu, kterým modul pružnosti betonu bezesporu je.

3 TEORETICKÁ ČÁST

Beton je kompozitní látka, která vznikne smícháním a následným ztvrdnutím složek, přičemž ty základní tvoří cement jako nejčastěji používané pojivo, kamenivo jako plnivo a voda a dalšími možnými složkami mohou být nejrůznější přísady a příměsi. Beton lze také definovat jako umělý kámen vzhledově podobný přírodnímu slepenci.

První zmínky o použití stavebního materiálu, který bychom teoreticky mohli nazvat betonem, jsou staré přibližně 5 600 let. Přestože stavby z „betonu“ vznikaly i ve starém Římě, záznam o prvním použití cementového betonu, jak ho známe dnes, se datuje až do 2. poloviny 19. století. Na území současné ČR byl nástup (železo)betonu pomalejší, přesto si i zde od počátku 20. století beton dobývá své místo. V porovnání s dalšími stavebními látkami je tedy beton poměrně novodobý, o to ale dynamičtěji se vyvíjející materiál. Přesto stále nejsou jeho návrh a výroba zcela ideální.

Při návrhu složení betonu a také při použití při stavbě se vždy nejčastěji upírala pozornost na jeho pevnost v tlaku, přičemž vliv prostředí a s tím související trvanlivost betonu a především u předpjatých konstrukcí modul pružnosti betonu se dostává do popředí diskuzí až poslední dobou. Nezřídka je ale právě modul pružnosti betonu stejně důležitý jako jeho pevnost v tlaku.

A právě o modulu pružnosti betonu pojednává tato práce.

3.1 MODUL PRUŽNOSTI

Aby bylo možné pojem modul pružnosti důkladně vysvětlit, je nezbytné začít obecně, tedy teorií pružnosti. Teorie pružnosti stejně jako teorie plasticity je nezbytná součást mechaniky kontinua pevné fáze. Dvěma základními předměty zkoumání v teorii pružnosti jsou napětí v tělese a deformace tělesa. Napětí lze chápat jako intenzitu vnitřních sil v tělese a deformace, nebo-li přetvoření, jsou geometrické změny rozměrů a tvaru těles. Teorie pružnosti a plasticity využívá informací a znalostí z oborů, které se zabývají studiem pevnosti materiálu, což je schopnost materiálu bez porušení odolávat vnějším účinkům. V oboru stavebnictví vytváří teorie pružnosti a plasticity teoretický základ pro teorii konstrukcí. Konečným cílem stavebního inženýra je totiž navrhnout nosnou konstrukci, která by dostatečně spolehlivě odolávala vnějším účinkům, jako jsou např. zatížení, teplotní změny, vynucená přetvoření a jiné vlivy [4].

Pružnost je schopnost materiálu chovat se elasticky (pružně), tedy vrátit se do svého původního stavu ve chvíli, kdy na něj přestanou působit vnější deformační síly. Takové materiály lze nazývat elastické. Naopak materiály, které schopnost chovat se pružně nemají, označujeme jako plastické.

Pružnost je výsledkem působení mezimolekulárních sil. Pokud je těleso stlačováno nebo natahováno, jeho molekuly se pohybují blíže nebo naopak dále od sebe a výsledkem je působení odpudivých nebo přitažlivých sil. Vlivem těchto sil se molekuly po odstranění vnější síly působící na těleso vracejí do své původní polohy.

Tato skutečnost platí jen do určité míry napětí (mez pružnosti), která je pro každý materiál individuální. Pokud napětí v tělese nabyde vyšších hodnot (překročí mez pružnosti), stávají se všechny materiály plastickými.

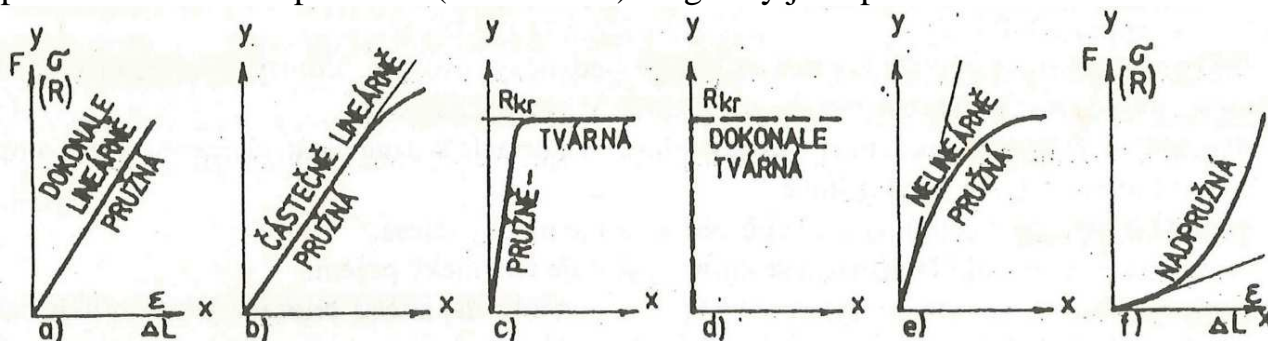
Pro pružný materiál platí jednoznačná závislost mezi napětím a deformací, kterou napětí vyvolá, a to ve všech fázích působení, tedy při zatěžování, odlehčování, zatěžování v opačném smyslu apod. Pro elementární kvádr, který je namáhaný napětím ve směru osy x , je lineární vztah mezi poměrnou deformací ε_x a normálovým napětím σ_x vyjádřen Hookovým zákonem v tahu a tlaku

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (1)$$

kde je E modul pružnosti v tahu a tlaku (též Youngův modul) v MPa,
 ε_x poměrné přetvoření,
 σ_x normálové napětí v MPa.

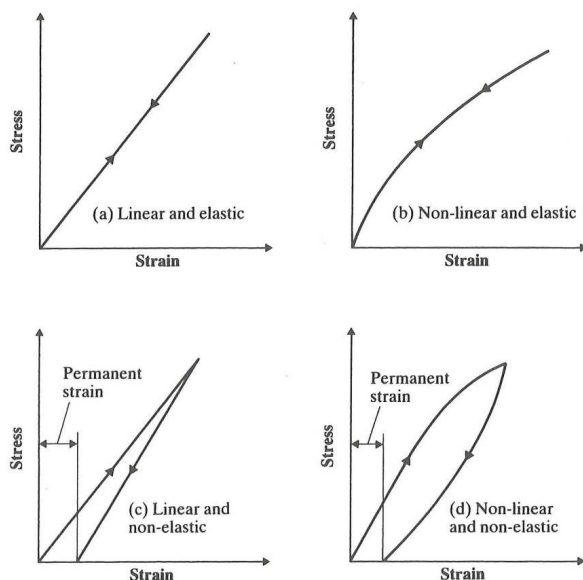
Aby bylo možné pospat reálné chování materiálů, je nejdříve nutné vysvětlit pojem deformační diagram. Přesnou závislost mezi změnou tvaru a rozměrů pevného tělesa a namáháním reálného materiálu, které je vyvoláno působením vnějších sil, nelze nikdy předem přesně určit, protože závisí na mnoha faktorech, zejména vlastnostech materiálu. Není ji možné ani přesně odvodit z fyzikální podstaty zkoušené látky. Pro navrhování stavebních konstrukcí či prvků a zejména pro určení jejich deformací je však znalost výpočtových charakteristik použitých materiálů, odpovídající této závislosti, nutná. Proto se pro jednotlivé materiály stanovuje průměrnými hodnotami, které byly získány pomocí experimentálních zkoušek.

Závislost deformace Δl pevných látek na působení vnější síly F graficky vyjadřuje **pracovní diagram**. Závislost poměrné deformace ε na vneseném napětí do pevné látky σ poté graficky znázorňuje **deformační diagram**. V označení těchto diagramů však bohužel nepanuje v odborných publikacích jednotn. Pro potřeby vysvětlení pojmu modul pružnosti je však dle autora této práce jednoznačné názvosloví v této oblasti velmi důležité. Autor osobně se přiklání k výše uvedeným názvům pro tyto diagramy. Stejně jsou tyto termíny vysvětleny např. v [5]. Název pracovní diagram vychází ze skutečnosti, že plocha pod křivkou je rovna vykonané práci. Idealizované pracovní (deformační) diagramy jsou předmětem Obr. 1.



