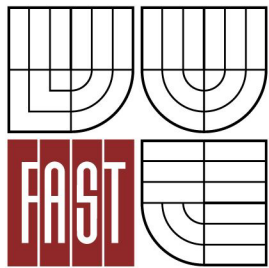




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK NA MODUL PRUŽNOSTI MOSTNÍHO BETONU

INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS ON THE MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE FOR
BRIDGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Blažek

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Michal Blažek

Název Vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu

Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2011

Datum odevzdání bakalářské práce 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu



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

Podklady a literatura

AĪTCIN, P.-C.: Vysokohodnotný beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2005.

COLLEPARDI, M.: Moderní beton. ČKAIT a ČBS. Praha, 2009

ANTON, O., kolektiv autorů, Základy zkušebnictví, Brno, CERM, 2002.

Platné normy, zejména ČSN EN 206-1, ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 12504-4, ČSN ISO 6784, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372.

Zásady pro vypracování

Teoretická část: Rešerše pramenů - vliv počátečních podmínek na charakteristiky betonu, zejména pevnost v tlaku a modul pružnosti. Vývoj pevností v tlaku a modulu pružnosti betonu v čase - vlivy, způsoby stanovení. Metodiky zkoušení těchto charakteristik.

Praktická část: Zpracování plánu experimentu - sledování vlivu nízké počáteční teploty na vývoj modulu pružnosti betonu. Výroba zkušebních těles - hranolů 100×100×400 mm v počtu minimálně 18 ks a zkušebních krychlí 150×150×150 mm. Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové a rezonanční metody pro stanovení dynamických modulů pružnosti. Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku. Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek, vyhodnocení výsledků zkoušek.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací



.....
Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Vedle pevnosti betonu v tlaku, která je základním parametrem pro návrh betonové konstrukce, je třeba stanovit i modul pružnosti betonu. V této práci se pojednává o vlivech působících na beton, zejména v počáteční fázi tvrdnutí (do 28 dnů). V dnešní době, kdy je čas nejcennější položkou, je třeba znát fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu dříve než po 28 dnech a umět tyto vlastnosti využít. Na beton v počátečním stádiu tuhnutí působí mnoho vlivů, které vývoj modulu pružnosti betonu v čase ovlivní. K porozumění této problematiky byla provedena rešerše literatury a byl uskutečněn experiment, který má prokázat vliv teploty na modul pružnosti betonu. Vliv teploty na modul pružnosti doposud nebyl intenzivněji zkoumán, a proto mu bude věnována větší pozornost. V experimentu je zjišťován statický a dynamický modul pružnosti betonu v počáteční fázi tuhnutí, který se svou recepturou podobá betonu používanému pro výrobu prefabrikovaných, předpjatých mostních nosníků.

Klíčová slova

Beton, pevnost v tlaku, modul pružnosti, vývoj modulu pružnosti betonu v čase, vliv teploty, statická zatěžovací zkouška, ultrazvuková zkouška, rezonanční zkouška.

Abstract

Beside the compressive strength of concrete, which is considered as the basic parameter for design of concrete structures a modulus of the concrete elasticity should be set as well. This thesis deals with influences, which are acting on the concrete, particularly within the initial stage of its hardening (i.e. within 28 days after casting). Nowadays, when time is the most valuable factor, some knowledge is required about mechanical properties of concrete earlier than after above mentioned 28 days and to apply them advantageously. The concrete in initial stage of hardening is influenced by many factors that affect progress of the elasticity modulus during the course of the time. For understanding of these problems a literature search was performed, as well as the experiment demonstrating the effect of temperature on the modulus of the concrete elasticity. The effect of temperature on the modulus of elasticity of concrete in initial stage of hardening has not been intensively studied yet. Therefore, more attention is paid to it by this elaborate. The experiment investigated the static and dynamic elastic modulus of concrete, whose recipe is similar to one used for production of prefabricated and prestressed bridge girders.

Keywords

Concrete, compressive strength, modulus of elasticity, progress modulus of elasticity at the time, static load test, ultrasonic inspection test, resonance test.

Bibliografická citace VŠKP

BLAŽEK, Michal. *Vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu*. Brno, 2012. 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 20.5.2012

Michal Blásek

.....
podpis autora

Než začnete číst první řádky této práce, věnujte prosím pozornost tomuto odstavci, kterým bych chtěl poděkovat lidem, co mi při mé práci pomohli. Za rady, pomoc a zejména ochotu pomáhat a radit, bych rád upřímně poděkoval vedoucímu této práce Ing. Petrovi Cikrlemu, Ph.D. a stejně velkou měrou Ing. Daliborovi Kocábovi. Rád bych poděkoval i Ing. Vlastimilovi Bílkovi, Ph.D., který ochotně zapůjčil kvalitní a cennou literaturu.

Obsah

<u>1</u>	<u>ÚVOD</u>	<u>9</u>
1.1	Úvodní část	9
1.2	Cíle práce	10
<u>2</u>	<u>PEVNOST BETONU V TLAKU A MODUL PRUŽNOSTI</u>	<u>11</u>
2.1	Vysokohodnotný, vysokopevnostní a mostní beton	11
2.1.1	Ujasnění pojmů vysokohodnotný a vysokopevnostní beton	11
2.1.2	Mostní beton	12
2.1.3	Současné požadavky na modul pružnosti	13
2.2	Vývoj pevnosti betonu v tlaku v čase	14
2.3	Vývoj modulu pružnosti betonu v čase	17
<u>3</u>	<u>VLIV POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK NA PEVNOST V TLAKU A MODUL PRUŽNOSTI</u>	<u>20</u>
3.1	Tuhnutí a tvrdnutí betonu	20
3.2	Betonáž při extrémních teplotách	20
3.2.1	Opatření pro betonování při nízkých teplotách	21
3.2.2	Opatření pro betonování při vyšších teplotách	22
3.3	Vnitřní vlivy působící na beton v počáteční fázi tvrdnutí	22
3.3.1	Druh a způsob výroby cementu	22
3.3.2	Přísady a příměsi ovlivňující tuhnutí a zpracování betonu	23
3.4	Vnější vlivy působící na beton v počáteční fázi tuhnutí	25
3.4.1	Vliv teploty	25
3.4.2	Způsob ošetřování betonu	25
<u>4</u>	<u>ZKOUŠENÍ BETONU</u>	<u>27</u>
4.1	Obecný popis pevnosti v tlaku a modulu pružnosti	27
4.2	Stanovení statického modulu pružnosti	28
4.3	Stanovení dynamického modulu pružnosti	30
4.3.1	Stanovení ultrazvukovou impulsovou zkouškou	31
4.3.2	Stanovení rezonanční metodou	31

<u>5</u>	<u>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</u>	33
5.1	Výroba betonu pro experiment	33
5.2	Zkoušení n-denních těles	36
<u>6</u>	<u>VÝSLEDKY MĚŘENÍ</u>	38
6.1	Vlastnosti čerstvého betonu	38
6.2	Pevnost betonu v tlaku	38
6.3	Modul pružnosti	40
6.3.1	Statický modul pružnosti	41
6.3.2	Dynamický modul pružnosti	44
6.4	Shrnutí	49
<u>7</u>	<u>ZÁVĚR</u>	52
<u>8</u>	<u>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</u>	53
8.1	Skripta a opory	53
8.2	Normy	53
8.3	Články	54
8.4	www zdroje	54
<u>9</u>	<u>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</u>	55
<u>10</u>	<u>SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</u>	56
10.1	Seznam obrázků	56
10.2	Seznam grafů	56
10.3	Seznam tabulek	57

1 ÚVOD

1.1 Úvodní část

V moderním stavitelství jsou vlivem trhu a obchodní konkurence nastaveny podmínky, které zhotovitele nutí vyrábět co nejrychleji a nejefektivněji. Beton patří mezi nejvýznamnější stavební materiály, přičemž jeho doba tuhnutí a tvrdnutí aktuálním požadavkům příliš nevyhovuje. Je tedy požadováno urychlení doby tuhnutí a tvrdnutí na minimum. Obzvláště přísné požadavky jsou nastaveny v závodech na výrobu předpínaných prefabrikátů. Výrobní kapacita je v těchto případech přímo závislá na vytíženosti forem. V současnosti je běžné, že se po jednom až dvou dnech tuhnutí a tvrdnutí výrobek vyjme z formy, předepne se a uloží do skladiště. Tohle klade velký důraz na požadavek dosáhnout velkých pevností v tlaku i modulu pružnosti při raných stádiích tvrdnutí. U betonování monolitických staveb se tato problematika objeví zvláště při výstavbě patrových budov, kde nedostatečně ztvrdlý beton brání vybudování dalšího patra.

Intenzifikace postihující naši dobu je ve vývoji stavitelství relativně krátkodobá záležitost. V minulosti nebylo jiné možnosti, než se s časovou náročností stavby vyrovnat a nechat beton dosáhnout dostatečných hodnot. Převažoval monolitický způsob výroby, zejména v důsledku nevyvinuté automobilové nákladní přepravy. Běžný časový harmonogram musel počítat se třemi týdny zrání betonu v bednění a někdy až po šesti týdnech možnost plného zatížení betonovaných prvků.

Existuje celá řada faktorů působících na beton, které ovlivňují jeho dobu tuhnutí a tvrdnutí. Nejvýznamnější faktory můžeme rozdělit na vnitřní a vnější vlivy. Mezi vnitřní vlivy lze zahrnout složení cementu, které například jemností mletí a obsahem jednotlivých složek, ovlivní proces hydratace. Proces hydratace může být dále ovlivněn chemickou přísadou či příměsí, obecně zpomalovačem nebo urychlovačem tuhnutí. Neméně důležitou měrou se uplatní vnější vlivy. Vliv teploty, který řadíme mezi vnější vlivy, bezesporu velkou měrou ovlivní rychlost hydratace. Nezanedbatelnou roli však může hrát i způsob ošetřování betonu v počáteční fázi tvrdnutí.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je stanovit vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu, ale i pevnost betonu v tlaku. Bude provedena rešerše literatury, která se zabývá problematikou všech nejdůležitějších vlivů, a která řeší jak se efektivně vyrovnat s jejich dopady na kvalitu betonu. Dále bude proveden experiment, ve kterém má být objasněn vliv teploty na modul pružnosti. Konkrétně bude zjišťován statický i dynamický modul pružnosti na 3 sadách (3 betonážích) trámců 100x100x400 mm po 1, 2, 3, 7, 14 a 28 dnech zrání. Každá sada bude obsahovat pro každé n-denní měření jeden vzorek uložený ve vlhkém prostředí při 10°C a jeden referenční vzorek uložený ve vlhkém prostředí při teplotě v laboratoři. Porovnání naměřených výsledků chlazených a referenčních trámců by nám mělo dát představu o celkovém vlivu teploty na modul pružnosti betonu v počáteční fázi tvrdnutí.

2 PEVNOST BETONU V TLAKU A MODUL PRUŽNOSTI

2.1 Vysokohodnotný, vysokopevnostní a mostní beton

2.1.1 Ujasnění pojmů vysokohodnotný a vysokopevnostní beton

V současnosti jsou budovány rozsáhlé a dech beroucí konstrukce jako jsou stále vyšší mrakodrapy, mosty spojující ostrovy či kontinenty apod. (viz. Obr. 2-1) [4-2]. I tyto konstrukce jsou zatíženy požadavkem na co nejrychlejší dobu výstavby a na možnost konstrukci betonovat i při velmi nepříznivých podmínkách. Proto je nutné si ujasnit pojmy, které se u nás i ve světě spojují s vlastnostmi betonu.



Obr. 2-1 Příklad novodobé stavby- Øresundský most [4-2].

Názory na definici vysokopevnostního a vysokohodnotného betonu se ve světě liší. Některé zdroje uvádějí, že vysokopevnostní beton je obdoba běžného betonu, jeho zvýšená pevnost má být docílena pouze pečlivějším výběrem materiálů do betonové směsi. Vysokohodnotný beton má disponovat svou vysokou pevností díky velmi nízkému vodnímu součiniteli, kterého je možno dosáhnout pouze přidávkem superplastifikátoru.

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti

Jiné zdroje zase vycházejí z názoru, že odlišnost vysokohodnotného betonu od vysokopevnostního betonu je dána pouze jeho dalšími vylepšenými vlastnostmi jako jsou dlouhodobá stálost, odolnost vůči trhlinám vysoká houževnatost atd.

Nezávisle na definici ovšem můžeme říci, že vysokých pevností betonů je dosaženo při co nejmenším vodním součiniteli, při použití minerálních příměsí a použitím kameniva s velkou pevností v tlaku a s vysokou soudržností s cementovým tmelem. Za běžný beton můžeme považovat beton s pevností do 50 MPa a nedisponující žádnou vylepšenou vlastností [1-1, 1-2].

2.1.2 Mostní beton

V ČR není betonové stavitelství na takové úrovni jako ve světě a konstrukce, které lze považovat za nejnáročnější z hlediska namáhání a trvanlivosti, jsou mosty, popř. tunely. Tyto konstrukce jsou navrhovány na životnost 100 let a jsou vystaveny vnějším povětrnostním vlivům, zatížení dopravou a s tím související zimní údržbou (působení mrazu a chloridů na konstrukci). V důsledku všech těchto zatížení jsou na mostní beton kladeny přísnější podmínky (viz. Tab. 2-1). Běžné pevnosti mostního betonu se pohybují do 50 MPa a proto mostní beton považujeme za běžný beton.

Tab. 2-1 Doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu dle ČSN EN 206-1 [2-1].

	Stupně vlivu prostředí			
	Působení a mrazu a rozmrazování			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Maximální vodní součinitel [-]	0,55	0,55	0,5	0,45
Minimální pevnostní třída	C 30/37	C 25/30	C 30/39	C 30/40
Minimální obsah cementu [kg.m ⁻³]	300	300	320	340
Minimální provzdušnění [%]	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}
Jiné požadavky	kamenivo dle normy prEN 126:2000			
a) Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet ve srovnání s betonem u kterého byla prokázána odolnost proti mrazu a rozmrazování, pro příslušný stupeň vlivu prostředí.				

Zvláštní případ u mostního betonu jsou prefabrikované dílce. Složení betonu pro výrobu předepnutých nosníků je koncipováno tak, aby beton dosáhl velkých pevností a zejména modulu pružnosti už při raných stádiích, kdy je třeba nosník odformovat, předepnout a vyskladnit. Tím, že priorita je vysoká pevnost a tuhost v raném stádiu, není problém

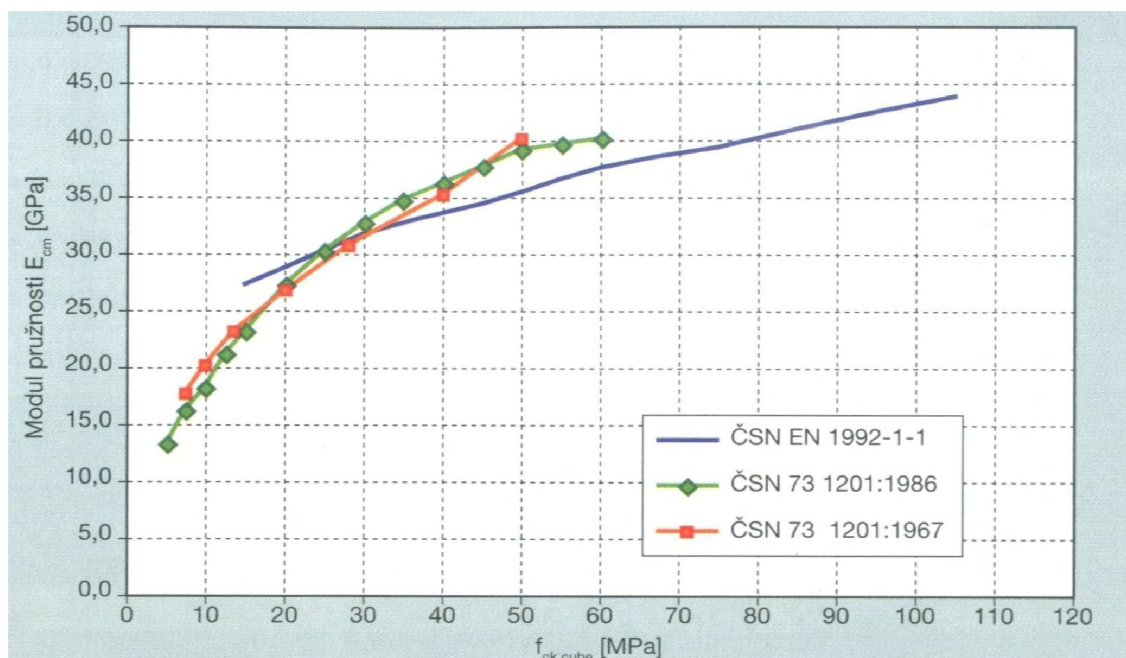
2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti

dosáhnout předepsaných hodnot po 28 dnech. Naopak i když je beton prefabrikátu po 28 dnech zatříděn do určité třídy, jeho pevnost dále stoupá a má potenciál být zatříděn do vyšších tříd.

2.1.3 Současné požadavky na modul pružnosti

Zajímavé je sledovat požadavky na modul pružnosti betonu v poslední době. Trendem je zvyšovat pevnost konstrukčního betonu. Paradoxem je, že požadavky, které na modul pružnosti vyšších pevnostních tříd normy kladou, klesají.

Tento trend je vidět na následujícím grafu (Graf. 2-1), kde jsou srovnány moduly pružnosti betonu vypočtené podle normy ČSN EN 1992-1-1, ČSN 73 1201:1986 a ČSN 73 1201:1967.



