



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV PROVZDUŠNĚNÍ A OŠETŘOVÁNÍ NA VÝVOJ MODULU PRUŽNOSTI BETONU

INFLUENCE OF AIR ENTRAINMENT AND CURING ON DEVELOPMENT OF ELASTIC MODULUS
OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADKA BARTULÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. RADKA BARTULÍKOVÁ
Název	Vliv provzdušnění a ošetřování na vývoj modulu pružnosti betonu
Vedoucí diplomové práce	Ing. Dalibor Kocáb
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Schmidt, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.
Anton, O. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2002.
Aïtcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.
Collepardi, M.: Moderní beton.
Pytlík, P.: Technologie betonu.
Bajza, A.; Rouseková, I.: Technológia betónu.
De Schutter, G.; Bartos, P.J.M.; Domone, P.; Gibbs, J.; Hela, R.: Samozhutnitelný beton
Newman, J.: Advanced concrete technology – Processes.
Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.
Neville, A.M.: Properties of concrete.
Normy ČSN EN 206-1, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN ISO 6784,
ČSN EN 13760, ČSN EN 1992-1, CEB FIB 1990, Model B3normy na výpočet dotvarování

Zásady pro vypracování

Teoretická část: rešerše pramenů – vliv počátečních podmínek (ošetřování v rané fázi) a míry provzdušnění 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 provzdušnění a způsobu ošetřování na dlouhodobý vývoj modulu pružnosti betonu v tlaku/tahu. Výroba zkušebních těles – hranolů 100×100×400 mm a 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. Provedení teoretického výpočtu závislosti dotvarování betonu na hodnotě modulu pružnosti dle různých předpisů a srovnání teoretických průběhů dotvarování. Porovnání přístupů k výpočtu dotvarování dle jednotlivých předpisů, výhody a nevýhody jednotlivých modelů, zhodnocení vhodnosti použitých modelů pro daný typ betonu.

Práci se zkušebními lisy provede osoba k tomu oprávněná.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Dalibor Kocáb
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem různých činitelů na pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti. Zejména se soustředí na vliv ošetřování v rané fázi a provzdušnění betonu. Součástí práce je vyhodnocení laboratorního měření, které bylo prováděno na normových krychlích a normových trámčích. Sledován byl vývoj modulů pružnosti v čase až do jeho stáří 730 dní s ohledem na provzdušnění a způsob ošetřování betonu. Druhá část experimentu se zabývá srovnáním teoretických průběhů dotvarování v závislosti na hodnotě modulu pružnosti dle různých předpisů. Opět je zde zohledněno provzdušnění a vliv počátečních podmínek.

Klíčová slova

Pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti betonu, dynamický modul pružnosti, statický modul pružnosti, rezonanční metoda, ultrazvuková impulzová metoda, stáří betonu, způsob ošetřování, provzdušnění betonu, dotvarování, Model B3, ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2, CEB - FIP Model Code 1990

Abstract

Master's thesis deals with influence of various factors on the concrete compressive strength and modulus of elasticity. This work concentrates mainly on the influence of early curing and air entrainment of concrete. One part of this work is the evaluation of laboratory measurement, which was carried out on cubes of standard and norm prisms. The development of elastic moduli was monitored in time to 730 days of age with respect to air entrainment and curing conditions. The second part of the experiment deals with a comparison of theoretical creep curves depending on the value of the modulus of elasticity based on different standards. Again, the air entrainment effect and influence of initial conditions are reflected.

Keywords

Concrete compressive strength, modulus of elasticity of concrete, dynamic modulus, static modulus, the resonance method, ultrasonic impulse method, concrete age, curing conditions, aerated concrete, creep, Model B3, ČSN EN 1992-1-1 Eurocode 2, CEB - FIP Model Code 1990

Bibliografická citace VŠKP

BARTULÍKOVÁ, Radka. *Vliv provzdušnění a ošetřování na vývoj modulu pružnosti betonu*. Brno, 2013. 105 s., příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.

Prohlášení:

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

V Brně dne 3.1.2013

.....
podpis autora
Radka Bartulíková

Bc. Radka Bartulíková

Prohlášení:

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

V Brně dne 3.1.2013

.....
podpis autora
Bc. RADKA BARTULÍKOVÁ

Bc. Radka Bartulíková

Poděkování:

Na tomto místě bych ráda poděkovala svým blízkým, kteří mě po celou dobu studia podporovali a všem, kteří mi pomáhali při vypracování diplomové práce. Děkuji především vedoucímu diplomové práce Ing. Daliborovi Kocábovi za kvalitní odborné konzultace a za zapůjčení odborné literatury. Dále bych ráda poděkovala Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D, za cenné rady a připomínky. Děkuji také firmě OHL ŽS, a.s., která umožnila přístup na staveniště a odběr betonu pro výrobu vzorků.

Bc. Radka Bartulíková

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Cíl práce	12
3.	Teoretická část.....	13
3.1	Mechanické vlastnosti betonu.....	13
3.1.1	Pevnost.....	13
3.1.2	Zkoušení pevnosti betonu	13
3.2	Činitelé ovlivňující pevnost betonu v tlaku	16
3.2.1	Vodní součinitel	16
3.2.2	Pevnost cementové pasty.....	17
3.2.3	Zhutnění čerstvého betonu.....	17
3.2.4	Provzdušnění.....	18
3.2.5	Přísky	20
3.2.6	Příměsi	21
3.2.7	Kamenivo.....	21
3.3	Deformace betonu	22
3.3.1	Deformační diagram.....	22
3.3.2	Poissonovo číslo.....	23
3.4	Přetvárné vlastnosti – modul pružnosti	24
3.4.1	Statický modul pružnosti.....	28
3.4.2	Dynamický modul pružnosti.....	30
3.5	Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu a jeho variabilitu.....	35
3.5.1	Modul pružnosti použitého kameniva	35
3.5.2	Provzdušnění.....	36
3.5.3	Vlastnosti pojivové a maltové složky.....	37
3.5.4	Vliv ošetřování betonu a vodního součinitele.....	38
3.5.5	Další vlivy.....	38

3.6	Vztah mezi pevností betonu v tlaku a modulem pružnosti.....	39
3.7	Přetvárné vlastnosti – dotvarování	42
3.8	Činitelé ovlivňující dotvarování betonu	46
3.8.1	Složení betonu a vlastnosti jednotlivých složek	46
3.8.2	Relativní vlhkost okolního prostředí	48
3.8.3	Vliv teploty	49
3.8.4	Vliv napětí a pevnosti.....	50
3.8.5	Vztah mezi dotvarováním a časem.....	51
3.9	Způsoby výpočtu dotvarování.....	51
4.	Experimentální část.....	59
4.1	Porovnání statických modulů pružnosti	63
4.2	Porovnání dynamických modulů pružnosti	66
4.2.1	Výsledky rezonanční metody.....	66
4.3	Porovnání průběhu dotvarování	78
5.	Závěr	85
6.	Použitá literatura.....	86
7.	Seznam obrázků.....	90
8.	Seznam tabulek.....	94
9.	Seznam zkratk.....	96
10.	Přílohy	100

1. Úvod

Beton je konstrukční materiál, proto fyzikálně mechanické vlastnosti, a především pevnost, patří mezi jeho nejsledovanější charakteristiky. Obecně je pevnost posuzována jako schopnost vzdorovat vzniklému napětí a odpovídá maximálnímu napětí, které materiál ve formě vzorku určitého geometrického tvaru přenesení do okamžiku porušení. Podle druhu napětí, kterému je beton vystaven až do mezní hodnoty, rozlišujeme pevnosti a označujeme je - jako tlakovou, tahovou či ohybovou. Hlavní vlastnost betonu je jeho pevnost v tlaku [1], [13].

S fyzikálně mechanickými vlastnostmi betonu souvisí jeho přetvárné vlastnosti. Nejdůležitější z nich je zejména modul pružnosti. Jeho vliv na chování stavebních konstrukcí je významný a to zejména u subtilnějších konstrukcí. Při návrhu konstrukce a pevnostní třídy betonu se projektant řídí normou ČSN EN 1992-1-1 [2], kde jsou uvedeny směrné hodnoty modulu pružnosti, avšak dosažení požadovaných hodnot modulu není automatické [9], [24].

V praxi se ukazuje, že směrné hodnoty modulu pružnosti z normy ČSN EN 1992-1-1 [2] se od hodnot naměřených na zkušebních tělesech velmi liší. Norma návrhovou hodnotu nespecifikuje, uvádí jen přibližné (směrné) hodnoty a možnost úpravy modulu dle kameniva. Přitom je právě vliv modulu pružnosti na chování stavebních konstrukcí, zvláště pak pro prvky náchylné na průhyb, významný. Bohužel variabilitou modulu pružnosti se norma příliš nezabývá [9], [7], [25].

Na hodnotu modulu pružnosti betonu mají vliv zejména modul pružnosti hrubého kameniva betonu, podíl objemu kameniva k objemu betonu a tím i obsah vody neboli vodní součinitel. Vliv mají také vlastnosti maltové, pojivové složky, způsob ošetřování a provzdušnění betonu. Z důvodu snadnější zpracovatelnosti se v dnešním stavebnictví používají nové technologie, plastifikátory a superplastifikátory, které mají za určitých podmínek také negativní dopad na výsledný modul pružnosti [11], [7], [25].

Další neméně důležitou přetvárnou vlastností je dotvarování betonu. Pod pojmem dotvarování rozumíme trvalé změny objemu betonu nebo jeho tvaru způsobené dlouhodobým zatížením. Můžeme ho definovat jako postupné zvyšování přetvoření za trvalého napětí. Protože toto zvýšení může být několikrát větší než přetvoření od napětí při zatížení, má dotvarování značný význam v konstrukcích [23], [13].

2. Cíl práce

Pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti betonu jsou charakteristiky, které se navzájem ovlivňují.

Cílem této diplomové práce bylo nashromáždit co nejvíce dostupných informací o faktorech ovlivňujících pevnost betonu v tlaku, modul pružnosti betonu a vztah mezi nimi. Důležitými faktory byla míra provzdušnění a vliv počátečních podmínek (ošetřování v rané fázi). Práce se také věnuje problematice dotvarování betonu. Na rešerši pramenů navazuje praktická část, ve které byl sledován vývoj statických a dynamických modulů pružnosti betonu v čase. Hodnocení se zabývalo vlivem provzdušnění betonu a ošetřování na tento vývoj. Následně byl proveden teoretický výpočet dotvarování betonu v závislosti na hodnotě modulu pružnosti dle různých předpisů a vyhodnocení vhodnosti jednotlivých modelů.

Diplomová práce se zabývá vlivem různých činitelů na pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti. Zejména se soustředí na vliv ošetřování v rané fázi a provzdušnění betonu. Součástí práce je vyhodnocení laboratorního měření, které bylo prováděno na normových krychlích a normových trámcích. Sledován byl vývoj modulů pružnosti v čase až do jeho stáří 730 dní s ohledem na provzdušnění a způsob ošetřování betonu. Druhá část experimentu se zabývá srovnáním teoretických průběhů dotvarování v závislosti na hodnotě modulu pružnosti dle různých předpisů. Opět je zde zohledněno provzdušnění a vliv počátečních podmínek

3. Teoretická část

3.1 Mechanické vlastnosti betonu

Beton je jako konstrukční materiál posuzován hlavně z hlediska pevnosti. Právě ta je nejčastěji ukazatelem jeho kvality.

3.1.1 Pevnost

Obecně je pevnost posuzována jako schopnost vzdorovat vzniklým napětím. Pevnost betonu je tedy mezní napětí σ v betonu, při kterém dojde ke zlomu, tj. ke globálnímu porušení soudržnosti [5], [25]. Neboli, jak již bylo zmíněno v úvodu práce, pevnost f odpovídá maximálnímu napětí σ , které je materiál v podobě zkušebního tělesa určitého geometrického tvaru schopen přenést až do okamžiku porušení [1].

V praxi je měřena zejména pevnost v tlaku f_c , někdy bývá určována i pevnost v tahu stanovená zkouškou v příčném či prostém tahu, anebo zkouškou v tahu ohybem. Měření pevnosti v tahu je v případě betonu obtížné. Proto se často pevnost v tahu betonu odvozuje z hodnoty pevnosti v tlaku [1], [5].

Hodnota tlakové pevnosti závisí na tvaru zkušebního vzorku, používají se válce nebo krychle. Válcová pevnost dané betonové směsi $f_{ck,cyl}$, měřená na standardních válcích o průměru podstavy 150 mm a poměru výška/průměr = 2, je nižší o 20 % než je pevnost krychelná $f_{ck,cube}$, která je zjištěna na krychlích o hraně 150 mm [1], [25].

3.1.2 Zkoušení pevnosti betonu

Zkoušení pevnosti ztvrdlého betonu se provádí na zkušebních tělesech z jádrových vývrtů nebo na vzorcích ve tvaru krychle, hranolu či válce. Zkoušení je destruktivní, tj. dojde ke zničení vzorku. Připouští se i nedestruktivní měření, ale v tom případě jde pouze o odhad pevnosti. Nejčastěji se v praxi používají zkušební vzorky tvaru krychle o rozměrech 150×150×150 mm, válce s průměrem 150 mm, s výškou 300 mm a hranoly 100×100×400 mm nebo 150×150×600 mm.

Vzorky se mají při zkoušce pevnosti v tlaku zatěžovat rovnoměrně a bez nárazů dle normy ČSN EN 12390-3 [26]. Zatěžování se zvyšuje konstantní rychlostí 0,6 MPa/s ± 0,2 MPa/s plynule a nepřetržitě až do porušení. Pevnost v tlaku je dána vztahem [6]:

$$f_c = F / A_c \quad (3-1)$$

kde f_c je pevnost v tlaku (MPa, N/mm²), F je maximální síla při porušení vzorku (N) a A_c je plocha průřezu zkušebního vzorku, na kterou působí zatížení v tlaku (mm²). Vypočítaná pevnost v tlaku se udává s přesností na 0,1 MPa [6], [25].

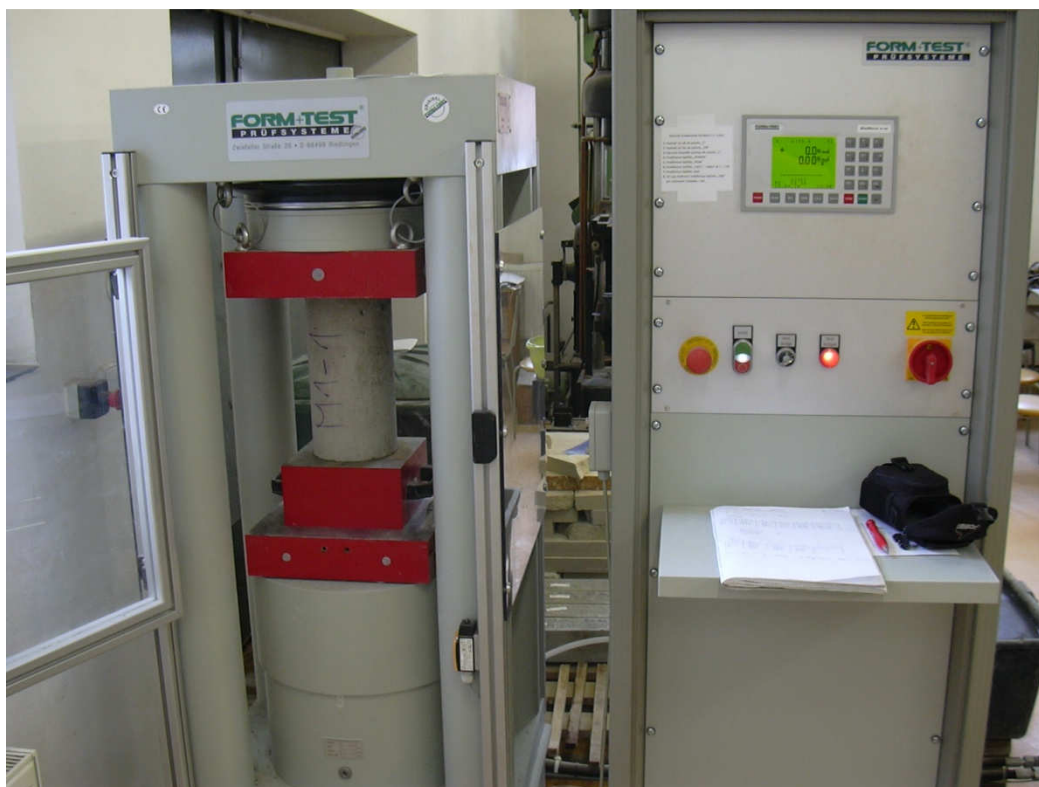
Pevnosti stanovené na krychlích mají většinou větší hodnotu než pevnosti stanovené na válcích, a to z důvodu rozdílného poměru výška/příčné rozměry podstavy, což má za následek jiné vnitřní porušování při zatěžování mezi deskami lisu. Zkoušku krychelné pevnosti můžeme vidět na Obr. 1. V dostupné literatuře je uvedeno, že válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ je 0,8 násobek pevnosti krychelné $f_{ck,cube}$ [1], [25].

$$f_{ck,cyl} = 0,80 f_{ck,cube} \quad (3-2)$$



Obr. 1 Zkouška krychelné pevnosti betonu v tlaku [28]

Zkoušení válcové pevnosti betonu v tlaku vidíme na Obr. 2. U měření pevnosti, kdy je použit válec s nižším poměrem výška/průměr, je rozdíl mezi pevností krychelnou a válcovou nižší. V Tab. 1 jsou uvedeny korekce pro pevnosti naměřené na válcích, které mají různý poměr výšky a průměru ($h/d = 2$) [1].



Obr. 2 Zkouška válcové pevnosti betonu v tlaku [28]

Tab. 1 Přepočtní součinitele pro válcovou tlakovou pevnost v závislosti na velikosti poměru
výška / průměr (h/d) [1]

h/d	ASTM-C 42-90	BS 1881:PART 120 1983
2,00	1,00	1,00
1,75	0,98	0,97
1,50	0,96	0,92
1,25	0,93	0,87
1,00	0,87	0,80

V souladu s British Standards [16] platí, že pokud má válec poměr $h/d = 1$, je třeba jeho pevnost vynásobit korekčním faktorem. Jeho výsledná hodnota bude odpovídat pevnosti na válci s $h/d = 2$, takže na válci s $h/d = 1$ bude zjištěna stejná hodnota pevnosti jako na krychli [1], [25].

3.2 Činitelé ovlivňující pevnost betonu v tlaku

Beton je složitý kompozitní materiál, jehož chování při působení vnějších vlivů nezávisí jen na chování jednotlivých složek, ale také na jejich vzájemném spolupůsobení. Jelikož v pevných látkách je mezi pevností a pórovitostí nepřímá závislost, je vhodné posoudit významnost pórovitosti dílčích složek betonu. Přírodní kamenivo je většinou hutné, málo pórovité s výrazně vyšší pevností než beton. Naproti tomu pevnost cementového kamene má ve většině případů nižší hodnotu než pevnost obvyčejného betonu. Pevnost betonu je ovlivněna pórovitostí cementové složky a tzv. přechodovou zónou mezi cementovým kamenem a zejména hrubým kamenivem [6].

Důležitým ukazatelem určujícím právě pórovitost cementové složky a tím i pevnosti betonu je vodní součinitel. Výrazně však pevnost ovlivňuje také kvalita cementu, přísady, příměsi, zhutnění betonu, stupeň hydratace a způsob ošetřování [14], [6], [25].

3.2.1 Vodní součinitel

Rozhodujícím parametrem pro beton je vodní součinitel, od kterého jsou odvozeny jeho pevnosti. Základní vztah pevnosti betonu je proto často definován různými empirickými závislostmi, které jsou v určitých mezích platnosti a pro určité parametry složení betonu [5], [13].

Po uvažované době ošetřování závisí pevnost betonu za normálních podmínek na vodním součiniteli a stupni zhutnění betonu. Vyšší vodní součinitel je příčinou nižší pevnosti betonu a současně zlepšením zpracovatelnosti čerstvého betonu [5], [25]. Za důkladně zhutněný považujeme beton s obsahem vzduchu okolo 1 %. Abrams v roce 1919 odvodil nepřímou závislost mezi pevností v tlaku zhutněného betonu a vodním součinitelem, která je dána vztahem [6]:

$$f_c = A / B^{1,5w} \quad (3-3)$$

kde f_c je pevnost v tlaku, A je experimentální konstanta, která vyjadřuje pevnost betonu při nulovém vodním součiniteli a B je konstanta závisící na vlastnostech použitých materiálů, stáří a způsobu ošetřování betonu a w je hmotnostní vodní součinitel [6].

$$w = V / C \quad (3-4)$$

kde V je hmotnost (nebo také objem) záměsové vody a C je hmotnost cementu. Při velmi nízkých hodnotách vodního součinitele již bývá beton těžko zhutnitelný, což má za následek vytvoření určitého množství větších mezer a tedy zvýšení pórovitosti. Při použití účinných

plastifikačních přísad a vhodném způsobu zhutnění se dá i při relativně nízkém vodním součiniteli vyrobit beton s velmi vysokou pevností a hutnou strukturou [5].

Vodní součinitel betonu ovlivňuje pevnost betonu, ale také hutnost cementové složky a přechodové zóny. Skutečnost, že u betonů s vysokou pevností a vodním součinitelem menším než 0,3 je možné dosáhnout velkých nárůstů pevnosti, je nejčastěji připisována výraznému zvýšení pevnosti přechodové zóny při velmi nízkých vodních součinitelích. Můžeme to odůvodnit tím, že při snižování vodního součinitele se zmenšuje velikost krystalů hydroxidu vápenatého [6], [25].

3.2.2 Pevnost cementové pasty

Pevnost ztvrdlé cementové pasty do jisté míry ovlivňuje pevnost betonu. V polovině minulého století T. C. Powers podrobně studoval tuto závislost a podle jeho teorie [1] je pevnost ztvrdlé cementové pasty $f_{cu/c}$ funkcí vodního součinitele pro dané hodnoty stupně hydratace α (0,50 – 0,75 – 1,0). Rovnice je ve tvaru:

$$f_{cu/c} = 250[0,6790\alpha / (0,3175\alpha + w/c)]^{-3} \quad (3-5)$$

Pevnost ztvrdlé cementové pasty není z praktického hlediska tak důležitá jako pevnost hotového betonu, stejně tak není užitečné znát pevnosti betonu v tlaku pro různé stupně hydratace, ale pevnosti betonu v tlaku pro různé pevnostní třídy cementu [1].

3.2.3 Zhutnění čerstvého betonu

Pevnost betonu v tlaku je ovlivněna zhutněním. Ke snížení pevnosti Δf_c dojde, pokud je stupeň zhutnění d_c menší než 1. Snížení pevnosti je vyjádřeno rovnicí [1]:

$$\Delta f_c = 100(f_{fc} - f_{ic}) / f_{fc} = 500(1 - d_c) \quad (3-6)$$

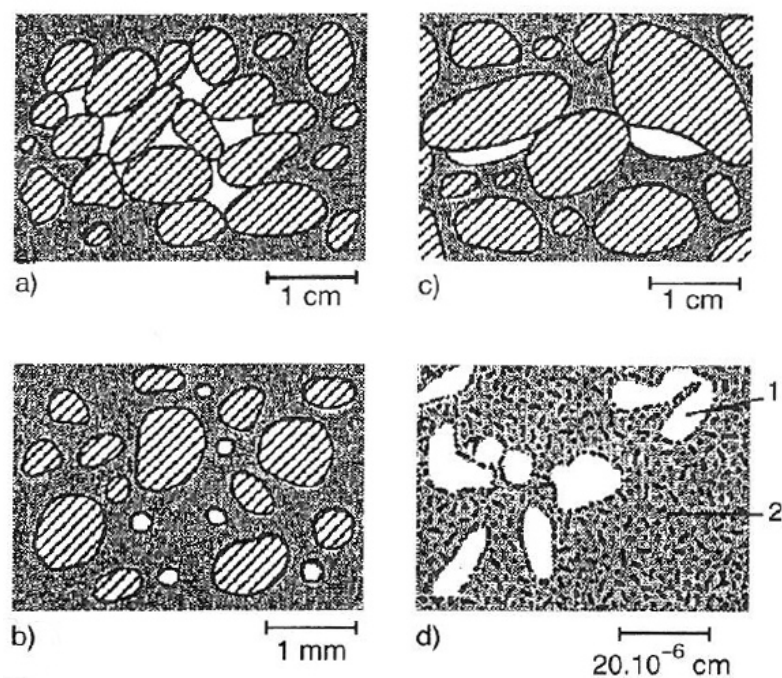
kde f_{fc} je tlaková pevnost dokonale zhutněného betonu a f_{ic} je tlaková pevnost nedokonale zhutněného betonu. Rovnice může být použita i pro ztráty pevnosti Δf_c vývrtů z konstrukce vůči dokonale zhutněnému betonu ve vzorcích na základě objemových hmotností odvrtaného betonu d a dokonale zhutněného betonu d_0 stanovené na zkušebním tělese. Stupeň zhutnění je dán vztahem [1], [25]:

$$d_c = d / d_0 \quad (3-7)$$

Ve srovnání s dokonale zhutněným betonem je ztráta pevnosti betonu tím vyšší, čím nižší je stupeň zhutnění d_c . Při každém snížení stupně zhutnění d_c o 0,01 (o každé procento) je pevnost snížena o 5 % [1].

3.2.4 Provzdušnění

Pro svou mrazuvzdornost se v dnešní době provzdušněné betony používají v konstrukcích dopravních staveb, jako jsou pilíře, římsy nebo protihlukové stěny. Mrazuvzdorností se rozumí schopnost betonu, který je ve vodou nasyceném stavu, odolávat opakovaným cyklům zmrazování a rozmrazování. Právě díky provzdušnění betonu se v cementovém kameni uměle vytvoří uzavřené vzduchové póry. Vzhledem k významu pórovitosti působí provzdušnění paradoxně. Provzdušňovací póry nejsou zaplněny vodou a slouží jako kompenzační prostor, kde se může zvětšovat objem ledu o 9 % (při 0 °C) až 13 % (při -20°C) [13]. Pro srovnání velikosti provzdušňovacích pórů je uveden Obr. 3 [13].



Obr. 3 Schematické znázornění pórů betonu [13]

a) technologické póry, b) provzdušňovací póry, c) sedimentační póry, d) kapilární póry v cementovém gelu, 1 – kapilární póry, 2 – cementový gel s gelovými póry

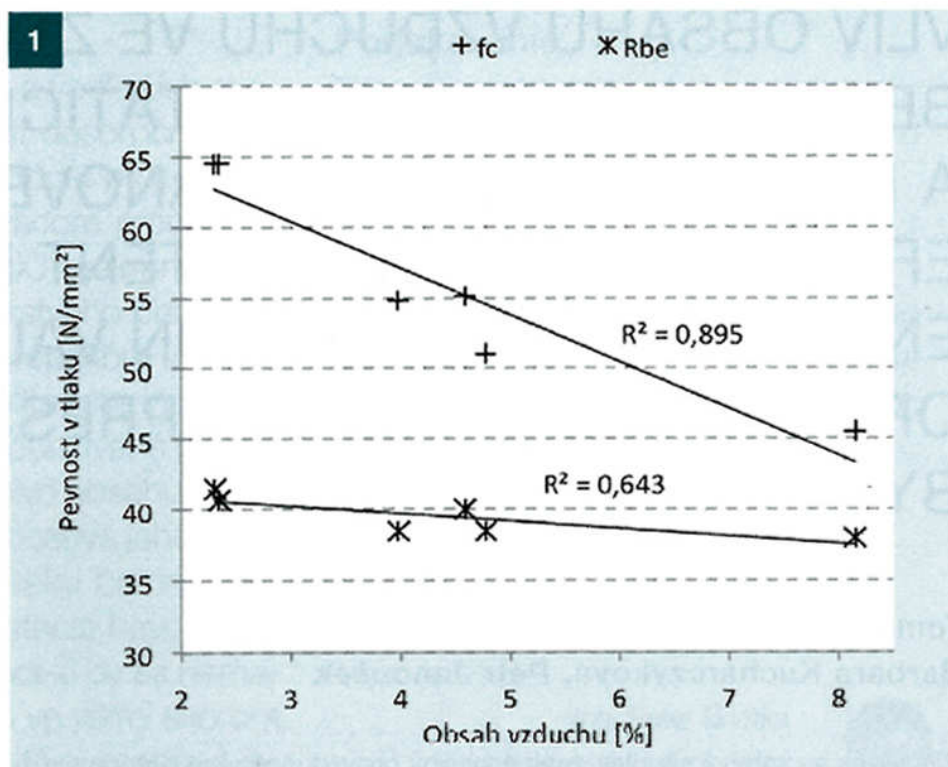
Na obrázku jsou porovnány technologické póry, způsobené nedostatečným zhutněním čerstvého betonu, sedimentační póry vzniklé sedimentací jemných částic pod plochou zrna kameniva (tato dutina je vyplněna vodou a následně ve ztvrdlém betonu vysušena), kapilární

póry, které souvisejí s vodním součinitelem a provzdušňovací póry. Provzdušňovací póry o průměru 50 – 300 μm tvoří u provzdušněného betonu (podle velikosti maximálního zrna kameniva) 4 až 6 % objemu betonu [13].

Při návrhu provzdušněných betonů se však nesmí opomíjet vliv obsahu vzduchu na fyzikálně mechanické vlastnosti. Vyšší obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu zvyšuje pórovitost cementového kamene a tím snižuje jeho pevnost. Zároveň se předpokládá, že touto skutečností bude snížena soudržnost mezi cementovým kamenem a povrchem kameniva. Vnesení pórů provzdušněním do struktury cementového kamene má za následek snížení hodnoty pevnosti betonu v tlaku až o 20 % [1], [27].

Ve většině případů určuje vodní součinitel pórovitost cementové matrice. Pokud je však v betonu vzduch z důvodu přítomnosti provzdušňovací přísady nebo díky nedostatečnému zhutnění čerstvého betonu, zvyšuje se celková pórovitost systému a snižuje se jeho pevnost. Betony s vysokou pevností, jež jsou bohatší na cement, mají výrazně větší pokles pevnosti s narůstajícím provzdušněním. Oproti tomu betony s nižší pevností, které jsou chudší na cement, vykazují jen malý pokles pevnosti, případně její částečný nárůst [6], [25].

Dané problematice se věnují autoři článku [27], kde je hodnocen vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na statický modul pružnosti a právě na pevnost betonu v tlaku. Ačkoli byla pevnost betonu stanovena nedestruktivní metodou, autoři došli k jednoznačnému závěru: *„Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že teoretické předpoklady o vlivu obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu na jeho charakteristiky byly potvrzeny. Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu se snižuje pevnost betonu v tlaku nezávisle na tom, zda byla použita destruktivní nebo nedestruktivní metoda (Obr. 4)“* [27].



Obr. 4 Závislost pevnosti betonu v tlaku na obsahu vzduchu, Rbe značí pevnost v tlaku stanovenou NDT metodou a f_c je pevnost betonu v tlaku stanovená destruktivně [27]

Vlivu provzdušnění na pevnost betonu v tlaku se věnuje i příspěvek autorů Kocáb D. a kolektiv [18], kde mimo jiné autoři určují pevnosti na dvou sadách vzorků normových krychlí. První sada krychlí je vyrobena z betonu C 30/37 s procentuálním množstvím vzduchu 9,5 ~ 10 %. Druhá sada krychlí je vyrobena z betonu stejné pevnostní třídy s procentuálním množstvím vzduchu 2,2 ~ 2,3 %. Zkušební sada krychlí zhotovená z neprovzdušněného – běžného betonu dosáhla vyšších pevností. Krychelná pevnost provzdušněného betonu byla pouze, jak uvádí autoři příspěvku, 70,3 % z krychelné pevnosti neprovzdušněného betonu. Příčinou výrazného nepoměru je právě vysoké provzdušnění, čemuž odpovídá i relativně vysoký rozdíl objemových hmotností betonů. Ten je 170 kg.m^{-3} [18], [25].

3.2.5 Přísady

Samy o sobě ovlivňují pevnost betonu nevýrazně [6]. Jejich vliv se projeví, pokud ovlivní vodní součinitel nebo pórovitost betonu. Jednou z nich je již dříve zmíněná provzdušňovací přísada, která snižuje pevnost betonu zvýšením pórovitosti a umožňuje, díky svému plastifikačnímu efektu, částečné snížení dávky záměsové vody. Toto snížení může

zvýšit pevnost betonu s nízkou dávkou cementu při konstantní konzistenci čerstvého betonu [6].