Obr. 1 Idealizované typy pracovních (deformačních) diagramů [5]

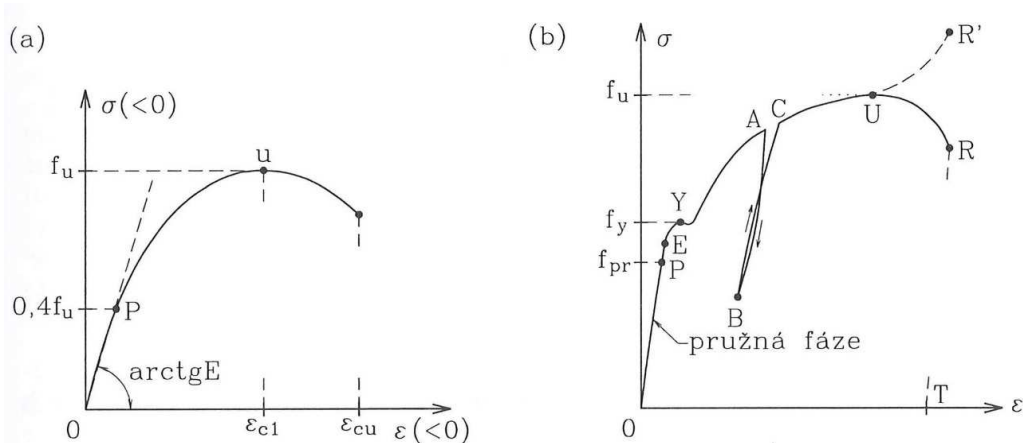
U skutečných látek jsou pracovní diagramy podstatně složitější. Jejich reálně zaznamenané průběhy obvykle lze na Obr. 2 uvedenými idealizovanými diagramy část po části aproximovat a nahradit. Příkladem takového částečného nahrazení je proložení přímkou počáteční částí křivky deformačního diagramu betonu v tlaku, který je zobrazen na Obr. 3 (a). Poté je možné uvažovat, že v této části platí Hookův zákon, který je již vysvětlen pomocí rovnice (1).



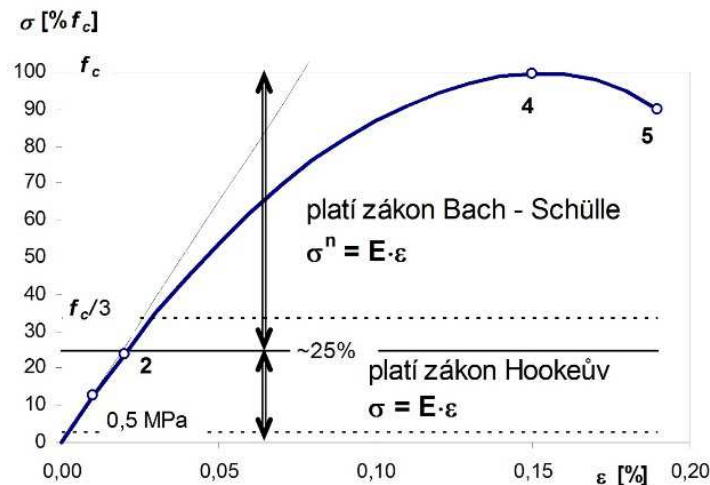
Obr. 2 Idealizované deformační diagramy materiálů dle chování po odlehčení [6]

V mezích Hookova zákona je modul pružnosti konstantou úměrnosti normálového napětí a poměrného podélného přetvoření, u betonu tedy směrnici přímkou proložené počáteční částí deformačního diagramu betonu v tlaku. Obecně lze říci, že modul pružnosti je **měrná veličina tuhosti pevné látky** v tlaku (tahu).

Reálné chování betonu je však složitější. Aby bylo možné použít pro výpočty deformací betonových konstrukcí modul pružnosti E v uvažované oblasti pružných přetvoření, byl Hookův lineární zákon nahrazen Bach-Schülleho mocninovým zákonem, viz Obr. 3, kde mocnina n je číslo blízké jedničce, ale pro beton vždy o málo větší než 1.

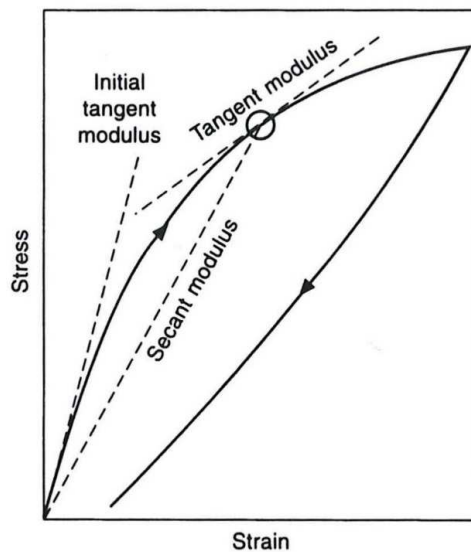


Obr. 3 Deformační diagram betonu v tlaku (a) a oceli v tahu (b) [4]



Obr. 4 Deformační diagram betonu v tlaku [7]

Jak již bylo řečeno, reálné chování betonu se od zidealizovaných diagramů přece jen liší. Lze tedy charakterizovat více druhů modulu pružnosti betonu v tlaku, a to v závislosti na skutečnosti, v jaké fázi deformačního diagramu se nacházíme a jaký typ přímky (tečna vs. sečna) prokládáme. Na deformačním diagramu na Obr. 5 je možné vidět tři základní druhy modulu pružnosti betonu – počáteční (tečnový), sečnový a sečnový.



Obr. 5 Typy modulu pružnosti zobrazené v deformačním diagramu betonu v tlaku [8]

S přesnou definicí sečnového modulu pružnosti je to ale poněkud složitější. Norma [9] udává, že se jedná o sklon přímky mezi počátkem deformačního diagramu ($\sigma = 0$) a bodem, který odpovídá 40 % pevnosti v tlaku ($\sigma = 0,4 \cdot f_c$). Kniha [10] dokonce horní bod v deformačním diagramu udává jako 45 % pevnosti ($\sigma = 0,45 \cdot f_c$). V každém případě se však jedná o statický modul pružnosti, který se do loňského roku zjišťoval pomocí normy [11] a od letošního roku se stanovuje pomocí normy [12] nebo [13] – a všechny tyto tři předpisy uvažují horní úroveň zatížení jako 33 % pevnosti v tlaku ($\sigma = 1/3 \cdot f_c$). Jak je z diagramů na Obr. 4 jasně patrné, sečnový (statický) modul pružnosti betonu se vzrůstajícím napětím klesá. Je tedy otázka, zda všechny výše uvedené předpisy uvažují stejnou charakteristiku. Pro

běžný beton se uvažuje hodnota statického modulu pružnosti v rozmezí 20 000 až 40 000 MPa.

Dynamický modul pružnosti betonu nabývá oproti statickému modulu pružnosti hodnot vyšších, udává se rozmezí 30 000 až 50 000 MPa pro běžný beton. Při určování dynamické hodnoty se pohybujeme na úplném začátku deformačního diagramu, protože do zkoušených těles nevnašíme v podstatě žádná napětí. Dynamický modul pružnosti tedy můžeme uvažovat jako tečnový.

Modul pružnosti je jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin, které daný materiál charakterizují. U betonu tato skutečnost platí bezpochyby také, zejména při statických výpočtech konstrukcí. Modul pružnosti je důležitým vstupním parametrem do výpočtů průhybů, při návrhu desek, a při výpočtech předem či dodatečně předpínaných konstrukcí.

Modul pružnosti betonu v tlaku (tahu) závisí především na konkrétním složení betonu, které do značné míry ovlivňuje všechny jeho vlastnosti. Přesto nelze říci, že složení betonu je vlivem jediným. Faktorů, které mají na výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu silný dopad, je celá řada. Tyto faktory je možné rozdělit na dvě základní skupiny – na vlivy technologické a na vlivy zkušební (možná by bylo lepší označení zkušebnické).

Mezi vlivy technologické lze bezpochyby zařadit složení čerstvého betonu. Modul pružnosti ovlivní zejména typ použitého hrubého kameniva [14], ale i další faktory mají nezanedbatelnou váhu – jako ty nejvýznamnější jmenujme např. použití přísad, zejména provzdušňovacích, použití příměsí a jejich množství či výsledný vodní součinitel betonu. Jako technologické vlivy je možné zařadit i ošetřování betonu v rané fázi jeho tuhnutí a tvrdnutí. Zejména okolní teplota hraje v zrání betonu velkou roli. Ošetřování betonu především v problematických podmínkách – v zimním období (při betonáži v teplotách pod bodem mrazu je nutné beton zahřívat) nebo v letním období (při vysokých teplotách je nutné beton naopak chránit proti vysychání) – je velmi podstatným faktorem, který má na výslednou hodnotu modulu pružnosti vliv.

Do druhé kategorie vlivů patří např. to, jakou metodu pro stanovení modulu pružnosti zvolíme, na jakých zkušebních tělesech měření provádíme či jakým způsobem zkušební tělesa zakončíme.