Graf 2-1 Srovnání nároků na modul pružnosti dle jednotlivých norem [2-7].

V normě ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2) je modul pružnosti definován jako sečnová hodnota mezi napětím $\sigma_c=0$ a pevností betonu $0,4 f_{cm}$. Takto vypočtený modul pružnosti je možné použít pro běžné výpočty. U konstrukcí citlivých na deformace se stanovují normové hodnoty E_{cm} přesněji ze vztahu (1).

$$E_m = 22 (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (1)$$

f_{cm} charakteristická válcová pevnost v tlaku, zvýšená o 8 MPa [3-1]

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti

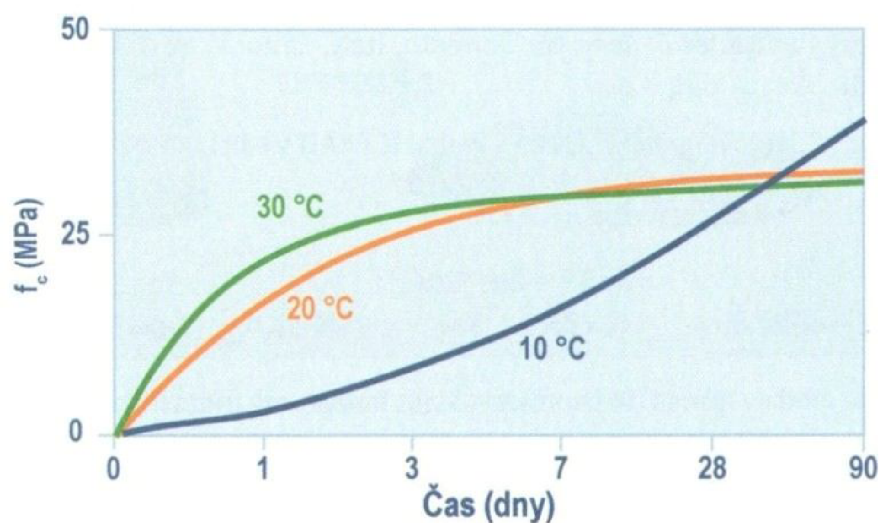
V následující tabulce (Tab. 2-2) jsou pro srovnání uvedeny hodnoty modulu pružnosti, požadované dle normy ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2) [2-2] a normy ČSN 73 1201 [2-7].

Tab. 2-2 Požadované hodnoty modulu pružnosti dle třídy betonu [1-8].

Eurokód 2	Třída betonu								
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
ČSN 73 1201	B15	B20	B25	B30	-	B45	B50	B55	B60
E_c podle Eurokód 2 [kPa]	26 000	27 500	29 000	30 500	32 000	33 500	35 000	36 000	37 000
E_b podle ČSN 73 1201 [kPa]	23 000	27 000	30 000	32 500	-	37 500	39 000	39 500	40 000

2.2 Vývoj pevnosti betonu v tlaku v čase

Teplota je významný faktor ve vývoji pevnosti betonu, obzvláště v počátečních stádiích. Norma ČSN EN 197-1 [2-8] pro stanovení pevnostní třídy cementu a norma ČSN EN 206-1 [2-1] pro určení pevnostní třídy betonu definují pro měření těchto vlastností teplotu 20°C. Podmínka byla zavedena právě kvůli značnému vlivu teploty na pevnost cementu i betonu. V praxi je však beton zpracováván při různých teplotách. Proto je velmi důležité znát vztahy mezi normovou pevností při 20°C s pevnostmi, stanovených při aktuálních teplotách. V následujícím grafu (Graf 2-2) je znázorněn přibližný vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na čase a teplotě ošetřování.

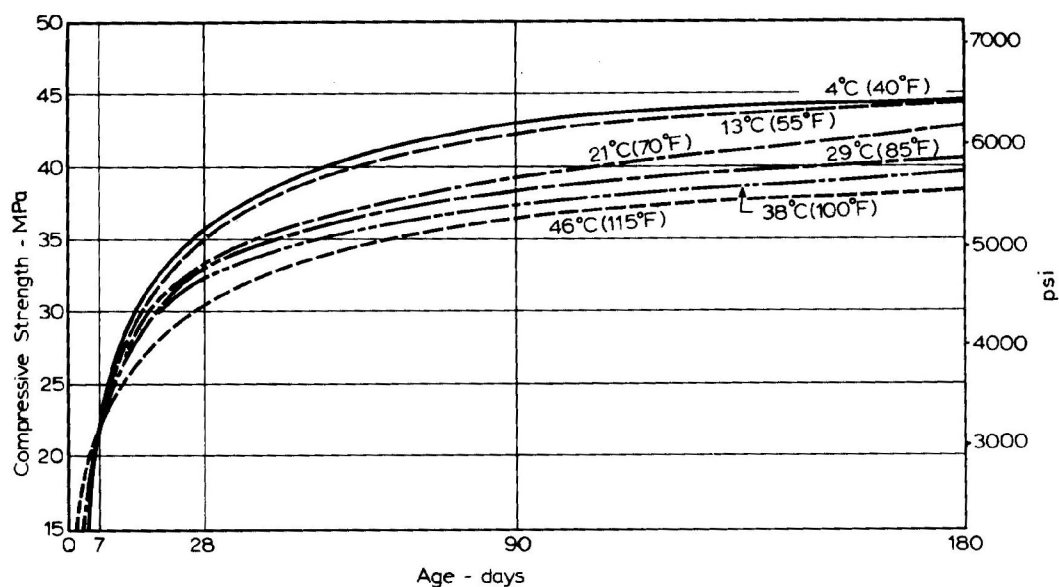


Graf 2-2 Vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na čase a teplotě ošetřování [1-2]

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti

Pevnost betonu v krátkodobém horizontu (1 až 2 měsíce) je výrazně nižší u betonu ošetřovaného při nižší teplotě (10°C). V dlouhodobém horizontu má však pevnost betonu ošetřovaného při nižších teplotách potenciálně růst více než u betonů ošetřovaných při teplotách vyšších (20-30°C). V krátkodobém horizontu však betony ošetřované při vyšších teplotách dosahují vyšších pevností. Menší počáteční teploty způsobí menší rychlosti chemických reakcí. Rychlost hydratace je při menších teplotách také zpomalená. Tento fakt paradoxně způsobí v pozdějších stádiích vyšší dosaženou pevnost. Chemické vazby totiž vzniknou pomaleji, jsou však kvalitnější. 28 denní pevnost betonu měřená při nižších teplotách ani pevnost měřená při vyšších teplotách se příliš neliší od pevnosti naměřené ve 20°C [1-2].

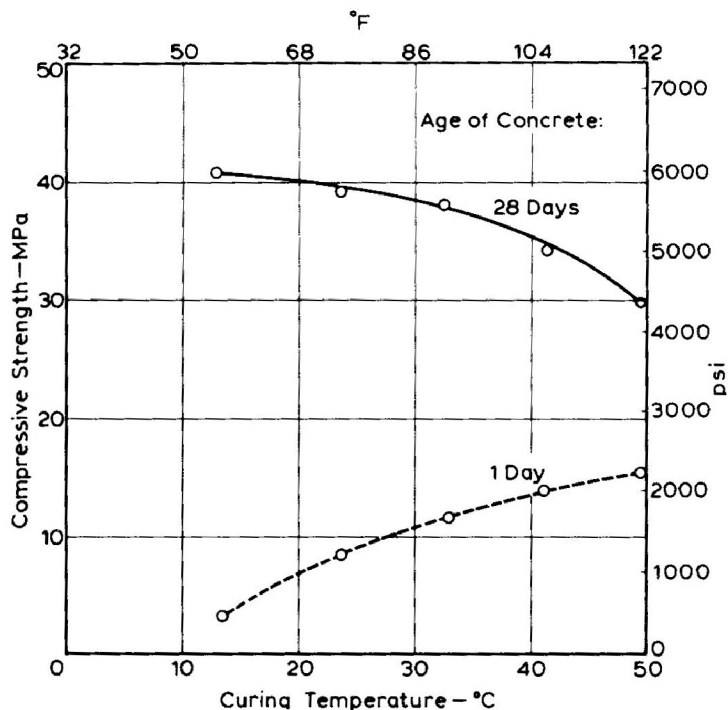
Podobný vývoj pevnosti betonu v tlaku můžeme pozorovat níže (viz. Graf 2-3). Můžeme zde pozorovat vývoj při vyšších teplotách než je 40°C. Je zřetelné, že při vyšší teplotě počáteční pevnosti rostou velmi rychle, ovšem dlouhodobé pevnosti jsou znatelně nižší než při nižší teplotě [1-3].



Graf 2-3 Vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na čase a teplotě ošetřování [1-3].

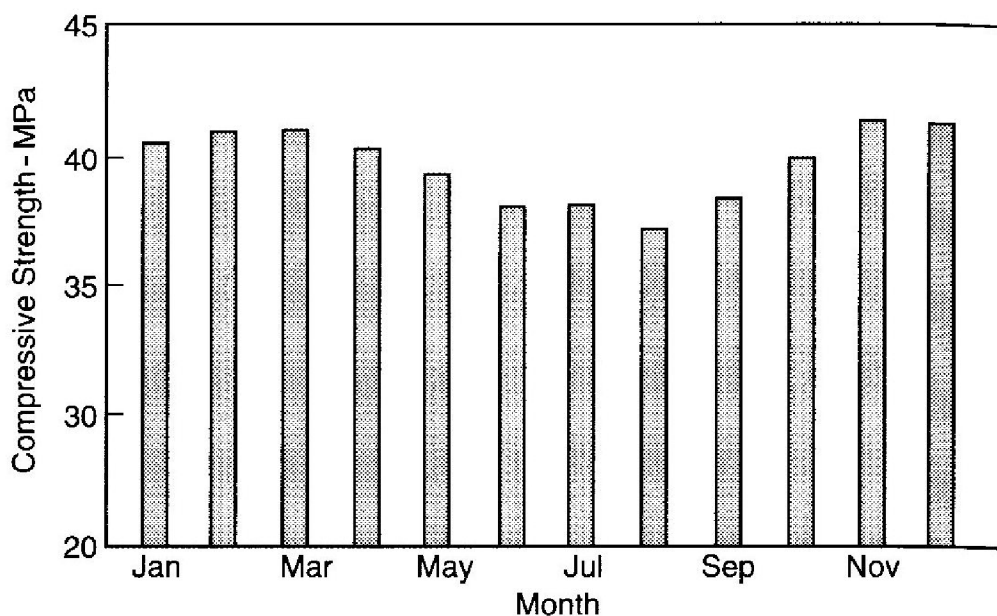
Následující graf (Graf. 2-4) je zaměřen právě na ilustraci tohoto jevu. Se vzrůstající teplotou ošetřování se krátkodobé (jednodenní) pevnosti betonu v tlaku zvyšují. Čím více jsou ovšem počáteční teploty vyšší, tím menší jsou pevnosti po 28 dnech [1-3].

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti



Graf 2-4 Závislost pevnosti betonu v tlaku na teplotě ošetřování [1-3]

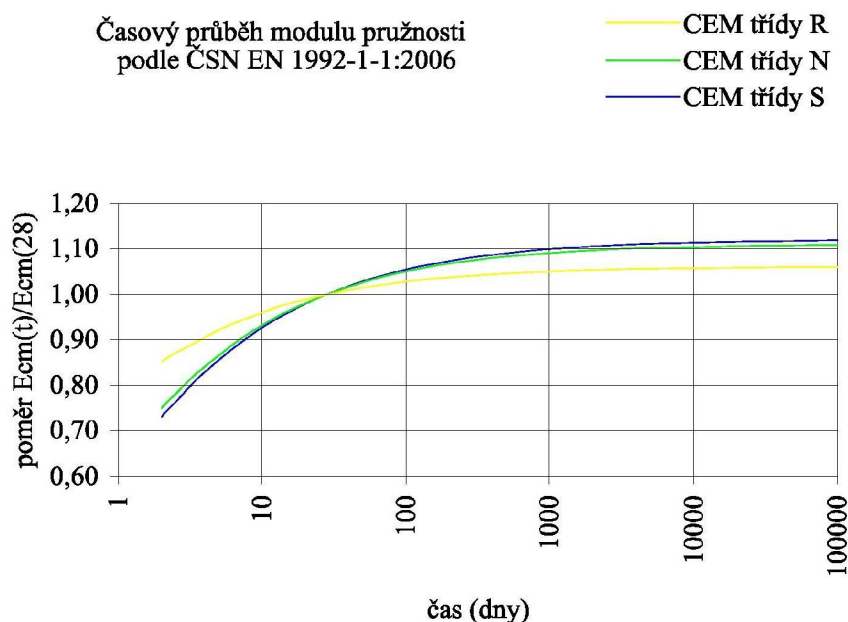
Velmi zajímavé srovnání 28 denních pevností dostaneme při teplotách, které odpovídají průměrným měsíčním teplotám v roce (viz Graf. 2-5). Je zřejmé, že z hlediska dosažení vysoké pevnosti v tlaku (po více než 28 dnech) se jeví nejpříhodnější doba pro betonáž na jaře a na podzim. Je zajímavé, že při dodržení určitých podmínek (viz. norma ČSN EN 206-1 [2-1]) je příhodnější doba pro betonáž v zimě, než v létě [1-3].



Graf 2-5 Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech odpovídající průměrným měsíčním teplotám [1-3].

2.3 Vývoj modulu pružnosti betonu v čase

Vývoj modulu pružnosti betonu v čase a zejména vliv počátečních podmínek na hodnoty modulu se v současnosti dostává do popředí zájmu. Zdánlivá analogie mezi nárůstem pevnosti betonu v tlaku a jeho modulem pružnosti je zřetelná dle tvaru křivky v následujícím grafu (Graf. 2-6). Graf byl sestaven pro různé typy cementu, použité pro výrobu zkoušené betonové směsi [3-2].



Graf 2-6 Vývoj poměru modulu pružnosti, měnícího se v čase a modulu pružnosti betonu po 28 dnech v závislosti na čase a typu cementu [3-2]

Podle normy ČSN EN 1992-1-1 [2-2] lze nárůst modulu pružnosti v čase odhadnout podle vztahu (2). Hodnota pevnosti betonu v čase $f_{cm(t)}$ (3) se vyjádří pomocí součinitele β_{cc} (4).

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

E_{cm} modul pružnosti betonu po 28 dnech

f_{cm} pevnost beton v tlaku po 28 dnech

$E_{cm}(t), f_{cm}(t)$ hodnoty v čase t

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (3)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s \cdot \left[1 - (28/t)^{1/2}\right]\right\} \quad (4)$$

t stáří betonu ve dnech

s koeficient dle použitého cementu

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti

Vztah mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti

Vzhledem ke znalostem vývoje pevnosti betonu v tlaku při různých teplotách a jiných působících vlivů se nabízí možnost přepočítat pevnost v tlaku na modul pružnosti. Jelikož se jedná o dvě různé veličiny, nejedná se o jednoduchý úkol. Modul pružnosti může být vyjádřen podle vztahu (5).

$$E = K_E \cdot f_c^{0,5} \quad (5)$$

f_c pevnost betonu v tlaku

K_E konstanta závisící na způsobu měření pevnosti v tlaku a na počátečním modulem pružnosti

Předchozí vztah má však pouze orientační charakter. Bere totiž v potaz jen závislost na pevnosti v tlaku. Modul pružnosti ale závisí také na dávce tužší složky (kameniva) a přetvárnější složky (cementové pasty). Lze tvrdit, že čím více bude beton obsahovat tužší složky, tím bude vyšší modul pružnosti betonu a naopak. Dále je třeba uvážit vznik mikrotrhlin, které velmi ovlivňují modul pružnosti. Někteří autoři se také domnívají, že superplastifikátory mohou snižovat modul pružnosti (nepřímo ho však zvyšují).