Superplastifikátory mohou zvýšit pevnost betonu i při stejném vodním součiniteli v důsledku vyššího stupně hydratace, kterou umožňuje lepší dispergace částic cementu a zmenšení obsahu větších pórů. V posledních letech došlo k rozšíření použití plastifikátorů z důvodu větších nároků na vyšší pevnosti betonu. Pevnost betonu v tlaku výrazně vzrostla, ale společně s tím se začalo projevovat smrštění od samovysychání. Jeho význam u betonů s nízkým vodním součinitelem roste, v jeho důsledku dochází k vývoji mikrotrhlin a ty ovlivňují některé mechanické vlastnosti betonu [24], [6]. Přísady tedy mohou zvyšovat nebo snižovat rychlost hydratace cementu a tím i rychlost vývinu pevnosti. Snížením rychlosti vývinu počáteční pevnosti obvykle získáme zvýšení dlouhodobé pevnosti betonu a naopak [5], [25].

3.2.6 Příměsi

Použitím minerálních příměsí do betonu dojde k modifikaci vlastností a struktury cementové složky betonu a ke změně vlastností přechodové zóny. Obvykle se zpomaluje vývin počáteční pevnosti a je dosaženo vyšší dlouhodobé pevnosti. Např. použitím popílků [6], [15]. Popílek má vysoký obsah oxidu vápenatého CaO . Při použití nevhodné kvality nebo vyšší dávky popílku do betonu dochází díky oxidu vápenatému k objemovým změnám čerstvého a tuhnoucího betonu, k vnitřnímu napětí s rozvojem trhlin v cementovém tmelu a k celkovému snížení pevnosti ztvrdlého betonu zejména v tahu za ohybu [15]. Naopak použitím křemičitanového úletu se zvýší pevnost betonu. Důvodem tohoto zvýšení pevnosti je pucolánová aktivita (reakce s hydroxidem vápenatým uvolněným při hydrataci kalciumsilikátů) a také filerový efekt (vyplnění vzdušných pórů mezi zrny cementu). Tento kombinovaný efekt snižuje pórovitost přechodové zóny v porovnání s betonem bez příměsí, čímž zvyšuje pevnost.

3.2.7 Kamenivo

Na pevnost obyčejného betonu má výrazný vliv textura a velikost maximálního zrna kameniva. Jelikož je pevnost kameniva výrazně vyšší než cementové pasty, je její vliv malý. Povrch kameniva ovlivňuje jeho soudružnost s cementovou složkou. Ovlivňuje více pevnost v tahu a pevnost v tahu za ohybu než pevnost betonu v tlaku. Při nízkém vodním součiniteli se použitím drceného kameniva dosahuje vyšších pevností z důvodu lepší soudržnosti. Použitím většího maximálního zrna kameniva je ovlivněna pevnost betonu různými směry. Jestliže

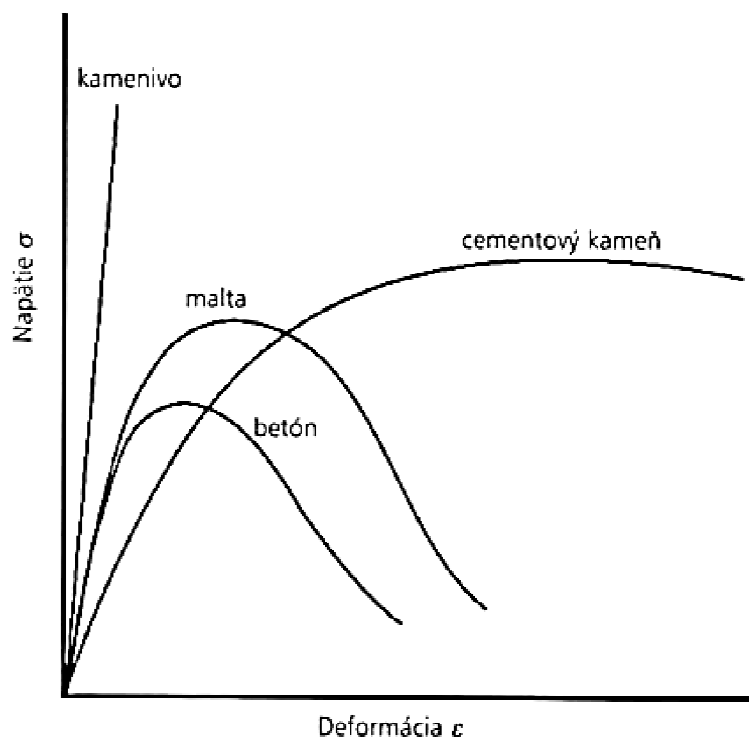
použijeme větší zrna kameniva, je celkový specifický povrch kameniva menší a tím je menší i jeho soudržnost s cementovou složkou. To má za následek menší pevnost betonu. Velká zrna kameniva snižují objemové změny u cementového tmele, což v něm může vyvolat dodatekové napětí. Ty vedou k oslabení betonu. Tyto negativní vlivy se však dají vyrovnat snížením dávky vody potřebné k dosažení požadované konzistence. Proto výsledný efekt použití větších zrn kameniva může být malý [6], [25].

3.3 Deformace betonu

Beton je jako složitý kompozitní materiál při působení vnějších vlivů závislý nejenom na chování jeho jednotlivých složek, ale také na jejich vzájemném působení [5], [13].

3.3.1 Deformační diagram

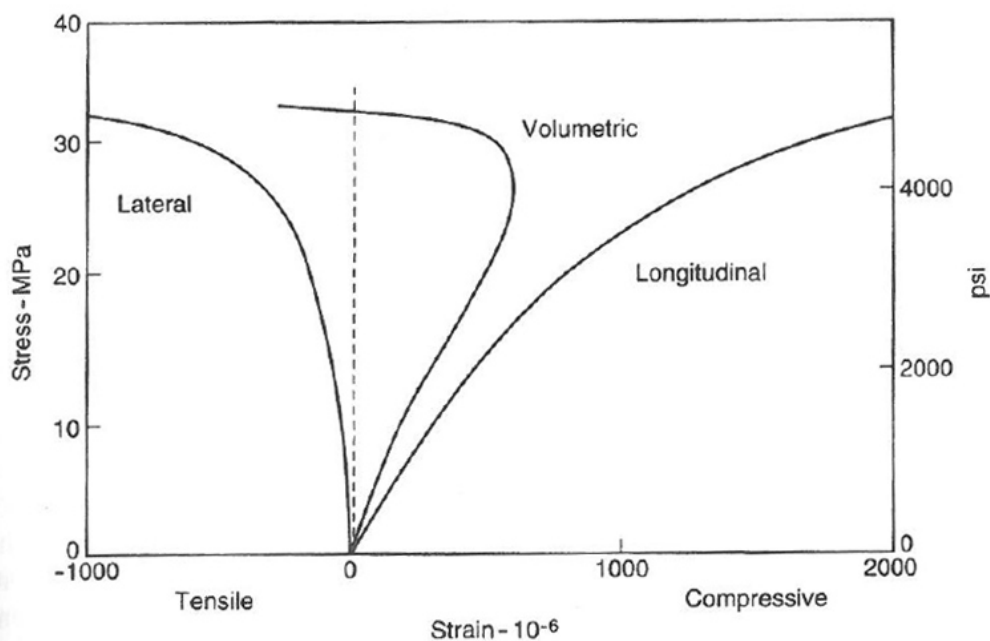
Toto vzájemné působení a jeho složitost jsou zobrazeny na Obr. 5, kde je znázorněna charakteristická závislost mezi napětím a deformací betonu a jeho složek [6], [25]. Deformace, projevující se obvykle stlačením a protažením tělesa, dělíme na vratné (pružné) a nevratné (plastické). Vratné deformace charakterizujeme modulem pružnosti, teplotní roztažností a smrštěním betonu způsobeným migrací vlhkosti. Mezi nevratné deformace patří dotvarování, které je způsobeno působením dlouhodobého zatížení a částečně i smrštění, které vyvolává karbonatace a hydratace [5], [13].



Obr. 5 Charakteristické závislosti mezi napětím a deformací kameniva, cementového kamene, malty a ztvrdlého betonu [6]

3.3.2 Poissonovo číslo

Jednoosé zatížení působící na konkrétním vzorku vytváří podélné přetvoření ve směru aplikovaného zatížení a zároveň příčná přetvoření (s opačným znaménkem). Deformace se projevuje právě stlačením a protažením tělesa [23]. Poměrem příčné a podélné deformace je charakterizován součinitel příčného přetvoření známý jako Poissonovo číslo (znaménko je ignorováno) [5]. Pro izotropní lineární a elastické materiály je Poissonovo číslo konstantní, ale v betonu může být ovlivněno specifickými podmínkami. Avšak pro napětí, pro které je vztah mezi napětím a podélným přetvořením lineární, je jeho hodnota přibližně konstantní. V závislosti na vlastnostech použitého kameniva se Poissonovo číslo betonu pohybuje v rozmezí od 0,15 do 0,22 pro poměr příčného roztažení k podélnému stlačení. Pro poměr příčného stlačení k podélnému roztažení betonu dosahuje hodnot asi 0,125 až 0,08 [5], [23]. V literatuře [23] je uvedeno, že zkoušky na nasycené maltě ukázaly, že hodnota Poissonova čísla je vyšší při vyšších rychlostech přetvoření.



Obr. 6 Křivky závislosti podélné, příčné a objemové deformace betonu od tlakového zatížení [23]

Obr. 6 znázorňuje typickou závislost mezi podélnou a příčnou deformací betonových vzorků zatížených osovým tlakovým zatížením až do momentu porušení. Kromě toho je

znázorněno objemové přetvoření. Až přibližně do 70 % lomového zatížení roste stejnou rychlostí podélná i příčná deformace. Při vyšších napětích však dochází k rychlejšímu růstu příčné deformace. Blízko před porušením se postupná kontrakce vzorků zastaví a objem příčných deformací začne narůstat. Tento nárůst je připisován vznikajícím počátečním mikrotrhlinám v betonu a stále se zvětšujícím trhlinám na rozhraní kameniva a cementové složky. Napětí, při kterém beton začíná expandovat, se někdy označuje jako kritické. Poissonovo číslo má konstantní hodnotu, když příčná a podélná deformace narůstají stejnou rychlostí. Když však příčná deformace začne narůstat větší rychlostí než podélná, začne narůstat společně se zvyšujícím se zatížením i hodnota Poissonova čísla. Nárůst začíná všeobecně v rozpětí 70 až 90 % napětí při porušení [6], [23], [25].

3.4 Přetvárné vlastnosti – modul pružnosti

Ačkoli se zavedením normy ČSN EN 206-1 [8] dostaly do popředí, vedle pevnostních charakteristik, také trvanlivostní vlastnosti a zpracovatelnost betonu, v ústraní stále zůstávají přetvárné vlastnosti betonu, které jsou neméně důležité. Mezi tyto vlastnosti patří především statický modul pružnosti v tlaku. Ten však ve zmiňované normě týkající se specifikací vlastností a výroby betonu není vůbec uvažován [9], [25].

I když projektanti při současném vývoji navrhování výstavby betonových konstrukcí ví, že se hlavními stávají požadavky trvanlivosti, není běžné, aby v souladu s tím specifikovali příslušné požadavky na přetvárné vlastnosti betonu [25]. V článku [10] je zmíněna železobetonová deska, na které bylo zaznamenáno zvýšení průhybu až o 75 % při uvažování možné odchylky hodnoty modulu pružnosti o 30 % od její „tabulkové“ hodnoty – např. vlivem druhu kameniva a jeho vlastností [7]. Moderní trendy v současném stavitelství vedou ke stále subtilnějším konstrukcím. Vliv přetvárných charakteristik betonu na chování konstrukcí je tedy velmi významný [9], [25].

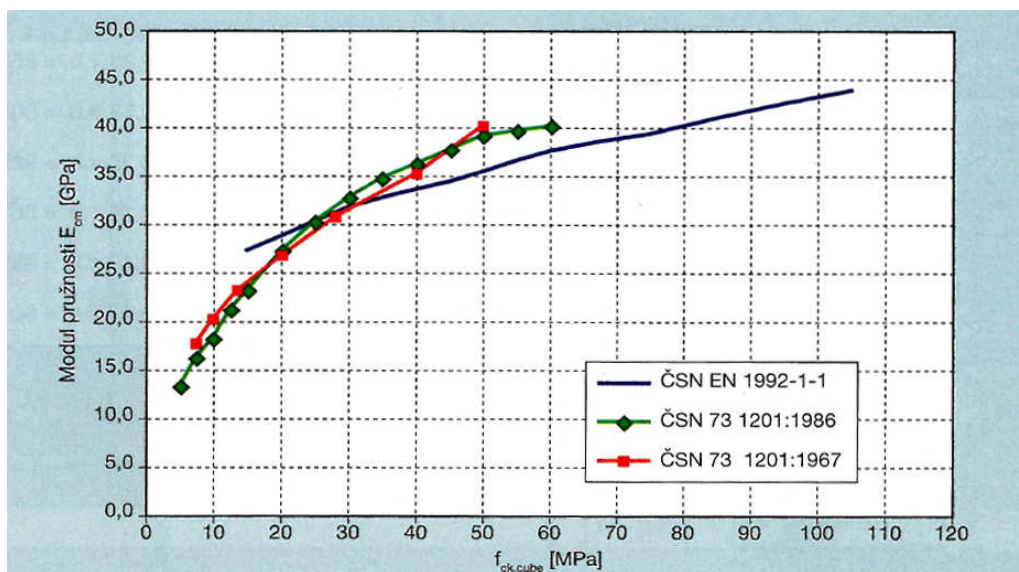
V dnešním stavebnictví jsou trendem zejména změny snižující energetické nároky na výrobu betonu, a tím i jeho vstupních složek (hlavně pak cementu) a použití betonů vyšších a pevností. Odběratelé betonu zase vyžadují neustálé zlepšování zpracovatelnosti betonu. Kladným důsledkem je kromě snížení pracnosti ukládky betonu i zlepšování pracovních a hygienických podmínek (hlavně pokud jde o hluk a vibrace). Usnadnění zpracovatelnosti má navíc pozitivní vliv i na některé výsledné parametry ztvrdlého betonu a tím i celé konstrukce, hlavně na hutnost, nepropustnost, dokonalé obalení výztuže a na pohledovost povrchů. Výše

uvedená hlediska mohou mít vliv na vztah mezi modulem pružnosti a pevností betonu v tlaku [11], [25].

Hodnota modulu pružnosti závisí do jisté míry na tom, jak je definován. V aktuálně používané normě ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] je modul pružnosti E_{cm} definován sečnovou hodnotou mezi napětím $\sigma_c = 0$ a $0,4 f_{cm}$ (pevnost betonu). Hodnoty uvedené v normě se považují za směrné pro obecné použití, u konstrukcí citlivých na deformace je třeba moduly pružnosti stanovit přesněji. Normové hodnoty vycházejí ze vztahu [24]:

$$E_m = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (3-9)$$

V článku [24] jsou hodnoty E_{cm} dle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] vyneseny do grafu (Obr. 7) Autoři použili pro srovnání křivky s hodnotami modulů dle starších norem. Jak je vidět z Obr. 7, návrhové hodnoty modulů pružnosti se od hodnot v dřívějších normách značně liší. Moduly pružnosti nově vyráběných betonů pevnostní třídy C30/37 až C50/60 jsou výrazně nižší než moduly stejných betonů vyráběných před třiceti až padesáti lety. Zatímco modul pružnosti 40 GPa je podle Eurokódu [2] dosažen až u pevnostní třídy C70/85, podle normy z roku 1968 byla tato hodnota už u pevnostní třídy C50/60 (B 60) a podle dřívější normy dokonce u třídy betonu C40/50 (tehdy VI) [24]. Důvod rozdílností těchto hodnot jistě nalezneme ve způsobu výroby betonů dnes a betonů v době před padesáti lety, kdy se tvořily podklady pro vypracování dřívějších norem.



Obr. 7 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti pro dané třídy betonu dle dřívějších norem ČSN 73 1201 a současné normy ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [24]

V dnešní době je výrazné rozšíření plastifikátorů a superplastifikátorů, používají se různé minerální příměsi a současné cementy jsou vyráběny s cílem co nejrychlejšího vývoje počátečních pevností [24].

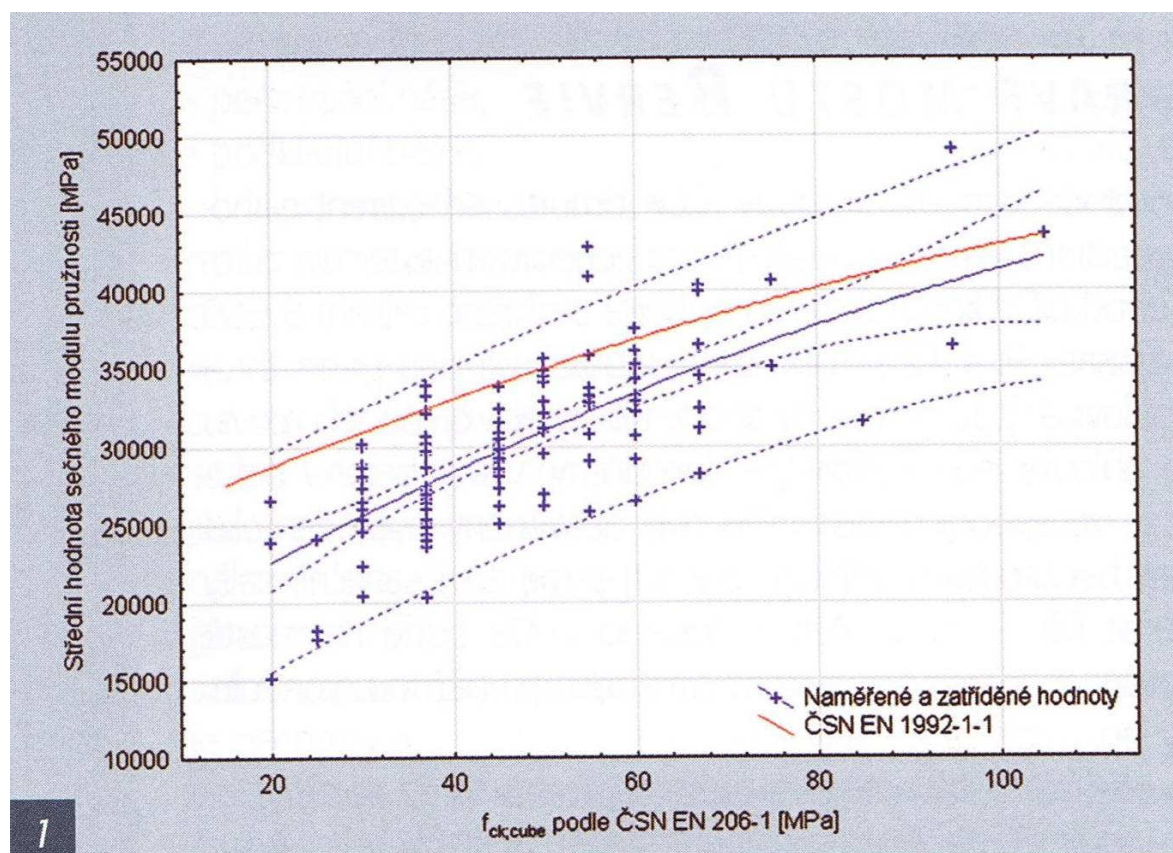
Aby byl projekt správně realizován, je často nutná dostatečná komunikace mezi projektantem a výrobcem betonu. K návrhu konstrukce podle platných norem se pro odhad hodnoty modulu pružnosti k příslušné pevnosti použije tabulka 3.1 normy ČSN EN 1992-1-1 [2]. Avšak norma ČSN EN 206-1 [8], kterou se výrobci betonu řídí, „nezná“ pojem modul pružnosti, neklade tudíž na tuto charakteristiku žádné požadavky. Tady může projektant (technolog) narazit na problém. Pokud hodnota modulu pružnosti betonu není přímo specifikována a není počítáno s její variabilitou v rámci jedné pevnostní třídy, výrobce nemá žádnou povinnost tuto vlastnost dodržovat [9], [25].

Eurokód ČSN EN 1992-1-1 [2] v kapitole 3 uvádí k modulu pružnosti následující informace:

- *Pružné deformace betonu závisí velkou mírou na jeho složení (zejména na kamenivu). Hodnoty uvedené v této normě se mají považovat za směrné pro obecné použití. Avšak pokud je konstrukce citlivá na odchylky od těchto obecných hodnot, mají se hodnoty stanovit přesněji. Pružné deformace se posuzují při napětí do 30 % maximálního napětí podle Hookeova zákona [5], [9].*
- *Modul pružnosti betonu závisí na modulu pružnosti jeho složek. Přibližné hodnoty modulu pružnosti E_{cm} (sečnová hodnota mezi $\sigma_c = 0$ a $0,4 f_{cm}$) pro betony se silikátovým kamenivem jsou uvedeny v tabulce 3.1 této normy. Pro vápencové a pískovcové kamenivo se mají hodnoty snížit o 10, resp. 30 %. Pro čedičové kamenivo se mají hodnoty navýšit o 20 % [9], [25].*

Pro určitou pevnost betonu v tlaku (s výjimkami) platí, že lepší zpracovatelnost nebo-li tekutost, snadnohutnitelnost, samozhutnitelnost a větší obsah jemných zrn (včetně zrn příměsí, např. popílku) mají na velikost modulu negativní vliv [11], [25]. Uvedený vliv může být zcela nebo částečně odstraněn použitím novodobých superplastifikačních přísad (v mírné závislosti na přísadou ovlivněném obsahu vzduchu) [11]. Problém s rozptylem hodnot modulu pružnosti se začíná dostávat do centra pozornosti, ovšem stále o něm není mnoho praktických poznatků, jelikož většina zkoušek je věnována pevnostem betonu [25].

Jedním z příspěvků, který významně rozšiřuje poznatky v oblasti modulu pružnosti betonu, je článek autorů Misák, P. a Vymazal, T. [9], kde autoři graficky porovnávají výsledky průměrné hodnoty sečnového modulu pružnosti s výpočtovými hodnotami z tabulky 3.1 ČSN EN 1992-1-1 [2]. Jde celkem o 130 průměrných výsledků sad normových těles. Z výsledků je patrné, že přepočtené směrné hodnoty modulu pružnosti z pevnosti v tlaku jsou nadhodnocené jak ve všech sledovaných charakteristikách, tak ve všech pevnostních třídách betonu. Obr. 8 ukazuje porovnání tabulkových hodnot závislosti pevnosti v tlaku na modulu pružnosti v uvedené normě [2] a skutečných výsledků, které autoři naměřili.



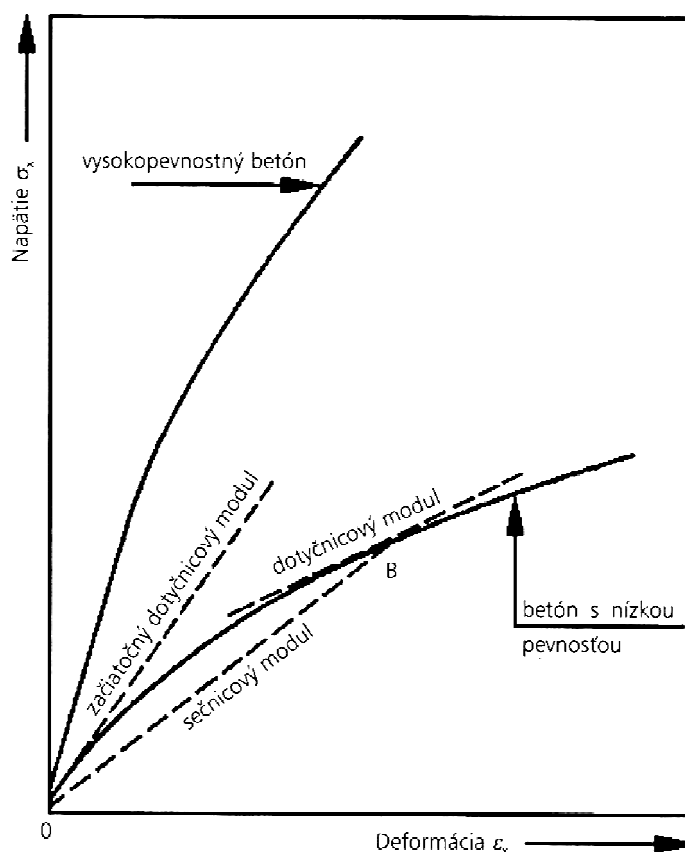
Obr. 8 Porovnání směrných hodnot sečnového modulu pružnosti v tabulce 3.1 eurokódu ČSN [9]

3.4.1 Statický modul pružnosti

Základní definice statického modulu pružnosti, který je uváděn jako sečnový, je uvedena jako poměr mezi působícím napětím a jemu odpovídající deformací [1], [25]:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3-10)$$

Modul pružnosti není během zatěžování betonu konstantní a závisí na napětí, při kterém byl určený. Modul pružnosti, který je daný poměrem σ_x / ε_x (např. směrnici OB v Obr. 9) je známý jako sečnový modul pružnosti. Modul pružnosti daný směrnicí ke křivce závislosti mezi napětím a deformací při daném napětí je tzv. tečnový modul pružnosti. Modul pružnosti, který je směrnicí ke křivce v počátku závislosti, je tzv. počáteční tečnový modul pružnosti [6], [25].



Obr. 9 Definování modulu pružnosti betonu [6]

Závislost mezi deformací a napětím v betonu není lineární. Výjimku tvoří případ, kdy je při krátkodobém zatížení a při napětích nepřevyšujících 40 % pevnosti betonu závislost přibližně lineární. Při takových napětích se předpokládá, že sečnový modul je konstantní a hned po zatížení jsou naměřené deformace čistě pružné. Modul pružnosti se může stanovit,

jakmile se vyvodí tlakové nebo tahové napětí (ovlivňující druh stanoveného modulu pružnosti) [6], [25].

Měření a určování statického modulu pružnosti v tlaku se provádí podle normy ČSN ISO 6784 [3]. Nejdříve se na doprovodné sadě zkušebních těles stanoví pevnost betonu v tlaku. Ze získané hodnoty pevnosti betonu se určí horní mez napětí pro zkoušku modulu pružnosti v tlaku. Zkušební tělesa, určená pro stanovení pevnosti a modulu pružnosti v tlaku, musí mít shodnou velikost i tvar a musí být ošetřena stejným způsobem. Vzorky se zatěžují základním napětím ($\sigma_b = 0,5 N / mm^2$) a potom napětím, které dosahuje hodnoty jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku ($\sigma_a = f_c / 3$). Při těchto napětích se zaznamenají deformace odečtené z přístrojů připevněných na povrchu zkušebních těles (mechanický tenzometr/deformometr, odporový nebo indukční tenzometr a jiné). Všechny podmínky zmíněné normy musí být splněny, jinak výsledky nelze uvažovat [3]. Na Obr. 10 vidíme zkoušku statického modulu pružnosti v tlaku pomocí mechanických úchylkoměrů na Hollanových můstcích. Zkušební lis je ovládán manuálně.



Obr. 10 Zkouška statického modulu pružnosti v tlaku pomocí mechanických úchylkoměrů na Hollanových můstcích [28]

Z naměřených hodnot se vypočítá statický modul pružnosti ze vztahu

$$E_c = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon = (\sigma_a - \sigma_b) / (\varepsilon_a - \varepsilon_b) \quad (3-11)$$

kde E_c je modul pružnosti (N/mm^2 , MPa), σ_a je horní zatěžovací napětí (N/mm^2 , MPa), σ_b je základní napětí (N/mm^2 , MPa), ε_a je průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí a ε_b je průměrné poměrné přetvoření při základním napětí [3], [25].

Na Obr. 11 můžeme vidět zkoušku statického modulu pružnosti v tlaku, prováděnou pomocí modernějšího zkušebního zařízení. Lis FORM+TEST má software, který přímo vyhodnotí hodnotu modulu pružnosti.



Obr. 11 Zkouška statického modulu pružnosti pomocí modernější metody [28]

3.4.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti lze stanovit více metodami, k nejčastějším patří rezonanční a ultrazvuková impulsová metoda, které jsou nedestruktivní. Jelikož při nedestruktivním stanovení modulu pružnosti není beton vystavený reálnému zatížení, ve vzorku tedy nejsou žádná napětí, nedochází ani k vzniku mikrotrhlin na rozhraní kameniva a cementového kamene. V důsledku toho dynamický modul pružnosti odpovídá přibližně počátečnímu tečnovému modulu pružnosti při statickém stanovení, a je tedy podstatně vyšší oproti sečnovému modulu pružnosti (známý pod pojmem statický modul pružnosti), který se určuje při zatížení zkušebních těles tlakovým napětím [19], [25].

Rezonanční metoda se používá ke zjištění dynamického modulu pružnosti, ale také ke zjištění dynamického Poissonova koeficientu a charakteristiky tlumení betonu. Ke zkoušení betonu rezonanční metodou se používá přístroj umožňující zjišťování rezonančních kmitočtů mechanického kmitání elektroakustickými metodami (impaktometr, piezoelektrický snímač) [12]. [25]. Přístroj zahrnuje budicí okruh s oscilátorem a snímací okruh s měřičem a osciloskopem, zabudované v jednom celku, nebo sestavené z jednotlivých jednotek. Měření dynamického modulu pružnosti můžeme vidět na Obr. 12. V místech vhodných na vznik požadovaného kmitání se přiloží sondy přístroje. Rozlišujeme kmitání podélné, příčné nebo kroutivé [20]. Abychom odlišili chybné rezonanční frekvence způsobené jinými druhy kmitání vzorku, je nutné ověřit správnost zjištěných hodnot. Správnost hodnot se ověří podle normy ČSN 73 1372 [12] pomocí teoretických poměrů kmitočtů, jež jsou ve zmiňované normě uvedeny. Další možností je výpočet přibližné hodnoty podélné frekvence f'_L , zjištěnou z doby průchodu ultrazvukového vlnění vzorkem ve směru jeho délky [21]:

$$f'_L = 500 / T \quad \text{v kHz} \quad (3-12)$$

kde T je doba průchodu ultrazvuku ve směru „L“ v μs .

Na Obr. 12 vidíme zanalyzované zvukové spektrum, vlastní frekvence tělesa se zobrazí jako „peak“ – příčný kmitočet (A), kroutivý kmitočet (B), podélný kmitočet (C).