Technologické vlivy na modul pružnosti betonu je možné vnímat jako vlivy skutečné, protože např. změnou kameniva dojde k reálnému posunu v hodnotě modulu pružnosti betonu. Zkušební vlivy mohou být naopak z větší části vnímány jako „zdánlivé“. Ačkoliv na válci zjistíme pravděpodobně jiný modul pružnosti než na hranolu, reálná hodnota modulu pružnosti toho konkrétního betonu zůstává pořád stejná. Všechny podstatné vlivy, které byly v předešlých odstavcích nastíněny, se autor pokusí podrobněji popsat v následujících dvou kapitolách.

3.2 TECHNOLOGICKÉ VLIVY

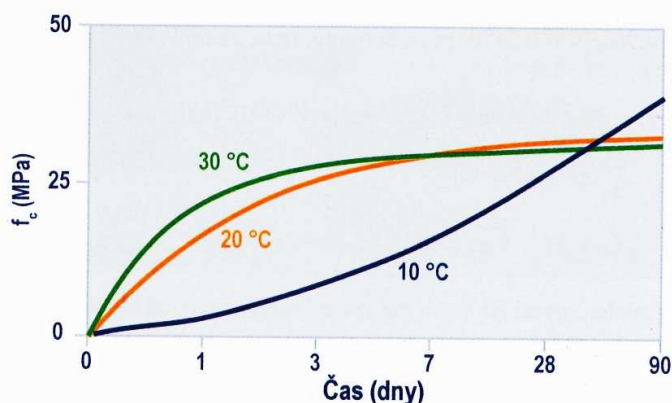
Kamenivo je především vzhledem ke svému obsahu v betonu pravděpodobně nejdůležitějším aspektem ve složení ČB, který ovlivňuje výslednou hodnotu modulu

pružnosti betonu. Kamenivo výsledný modul pružnosti betonu ovlivňuje v zásadě dvěma způsoby – jednak je rozhodující druh a také lokalita horniny, ze které je kamenivo získáno, a jednak je to množství a frakce použitého hrubého kameniva.

Cement, příměsi a přísady mají na hodnotu modulu pružnosti také svůj vliv, ten je ale poměrně málo významný. Jedinou výjimkou je provzdušňující přísada [15]. Dalšími vlivy, kterým bude dále věnována významná pozornost, jsou faktory, které lze ovlivnit při betonáži či krátce po ní. Jedná se především o teplotu, vlhkost a ošetřování betonu během jeho tuhnutí a tvrdnutí. Bylo by možné uvažovat také stupeň zhutnění, ale podstatou je pouze míra snížení obsahu vzduchu v betonu, což má stejný efekt jako provzdušnění, jehož vliv byl již charakterizován.

V některých případech výstavby betonových konstrukcí nebo prvků je důležitá hodnota modulu pružnosti betonu již v rané fázi zrání betonu. Velmi názorným příkladem mohou být prefabrikované předpjaté nosníky. Pokud v době předpínání (což může být již po 24 hodinách zrání betonu) nemá beton požadovaný modul pružnosti, může dojít ke zdatelně větším deformacím, než s jakými projektant počítal. To může znamenat větší ztráty předpětí, větší nadvýšení nosníků a následné problémy při zabudování do konstrukce.

Získání požadovaných vlastností betonu je podmíněné jeho vhodným ošetřováním. To je úzce spojeno mimo jiné s kontrolou teploty během zrání betonu, neboť právě teplota okolního prostředí (obzvláště v počátečních stádiích) hraje velmi důležitou roli ve vývoji betonu a má rozhodující vliv na chování betonu (či konstrukce) při jeho následném používání. Vliv teploty ošetřování na vývoj pevnosti betonu v tlaku je graficky zobrazen na Obr. 6.



Obr. 6 Vliv teploty na vývoj pevnosti betonu v tlaku [16]

Kromě udržování teploty ve správných mezích je při ošetřování betonu důležité zaměřit se také na vlhkost betonu. Zejména při betonáži ve vysokých teplotách je nutné beton prvních několik hodin až dnů důkladně ošetřovat, aby bylo zamezeno vysokému stupni odpařování vody z povrchu betonu, což by mohlo způsobit vážné problémy (masivní smršťování apod.). Na výsledné hodnoty modulu pružnosti má vliv také délka ošetřování betonu. Teplota, vlhkost a délka ošetřování betonu v rané fázi jeho zrání jsou vzájemně provázány a je možné je považovat za jediný, o to ale významnější vliv na hodnotu modulu pružnosti – více o tomto fenoménu např. v [17, 18, 19].

3.3 ZKUŠEBNÍ VLIVY

Podobně jako je velké množství technologických faktorů, které mají vliv na modul pružnosti betonu, je také nepřehledné množství vlivů zkušebních. Výstižnější, či možná přesnější, by bylo označení zkušebnické vlivy, ale protože jedná čeština takové slovo nezná a jedná je označení „zkušební vliv“ vžitě, budu nadále v práci používat výhradně termín zkušební vliv.

Zkušební vlivy na finální hodnotu modulu pružnosti betonu nelze jednoduše rozdělit do několika základních kategorií. Téměř je možné říci, že každý jednotlivý zkušební vliv je svou vlastní kategorií. Právě proto se pokusím v následujících kategoriích vyzdvihnout jen ty nejpodstatnější a ty méně významné shrnout do kapitoly „ostatní“.

Pokud bychom přece jen chtěli zkušební vlivy roztrždit, mohli bychom je rozdělit do dvou základních skupin – ty, které můžeme ovlivnit (např. úprava zkušebních těles, rychlost zatěžování, apod.), a ty, které ovlivnit nemůžeme (metoda pro stanovení dynamické hodnoty modulu pružnosti vs. metoda pro stanovení statického modulu pružnosti).

Je dobré si také uvědomit, že zjištěný statický modul pružnosti E_c na zkušebním tělese nebude nikdy zcela přesně odpovídat skutečnému modulu pružnosti betonu zabudovaného v konstrukci – beton těles zraje jiným způsobem než beton v konstrukci. A pokud zjišťujeme E_c přímo na konstrukci, narážíme na limity kalibračních vztahů a použitých metod samotných.

Zkušebních postupů, pomocí kterých můžeme stanovit hodnotu modulu pružnosti betonu, je celá řada. V současné době jsou v platných českých normách uvedeny celkem čtyři metodiky, podle kterých lze určit modul pružnosti betonu. Dvě z nich jsou založeny na zatěžování zkušebního tělesa v zatěžovacím lisu a jedná se o **metody statické**. První metoda využívá zkoušku tlakem, druhá poté zkoušku tahu ohybem. Další dva normové postupy jsou založeny na nedestruktivních elektroakustických metodách a souhrnně se nazývají **dynamické metody**. Využívají fyzikálního zákona pro rychlost šíření pružného vlnění v hmotě a konkrétně se jedná o ultrazvukovou impulzovou metodu a metodu rezonanční.

Dynamický modul pružnosti je vždy vyšší než statický modul pružnosti. Poměr mezi dynamickou a statickou hodnotou závisí především na kvalitě a stáří betonu. Obecně platí, že čím je beton méně kvalitní (nebo velmi mladý), tím je poměr mezi statickým a dynamickým modulem nižší (může dosahovat hodnot nižších než 0,6). Zatímco velmi kvalitní betony mohou mít tento poměr relativně vysoký (číslo přesahující hodnotu 0,9).

Nyní si popíšeme jednotlivé metody. Podstatou zkoušky statického modulu pružnosti betonu v tlaku je cyklické zatěžování zkušebního tělesa za současného odečtu deformací tělesa. Zkušební těleso je vystaveno základnímu napětí 0,5 N/mm² (MPa) a poté se napětí plynule zvyšuje do hodnoty jedné třetiny očekávané pevnosti betonu v tlaku. Zaznamenají se poměrná přetvoření při odpovídajících napětích a statický modul pružnosti betonu se vypočítá jako podíl rozdílu základního napětí

a horního zatěžovacího napětí a rozdílu odpovídajících poměrných přetvoření dle vztahu

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (2)$$

kde je E_c modul pružnosti v tlaku v MPa,
 σ_a horní zatěžovací napětí v MPa,
 σ_b základní zatěžovací napětí, tj. 0,5 MPa,
 ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí,
 ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí.

Druhá statická zkouška je zkouška v tahu ohybem a je prováděna podle normy ČSN 73 6174 [20]. Principem postupu je stanovení modulu pružnosti a modulu přetvárnosti betonu namáhaného napětím v tahu ohybem pomocí výpočtu z naměřeného průhybu trámce, který je zatěžován tzv. čtyřbodovým ohybem (dvě břemena ve třetinách rozpětí).