Pro efektivnější výpočet modulu pružnosti lze použít následujících dvou rovnic, výpočet je však stále jen přibližný. Rovnice (6) je založena na teorii kompozitního působení, kde obě složky (kamenivo i cementová pasta) podléhají stejnému napětí, zatímco rovnice (7) odpovídá modelu, kde se předpokládá stejná deformace obou složek. Graficky je tato závislost přibližně naznačena v Grafu 2-6 [1-2].

$$\frac{1}{E_c} = V_a \cdot \frac{1}{E_a} + V_p \cdot \frac{1}{E_p} = \frac{V_a}{E_a} + \frac{1-V_a}{E_p} \quad (6)$$

$$E_c = V_a \cdot E_a + V_p \cdot E_p = V_a \cdot E_a + (1-V_a) \cdot E_p \quad (7)$$

E_c modul pružnosti betonu

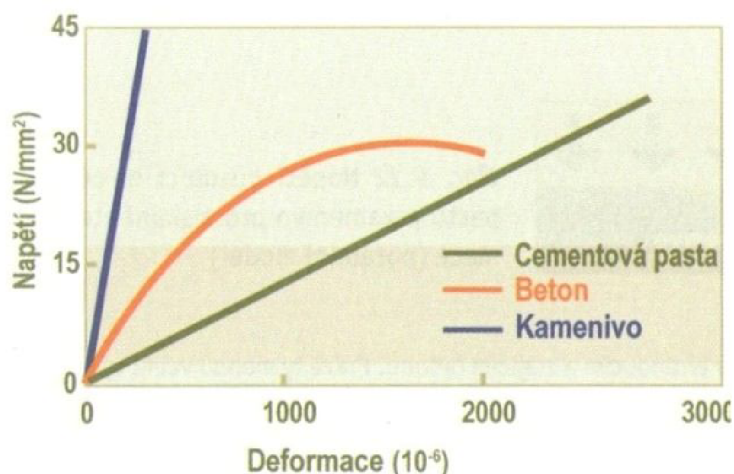
E_a modul pružnosti kameniva

E_p modul pružnosti cementové pasty

V_a objem kameniva

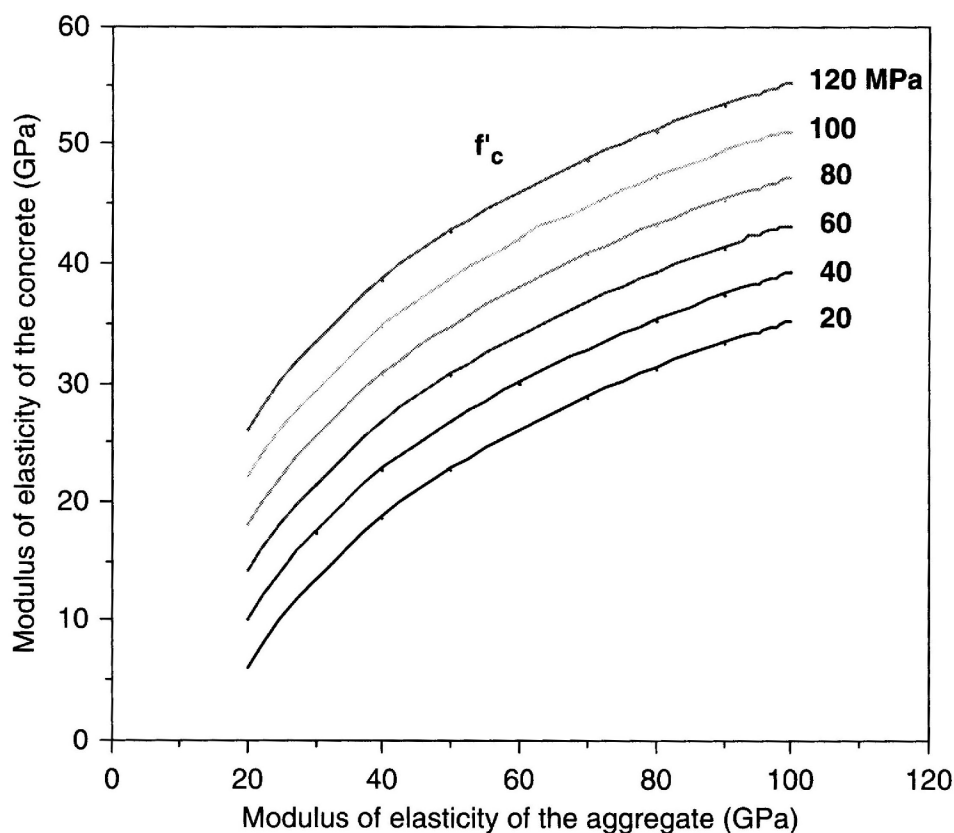
V_p objem cementové pasty

2 Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti



Graf 2-7 Grafické znázornění průběhu deformace jednotlivých složek v betonu při rostoucím napětí [1-2]

Z Grafu 2-7 je zřetelné, že markantní podíl na výsledném modulu pružnosti betonu má použitý druh kameniva. V dalším grafu (Graf. 2-8) je patrná závislost modulu pružnosti betonu na modulu pružnosti použitého kameniva při různých pevnostech betonu v tlaku [1-4].



Graf 2-8 Závislost modulu pružnosti betonu a kameniva při různých pevnostech betonu v tlaku [1-4].

3 VLIV POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK NA PEVNOST V TLAKU A MODUL PRUŽNOSTI

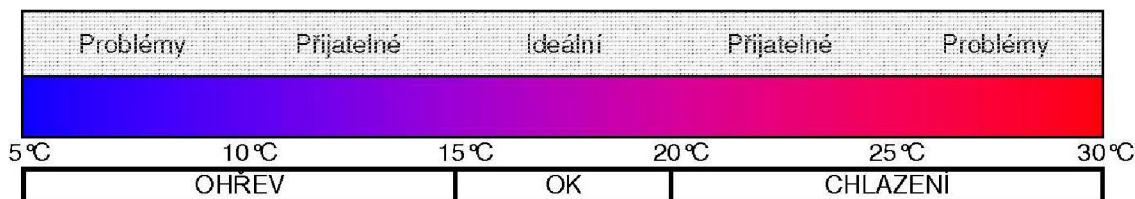
3.1 Tuhnutí a tvrdnutí betonu

Při smíchání cementu s vodou začíná beton tuhnout. Při procesu hydratace čerstvý beton rychle houstne a stává se nepoddajným, čili tuhne. Po určitém čase čerstvý beton ztvdne. Proces hydratace však nekončí a beton tvrdne další dny, měsíce i roky. Ze stavebního hlediska je důležitý počátek a konec tuhnutí i tvrdnutí. Tyto veličiny se stanovují pomocí Vicatova přístroje. V souladu s normou EN 196-3:2005 je pro měření počátku tuhnutí třeba připravit kaši normální hustoty. Touto kaší se naplní objímka Vicatova přístroje a zaznamená se čas smíchání cementu s vodou. Poté je do objímky se směsí vtlačována normová jehla. Počátek tuhnutí je stanoven jako doba kdy se vtlačovaná jehla zastaví 6 ± 3 mm ode dna objímky. Konec tuhnutí není normami předepsán, ale uvažuje se doba, kdy jehla pronikne 0,5 mm do pasty. Pro cementy do třídy 42,5 musí počátek tuhnutí nastat nejméně do 60 minut, pro vyšší třídy do 45 minut. Návrhová pevnost betonu je dosažena po 28 dnech, teoreticky však beton tvrdne dále celou svojí životnost [2-3].

3.2 Betonáž při extrémních teplotách

Regulace teploty čerstvého betonu je velmi důležitá u běžných betonů a zvláště u betonů vysokohodnotných či vysokopevnostních. Teplota zásadním způsobem ovlivňuje reologii betonu. Při dostatečně vysoké teplotě směsi (řekněme 25 °C) se urychluje hydratace a je velmi obtížné dosáhnout požadované zpracovatelnosti. V teplém betonu je navíc obtížné udržovat požadované provzdušnění. Pokud je na druhé straně teplota betonu nízká (řekněme 10°C) dochází ke zpomalení hydratace i k menší účinnosti plastifikátoru, či superplastifikátoru. Důsledky mohou znamenat nedostatečnou počáteční pevnost betonu a nedostatečnou zpracovatelnost betonu vlivem příliš vysoké viskozity plastifikátoru. Jako ideální teplota čerstvého betonu se tedy jeví 15-20°C (viz. Obr. 3-1) [1-1].

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti



Obr. 3-1 Ideální teplota čerstvého betonu

3.2.1 Opatření pro betonování při nízkých teplotách

S problémem příliš studeného čerstvého betonu se můžeme setkat zejména v zimních měsících, kdy je třeba odformovat betonový prvek, který musí dosáhnout určitých pevností, aby bylo možné formu co nejdříve znovu použít. Tento problém je celkem jednoduché řešit ohřevem záměsové vody do betonu. Pokud toto opatření není dostačující, lze problém řešit párou předehříváním kamenivem. Při předehřívání kameniva je však nutné sledovat vlhkost kameniva, abychom dodrželi požadovanou recepturu.

Je nutné docílit takové teploty čerstvého betonu, aby se při transportu nesnížila pod požadovanou hodnotu. Jakmile je beton uložen do bednění, nastartuje se proces hydratace a není nutné zavádět další opatření ohledně teploty. Při hydrataci se totiž vyvine dostatek tepla na to, aby zabránilo škodlivým účinkům nízkých teplot. Problematické případy mohou nastat pokud je beton ukládán do ocelových forem při velmi nízkých teplotách nebo pokud se betonuje tenká deska. V těchto případech by nemuselo dojít k nastartování hydratace. Pro zabránění těchto rizik lze využít tepelně izolovaného bednění [1-1].

Dle normy ČSN EN 206-1 nesmí být teplota čerstvého betonu v době dodávání menší než +5°C. Pokud se požaduje jiná minimální teplota betonu nebo maximální teplota betonu, musí být uvedena s dovolenými odchylkami. Jakýkoliv požadavek na umělé ochlazování nebo oteplování betonu před jeho dodáním musí být odsouhlasen předem mezi výrobcem a dodavatelem [2-1].

Norma ČSN EN 13670 říká, že teplota povrchu betonu nesmí klesnout pod 0°C dokud pevnost betonu v tlaku nedosáhne alespoň 5 MPa. Teplota uvnitř betonované části, vystavené vlhkému nebo střídavě vlhkému prostředí, nemá přestoupit hodnotu 70°C [2-9].

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti

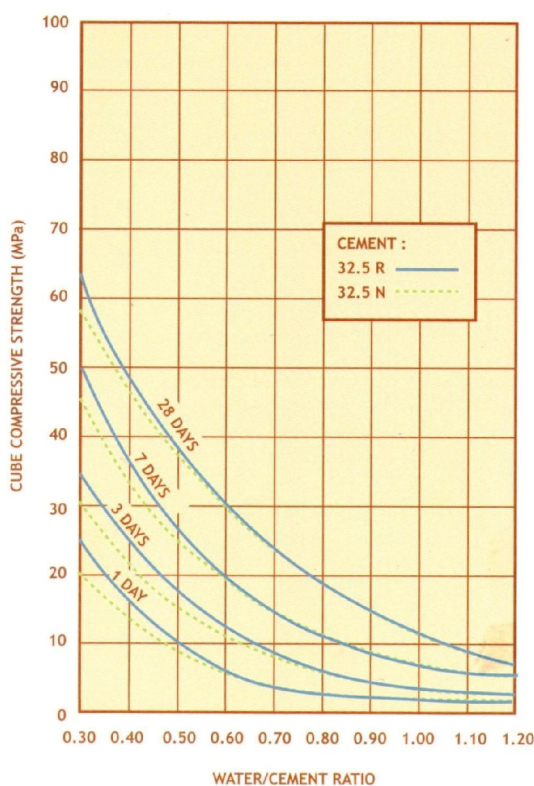
3.2.2 Opatření pro betonování při vyšších teplotách

V případě rizika zahřátí betonu na příliš vysokou teplotu je zejména v letním měsících předepisována maximální teplota čerstvého betonu. Ke snížení teploty čerstvého betonu je používána vychlazená voda, kdy je možné dosáhnout výsledné teploty betonu kolem 20°C. Pokud toto opatření není dostačující je možné použít ledové tříště. Další možností je přidávání tekutého dusíku. Vysoké a nízké teploty jsou nežádoucí a opatření k jejich regulaci vedou ke zvýšení ceny [1-1].

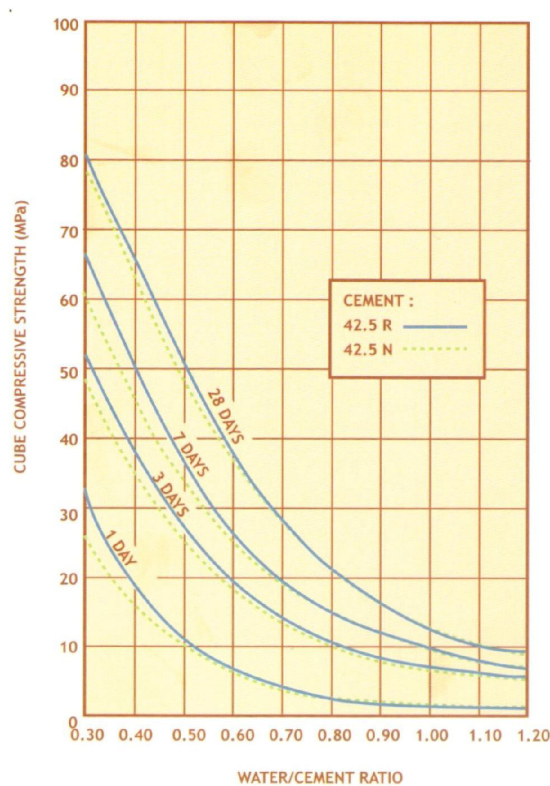
3.3 Vnitřní vlivy působící na beton v počáteční fázi tvrdnutí

3.3.1 Druh a způsob výroby cementu

Cement, jako hlavní složka betonu, bezpochyby ovlivní průběh nárůstu pevnosti v tlaku i modulu pružnosti v čase. Rozhodujícími parametry jsou pevnostní třída cementu a jemnost mletí cementu. V následujících grafech (Graf 3-1a, 3-1b a 3-1c) můžeme porovnat nárůst pevností cementů pevnostních tříd 32,5; 42,5 a 52,5 (s normálním i rychlým nárůstem počátečních pevností) v závislosti na vodním součiniteli čerstvého betonu.



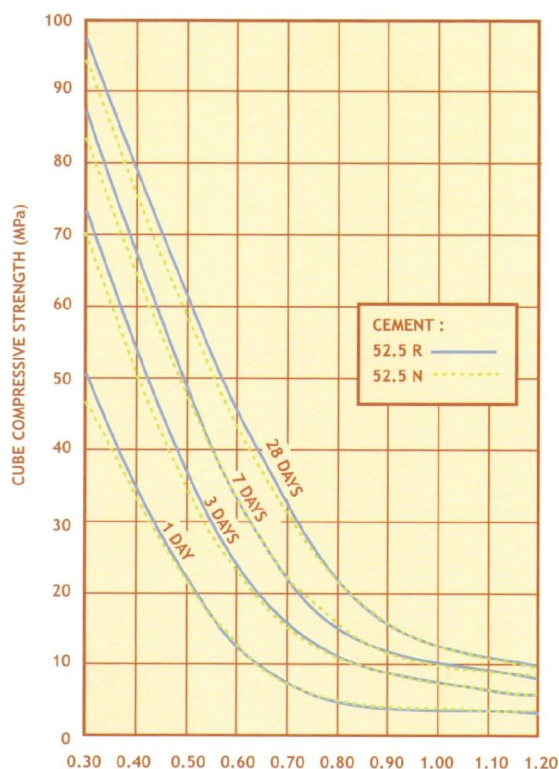
Graf 3-1a Vývoj pevnosti cementu v tlaku třída 32,5 [1-5].



Graf 3-1b Vývoj pevnosti cementu v tlaku třída 42,5 [1-5].

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti

Z grafů je patrné, že se zvyšující se pevnostní třídou cementu a snižujícím se vodním součinitelem dochází k prudkému nárůstu pevnosti betonu v tlaku. Při použití cementu s rychlými počátečními pevnostmi (R) se počáteční pevnosti skutečně navýší, faktem je, že k navýšení dojde o ne více než 5 MPa. U cementů nižší třídy je tento nárůst relativně větší než u cementu třídy vyšší. Příspěvek cementu typu R se projeví zejména v prvních sedmi dnech [1-5].



Graf 3-1c Vývoj pevnosti cementu v tlaku
třída 52,5 [1-5].

3.3.2 Přísady a příměsi ovlivňující tuhnutí a zpracování betonu

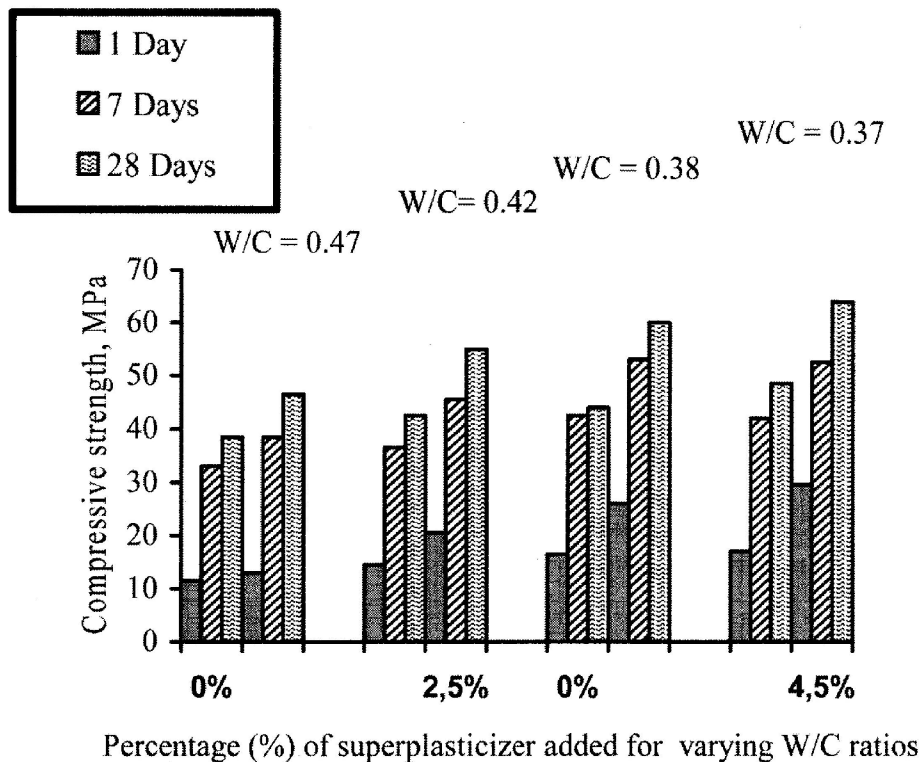
Plastifikátory a superplastifikátory

V současnosti jsou hojně užívány přísady do betonu ve snaze ovlivnit počáteční vlastnosti čerstvého betonu. Klíčové pro kvalitu betonu je udržení nízkého vodního součinitele tak, aby nedošlo k problémům se zpracováním. K tomuto účelu složí plastifikátory a superplastifikátory. Tyto přísady se naváží na povrch částic cementu a předají negativní náboj na povrch zrna, čímž dojde k elektrostatickému odpuzování a deflokulaci, voda se uvolňuje mezi zrníčka a pohyblivost roste.