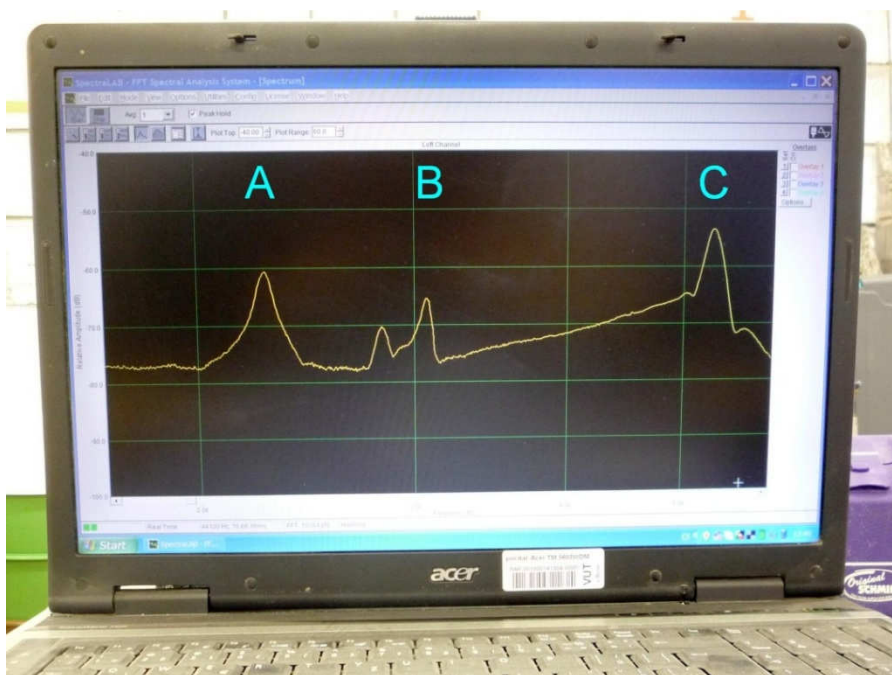
Při měření vlastní podélné frekvence musí být vzorek podepřen v polovině své délky $L/2$. Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku a v tahu E_{brL} při podélném kmitání se určí vztahem [12]:

$$E_{brL} = 4Lf_L^2 \rho \quad \text{v MPa} \quad (3-13)$$

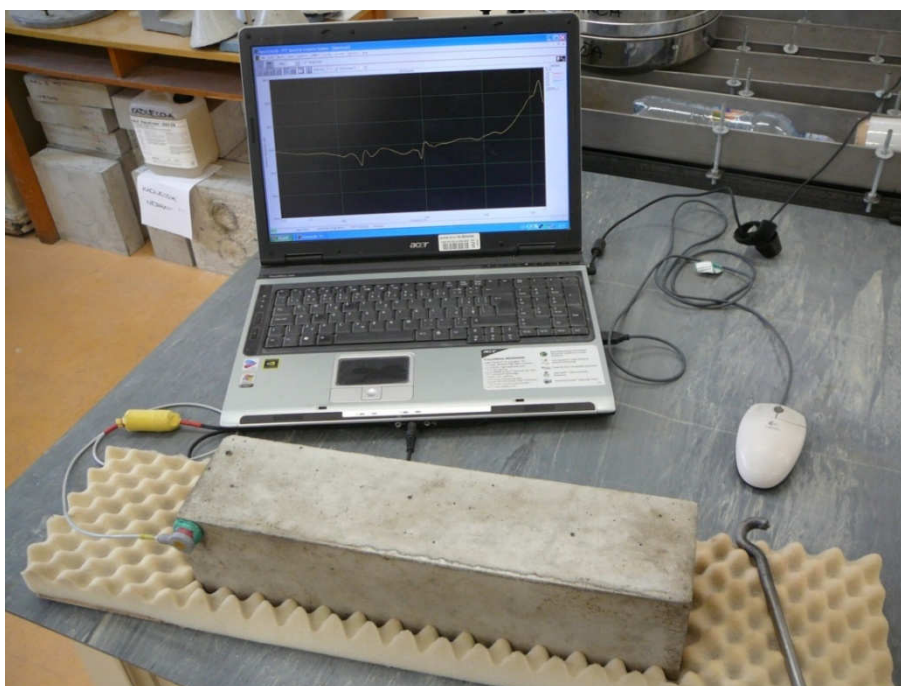
kde L je délka zkoušeného tělesa, f_L je naměřená vlastní frekvence podélného kmitání a ρ je objemová hmotnost betonu. U měření vlastní příčné frekvence je vzorek podepřen ve dvou místech ve vzdálenosti $0,224L$ od obou konců zkušební tělesa. Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku a tahu E_{brf} při příčném kmitání se určí ze vztahu [12]:

$$E_{brf} = 0,0789c_1 L^4 f_f^2 \rho / i^2 \quad \text{v MPa} \quad (3-14)$$

kde c_1 je korekční součinitel určený interpolací, L je délka zkoušeného vzorku, f_f je naměřená vlastní frekvence příčného kmitání, ρ je objemová hmotnost betonu a i je poloměr setrvačnosti průřezu.



Obr. 12 Zanalyzované zvukové spektrum, příčný kmitočet (A), kroutivý kmitočet (B), podélný kmitočet (C) [28]



Obr. 13 Měření dynamického modulu pružnosti v tlaku rezonanční metodou [28]

Měření vlastního kroutivého kmitání probíhá na vzorku podepřeném v polovině své délky $L/2$. Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku G_{brf} se vypočítá vztahem [12]

$$G_{brf} = 4k.L^2 f_t^2 \rho \text{ v MPa} \quad (3-15)$$

kde L je délka zkoušeného vzorku, f_t je naměřená vlastní frekvence kroutivého kmitání, ρ je objemová hmotnost betonu a k je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku [12], [25]. Díky rezonanční metodě lze také určit hodnotu dynamického Poissonova koeficientu.

Druhou nejčastější metodou používanou pro zjišťování dynamického modulu pružnosti je již zmíněná metoda ultrazvuková impulsová, která se zakládá na měření rychlosti šíření impulsů ultrazvukového (UZ) vlnění v betonu. Kromě měření rychlosti UZ vlnění a následného určení dynamických modulů pružnosti betonu se tato metoda používá k určení dynamického Poissonova koeficientu, ke kontrole pevnosti betonu či k určení stejnorodosti betonu a jeho defektoskopii [20], [25]. Měří se doba průchodu čela ultrazvukového impulsu podélného vlnění mezi dvěma sondami - budičem a snímačem (Obr. 14). Zařízení na měření zahrnuje pulsní generátor, budič, snímač, zesilovač a vlastní měřicí zařízení [20]. Lze rovněž použít pouze jednu sondu (většinou piezoelektrickou), která se přikládá na povrch zkoušeného prvku. Ta nejdříve funguje jako budič a poté se přepne na snímání [22].



Obr. 14 Měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou [28]

Ve stavebnictví se používá ultrazvuk s kmitočty až do 500 kHz. Pro zkoušení betonu se většinou používá nízká frekvence 10 ~ 150 kHz. Měření se provádí podle normy ČSN 73 1371 [4]. Čas šíření čela impulsů podélných UZ vln se měří při protilehlé, šikmé a povrchové (obě sondy na téže ploše vzorku) poloze sond.

Naměřená hodnota času t_L je ovlivněna UZ aparaturou, délkou vlny UZ signálu a použitým akustickým vazebním prostředkem. Skutečná doba šíření UZ ve zkoušeném materiálu se proto upravuje korekcí t_{kor} z měření na kalibračním vzorku, často nazývaném etalon, na kterém je vyznačena nominální doba t_E . Podle ČSN [4] označujeme dobu průchodu vrstvou etalonu a konstrukcí sondy jako mrtvý čas t_{ME} . Korekce se vypočte dle vztahu [22]:

$$t_{kor} = t_{ME} - t_E \quad (3-16)$$

Rychlost šíření impulsů podélných UZ vln se tedy vypočte ze vztahu [4]:

$$v_L = L / (t_L - t_{kor}) \text{ [m.s}^{-1}\text{]}; \quad (3-17)$$

kde L je měřicí základna, t_L je měřený čas šíření impulsů UZ vlnění v betonu a t_{kor} je korekce, tzv. mrtvý čas přístroje.

U výpočtů dynamického modulu pružnosti se projevuje vliv rozměrnosti prostředí k . Tato charakteristika je závislá na vztahu rozměrů měřeného objektu a délce vlny UZ vlnění. Prostředí může být jednorozměrné, dvojrozměrné, trojrozměrné nebo neurčité [21], [25]. Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu E_{bu} se určí ze vztahu [4]:

$$E_{bu} = \rho v_L^2 / k^2 10^{-6} \text{ v MPa}, \quad (3-18)$$

kde ρ je objemová hmotnost betonu v kg.m^{-3} , v_L je impulsová rychlost podélného UZ vlnění v m.s^{-1} a k je součinitel rozměrnosti prostředí, který se vyjadřuje hodnotami k_1 , k_2 , k_3 .

Z impulsové rychlosti podélných UZ vln s použitím příslušného kalibračního vztahu odvozeného dle ČSN 73 1370 [23] lze stanovit také pevnost betonu v tlaku. Pro informativní výpočet pevnosti hutného betonu je nutné znát rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí. Pokud se nezíská přímo z měření, lze ji spočítat ze vzorce [21]:

$$v_{L3} = k_3 / v_{L1} \text{ v m.s}^{-1} \quad (3-19)$$

kde v_{L3} je rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí v m.s^{-1} , k_3 je koeficient pro trojrozměrné prostředí (bez rozměru) a v_{L1} je rychlost šíření ultrazvuku v jednorozměrném prostředí v m.s^{-1} .

Informativní pevnost betonu R_{be} se poté vypočte dle níže uvedeného vztahu [4], [21]:

$$R_{be} = 9,9v_{L3}^2 - 56v_{L3} + 87,8 \text{ v MPa} \quad (3-20)$$

kde v_{L3} je rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí v m.s^{-1} .

3.5 Faktory ovlivňující modul pružnosti betonu a jeho variabilitu

Z příspěvku [9] je zřejmé, že variabilita modulu pružnosti je u všech pevnostních tříd betonu. Výrobci betonu používají různé druhy receptur, které se od konce minulého století výrazně změnily a stále se vyvíjí. Od nástupu samozhutnitelných betonů se v recepturách objevují stále častěji různé přísady (provzdušňovací a plastifikační) a příměsi (např. elektrárenský popílek), jež mají také svůj podíl na výsledné hodnotě modulu pružnosti. Vliv na modul pružnosti betonu má jistě i způsob ošetřování související s vodním součinitelem a kombinace různých faktorů. Jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují modul pružnosti betonu, je kamenivo. Zejména je to jeho modul pružnosti, plynulost jeho granulometrie a největší použité frakce [9], [25].

3.5.1 Modul pružnosti použitého kameniva

Z důvodu vysokého obsahu kameniva v betonu (70 až 80 % objemu betonu), má na hodnotu modulu pružnosti betonu a jeho variabilitu výrazný vliv právě modul pružnosti použitého kameniva. Míra ovlivnění je závislá na celkovém podílu objemu kameniva k objemu betonu. Tento podíl závisí na obsahu vody, což souvisí s konzistencí čerstvého betonu, s vodním součinitelem a se způsobem zhutňování. Dále závisí na maximální jmenovité horní mezi frakce kameniva $D_{\max}$, na použitých přísadách a na způsobu přepravy betonu [6], [11], [25].

Velký rozdíl v modulech pružnosti kameniva a cementového kamene může v důsledku menší stlačitelnosti kameniva vést ke vzniku trhlin v cementovém kameni, snížení pevnosti a snížení trvanlivosti betonu [6], [25].

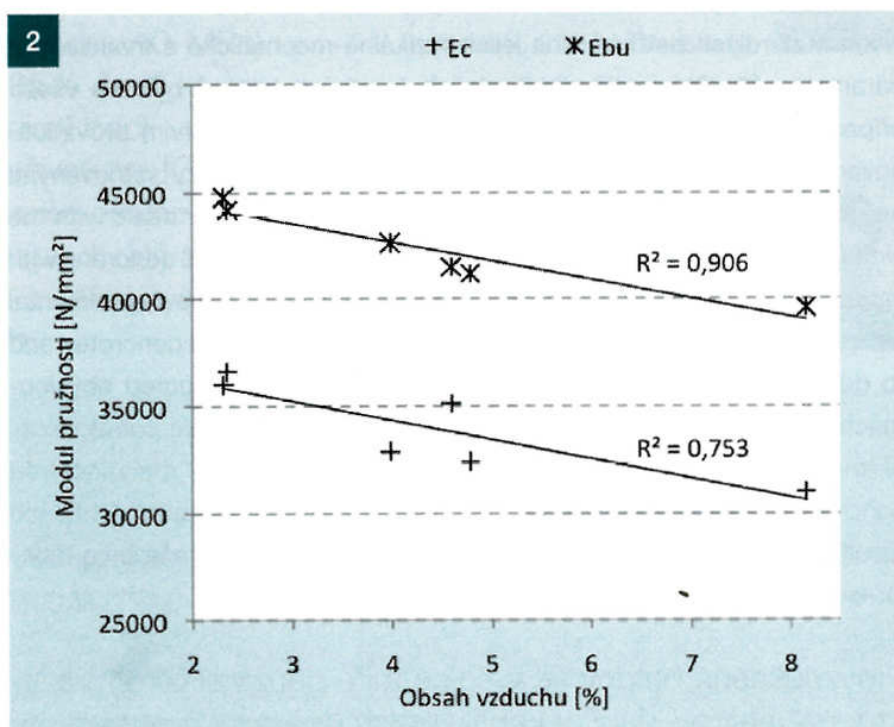
Modul pružnosti kameniva se pohybuje v širokém rozpětí. Ovlivňuje ho mineralogické složení, textura a struktura hornin, ze kterých vzniklo. Vysoký modul pružnosti mají vyvřelé horniny, jako je čedič, diorit, gablo a diabas. Pohybuje se mezi 50 - 100 GPa. Usazené a

přeměněné horniny mají modul pružnosti mnohem nižší. Hodnoty modulu pružnosti kameniva jsou zpravidla vyšší než moduly pružnosti betonu. Platí, že čím je jeho hodnota vyšší u kameniva, tím je vyšší i u betonu. Modul pružnosti kameniva má také vliv na dotvarování a smršťování betonu [6], [25].

V dnešní době lze pevnost a s ní spojený modul pružnosti výrazně ovlivnit použitím přísad a příměsí. Užitím plastifikátorů je u betonů zaznamenán vysoký nárůst pevnosti, proto vliv kameniva není tak velký jako v dřívějších letech. To má ovšem za následek nepoměr mezi těmito charakteristikami. Jak již bylo znázorněno na Obr. 7, vyšší pevnost betonu nemusí automaticky znamenat vyšší modul pružnosti.

3.5.2 Provzdušnění

Autoři článku [27] provedli experiment týkající se vlivu provzdušnění na statický modul pružnosti betonu a jeho pevnost. Z jejich výsledků, jak je zřejmé z Obr. 15, vyplývá, že s rostoucím obsahem vzduchu ve ztvrdlém betonu klesá statický i dynamický modul pružnosti [27].



Obr. 15 Grafické znázornění závislosti statického a dynamického modulu pružnosti na obsahu vzduchu, E_c značí statický a E_{bu} dynamický modul pružnosti [27]

K této problematice také přispívá experiment autorů Kocáb D. a kolektiv [17], který zkoumá vliv provzdušnění na modul pružnosti mostního betonu. Autoři zjišťovali modul

pružnosti na normových hranolech s procentuálním obsahem vzduchu 9,5 ~ 10 %, tedy na vzorcích z provzdušněného betonu a modul pružnosti na vzorcích s procentuálním obsahem vzduchu 2,25 ~ 2,3 %. To odpovídá neprovzdušněnému – běžnému betonu. Z výsledků příspěvku [17] je vidět, že hodnota modulu pružnosti neprovzdušněného betonu je o 11 % (3,5 GPa) vyšší než hodnota modulu pružnosti provzdušněného betonu.

Ke stejnému závěru, co se vlivu provzdušnění týče, došel i experiment kolektivu autorů příspěvku: „*Stanovení modulu pružnosti na válcových tělesech vyrobených z mostního betonu*“ [18]. Modul pružnosti byl tentokrát stanoven na normových válcích. V tomto případě byl použit beton stejného provzdušnění jako v experimentu [17]. Zaznamenáno bylo snížení hodnoty statického modulu pružnosti o 9,1 % (2,7 GPa) [18].

3.5.3 Vlastnosti pojivové a maltové složky

Všechny činitele ovlivňující pevnost ztuhlého cementového tmele (mimo vlhkosti) [6] ovlivňují i její modul pružnosti, který se uvádí v rozpětí 5 ~ 25 GPa. Vodní součinitel tmele má vliv na pórovitost cementového kamene, což má významný vliv na jeho modul pružnosti. Vztah modulu pružnosti k pórovitosti je stejný jako vztah pevnosti k pórovitosti, liší se pouze empirické konstanty [6], [25]. Při uvažování kapilární pórovitosti cementové pasty platí:

$$E = E_0(1 - P_k)^k \quad (3-21)$$

$$E_0 = 72,5 \text{ GPa}, k = 3 \text{ nebo } E_0 = 85 \text{ GPa}, k = 4$$

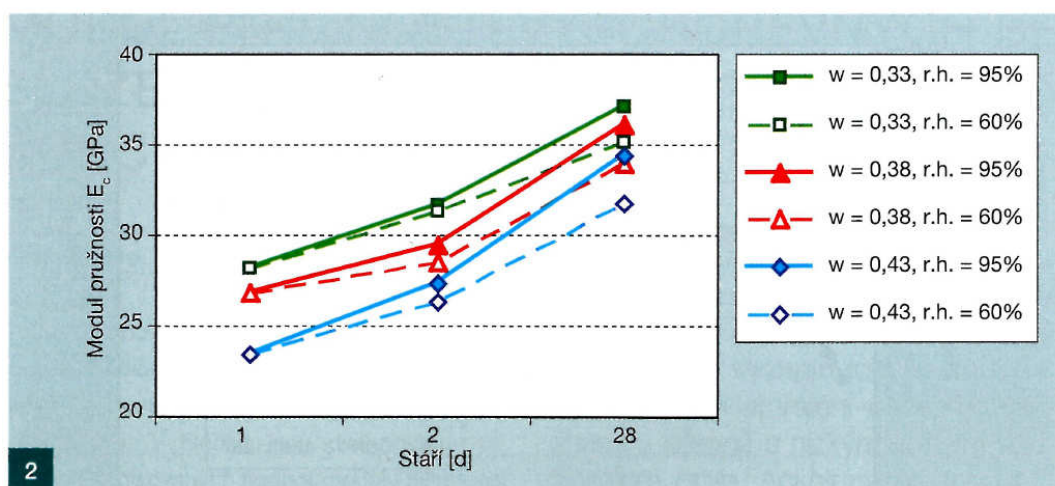
kde E je modul pružnosti ztuhlé cementové pasty E_0 je modul pružnosti cementového tmele při nulové pórovitosti, P_c je kapilární pórovitost a k je empirický exponent [13], [25]. Závislost mezi napětím a deformací pórovitých látek má podobu charakteristické lomené deformační křivky. Při nižším napětí na počátku zatěžování vykazuje směrnice křivky vyjadřující modul pružnosti betonu vyšší hodnotu než při vyšším napětí. Příčinou jsou plastické deformace, které vznikají dotlačováním pórovité struktury. Čím je cementový kámen starší, tím víc roste hodnota modulu pružnosti [13]. Tu ovlivňuje i prostředí, v němž je vzorek uložen. V literatuře je uvedeno, že při uložení vzorku ve vodě je modul pružnosti o 10 - 20 % vyšší než v případě, kdy je vzorek uložen na vzduchu. Proto má způsob ošetřování betonu na modul pružnosti zásadní vliv [13], [25].

Jak uvádí autoři článku [11]: „*Modul pružnosti betonu je ovlivněn i vlastnostmi maltové a pojivové složky. Proto se kromě vlivu vodního součinitele (tím nepřímo pevnosti betonu) uplatňují především vlivy provzdušnění. Takto se kromě provzdušňujících přísad uplatňují i*

některé plastifikační přísady. Ve shodě s platnými normami se připouští jejich vliv na zvětšení obsahu vzduchových pórů až o 2 %. Proto se může stát, že vliv plastifikační nebo superplastifikační přísady na modul pružnosti betonu bude menší, než by se dalo očekávat od přísadou dosaženého zmenšení vodního součinitele” [25].

3.5.4 Vliv ošetřování betonu a vodního součinitele

Vhodné ošetřování společně s vodním součinitelem má na pevnost betonu i jeho modul pružnosti zásadní vliv. Důležitost vhodného ošetřování roste s rostoucí pevností betonu. Absence ošetřování se projeví vznikem mikrotrhlin, a to má velký dopad zejména na trvanlivost betonu. Mikrotrhliny by měly mít výrazný vliv i na jeho modul pružnosti [24]. Graficky znázorněn vliv způsobu ošetřování a vodního součinitele je vidět na Obr. 16 [24]:



Obr. 16 Porovnání hodnot modulu pružnosti pro betony s různým vodním součinitelem a způsobem ošetřování [24]

Nízká hodnota vodního součinitele je pro modul pružnosti betonu významná hlavně u prvků a konstrukcí, u nichž je požadován rychlý nárůst pevností a modulů pružnosti, např. předpjaté prefabrikované nosníky a monolitické mostní konstrukce [24].

3.5.5 Další vlivy

Mezi další faktory ovlivňující hodnotu modulu pružnosti patří tvar zkušební tělesa, výše horní zatěžovací úrovně, způsoby zakoncování tlačných ploch a teplota [44].

Vliv teploty je zejména v prvních dnech zrání betonu velmi zřetelný. Hodnoty modulu pružnosti jsou nižší u vzorků ošetřovaných při nízké teplotě [42]. Také jsou známy vyšší hodnoty modulů u zkušebních těles tvaru krychle ve srovnání s hodnotami zjištěnými na válcích nebo trámčích.

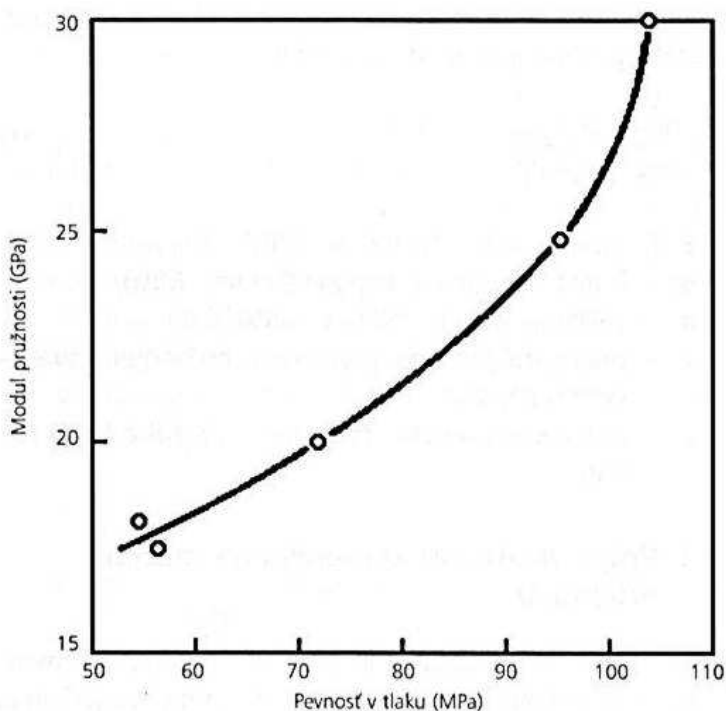
3.6 Vztah mezi pevností betonu v tlaku a modulem pružnosti

Modul pružnosti a pevnost betonu v tlaku jsou nejdůležitější charakteristiky ztvrdlého betonu. Je zřejmé, že jsou ovlivňovány stejnými proměnnými, a to zejména pevností na rozhraní kameniva se ztvrdlým cementovým tmelem, pevností samotného cementového tmele, vlastnostmi kameniva a způsobem ošetřování [24].

Vztah mezi f_c nebo (f_{ck}) a odpovídajícím modulem pružnosti E může být vyjádřen následovně (viz [1]):

$$E = K_E f_c^{1/2} \quad (3-22)$$

kde konstanta K_E závisí na použitých jednotkách, na způsobu, jakým je měřena pevnost (zda byly použity krychle nebo válce) a na E (počátečním modulu pružnosti, nebo-li na sečnovém modulu pružnosti). Ve skutečnosti má rovnice (3-22) nebo rovnice, které jsou jí podobné, spíše orientační charakter. Rovnice opomíjí fakt, že modul pružnosti závisí také na dávce tužší složky (kameniva) a přetvárnější složky (cementový kámen), a bere v potaz pouze tu skutečnost, že modul pružnosti betonu závisí na pevnosti v tlaku, (tedy na vodním součiniteli w/c , způsobu ošetřování, době ošetřování a na třídě cementu). Modul pružnosti kameniva nabývá obecně mnohem vyšších hodnot než modul pružnosti cementového kamene [1], [25].



Obr. 17 Deformace cementové pasty a kameniva při stejném napětí (sériový moment) [6]

Protože na modul pružnosti cementového kamene má vliv jeho pevnost (Obr. 17), dá se předpokládat, že bude existovat i závislost mezi modulem pružnosti betonu a jeho pevností [6], [25].

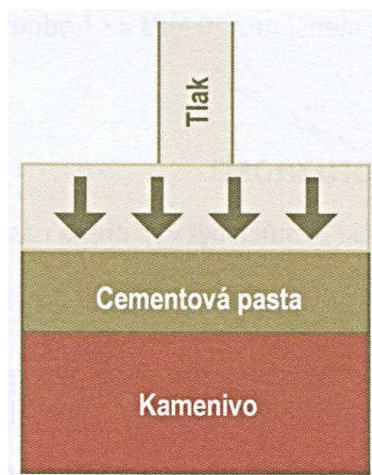
Je třeba si uvědomit, že modul pružnosti pro kamenivo E_a i pro cementovou pastu E_p bude záviset na tuhosti horniny (žuly, čediče, vápence, křemene atp.) a na tvrdosti cementové pasty. U cementové pasty platí pravidlo, že čím vyšší je w/c , tím nižší je E [1]. U zrajícího a tvrdnoucího betonu může být také vznik a vývoj mikrotrhlin ovlivňujícím faktorem [1], [25].

Modul pružnosti betonu E_c je možné určit efektivněji (i když stále jen přibližně) pomocí rovnic (3-23) a (3-24), ve kterých je E_c vyjádřen jako funkce hodnot modulu pružnosti cementové pasty E_p (okolo 20 ~ 30 MPa), modulu pružnosti kameniva E_a (okolo 70 ~ 90 GPa), a objemu těchto zmíněných složek (v_a a v_p) [25], [1]:

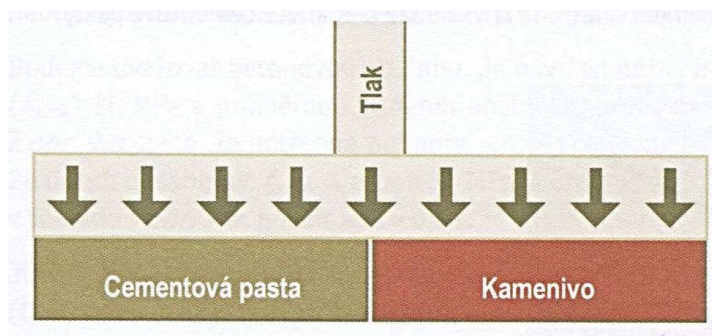
$$1/E_c = v_a 1/E_p + v_p 1/E_p = v_a/E_a + (1-v_a)/E_p \quad (3-23)$$

$$E = v_a E_a + v_p E_p = v_a E_a + (1-v_a) E_p \quad (3-24)$$

Předpokladem rovnice (3-23) je, že na obě složky (cementovou pastu i kamenivo) působí stejné napětí σ (Obr. 18), jde tedy o kompozitní teorii, zatímco rovnice (3-24) je založena na stejné deformaci obou složek ε (Obr. 19) [1], [25].



Obr. 18 Deformace cementové pasty a kameniva při stejném napětí (sériový moment) [1]



Obr. 19 Napětí působící na cementovou pastu a kamenivo pro získání stejné deformace (paralelní model) [1]

V praxi by se měla hodnota modulu pružnosti betonu pohybovat v rozmezí určeném hodnotami vypočítanými z těchto dvou rovnic. Je dobré podotknout, že v případě konstrukcí citlivých na deformace je nutné modul pružnosti experimentálně ověřit [24]. Zvýšením podílu kameniva (volbou nejvyšší možné hodnoty), nebo snížením vodního součinitele cementové pasty, jelikož E_a je vyšší než E_p , zajistíme v běžném betonu růst modulu pružnosti. U betonů z lehkého kameniva se, vzhledem k charakteru použitého plniva, bude modul pružnosti přibližovat spíše modulu pružnosti cementové pasty E_p , a bývá zpravidla daleko nižší než modul pružnosti betonu s běžným hutným kamenivem [1], [25].

Pro případ, kdy nejsou pro stanovení modulu pružnosti k dispozici přesnější podklady, je v ČSN EN 1992-1-1 [2] uveden již zmíněný vztah určující závislost průměrné hodnoty statického modulu pružnosti E_{cm} [GPa] na průměrné pevnosti betonu v tlaku f_{cm} [MPa] [25]:

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (3-25)$$

kde f_{cm} je odvozeno z pevnostní třídy f_{ck} [MPa] pomocí vzorce

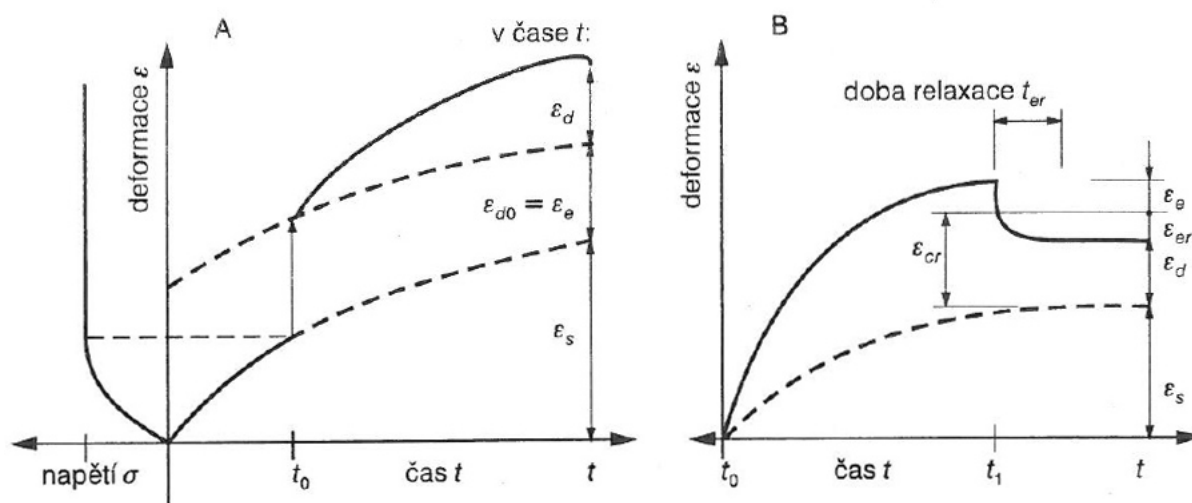
$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (3-26)$$

Je třeba opět podotknout, že i když bude výsledná hodnota zpřesněna dalším výpočtem uvedeným v normě, který uvažuje další známé podmínky (korekce závislé na použitém druhu kameniva), půjde vždy o hrubý odhad [11], [25].

3.7 Přetvárné vlastnosti – dotvarování

Dotvarováním betonu rozumíme trvalé změny tvaru nebo objemu betonu způsobené dlouhodobým zatížením [13]. Dotvarování může být také definováno jako postupné zvýšení přetvoření (deformace) s časem za trvalého napětí, a protože toto zvýšení může být několikrát větší než od napětí při zatížení, má dotvarování značný význam u velkorozponových konstrukcí, štíhlých konstrukčních prvků, u oblouků s nízkým vzepětím a u skořepinových konstrukcí [30], [23], [33]. Modul pružnosti betonu se s časem zvětšuje, pružná deformace se postupně snižuje a za dotvarování by mělo být považováno napětí nad rámec pružné deformace v okamžiku jeho určování. Modul pružnosti není často stanoven při různých dobách a dotvarování je bráno jako zvýšení napětí nad počáteční pružnou deformaci [23].

Trvalé změny objemu betonu způsobuje rovněž smršťování, které je způsobeno vnitřními silami v betonu, přesněji migrací vlhkosti. Vzhledem k tomu, že obě trvalé deformace vznikají současně, je obtížné určit jejich jednotlivou velikost. Na Obr. 20 je znázorněn časový průběh těchto deformací [13].