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu pomocí ultrazvukové (dále též UZ) impulzové metody se provádí podle normy ČSN 73 1373 [21]. Princip metody je výpočet modulu pružnosti E_{cu} z rychlosti šíření UZ vlnění betonem v_L . Výhodou ultrazvukového vlnění je, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu, kde se např. slyšitelné vlnění rychle utlumí. Ačkoliv je již i u betonových objektů možné využít metodu ultrazvukovou odrazovou, v drtivém množství případů se používá ultrazvuková impulzová metoda průchodová, která je založena na opakovaném vysílání UZ impulzů do zkoušeného materiálu a zjištění doby jejich průchodu, z čehož se následně vypočte rychlost v_L . Je nutné podotknout, že rychlost šíření UZ impulsu betonem je do jisté míry konvencí, neboť délka dráhy, po které UZ impuls probíhá, není přesně známa.

Po měření na zkušebním tělese se vypočte rychlost v_L a dynamický modul pružnosti je stanoví podle vztahu

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

kde je E_{cu} dynamický modul pružnosti v MPa,
 ρ objemová hmotnost materiálů v kg/m^3 ,
 v_L rychlost šíření ultrazvuku v m/s,
 k koeficient rozměrnosti prostředí.

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu pomocí rezonanční metody se provádí podle normy ČSN 73 1372 [22]. Princip metody je výpočet modulu pružnosti z vlastních (rezonančních) frekvencí (kmitočtů) zkušebního tělesa.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určíme pomocí podélného kmitání ze vztahů

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

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (5)$$

kde je	E_{crL}, E_{crf}	dynamický modul pružnosti v tlaku (tahu) v MPa,
	L	délka zkušební tělesa v m,
	c_1	korekční součinitel, více v [98],
	f_L, f_f	vlastní frekvence podélného, příčného kmitání v kHz,
	ρ	objemová hmotnost materiálů v kg/m ³ ,
	i	poloměr setrvačnosti průřezu zkušební tělesa v m.

3.4 PREDIKCE STATICKÉ HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI

Hodnota modulu pružnosti betonu do jisté míry záleží na tom, jak je definován, a jak již bylo uvedeno, v různých předpisech je definován různě. Samotná zkouška statického modulu pružnosti betonu v tlaku (tahu) je podstatně náročnější než zkouška pevnosti betonu v tlaku. Experimentálně se z tohoto důvodu zkouší modul pružnosti méně často a v praxi se můžeme setkat se snahou o predikci hodnoty modulu pružnosti, ať už pomocí převodních vztahů, empirických dat nebo teoretických úvah.

Teoretickým způsobem může být modul pružnosti vypočítán z různých modelů. Základní typy jsou dva – sériový model (deformace cementové pasty a kameniva při stejném napětí) a paralelní model (napětí působí na cementovou pastu a kamenivo pro získání stejné deformace). Je v nich uvažován modul pružnosti malty, modul pružnosti hrubého kameniva a také jejich relativní objem v betonu.

Převodní vztahy udávají poměr mezi dynamickou a statickou hodnotou modulu pružnosti. Obecně však tyto vztahy nejsou moc přesné. Pokud je ale provedeno upřesnění pomocí statické zkoušky na zkušebním tělese, přepočtení dynamické hodnoty modulu pružnosti na hodnotu statickou může dobře fungovat, což je výhodné při ověřování modulu pružnosti betonu v konstrukci.

Empirický přístup využívá pro určení modulu pružnosti jinou známou vlastnost betonu. Nejčastěji se modul pružnosti betonu počítá z jeho pevnosti v tlaku, ale využívá se také objemová hmotnost či nejrůznější koeficienty. Empirických vztahů existuje opět celá řada, z nichž velkou část uvádí práce [23]. Zde bude uveden jen jeden vztah, který uvádí norma pro navrhování betonových konstrukcí [9] a normované hodnoty statického modulu pružnosti E_{cm} jsou dány vztahem

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (6)$$

kde je	E_{cm}	statický modul pružnosti v tlaku v GPa,
	f_{cm}	(charakteristická válcová pevnost v tlaku + 8) v MPa.

Kalibrační vztahy vycházejí z naměřených bodů (dvojic vstupních údajů tvořených souřadnicemi ukazatele nedestruktivního měření a ukazatele vlastnosti získané destruktivním zjištěním na zkušebním tělese) a stanovují se metodami matematické statistiky, např. regresní analýzou. Rozsah kalibračního vztahu dle [24]

musí být takový, aby umožňoval stanovení hodnot sledované vlastnosti všech velikostí, které při zkoušení mohou přicházet v úvahu.

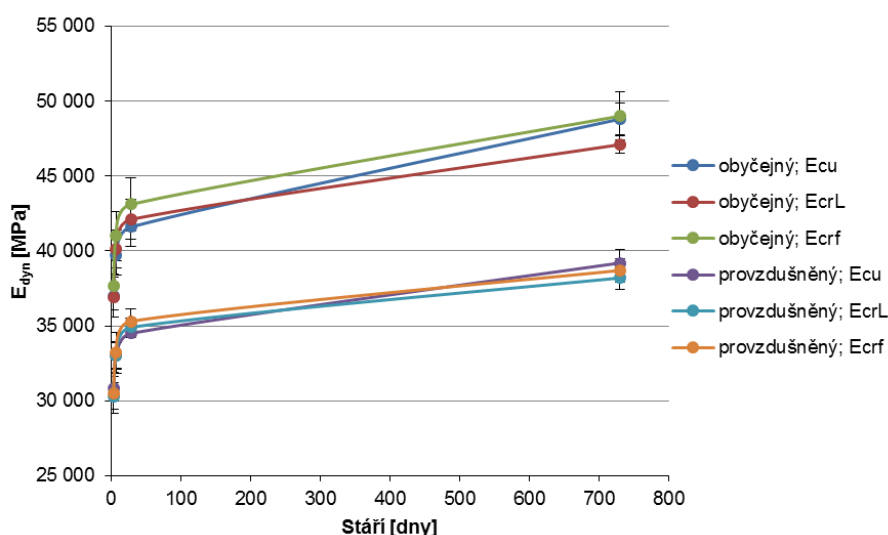
Kalibrační vztahy se rozlišují na obecný (stanovený pomocí minimálně 300 měření na betonech různého složení), směrný (stanovený pomocí minimálně 100 měření na betonech obvyklých pro sledovanou vlastnost) a určující (dosažený na zkušebních tělesech z betonů ze stejných složek a vyrobených stejnou technologií) Obecný a směrný kalibrační vztah lze upřesnit pomocí součinitele α , což je poměr součtu ukazatelů destruktivního měření a součtu ukazatelů nedestruktivního měření (při stejném počtu měření) [24].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 VLIV PROVZDUŠNĚNÍ

Podstatou popisovaného experimentu, který byl naplánován a proveden v rámci výzkumné spolupráce s firmou OHL ŽS, a.s., bylo stanovit dynamický i statický modul pružnosti provzdušněného a neprovzdušněného betonu určeného pro mostní konstrukce. Z hlediska metodiky zkoušek byly využity všechny čtyři normované metody pro stanovení dynamických a statických modulů pružnosti.

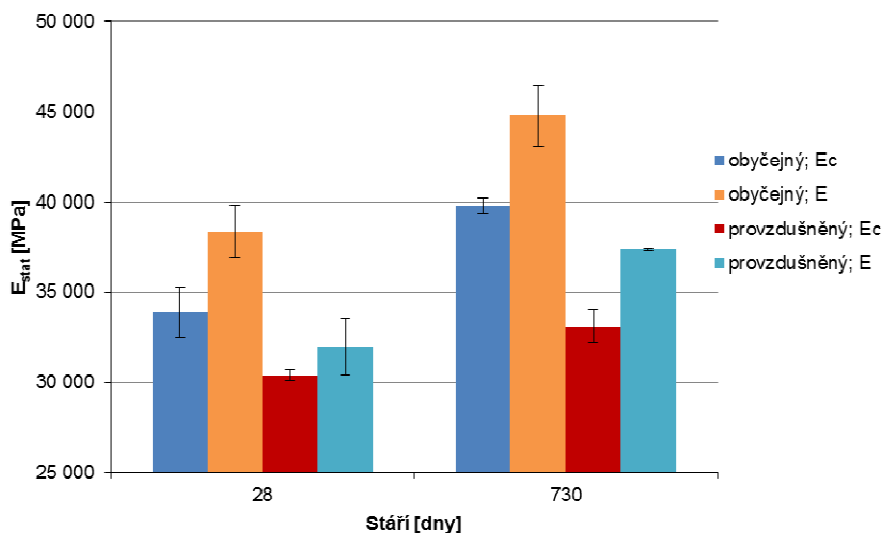
Zkoušky probíhaly na dvou sadách zkušebních tělesech tvaru hranolu. První sada byla vyrobena z betonu C 30/37 XF4 se záměrně vysokým provzdušněním (9,5 až 10,0 %), druhá sada byla vyrobena druhý den ze stejného betonu, tentokrát však bez provzdušnění. Dynamické zkoušky pomocí ultrazvukové impulzové metody a metody rezonanční probíhaly ve stáří betonu 3, 7, 28 a 730 dní. Statické moduly pružnosti se stanovovaly pomocí zkoušky v tlaku a také pomocí zkoušky v tahu ohybem ve stáří betonu 28 dní a 2 roky (730 dní). Graficky jsou výsledky zobrazeny na Obr. 7 a 8.



