



ERMCO – Európska asociácia výrobcov transportbetónu

**SPRIEVODCA
technickými vlastnosťami betónu**

November 2006

SKRATKY

C_v	variačný súčiniteľ
E_{cd}	návrhová hodnota modulu pružnosti betónu
$E_{c,eff}$	skutočný modul pružnosti betónu
E_{cm}	priemerný sečnicový modul pružnosti betónu
f_{ck}	predpísaná charakteristická valcová pevnosť
$f_{ck,cu}$	predpísaná charakteristická kocková pevnosť
f_{cm}	cieľová priemerná valcová pevnosť
f_{ct}	pevnosť v prostom ťahu
f_{cd}	návrhová pevnosť v tlaku
f_{ctd}	návrhová pevnosť v ťahu
f_{ctm}	priemerná pevnosť v ťahu
$f_{ctm,fl}$	priemerná pevnosť v ťahu za ohybu
$f_{ct,sp}$	pevnosť v priečnom ťahu
$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$	deformácia od dotvarovania v čase $t = \infty$
$\varepsilon_{ca}(t)$	vlastná zmrašťovacia deformácia do času t
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	vlastná zmrašťovacia deformácia do času $t = \infty$
$\varphi(\infty, t_0)$	súčiniteľ dotvarovania v čase $t = \infty$
σ_c	konštantné tlakové napätie vyvolané v čase $t = t_0$
γ_{cE}	parciálny (dielčí) stupeň bezpečnosti pre E-hodnotu betónu

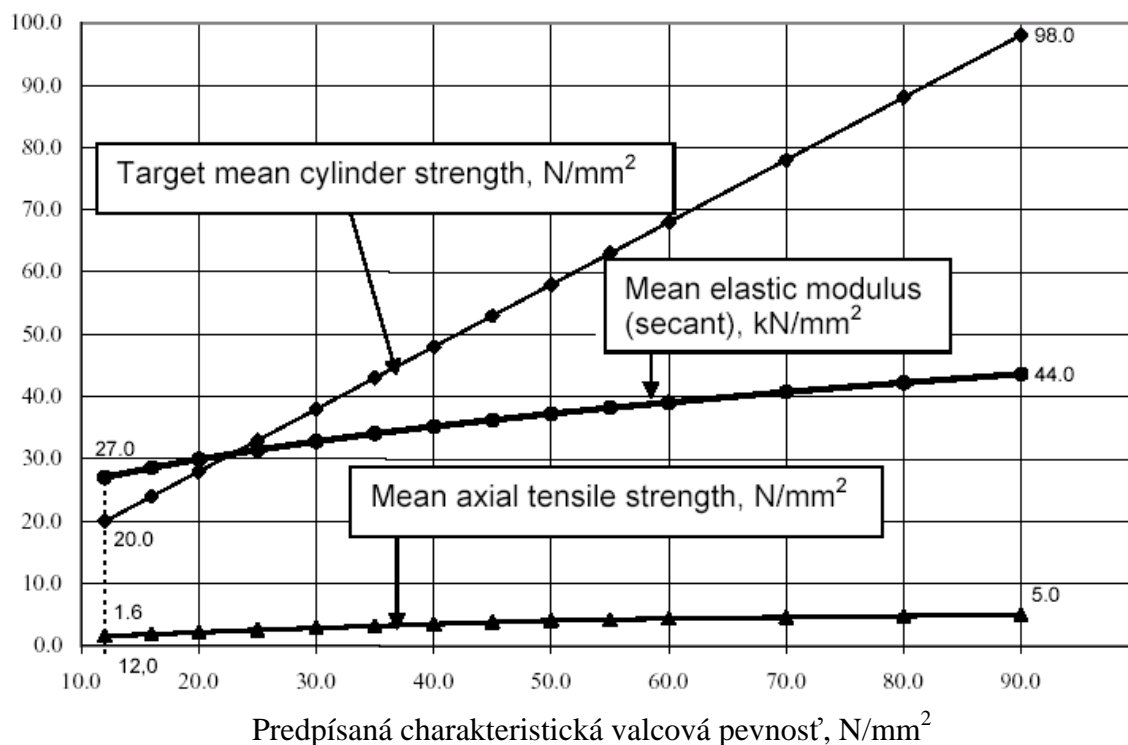
O b s a h

1. Úvod	4
2. Poznámka k niektorým predpokladom tvoriacich základ Eurokodu	7
3. Dôležité technické vlastnosti betónu	7
4. Pevnosť v tlaku	8
5. Pevnosť v ťahu	11
6. Modul pružnosti	15
7. Dotvarovanie	18
8. Zmrašťovanie	22
9. Teplotná rozťažnosť	25
10. Požiarna odolnosť	26
11. Adiabatický nárast teploty	28
12. Praktické aspekty dodávok betónu	28
13. Zistená potreba ďalšieho výskumu a vývoja	29
14. Normové metódy merania fyzikálnych vlastností	29