Obr. 20 Průběh dotvarování betonu [13]

Beton zatížen v čase t_0 , čímž je vyvoláno napětí σ v betonu, se ihned deformuje hodnotou $\varepsilon_{do}(= \varepsilon_e$ pružná deformace od krátkodobého zatížení) a tato deformace narůstá s časem, až v čase t dosáhne hodnoty [13]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s + \varepsilon_{do} + \varepsilon_d \quad (3-27)$$

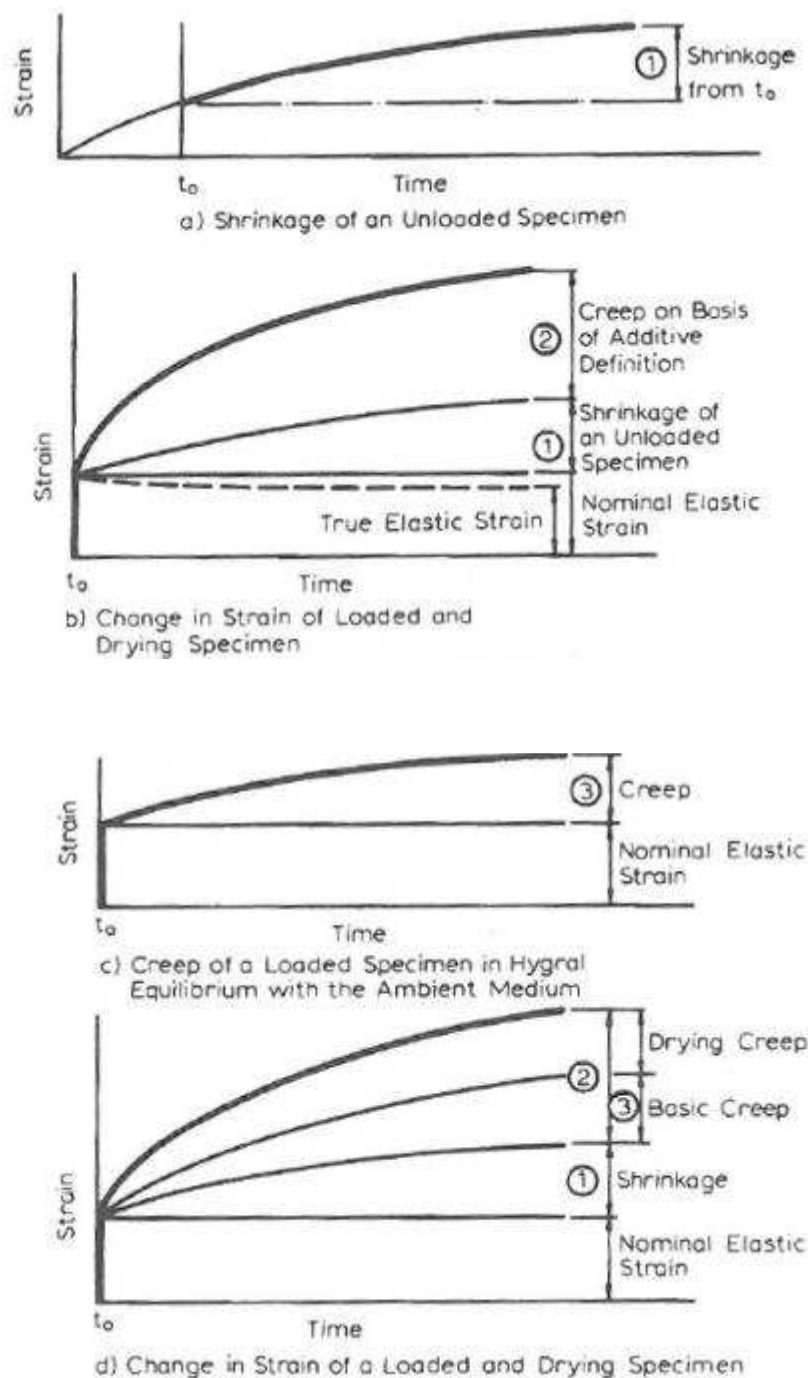
kde ε_s je deformace smrštění, ε_d je deformace dotvarováním dlouhodobým zatížením a ε_c je deformace celková. Dotvarování se tedy vypočítá z rovnice [13]:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c - \varepsilon_e - \varepsilon_s \quad \text{v [mm.m}^{-1}\text{]} \quad (3-28)$$

Ke snížení deformace, jak je uvedeno na Obr. 20, dojde při odtížení konstrukce a snížení napětí v čase t_1 . Dojde k vypružení betonového tělesa o pružnou deformaci ε_e a následně k pružné relaxaci o hodnotu ε_{er} (opožděná pružná deformace po dobu relaxace t_{er}). Po odtížení za dobu $t_1 + t_{er}$ bude výsledná deformace součtem deformace smrštěním ε_s a deformace viskózním nepružným dotvarováním ε_d . Dotvarování ihned po odtížení ε_{cr} je tedy [13]:

$$\varepsilon_d + \varepsilon_{er} = \varepsilon_{cr} \quad (3-29)$$

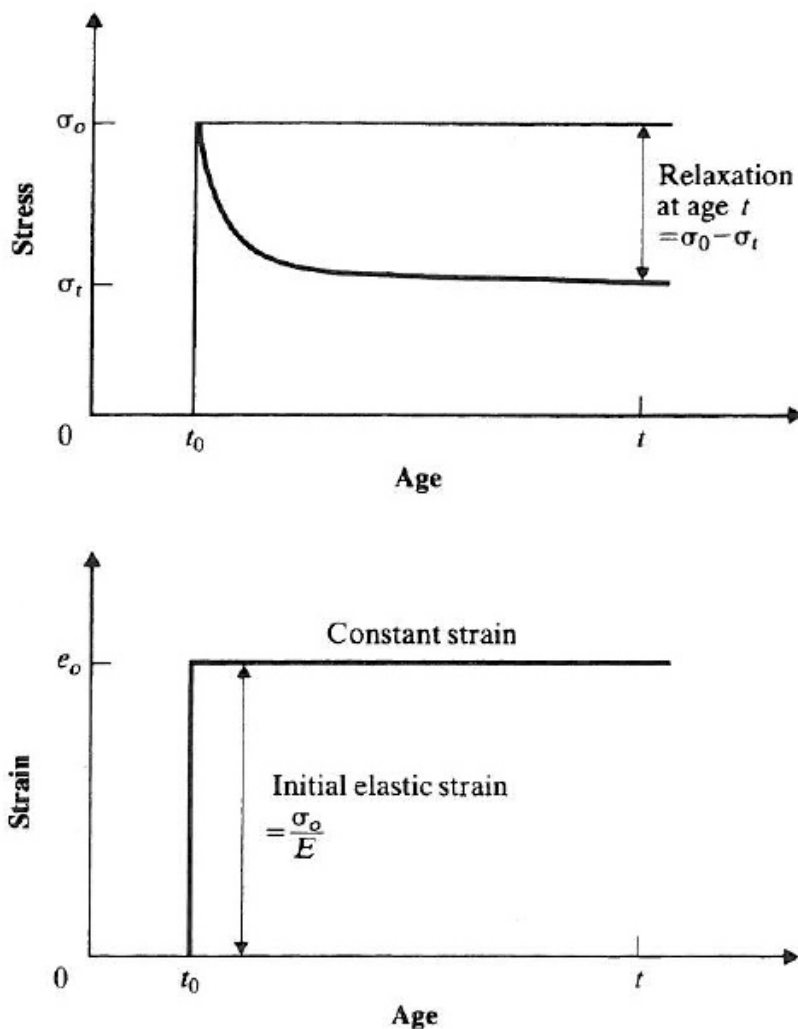
V mnoha reálných konstrukcích se dotvarování a smršťování vyskytují současně, proto zacházení s oběma společně je praktické. Zásadnější přístup rozlišuje běžné dotvarování, nebo-li bez pohybu vlhkosti z nebo do okolního prostředí, a dotvarování při vysychání. Podmínky jsou zobrazeny na Obr. 21 [23], [29].



Obr. 21 Časově závislé deformace v betonu, které byly vystaveny trvalému zatížení [23]

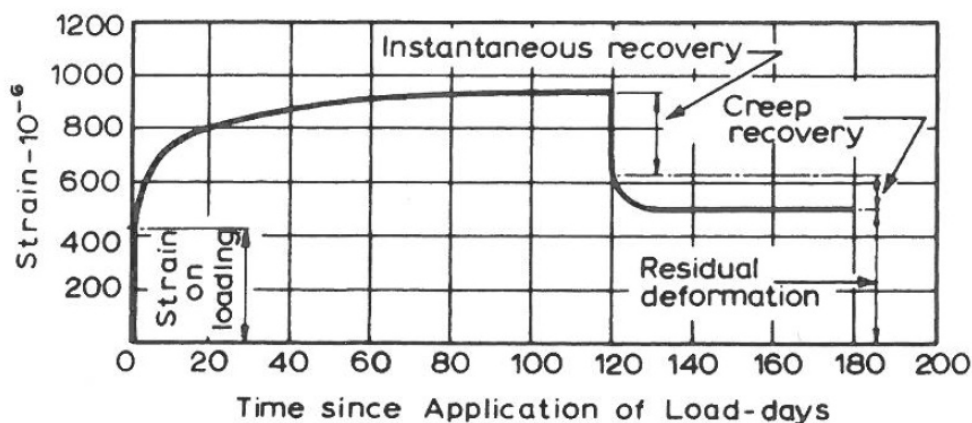
- a) smrštění nezatíženého vzorku, b) změna poměrného přetvoření zatíženého a vysušeného vzorku, c) dotvarování zatíženého vzorku ve „vlhkostní“ rovnováze s okolním prostředím, d) změna poměrného přetvoření zatíženého a vysušeného vzorku

Na účinky dotvarování se dá podívat z jiného hlediska. Pokud je betonový vzorek trvale zatížen konstantním napětím, dotvarování se projeví jako postupné snížení napětí s časem. To se nazývá relaxací (Obr. 22) [30].



Obr. 22 Definice relaxace betonu vystaveného původnímu napětí, které bylo poté udržováno jako konstantní [30]

Pokud je po určité době trvalé zatížení odstraněno, přetvoření klesá o výši rovnající se pružné deformaci v daném čase (stáří betonu). Tato deformace je, z důvodu zvýšení modulu pružnosti v čase, obecně menší než původní pružná deformace. Okamžitá obnova je následována pozvolným poklesem přetvoření betonu. Jde o tzv. zotavení, jedná se o jev dotvarování (Obr. 23) [23].



Obr. 23 Dotvarování a následné zotavení vzorku malty uloženém na vzduchu při relativní vlhkosti 95 %, který byl vystaven napětí 14,8MPa a poté odtížen [23]

3.8 Činitelé ovlivňující dotvarování betonu

Dotvarování je zkoumáno empiricky za účelem zjištění, jaké vlastnosti betonu ho ovlivňují. Důležitou roli hraje samotné složení betonu. Například typ cementu ovlivňuje dotvarování v rozsahu, v němž ovlivňuje pevnost betonu v době působení zatížení. Dalším důležitým faktorem je vliv relativní vlhkosti okolního prostředí, ve kterém je beton ošetřován, dále pak teplota, při které je vzorek zatěžován, a v neposlední řadě je důležitým faktorem vztah mezi dotvarováním a časem [23], [29].

Hodnota dotvarování betonu je tedy ovlivněna charakteristikami okolního prostředí, jako je vlhkost, teplota, hladina zatížení, a také samotnými charakteristikami betonu, jako je pevnost, modul pružnosti a již zmíněné stáří betonu. Důležitá je tedy predikce účinků dotvarování betonu. Ta je možná podle několika modelů platných dle norem a jiných předpisů [31], [35]. Predikční modely pracují často s funkcí poddajnosti, která představuje deformaci vyvolanou jednotkovým napětím. Vztah mezi funkcí poddajnosti a součinitelem dotvarování, který je při návrhu běžně užíván, je [37]:

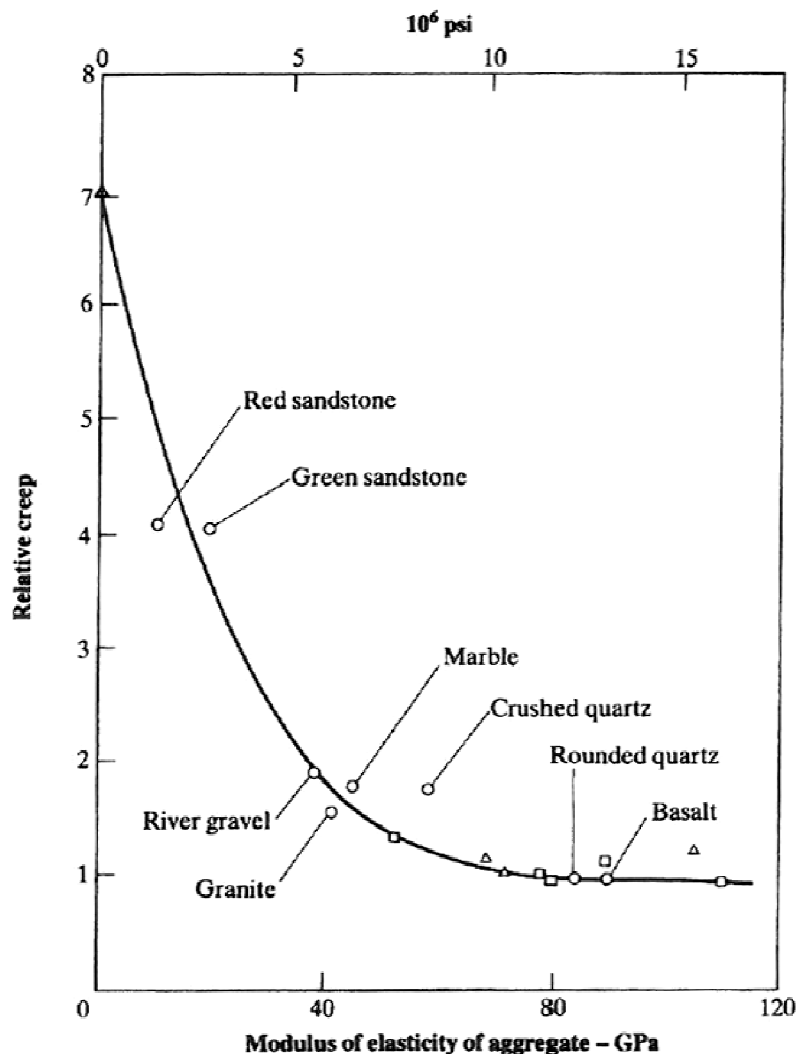
$$\phi(t, t') = J(t, t')E(t') - 1 \quad (3-30)$$

kde $\phi(t, t')$ představuje součinitel dotvarování, $J(t, t')$ funkci poddajnosti, $E(t')$ modul pružnosti v čase zatížení, t sledovaný okamžik a t' čas vnesení zatížení [37]. Jednotlivým modelům bude věnována kapitola níže.

3.8.1 Složení betonu a vlastnosti jednotlivých složek

V obyčejném betonu má vliv na dotvarování i cementová pasta. Cementová pasta podléhá dotvarování, proto je úkolem pevnějšího kameniva snížit celkové dotvarování betonu.

Účinek závisí na modulu pružnosti kameniva a jeho objemovém podílu v betonu. Z toho vyplývá, že pokud beton obsahuje větší objem kameniva nebo je kamenivo tužší, je dotvarování betonu nižší. Tento vliv je znázorněn na Obr. 24 [30].



Obr. 24 Vliv modulu pružnosti kameniva na relativní dotvarování betonu (vzorek s modulem 69 GPa se rovná 1) [30]

Velmi dobrá zrnitost kameniva snižuje dotvarování betonu [13]. Dále bylo zjištěno, že dotvarování ovlivňuje pórovitost kameniva, ale protože kamenivo s vyšší pórovitostí má nižší modul pružnosti, je možné, že pórovitost není v dotvarování závislý faktor. Na druhou stranu s tím souvisí absorpce, která hraje přímou roli v přenosu vlhkosti v betonu. Tento přenos vytváří příznivé podmínky pro rozvoj dotvarování při vysychání. To může být vysvětlení pro vysoké počáteční dotvarování, ke kterému dochází u některých lehkých kameniv

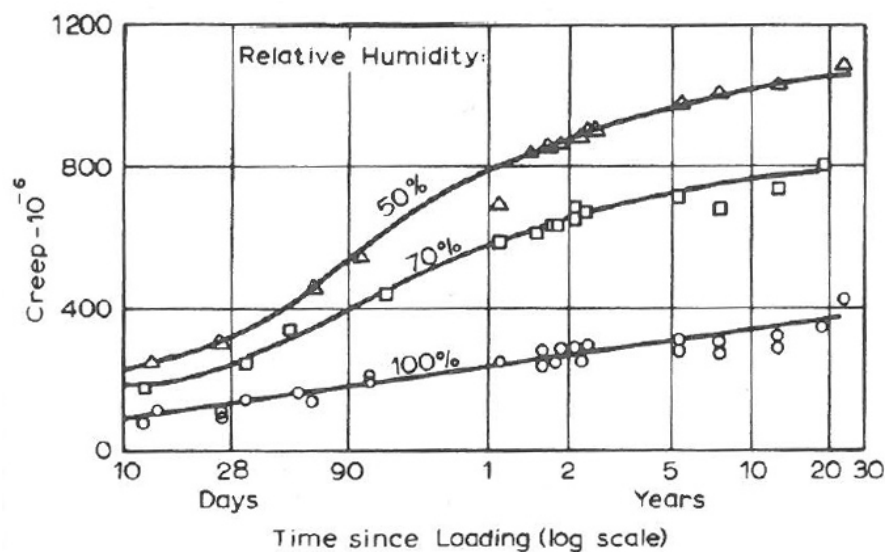
dávkovaných ve vysušeném stavu. Dotvarování při vysychání bude vysvětleno v další podkapitole [23].

Ve většině směsí s podobnou zpracovatelností je obsah cementu malý. Mohlo by se zdát, že jeho vliv na dotvarování není tak velký. Předávkování betonu cementem dokáže způsobit větší dotvarování, ovšem při stejném vodním součiniteli mají betony s nižším obsahem cementu dotvarování nižší. Proto dalším významným faktorem, který ovlivňuje dotvarování a souvisí s obsahem cementu, je poměr vody ku cementu. Tento poměr ovlivňuje pórovitost betonu a tím i jeho pevnost. Pevnost betonu úzce souvisí s jeho dotvarováním. Pokud tedy snížíme zmíněný poměr, zvýšíme tím pevnost betonu a snížíme dotvarování. Dotvarování je nepřímo úměrné pevnosti betonu v délce času působení zatížení. Jelikož se pevnost zvyšuje se stářím betonu, lze očekávat, že s časem dojde k postupnému snížení dotvarování [30].

U jakéhokoli srovnání dotvarování betonů v době aplikace zatížení by měl být brán v úvahu typ a jemnost mletí použitého cementu. Jemnost cementu ovlivňuje vývoj pevnosti betonu v jeho raném stáří, a proto ovlivňuje i dotvarování. Extrémně jemné cementy s měrným povrchem až do 740 kg/m^2 vedou k vyššímu počátečnímu dotvarování, po roce až dvou však dochází k jeho snížení. Tento jev je pravděpodobně způsoben vysokým nárůstem pevnosti cementu s výsledným rychlým poklesem skutečného poměru napětí ku pevnosti. Menší hodnoty dotvarování vykazují betony obsahující portlandské cementy vyšších pevností. Naopak zvýšení dotvarování platí pro betony, které byly vyrobeny z rychletuhnoucích, vysoce hlinitých a směsných cementů [13], [23], [30].

3.8.2 Relativní vlhkost okolního prostředí

Další z vnějších faktorů ovlivňujících dotvarování je relativní vlhkost vzduchu okolního prostředí a s tím i související způsob ošetřování. V literatuře [13] je uvedeno, že nejmenší dotvarování je naměřeno u betonu, který je uložen ve vodě, a největší pak vykazuje beton uložený v prostředí teplého vzduchu. Obecně platí, že dotvarování pro daný beton je tím vyšší, čím nižší je relativní vlhkost vzduchu, jak je znázorněno na Obr. 25 [30]. Obrázek znázorňuje dotvarování vzorků, které byly ošetřovány při relativní vlhkosti 100 %, poté byly zatíženy a vystaveny různým vlhkostem [23].

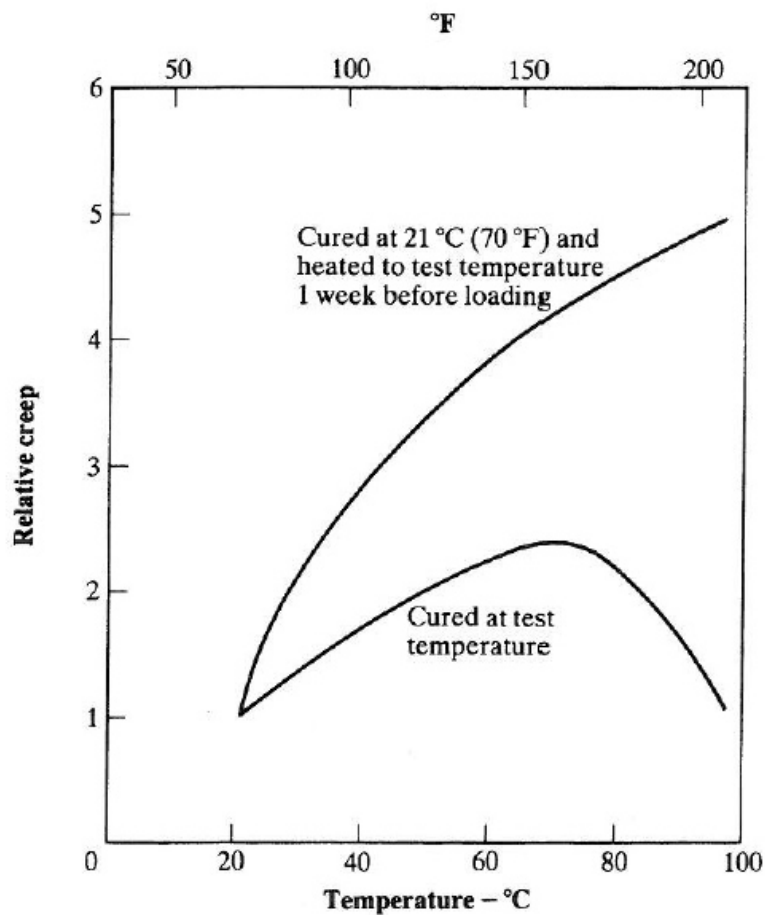


Obr. 25 Průběh dotvarování betonu, který je vytvrzen v prostředí se 100 % vlhkostí po dobu 28 dnů, poté zatížen a uložen v různých relativních vlhkostech [23]

Vliv relativní vlhkosti je mnohem menší, nebo chybí, v případě vzorků, které dosáhly vlhkostní rovnováhy (jak doslova uvádí zahraniční literatura) s okolním prostředím před aplikací zatížení. Proto nejde o vliv relativní vlhkosti, ale o vliv procesu vysychání, tj. vznik dotvarování při vysychání [23]. Dotvarování při vysychání může souviset se vznikem tahového napětí, které bylo vyvoláno smršťováním ve vnější vrstvě betonového vzorku. Výsledkem jsou mikrotrhliny v betonu. Tlakové napětí vyplývající z aplikovaného zatížení bylo těmito trhlinami zrušeno. Pánové Day a Illston zjistili na velmi malých vzorcích hydratované cementové pasty, které byly podrobeny dotvarování při vysychání, že dotvarování a dotvarování při vysychání jsou vnitřními vlastnostmi hydratované cementové pasty [23].

3.8.3 Vliv teploty

Bylo zjištěno, že pokud se nasycený beton zahřeje a zatíží současně, dotvarování je větší, než když se zahřeje během tuhnutí před aplikací zatížení. Obr. 26 ukazuje tyto dvě podmínky [30].

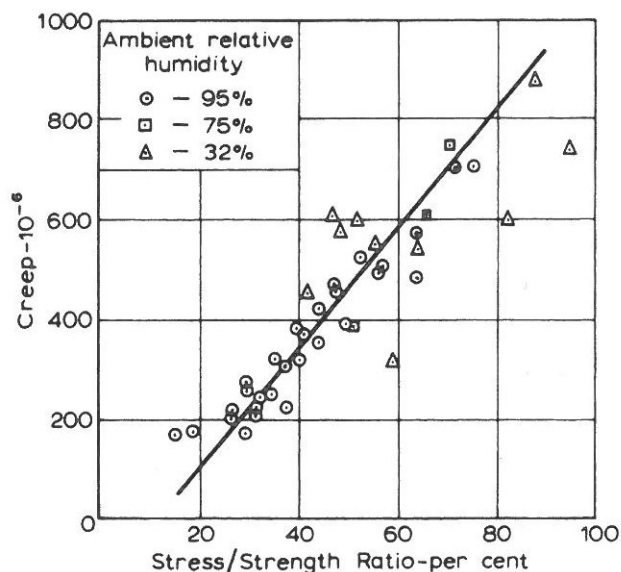


Obr. 26 Vliv teploty na dotvarování nasyceného betonu vzhledem k dotvarování při 21 °C; vzorky vyrobené při uvedené teplotě od 1. dne až do zatížení na 1 rok [30]

Dotvarování je menší, pokud je beton, z důvodu vyšší pevnosti, vytvrzen při vysoké teplotě. Tepelné ošetření betonu před jeho zatížením sníží dotvarování betonu až o 30 % [13], [30].

3.8.4 Vliv napětí a pevnosti

Předpokládá se, že dotvarování je přímo úměrné aplikovanému napětí až do asi 40 % krátkodobé pevnosti daného betonu. Výjimku tvoří zatížení vzorků ve velmi raném věku. Nad 40 až 50 % krátkodobé pevnosti dochází ke vzniku mikrotrhlin a vztah mezi dotvarováním a napětím se stává nelineární. Je tedy dosaženo horní meze úměrnosti. Samotné dotvarování při zvýšení napětí roste se zvyšující se rychlostí [30]. Je tedy možné vyjádřit dotvarování jako lineární funkci poměru napětí ku pevnosti (Obr. 27) [23]:



Obr. 27 Dotvarování maltových vzorků vytvrzených a trvale uložených v různých vlhkostech [23]

3.8.5 Vztah mezi dotvarováním a časem

Dotvarování je obvykle stanoveno na základě měření změn deformace vzorku v průběhu času, přičemž byl vzorek podroben konstantnímu napětí a uložen za vhodných podmínek. Jak již bylo zmíněno: „Dotvarování je nepřímě úměrné pevnosti betonu v délce času působení zatížení. Jelikož se pevnost zvyšuje se stářím betonu, lze očekávat, že s časem dojde k postupnému snížení dotvarování.“ [23], [30].

Také ve výpočtu dotvarování normy ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] je nutné zahrnout počátek působení napětí nebo-li stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení a stáří betonu v uvažovaném okamžiku, pro který chceme znát hodnotu dotvarování. S tím souvisí i způsob a doba ošetřování betonu [2]. Z toho lze usuzovat, že vztah mezi časem a dotvarováním hraje významnou roli.

3.9 Způsoby výpočtu dotvarování

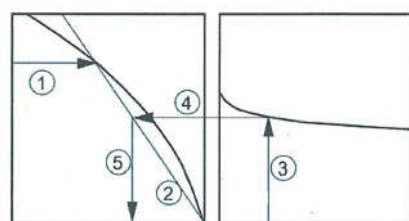
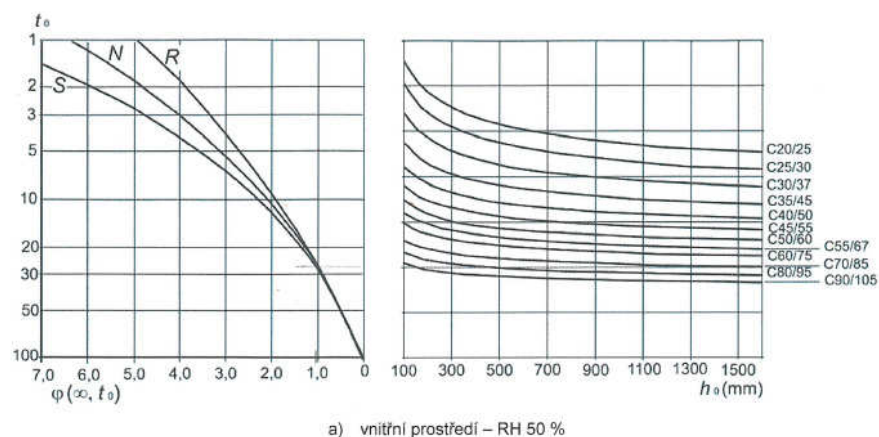
Projevy reologických vlastností, jako je dotvarování a smršťování, nebyly v původních českých normách správně zohledněny, a tak se často výpočetní predikce dotvarování lišila od chování reálných konstrukcí. Beton v konstrukcích vykazoval vyšší nárůst deformací, s nímž bylo spojeno omezení použitelnosti a poruchy konstrukce [31].

Autoři článku [31] uvádějí: „Dotvarování a smršťování betonu jsou velmi složité a komplikované jevy, jejichž časový vývoj, stejně jako jejich konečná hodnota, jsou závislé na množství faktorů a vstupních parametrů. Pro jejich popis je možné použít mnoho více, či méně

spolehlivých matematických modelů, často normově závislých, které dotvarování a smršťování popisují z hlediska jejich časového průběhu, kvantifikují jejich velikost a zohledňují vlivy vstupních parametrů. Tyto modely se zásadním způsobem liší ve své komplexnosti, nebo-li jak jsou schopny správně (a zda vůbec) postihnout velké množství jednotlivých vlivů na dotvarování a smršťování. Všechny modely by však měly splňovat základní předpoklady chování betonu jako materiálu. Toto je možné shrnout do několika zásad, které musí modely respektovat:

- *modul pružnosti limitně narůstá se stářím betonu (stárnutí betonu),*
 - *čím později je betonový prvek zatížen, tím méně bude dotvarovat,*
 - *součinitel dotvarování musí nabývat vždy kladných hodnot,*
 - *po odtížení prvku dochází k zotavování – dlouhodobé poměrné přetvoření částečně vymizí,*
 - *větší délka doby ošetřování betonu se projeví snížením dotvarování a smršťování,*
 - *vyšší třída (pevnost) betonu – nižší dotvarování a smršťování*
 - *vyšší vodní součinitel se projeví intenzivnějším dotvarováním a smršťováním*
 - *v prostředí s nižší relativní vlhkostí prvky dotvarují a smršťují více,*
 - *tenké prvky vykazují intenzivnější dotvarování a smršťování oproti masivním.“*
- [31].

Jednou z metod predikce dotvarování je model podle normy ČSN EN 1992-1- Eurokód 2 [2]. Ten je oproti bývalé normě ČSN 73 6207 [33], která reologické chování betonu podceňovala, mnohem přesnější. Jelikož je hodnota dotvarování ovlivněna charakteristikami betonu a okolního prostředí, je pro každý model predikce nutné vědět vstupní údaje v přípustných rozmezích použitelnosti daného modelu [35]. Dotvarování je v této normě vyjádřeno součinitelem dotvarování $\varphi(t, t_0)$. Součinitel dotvarování je číslo, kterým je třeba násobit krátkodobou deformaci, abychom dostali deformaci dlouhodobou, která je vyvolána dotvarováním. Obvykle se pohybuje v rozmezí 0 – 6 [32]. Norma obsahuje vypracované grafy pro relativní vlhkost 50 % odpovídající běžným vnitřním podmínkám v budovách [32]. Pokud není vyžadována velká přesnost a beton není namáhán tlakovým napětím větším než $0,45 f_{ck}(t_0)$ ve stáří t_0 (stáří betonu v okamžiku zatížení), může se hodnota stanovená z obrázku Obr. 28 považovat za součinitel dotvarování [2]:



POZNÁMKA

- průsečík čar 4 a 5 může být též nad bodem 1
- pro $t_0 > 100$ je dostatečně přesné předpokládat $t_0 = 100$ (a použít tečnu)

Obr. 28 Ukázka zjednodušeného stanovení součinitele dotvarování pro RH 50 % [2]

Po stanovení součinitele dotvarování $\varphi(\infty, t_0)$ stačí dopočíst hodnotu přetvoření $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ od dotvarování v čase $t = \infty$ [2], [35]:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0)(\sigma_c / E_c) \quad (3-31)$$

kde $\varphi(\infty, t_0)$ je konečný součinitel dotvarování, σ_c je tlakové napětí ve vzorku od zatížení a E_c je tečný modul pružnosti [2], [35].