Obr. 7 Grafické znázornění časového vývoje dynamických modulů pružnosti provzdušněného a obyčejného betonu

Výsledky experimentu jasně prokázaly poměrně výrazný **pokles** modulu pružnosti betonu **vlivem provzdušnění**. V tomto konkrétním případě, kdy byl použit

beton pevnostní třídy C 30/37 s provzdušněním a bez něj, byl pokles o téměř 11 % (3,5 GPa) u 28denních hodnot statického modulu pružnosti z tlakové zkoušky E_c a o téměř 17 % (6,4 GPa) u 28denních hodnot statického modulu ze zkoušky v tahu ohybem E . Po 2 letech zrání betonu byl rozdíl u obou statických modulů pružnosti téměř 17 % (6,7 GPa u E_c , 7,4 GPa u E).

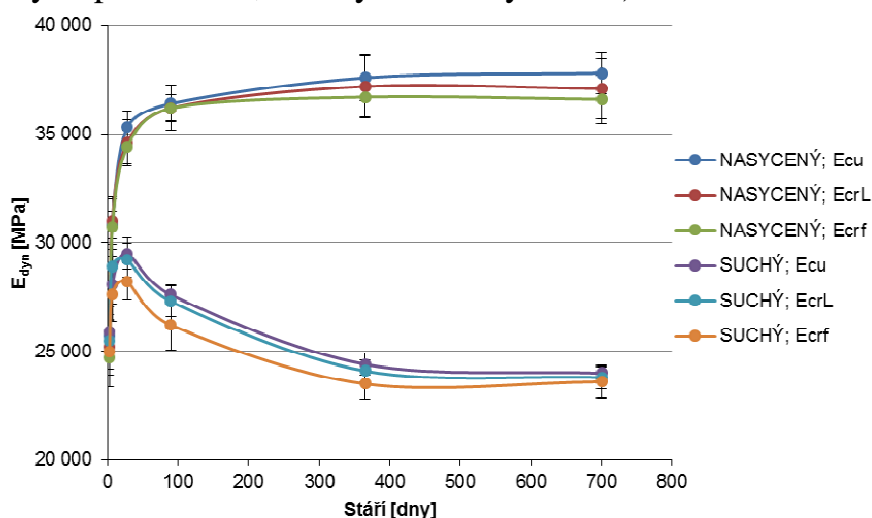


Obr. 8 Statický modul pružnosti provzdušněného i obyčejného betonu po 28 a 730 dnech zrání

4.2 VLIV ZPŮSOBU OŠETŘOVÁNÍ

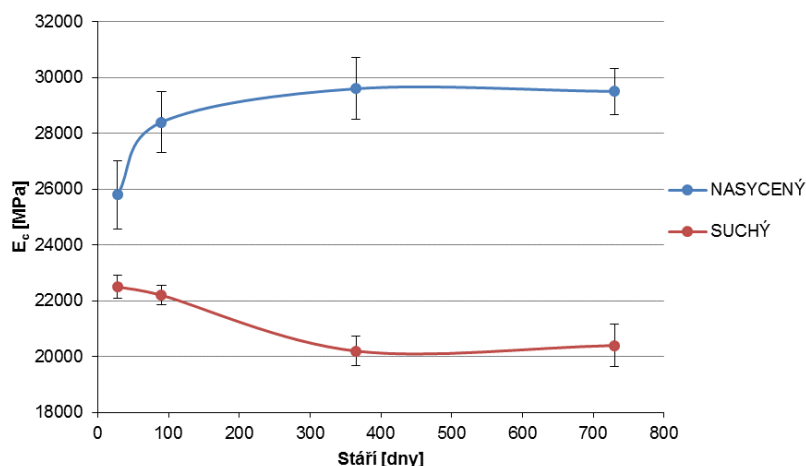
Podstatou tohoto experimentu, který byl opět naplánován a proveden v rámci výzkumné spolupráce s firmou OHL ŽS, a.s., bylo stanovit časový vývoj dynamického i statického modulu pružnosti mostního betonu s různým ošetřováním.

Pro zkoušky byla vyrobena zkušební tělesa z mostního betonu při výstavbě mostu na ulici Hradecké v Brně. Termíny betonáží byly 17. 3. 2009 (výstavba opěry mostu, beton označen 1) a poté 1., 23. a 30. 5. 2009 (betonovány byly postupně mostovkové desky jednotlivých polí mostu, betony označeny 2 až 4).



Obr. 9 Grafické znázornění časového vývoje dynamických modulů pružnosti ošetřovaného (nasyceného) a neošetřovaného (suchého) betonu 1 (ze dne 17. 3. 2009)

Tělesa z každé betonáže byla rozdělena do dvou sad. První sada byla uložena do vodní lázně, druhá sada byla uložena (po ošetřování během prvních 3 dnů) do laboratorního prostředí bez dalšího ošetřování vodou. Dynamické moduly pružnosti byla na obou sadách zjišťovány po 3, 7, 28, 90, 365 a 730 dnech zrání betonu, statické moduly E_c po 28, 90, 365 a 730 dnech zrání betonu. Grafická znázornění vývoje modulů pružnosti na tělesech z betonu 1 (další betony viz disertační práce) jsou zobrazena na Obr. 9 a 10.



Obr. 10 Grafické znázornění časového vývoje statického modulu pružnosti v tlaku E_c ošetřovaného (nasyčeného) a neošetřovaného (suchého) betonu 1 (ze dne 17. 3. 2009)

Zajímavý je rozdíl v chování těles ošetřovaných a neošetřovaných po uplynutí 28 dní od betonáže. Zatímco beton uložený ve vodní lázni nadále vykazuje nárůst hodnot modulu pružnosti (dynamického i statického), u betonu neošetřovaného je tomu jinak. Průměrné hodnoty statických i dynamických modulů pružnosti neošetřovaného betonu po 28 dnech nejen že nerostou, ale naopak se snižují (!), a to až téměř na úroveň 3denních výsledků (pozorováno u dynamických modulů pružnosti).

Z naměřených hodnot vyplývá, že se pravděpodobně po 1 roce stáří betonu jeho modul pružnosti pomalu ustaluje. U ošetřovaných těles už nadále tak výrazně neroste (spíše lze hovořit o stagnaci), u neošetřovaných těles naopak výrazně neklesá (spíše také stagnuje). Stejný (nebo alespoň velmi, opravdu velmi podobný) trend vývoje modulu pružnosti v čase byl zaznamenán jak u ošetřovaného, tak u neošetřovaného betonu u všech sérií.

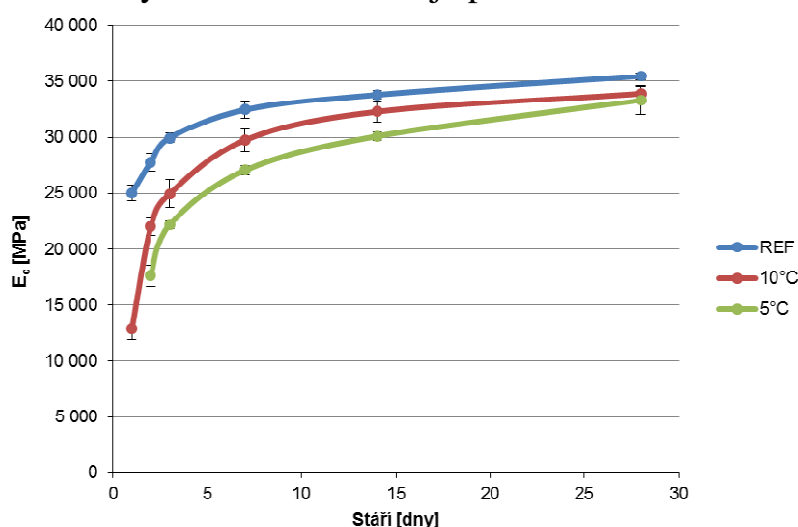
Zajímavý fakt je, že u betonů 2 až 4 (tedy u neprovzdušněných) nebyl po 28 dnech zjištěn nijak markantní rozdíl ve statických modulech pružnosti mezi betonem ošetřovaným a neošetřovaným – chybové úsečky tvořené výběrovou směrodatnou odchylkou se téměř (nebo dokonce úplně) překrývají – výrazný rozdíl ve statických hodnotách modulu pružnosti lze pozorovat až po 90 dnech zrání betonu. Avšak u betonu 1, který byl jako jediný provzdušněný, je rozdíl mezi výsledky statického modulu pružnosti ošetřovaného a neošetřovaného betonu poměrně výrazný již po 28 dnech od betonáže.