Superplastifikátory nové generace na bázi polykarboxylátů jsou schopny sterického odpuzování. Sterické odpuzování je mechanismus, při kterém jsou na hlavních řetězcích molekul těchto látek navázány boční řetězce různé délky, které od sebe cementové částice fyzicky oddělují a umožňují tak vodě obklopit větší podíl povrchu zrn. Pomocí úprav délky hlavního řetězce, délky a hustoty každého z bočních řetězců je možné významně pozměnit vlastnosti čerstvého betonu vhodným směrem. Například regulovat tuhnutí nebo dobu udržení konzistence v delším čase [1-7].

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti

V následujícím grafu (Graf 3-2) lze pozorovat vývoj pevnosti v tlaku betonu v různých stádiích tuhnutí, v závislosti na velikosti vodního součinitele a množství superplastifikátoru.



Graf 3-2 Porovnání pevnosti v tlaku betonů různého stáří, velikosti vodního součinitele a dávkování superplastifikátoru [1-6].

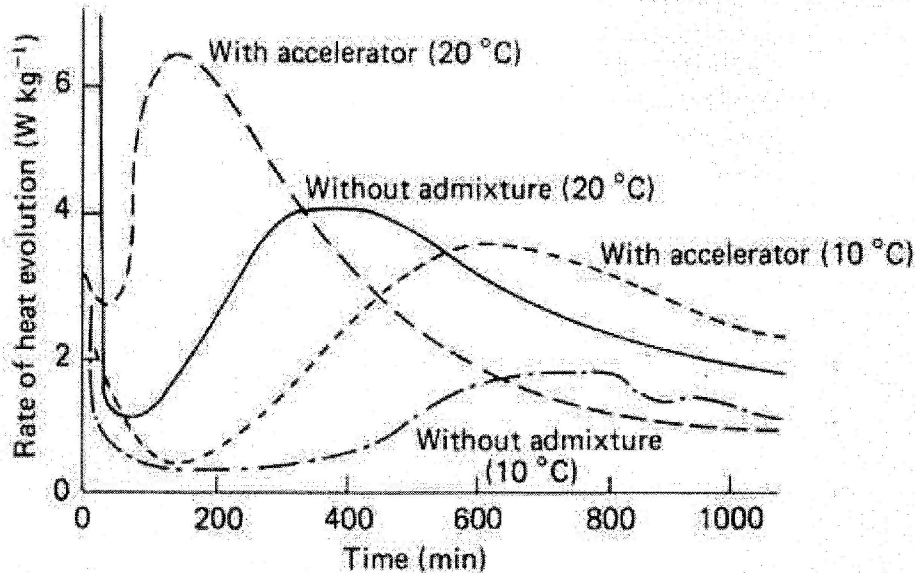
Z Grafu 3-2 je patrné, že použití superplastifikátoru má za následek možnost snížení vodního součinitele při zachování dobré zpracovatelnosti. Dobrá zpracovatelnost umožní lepší promísení složek, a proto je při jeho použití docíleno větších pevností v tlaku. Někteří autoři tvrdí, že použití superplastifikátoru může snížit modul pružnosti betonu. Tyto názory ovšem nejsou dostatečně podloženy. Dalším argumentem pro jeho prospěšnost je fakt, že superplastifikátor nepřímo modul pružnosti zvyšuje [1-6].

Přísady a příměsi ovlivňující rychlost tuhnutí a tvrdnutí

Existuje celá řada výrobků, které jsou určeny jako přísada ovlivňující rychlost tuhnutí a tvrdnutí betonu. Přísady, které zvyšují rychlost tuhnutí zároveň zvyšují hydratační teplo, jsou užitečné pro betonáž při nízkých teplotách tak, aby došlo ke včasnému nastartování procesu hydratace a beton nezmrzl. Pro betonáž při vysokých teplotách, zvláště u masivních betonových prvků je důležité aby nedocházelo k prudkému nárůstu hydratačního tepla a nedošlo ke „spálení“ betonu. Pro tyto účely

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti

jsou k dispozici přísady, které zpomalí průběh hydratace tak, aby nedocházelo k rapidnímu nárůstu hydratačního tepla. V následujícím grafu (Graf 3-3) můžeme pozorovat nárůst hydratačního tepla v závislosti na čase, teplotě okolí a použití přísady.



Graf 3-3 Nárůst hydratačního tepla v závislosti na čase a použití příměsi [1-6].

Je patrné, že vyšší teplota betonáže společně s použitím urychlovače tuhnutí má za následek prudký nárůst hydratačního tepla v prvních třech hodinách. Rychlost nárůstu hydratačního tepla je velmi citlivá na teplotu betonáže a to i při použití urychlovače tuhnutí [1-6].

3.4 Vnější vlivy působící na beton v počáteční fázi tuhnutí

3.4.1 Vliv teploty

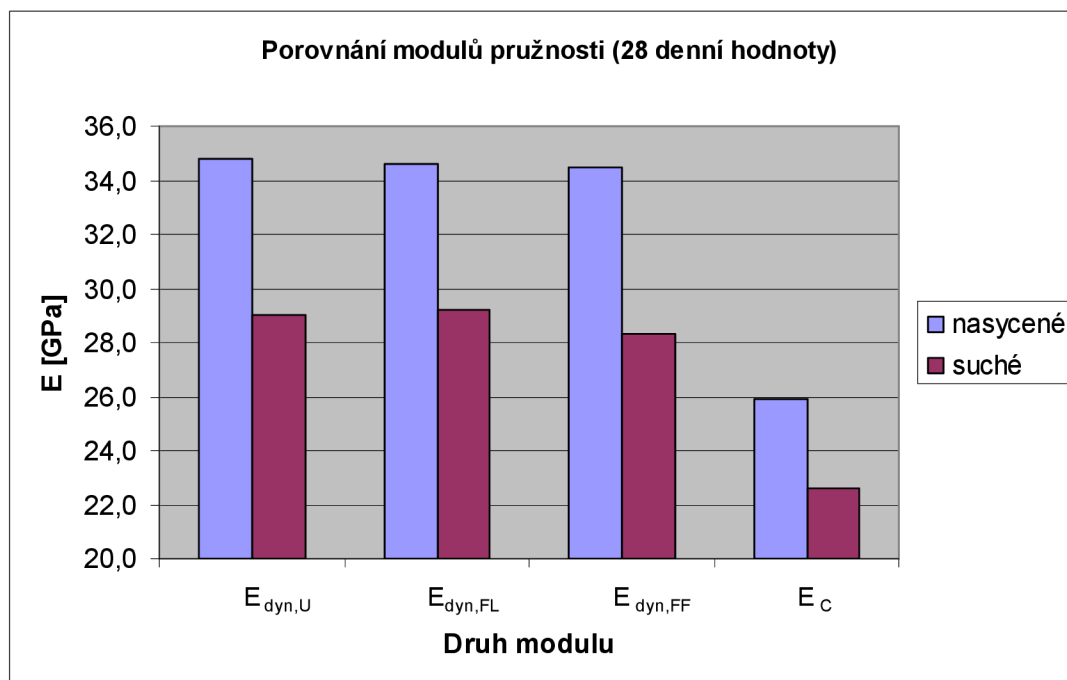
Počáteční vliv teploty na modul pružnosti i pevnost betonu v tlaku patří zřejmě mezi nejvýznamnější vnější vlivy. Proto bude vlivu teploty věnována experimentální část této bakalářské práce.

3.4.2 Způsob ošetřování betonu

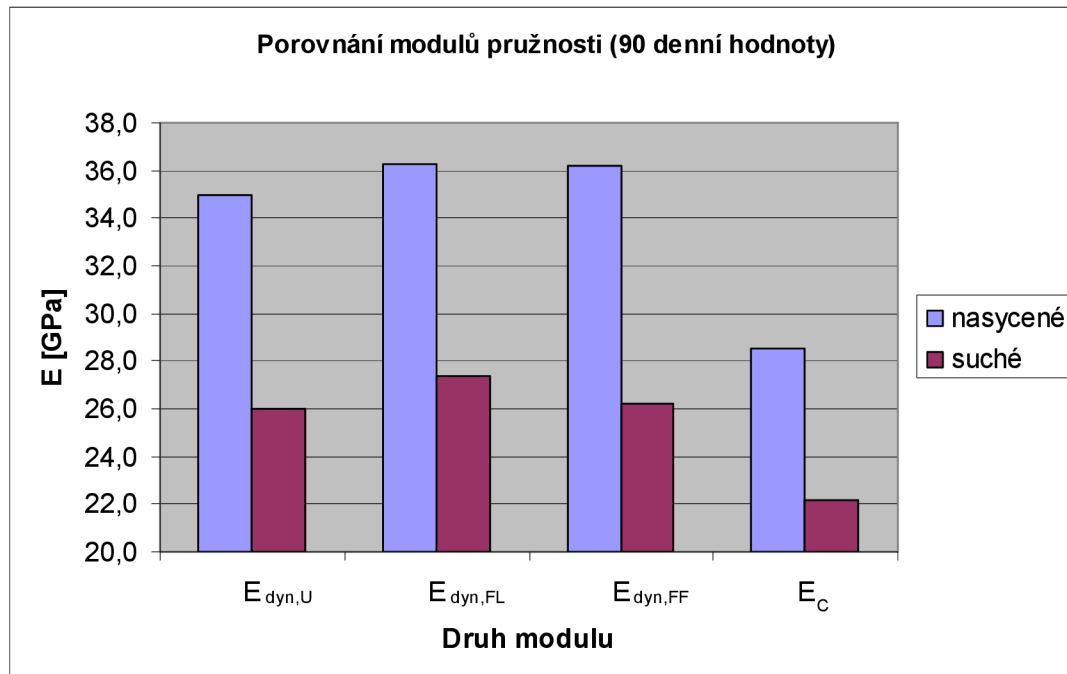
Způsob ošetřování betonu, tedy ošetřování betonu vodou, je velmi důležitou součástí procesu zrání betonu. Špatné počáteční ošetřování má velké důsledky na modul pružnosti, potažmo pevnost betonu v tlaku. Čím více je beton nasycený vodou, tím jeho modul pružnosti v čase roste. Srovnání modulů pružnosti je naznačeno na následujícím grafu (Graf 3-4) 28 denních hodnot modulů pružnosti, zkoušeného provzdušněného betonu. K zajímavému zjištění docházíme při porovnání výsledků 90 denních hodnot

3 Vliv počátečních podmínek na pevnost v tlaku a modul pružnosti

modulů pružnosti. U betonu nasyceného vodou modul pružnosti stále roste, u suchého betonu modul pružnosti dokonce i klesá (viz. Graf 3-5) [3-3].



Graf 3-4 Porovnání modulů pružnosti betonu nasyceného vodou s betonem neošetřovaným (28 denní hodnoty) [3-3].



Graf 3-5 Porovnání modulů pružnosti betonu nasyceného vodou s betonem neošetřovaným (90 denní hodnoty) [3-3].

4 ZKOUŠENÍ BETONU

4.1 Obecný popis pevnosti v tlaku a modulu pružnosti

Pevnost betonu je velikost napětí dosaženého v místě porušení, při zániku celistvosti betonu. Rozlišujeme pevnost betonu v tahu a v tlaku. Dále rozdělujeme pevnost betonu v tlaku na pevnost válcovou a krychelnou podle tvaru zkoušeného tělesa [4-1].

Modul pružnosti E je významná pružnostní charakteristika, vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Zjednodušeně můžeme o této deformační charakteristice tvrdit, že čím je vyšší hodnota modulu pružnosti, tím menší lze očekávat deformace materiálu, potažmo deformace konstrukce. Pokud na těleso působíme silou, vyvoláváme v něm napětí. Toto napětí vyvolá deformaci (změnu rozměrů). Jedná-li se o sílu tlakovou, těleso se v jejím směru zkracuje, jedná-li se o sílu tahovou, těleso se prodlužuje. Pokud jsou rozměry tělesa po odtížení stejná, jedná se o pružnou deformaci. V případě opačném, tedy přetrvávajících deformací, se jedná o deformaci plastickou [1-8].

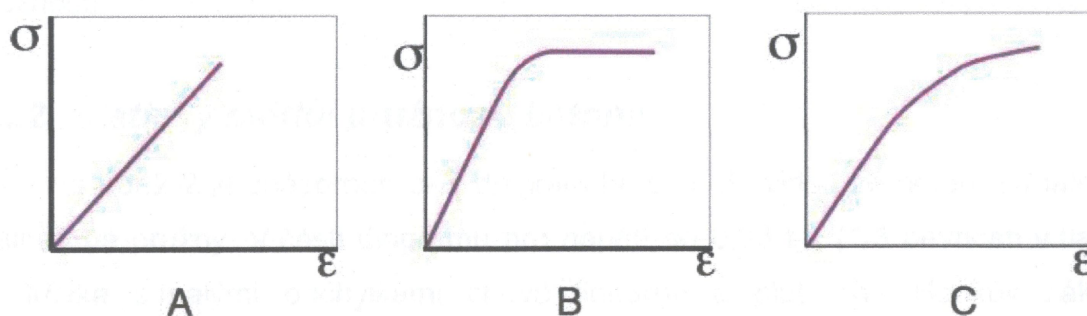
Velikost deformace materiálu se vyjadřuje pomocí poměrného přetvoření ε , což je poměr zdeformovaného rozměru k rozměru původnímu. Pokud je poměrné přetvoření způsobeno tlakovým napětím, mluvíme o poměrném zkrácení, o poměrném prodloužení v případě tahového napětí. Poměrné přetvoření je dáno vztahem (1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

Δl změněná délka tělesa

l_0 původní délka tělesa

Grafické znázornění vztahu mezi poměrným přetvořením a napětím vystihuje σ - ε diagram (deformační diagram). V následujících obrázcích (Obr. 4-1a-c) jsou vyobrazeny deformační diagramy dokonale pružného materiálu (Obr. 4-1a), pružno-elastického materiálu (Obr. 4-1b) a nelineárně pružného materiálu (Obr. 4-1c).



Obr. 4-1 Deformační diagramy a) pružný materiál, b) pružno-elastický materiál, c) nelineárně pružný materiál [1-8].

Modul pružnosti se zjišťuje z deformací, které nastávají při známém zatížení, na základě Hookeova zákona. Platí, že napětí je přímo úměrné poměrnému přetvoření (2) [1-8].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

4.2 Stanovení statického modulu pružnosti

Dle normy ČSN ISO 6784 [2-4] se statický modul pružnosti v tlaku E_c (stanovený jako sečnový modul) vypočítá v N/mm^2 ze vztahu (3).

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

$\Delta\sigma$ rozdíl v napětí

$\Delta\varepsilon$ rozdíl v poměrném přetvoření, odpovídající základnímu napětí $0,5 \text{ N/mm}^2$ a hornímu napětí v hodnotě jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku se podle normy ČSN ISO 6784 [2-4] stanoví na třech srovnávacích zkušebních tělesech, která jsou shodná velikostí a tvarem, a která byla vyrobena a ošetřována stejným způsobem jako tělesa, která budou použita pro stanovení statického modulu pružnosti. Jako zkušební tělesa se používají přednostně válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Je možné použít i jiná tělesa, ale jen za předpokladu, že poměr délky L k průměru d je v rozmezí $2 \leq L/d \leq 4$ a průměr d je nejméně čtyřnásobek velikosti největšího kameniva v betonu. Pokud tyto požadavky nemohou být splněny, musí se tato skutečnost uvést ve zprávě o zkoušce [2-4].