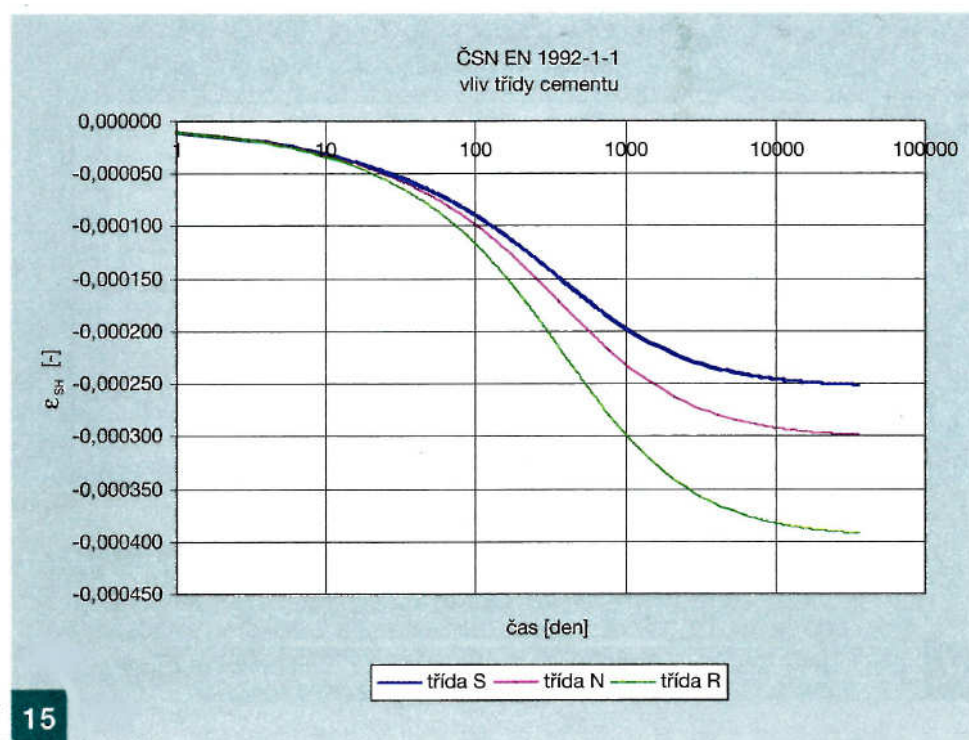
Pokud jsme nuceni díky některým omezením zjednodušené metody použít podrobný výpočet objemových změn, norma nás odkáže na přílohu B. V příloze je zohledněn vliv relativní vlhkosti součinitelem φ_{RH} , dále je v příloze zohledněn vliv trvání zatížení součinitelem časového průběhu dotvarování po zatížení $\beta_c(t, t_0)$ a součinitel $\beta(f_{cm})$, který zohledňuje vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování. Je zde také zahrnut vliv druhu cementu a vliv zvýšení nebo snížení teplot v rozsahu 0 °C až 80 °C na zralost betonu [2].

Součinitel dotvarování $\varphi(t, t_0)$ lze vypočítat ze vztahu [2]:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (3-32)$$

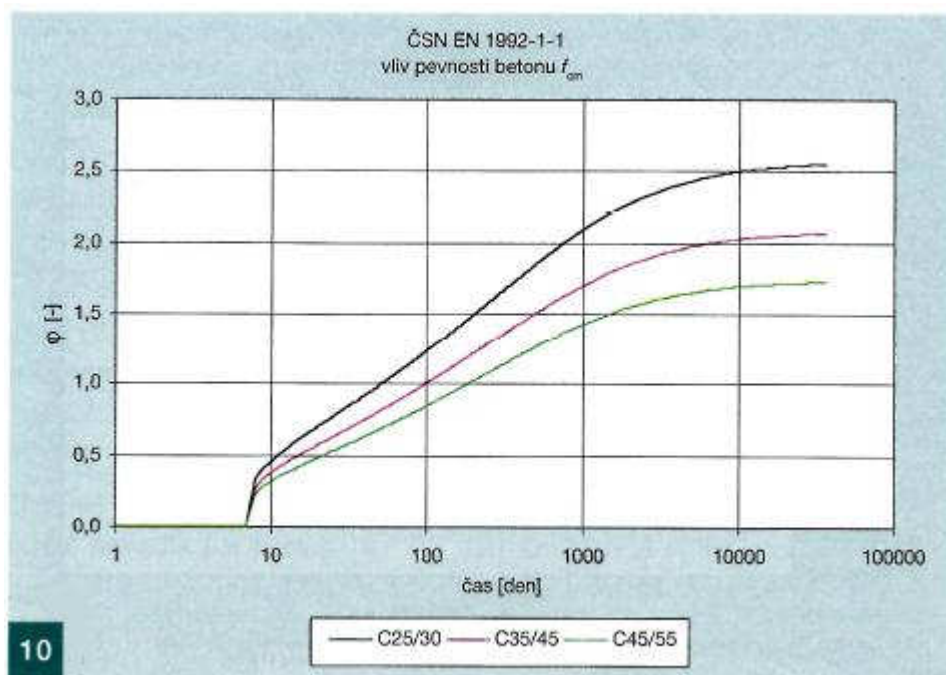
kde $\beta_c(t, t_0)$ je součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení a φ_0 je základní součinitel dotvarování.

Autoři článku [31] porovnávají vliv druhu cementu na hodnotu dotvarování v normě ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2]. Z jejich příspěvku vyplývá, že rozdíl mezi třídou S a R je téměř dvojnásobný. Obr. 29 ukazuje toto srovnání [31]:



Obr. 29 Vliv změny druhu cementu na výslednou hodnotu smršťování a dotvarování [31]

Dále je v příspěvku porovnán vliv pevností betonu na hodnotu součinitele dotvarování, který je počítán podle již zmiňované normy [2]. Jak můžeme vidět na Obr. 30, je zde patrný přístup, že čím vyšší je pevnost použitého betonu, tím menší je výsledný součinitel dotvarování, a to po celou sledovanou dobu [31].



Obr. 30 Vliv pevnosti betonu na hodnotu součinitele dotvarování,
ČSN EN 1992-1-1 [31]

Nutné vstupní údaje pro stanovení přetvoření od dotvarování (smršťování) betonu pro ČSN EN 1992-1-1 [2] ve srovnání s Modelem B3 shrnul v tabulce (Obr. 31) autor článku [35]:

Vstupní charakteristiky			ČSN EN 1992-1-1	Model B3
Materiálové	cement	hmotnost	–	požadováno
		typ	požadováno: S, N, R	požadováno: Type I, II, III
	voda	hmotnost	–	požadováno
	kamenivo	hmotnost	–	požadováno
Průřezové	plocha řezu (A_c)		požadováno	požadováno
	obvod (u)		požadováno	požadováno
	typ tělesa		–	požadováno
Prostředí	vlhkost (RH)		požadováno	požadováno
	typ uložení		–	požadováno
	teplota (T)		pokud chci zohlednit	pokud chci zohlednit
Pevnostní	pevnost – válcová (f_{cd})		požadováno	požadováno
	modul pružnosti (E_{cm})		alternativně, jinak dopočítáván ze síly	alternativně, jinak dopočítáván ze síly
	napětí ve vzorku (pružné) σ		požadováno (max. 45 % σ)	požadováno (max. 45 % σ)

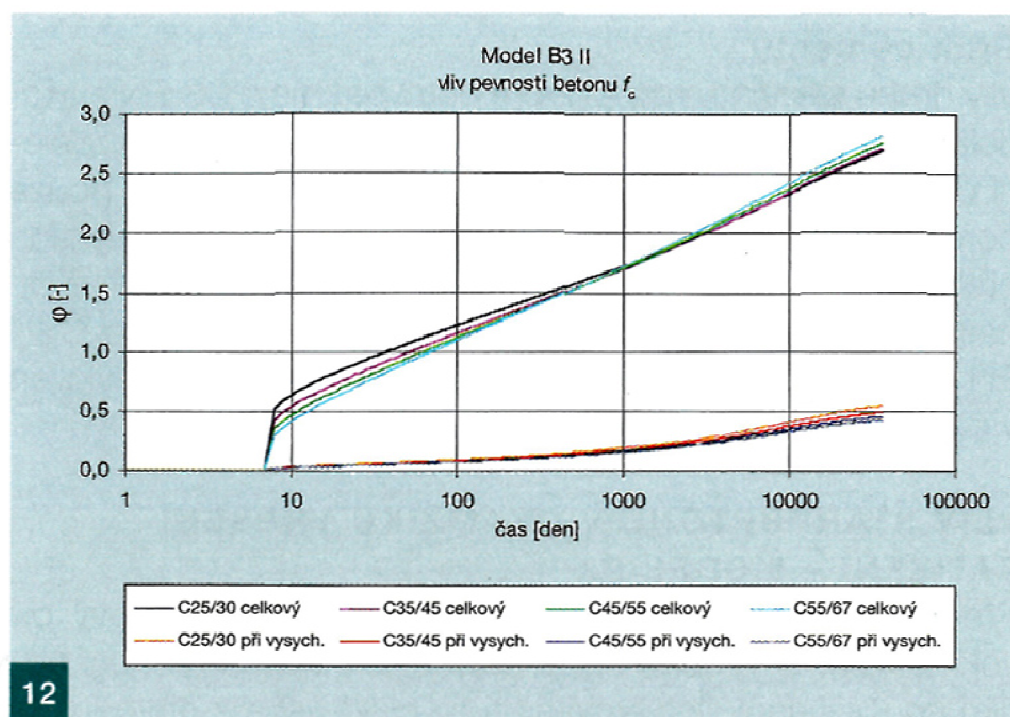
Obr. 31 Porovnání vstupních údajů pro stanovení přetvoření od dotvarování (smršťování) dle různých modelů predikce [35]

V současné době asi jeden z nejuznávanějších, ale zároveň nejdiskutovanějších modelů predikce dotvarování, je Model B3 [36]. Model je založen na obrovském počtu experimentálních ověřování a zkoušek. Vychází z těchto měření a snaží se svými matematickými postupy co nejpřesněji vystihnout chování zkoušených konstrukcí [31]. Predikční model byl navržen profesorem Bažantem v roce 2000. Tento pravděpodobně nejs sofistikovanější model popisuje viskoelastické vlastnosti betonu zahrnující vlivy dotvarování a smršťování a jejich kombinaci. Funkce poddajnosti, která v modelu definuje dotvarování, má tvar [37]:

$$J(t, t') = q_1 + q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')^{0.1}] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) + J_d(t, t') \quad (3-33)$$

Parametr q_1 představuje inverzní asymptotický elastický modul pružnosti, členy obsahující konstanty q_2 , q_3 , a q_4 popisují viskoelastické vlastnosti betonu, kde hodnoty konstant mohou být určeny z empirických vzorců. Funkce Q nemá přesnou formu a její hodnotu lze určit z přibližného vzorce nebo její integrální podoby. Funkce J_d představuje vlivy týkající se vysychání, avšak v případě zjištění pouze základního dotvarování betonu je možné tento parametr vynechat [37].

Autoři v již zmiňovaném článku [31], který hodnotí jimi zvolené matematické metody predikce dotvarování na Kelvinově reologickém modelu, upozorňují na větší míru dotvarování v časech do cca 1000 dní u betonů nižších pevností. V čase 100 let je ovšem situace přesně opačná. Model B3 tak nabízí zcela odlišný přístup oproti ČSN EN 1992-1-1 [2]. V grafu (Obr. 32) je zobrazena nejen celková hodnota součinitele dotvarování, ale také jeho část od vysychání, která byla dopočítána jako rozdíl mezi hodnotou celkovou a základní složkou dotvarování [31].



Obr. 32 Vliv změny pevnosti betonu na velikost součinitele dotvarování, Model B3 [31]

Další možností predikce dotvarování je Model CEB-FIP, 1990 (dle normy CEB-FIB Model Code 1990 [38]). Jde o moderní komplexní model dotvarování a smršťování betonu. Zohledňuje mimo jiné i vliv zvýšené teploty a vysokých napětí na nelinearitu dotvarování. Pro koeficient dotvarování se uvádí vztah [39]:

$$\varphi(t, \tau) = \varphi_0(\tau) \left[\frac{t - \tau}{\beta_{H,T} + t - \tau} \right]^{0,3} \quad (3-34)$$

Součinitel fiktivního (nebo také základního) dotvarování φ_0 a součinitel $\beta_{H,T}$ jsou závislé na stáří betonu při zatížení, pevnosti betonu, vlhkosti, teplotě okolního prostředí a dalších vlastnostech betonu. Tento model dotvarování je v téměř nezměněné formě rovněž v EN 1992-1-1, 2004 [39]. Obr. 33 [40] nám ukazuje osm modelů mezinárodního typu, které se používají k predikci dotvarování. Tyto empiricky založené modely, které se liší ve své technice, vyžadují určité vnitřní nebo vnější veličiny.

METHOD		SABS 0100 (1992)	BS 8110 (1985)	ACI 209 (1992)	AS 3600 (1988)	CEB – FIP (1970)	CEB – FIP (1978)	CEB – FIP (1990)	RILEM Model B3 (1995)
Intrinsic Factors	Aggregate Type	X							
	A/C Ratio								X
	Air Content			X					
	Cement Content					X			X
	Cement Type					X	X	X	X
	Concrete Density			X	X				
	Fine/Total Aggregate Ratio (Mass)			X					
	Slump			X					
	W/C Ratio					X			X
	Water Content								X
Extrinsic Factors	Age at First Loading	X	X	X	X	X	X	X	X
	Age of Sample								X
	Applied Stress	X	X	X	X	X	X	X	X
	Characteristic Strength at Loading	X	X						
	Cross-section Shape								X
	Curing Conditions								X
	Compressive Strength at 28 Days			X	X	X	X	X	X
	Duration of Load			X	X	X	X	X	X
	Effective Thickness	X	X	X	X	X	X	X	X
	Elastic Modulus at Age of Loading	X	X						X
	Elastic Modulus at 28 Days	X	X	X	X	X	X	X	X
	Relative Humidity	X	X	X	X	X	X	X	X
	Temperature							X	X
	Time Drying Commences								X

Obr. 33 Faktory ovlivňující dotvarování různých predikčních metod [40]

Z příslušného obrázku tabulky můžeme vyčíst, že CEB-FIP 1990 [38] do predikce dotvarování zahrnuje do výpočtu vliv typu cementu, stáří betonu při jeho prvním zatížení, aplikované napětí, 28 denní pevnost betonu v tlaku, dobu trvání zatížení, účinnou tloušťku prvku, modul pružnosti betonu v době zatížení, modul pružnosti ve 28 dnech stáří betonu, relativní vlhkost a teplotu [40].

4. Experimentální část

Předmětem diplomové práce bylo v první části sledování vlivu provzdušnění a způsobu ošetřování na dlouhodobý vývoj modulu pružnosti v tlaku, a to jak statického, tak dynamického. Moduly pružnosti byly stanoveny pomocí nedestruktivního měření ultrazvukovou a rezonanční metodou. Stanovení statických modulů pružnosti a pevností betonu proběhlo za použití lisu.

Dne 17. 3. 2009 proběhlo odebrání zkušebních vzorků betonu ze stavby opěry silničního mostu Hradecká (Obr. 34). Zhotoveno bylo celkem 12 krychlí o rozměrech hrany 150 mm a 14 trámců o rozměrech hran 100 x 100 x 400 mm. Pevnostní třída odebraného betonu byla C30/37 XF4 s procentuálním množstvím vzduchu 3 %. Množství vzduchu v betonu bylo zjištěno pracovníky externí laboratoře. Přesné složení zobrazuje Tab. 2.



Obr. 34 Odebírání vzorků betonu ze stavby (12 krychlí, 14 trámců) 17. 3. 2009

Třída betonu	CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	0 – 4 Ledce [kg]	8 – 16 Olbra [kg]	11 – 22 Lomnič [kg]	Voda [l]	v/c	Sika Aer200 [kg]	ViscoC 5 – 800 [kg]	Objem. hmotn. [kg/m ³]
C 30/37 XF4	400	700	669	284	172	0,43	0,60	2,40	2228

Tab. 2 Konečné složení provzdušněného čerstvého betonu pro konzistenci betonu S3

Dne 30. 5. 2009 byl pro naše účely odebrán ze stavby mostovky stejného mostu počet zkušebních vzorků betonu jako v předchozím případě (Obr. 35). Šlo o 12 krychlí s rozměry hran 100 mm a 14 trámců rozměrech hran 100 x 100 x 400 mm. Pevnostní třída odebraného betonu byla stejná jakou betonu odebraného 17. 3. 2009, tedy C30/37 XF1, ale tentokrát bez provzdušnění. Přesné složení zobrazuje Tab. 3.



Obr. 35 Odebírání vzorků betonu ze stavby (12 krychlí, 14 trámců) 30. 5. 2009 [28]

Třída betonu	CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	0 – 4 Ledce [kg]	8 – 16 Olbra [kg]	11 – 22 Lomnič [kg]	Voda [l]	v/c	ViscoC 5 – 800 [kg]	Objem. hmotn. [kg/m ³]
C 30/37 XF4	400	700	669	284	172	0,43	2,40	2228

Tab. 3 Konečné složení neprovzdušněného čerstvého betonu pro konzistenci betonu S3

Pracovníci externí zkušební laboratoře zjišťovali konzistenci čerstvého betonu metodou sednutí kužele. V obou případech byl beton uložený do forem hutněn pomocí vysokofrekvenčního vibračního stolku a poté byla část vzorků ošetřována ve vodě, část na vzduchu.

Na polovině krychlí z provzdušněného betonu obou sad vzorků byla po 28 dnech zrání betonu zjištěna maximální zatěžovací síla (Obr. 36, Obr. 37).



Obr. 36 Zatěžování vzorku betonu ve tvaru krychle pro zjištění maximální zatěžovací síly [28]



Obr. 37 Vyhovující způsob porušení zkušební krychle [28]

Výsledky sloužily jako podklad pro stanovení statického modulu pružnosti ve stáří 28 dní. Zbývající část zkušebních těles byla ponechána na zkoušky po 90-ti, 365-ti a 730-ti dnech. Zkoušky modulu pružnosti byly prováděny dle ČSN ISO 6784 [3] na trámcích s poměrem stran 4:1:1 zatěžovaných dostředným tlakem, příslušné deformace byly odečteny z tenzometrů. Z poměru příslušného napětí a poměrného přetvoření byl dopočten statický modul pružnosti v tlaku.

Kromě zmíněných charakteristik byla před prováděním statických zkoušek na všech zkušebních trámcích (100×100×400 mm) stanovena hodnota dynamického modulu pružnosti, a to ve stáří 3, 7, 28, 90, 365 a 730 dní. K tomuto účelu byly použity dvě nedestruktivní zkušební metody, metoda ultrazvuková a rezonanční.

Pro stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou byl použit přístroj TICO (výrobce Proceq). Hodnota modulu pružnosti byla vypočtena na základě naměřené doby průchodu ultrazvukového impulsu (UZ) vzorkem dle ČSN 73 1371 [4].

Pro stanovení rezonančních frekvencí bylo použito zkušební zařízení, jež využívá piezoelektrického snímače, který umožňuje přenos zvukové frekvence do záznamové jednotky. Měření bylo prováděno v souladu s normou ČSN 73 1372 [12]. Z podélných, příčných a kroutivých frekvencí byly opět vypočteny příslušné hodnoty dynamických modulů pružnosti.

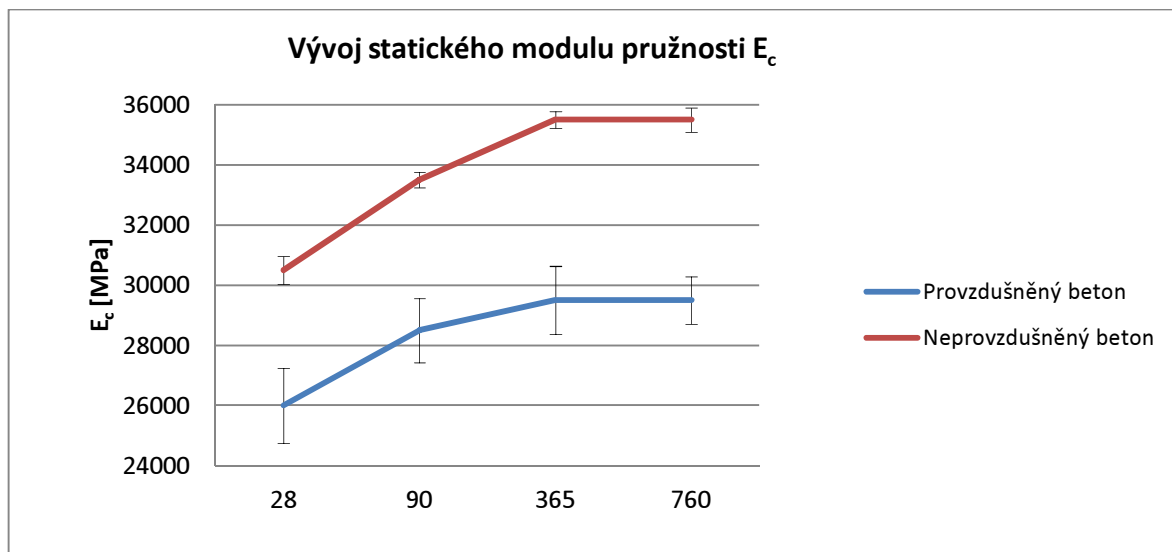
Zmíněný postup, v celém svém rozsahu, byl později proveden i na vzorcích z betonu neprovzdušněného.

Dalším úkolem diplomové práce byla predikce dotvarování mostní konstrukce podle třech vybraných matematických modelů, jimiž jsou ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2], Model B3 [36] profesora Bažanta a CEB-FIP Model Code 1990 [12]. K tomuto úkolu patřilo zhodnocení vhodnosti použitých modelů pro daný typ betonu. Do výpočtu byly zahrnuty hodnoty pevností a modulů pružnosti, které byly zjištěny experimentálně na vyrobených betonových vzorcích. Z tohoto důvodu je v analýze zohledněn způsob ošetřování (relativní vlhkost okolního prostředí), složení betonů a hlavně jejich provzdušnění.

V práci je rovněž porovnán průběh dotvarování vypočtený z námi zjištěných charakteristik betonových vzorků s takzvaným normovým vzorkem, podle jednotlivých modelů. Normový vzorek značí vzorek betonu, kde bylo počítáno s jeho normovými charakteristikami dle ČSN EN 1992-1-1 [2].

4.1 Porovnání statických modulů pružnosti

Zkouška zjištění statického modulu pružnosti byla provedena na normových trámčích dle normy ČSN ISO 6784 [3]. Postup byl popsán v kapitole 3.4.1. Zjištěny byly hodnoty modulu pružnosti betonu stáří 28, 90, 365 a 730 dní pro sadu vzorků ošetřovaných jak ve vodě, tak i ve vzduchu pro provzdušněný a neprovzdušněný beton. Porovnávány byly hodnoty mezi provzdušněným a neprovzdušněným betonem, dále pak vliv způsobu ošetřování.



Obr. 38 Porovnání vývoje statického modulu pružnosti u provzdušněného a neprovzdušněného betonu

Tab. 4 Průměrné hodnoty naměřených modulů pružnosti betonu v tlaku

E_c	jednotky	28	90	365	760
Provzdušněný	MPa	26000	28500	29500	29500
Sm. Odchylka	MPa	1246	1071	1136	786
Var. Koeficient	%	4,79	3,76	3,85	2,67
Neprovzdušněný	MPa	30500	33500	35500	35500
Sm. Odchylka	MPa	465	254	276	398
Var. Koeficient	%	1,52	0,76	0,78	1,12



Obr. 39 Uspořádání zkoušky při zjišťování statického modulu pružnosti betonu v tlaku [28]

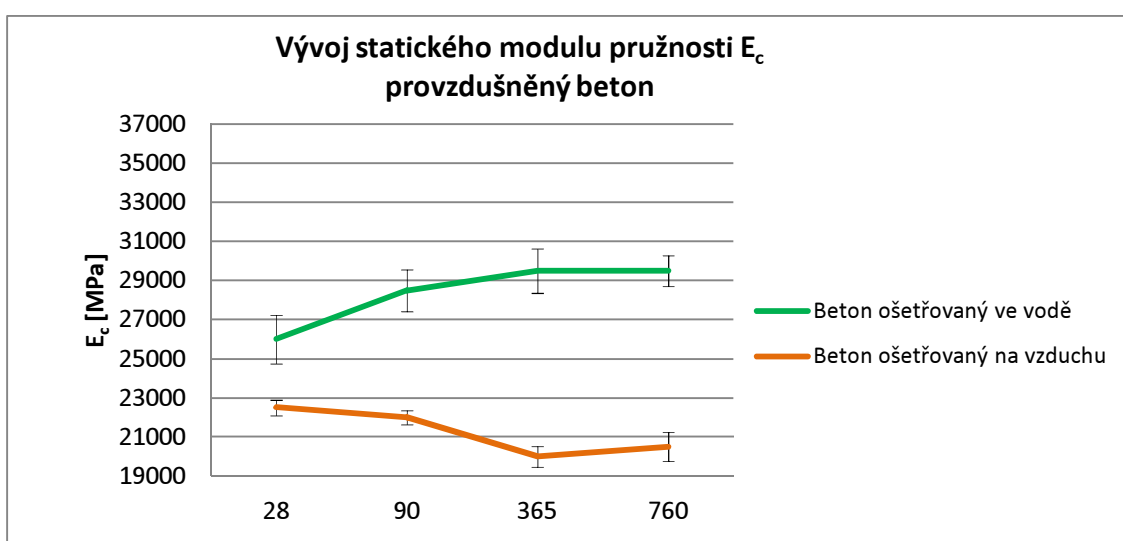
Z výsledků provedených zkoušek vyplývá, že hodnota modulu pružnosti v čase se zvyšuje a vyšších hodnot nabývá beton, který nebyl provzdušněn. Rozdílnost hodnot ve 28 dnech stáří betonu je 4500 MPa a až 6000 MPa, tedy 16,9 %, u vzorků stáří dvou let. Jak je také vidět na Obr. 38 a v Tab. 4, pro jednotlivý typ betonu se hodnota statického modulu pružnosti v 365 a 730 dnech neliší.

Tab. 5 Průměrné hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku u provzdušněného betonu

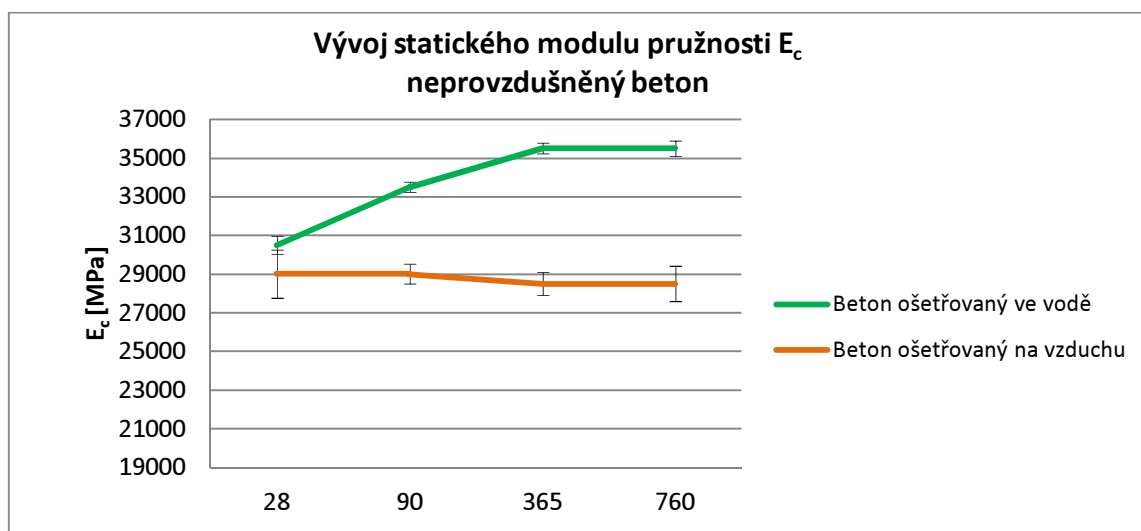
Provzdušněný beton E_c	jednotky	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	26000	28500	29500	29500
Sm. Odchylka	MPa	1246	1071	1136	786
Var. Koeficient	%	4,79	3,76	3,85	2,67
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	22500	22000	20000	20500
Sm. Odchylka	MPa	395	355	527	743
Var. Koeficient	%	1,76	1,61	2,64	3,63

Tab. 6 Průměrné hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku u neprovzdušněného betonu

Neprovzdušněný beton E_c	jednotky	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	30500	33500	35500	35500
Sm. Odchylka	MPa	465	254	276	398
Var. Koeficient	%	1,52	0,76	0,78	1,12
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	29000	29000	28500	28500
Sm. Odchylka	MPa	1245	515	584	911
Var. Koeficient	%	4,29	1,78	2,05	3,20



Obr. 40 Vliv ošetřování na vývoj statického modulu pružnosti v tlaku u provzdušněného betonu



Obr. 41 Vliv ošetřování na vývoj statického modulu pružnosti v tlaku u neprovzdušněného betonu

Z výsledků provedených zkoušek vyplývá, že vzorky ošetřované ve vodě vykazují vyšší modul pružnosti než vzorky, které byly ošetřovány na vzduchu. Jak můžeme vidět v Tab. 5 a Tab. 6, hodnota modulu se pro 28denní vzorky betonu liší až o 8000 MPa. Po dvou letech je tento rozdíl 15000 MPa, tedy celých 42,3 %. Hodnoty modulu se nejvíce rozcházejí mezi vzorky provzdušněného betonu ošetřovanými v suchém prostředí a mezi vzorky neprovzdušněného betonu ošetřovanými ve vodě. Téměř u všech vzorků se hodnota statického modulu pružnosti betonu po roce ustálila, což je graficky znázorněno na Obr. 40 a Obr. 41.

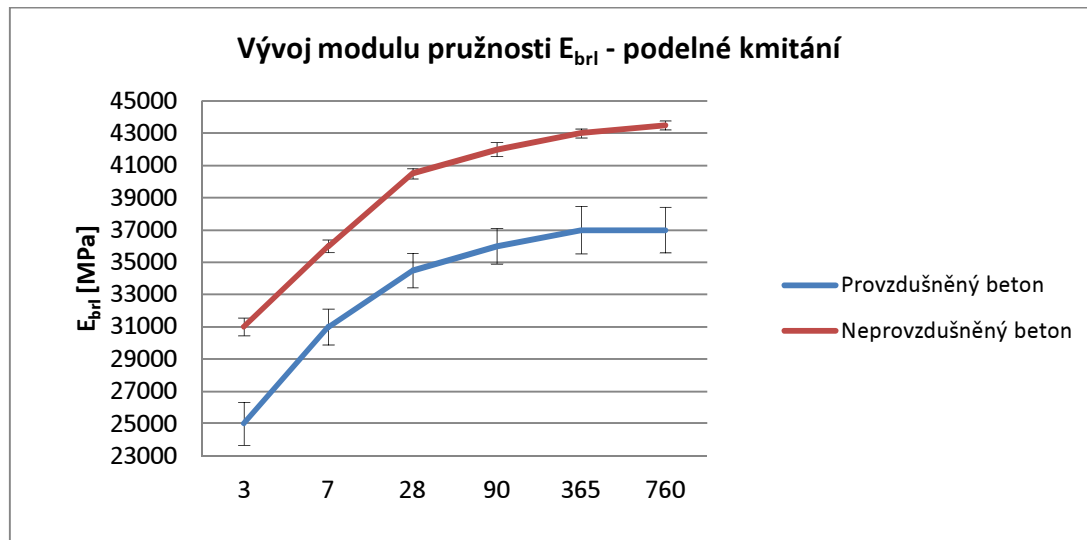
4.2 Porovnání dynamických modulů pružnosti

K měření na normových trámčích byla použita metoda rezonanční a metoda ultrazvuková impulsová.

4.2.1 Výsledky rezonanční metody

Zkouška byla provedena dle normy ČSN 73 1372 [12]. Postup měření a vyhodnocení je podrobněji popsán v kapitole 3.4.2. Měření proběhlo na vzorcích z provzdušněného a neprovzdušněného betonu ošetřovaných ve vodě i na vzduchu ve 3, 7, 28, 90, 365 a 730 dnech jeho stáří. Z výsledků zkoušek byly vyhodnoceny 3 druhy dynamických modulů pružnosti podle druhu naměřeného kmitání. Porovnávány byly hodnoty mezi provzdušněným a neprovzdušněným betonem, dále pak vliv způsobu ošetřování.