Je možné konstatovat, že dosažené výsledky jednoznačně dokazují **kladný vliv ošetřování** betonu **na jeho výsledný modul pružnosti**. U ošetřovaného betonu (uloženého ve vodní lázni) dynamický i statický modul pružnosti v čase uspokojivě roste, přičemž tento proces probíhá i po 90 dnech stáří betonu. Naopak u neošetřovaného betonu (uloženého v standardním laboratorním prostředí) roste modul pružnosti v čase jen zpočátku a méně než o ošetřovaného betonu, mezi 28 a 90 dnem stáří se nárůst zastavuje a modul pružnosti začíná naopak klesat.

4.3 VLIV OKOLNÍ TEPLoty V POČÁTEČNÍ FÁZI ZRÁNÍ BETONU

Cílem tohoto experimentu, který byl naplánován ve spolupráci s firmou ŽPSV, a.s., bylo ověřit míru vlivu nízké teploty při tuhnutí a tvrdnutí betonu na jeho výslednou hodnotu modulu pružnosti. Byl také sledován vývoj této charakteristiky betonu v čase právě v závislosti na teplotě okolního prostředí. Zkušební tělesa tvaru hranolu byla rozdělena do tří sad po 18 ks. První sada byla referenční a tělesa byla uložena ve standardních laboratorních podmínkách. Druhá sada byla ihned po vybetonování uložena v prostředí s okolní teplotou +10 °C a třetí v prostředí s okolní teplotou +5 °C. Po 1, 2, 3, 7, 14 a 28 dnech byl na 3 hranolech z každé sady zjištěn modul pružnosti pomocí dynamických metod a pomocí statické metody v tlaku.

Grafické znázornění výsledků modulu E_c je předmětem Obr. 11.



Obr. 11 Časový vývoj statického modulu pružnosti E_c betonu zrajícího při různých teplotách

Na základě provedení tohoto experimentu je možné konstatovat, že dosažené výsledky jednoznačně potvrzují skutečnost, že **teplota** okolního prostředí, v němž beton zraje, **má významný vliv na jeho aktuální hodnotu modulu pružnosti**. Pro experiment byl záměrně použit beton určený pro výrobu přepjatých nosníků, protože ve chvíli předpínání hraje modul pružnosti značný vliv na chování celého dílce. Při betonáži v zimním období by tedy okolní teplota měla být rozhodujícím faktorem pro určení doby vnesení předpětí do betonu.

U betonů zrajících při nižší teplotě okolního prostředí se potvrdily počáteční nízké hodnoty modulu pružnosti spojené s pozdějším výrazně strmějším nárůstem těchto hodnot, protože po 28 dnech vykazují všechny sledované moduly pružnosti

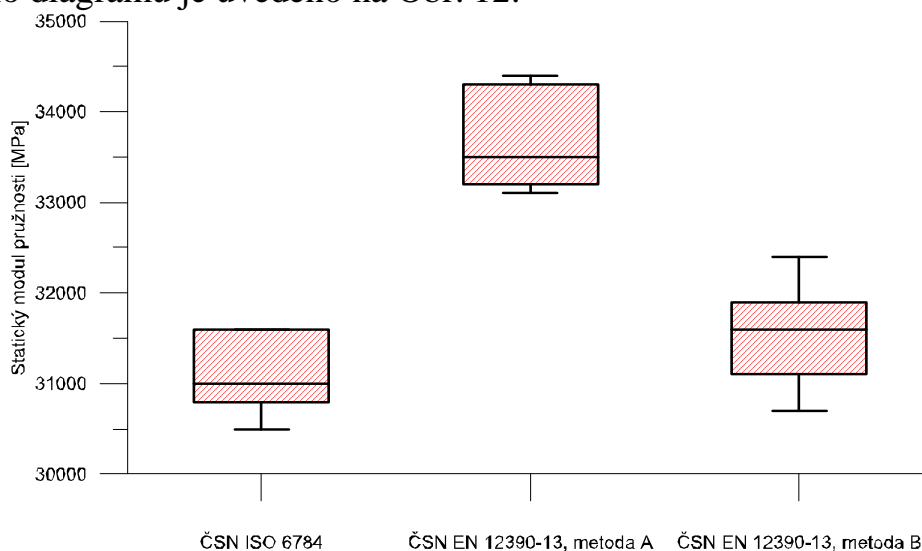
téměř stejných výsledků. Je možné, že po 90 dnech by betony uložené v prostředí s okolní teplotou +5 °C dosahovaly nejlepším parametrů. Při použití betonu nižší pevnostní třídy by rozdíly ve výstupech experimentu byly pravděpodobně ještě výraznější, zřejmě by ovšem nastal problém se stanovováním charakteristik betonu zrajícího při teplotě +5 °C ještě několik dní po betonáži.

4.4 VLIV POUŽITÉHO POSTUPU

V únoru roku 2014 vešla v platnost norma ČSN EN 12390-13 [13], která novým způsobem popisuje zkoušení modulu pružnosti betonu v tlaku. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že se její výsledky od hodnot zjištěných dle tehdejší dlouhodobě platné normy ČSN ISO 6784 [11] poměrně výrazně liší. Současně jsou určité pasáže normy [13] formulovány tak, že mohou nastat problémy s jejich interpretací.

Pro experiment byla vyrobena zkušební tělesa tvaru válce 150 × 300 mm, která byla na základě dynamických zkoušek rozdělena do 3 skupin po 8 kusech tak, aby průměrné dynamické hodnoty modulů pružnosti byly u každé skupiny přibližně stejné a nedošlo k ovlivnění experimentu faktorem rozdílných kvalit zkušebních těles v jednotlivých skupinách. První sada byla zkoušena dle [11], druhá dle metody A [13] a třetí dle metody B [13].

Grafické znázornění statických modulů pružnosti betonu prostřednictvím krabicového diagramu je uvedeno na Obr. 12.



Obr. 12 Krabicové grafy výsledků zkoušek statického modulu pružnosti betonu stanoveného podle norem [11] a [13]

Z výsledků provedeného jednoznačně vyplývá, že stanovení statického modulu pružnosti podle **metody A** v [13] vede k **nadhodnocení** této veličiny **oproti metodě B** a oproti postupům uvedeným v **normě [11]**, tedy i normě [12]. Výsledky zkoušek statického modulu pružnosti provedených podle [11] (respektive [12]) a metodou B v [13] nenaznačují statisticky významné rozdíly. Je tedy možné říci, že výsledky těchto zkoušek jsou vzájemně srovnatelné.

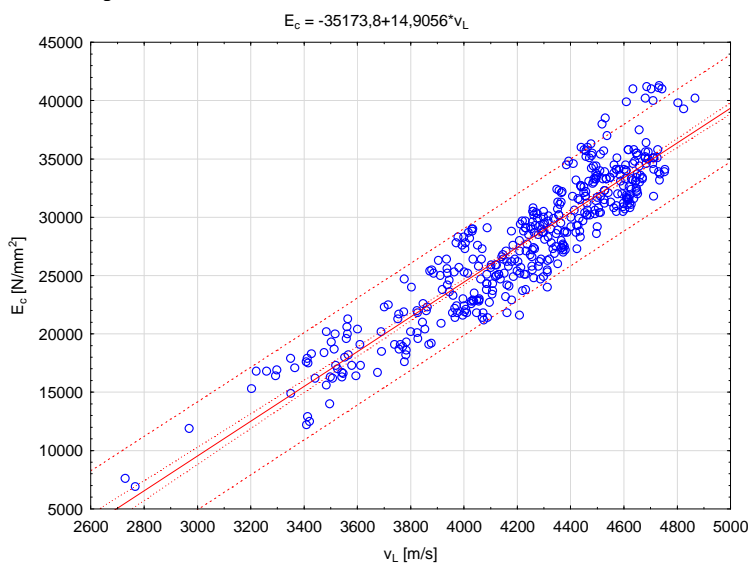
4.5 MOŽNOST TVORBY KALIBRAČNÍCH VZTAHŮ

Kalibračních vztahů pro zjištění určité charakteristiky ztvrdlého betonu pomocí nedestruktivních metod zkoušení (NDT) existuje celá řada (např. jako součást příslušenství nových produktů firmy Proceq, jako jsou tvrdoměry SilverSchmidt, v normě [24], apod.), téměř výhradně se však jedná o pevnost v tlaku. Není se ovšem čemu divit, když i v nejzákladnější normě pojednávající o specifikaci, vlastnostech, výrobě a shodě betonu [25] se o modulu pružnosti vůbec (!) nepíše.