Deformační odezvu budeme sledovat při změně napětí v materiálu zkušebního tělesa ze základního napětí σ_b na hodnotu tzv. horního σ_a zatěžovacího napětí. Základní napětí σ_b je vždy rovno $0,5 \text{ N.mm}^{-2}$. Horní napětí σ_a v hodnotě $f_c/3$ vypočteme z pevnosti v tlaku

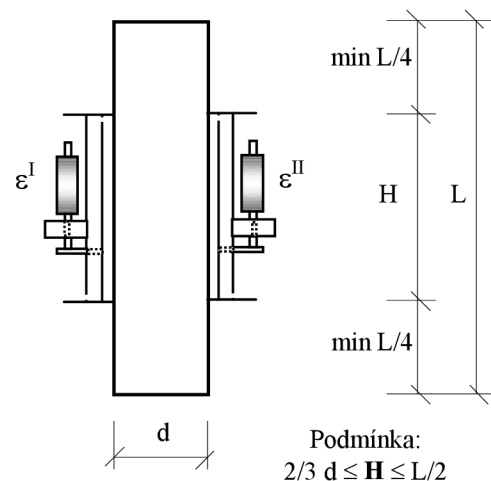
f_c . srovnávacích těles. Z těchto napětí a z vypočtené plochy zkušební tělesa určíme základní sílu F_b a horní zatěžovací sílu F_a , kterou bude třeba vyvinout zkušebním lisem. Z hodnot síly znovu vypočteme skutečné hodnoty základního napětí σ_b a horního napětí σ_a . Pro výpočet sil F_b a F_a použijeme vztahy (4), (5) a (6).

$$F_b = 0,5 \cdot A \quad (4) \qquad F_a = \frac{f_c}{3} \cdot A \quad (5) \qquad \sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

f_c napětí [N.mm⁻²],

A průřezová plocha vzorku [mm²]

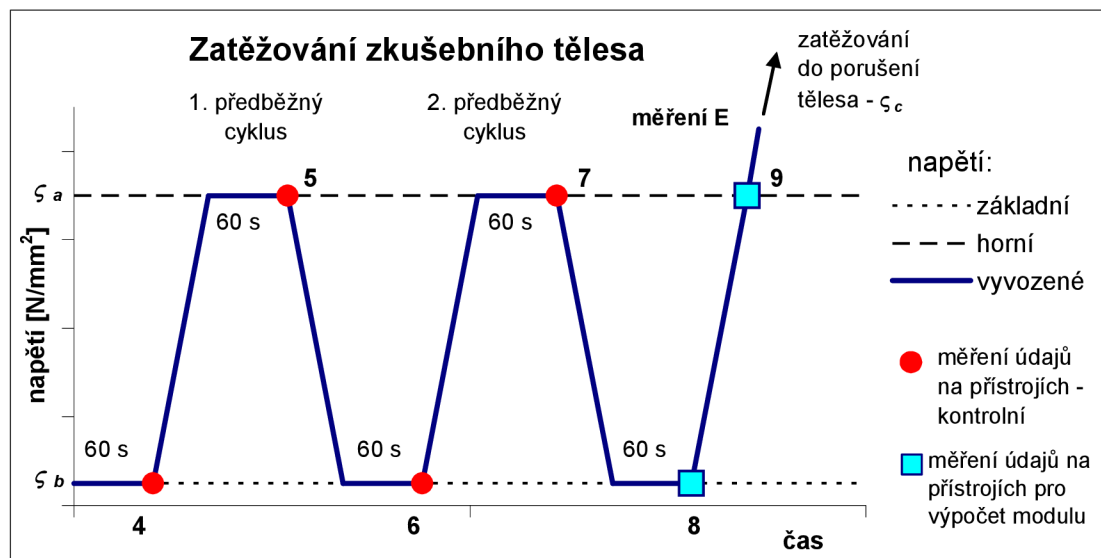
Příprava zkušebních těles pro měření změn délky musí být provedena tak, aby měřené body byly stejně vzdálené od obou konců zkušební tělesa a ve vzdálenosti od jeho konců rovné alespoň jedné čtvrtině délky zkušební tělesa ($1/4 L$). Kvůli přesnosti však má být měřicí základna H co možná nejdelší, rozhodně nesmí být menší než $2/3d$. Přetvoření se musí měřit nejméně na dvou protilehlých stranách zkušební tělesa (viz. Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Měření deformací na zkušebním tělese [1-8].

Před vlastním měřením statického modulu pružnosti je nutné zkušební těleso vycentrovat, tak aby se jednotlivá naměřená poměrná přetvoření nelišila více než o 20% od své průměrné hodnoty. Při našem provedeném experimentu však byl použit lis s patentovanou technologií centrování a bylo tedy možné tento krok vynechat. Po všech zmíněných přípravných pracích se dostáváme k samotnému měření statického modulu pružnosti. Na zkušební těleso s osově osazenými přístroji se vyvodí na 60s základní napětí σ_b 0,5 N.mm⁻² a zaznamenají se údaje na všech přístrojích. Po úspěšném vycentrování tělesa udržujeme po dobu 60 s zatížení na základním napětí σ_b , po přečtení údajů na úchylkoměrech zatížení zvyšujeme plynule do hodnoty horního napětí σ_a , kde po 60 s opět odečteme údaje na všech přístrojích. Tento předběžný cyklus ještě nejméně jednou opakujeme se stejnou rychlostí zatěžování a odtěžování. Po dokončení posledního předběžného zatěžovacího cyklu následuje měřený zatěžovací cyklus. Při měřeném zatěžovacím cyklu vyčkáme 60 s při napětí σ_b a přečteme hodnoty na všech

přístrojích. Zkušební těleso znovu plynule zatížíme na napětí σ_a a tentokrát ihned bez minutové prodlevy přečteme údaje na přístrojích. Po dokončení měření a odstranění měřicích přístrojů zvětšujeme zatížení zkušební tělesa předepsanou rychlostí až do porušení. Celý proces zatěžování je znázorněn na Grafu 4-1. Jestliže se pevnost zkušební tělesa σ_c liší od pevnosti srovnávacích těles f_c o více než 20%, je nutné tuto okolnost uvést v protokolu.



Graf 4-1 Schéma zatěžování zkušební tělesa [1-8].

Vyhodnocení výsledku se provede pomocí vztahu (7) [2-4], [1-8].

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (7)$$

σ_a horní zatěžovací napětí v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$

σ_b základní napětí (tj. $0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním napětí

4.3 Stanovení dynamického modulu pružnosti

Dynamický modul pružnosti se stanovuje pomocí nedestruktivních zkoušek. Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu podle normy ČSN 73 1371 [2-5]. Rezonanční metoda zkoušení betonu podle normy ČSN 73 1372 [2-6]. Modul pružnosti zjištění pomocí nedestruktivních zkoušek není tak výstižný jako z destruktivních zkoušek, výhoda ovšem zůstává právě v nedestruktivním zkoušení.

4.3.1 Stanovení ultrazvukovou impulsovou zkouškou

Zkouška se zakládá na stanovení rychlosti šíření UZ vlnění v betonu. Ze stanovené rychlosti UZ vlnění se určí dynamický modul pružnosti (i jiné fyzikálně mechanické vlastnosti) pomocí odvozeného vztahu (8) mezi rychlostí UZ vlnění a dynamickým modulem pružnosti $E_{dyn,U}$.

$$E_{dyn,U} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (8)$$

ρ objemová hmotnost betonu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

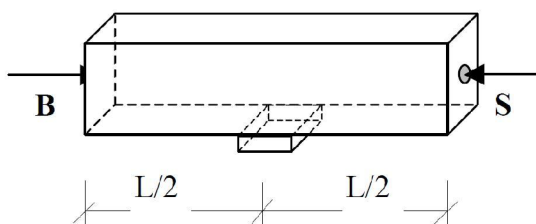
v_L impulsová rychlost podélného UZ vlnění v $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$

k součinitel rozměrnosti prostředí

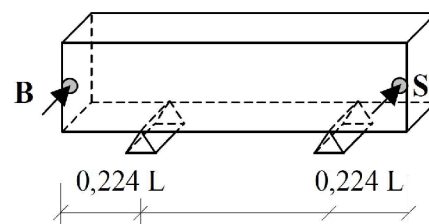
Pozn.: Při stanovení fyzikálně mechanických vlastností betonu je nutno dodržet podmínku, že teplota betonu je v rozmezí 10°C až 30°C [2-5].

4.3.2 Stanovení rezonanční metodou

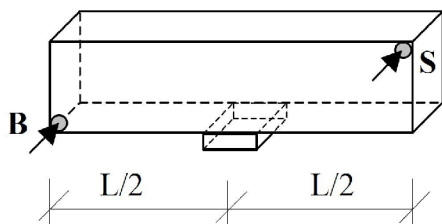
Rezonanční metoda se zakládá na stanovení první vlastní frekvence kmitání zkušebních vzorků. Ze zjištěné první vlastní frekvence a jiných fyzikálních vlastností zkoušených vzorků se určí dynamický modul pružnosti (i jiné fyzikálně mechanické vlastnosti). Zkušební vzorky se uloží na takový podklad, aby neomezoval jeho pohyb a aby vlastní frekvence podložky byla mimo rozsah frekvence zkoušeného vzorku. Na takto připravený vzorek se přiloží snímač a budičem se vyvedí vzruch. Podle polohy snímače a budiče vznikne podélné kmitání (viz. Obr. 4-3), příčné kmitání (viz. Obr. 4-4) nebo kroutivé kmitání (viz. Obr. 4-5).



Obr. 4-3 Podélné kmitání [1-8].



Obr. 4-4 Příčné kmitání [1-8].



Obr. 4-5 *Kroutivé kmitání [1-8].*

Poklepem budiče se zkoušený vzorek rozkmitá. Pomocí snímače se zaznamená frekvence vzorku. Poté se zpětně vyhodnotí první vlastní frekvence, tedy frekvence, kdy je největší amplituda kmitání (rezonance). Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu se určí při znalosti první vlastní frekvence v podélném kmitání zkoušeného vzorku ze vztahu (9).

$$E_{dyn,FL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (9)$$

$E_{dyn,FL}$ dynamický modul pružnosti v tahu nebo tlaku [Pa]

L délka zkoušeného vzorku [m]

f_L první vlastní frekvence zkoušeného vzorku při podélném kmitání [Hz]

ρ objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu se určí při znalosti první vlastní frekvence v příčném kmitání zkoušeného vzorku ze vztahu (10).

$$E_{dyn,FF} = 0,0789 \cdot L^4 \cdot f_f^4 \cdot c_1 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (10)$$

$E_{dyn,FF}$ dynamický modul pružnosti v tahu nebo tlaku [Pa]

L délka zkoušeného vzorku [m]

c_1 korekční součinitel [-]

f_f první vlastní frekvence zkoušeného vzorku při příčném kmitání [Hz]

ρ objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

i poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného vzorku [m]

Pomocí první vlastní frekvence kroutivého kmitání se určí dynamický modul pružnosti ve smyku [1-8, 2-6].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Výroba betonu pro experiment

Experiment spočívá ve zkoušení modulu pružnosti a pevnosti v tlaku betonu v různých stádiích tvrdnutí, při snaze zjistit jakým způsobem tyto fyzikální vlastnosti ovlivňuje teplota. Byla snaha navrhnout recepturu betonu takovou, aby se co nejvíce podobala receptuře, která se běžně používá při výrobě prefabrikovaných předpínaných nosníků. Beton umíchaný dle níže uvedené receptury má velmi rychlý nárůst pevnosti i modulu pružnosti v prvních dnech tuhnutí a tvrdnutí. Pro experiment byla navržena následující receptura betonu:

- Cement I 42,5R Mokrý 450 kg.m⁻³
- Písek Lípa 0/4 mm 690 kg.m⁻³
- Drť Litice 4/8 mm 220 kg.m⁻³
- Drť Litice 8/16 mm 845 kg.m⁻³
- Stachement 2060 4,5 kg.m⁻³
- Voda 170 kg.m⁻³

Beton byl připravován v laboratoři Ústavu zkušebnictví na VUT, fakultě stavební. Z důvodu kapacity chladícího zařízení, do kterého byly formy s čerstvým betonem ukládány, se muselo betonovat po třech etapách. Při každé etapě bylo vyrobeno 12 zkušebních trámů 100 x 100 x 400 mm a 12 krychlí 150 x 150 x 150 mm. Po přesném navážení jednotlivých složek betonu do připravených nádob, byl beton míchán v laboratorní míchačce (viz. Obr. 5-1). Dále byla provedena zkouška sednutí kužele pro kontrolu konzistence (viz. Obr. 5-2). Po naplnění forem a jejich následném zavibrováním byla zkušební tělesa uložena do vlhkého prostředí (viz. Obr. 5-3). Pro zjištění vlivu teploty se část zkušebních těles označila jako referenční a zůstala vystavena teplotě v laboratorním prostředí. Druhá část těles byla uložena do chladicí skříně s konstantní teplotou 10°C (viz. 5-4). Všechna tělesa byla uchovávána ve vlhkém prostředí.



Obr. 5-1 *Míchání betonu v laboratorní míchačce.*



Obr. 5-2 *Zkouška konzistence sednutím kužele.*



Obr. 5-3 Plnění forem betonem s následným vibrováním.



Obr. 5-4 Zkušební tělesa, uložená v chladicí skříni.

5.2 Zkoušení n-denních těles

Jak již bylo zmíněno, zkušební tělesa byla betonována po třech betonážích. První sada těles se vybetonovala a následovně zkoušela v červnu 2011 a druhá v červenci 2011. Poslední sada byla betonována v listopadu 2011, tato sada však byla vyřazena z důvodu použití vadného superplastifikátoru, což mělo za následek nežádoucí provzdušnění zkoušeného betonu. Třetí sada tedy byla dobetonována v lednu 2012.

Na každé sadě byla u každého zkušebního tělesa zjištěna hmotnost a jeho přesné rozměry. Na zkušebních krychlich byla stanovena pevnost v tlaku. U zkušebních trámčů byly provedeny následující zkoušky:

- stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou přístrojem TICO, dle normy ČSN 73 1371 (viz. Obr. 5-5)
- stanovení dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou pomocí naměřených hodnot podélných a příčných frekvencí, dle normy ČSN 73 1372 (viz. Obr. 5-6)
- stanovení statického modulu pružnosti zatěžovací zkouškou, dle normy ČSN ISO 6784 (viz. Obr. 5-7)



Obr. 5-5 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou zkouškou.



Obr. 5-6 Rezonanční zkouška.



Obr. 5-7 Statická zatěžovací zkouška.

Pozn.: U každé sady se postupovalo stejným způsobem a všechna měření byla prováděna po 1, 2, 3, 7, 14 a 28 dnech od betonáže.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

6.1 Vlastnosti čerstvého betonu

Tab. 6-1 Vlastnosti čerstvého betonu dle jednotlivých míchaček a betonáží.

	1. betonáž		2. betonáž		3. betonáž	
	Sednutí kužele [mm]	Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg.m ⁻³]	Sednutí kužele [mm]	Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg.m ⁻³]	Sednutí kužele [mm]	Obj. hmotnost čerstvé směsi [kg.m ⁻³]
1. míchačka	185	2380	200	2380	190	2370
2. míchačka	180		190		195	
3. míchačka	160		205		195	

6.2 Pevnost betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku byla zjišťována na zkušebních krychlích o hraně 150 mm. Při každé betonáži bylo přichystáno minimálně 12 krychlí. Část krychlí byla označena jako referenční a uložena ve vlhkém prostředí při teplotě v laboratoři. Druhá část byla uložena do chladicí skříně při teplotě 10°C, též ve vlhkém prostředí. V následujících tabulkách (Tab. 6-2, 6-3, 6-4) jsou výsledky měření krychlí referenčních (označené zkratkou REF.) a krychlí chlazených (označeny zkratkou CHL. a modrou barvou). Každá krychle byla rozdracena v zatěžovacím lisu na mezi únosnosti. Při znalosti síly při porušení vzorku a přesných rozměrů vzorku, které byly zjištěny před porušením krychle, jsme schopni snadno určit pevnost betonu v tlaku.

Tab. 6-2 Výsledky měření na krychlích- 1. betonáž.

1. betonáž		Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Plocha [m ²]	Síla porušení [kN]	Pevnost [MPa]
Stáří	Označení	m	a	b	c	A	F	f _c
1 den	K1 REF.	7,887	150,2	150,1	148,7	2,233E-02	955,3	42,8
	K2 REF.	8,109	149,9	150,0	152,1	2,280E-02	967,3	42,4
	K1 CHL.	7,953	149,7	149,8	150,7	2,256E-02	454,5	20,1
2 dny	K3 REF.	7,920	150,1	150,1	148,3	2,226E-02	1246,5	56,0
	K4 REF.	7,865	150,1	150,1	148,3	2,226E-02	1236,8	55,6
	K2 CHL.	8,039	149,9	149,9	151,9	2,277E-02	814,5	35,8
3 dny	K5 REF.	8,028	150,1	150,1	150,8	2,264E-02	1390,6	61,4
	K6 REF.	8,137	150,2	150,2	151,8	2,280E-02	1371,7	60,2
7 dní	K7 REF.	7,476	150,1	150,2	141,6	2,125E-02	1431,3	67,3
	K8 REF.	8,074	150,0	150,0	151,9	2,279E-02	1564,9	68,7
14 dní	K9 REF.	7,876	150,0	150,0	146,9	2,204E-02	1702,6	77,3
28 dní	K10 REF.	7,984	150,1	150,2	148,7	2,232E-02	1756,2	78,7

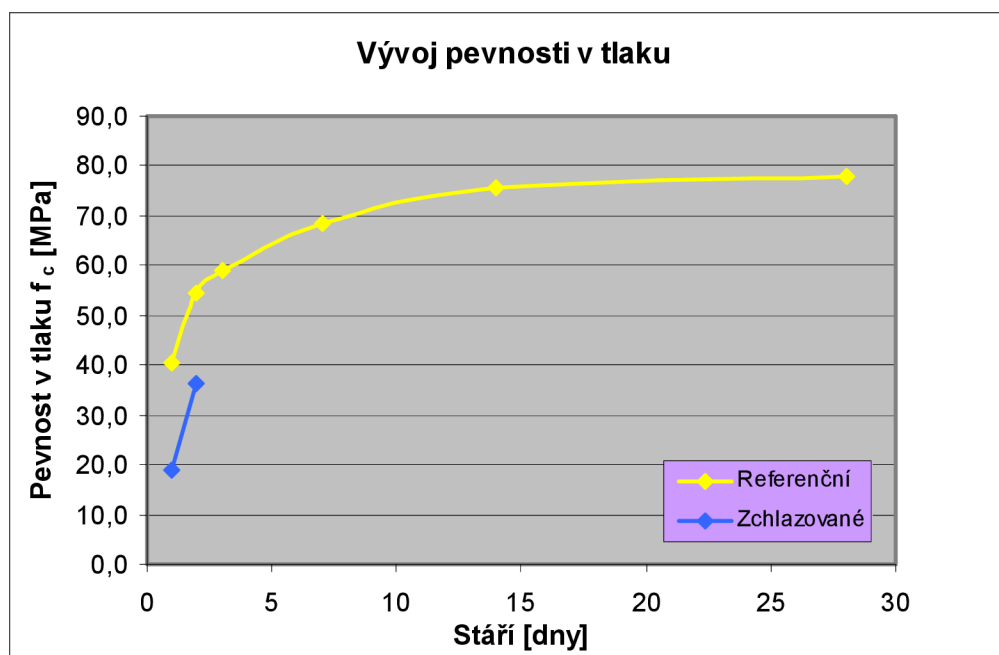
Tab. 6-3 Výsledky měření na krychlich- 2. betonáž.