Prvním vyhodnocením této zkoušky byl dynamický modul pružnosti při podélném kmitání u obou druhů betonu. Jejich srovnání je zobrazeno na Obr. 42 a Tab. 7



Obr. 42 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného a neprovzdušněného betonu

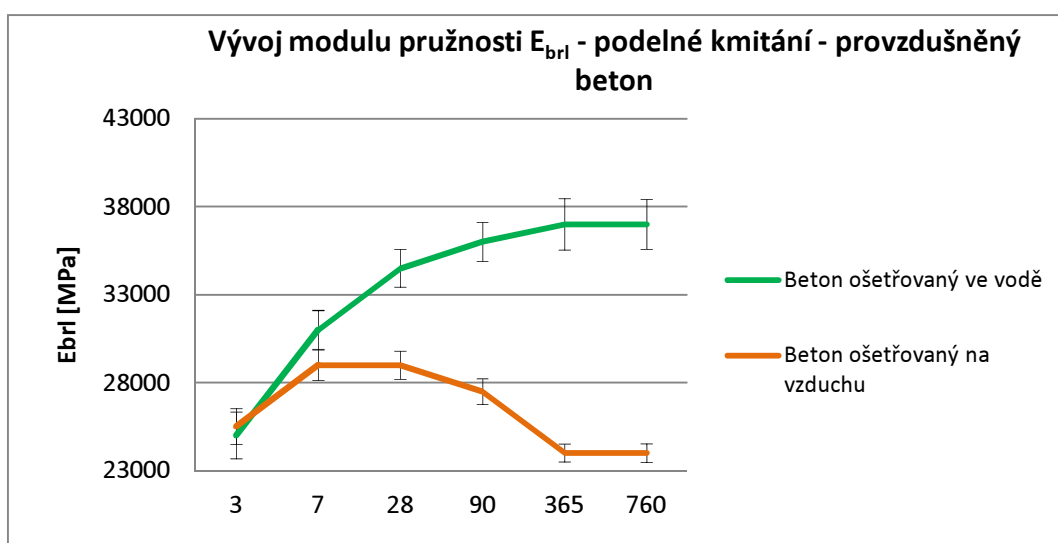
E_{brI}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Provzdušněný	MPa	25000	31000	34500	36000	37000	37000
Sm. Odchylka	MPa	1324	1108	1072	1105	1467	1411
Var. Koeficient	%	5,30	3,57	3,11	3,07	3,96	3,81
Neprovzdušněný	MPa	31000	36000	40500	42000	43000	43500
Sm. Odchylka	MPa	544	383	324	434	278	279
Var. Koeficient	%	1,76	1,06	0,80	1,03	0,65	0,64

Tab. 7 Průměrné hodnoty naměřených dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání

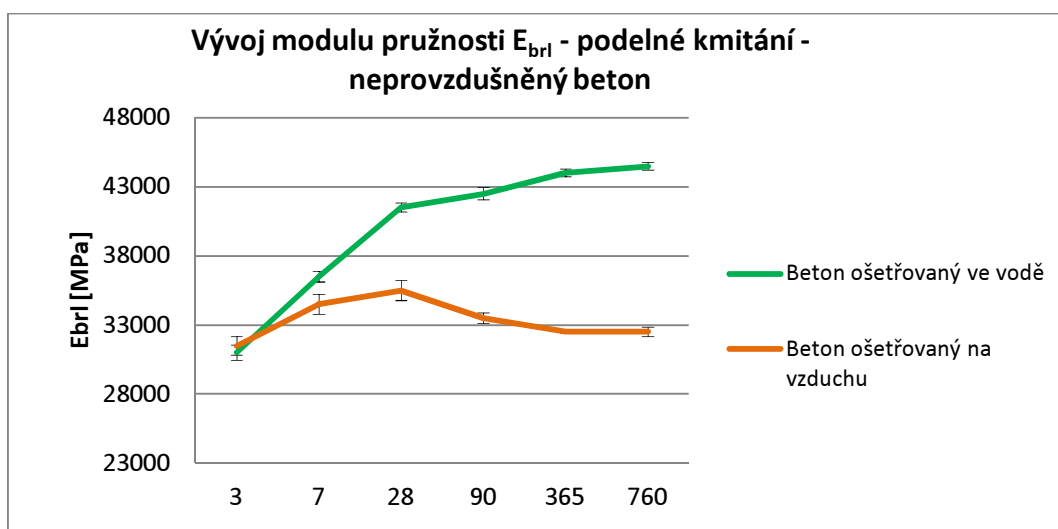
Z výsledků provedených zkoušek vyplývá, že vyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti v tlaku určené pomocí rezonanční metody z podélného kmitání byly zjištěny u neprovzdušněného typu betonu. Rozdíl hodnot mezi provzdušněným a neprovzdušněným betonem je nejen ve 28 dnech jeho zrání 6000 MPa. Ve stáří betonu 730 dní má neprovzdušněný beton o 14,9 % vyšší hodnotu dynamického modulu.

Provzdušněný beton E_{brl}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	25000	31000	34500	36000	37000	37000
Sm. Odchylka	MPa	1324	1108	1072	1105	1467	1411
Var. Koeficient	%	5,30	3,57	3,11	3,07	3,96	3,81
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	25500	29000	29000	27500	24000	24000
Sm. Odchylka	MPa	1024	860	788	723	511	538
Var. Koeficient	%	4,01	2,97	2,72	2,63	2,13	2,24

Tab. 8 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku naměřené pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného betonu



Obr. 43 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného betonu

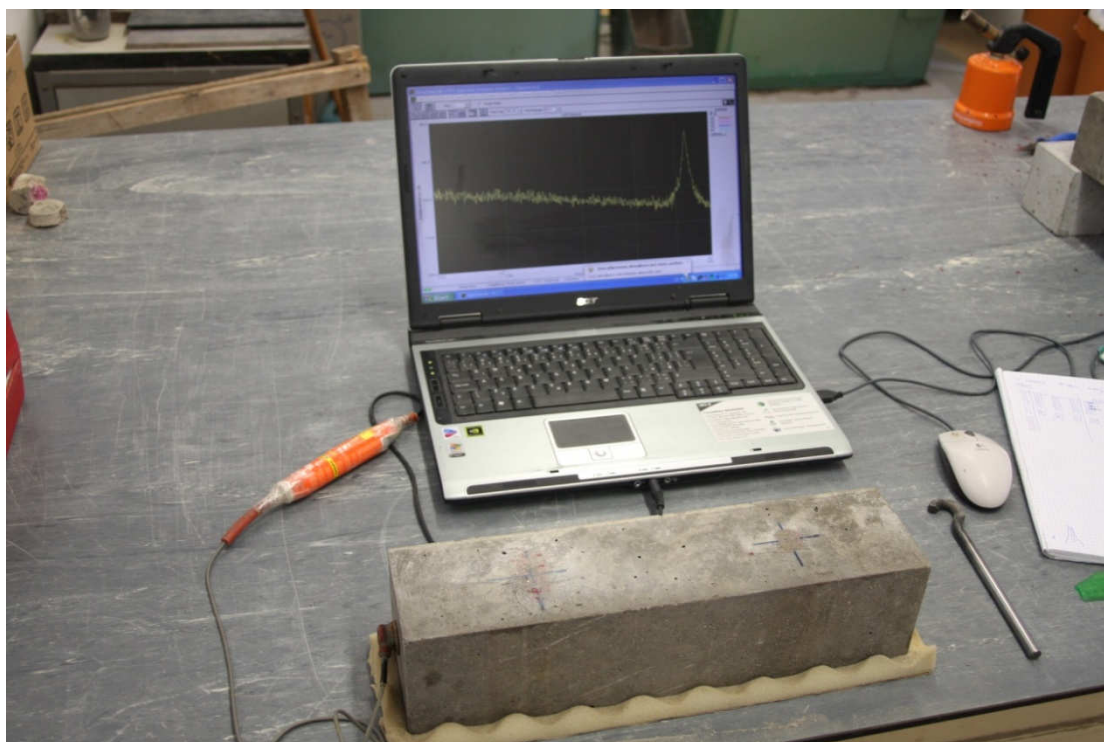


Obr. 44 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u neprovzdušněného betonu

Neprovzdušněný beton E_{brl}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	31000	36000	40500	42000	43000	43500
Sm. Odchylka	MPa	544	383	324	434	278	279
Var. Koeficient	%	1,76	1,06	0,80	1,03	0,65	0,64
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	31500	34500	36500	35000	32500	32000
Sm. Odchylka	MPa	675	722	726	375	120	344
Var. Koeficient	%	2,14	2,09	1,99	1,07	0,37	1,08

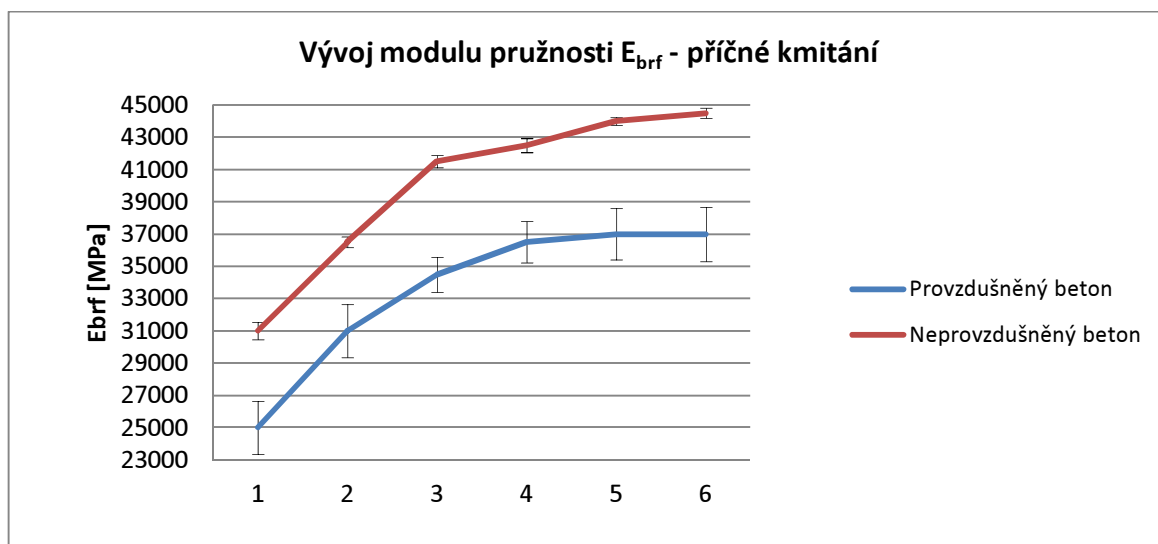
Tab. 9 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u neprovzdušněného betonu

Z výše uvedených výsledků (Tab. 8, Tab. 9) provedených zkoušek vyplývá, že vzorky ošetřované ve vodě vykazují vyšší dynamický modul pružnosti zjištěného z podélného kmitání než vzorky ošetřované na vzduchu. Porovnáním Obr. 43 a Obr. 44 můžeme vidět, že 28denní beton se liší až o 11 500 MPa a největší rozdíl je 19500 MPa, tedy celých 44,8 %, u dvouletých hodnot mezi vzorky provzdušněného betonu ošetřovanými v suchém prostředí a mezi vzorky neprovzdušněného betonu ošetřovanými ve vodě. V tomto případě je opět vidět, že po roce se u téměř všech vzorků hodnota dynamického modulu pružnosti betonu určeného z podélného kmitání ustálila. Je zajímavé, že u betonů ošetřovaných na vzduchu hodnota modulu po 28 dnech klesá, zatímco u betonů ošetřovaných ve vodě roste.



Obr. 45 Uspořádání měření pomocí rezonanční metody [28]

Druhým vyhodnocením měření provedených rezonanční metodou byl dynamický modul pružnosti betonu určený z příčného kmitání. Porovnání výsledků pro provzdušněný a neprovzdušněný beton je na Obr. 46 a v Tab. 10.



Obr. 46 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného a neprovzdušněného betonu

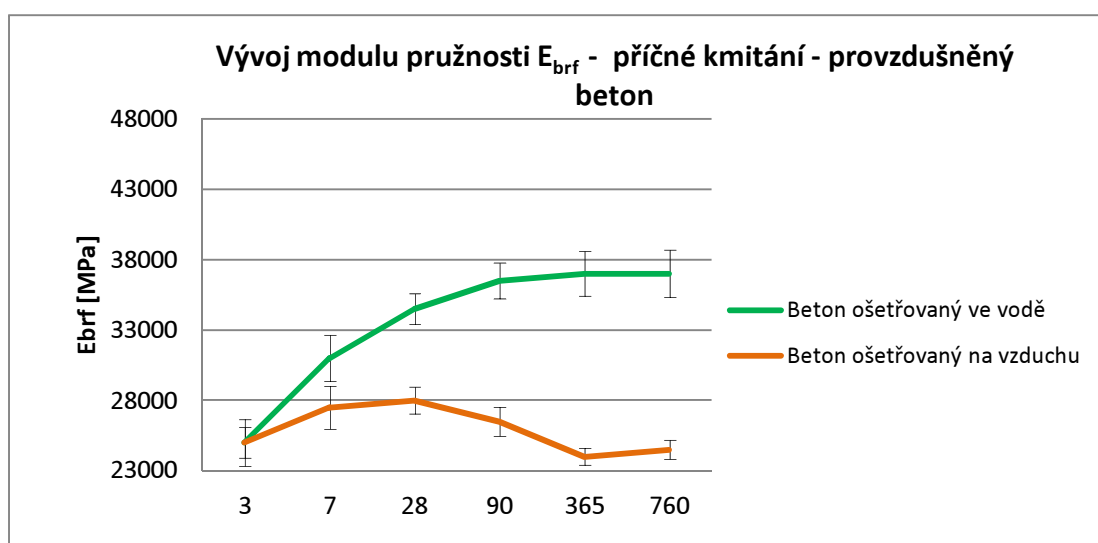
E_{brl}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Provzdušněný	MPa	25000	31000	34500	36000	37000	37000
Sm. Odchylka	MPa	1324	1108	1072	1105	1467	1411
Var. Koeficient	%	5,30	3,57	3,11	3,07	3,96	3,81
Neprovzdušněný	MPa	31000	36000	40500	42000	43000	43500
Sm. Odchylka	MPa	544	383	324	434	278	279
Var. Koeficient	%	1,76	1,06	0,80	1,03	0,65	0,64

Tab. 10 Průměrné hodnoty naměřených dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání

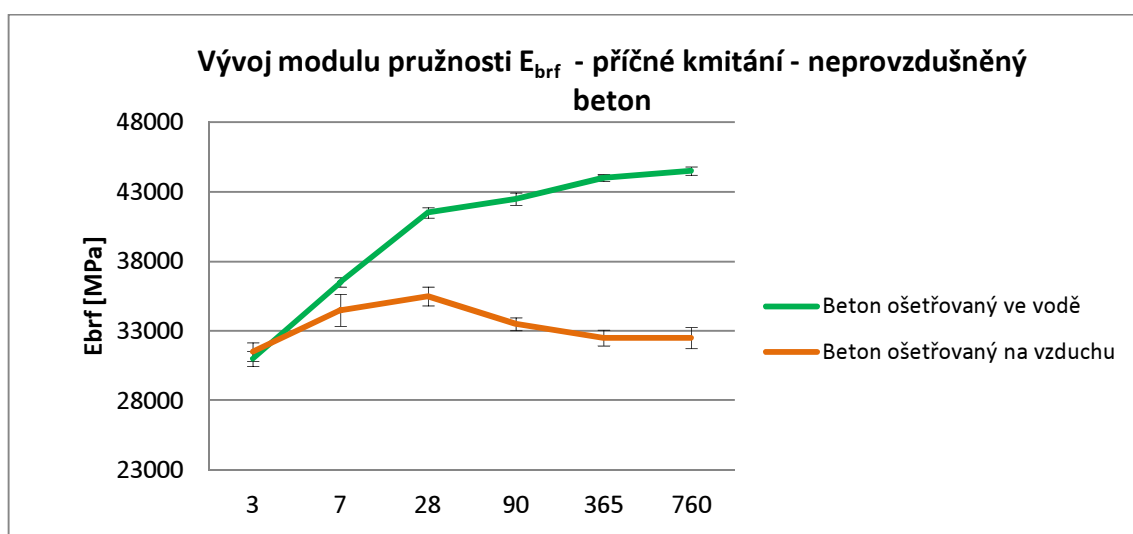
Z výsledků zkoušek opět vyplývá, že vzorky vyrobené z neprovzdušněného betonu nabývají vyšších hodnot modulů pružnosti. Ve 28 dnech stáří betonu se moduly liší o 6000 MPa a po dvou letech dokonce o 6500 MPa. Neprovzdušněný beton tedy vykazuje hodnoty dynamického modulu pružnosti při příčném kmitání vyšší až o 14,9 %.

Provzdušněný beton E_{brf}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	25000	31000	34500	36500	37000	37000
Sm. Odchylka	MPa	1661	1644	1090	1280	1592	1688
Var. Koeficient	%	6,64	5,30	3,16	3,51	4,30	4,56
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	25000	27500	28000	26500	24000	24500
Sm. Odchylka	MPa	1085	1518	954	1022	600	675
Var. Koeficient	%	4,34	5,52	3,41	3,86	2,50	2,75

Tab. 11 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného betonu



Obr. 47 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného betonu



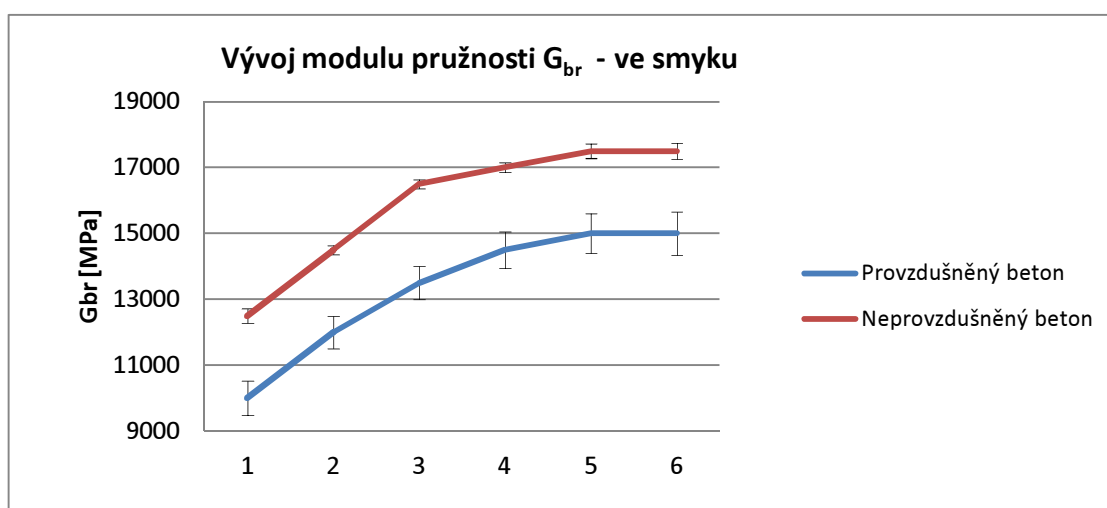
Obr. 48 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u neprovzdušněného betonu

Provzdušněný beton E_{brf}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	31000	36500	41500	42500	44000	44500
Sm. Odchylka	MPa	544	330	383	436	233	303
Var. Koeficient	%	1,76	0,90	0,92	1,03	0,53	0,68
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	31500	34500	35500	33500	32500	32500
Sm. Odchylka	MPa	675	1134	682	460	562	749
Var. Koeficient	%	2,14	3,29	1,92	1,37	1,73	2,31

Tab. 12 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u neprovzdušněného betonu

Z výše uvedených výsledků provedených zkoušek vyplývá, že vzorky betonu ošetřované ve vodě vykazují vyšší dynamický modul pružnosti určený z příčného kmitání než vzorky ošetřované na vzduchu. Porovnáním hodnot z Tab. 11 a Tab. 12 zjistíme, že dynamický modul pružnosti betonu se po 28 dnech zrání liší až o 13 500 MPa a největší rozdíl hodnot je 20 000 MPa, tedy celých 44,9 %, u dvouletých hodnot mezi vzorky z provzdušněného betonu ošetřovanými v suchém prostředí a mezi vzorky neprovzdušněného betonu ošetřovanými ve vodě. Jak můžeme vidět na Obr. 47 a Obr. 48, u betonů ošetřovaných na vzduchu je po 28 dnech opět patrná klesající hodnota modulů.

Třetím vyhodnocením zkoušek rezonanční metodou byl dynamický modul pružnosti betonu ve smyku. Porovnání výsledků pro provzdušněný a neprovzdušněný beton můžeme vidět na Obr. 49 a v Tab. 13.



Obr. 49 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného a neprovzdušněného betonu

G_{br}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Provzdušněný	MPa	10000	12000	13500	14500	15000	15000
Sm. Odchylka	MPa	521	491	500	556	603	654
Var. Koeficient	%	5,21	4,09	3,70	3,83	4,02	4,36
Neprovzdušněný	MPa	12500	14500	16500	17000	17500	17500
Sm. Odchylka	MPa	220	137	133	145	219	242
Var. Koeficient	%	1,76	0,94	0,81	0,86	1,25	1,38

Tab. 13 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody

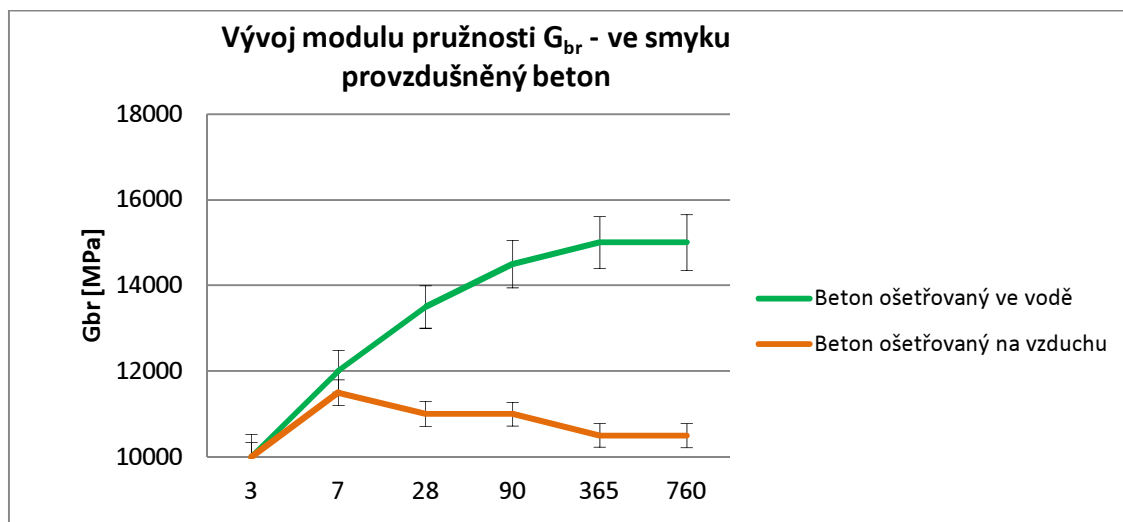
Z výsledků zkoušek vyplývá, že vzorky vyrobené z neprovzdušněného betonu nabývají vyšších hodnot modulů pružnosti než vzorky vyrobené z betonu provzdušněného. Ve 28 dnech stáří betonu se moduly liší o 3000 MPa a po dvou letech o 3500 MPa. Neprovzdušněný beton tedy vykazuje hodnoty dynamického modulu pružnosti ve smyku vyšší až o 14,3 %.

Provzdušněný beton G_{br}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	10000	12000	13500	14500	15000	15000
Sm. Odchylka	MPa	521	491	500	556	603	654
Var. Koeficient	%	5,21	4,09	3,70	3,83	4,02	4,36
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	10000	11500	11000	11000	10500	10500
Sm. Odchylka	MPa	326	302	292	280	274	280
Var. Koeficient	%	3,26	2,63	2,66	2,55	2,61	2,67

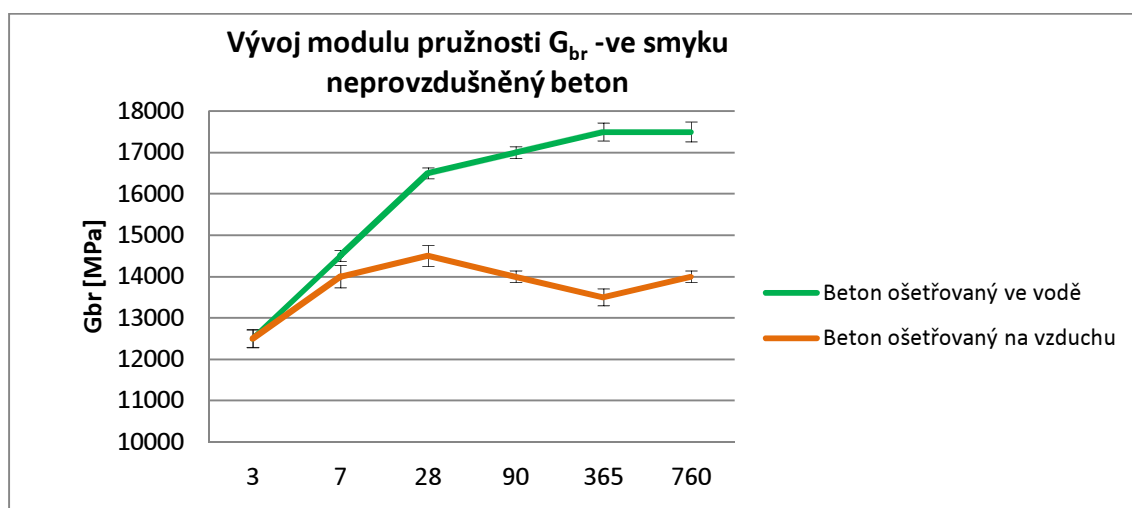
Tab. 14 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného betonu

Neprovzdušněný beton G_{br}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	12500	14500	16500	17000	17500	17500
Sm. Odchylka	MPa	220	137	133	145	219	242
Var. Koeficient	%	1,76	0,94	0,81	0,86	1,25	1,38
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	12500	14000	14500	14000	13500	14000
Sm. Odchylka	MPa	211	272	252	137	206	137
Var. Koeficient	%	1,69	1,94	1,74	0,98	1,52	0,98

Tab. 15 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u neprovzdušněného betonu



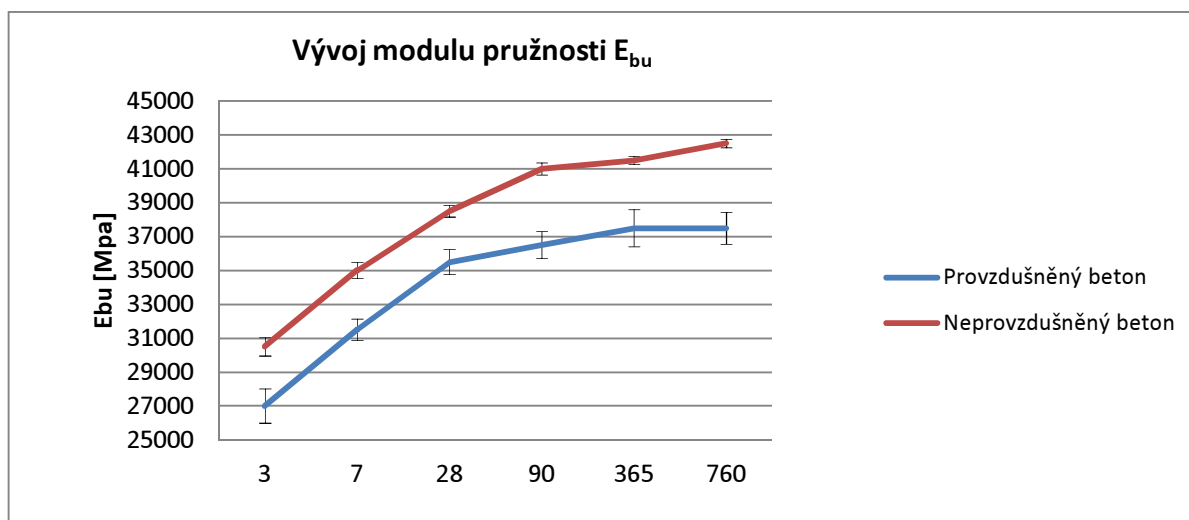
Obr. 50 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného betonu



Obr. 51 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u neprovzdušněného betonu

Z výsledků zkoušek uvedených v Tab. 14 a Tab. 15 a na Obr. 50 a Obr. 51 je vidět, že beton ošetřovaný ve vodě nabývá vyšších hodnot modulů pružnosti. Ve 28 dnech je tento rozdíl hodnot 5500 MPa a v 760 dnech je celých 7000 MPa. Můžeme tedy konstatovat, že dynamický modul pružnosti betonu ve smyku má nejvyšší hodnotu u neprovzdušněného betonu ošetřovaného ve vodě a liší se o 40 % od hodnot dynamického modulu ve smyku provzdušněného betonu, který byl ošetřován na vzduchu. U výsledků betonu ošetřovaného na vzduchu je po 28 dnech zrání opět vidět pokles hodnot dynamických modulů pružnosti.

Zkouška ultrazvukovou impulsovou metodou byla provedena podle normy ČSN 73 1371 [4]. Její podrobnější postup je popsán v kapitole 3.4.2. Dynamický modul pružnosti byl vyhodnocen pro vzorky stáří 3, 7, 28, 90, 365 a 730 dnů, které byly ošetřovány ve vodě a na vzduchu. Vyhodnocením této zkoušky byly hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku E_{bu} . Porovnávány byly hodnoty (Tab. 16, Obr. 52) mezi provzdušněným a neprovzdušněným betonem, poté hodnocen vliv způsobu ošetřování.