1. ÚVOD

Pri návrhu betónových konštrukcií inžinieri používajú určitý počet mechanických vlastností betónu, ktoré sú spravidla súčasťou požiadaviek na betón. Používajú sa pritom predpokladané (bezpečné) hodnoty, ktoré sú často odvodené od pevnosti v tlaku používanej pre navrhovanie. Časť 3 Eurokódu 2, EN 1992-1-1 jednotným spôsobom zhrňuje tieto technické vlastnosti. Obecne sa predpokladá, že tieto mechanické vlastnosti závisia na priemernej pevnosti v tlaku, ktorá sa predpisuje hodnotou charakteristickej pevnosti, plus 8 MPa. Hodnoty vlastností sa vypočítavajú z priemernej pevnosti v tlaku. V tomto ohľade (výpočet hodnôt založený na predpísanej charakteristickej pevnosti) sa Eurokód nelíši od minulých prístupov k technickým vlastnostiam. Eurokód tiež v každom prípade uvádza, ako sa majú vypočítať hodnoty vlastností v rôznom veku betónu.

Nasledujúca **tabuľka 1** uvádza hlavné pevnostné a deformačné charakteristiky betónu, tak ako sú stanovené v tabuľke 3.1 Eurokódu. Obr.1 ukazuje základné grafické vzťahy na jednej strane medzi predpísanou charakteristickou valcovou pevnosťou a na druhej strane cieľovou priemernou valcovou pevnosťou, ďalej priemernou pevnosťou v ťahu a priemerným sečnicovým modulom pružnosti betónu.



Obr.1: Vzťahy medzi predpísanou pevnosťou, cieľovou priemernou pevnosťou, priemernou pevnosťou v ťahu a modulom pružnosti

Preklad: - Target mean cylinder strength = cieľová priemerná valcová pevnosť
 - Mean elastic modulus (secant) = priemerný modul pružnosti (sečnicový)
 - Mean axial tensile strength = priemerná osová pevnosť v ťahu

Strength classes for concrete													Analytical relation / Explanation		
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(0,6)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10))$ > C50/60
$f_{ck,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ck,0,05} = 0,7 \cdot f_{cm}$ 5% fractile
$f_{ck,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ck,0,95} = 1,3 \cdot f_{cm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)

Tabuľka 1

Výt'ah z EN 1992-1-1, tabuľka 3.1

Preklad: - *Strength classes for concrete* = *pevnostné triedy betónu*
- *Analytical relation/Explanation* = *analytický vzťah/vysvetlivky*
- *fractile* = *kvantil*

kde:

f_{ck} :	predpísaná charakteristická valcová pevnosť
$f_{ck,cu}$:	predpísaná charakteristická kocková pevnosť
f_{cm} :	cieľová priemerná valcová pevnosť
f_{ctm} :	priemerná axiálna (osová) pevnosť v ťahu
$f_{ctk, 0,05}$:	charakteristická axiálna (osová) pevnosť v ťahu, 5% kvantil
$f_{ctk, 0,95}$:	charakteristická axiálna (osová) pevnosť v ťahu, 95% kvantil
E_{cm} :	priemerný sečnicový modul pružnosti betónu

Tieto mechanické vlastnosti sa používajú pri výpočtoch doby použiteľnosti (betónovej konštrukcie). Dané súčasné trendy používať betóny o vyššej pevnosti môžu privodiť taký stav, že ak sa berú do úvahy požiadavky na dobu použiteľnosti (konštrukcie), práve tieto požiadavky sa môžu stať rozhodujúce pre navrhovanie konštrukcií [1] a projektanti môžu sa začať pozeráť na navrhované hodnoty oveľa pozornejšie, aby tak zistili, ktoré návrhy sú hospodárnejšie.

Vo väčšine prípadov použitie návrhových hodnôt uvedených v EN 1992-1-1 je primerané. Avšak inžinieri, ktorí chcú využiť plný potenciál betónovej konštrukcie, môžu zistiť, že predpokladané návrhové hodnoty obmedzujú možnosti navrhovania.