2. betonáž		Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Plocha [m ²]	Síla porušení [kN]	Pevnost [MPa]
Stáří	Označení	m	a	b	c	A	F	f _c
1 den	K1 REF.	8,086	150,1	150,1	149,7	2,247E-02	1007,0	44,8
	K2 REF.	7,974	150,2	150,2	148,7	2,233E-02	965,6	43,2
	K1 CHL.	7,982	150,0	149,9	147,7	2,216E-02	463,7	20,9
2 dny	K3 REF.	8,079	150,0	150,1	148,6	2,229E-02	1273,3	57,1
	K4 REF.	8,022	150,3	150,3	148,9	2,238E-02	1294,2	57,8
	K2 CHL.	7,939	149,9	149,9	147,7	2,214E-02	867,8	39,2
3 dny	K5 REF.	7,941	150,2	150,1	149,1	2,239E-02	1383,8	61,8
	K6 REF.	7,969	150,1	150,1	148,7	2,232E-02	1447,7	64,9
7 dní	K7 REF.	7,995	150,1	150,1	150,0	2,252E-02	1574,4	69,9
	K8 REF.	7,965	150,2	150,2	148,5	2,230E-02	1608,9	72,1
14 dní	K9 REF.	8,033	150,3	150,2	150,2	2,258E-02	1749,1	77,5
	K10 REF.	8,098	150,2	150,3	150,3	2,258E-02	1756,6	77,8
28 dní	K11 REF.	7,973	150,1	150,1	149,0	2,236E-02	1822,0	81,5

Tab. 6-4 Výsledky měření na krychlich- 3. betonáž.

3. betonáž		Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Plocha [m ²]	Síla porušení [kN]	Pevnost [MPa]
Stáří	Označení	m	a	b	c	A	F	f _c
1 den	K1 REF.	8,015	150,1	150,1	149,5	2,244E-02	637,8	28,4
	K1 CHL.	8,052	149,7	149,7	153,1	2,292E-02	352,2	15,4
2 dny	K2 REF.	7,916	149,9	149,9	148,5	2,226E-02	1015,1	45,6
	K2 CHL.	7,972	149,9	149,8	151,8	2,275E-02	766,8	33,7
3 dny	K3 REF.	7,889	149,8	149,7	147,7	2,213E-02	1165,0	52,7
	K4 REF.	8,034	150,0	150,0	150,5	2,258E-02	1179,9	52,3
7 dní	K5 REF.	7,954	149,8	149,8	149,2	2,235E-02	1509,4	67,5
	K6 REF.	7,959	149,7	149,8	149,3	2,235E-02	1457,8	65,2
14 dní	K7 REF.	7,979	149,8	149,8	150,0	2,247E-02	1636,2	72,8
	K8 REF.	8,027	149,8	149,8	150,4	2,253E-02	1645,6	73,0
28 dní	K9 REF.	7,969	149,7	149,7	149,8	2,243E-02	1835,9	81,9
	K10 REF.	7,949	149,7	149,7	150,3	2,250E-02	1661,5	73,8
	K11 REF.	7,980	149,8	149,8	151,6	2,271E-02	1686,0	74,2

Průběh vývoje pevnosti betonu v tlaku (viz. Graf 6-1) v čase má očekávaný vývoj. Pevnost betonu v tlaku referenčních krychlí roste nejstrměji v prvním týdnu tvrdnutí, další růst již není tak prudký. Obdobný vývoj rozpoznáváme i ve vývoji pevnosti betonu v tlaku na krychlich ošetřovaných při 10°C, jen s tím rozdílem, že hodnoty jsou vlivem teploty v prvním dni sníženy zhruba o 20 MPa, je však naznačen vývoj jen v prvních dvou dnech z důvodu nedostatku chlazených krychlí. Pevnost betonu v tlaku stanovená na krychlich poslouží zejména pro výpočet horní zatěžovací meze statické zatěžovací zkoušky.



Graf 6-1 Vývoj pevnosti betonu v tlaku (průměrné hodnoty ze všech betonáží).

6.3 Modul pružnosti

Hlavním cílem experimentu je určit vliv teploty na modul pružnosti betonu v počáteční fázi tvrdnutí. Pro tyto účely bylo přichystáno při každé betonáži 12 zkušebních trámčů 100 x 100 x 400 mm. Z nichž 6 trámčů bylo uloženo a ošetřováno při teplotě 10°C a zbylých 6 trámčů bylo ponecháno při teplotě v laboratoři. Na zkušebních trámcích starých 1, 2, 3, 7, 14 a 28 dní byl stanoven statický modul pružnosti zatěžovací zkouškou a dynamický modul pružnosti ultrazvukovou metodou a rezonanční metodou.

Tab. 6-5 Údaje o referenčních zkušebních trámcích.

Referenční	Betonáž	Označení	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Obj. hmotnost [kg.m ⁻³]
			b	h	L	m	ρ
1 den	1.	T1	100,0	99,9	400,0	9 551	2 390
	2.	T1	100,1	100,0	400,0	9 511	2 375
	3.	T1	100,1	100,7	400,0	9 517	2 360
2 dny	1.	T2	100,1	99,2	400,0	9 531	2 400
	2.	T2	100,2	100,9	400,0	9 694	2 397
	3.	T2	99,9	99,5	400,0	9 376	2 358
3 dny	1.	T3	99,6	99,4	400,0	9 456	2 388
	2.	T3	100,2	96,7	400,0	9 290	2 397
	3.	T3	99,9	100,7	400,0	9 486	2 357
7 dní	1.	T4	100,0	100,3	400,0	9 590	2 390
	2.	T4	99,9	100,6	400,0	9 614	2 392
	3.	T4	100,0	99,8	400,0	9 452	2 368

Tab. 6-5 Pokračování Tab. 6-5.

Referenční	Betonáž	Označení	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Obj. hmotnost [kg.m ⁻³]
			b	h	L	m	ρ
14 dní	1.	T5	100,0	100,5	400,0	9 648	2 400
	2.	T5	100,1	99,3	399,5	9 452	2 380
	3.	T5	100,1	100,3	399,5	9 498	2 368
28 dní	1.	T6	99,9	99,2	400,0	9 512	2 400
	2.	T6	99,9	98,8	400,0	9 399	2 381
	3.	T6	100,1	99,8	399,5	9 473	2 374

Tab. 6-6 Údaje o chlazených zkušebních trámcích.

Chlazené	Betonáž	Označení	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Obj. hmotnost [kg.m ⁻³]
			b	h	L	m	ρ
1 den	1.	T1	100,0	99,9	399,5	9 500	2 381
	2.	T1	100,0	99,1	399,5	9 394	2 373
	3.	T1	99,9	101,5	399,5	9 630	2 377
2 dny	1.	T2	100,0	98,8	399,5	9 348	2 368
	2.	T2	99,9	98,0	400,0	9 265	2 366
	3.	T2	99,6	99,6	399,5	9 336	2 356
3 dny	1.	T3	99,9	101,4	400,0	9 529	2 352
	2.	T3	99,8	99,1	399,5	9 439	2 389
	3.	T3	99,9	100,3	399,5	9 363	2 339
7 dní	1.	T4	100,1	100,4	399,5	9 463	2 357
	2.	T4	99,9	99,4	399,0	9 525	2 404
	3.	T4	100,0	100,5	399,0	9 499	2 369
14 dní	1.	T5	100,0	100,9	399,5	9 460	2 347
	2.	T5	99,8	100,0	400,0	9 504	2 381
	3.	T5	100,1	99,0	399,5	9 351	2 362
28 dní	1.	T6	99,8	100,0	399,5	9 343	2 343
	2.	T6	99,9	98,9	400,0	9 452	2 392
	3.	T6	99,9	101,4	399,0	9 562	2 366

6.3.1 Statický modul pružnosti

Horní mez zatížení při statické zatěžovací pevnosti byla odhadnuta částečně ze zkušebních krychlí a částečně dle výsledků z nedestruktivních zkoušek. Dle normy ČSN ISO 6784 [2-4] byla stanovena dolní zatěžovací mez $\sigma_b = 5 \text{ kN.m}^{-2}$. Zatěžovací lis automaticky provede centraci vzorku, celý proces zatěžování a vyhodnocení statického modulu pružnosti. Podle normy ČSN ISO 6784 [2-4] se nesmí lišit skutečná pevnost zkušebního tělesa o více než 20% oproti odhadnuté pevnosti. Pokud tento požadavek není splněn je třeba okolnosti uvést do protokolu o měření (viz. Tab. 6-7, 6-8).

Tab. 6-7 Posouzení splnění kritéria na přesnost odhadnuté pevnosti $\pm 20\%$ (referenční trámce).

Referenční	Betonáž	Plocha [m ²]	Zatěžování [kN]	Síla při porušení [kN]	Pevnost odhadnutá [MPa]	Pevnost naměřená [MPa]	Vyhoví?
1 den	1.	0,01	5 → 115	329,1	34,5	32,9	ANO
	2.		5 → 100	300,0	30,0	30,0	ANO
	3.		5 → 70	189,2	21,0	18,9	ANO
2 dny	1.	0,01	5 → 145	456,5	43,5	45,7	ANO
	2.		5 → 155	459,0	46,5	45,9	ANO
	3.		5 → 110	334,3	33,0	33,4	ANO
3 dny	1.	0,01	5 → 160	511,6	48,0	51,2	ANO
	2.		5 → 170	499,9	51,0	50,0	ANO
	3.		5 → 140	416,1	42,0	41,6	ANO
7 dní	1.	0,01	5 → 180	612,3	54,0	61,2	ANO
	2.		5 → 200	633,7	60,0	63,4	ANO
	3.		5 → 195	586,2	58,5	58,6	ANO
14 dní	1.	0,01	5 → 220	657,3	66,0	65,7	ANO
	2.		5 → 220	660,6	66,0	66,1	ANO
	3.		5 → 210	630,9	63,0	63,1	ANO
28 dní	1.	0,01	5 → 230	720,2	69,0	72,0	ANO
	2.		5 → 250	697,5	75,0	69,8	ANO
	3.		5 → 220	685,9	66,0	68,6	ANO

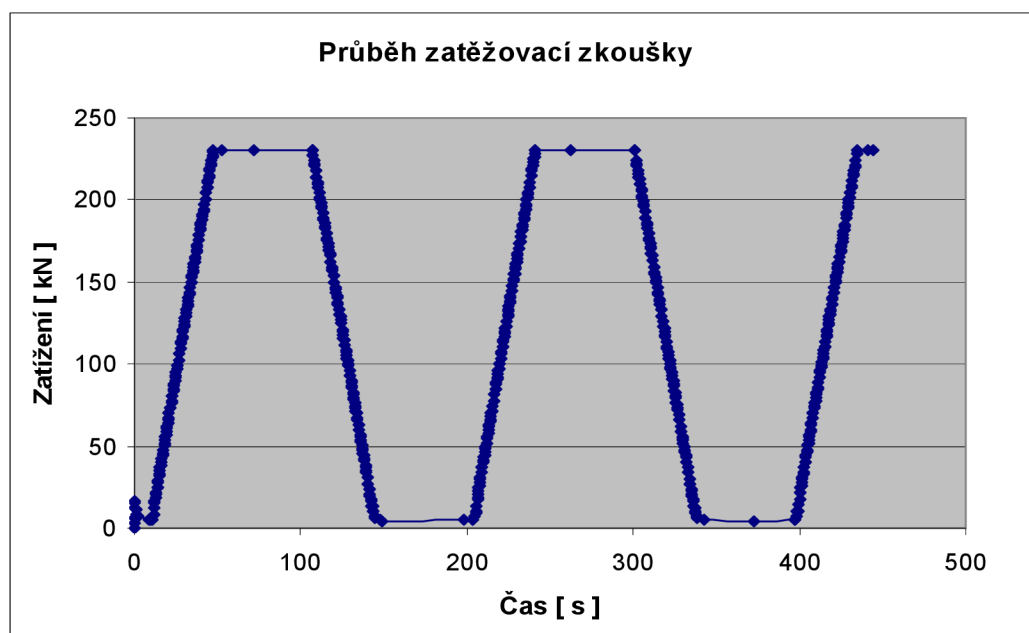
Tab. 6-8 Posouzení splnění kritéria na přesnost odhadnuté pevnosti $\pm 20\%$ (chlazené trámce).

Chlazené	Betonáž	Plocha [m ²]	Zatěžování [kN]	Síla při porušení [kN]	Pevnost odhadnutá [MPa]	Pevnost naměřená [MPa]	Vyhoví?
1 den	1.	0,01	5 → 50	95,6	15,0	9,6	NE
	2.		5 → 35	102,1	10,5	10,2	ANO
	3.		5 → 25	69,6	7,5	7,0	ANO
2 dny	1.	0,01	5 → 70	259,9	21,0	26,0	NE
	2.		5 → 95	293,6	28,5	29,4	ANO
	3.		5 → 90	249,8	27,0	25,0	ANO
3 dny	1.	0,01	5 → 105	313,4	31,5	31,3	ANO
	2.		5 → 115	375,3	34,5	37,5	ANO
	3.		5 → 115	329,3	34,5	32,9	ANO
7 dní	1.	0,01	5 → 130	424,1	39,0	42,4	ANO
	2.		5 → 150	507,1	45,0	50,7	ANO
	3.		5 → 160	522,0	48,0	52,2	ANO
14 dní	1.	0,01	5 → 155	469,5	46,5	47,0	ANO
	2.		5 → 185	632,4	55,5	63,2	ANO
	3.		5 → 185	588,4	55,5	58,8	ANO
28 dní	1.	0,01	5 → 180	552,2	54,0	55,2	ANO
	2.		5 → 230	689,8	69,0	69,0	ANO
	3.		5 → 200	669,3	60,0	66,9	ANO

V následující tabulce (Tab. 6-9) jsou uvedeny hodnoty statického modulu pružnosti, které vyhodnotil zatěžovací lis. Hodnoty statického modulu pružnosti E_c n-denních trámů jsou doplněny o aritmetický průměr ze všech betonáží a vypočtenou směrodatnou odchylku s_x . Dále je v Grafu 6-2 demonstrativně znázorněn průběh zatěžování náhodně vybraného trámce T6 (referenční trámec z 1. betonáže).

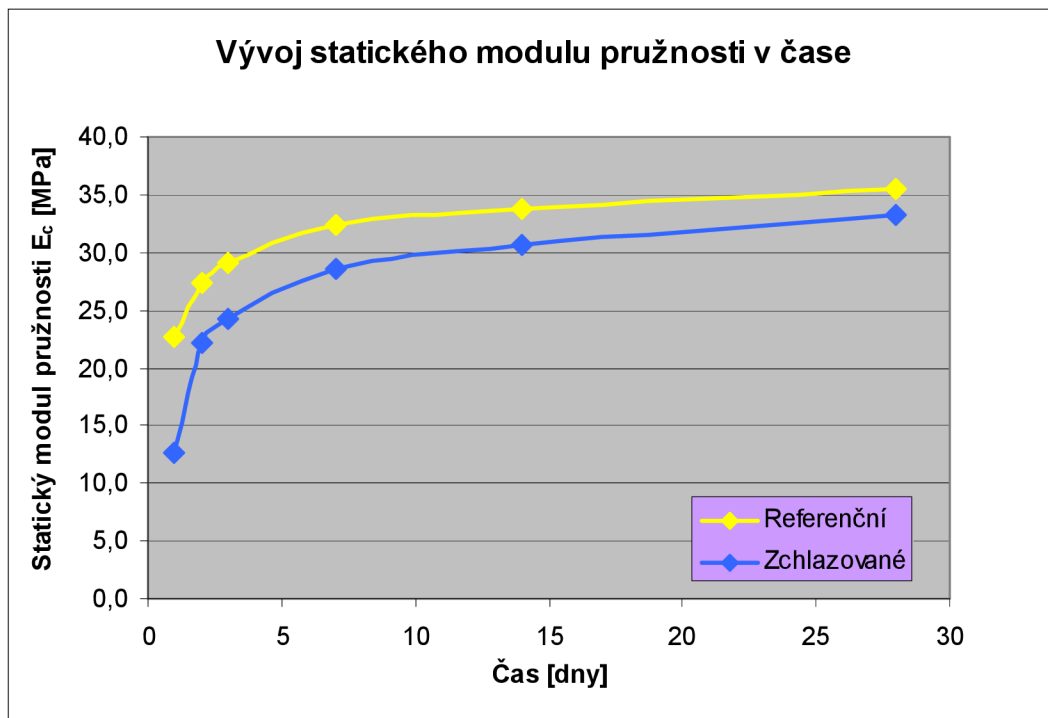
Tab. 6-9 Vyhodnocené moduly statického modulu pružnosti.

	Betonáž	Referenční trámce			Chlazené trámce		
		E_c [MPa]	Průměr E_c [MPa]	s_x [MPa]	E_c [MPa]	Průměr E_c [MPa]	s_x [MPa]
1 den	1.	25,1	22,8	2,8	11,9	12,7	0,9
	2.	24,3			14,0		
	3.	18,9			12,2		
2 dny	1.	28,7	27,3	1,1	22,0	22,1	0,6
	2.	27,4			22,9		
	3.	25,9			21,4		
3 dny	1.	30,2	29,2	1,5	23,0	24,3	1,4
	2.	30,2			26,2		
	3.	27,1			23,7		
7 dní	1.	32,3	32,5	0,6	26,2	28,5	1,8
	2.	33,3			30,7		
	3.	31,8			28,7		
14 dní	1.	34,1	33,8	0,3	27,1	30,6	2,6
	2.	34,0			33,3		
	3.	33,4			31,5		
28 dní	1.	35,5	35,5	0,3	31,8	33,2	1,1
	2.	35,1			34,4		
	3.	35,8			33,3		



Graf 6-2 Průběh zatěžovací zkoušky trámce T6 (referenční, 1. betonáž).