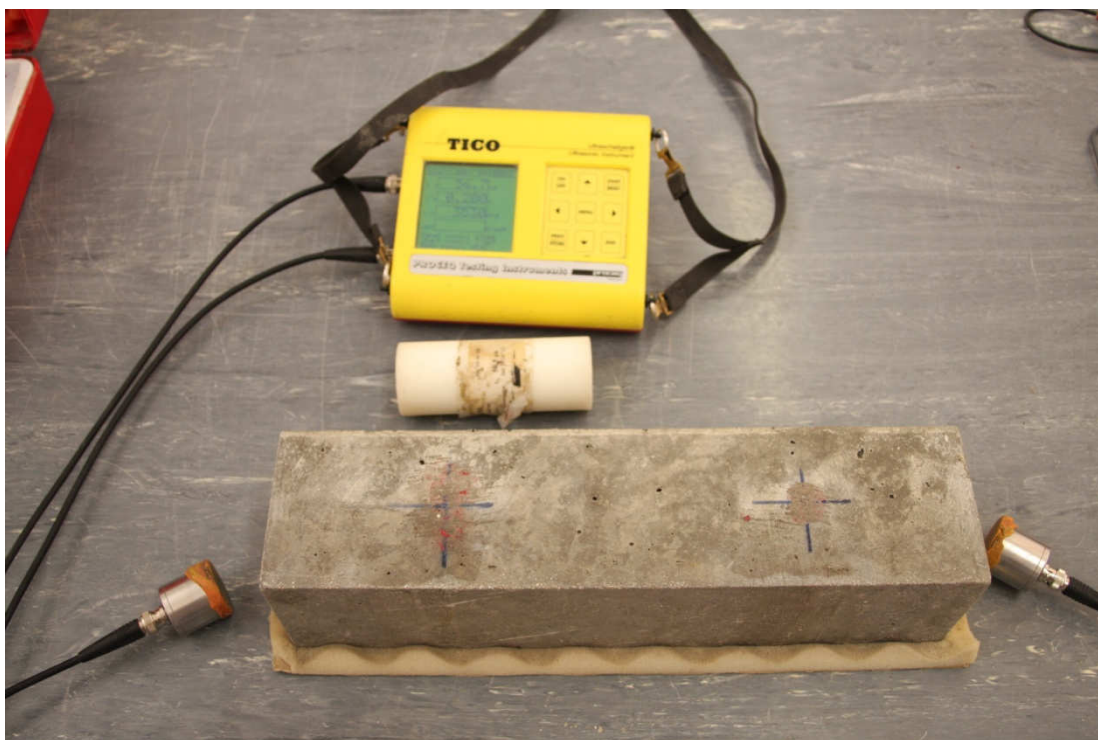


Obr. 52 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného a neprovzdušněného betonu

E_{bu}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Provzdušněný	MPa	27000	31500	35500	36500	37500	37500
Sm. Odchylka	MPa	1016	638	734	787	1095	947
Var. Koeficient	%	3,76	2,02	2,07	2,16	2,92	2,53
Neprovzdušněný	MPa	30500	35000	38500	41000	41500	42500
Sm. Odchylka	MPa	547	472	345	359	241	254
Var. Koeficient	%	1,79	1,35	0,90	0,88	0,58	0,60

Tab. 16 Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody

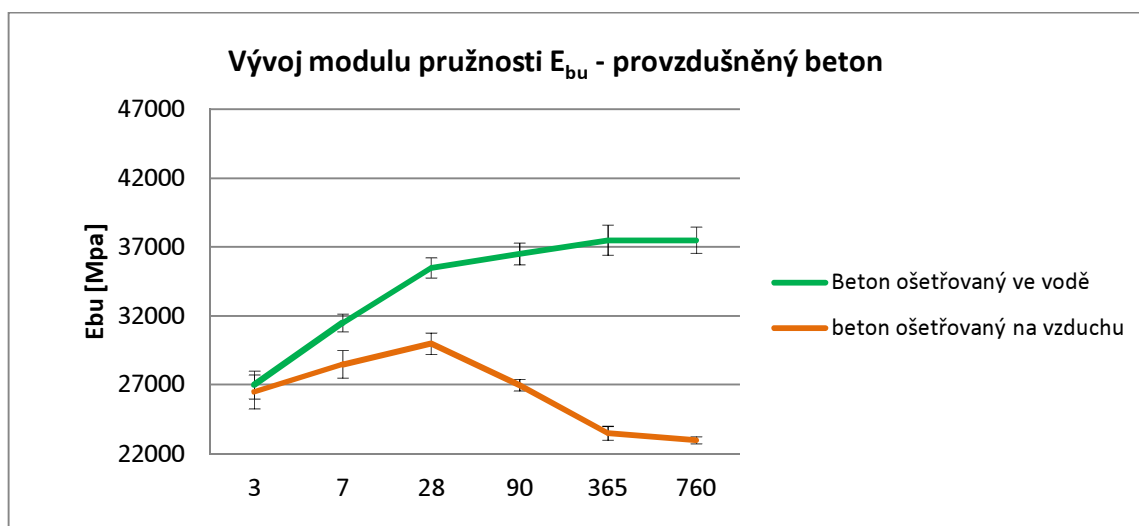
Z výsledků zkoušek je patrné, že vzorky vyrobené z neprovzdušněného betonu nabývají vyšších hodnot dynamických modulů pružnosti. Ve 28 dnech stáří betonu se moduly liší o 3000 MPa a po dvou letech o 5000 MPa. Neprovzdušněný beton tedy vykazuje hodnoty dynamického modulu pružnosti určené ultrazvukovou impulsovou metodou vyšší až o 11,8 %.



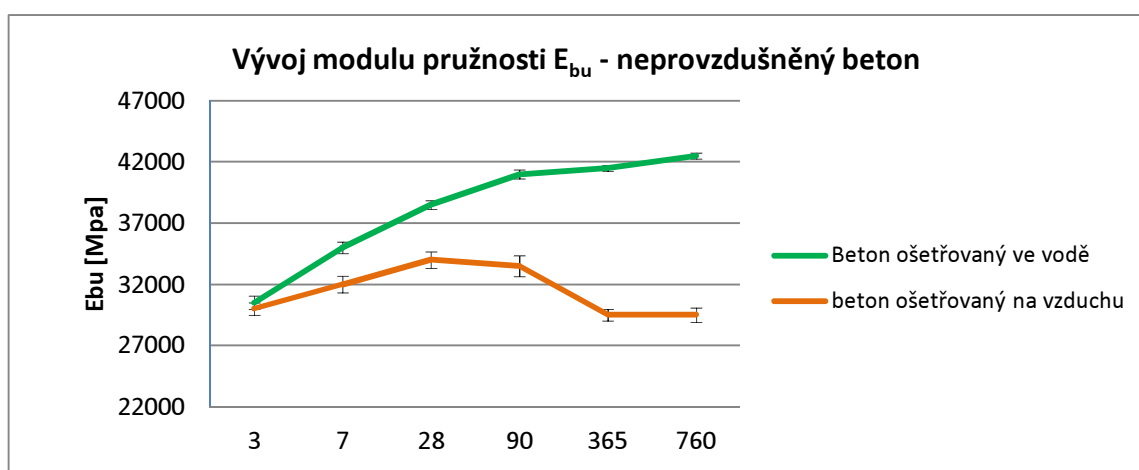
Obr. 53 Měření rychlosti šíření ultrazvuku pomocí přístroje Tico

Provzdušněný beton E_{bu}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	27000	31500	35500	36500	37500	37500
Sm. Odchylka	MPa	1016	638	734	787	1095	947
Var. Koeficient	%	3,76	2,02	2,07	2,16	2,92	2,53
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	26500	28500	30000	27000	23500	23000
Sm. Odchylka	MPa	1233	992	776	437	508	255
Var. Koeficient	%	4,65	3,48	2,59	1,62	2,16	1,11

Tab. 17 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného betonu



Obr. 54 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného betonu



Obr. 55 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u neprovzdušněného betonu

Neprovzdušněný beton E_{bu}	jednotky	3	7	28	90	365	760
Ošetřovaný ve vodě	MPa	30500	35000	38500	41000	41500	42500
Sm. Odchylka	MPa	547	472	345	359	241	254
Var. Koeficient	%	1,79	1,35	0,90	0,88	0,58	0,60
Ošetřovaný na vzduchu	MPa	30000	32000	34000	33500	29500	29500
Sm. Odchylka	MPa	515	671	674	848	494	590
Var. Koeficient	%	1,72	2,10	1,98	2,53	1,67	2,00

Tab. 18 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u neprovzdušněného betonu

Z výše uvedených výsledků provedených zkoušek vyplývá, že vzorky betonu ošetřované ve vodě vykazují vyšší dynamický modul pružnosti než vzorky ošetřované na vzduchu. Porovnáním hodnot z Tab. 17 a Tab. 18 zjistíme, že dynamický modul pružnosti betonu se po 28 dnech zrání liší až o 8 500 MPa a největší rozdíl hodnot je 19 500 MPa, tedy celých 45,9 %, u dvouletých hodnot mezi vzorky z provzdušněného betonu ošetřovanými v suchém prostředí a mezi vzorky neprovzdušněného betonu ošetřovanými ve vodě. Jak můžeme vidět na Obr. 54 a Obr. 55, u betonů ošetřovaných na vzduchu je po 28 dnech opět patrná klesající hodnota modulů.

4.3 Porovnání průběhu dotvarování

V této části byly srovnány vypočtené teoretické průběhy dotvarování konstrukce podle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2], Modelu B3 [36] a CEB – FIP Model Code 1990 [38], u nichž byly využity experimentálně zjištěné charakteristiky betonu. Do výpočtu byly dosazeny hodnoty 28 denního statického modulu pružnosti a pevnosti.

V první fázi výpočtu došlo k teoretické aplikaci předchozího experimentu na reálnou konstrukci mostu, ovšem s určitým zjednodušením. Přesné údaje o geometrii mostu nebyly k dispozici, proto bylo dotvarování počítáno pro teoretické betonové těleso – nekonečný hranol čtvercového průřezu plochy 10 000 mm². Doba ošetřování mostní konstrukce, stejně jako doba při vnesení předpětí t_0 , byla 7 dní. Dle informací prováděcí firmy se reálná napětí v betonu při předpínání pohybovala kolem hodnoty 10 % pevnosti. Hodnota napětí byla pro jistotu stanovena vyšší, přibližně 20 % skutečné pevnosti, tedy 10 MPa.

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] a CEB – FIP Model Code 1990 [38] počítají s 28 denním statickým modulem pružnosti, ten byl použit z námi zjištěných hodnot v předchozí části diplomové práce. Dále počítají s průměrnou hodnotou pevnosti betonu v tlaku f_{cm} ve stáří 28 dní, proto musela být přepočtena námi zjištěná krychelná pevnost betonu v tlaku na válcovou a navýšena o hodnotu 8 MPa. U Modelu B3 byla naopak vyžadována hodnota válcové pevnosti f_c ve 28 dnech a za tvar průřezu byl zvolen nekonečný čtyřhranný hranol. U výsledků tohoto modelu bylo nutné od konečných hodnot dotvarování odečíst okamžitou deformaci při vnesení zatížení. Přehled použitých hodnot je obsažen v Tab. 19:

[MPa]	Provzdušněný beton		Neprovzdušněný beton	
	Ve vodě	Na vzduchu	Ve vodě	Na vzduchu
σ_c	10	10	10	10
E_c	26000	22500	30500	29000
f_{cm}	49,4	48,4	58,5	57,2
f_c	33,12	32,32	40,4	39,36
RH	100%	60%	100%	60%

Tab. 19 Přehled hodnot použitých v jednotlivých modelech

Hodnoty součinitelů dotvarování (Tab. 20) a následného přetvoření od dotvarování vypočtené podle jednotlivých modelů byly zjištěny pro 7, 28, 90, 365 a 730 dní stáří pro typ provzdušněného i neprovzdušněného betonu s ohledem na jeho ošetřování. Výsledky jsou znázorněny graficky na Obr. 56, Obr. 57, Obr. 58, Obr. 59. a číselně v Tab. 21, Tab. 22, Tab. 23.

ϕ (t, t ₀)	Eurokód 2				Model B3				CEP - FIB			
	Provzdušněný		Neprovzdušněný		Provzdušněný		Neprovzdušněný		Provzdušněný		Neprovzdušněný	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0,4169	1,1737	0,380	1,0063	0,5786	0,7755	0,5961	0,790	0,4230	1,3680	0,3891	1,2571
90	0,6209	1,6774	0,5655	1,4338	0,7857	1,1579	0,8273	1,194	0,6313	1,9664	0,5807	1,8070
365	0,9108	2,2002	0,8262	1,8692	1,0074	1,6091	1,0809	1,6647	0,9328	2,6123	0,8580	2,4005
730	1,0586	2,3742	0,9567	2,0111	1,1152	1,7647	1,2014	1,8301	1,0914	2,8368	1,0040	2,6068

Tab. 20 Hodnoty součinitele dotvarování vypočtené dle daných modelů

ϵ_{cc} (t, t ₀)	Eurokód 2			
	Provzdušněný		Neprovzdušněný	
	N	S	N	S
7	0	0	0	0
28	0,00016	0,000522	0,000125	0,000347
90	0,000239	0,000746	0,000185	0,000494
365	0,00035	0,000978	0,000271	0,000645
730	0,000407	0,001055	0,000314	0,000693

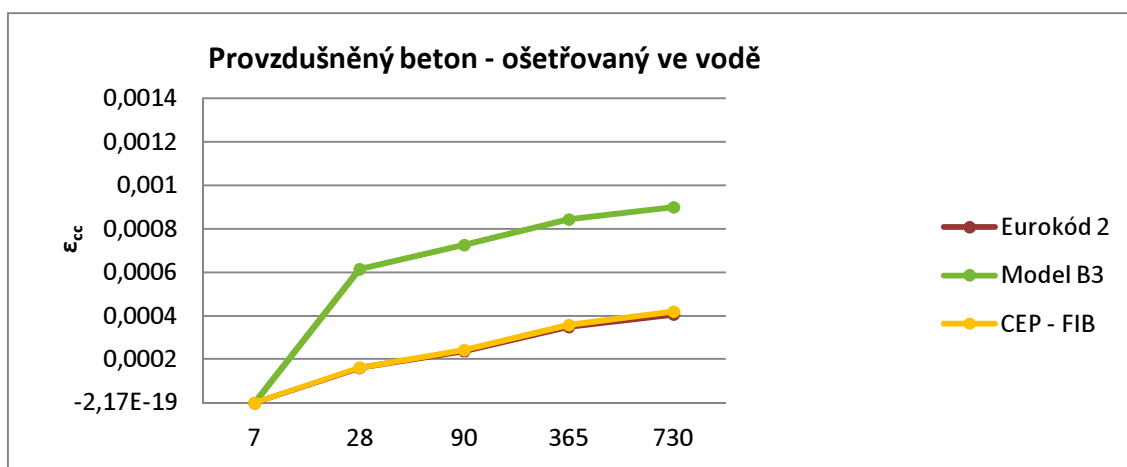
Tab. 21 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2]

ϵ_{cc} (t, t ₀)	Model B3			
	Provzdušněný		Neprovzdušněný	
	N	S	N	S
7	0	0	0	0
28	0,000615	0,00073	0,000532	0,00063
90	0,000726	0,000935	0,000609	0,000817
365	0,000843	0,001176	0,000756	0,001034
730	0,000901	0,00126	0,000811	0,001111

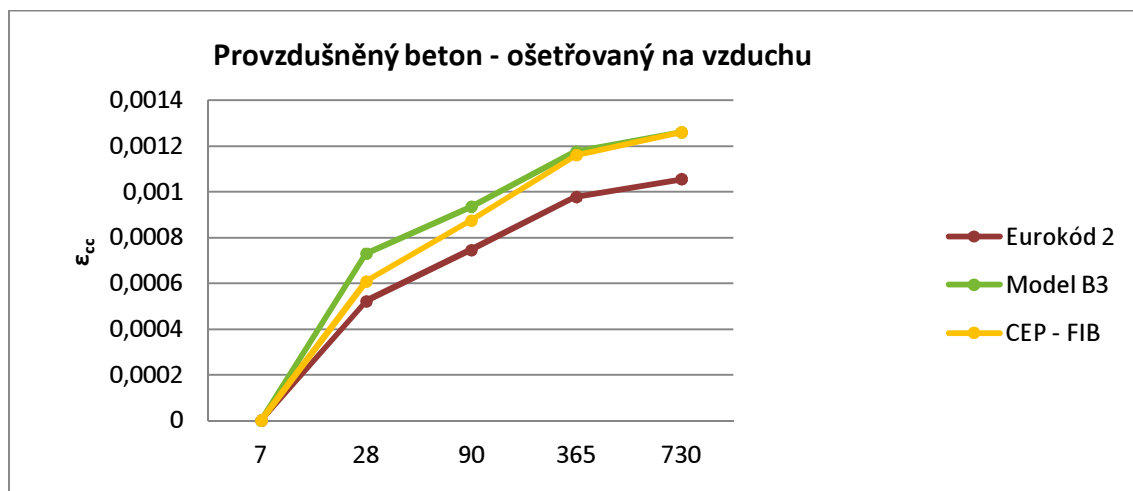
Tab. 22 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle Modelu B3 [36]

ϵ_{cc} (t, t ₀)	CEP - FIB			
	Provzdušněný		Neprovzdušněný	
	N	S	N	S
7	0	0	0	0
28	0,000163	0,000608	0,000128	0,000433
90	0,000243	0,000874	0,00019	0,000623
365	0,000359	0,001161	0,000281	0,000828
730	0,00042	0,001261	0,000329	0,000899

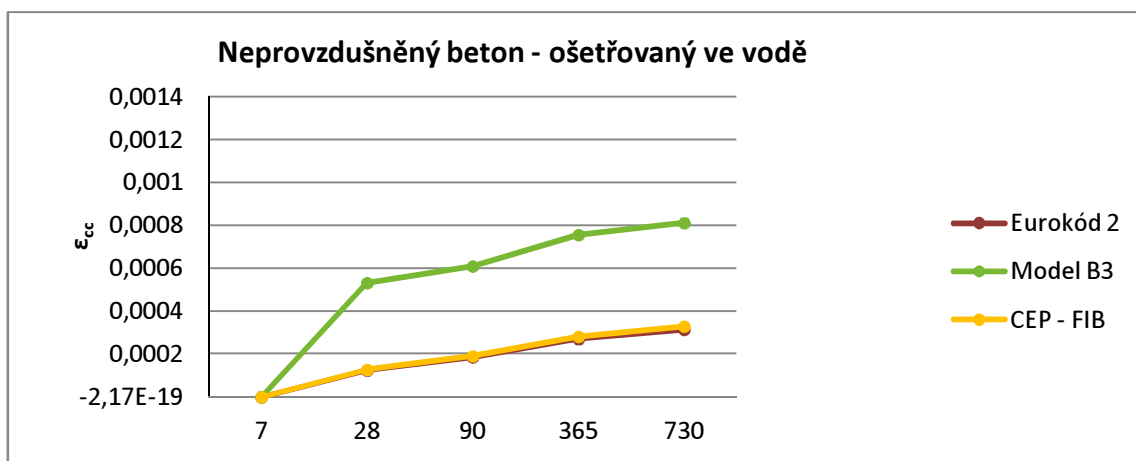
Tab. 23 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle CEB – FIP Model Code 1990 [38]



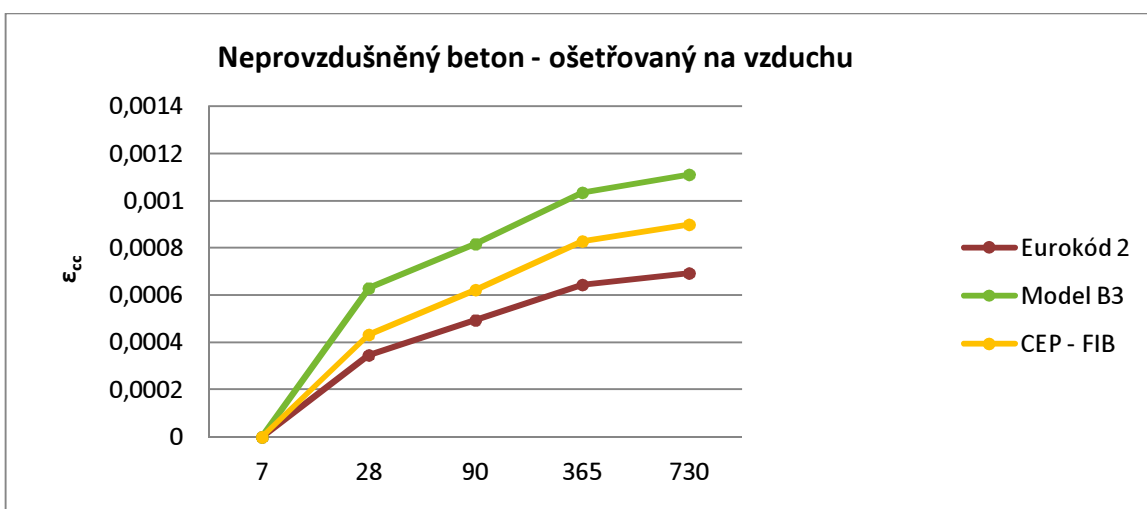
Obr. 56 Průběh dotvarování u betonu provzdušněného ošetřovaného ve vodě



Obr. 57 Průběh dotvarování u betonu provzdušněného ošetřovaného na vzduchu



Obr. 58 Průběh dotvarování u betonu neprovzdušněného ošetřovaného ve vodě



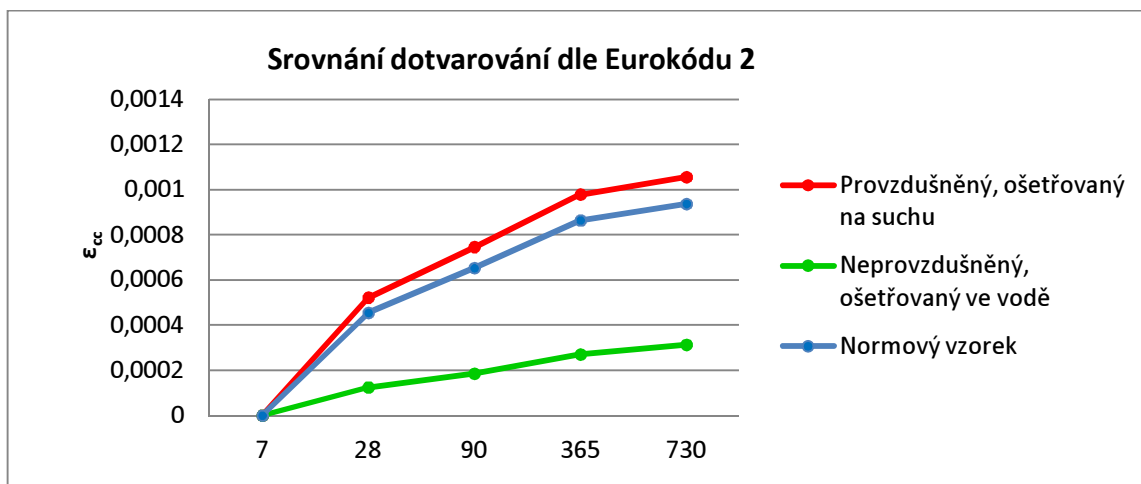
Obr. 59 Průběh dotvarování u betonu neprovzdušněného ošetřovaného na vzduchu

Z graficky znázorněných průběhů dotvarování vyplývá, že méně podléhají dotvarování betony, které byly ošetřovány v prostředí s relativní vlhkostí 100 %, a vůbec nejmenších hodnot dosahuje právě takto ošetřovaný neprovzdušněný typ betonu. Z grafů vyplývá, že dotvarování dle ČSN EN 1992-1-1 [2] a CEB – FIP Model Code 1990 [38] u betonů, které byly ošetřovány ve vodě, má téměř stejný průběh. Z toho lze usuzovat stejný přístup výpočtu dotvarování k takto ošetřovaným betonům. Naopak u betonů ošetřovaných na vzduchu norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] oproti ostatním dvěma modelům dotvarování podhodnocuje. Nejvyšší průběh přetvoření od dotvarování je však zaznamenán u výsledků Modelu B3 [36], a to u všech variant betonů.

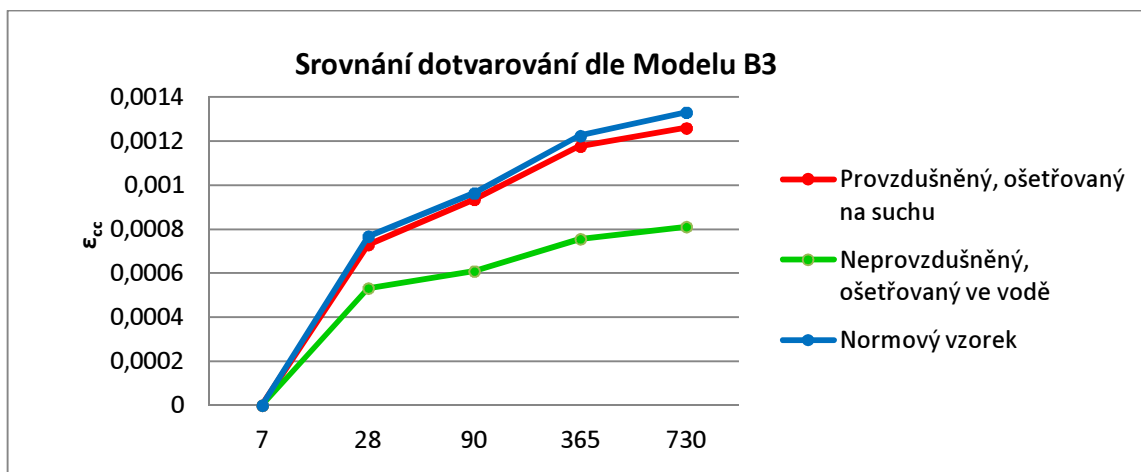
Z minulého hodnocení jsme zjistili, že nejvíce dotvaruje provzdušněný beton uložený na vzduchu v suchém prostředí, lze ho tedy označit z hlediska dotvarování za horší. Nejméně dotvaruje neprovzdušněný beton ošetřovaný ve vodní lázni. Ten lze z hlediska dotvarování označit za lepší. V další fázi výpočtu bylo postupováno tak, jako by byl most vybudován z betonu horšího, poté z betonu lepšího a z betonu referenčního (Tab. 24). Pojmem referenční rozumíme beton, u něhož byly použity normové hodnoty modulu pružnosti a pevnosti pro danou třídu betonu. Pro náš případ pevnostní třídy C30/37 to tedy bylo: $f_{cm} = 38$ MPa, $f_c = 30$ MPa, $E_c = 33$ MPa. Vyhodnocení je graficky zobrazeno na Obr. 60, Obr. 61, Obr. 62.

ϵ_{cc} (t, t ₀)	Referenční beton		
	Eurokód 2	Model B3	CEP -FIB
7	0	0	0
28	0,0004544	0,0007669	0,0004727
90	0,0006522	0,0009636	0,0006794
365	0,0008638	0,0012246	0,0009026
730	0,0009366	0,0013301	0,0009801

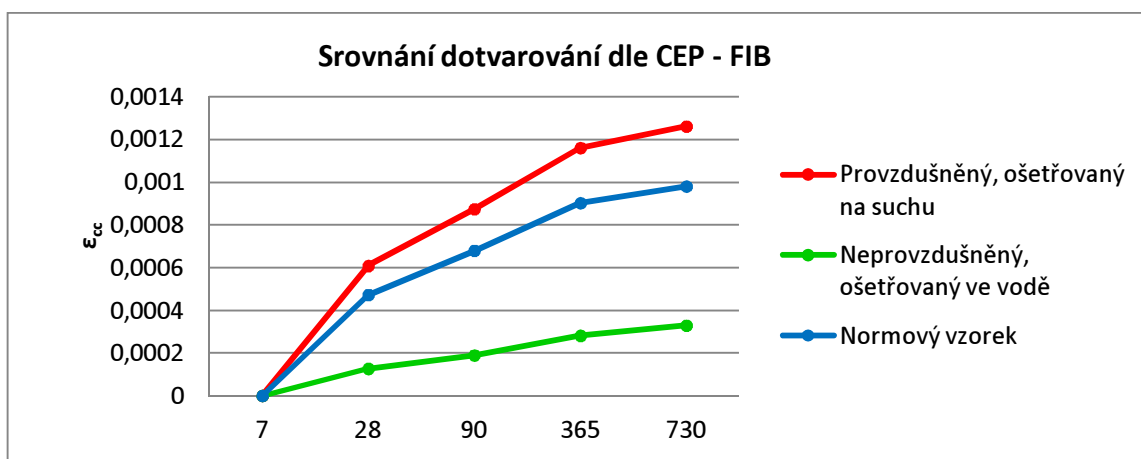
Tab. 24 Hodnoty přetvoření od dotvarování referenčního betonu vypočtené dle jednotlivých modelů



Obr. 60 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle ČSN EN 1990-1-1 Eurokód 2 [2]



Obr. 61 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle Modelu B3 [36]



Obr. 62 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle CEB – FIP Model Code 1990 [38]

Porovnáním výsledků průběhu dotvarování se potvrdila důležitost ošetřování. U všech predikčních modelů vychází nižší hodnoty dotvarování u betonu, který byl ošetřován ve vodě. Správným ošetřováním konstrukce můžeme tedy výrazně snížit tento druh přetvoření. Dotvarování, které počítalo s normovými hodnotami pevnosti a modulu pružnosti, odpovídá spíše provzdušněnému betonu, který byl ošetřován na vzduchu.

5. Závěr

Výsledky experimentu prokázaly, že způsob ošetřování má na výslednou hodnotu modulů výrazný vliv. Modul pružnosti nabývá vyšších hodnot u vzorku betonů, které byly ošetřovány ve vodní lázni bez ohledu na to, zda jde o modul statický nebo dynamický. U vzorků betonu ošetřovaných v suchém prostředí se navíc po 28 dnech jejich stáří objevuje pokles hodnot modulu pružnosti. U vzorků ošetřovaných ve vodě je tento trend opačný.

Porovnáním provzdušněného a neprovzdušněného typu betonu jsme zjistili, že rozdílnost hodnot modulů po dvou letech zrání dosahuje až 15 %. Jelikož kombinace těchto dvou faktorů může ovlivnit celkovou hodnotu modulu pružnosti betonu v tlaku dokonce až o téměř 50 %, měl by být při návrhu a realizaci stavby brán zřetel nejen na návrh betonu, ale také na kvalitu jeho ošetřování. Zvláště u konstrukcí náchylných na průhyb by měl být modul pružnosti betonu specifikován.

Z druhé části experimentu týkajícího se dotvarování vyplývá, že jeho průběh je dle ČSN EN 1992-1-1 [2] a CEB – FIP Model Code 1990 [38] u betonů, které byly ošetřovány ve vodě, téměř stejný. Z toho lze usuzovat stejný přístup výpočtu predikce dotvarování k takto ošetřovaným betonům. Naopak u betonů ošetřovaných na vzduchu norma ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2] oproti ostatním dvěma modelům dotvarování podhodnocuje. Rozdílnost hodnot však není příliš markantní. Nejvyšší průběh přetvoření od dotvarování je zaznamenán u výsledků Modelu B3 [36], a to u všech variant betonů.

Výsledky této části experimentu potvrdily, že provzdušněný beton ošetřovaný na suchu vykazuje vyšší hodnoty dotvarování než beton neprovzdušněný ošetřovaný v prostředí se 100% vlhkostí.

Při návrhu betonu by mělo být zváženo množství provzdušňovací přísady. Ačkoli má provzdušnění pozitivní vliv na mrazuvzdornost betonu, jeho míra velmi ovlivňuje výsledné hodnoty dotvarování. Přitom rozdíl v mrazuvzdornosti betonu, jak bylo potvrzeno v příspěvku [43], mezi 4% a 6% provzdušněním, je zanedbatelný.

Pro námi použitý běžný typ betonu není výběr matematického modelu pro výpočet průběhu dotvarování podstatný. Výsledky se zásadně nelišily. Jak je však zhodnoceno v příspěvku [41], pro lehké betony se jako nejlepší ukázal Model B3, protože zohledňuje vliv míry nasycení kameniva.

6. Použitá literatura

- [1] COLLEPARDI, M. Moderní beton. ČKAIT, Praha, 2009. (342 s.)
- [2] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí : -Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby.* Praha : ČNI, 2006. 210 s.
- [3] ČSN ISO 6784. *Beton - Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku.* Praha : ČNI, 1993. 6 s.
- [4] ČSN 73 1371. *Ultrazvuková impulzová metoda skúšania betónu.* Praha : ČNI, Červen 1983. 15 s.
- [5] HELA, R. *Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I.* Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora.
- [6] BAJZA, A., ROUSEKOVÁ, I. *Technológia betónu.* JAGA, Bratislava, 2006. (190 s.)
- [7] TEPLÝ, B. Ještě k modulu pružnosti. *Beton : TKS.* 2008, 1, s. 74-75. Dostupný také z WWW: <<http://www.betontks.cz/casopis/2008-1/74.pdf>>.
- [8] ČSN EN 206-1 . *Beton -Část 1 : Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.* Praha : ČNI, Listopad 2001. 72 s.
- [9] MISÁK, P.; VYMAZAL, T. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton : TKS.* 2009, 2, s. 58-59. Dostupný také z WWW: <<http://www.betontks.cz/casopis/2009-2/58.pdf>>.
- [10] VAŠKOVÁ, J.; ŠTEVULA, M.; VESELÝ, V. Modul pružnosti automaticky?. *Beton : TKS.* 2007, 6, s. 57-59. Dostupný také z WWW: <<http://www.betontks.cz/casopis/2007-6/57.pdf>>.
- [11] RIEGER, Pavel; ŠTĚRBA, Alain. Ještě k modulu pružnosti. *Beton : TKS.* 2009, 4, s. 88-91. Dostupný také z WWW: <<http://www.betontks.cz/casopis/2009-4/88.pdf>>.
- [12] ČSN 73 1372. *Rezonančná metoda skúšania betónu.* Praha : ČNI, Červen 1983. 24 s.
- [13] PYTLÍK, P. *Technologie betonu.* Vyd. 1. Brno : VUT, 2000. 390 s. ISBN 80-214-1647-5. 346 s.
- [14] *Pozemní stavitelství* [online]. 2002 [cit. 2011-03-16]. Vlastnosti betonů. Dostupné z WWW: <<http://pozemni-stavitelstvi.wz.cz/bek14.php>>.
- [15] *Svaz výrobců cementů ČR : - vyhovujícího nové betonářské normě ČSN EN 206-1* [online]. 2008-05-23 [cit. 2011-04-20]. Popílek a jeho použití do betonu. Dostupné

z WWW:

<http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf>.