Napríklad, pri návrhu dosiek, ohyb je spravidla faktor limitujúci rozpätie a tento (ohyb) je zviazaný s priemerným modulom pružnosti. Ak sa v návrhu môže uvažovať s vyššou hodnotou modulu, rozpätie môže byť zväčšené bez zvýšenia hrúbky dosky. Takto, na základe správnych technických dôvodov, môžu projektanti chcieť stanoviť vyššiu hodnotu, ako je predpokladaná hodnota vlastnosti alebo hľadať radu u výrobcu (betónu), ako môže byť táto hodnota zvýšená. Schopnosť odvetvia výroby betónu uspokojiť tieto požiadavky môže spôsobiť, či konštrukcia bude zhotovená z betónu alebo iného alternatívneho materiálu.

Táto publikácia obsahuje:

- podklad prečo a kedy sú vlastnosti dôležité pre projektantov;
- ako je vlastnosť určovaná v EN 1992-1-1;
- ako môže byť vlastnosť meraná;
- ako môže byť nameraná hodnota použitá pri navrhovaní;
- podmienky zvýšenia hodnoty vlastnosti.

2. POZNÁMKA K NIEKTORÝM PREDPOKLADOM TVORIACIM ZÁKLAD EUROKÓDU

2.1 Čo je dôležité, Eurokód 2 predpokladá, že navrhovanie a zhotovenie bude:

- podliehať procesom kontroly kvality;
- vykonané patrične kvalifikovaným a skúseným pracovníkom pod primeranou kontrolou;
- používať také materiály a výrobky aké sú predpísané;
- spĺňať požiadavky na zhotovenie a odbornosť uvedené v ENV 13670 „Zhotovovanie betónových konštrukcií“.

2.2 Technická norma EN 1990 „Zásady navrhovania konštrukcií“ uvádza, že navrhovanie má byť vykonané za použitia **princípov medzných stavov**. Medzné stavy sú stavy, za ktorými už konštrukcia ďalej nespĺňa predpoklady návrhu.

- **Limitné medzné stavy (ULS)** sú spojené so zrútením alebo inými formami zlyhania konštrukcie, napr. porušenie v ohybe, porušenie v šmyku, vybočenie, porušenie ukotvenia výstuže, atď.
- **Medzné stavy použiteľnosti (SLS)** zodpovedajú podmienkam, za ktorými sa už nespĺňajú predpísané požiadavky na použiteľnosť (konštrukcie), napr. nadmerná deformácia, nadmerný výskyt trhlin alebo nadmerné napätie.

Pri navrhovaní sú kontrolované (alebo overované) obidva tieto limitné stavy, ako súčasť procesu navrhovania pre všetky relevantné návrhové situácie (štádia). Výpočty ULS vždy používajú charakteristické hodnoty a výpočty SLS skoro vždy používajú priemerné hodnoty. Doba 50 rokov je často používaná ako navrhovaná doba prevádzky budovy alebo inej bežnej konštrukcie.

3. DÔLEŽITÉ TECHNICKÉ VLASTNOSTI BETÓNU

Jediná technická vlastnosť betónu, ktorá sa rutinne predpisuje je charakteristická pevnosť betónu v tlaku, vyjadrená v EN 206-1 ako pevnostná trieda v tlaku. Je používaná ako vstupná hodnota vo všetkých procesoch návrhu betónu. Vo väčšine návrhov charakteristická valcová pevnosť získaná z predpísanej triedy pevnosti v tlaku je *tiež* používaná na určenie návrhových hodnôt pre rad iných technických vlastností vrátane ťahovej pevnosti, E-hodnoty (modul pružnosti) a dotvarovania. Výrobcovia betónu sú dobre oboznámení s dodávaním betónu o predpísanej pevnosti v tlaku a s preukazovaním zhody. Preto táto publikácia neobsahuje tieto hľadiska pevnosti v tlaku.

Pri niektorých postupoch navrhovania sa používajú nasledovné technické vlastnosti betónu:

- pevnosť v ťahu
- modul pružnosti
- dotvarovanie
- zmršťovanie
- koeficient tepelnej rozťažnosti
- odolnosť voči ohňu

V nasledujúcich častiach príručky je uvedený návod pre tieto vlastnosti.

Dosiahnutie **duktility (tvárnosti)** konštrukcie [2] nie je zahrnuté v tejto publikácii. Pri posudzovaní betónových konštrukcií vytváranie plastických kĺbov je založené na predpoklade, že výstuž bude pokračovať v preberaní zaťaženia, zatiaľ čo sa výstuž deformuje (predlžuje sa). EN 1992-1-1 uvádza ustanovenia pre použitie výstuže s rôznou rozťažnosťou. Použitie vlákien zlepšuje duktilitu betónu, ale toto je už mimo rozsah tejto publikácie a EN 1992-1-1.