V Grafu 6-3 je zobrazen vývoj statického modulu pružnosti v čase. Modul pružnosti je porovnáván na trácích referenčních a zchlazovaných. Pro zobrazení vývoje v čase byly použity aritmetické průměry hodnot ze všech betonáží. Na vývoji statického modulu pružnosti v čase lze rozeznat analogii s vývojem pevnosti betonu v tlaku. Zchlazované trávce v prvních dnech dosahují výrazně nižších hodnot (v počátku téměř poloviční) a v pozdějších dnech se rozdíl oproti referenčním trávčům snižuje. Z grafu lze podpořit i teorii, že hodnoty statického modulu pružnosti zchlazovaného trávce mají potenciál v dlouhodobém výhledu převýšit hodnoty statického modulu pružnosti trávce referenčního (podobně jako vývoj pevnosti betonu v tlaku v kap. 2.2).



Graf 6-3 Vývoj statického modulu pružnosti v čase (průměrné hodnoty všech betonáží).

6.3.2 Dynamický modul pružnosti

Ke stanovení dynamického modulu pružnosti byly použity trávce 100x 100 x 400 mm. Zkouška ultrazvuková i rezonanční byla vyhotovena na stejných trácích jako zatěžovací zkouška pro získání statického modulu pružnosti (před jejím provedením). Dynamický modul pružnosti $E_{dyn,U}$, stanovený ultrazvukovou metodou, byl určen dle normy ČSN 73 1371[2-5] a dynamické moduly $E_{dyn,FL}$ a $E_{dyn,FF}$, stanovené rezonanční zkouškou, byly vypočteny dle normy ČSN 73 1372 [2-6]. V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty vypočtených dynamických modulů pružnosti betonu na trácích dle ultrazvukové (viz. Tab. 6-10, 6-11) i rezonanční zkoušky (viz. Tab. 6-12, 6-13).

Tab. 6-10 Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného ultrazvukovou metodou - referenční trámce.

Referenční	Betonáž	Ozn.	Čas průchodu ultrazvuku [μs]			E _{dyn,U} [MPa]	Prům. E _{dyn,U} [MPa]	s _x [MPa]
			t _{L1}	t _{L2}	t _{L3}			
1 den	1.	T1	96,6	96,8	97,1	35,7	33,3	2,8
	2.	T1	98,0	97,7	98,0	34,7		
	3.	T1	104,5	107,3	106,5	29,4		
2 dny	1.	T2	92,3	93,3	93,8	38,8	37,9	2,1
	2.	T2	91,6	90,8	92,4	40,0		
	3.	T2	97,7	96,4	97,3	35,0		
3 dny	1.	T3	91,8	90,8	92,9	39,7	39,5	2,0
	2.	T3	90,1	89,4	89,5	41,8		
	3.	T3	94,4	94,1	95,0	37,0		
7 dní	1.	T4	88,7	87,7	88,6	42,9	42,4	0,9
	2.	T4	88,0	87,9	88,8	43,1		
	3.	T4	89,4	89,4	90,5	41,2		
14 dní	1.	T5	87,5	87,1	87,9	43,9	43,7	0,6
	2.	T5	85,7	86,7	87,7	44,3		
	3.	T5	87,8	88,3	87,4	42,9		
28 dní	1.	T6	86,1	86,0	86,1	45,4	45,3	0,8
	2.	T6	83,9	85,4	85,5	46,3		
	3.	T6	86,7	86,7	86,2	44,3		

Tab. 6-11 Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného ultrazvukovou metodou - chlazené trámce.

Chlazené	Betonáž	Ozn.	Čas průchodu ultrazvuku [μs]			E _{dyn,U} [MPa]	Prům. E _{dyn,U} [MPa]	s _x [MPa]
			t _{L1}	t _{L2}	t _{L3}			
1 den	1.	T1	116,8	117,5	116,8	24,3	24,6	0,5
	2.	T1	113,6	113,7	115,5	25,4		
	3.	T1	118,5	116,6	116,5	24,2		
2 dny	1.	T2	103,9	102,7	104,0	30,9	32,5	1,3
	2.	T2	98,6	98,6	98,6	34,1		
	3.	T2	100,7	99,9	101,6	32,5		
3 dny	1.	T3	100,8	99,9	99,6	32,9	34,8	1,7
	2.	T3	95,3	94,6	95,3	37,0		
	3.	T3	98,2	97,0	96,6	34,6		
7 dní	1.	T4	95,5	95,2	97,3	35,8	38,5	1,9
	2.	T4	92,5	90,8	91,8	39,9		
	3.	T4	91,0	91,0	91,5	39,7		
14 dní	1.	T5	94,1	94,1	96,6	36,4	39,7	2,4
	2.	T5	89,1	88,9	89,4	42,0		
	3.	T5	89,1	89,5	91,7	40,7		
28 dní	1.	T6	90,1	90,8	91,0	39,9	42,4	2,3
	2.	T6	86,0	85,6	86,0	45,5		
	3.	T6	88,9	88,6	88,9	41,8		

Tab. 6-12 Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného rezonanční metodou-referenční trámce.

Referenční	Betonáž	Ozn.	Frekvence [Hz]	
			f_L	f_f
1 den	1.	T1	4 697	2 013
	2.	T1	4 622	1 990
	3.	T1	4 203	1 801
2 dny	1.	T2	4 924	2 126
	2.	T2	4 998	2 144
	3.	T2	4 682	2 004
3 dny	1.	T3	5 029	2 156
	2.	T3	5 092	2 194
	3.	T3	4 835	2 079
7 dní	1.	T4	5 163	2 221
	2.	T4	5 212	2 248
	3.	T4	5 133	2 222
14 dní	1.	T5	5 276	2 264
	2.	T5	5 290	2 270
	3.	T5	5 252	2 282
28 dní	1.	T6	5 325	2 315
	2.	T6	5 388	2 343
	3.	T6	5 307	2 306

Tab. 6-12 Pokračování Tab. 6-12.

Referenční	Betonáž	Ozn.	$E_{dyn,FL}$ [MPa]	Průměr $E_{dyn,FL}$ [MPa]	s_x [MPa]	$E_{dyn,FF}$ [MPa]	Průměr $E_{dyn,FF}$ [MPa]	s_x [MPa]
1 den	1.	T1	33,7	31,0	3,1	33,6	30,8	3,3
	2.	T1	32,5			32,6		
	3.	T1	26,7			26,2		
2 dny	1.	T2	37,2	36,2	2,3	38,2	36,3	2,2
	2.	T2	38,3			37,5		
	3.	T2	33,1			33,1		
3 dny	1.	T3	38,6	37,9	1,9	38,9	38,8	3,2
	2.	T3	39,8			42,7		
	3.	T3	35,3			34,8		
7 dní	1.	T4	40,8	40,8	0,7	40,6	40,9	0,3
	2.	T4	41,6			41,4		
	3.	T4	39,9			40,7		
14 dní	1.	T5	42,8	42,3	0,5	42,2	42,4	0,3
	2.	T5	42,5			42,9		
	3.	T5	41,7			42,2		
28 dní	1.	T6	43,5	43,5	0,6	45,3	45,1	1,1
	2.	T6	44,2			46,4		
	3.	T6	42,7			43,7		

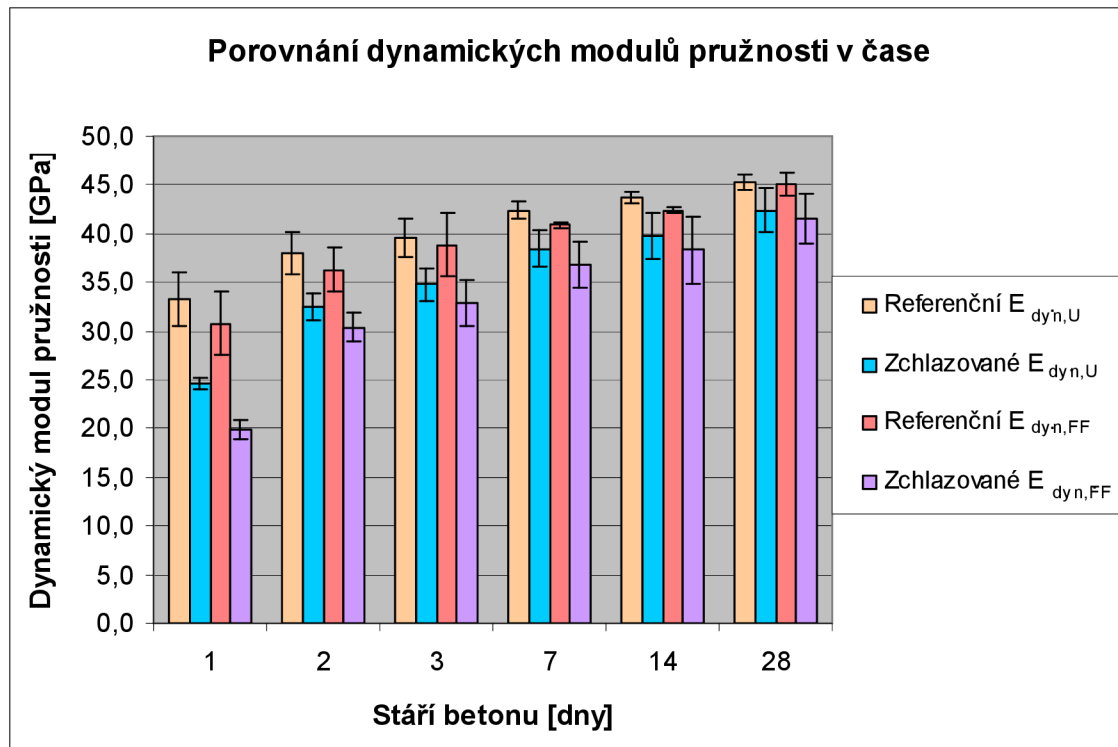
Tab. 6-13 Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného rezonanční metodou-chlazené trámce.

Chlazené	Betonáž	Ozn.	Frekvence [Hz]	
			f_L	f_f
1 den	1.	T1	3 625	1 543
	2.	T1	3 655	1 563
	3.	T1	3 547	1 503
2 dny	1.	T2	4 395	1 887
	2.	T2	4 586	1 965
	3.	T2	4 471	1 905
3 dny	1.	T3	4 559	1 941
	2.	T3	4 824	2 061
	3.	T3	4 628	1 983
7 dní	1.	T4	4 755	2 017
	2.	T4	5 018	2 138
	3.	T4	5 005	2 162
14 dní	1.	T5	4 833	2 038
	2.	T5	5 169	2 234
	3.	T5	5 092	2 177
28 dní	1.	T6	5 142	2 199
	2.	T6	5 358	2 301
	3.	T6	5 228	2 246

Tab. 6-13 Pokračování tabulky 6-13.

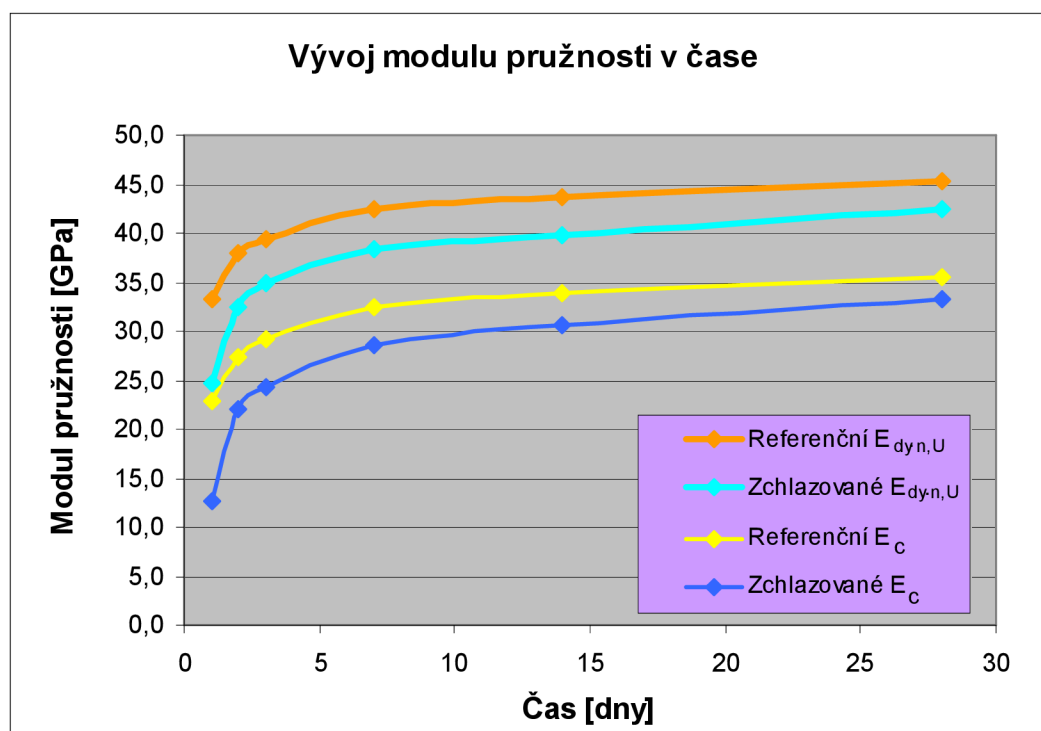
Chlazené	Betonáž	Ozn.	$E_{dyn,FL}$ [MPa]	Průměr $E_{dyn,FL}$ [MPa]	s_x [MPa]	$E_{dyn,FF}$ [MPa]	Průměr $E_{dyn,FF}$ [MPa]	s_x [MPa]
1 den	1.	T1	20,0	19,8	0,5	19,6	19,3	1,0
	2.	T1	20,2			20,3		
	3.	T1	19,1			18,0		
2 dny	1.	T2	29,2	30,4	1,1	29,8	30,8	1,5
	2.	T2	31,8			32,9		
	3.	T2	30,1			29,7		
3 dny	1.	T3	31,3	32,9	1,8	29,8	32,3	2,4
	2.	T3	35,5			35,6		
	3.	T3	32,0			31,5		
7 dní	1.	T4	34,0	36,8	2,0	32,8	36,2	2,4
	2.	T4	38,5			38,1		
	3.	T4	37,8			37,6		
14 dní	1.	T5	35,0	38,3	2,4	33,0	37,8	3,5
	2.	T5	40,7			41,2		
	3.	T5	39,1			39,4		
28 dní	1.	T6	39,6	41,6	1,8	39,1	41,2	2,6
	2.	T6	43,9			44,8		
	3.	T6	41,2			39,8		

V Grafu 6-4 jsou porovnány dynamické moduly pružnosti betonu v čase. Ve sloupcovém grafu nenalezneme porovnání dynamického modulu pružnosti vypočteného z podélné frekvence, jeho hodnoty jsou téměř stejné jako hodnoty vypočtené z frekvence příčné. Hodnoty dynamického modulu pružnosti vypočteného z ultrazvuku vychází o něco větší než hodnoty vypočtené z rezonance.



Graf 6-4 Porovnání dynamických modulů pružnosti v čase (jedná se o průměrné hodnoty ze všech betonů).

Vývoj v čase modulu pružnosti statického a dynamického je zobrazen v Grafu 6-5. Průběh křivek zobrazující vývoj modulů pružnosti má obdobný charakter (strmý nárůst v prvních dnech a pozvolnější nárůst v dalších dnech). Velký rozdíl je v hodnotách jednotlivých modulech pružnosti. Dynamické moduly pružnosti vycházejí zřetelně větší.



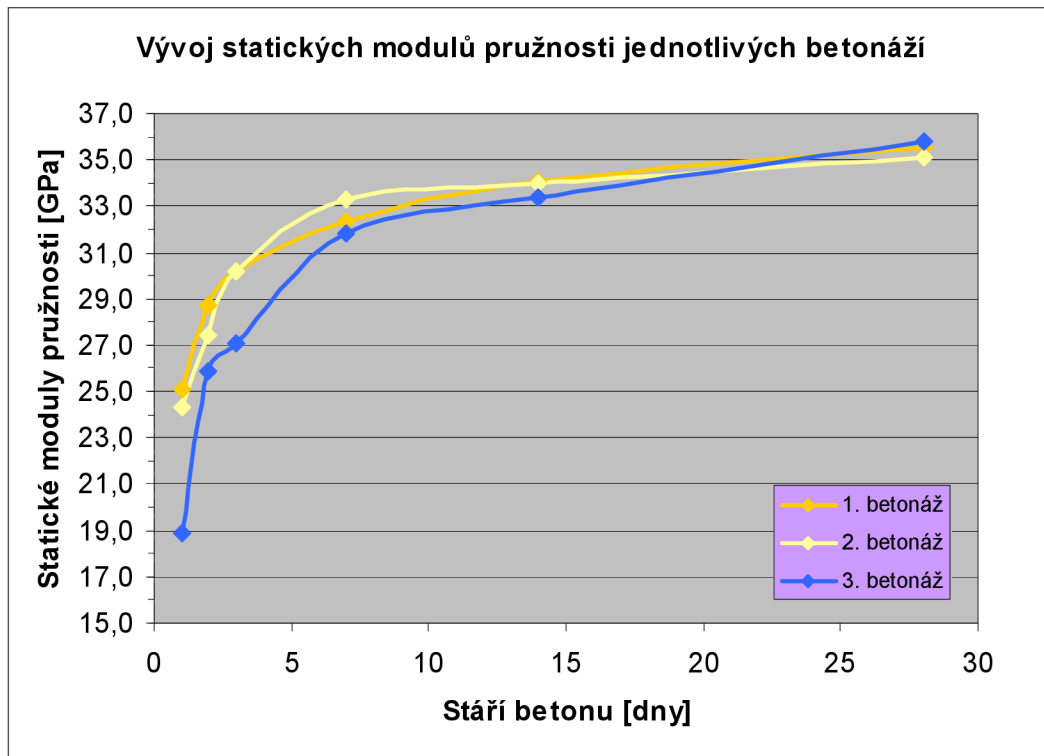
Graf 6-5 Vývoj modulu pružnosti v čase (jedná se o průměrné hodnoty ze všech betonáží).