V praxi však existují situace, kdy by bylo nedestruktivní zjištění přibližné hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku velmi výhodné. Typickým příkladem je chvíle vnášení předpětí do prvku či celé konstrukce, zvláště pokud panují, např. vzhledem k nízké okolní teplotě, pochybnosti o skutečné aktuální hodnotě modulu pružnosti betonu – předpětí je totiž často vnášeno velmi brzy po betonáži (ve stáří betonu např. pouhých 24 hodin).

V disertační práci, která pojednává o modulu pružnosti betonu, by ověření možnosti tvorby kalibračního vztahu pro zjištění statického modulu pružnosti betonu pomocí NDT nemělo chybět.

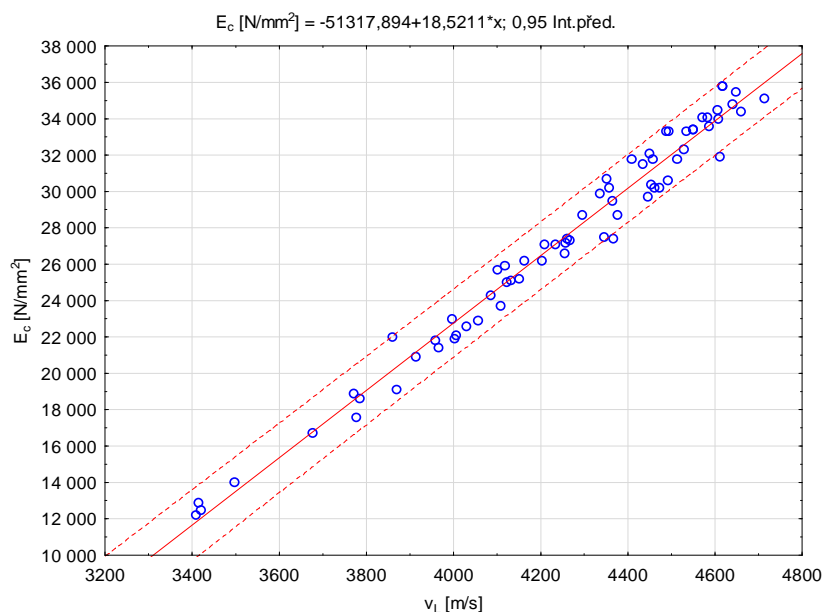
Pro tvorbu obecného kalibračního vztahu bylo využito celkem 440 měření na hranolech z obyčejného betonu (ale různého složení), kdy byl současně stanoven statický modul pružnosti E_c a zjištěna rychlost UZ vlnění v_L . Regresní model závislosti těchto veličin je na Obr. 13.



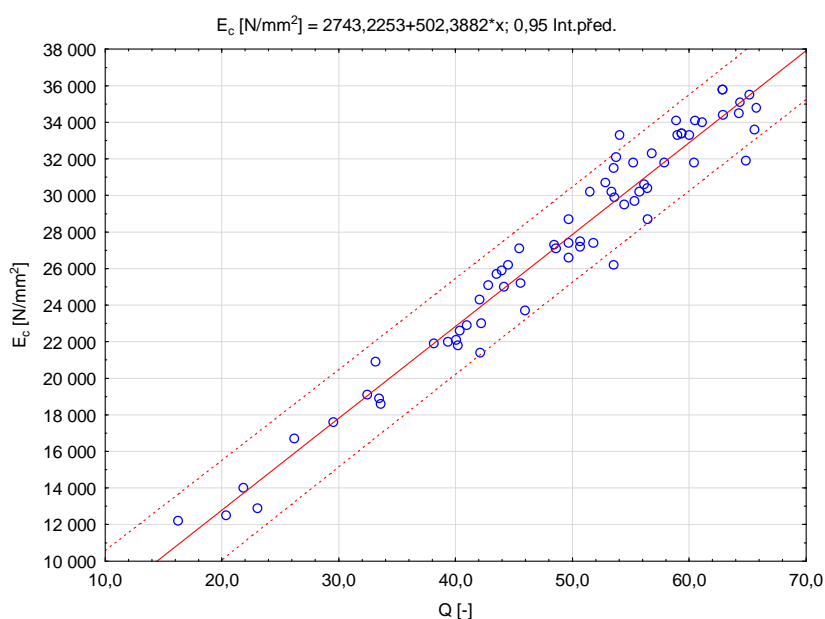
Obr. 13 Lineární regresní model závislosti E_c na v_L včetně spolehlivostního a predikčního pásu na hladině významnosti 0,95

Pro tvorbu určujícího kalibračního vztahu bylo využito údajů, které byly získány při provádění experimentu popsaného v kapitole 4.3. Základní počet zkušebních těles, který sestával ze tří sad 18 hranolů (celkově tedy o 54 zkušebních těles), byl doplněn také o „nepovedená“ zkušební tělesa, kterých bylo 18. Nepovedená neznamená, že by byl nekvalitní beton či rozměry, ale nebyla dodržena naplánovaná teplota okolního prostředí. Celkově bylo tedy pro tvorbu určujícího kalibračního vztahu použito 72 zkušebních těles. Jako NDT parametry pro tvorbu kalibračního

vztahy byly naměřeny hodnoty rychlosti v_L , odrazu a (Schmidt N) a vrácené energie Q (SilverSchmidt PC N).



Obr. 7-9 Závislost statického modulu pružnosti betonu E_c na rychlosti UZ vlnění v_L



Obr. 7-11 Závislost statického modulu pružnosti betonu E_c na průměrné hodnotě Q

Z uvedených výstupů vyplývá, že tvorba jak obecných, tak určujících kalibračních vztahů pro zjištění statické hodnoty modulu pružnosti pomocí NDT je možná.

Z naměřených údajů také plyne, že pro praktické použití obecného kalibračního vztahu by bylo nutné upřesnění pomocí destruktivních zkoušek.

U určujícího kalibračního parametru bylo zjištěno, že víceparametrická analýza nemá smysl, tudíž k určení E_c stačí znát jeden NDT parametr a takto vytvořený vztah je možné používat i bez upřesnění. Navíc tento zjištěný určující kalibrační vztah pro stanovení E_c neovlivní ani stáří betonu, ani okolní teplota, při které beton zraje. Platí však pouze pro daný beton známého složení.

5 ZÁVĚR

V disertační práci jsou popsány nejdůležitější aspekty, které ovlivňují výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu v tlaku (tahu). Na základě provedených experimentů a analýz jejich výsledků byla zhodnocena míra vlivu jednotlivých faktorů.

Modul pružnosti betonu je však fascinujícím fenoménem sám o sobě. Čím hlouběji se podařilo autorovi práce do problematiky modulu pružnosti betonu proniknout, tím více zjišťoval, že toho ví méně, protože objevoval stále nová kvanta nezodpovězených otázek a problémů k řešení. Zajímavá je bezesporu skutečnost, že modul pružnosti betonu nemá jednotnou definici. V základní normě popisující beton, jeho specifikaci a vlastnosti [25] není o této důležité charakteristice ani zmínka (!), což je minimálně zvláštní. Vzhledem k absolutní absenci jakýchkoliv kritérií shody, či definování charakteristických hodnot pro modul pružnosti betonu, vychází veškeré požadavky na modul pružnosti z hodnot uvedených v Eurokódu 2 [9]. Tyto hodnoty přiřazené k pevnostním třídám betonu jsou však pouze směrné (tedy průměrné, či informativní) a zdaleka neodpovídají vysoké variabilitě reálných výsledků modulu pružnosti. Přesné vymezení termínu modul pružnosti, včetně charakteristických hodnot a kritérií shody, je velmi důležité, přesto však v současných platných předpisech chybí. Z toho plynoucí nejasnosti a nedorozumění jsou samostatným aspektem, modul pružnosti může podstatně ovlivnit.

Z technologických vlivů byly zkoumány ty pravděpodobně nejpodstatnější (s výjimkou vlivu množství a druhu hrubého kameniva – tento problém popisuje disertační práce [14]). Všechny tři ověřované faktory, konkrétně provzdušnění, délka a kvalita ošetřování a teplota okolního prostředí při zrání betonu, vykazují na modul pružnosti významný vliv.

Provzdušnění betonu sice zlepšuje jeho mrazuvzdornost, ovšem poměrně výrazným způsobem snižuje hodnoty jeho pevnostních a zejména pružnostních charakteristik. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že modul pružnosti může vlivem vysoké hodnoty provzdušnění klesnout o více než 15 %.