- [16] BS 1881-120:1983. *Testing concrete. Method for determination of the compressive strength of concrete cores*. London : BSI, Leden 1983. 8 s.
- [17] KOCÁB, D., CIKRLE, P., ADÁMEK, J., POSPÍCHAL, O. Vliv provzdušnění na modul pružnosti mostního betonu. In *Sborník příspěvků 9. konference TECHNOLOGIE BETONU 2010*. Pardubice: ČBS Servis, s.r.o., 2010. s. 16-21. ISBN: 978-80-87158-23- 4.
- [18] KOCÁB, D.; POSPÍCHAL, O.; ADÁMEK, J.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; CIKRLE, P. Influence of Air- entrainment on Modulus of Elasticity of Concrete for Bridge Constructions. In *Non- Destructive Testing in Engineering Practice*. Brno: CERM, 2010. s. 121-130. ISBN: 978-80-7204-723- 9.
- [19] HUBERTO VÁ, M. Statický modul pružnosti lehkých konstrukčních betonů. *Beton : TKS*. 2010, 4, s. 50. Dostupný také z WWW:
<<http://www.betontks.cz/casopis/2010-4/50.pdf>>.
- [20] KONVALINKA, P. *Ecentrum.fsv.cvut.cz* [online]. Praha : 2009-10-27 [cit. 2011-05-16]. Experimentální metody mechaniky. Dostupné z WWW:
<<http://ecentrum.fsv.cvut.cz/download/EMM/EMM2P.pdf>>.
- [21] Dynamické moduly pružnosti : Návod do cvičení. In *BI02 Zkušebnictví a technologie* [online]. Brno, 2009-11-09 . 7 s. Elektronická opora VUT Brno.
- [22] SCHMID, P. *Studijní opora pro komb. st. - Modul BI02 – M02 Stavební zkušebnictví*. CERM, Brno : VUT, 2004. 38 s.
- [23] NEVILLE, A.M. *Properties of Concrete*. 1. vyd. England: Prentice Hall, 2011. 5. 799 s. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [24] CIKRLE, P.; a BÍLEK, V. Modul pružnosti vysokopevnostních betonů různého složení: Modulus of elasticity of high strength. *Beton TKS: Energetické a vodohospodářské stavby*. 2010, roč. 2010, č. 5, 40 - 44. ISSN 12133116.
- [25] BARTULÍKOVÁ, Radka. *Vztah mezi pevností a modulem pružnosti betonu v tlaku: bakalářská práce*. Brno, 2011. 63 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí bakalářské práce Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.

- [26] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost vtlaku zkušebních těles*. 1. vyd. Praha: ČNI, 2009. 20 s.
- [27] ŽALUD, O.; KUCHARCZYKOVÁ B.; VYMAZAL T.; MISÁK P.; JANOUŠEK P. Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovené NDT metodami. *Beton TKS: Mosty a dopravní stavby*. 2011, roč. 2011, č. 4, 73 - 75. ISSN 12133116.
- [28] Fotoarchív vedoucího diplomové práce
- [29] NEWMAN, J.; CHOO B.S. *Advanced Concrete technology: Concrete Properties*. 1. vyd. Burlington : elsevier Butterworth Heinemann, 2003. ISBN 0 7506 5104 0.
- [30] NEVILLE, A.M.; J.J. BROOKS, J.J.; PEARSON EDUCATION. *Concrete Technology*. 1. vyd. England: Prentice Hall, 2010. 442 s. 2. ISBN 978-0-273- 3219-8.
- [31] SOŠKA, J.; VRÁBLÍK L. Porovnání matematických modelů pro výpočet smršťování a dotvarování betonu. *Beton TKS: Materiály a Technologie*. 2011, roč. 2011, č. 6, 58 - 65. ISSN 12133116.
- [32] ČVUT: ATK 1 BK 51. KRÍSTEK, Vladimír, Alena KOHOUTOVÁ a Helena VČELOVÁ. [online]. [cit. 2013-01-10]. Dostupné z:
http://concrete.fsv.cvut.cz/~kristek/ATK1/ATK1_prednaska_1cast.pdf
- [33] ČSN 73 6207. *NAVRHOVÁNÍ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ Z PŘEDPJATÉHO BETONU*. 1. vyd. Praha: ČNI, 1993.
- [35] Výpočet dotvarování a smršťování dle ČSN EN 1992-1-1. *Beton TKS: Vodohospodářské stavby*. 2006, roč. 2006, č. 2, 56 - 58. ISSN 12133116.
- [36] Program pro řešení: dotvarování a smršťování dle modelu B3: (relaxace, přetvoření v čase, napjatost žebet. průřezu od smršťování a dotvarování v čase). In: VRÁBLÍK, Lukáš. *ČVUT: katedra betonových a zděných konstrukcí* [online]. Praha [cit. 2013-01-10]. Dostupné z:
http://concrete.fsv.cvut.cz/veda/konstrukce_theorie/tkonstrukce.php

- [37] Aktualizace predikce dotvarování betonu na základě měřených dat. In: DOBRUSKÝ, Svatopluk. *ČVUT: Soutěž o Cenu akademika Bažanta Akademický rok 2011/2012* [online]. Praha, 2010 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z: http://klobouk.fsv.cvut.cz/~anicka/bazant/works/2012_dobrusky.pdftrukce_teorie/tkonstrukce.php
- [38] CEB - FIP Model Code 1990. 1. vyd. London: Comite Euro International du Beton, 1998. S. 437. ISBN 0 7277 1696 4
- [39] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. 2. vyd. Brno: CERM, 2008. 186 s. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [40] PREDICTING CREEP DEFORMATION OF CONCRETE: A COMPARISON OF RESULTS FROM DIFFERENT INVESTIGATIONS. In: BALLIM, Y.; FANOURLAKIS, G. *FIG* [online]. 1. vyd. Greece, 2003 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z: <http://www.fig.net/commission6/santorini/i-monitoring%20static%20and%20dyn/i7.pdf>
- [41] Kucharczyková, B.: Závěrečná zpráva projektu č. GA103/09/P057 "Analýza mechanismu přetváření lehkých konstrukčních betonů", Brno, 2011.
- [42] BLAŽEK, M. 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.
- [43] POSPÍCHAL, O.; CIKRLE, P.; KOCÁB, D. Vývoj modulu pružnosti zmrazovaného mostního betonu. In: *Konference o zkoušení a jakosti ve stavebnictví*. Brno: FAST VUT, 2011. ISBN 978-80-214-3438-9.
- [44] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu - rekapitulace. *Beton TKS: Mosty a dopravní stavby*. 2012, roč. 2012, č. 4, 62 - 67. ISSN 12133116.

7. Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Zkouška krychelné pevnosti betonu v tlaku [28]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Zkouška válcové pevnosti betonu v tlaku [28]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Schematické znázornění pórů betonu [13]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 Závislost pevnosti betonu v tlaku na obsahu vzduchu, R_{be} značí pevnost v tlaku stanovenou NDT metodou a f_c je pevnost betonu v tlaku stanovená destruktivně [27]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5 Charakteristické závislosti mezi napětím a deformací kameniva, cementového kamene, malty a ztvrdlého betonu [6]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6 Křivky závislosti podélné, příčné a objemové deformace betonu od tlakového zatížení [23]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti pro dané třídy betonu dle dřívějších norem ČSN 73 1201 a současné normy ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [24]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8 Porovnání směrných hodnot sečnového modulu pružnosti v tabulce 3.1 eurokódu ČSN [9]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 9 Definování modulu pružnosti betonu [6]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 10 Zkouška statického modulu pružnosti v tlaku pomocí mechanických úchylkoměrů na Hollanových můstcích [28]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 11 Zkouška statického modulu pružnosti pomocí modernější metody [28]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 12 Zanalyzované zvukové spektrum, příčný kmitočet (A), kroutivý kmitočet (B), podélný kmitočet (C) [28]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 13 Měření dynamického modulu pružnosti v tlaku rezonanční metodou [28]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 14 Měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulsovou metodou [28]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 15 Grafické znázornění závislosti statického a dynamického modulu pružnosti na obsahu vzduchu, E_c značí statický a E_{bu} dynamický modul pružnosti [27]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 16 Porovnání hodnot modulu pružnosti pro betony s různým vodním součinitelem a způsobem ošetřování [24]</i>	<i>38</i>

<i>Obr. 17 Deformace cementové pasty a kameniva při stejném napětí (sériový moment) [6]....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 18 Deformace cementové pasty a kameniva při stejném napětí (sériový moment) [1]....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 19 Napětí působící na cementovou pastu a kamenivo pro získání stejné deformace (paralelní model) [1]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 20 Průběh dotvarování betonu [13].....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 21 Časově závislé deformace v betonu, které byly vystaveny trvalému zatížení [23]</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 22 Definice relaxace betonu vystaveného původnímu napětí, které bylo poté udržováno jako konstantní [30]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 23 Dotvarování a následné zotavení vzorku malty uloženém na vzduchu při relativní vlhkosti 95 %, který byl vystaven napětí 14,8MPa a poté odtížen [23]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 24 Vliv modulu pružnosti kameniva na relativní dotvarování betonu (vzorek s modulem 69 GPa se rovná 1) [30]</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 25 Průběh dotvarování betonu, který je vytvrzen v prostředí se 100 % vlhkostí po dobu 28 dnů, poté zatížen a uložen v různých relativních vlhkostech [23].....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 26 Vliv teploty na dotvarování nasyceného betonu vzhledem k dotvarování při.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 27 Dotvarování maltových vzorků vytvrzených a trvale uložených v různých vlhkostech [23]</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 28 Ukázka zjednodušeného stanovení součinitele dotvarování pro RH 50 % [2].....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 29 Vliv změny druhu cementu na výslednou hodnotu smršťování a dotvarování [31]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 30 Vliv pevnosti betonu na hodnotu součinitele dotvarování,</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 31 Porovnání vstupních údajů pro stanovení přetvoření od dotvarování (smršťování) dle různých modelů predikce [35]</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 32 Vliv změny pevnosti betonu na velikost součinitele dotvarování, Model B3 [31].....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 33 Faktory ovlivňující dotvarování různých predikčních metod [40].....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 34 Odebírání vzorků betonu ze stavby (12 krychlí, 14 trámů) 17. 3. 2009.....</i>	<i>59</i>

<i>Obr. 35 Odebírání vzorků betonu ze stavby (12 krychlí, 14 trámů) 30. 5. 2009 [28].....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 36 Zatěžování vzorku betonu ve tvaru krychle pro zjištění maximální zatěžovací síly [28]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 37 Vyhovující způsob porušení zkušební krychle [28]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 38 Porovnání vývoje statického modulu pružnosti u provzdušněného a neprovzdušněného betonu.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 39 Uspořádání zkoušky při zjišťování statického modulu pružnosti betonu v tlaku [28]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 40 Vliv ošetřování na vývoj statického modulu pružnosti v tlaku u provzdušněného betonu</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 41 Vliv ošetřování na vývoj statického modulu pružnosti v tlaku u neprovzdušněného betonu</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného a neprovzdušněného betonu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 43 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného betonu.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u neprovzdušněného betonu</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45 Uspořádání měření pomocí rezonanční metody [28].....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 46 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného a neprovzdušněného betonu</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 47 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného betonu.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u neprovzdušněného betonu</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného a neprovzdušněného betonu</i>	<i>72</i>

<i>Obr. 50 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného betonu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u neprovzdušněného betonu</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 52 Porovnání vývoje dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného a neprovzdušněného betonu</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 53 Měření rychlosti šíření ultrazvuku pomocí přístroje Tico</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 54 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného betonu</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 55 Vliv ošetřování na vývoj dynamického modulu pružnosti určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u neprovzdušněného betonu.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 56 Průběh dotvarování u betonu provzdušněného ošetřovaného ve vodě</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 57 Průběh dotvarování u betonu provzdušněného ošetřovaného na vzduchu.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 58 Průběh dotvarování u betonu neprovzdušněného ošetřovaného ve vodě.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 59 Průběh dotvarování u betonu neprovzdušněného ošetřovaného na vzduchu</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 60 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle ČSN EN 1990-1-1 Eurokód 2 [2]</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 61 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle Modelu B3 [36]</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 62 Porovnání průběhu přetvoření od dotvarování dle CEB – FIP Model Code 1990 [38]</i>	<i>83</i>

8. Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Přepočetni součinitele pro válcovou tlakovou pevnost v závislosti na velikosti poměru výška / průměr (h/d) [1].....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 Konečné složení provzdušněného čerstvého betonu pro konzistenci betonu S3</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 3 Konečné složení neprovzdušněného čerstvého betonu pro konzistenci betonu S3.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 4 Průměrné hodnoty naměřených modulů pružnosti betonu v tlaku</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 5 Průměrné hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku u provzdušněného betonu</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 6 Průměrné hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku u neprovzdušněného betonu</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 7 Průměrné hodnoty naměřených dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 8 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku naměřené pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u provzdušněného betonu.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 9 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z podélného kmitání u neprovzdušněného betonu</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 10 Průměrné hodnoty naměřených dynamických modulů pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 11 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u provzdušněného betonu</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 12 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku určeného pomocí rezonanční metody z příčného kmitání u neprovzdušněného betonu</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 13 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 14 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u provzdušněného betonu</i>	<i>73</i>

<i>Tab. 15 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku určeného pomocí rezonanční metody u neprovzdušněného betonu.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 16 Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 17 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u provzdušněného betonu</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 18 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu určeného pomocí ultrazvukové impulsové metody u neprovzdušněného betonu.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 19 Přehled hodnot použitých v jednotlivých modelech.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 20 Hodnoty součinitele dotvarování vypočtené dle daných modelů</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 21 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [2]</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 22 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle Modelu B3 [36]</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 23 Hodnoty přetvoření od dotvarování vypočtené podle CEB – FIP Model Code 1990 [38]</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 24 Hodnoty přetvoření od dotvarování referenčního betonu vypočtené dle jednotlivých modelů.....</i>	<i>82</i>

9. Seznam zkratk

ČSN – Česká technická norma

EN – Evropská norma – eurokód

ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci

CEB – FIP - Evropský výbor pro beton – vydává evropské normy

C30/37 – pevnostní třída betonu s pevností v tlaku 30 MPa

XF4 – stupeň vlivu prostředí - střídavé působení mrazu a rozmrazování

σ – mezní napětí v betonu

f_c – tlaková pevnost

$f_{ck,cyl}$ – válcová pevnost

$f_{ck,cube}$ – krychelná pevnost

F – maximální síla při porušení

A_c – plocha průřezu zkušební vzorku

h – výška válce

d – průměr válce

L – délka zkoušeného vzorku

f_t – naměřená vlastní frekvence krouživého kmit

w – hmotnostní vodní součinitel

$f_{cu,c}$ – pevnost cementové pasty

α – stupeň hydratace

d_c – stupeň zhutnění

Δf_c – snížení pevnosti

f_{fc} – tlaková pevnost dokonale zhutněného betonu

E – modul pružnosti

ε – deformace

σ_b – základní napětí

σ_a – napětí, které dosahuje jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku

E_c – statický modul pružnosti

ε_a – průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

ε_b – průměrné poměrné přetvoření při základním napětí

f'_L – přibližná podélná frekvence

T – doba průchodu ultrazvuku

E_{brL} – dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu při podélném kmitání

L – délka tělesa

ρ – objemová hmotnost betonu

f_L – vlastní naměřená frekvence podélného kmitání

c_1 – korekční součinitel určený interpolací

f_f – vlastní naměřená frekvence příčného kmitání

E_{brf} – dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a tahu při příčném kmitání

i – poloměr setrvačnosti průřezu

G_{brf} – dynamický modul pružnosti betonu ve smyku

f_t – naměřená vlastní frekvence kroutivého kmitání

k – součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku

ν_{br} – Poissonův koeficient

UZ – ultrazvukové impulsy

t_{ME} – mrtvý čas

t_{kor} – korekce času

t_E – nominální doba kalibračního vzorku – etalonu

t_L – naměřený čas šíření impulsů

E_{bu} – dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu – UZ metoda

v_L – impulsová rychlost podélného UZ vlnění

v_{L3} – rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí

k_3 – koeficient pro trojrozměrné prostředí

R_{be} - informativní pevnost betonu

D_{max} - maximální jmenovitá horní frakce kameniva

E_0 - modul pružnosti cementového tmele

P_c - kapilární pórovitost

K_E - konstanta

E_a - modul pružnosti kameniva

E_p - modul pružnosti cementové pasty

E_{cm} - průměrná hodnota statického modulu pružnosti

f_{cm} - průměrná pevnost betonu

$\varepsilon_{do} = \varepsilon_e$ - pružná deformace od krátkodobého zatížení

ε_s - deformace smrštěním

ε_d - deformace dotvarováním dlouhodobým zatížením

ε_c - deformace celková

ε_{er} - opožděná pružná deformace po dobu relaxace

t_{er} - doba relaxace

ε_d - deformace viskózním nepružným dotvarováním

ε_{cr} - Dotvarování ihned po odtížení

$\varphi(t, t')$ - součinitel dotvarování

$J(t, t')$ - funkce poddajnosti

t - sledovaný okamžik

t' - čas vnesení zatížení

$\varphi(\infty, t_0)$ - konečný součinitel dotvarování

σ_c - tlakové napětí ve vzorku od zatížení

φ_{RH} - součinitel zohledňující vliv relativní vlhkosti

$\beta_c(t, t_0)$ - součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení zohledňující vliv trvání zatížení

$\beta(f_{cm})$ - součinitel, který zohledňuje vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování

$\beta_c(t, t_0)$ - součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení

φ_0 - součinitel základního dotvarování

q_1 - představuje inverzní asymptotický elastický modul pružnosti

q_2 , q_3 , a q_4 - popisují viskoelastické vlastnosti betonu, kde hodnoty konstant mohou být určeny z empirických vzorců.

Q funkce, která nemá přesnou formu a její hodnotu lze určit z přibližného vzorce

J_d – funkce, která představuje vlivy týkající se vysychání

t_0 - doba ošetřování betonu, zároveň doba při vnesení zatížení

10. Přílohy

Dotvarování dle Eurokódu:

	PS	PN	NS	NN		S
f_{cm}	49,4	48,4	58,5	57,2	MPa	38
RH	60	100	60	100	%	60
A_c	10000	10000	10000	10000	mm ²	10000
u	400	400	400	400	mm	400
α_1	0,785667	0,796996	0,697973	0,709039	mm	0,944059
α_2	0,933401	0,937226	0,902365	0,90643		0,983687
α_3	0,841726	0,850377	0,773492	0,782233		0,959715
h_0	50	50	50	50		50
β_H	285,6342	1275,565	268,5759	1173,349		315,1315
$\beta(f_{cm})$	2,390264	2,41483	2,196501	2,221321		2,72532
ϕ_{RH}	1,72964	0,937226	1,58621	0,90643	dní	1,991994
t_0	7	7	7	7		7

Provdzušněný beton	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	2,623662	0
	28	0,447383	0,634609	2,623662	1,173782
	90	0,639359	0,634609	2,623662	1,677462
	365	0,838635	0,634609	2,623662	2,200296
	730	0,904943	0,634609	2,623662	2,374265
	Ošetřování ve vodě - N				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	1,436274	0
28	0,290287	0,634609	1,436274	0,416932	
90	0,432314	0,634609	1,436274	0,620922	
365	0,634197	0,634609	1,436274	0,910881	
730	0,737099	0,634609	1,436274	1,058677	

Neprovdzušněný beton	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	2,211049	0
	28	0,455132	0,634609	2,211049	1,006319
	90	0,648512	0,634609	2,211049	1,433891
	365	0,845421	0,634609	2,211049	1,869266
	730	0,909586	0,634609	2,211049	2,011139
	Ošetřování ve vodě - N				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	1,277768	0
28	0,297527	0,634609	1,277768	0,38017	
90	0,442579	0,634609	1,277768	0,565513	
365	0,64661	0,634609	1,277768	0,826218	
730	0,7488	0,634609	1,277768	0,956793	

Referenční beton:

Normové hodnoty	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	3,445178	0
	28	0,435224	0,634609	3,445178	1,499425
	90	0,624763	0,634609	3,445178	2,152421
	365	0,827437	0,634609	3,445178	2,850668
	730	0,897151	0,634609	3,445178	3,090847

Dotvarování dle CEB -FIP:

	PS	PN	NS	NN		
RH_0	100	100	100	100	%	100
h	50	50	50	50	mm	50
h_0	100	100	100	100	mm	100
β_H	325,2028	1500	325,2028	1500		325,2028
$\beta(f_{cm})$	2,384583	2,409091	2,19128	2,216041		2,718843
ϕ_{RH}	2,095584	1	2,095584	1		2,095584
t_0	7	7	7	7	dní	7

Provdzdušněný beton	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	3,1712	0
	28	0,431387	0,634609	3,1712	1,368013
	90	0,620098	0,634609	3,1712	1,966456
	365	0,823759	0,634609	3,1712	2,612304
	730	0,894557	0,634609	3,1712	2,836819
	Ošetřování ve vodě - N				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	1,528831	0
	28	0,276711	0,634609	1,528831	0,423045
	90	0,412933	0,634609	1,528831	0,631304
	365	0,61017	0,634609	1,528831	0,932848
	730	0,713937	0,634609	1,528831	1,091488

Neprovdzdušněný beton	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	2,914132	0
	28	0,431387	0,634609	2,914132	1,257117
	90	0,620098	0,634609	2,914132	1,807049
	365	0,823759	0,634609	2,914132	2,400542
	730	0,894557	0,634609	2,914132	2,606856
	Ošetřování ve vodě - N				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	1,40632	0
	28	0,276711	0,634609	1,40632	0,389145
	90	0,412933	0,634609	1,40632	0,580715
	365	0,61017	0,634609	1,40632	0,858095
	730	0,713937	0,634609	1,40632	1,004023

Referenční beton:

Normové hodnoty	Ošetřování na suchu - S				
	t	$\beta_c(t,t_0)$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\phi(t,t_0)$
	7	0	0,634609	3,615725	0
	28	0,431387	0,634609	3,615725	1,559775
	90	0,620098	0,634609	3,615725	2,242105
	365	0,823759	0,634609	3,615725	2,978485
	730	0,894557	0,634609	3,615725	3,234471

Rezonanční metoda

Provzdušněný

Ebrf	3	7	28	90	365	760
N1	23409	29327	34096			
N2	24653	30741	34061			
N3	28098	34000	36877	38388	39034	39003
N4	24215	30045	34267	35636		
N5	24593	30115	34761	36125	36240	35936
N6	24034	31124	34209	35819	36314	36246
Průměr	24834	30892	34712	36492	37196	37062
na 500	25000	31000	34500	36500	37000	37000
Sm. Odch.	1661	1644	1090	1280	1592	1688
S1	23061	25370	26491			
S2	24530	26576	27107			
S3	24889	27146	27409	25072	23603	23778
S4	24938	27241	28550	26843		
S5	25085	29250	28939	27424	24753	25127
S6	26438	29195	28385	26865	24478	24442
Z1 (S)	24659	27347	28546			
Z2 (S)	26051	29396	29073			
Průměr	24956	27690	28062	26551	24278	24449
na 500	25000	27500	28000	26500	24000	24500
Sm. Odch.	1085	1518	954	1022	600	675

Rezonanční metoda

Neprovzdušněný

Ebrf	3	7	28	90	365	760
N1	30443	36942	41930			
N2	31541	36856	41710			
N3	30912	36531	41260	42568	43717	44307
N4	30631	36425	41338	42902		
N5	31876	37090	41755	43219	44176	44687
N6	31107	36244	40902	42205	43876	44088
Průměr	31085	36681	41483	42723	43923	44361
na 500	31000	36500	41500	42500	44000	44500
Sm. Odch.	544	330	383	436	233	303
S1	30845	32849	34186			
S2	32650	35679	35923			
S3	31190	33233	34397	32720	31840	31795
S4	31571	34008	34887	33807		
S5	30836	34508	34145	33489	32816	33288
S6	31287	35376	34308	33453	32810	32658
Z1 (S)	31137	37256	42091			
Z2 (S)	31842	35050	34324			
Průměr	31420	34745	35533	33367	32489	32580
na 500	31500	34500	35500	33500	32500	32500
Sm. Odch.	675	1134	682	460	562	749

Rezonanční metoda

Provzdušněný

Gbr	3	7	28	90	365	760
N1	9689,641	11786,929	13377,63			
N2	9645,642	12084,14	13591,17			
N3	10857,87	13161,068	14679,64	15266,18	15596,439	15608,510
N4	9712,349	11916,559	13328,23	14039,18		
N5	9919,58	12067,55	13511,79	14142,64	14419,053	14319,577
N6	9347,65	12160,601	13681,57	14485,85	14780	14769,878
Průměr	9862	12196	13695	14483	14932	14899
na 500	10000	12000	13500	14500	15000	15000
Sm. Odch.	521	491	500	556	603	654
S1	9400,79	10841,728	10902,53			
S2	9864,931	11227,215	11092,6			
S3	9860,6	11213,72	11186,32	10508,21	10008,247	10129,616
S4	9893,251	11188,333	11162,52	10689,14		
S5	10231,55	11512,658	11542,59	11052,91	10510,403	10686,16
S6	10316,8	11722,296	10674,88	11080,93	10449,446	10350,958
Z1 (S)	9947,596	11439,746	11361			
Z2 (S)	10173,14	11580,315	11588,81			
Průměr	9961	11341	11189	10833	10323	10389
na 500	10000	11500	11000	11000	10500	10500
Sm. Odch.	326	302	292	280	274	280

Rezonanční metoda			Neprovzdušněný			
Gbr	3	7	28	90	365	760
N1	12174,6	14317,3	16147,54			
N2	12728,19	14646,573	16433,38			
N3	12470,98	14522,846	16214,5	16951,16	17305,343	17484,04
N4	12393,44	14510,652	16242,95	16865,32		
N5	12712,95	14592,35	16369,75	17043,44	17417,075	17549,503
N6	12673,4	14710,703	16484,27	17205,3	17727,673	17932,587
průměr	12526	14550	16315	17016	17483	17655
na 500	12500	14500	16500	17000	17500	17500
Sm. Odch.	220	137	133	145	219	242
S1	12503,34	13366,828	14043,23			
S2	13052,86	14166,508	14741,31			
S3	12585,18	13581,694	14171,25	13757,35	13430,375	13623,827
S4	12615,48	13678,611	14220,06	13869,02		
S5	12468,94	13714,02	14097,4	13892,6	13677,819	13897,133
S6	12652,15	13882,649	14311,76	14086,6	13838,977	13780,676
Z1 (S)	12685,22	14788,167	16556			
Z2 (S)	12821,08	14022,959	14386,48			
průměr	12673	13900	14566	13901	13649	13767
na 500	12500	14000	14500	14000	13500	14000
Sm. Odch.	211	272	252	137	206	137

Rezonanční metoda			Provzdušněný			
Ebrl	3	7	28	90	365	760
N1	24422	30030	33653			
N2	24493	30543	34092			
N3	27482	33162	36714	37856	38835	38658
N4	25161	30786	34267	35585		
N5	25695	30998	34520	35511	36179	36063
N6	23710	30483	34489	35936	36427	36398
Průměr	25160	31000	34622	36222	37147	37040
na 500	25000	31000	34500	36000	37000	37000
Sm. Odch.	1324	1108	1072	1105	1467	1411
S1	23632	27314	27830			
S2	24912	28447	28560			
S3	25280	28422	28851	26247	23515	23319
S4	26170	29226	29487	27643		
S5	26230	29425	29842	27752	24503	24394
S6	26161	29619	29772	27676	24235	23828
Z1 (S)	25541	28917	29349			
Z2 (S)	26081	29587	29932			
Průměr	25501	28870	29203	27329	24085	23847
na 500	25500	29000	29000	27500	24000	24000
Sm. Odch.	1024	860	788	723	511	538

Rezonanční metoda			Neprovzdušněný			
Ebrl	3	7	28	90	365	760
N1	30443,08	35635,523	40293,262			
N2	31540,660	36517,842	40904,081			
N3	30912,155	36058,296	40366,585	41818,349	42796,020	43255,01
N4	30630,856	35750,546	40327,95	41750,875		
N5	31875,791	36560,779	41055,788	42696,071	43350,282	43807,55
N6	31107,004	36006,444	40529,065	42192,436	43038,060	43598,58
průměr	31085	36088	40579	42114	43061	43554
na 500	31000	36000	40500	42000	43000	43500
Sm. Odch.	544	383	324	434	278	279
S1	30844,552	33418,774	35583,934			
S2	32649,950	35498,345	37450,227			
S3	31189,795	33696,892	35631,107	34666,868	32533,506	32117
S4	31570,890	34237,285	36119,321	35481,620		
S5	30835,716	34025,413	35545,09	35016,958	32606,071	32752
S6	31287,368	34358,005	35895,787	35396,918	32767	32203
Z1 (S)	31137	36258,412	40798,855			
Z2 (S)	31842	34878,783	36347,538			
průměr	31420	34546	36671	35141	32636	32357
na 500	31500	34500	36500	35000	32500	32000
Sm. Odch.	675	722	726	375	120	344

Ultrazvuková metoda

Provzdušněný

Ebu	3	7	28	90	365	760
N1	27278	31173	34843			
N2	26804	31240	35098			
N3	28575	32738	36647	37519	38768	38826
N4	26647	31001	34517	35650		
N5	27349	31642	35345	36201	36924	37169
N6	25475	31257	35154	36315	36823	37203
Průměr	27021	31509	35267	36421	37505	37733
na 500	27000	31500	35500	36500	37500	37500
Sm. Odch.	1016	638	734	787	1095	947
S1	23923	26400	28667			
S2	25589	27991	29370			
S3	26291	28188	29889	26577	23004	23058
S4	27218	28967	30702	27605		
S5	27117	28953	30398	27343	24017	23481
S6	26636	28903	30462	27216	23441	23023
Z1 (S)	26636	28814	30267			
Z2 (S)	27431	29096	30897			
Průměr	26355	28414	30081	27185	23487	23187
na 500	26500	28500	30000	27000	23500	23000
Sm. Odch.	1233	992	776	437	508	255

Ultrazvuková metoda

Neprovzdušněný

Ebu	3	7	28	90	365	760
N1	29673	34288	38028			
N2	30775	34945	38676			
N3	31013	35229	38894	41471	41860	42655
N4	30363	34209	38166	40785		
N5	31195	35326	38766	41218	41379	42231
N6	30783	34966	38574	40716	41643	42201
průměr	30634	34827	38518	41048	41627	42362
na 500	30500	35000	38500	41000	41500	42500
Sm. Odch.	547	472	345	359	241	254
S1	29220	31035	32745			
S2	30328	32605	34170			
S3	29185	31152	32692	32508	29146	29126
S4	30107	32326	34082	34180		
S5	29411	31688	33067	33587	30077	29826
S6	30137	32377	33820	34404	29896	30299
Z1 (S)	29552	33723	37377			
Z2 (S)	30856	32942	34371			
průměr	29849	32231	34040	33670	29706	29750
na 500	30000	32000	34000	33500	29500	29500
Sm. Odch.	515	671	674	848	494	590

Statický modul

Provzdušněný

Ec	3	7	28	90	365	760
N1			24896			
N2			25265			
N3			27216	29884	30842	30362
N4				28586		
N5				27545	28670	28837
N6				27709	29179	29265
průměr			25792	28431	29564	29488
na 500			26000	28500	29500	29500
Sm. Odch.			1246	1071	1136	786
S1			22211			
S2			22413			
S3			22974	21804	19569	20040
S4				22271		
S5				22631	20368	21306
S6				22024	20564	19998
Z1 (S)						
Z2 (S)						
průměr			22533	22182	20167	20448
na 500			22500	22000	20000	20500
Sm. Odch.			395	355	527	743

Statický modul

Neprovzdušněný

Ec	3	7	28	90	365	760
N1			30334			
N2			31181	33372		
N3			30426	33014	35615	35102
N4				33725		
N5				33349	35152	35806
N6				33291	35123	35133
průměr			30647	33350	35297	35347
na 500			30500	33500	35500	35500
Sm. Odch.			465	254	276	398
S1			27667			
S2			30122	28055		
S3			28531	29064	27808	27267
S4				28748		
S5				28670	28954	28686
S6				29445	28188	28966
Z1 (S)						
Z2 (S)						
průměr			28774	28797	28317	28306
na 500			29000	29000	28500	28500
Sm. Odch.			1245	515	584	911