6.4 Shrnutí

Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti je dle výsledků tohoto experimentu značný. Experiment měl tento vliv dokázat pomocí zkušebních těles, která byla ošetřována při laboratorní teplotě a pomocí těles zchlazovaných, ošetřovaných při teplotě 10°C. Vliv teploty je nejvíce patrný v počáteční fázi několika dnů, kdy modul pružnosti zchlazovaných zkušebních těles dosahuje nižších hodnot. Po jednom dni byly tyto hodnoty, např. u statického modulu pružnosti, téměř poloviční. Dále se rozdíl v hodnotě modulu pružnosti pozvolna zmenšuje a po 28 dnech již rozdíl není příliš významný

O tom, jaký vliv má teplota, se však můžeme přesvědčit i pomocí následujícího grafu (Graf 6-6), kde je porovnán vývoj statického modulu pružnosti na referenčních zkušebních trácích podle jednotlivých betonáží. První betonáže byly prováděny v letních měsících a přesto, že je laboratoř vytápěná, měla teplota vzduchu v laboratoři značný vliv při 3. betonáži, která byla prováděna až v lednu. Je zřetelné, že i menší změna teploty způsobí značné rozdíly v naměřených hodnotách. Největší vliv měla teplota v laboratoři na jednodenní hodnoty modulu pružnosti, v dalších dnech se rozdíl

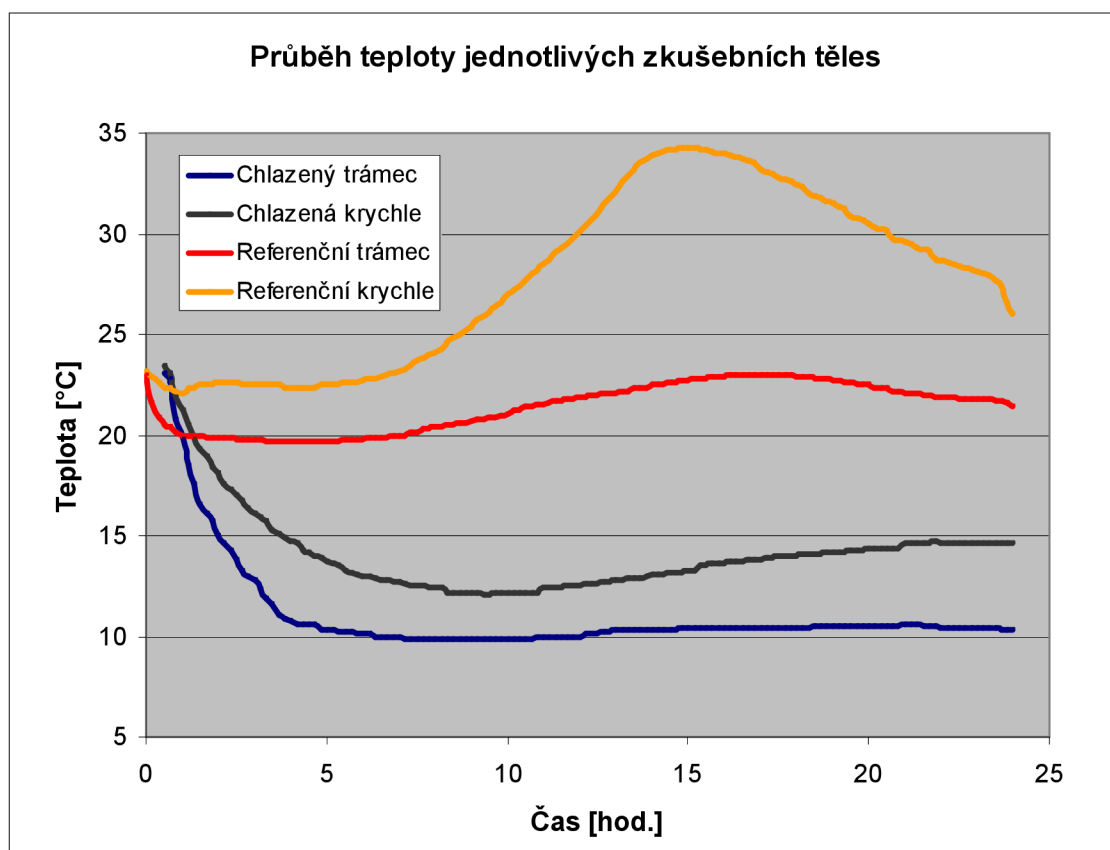
zmenšoval a po 28 dnech byla hodnota modulu pružnosti na trámcích 3. betonáže dokonce vyšší než u 1. a 2. betonáže, které byly provedeny v letních měsících.



Graf 6-6 Vývoj statických modulů pružnosti na referenčních trámcích podle jednotlivých betonáží

Při experimentu jsme se setkali s dalším jevem, který může zkreslit naměřené hodnoty. Vliv použitých forem pro výrobu zkušebních těles je okolnost, která se při plánování experimentu zdála zcela bezvýznamná. O tom, že opak je pravdou, se můžeme přesvědčit následujícím grafu (Graf 6-7). V grafu je zobrazen průběh teplot v prvních 24 hodinách pokusu, který zaznamenala čidla přímo ve formách zkušebních těles. Zkušební trávce byly odlity do ocelových forem s velkou tepelnou vodivostí, zkušební krychle byly odlity do forem plastových, které mají podstatně menší tepelnou vodivost.

Chlazené trávce byly během 5 hodin vychlazeny na teplotu 10°C a tuto teplotu si udržely po celou dobu experimentu. U chlazených krychlí teplota během prvních 10 hodin klesala, poté začala vlivem hydratačního tepla dokonce růst až na 15°C po 24 hodinách. U referenčních trávců je patrný nárůst teploty vlivem hydratačního tepla na 23°C po 17 hodinách. Referenční krychle však dosáhly vlivem izolačních schopností plastové formy až téměř 35°C po 15 hodinách. Po 24 hodinách byla všechna zkušební tělesa odformována a vliv použitých forem se v dalších dnech již neprojevil.



Graf 6-7 Zaznamenané teploty uvnitř forem zkušebních těles během prvních 24 hodin.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo objasnit vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu. Byla provedena rešerše literatury, která se zabývá problematikou vlivu počátečních podmínek na vývoj modulu pružnosti, ale i pevnost betonu v tlaku. Dále byla provedena rešerše norem, které se zabývají požadavky na beton v počáteční fázi tvrdnutí a tím, jaká opatření učinit při nepříznivých počátečních podmínkách. V experimentální části byl zkoumán vliv teploty na modul pružnosti betonu v počáteční fázi tvrdnutí (do 28 dnů). Měřením statického i dynamického modulu pružnosti na zkušebních trámcích bylo dokázáno, že vliv teploty je zejména v prvních dnech velmi zřetelný. Po prvním dni bylo dosahováno někdy až polovičních hodnot u chlazených těles. V následujících dnech se rozdíl postupně zmenšuje, po 28 dnech rozdíl není příliš významný a podle literatury by v dlouhodobém horizontu měl být modul pružnosti zchlazovaných těles dokonce větší, než u těles ošetřovaných při vyšší teplotě.

Zjištěné okolnosti by tedy měly zajímat především závody vyrábějící prefabrikované betonové výrobky, kde je důležitý modul pružnosti zejména v prvních třech dnech, ale také stavby, které jsou betonovány na místě a jsou zatěžovány dříve než po 28 dnech zrání betonu. Experiment byl prováděn při 10°C a vliv teploty byl velmi významný. V praxi se zajisté můžeme setkat ještě z obtížnějšími podmínkami, proto je vhodné se touto problematikou dále zabývat a provést další experimenty s větším objemem zkoušených vzorků i širší škálou teplot. Při dalším zkoumání tohoto jevu je důležité klást přísné požadavky zejména na dodržení přesné teploty při ošetřování betonu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

8.1 Skripta a opory

- [1-1] PIERRE-CLAUDE AITCIN. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [1-2] MARIO COLLEPARDI. *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 9788087093757.
- [1-3] A.M. NEVILLE. *Properties of concrete*. England: Pearson Education Limited, 1995. ISBN 0-582-23070-5.
- [1-4] PIERRE-CLAUDE AITCIN, Sidney Mindess. *Sustainability of Concrete*. Oxon: Spon Press, 2011. ISBN 978-0-415-57196-8.
- [1-5] MARIO COLLEPARDI, Silvia Collepardi, Roberto Troli. *Concrete mix design*. Grafiche Tintoretto: Italy, 2007. ISBN 88-901469-8-2.
- [1-6] SPIRATOS, N., M. PAGÉ, N.P. MAILVAGANAM, V.M. MALHOTRA a C. JOLICOEUR. *Superplasticizers for concrete: Fundamentals, Technology and Practice*. Quebec: AGMV Marquis, 2003. ISBN 0-9731507-1-8.
- [1-7] SCHUTTER, Geert De, Peter J. M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS Servis, s.r.o., 2008. ISBN 978-1904778-30-2.
- [1-8] ONDŘEJ ANTON. *Základy zkušebnictví: Návodů do cvičení*. Brno: CERM, 2012.

8.2 Normy

- [2-1] ČSN EN 206-1. *Beton: Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*.
- [2-2] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*.
- [2-3] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu: Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*.
- [2-4] ČSN ISO 6784. *Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*.
- [2-5] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*.
- [2-6] ČSN 73 1372. *Rezonanční metoda skúšania betónu*

- [2-7] ČSN 73 1201. *Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb*
- [2-8] ČSN EN 197-1. *Cement: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.*
- [2-9] ČSN EN 13670. *Provádění betonových konstrukcí.*

8.3 Články

- [3-1] CIKRLE, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokohodnotných betonů různého složení. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2010, roč. 2010, č. 5.
- [3-2] SOUČEK, Petr. Moduly pružnosti moderního betonu- Předpisy, vliv složení, postupy v praxi. *Technologie betonu*. 2010, roč. 2010, 9. konference.
- [3-3] KOCÁB, Dalibor, Petr CIKRLE a Jiří ZAHRADA. Vliv ošetřování mostního betonu na modul pružnosti. *Sborník recenzovaných příspěvků: Zkoušení a jakost ve stavebnictví*. 2009.

8.4 www zdroje

- www stránky

- [4-1] *Definice-pevnost betonu*, 2011. Dostupné z WWW:
<<http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku>>
čas 11:00, pátek 7.10. 2011

- obrázky

- [4-2] *Öresundský most*, 2011. Dostupné z WWW:
<<http://mimoa.eu/projects/Sweden/Malm%F6/%D8resund%20bridge>>
čas 11:00, čtvrtek 6.10. 2011

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

f_c	Krychelná pevnost v tlaku [Pa]
f_{cm}	Charakteristická válcová pevnost v tlaku [Pa]
F_c	Síla při porušení vzorku [N]
E_{cm}	Normová hodnota modulu pružnosti
E_c	Statický modul pružnosti [Pa]
$E_{dyn,U}$	Dynamický modul pružnosti z podélné rychlosti ultrazvuku [Pa]
$E_{dyn,FL}$	Dynamický modul pružnosti z podélné frekvence [Pa]
$E_{dyn,FF}$	Dynamický modul pružnosti z příčné frekvence [Pa]
σ	Napětí [Pa]
ε	Poměrné přetvoření [-]
t_L	Podélný čas průchodu ultrazvukového vlnění zkušebním tělesem [s]
f_L	Podélná frekvence zkušebního tělesa [Hz]
f_F	Příčná frekvence zkušebního tělesa [Hz]
m	Hmotnost zkušebního tělesa [g]
ρ	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ρ_f	Objemová hmotnost čerstvé směsi [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
A	Průřezová plocha zkušebního tělesa [m^2]
s_x	směrodatná odchylka

10 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

10.1 Seznam obrázků

- Obr. 2-1** Příklad novodobé stavby- Öresundský most [4-2].
- Obr. 3-1** Ideální teplota čerstvého betonu.
- Obr. 4-1** Deformační diagramy [1-8].
- Obr. 4-2** Měření deformací na zkušebním tělese [1-8].
- Obr. 4-3** Podélná kmitání [1-8].
- Obr. 4-4** Příčné kmitání [1-8].
- Obr. 4-5** Kroutivé kmitání [1-8].
- Obr. 5-1** Míchání betonu v laboratorní míchačce.
- Obr. 5-2** Zkouška konzistence sednutím kužele.
- Obr. 5-3** Plnění forem betonem s následným vibrováním.
- Obr. 5-4** Zkušební tělesa, uložena v chladicí skříni.
- Obr. 5-5** Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou zkouškou.
- Obr. 5-6** Rezonanční zkouška.
- Obr. 5-7** Statická zatěžovací zkouška.

10.2 Seznam grafů

- Graf 2-1** Srovnání nároků na modul pružnosti dle jednotlivých norem [2-7].
- Graf 2-2** Vývoj pevnosti betonu v závislosti na čase a teplotě ošetřování [1-2].
- Graf 2-3** Vývoj pevnosti betonu v tlaku v závislosti na čase a teplotě ošetřování [1-3].
- Graf 2-4** Závislost pevnosti betonu v tlaku na teplotě ošetřování [1-3].
- Graf 2-5** Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech odpovídající průměrným měsíčním teplotám [1-3].
- Graf 2-6** Vývoj poměru modulu pružnosti, měnícího se v čase a modulu pružnosti betonu po 28 dnech v závislosti na čase a typu cementu [3-2].
- Graf 2-7** Grafické znázornění průběhu deformace jednotlivých složek v betonu při rostoucím napětí [1-2].
- Graf 2-8** Závislost modulu pružnosti beton a kameniva při různých pevnostech betonu v tlaku [1-4].

- Graf 3-1** Vývoj pevnosti cementu v tlaku v závislosti na použitém cementu a pevnostní třídě [1-5].
- Graf 3-2** Porovnání pevnosti v tlaku betonů různého stáří, velikosti vodního součinitele a dávkování superplastifikátoru [1-6].
- Graf 3-3** Nárůst hydratačního tepla v závislosti na čase a použití příměsí [1-6].
- Graf 3-4** Porovnání modulů pružnosti betonu nasyceného vodou s betonem neošetřovaným (28 denní hodnoty) [3-3].
- Graf 3-5** Porovnání modulů pružnosti betonu nasyceného vodou s betonem neošetřovaným (90 denní hodnoty) [3-3].
- Graf 4-1** Schéma zatěžování zkušebního tělesa [1-8]
- Graf 6-1** Vývoj pevnosti betonu v tlaku (průměrné hodnoty všech betonáží).
- Graf 6-2** Průběh zatěžovací zkoušky trámce T6 (referenční, 1. betonáž).
- Graf 6-3** Vývoj statického modulu pružnosti v čase (průměrné hodnoty všech betonáží).
- Graf 6-4** Porovnání dynamických modulů pružnosti v čase (průměrné hodnoty všech betonáží).
- Graf 6-5** Vývoj modulu pružnosti v čase (průměrné hodnoty všech betonáží).
- Graf 6-6** Vývoj statických modulů pružnosti na referenčních trámcích podle jednotlivých betonáží.
- Graf 6-7** Zaznamenané teploty uvnitř forem zkušebních těles během prvních 24 hodin.

10.3 Seznam tabulek

- Tab. 2-1** Doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu dle ČSN EN 206-1 [2-1].
- Tab. 2-2** Požadované hodnoty modulu pružnosti dle třídy betonu [1-8].
- Tab. 6-1** Vlastnosti čerstvého betonu dle jednotlivých míchaček a betonáží.
- Tab. 6-2** Výsledky měření na krychlích- 1. betonáž.
- Tab. 6-3** Výsledky měření na krychlích- 2. betonáž.
- Tab. 6-4** Výsledky měření na krychlích- 3. betonáž.
- Tab. 6-5** Údaje o referenčních zkušebních trámcích.
- Tab. 6-6** Údaje o chlazených zkušebních trámcích.

- Tab. 6-7** Posouzení splnění kritéria na přesnost odhadnuté pevnosti $\pm 20\%$ (referenční trámce).
- Tab. 6-8** Posouzení splnění kritéria na přesnost odhadnuté pevnosti $\pm 20\%$ (chlazené trámce).
- Tab. 6-9** Vyhodnocené moduly statického modulu pružnosti.
- Tab. 6-10** Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného ultrazvukovou metodou- referenční trámce.
- Tab. 6-11** Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného ultrazvukovou metodou- chlazené trámce.
- Tab. 6-12** Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného rezonanční metodou- referenční trámce.
- Tab. 6-13** Hodnoty dynamického modulu pružnosti stanoveného rezonanční metodou- chlazené trámce.