Ošetřování betonu, zejména jeho kvalita a délka, jsou také významným vlivem na hodnotu modulu pružnosti betonu. Bylo zjištěno, že pokud beton nemá dlouhodobě možnost odebírat vodu z vnějšího prostředí (např. déšť, sníh apod.), může jeho modul pružnosti poměrně výrazně klesat oproti modulu pružnosti betonu kvalitně ošetřovanému.

Z analýzy provedených zkoušek také vyplývá, že pro počáteční hodnoty modulu pružnosti (v prvních několika hodinách až dnech zrání betonu) je nejdůležitější teplota okolního prostředí. Čím je okolní teplota nižší, tím je počáteční modul pružnosti betonu nižší, což je zejména v případě betonáže v zimním období podstatná informace. Zajímavé je, že přestože jsou počáteční hodnoty modulu pružnosti teplotou výrazně ovlivněny, u 28denních hodnot tento jev již neplatí.

Ze zkušebních vlivů stojí za zmínku bezpochyby vliv použitého postupu. Bylo ověřeno, že zvolený postup stanovení statického modulu pružnosti betonu ovlivní výsledek. Pokud uvažujeme dvě různé metody (zkouška v tlaku vs. zkouška v tahu

ohybem), lze rozdílné výstupy pochopit. Pokud ovšem stejná metoda (statický modul pružnosti ze zkoušky v tlaku), pouze prováděná podle jiných norem, vykazuje statisticky odlišné výsledky, je to problém. Je tedy nutné, aby byl při požadavku na statický modul pružnosti betonu ze strany projektanta přesně určen zkušební postup, podle kterého má být statický modul pružnosti určen.

V závěru experimentální části byly stanoveny dva kalibrační vztahy pro určení statické hodnoty modulu pružnosti betonu z nedestruktivních měření. Obecný kalibrační vztah, který byl vytvořen pomocí měření ultrazvukovou impulzovou metodou, se potýká s problémem vysoké variability souboru dat, zejména z důvodu rozdílného složení použitých betonů. Zvláště typ a frakce použitého kameniva mění vztah mezi rychlostí UZ vlnění a modulem pružnosti. Pro praktické užívání stanoveného obecného kalibračního vztahu by bylo nutné zjištěné hodnoty modulu pružnosti upřesnit pomocí destruktivních zkoušek. To však není významný problém, neboť upřesňování kalibračních vztahů (zjištění pevnosti betonu v tlaku na základě NDT) pomocí destruktivních zkoušek na tělesech se běžně používá. Zajímavý výsledek disertační práce představuje stanovený určující kalibrační vztah, který by mohl na betonu známého složení fungovat i bez upřesnění.

Posledním výstupem disertační práce je celkové zhodnocení problematiky transformované do určitých doporučení:

- do normativního systému zavést definici modulu pružnosti betonu, charakteristické hodnoty a kritéria shody;
- přesně stanovit, podle jakého postupu se bude modul pružnosti zkoušet (doporučuji buď ČSN ISO 1920-10 [12], anebo metodu B normy ČSN EN 12390-13 [13]);
- stanovit, na jakých tělesech se bude modul pružnosti zkoušet (osobně navrhuji hranol $100 \times 100 \times 400$ mm, ačkoliv vím, že většina odborné veřejnosti bude tvrdě proti – má to však své důvody – odpadne problém s koncováním tlačných ploch, směr zkoušení je kolmý na směr hutnění betonu a výrazně snáze se určuje vlastní frekvence kroutivého kmitání);
- zhodnotit, zda je pro danou konstrukci hodnota modulu pružnosti podstatná – pouze pokud ano, řídit se údaji z prvního bodu a body následujícími;
- rekognoskace receptury betonu vzhledem k místním podmínkám (zejména druh kameniva) a případná optimalizace receptury, pokud se finančně vyplatí (dovoz surovin, např. čedič nebo žula, atd.);
- důkladné ošetřování betonu – dbát na kvalitní dlouhodobé ošetřování vodou (klidně i více než týden), v zimních obdobích proteplovat.

LITERATURA

- [1] AĪTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton*. český překlad Bílek, V., ČKAIT, Praha, 2005, ISBN: 80-86769-39-9.
- [2] TANG, S.W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, **78**: 143-154 [cit. 2015-12-07]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021. ISSN: 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884615001581>.
- [3] GU, CH.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. *Science China Technological Sciences* [online]. 2015, **58**(4): 587-599 [cit. 2015-12-07]. DOI: 10.1007/s11431-015-5769-4. ISSN: 16747321. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11431-015-5769-4>.
- [4] ŠMIŘÁK, S. *Pružnost a plasticita I*. CERM, Brno, 2006, 3. vydání, ISBN: 80-7204-468-0.
- [5] ADÁMEK, J.; NOVOTNÝ, J.; KOUKAL, J. *Stavební materiály*, CERM, Brno, 1997, ISBN: 80-214-0631-3.
- [6] NEVILLE, A.M. *Properties of Concrete*. 5th edition, London: Pearson, 2011. ISBN: 978-0-273-75580-7.
- [7] ANTON, O. a kol., *Zkušebnictví a technologie – Laboratorní cvičení, Zkušebnictví a technologie – modul BI02 – M02*.
- [8] NEWMAN, J.; CHOO, B.S. *Advanced Concrete Technology – Concrete properties*. GB: Elsevier Ltd. 2003, ISBN: 0-7506-5104-0.
- [9] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ÚNMZ, 2011.
- [10] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. American Concrete Institute, U.S., ISBN: 978-0-87031-744-6, 2011, 503 p.
- [11] ČSN ISO 6784 *Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. FÚNM, 1993.
- [12] ČSN ISO 1920-10 *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. ÚNMZ, 2014.
- [13] ČSN EN 12390-13 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. ÚNMZ, 2014.
- [14] MITRENGA, P. *Vliv kameniva na hodnoty modulu pružnosti kameniva*. Disertační práce, Brno, 2011, 259 s., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, vedoucí disertační práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
- [15] VYMAZAL, T.; ŽALUD, O.; MISÁK, P.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; JANOUŠEK, P. Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovenou NDT metodami. *Beton TKS*, 2011, roč. 2011, č. 4, s. 73-75. ISSN: 1213- 3116.

- [16] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. český překlad Bílek, V., ČKAIT, Praha, 2009, ISBN: 978-80-87093-75-7.
- [17] BARTULÍKOVÁ, R. *Vliv provzdušnění a ošetřování na vývoj modulu pružnosti betonu*. Brno, 2013. 105 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.
- [18] CIKRLE, P.; BÍLEK, V.; JUŘINOVÁ, E. Zkoušení modulu pružnosti pro prefabrikaci. In *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. s. 61-65. ISBN: 978-80-214-3951-1.
- [19] REITERMAN, P.; HUŇKA, P.; KOLÁŘ, K. Vliv způsobu ošetřování na dlouhodobý vývoj modulu pružnosti. In *17. betonářské dny 2010*. Hradec Králové: ČBS Servis, s.r.o., 2010. s. 425-428. ISBN: 978-80-87158-28-9.
- [20] ČSN 73 6174 *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. ČNI, 1994.
- [21] ČSN 73 1373 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. ÚNMZ, 2011.
- [22] ČSN 73 1372 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. ÚNMZ, 2012.
- [23] HUŇKA, P. *Modul pružnosti betonu – možnosti stanovení, technologické a zkušební vlivy*. Disertační práce. Praha, 2014, 161 s., České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, školitel: Doc. Ing. Karel Kolář, CSc.
- [24] ČSN 73 1370 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*. ÚNMZ, 2011.
- [25] ČSN EN 206 *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ÚNMZ, 2014.

ŽIVOTOPIS

Ing. Dalibor Kocáb

Narozen:

18. 10. 1983 v Brně

Vzdělání:

1995 – 2003 Gymnázium v Moravském Krumlově
2003 – 2008 Fakulta stavební, VUT v Brně
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Studium: magisterské
Téma diplomové práce: Diagnostika železobetonového mostu v Telnici

Odborná praxe:

2008 – 2012 Fakulta stavební, VUT v Brně
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Studium: Doktorský studijní program s prezenční formou studia

2012 – dosud Fakulta stavební, VUT v Brně
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Studium: Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia

2010 – dosud Fakulta stavební, VUT v Brně
zaměstnanec Ústavu stavebního zkušebnictví

ABSTRACT

The Ph.D. thesis deals with one of the most important characteristics of hardened concrete; i.e. the modulus of elasticity. The thesis aims to describe and evaluate the important factors that affect the final value of concrete modulus of elasticity, especially those that can be influenced during construction. Another aim is to find ways to determine the static modulus of elasticity of concrete by non-destructive means (primarily ultrasonic pulse method, resonance method and use of electronic rebound hammers), thus to determine the possibility of creating calibration curve for NDT determination of the modulus of elasticity.