4. PEVNOSŤ V TLAKU

4.1. Podklad

Eurokód 2 používa charakteristickú pevnosť betónu v tlaku ako základ pre výpočty navrhovania (betónových konštrukcií). Táto **charakteristická pevnosť v tlaku** má štatistický základ: je to pevnosť pod ktorú sa dá očakávať, že padne 5% výsledkov. Aj výsledky pod predpísanou charakteristickou pevnosťou (t.j. predpísaná charakteristická pevnosť mínus 4 MPa) by sa mali preskúmať, zvlášť v kritických miestach, nemajú však znamenať, že prvok alebo konštrukcia je nevyhnutne nebezpečná alebo prevádzky neschopná.

Návrhová pevnosť betónu, f_{cd} používaná v Eurokóde 2 sa uvažuje ako:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

kde:

f_{ck} = charakteristická valcová pevnosť betónu po 28 dňoch

γ_c = dielčí (bezpečnostný) súčiniteľ pre betón

α_{cc} = dovolený súčiniteľ pre dlhodobé účinky a účinky zaťaženia

V Eurokóde je **doporučená hodnota** pre dielčí súčiniteľ bezpečnosti 1,5 a súčiniteľ pre α_{cc} je 1,00. Avšak stanovenie týchto hodnôt je úlohou Národného dodatku k Eurokódu v každej krajine. Napríklad vo Veľkej Británii je hodnota koeficientu α_{cc} všeobecne 0,85. Následky nižších pevností sú súčasťou toho, čo je zahrnuté v dielčom súčiniteli bezpečnosti.

Pevnosť v tlaku betónu nie je jednoznačná vlastnosť. Pre skúšobné vzorky pevnosť v tlaku je funkciou pomeru strán (dĺžka / šírka) a rýchlostí zaťažovania. Pri normových skúškach pomery strán sú normalizované a rozsah rýchlostí zaťažovania je limitovaný, a tak rýchlosť nemá významný vplyv na výsledok. U krátkych vzoriek, napríklad kociek tlačné dosky skúšobného prístroja (lisu) obmedzujú bočnú expanziu (rozpínanie) vzorky počas jej zaťažovania a to ma za následok vyššiu hodnotu pevnosti v tlaku, aká sa získa na valcoch s pomerom 2:1 (pomer výšky a priemeru valca), kde je malé bočné obmedzenie v centrálnej časti valca. V EN 206-1 sa predpokladá, že valcová pevnosť stanovená na valci s pomerom 2:1 je o 20% nižšia ako kocková pevnosť, ale ak pevnosť betónu narastá tento rozdiel sa znižuje a tak kocková pevnosť je bližšie k valcovej pevnosti.

Existuje domnienka, že **skutočná pevnosť v tlaku v konštrukcii** je nižšia ako pevnosť v tlaku získaná pri skúške na normalizovanom valci s pomerom 2:1. Eurokód i návrh normy prEN13791 „Stanovenie pevnosti betónu v konštrukciách“, obidva používajú súčiniteľ 0,85.

Eurokód 2 používa **valcovú pevnosť** ako základ výpočtov pri navrhovaní, pretože v niektorých situáciách je táto hodnota blízka k hodnote zaťaženia pri porušení betónu. Napríklad u jednoduchého nosníka bez šmykovej výstuže alebo hornej výstuže, hodnota

zaťaženia pri porušení betónu je obdobná ako hodnota valcovej pevnosti, ak sa vezme v úvahu rozdiel v pevnosti medzi betónom v skúšobných vzorkách a v konštrukcii. Na druhej strane v betónových prvkoch, kde je betón uzavretý výstužou, napríklad stĺp so šmykovou výstužou, tlakové napätie, ktorému betón odolá pred porušením v tlaku je významne vyššie. Eurokód toto zohľadňuje v rovniciach pre navrhovanie.

Zo zrejmých príčin je pevnosť betónu v tlaku hlavným kritériom pri navrhovaní stĺpov. Základom je preto určenie požadovaného množstva tlakovej výstuže. Ale je to dôležité aj pri ohýbaných prvkoch, akými sú nosníky a dosky, kde je hlavným kritériom pre stanovenie rozloženia napätí v priereze a tak tiež požadovaného množstva ťahovej výstuže v priereze. V niektorých prípadoch je tlaková výstuž tiež potrebná aj v nosníkoch. Pevnosť v tlaku betónu sa tiež používa na stanovenie únosnosti v šmyku a množstva šmykovej výstuže, na stanovenie vzniku a rozvoja trhlin a množstva výstuže pre kontrolu množstva a šírky trhlin, na stanovenie deformácií, atď.

4.2 Odhad priemernej pevnosti v tlaku

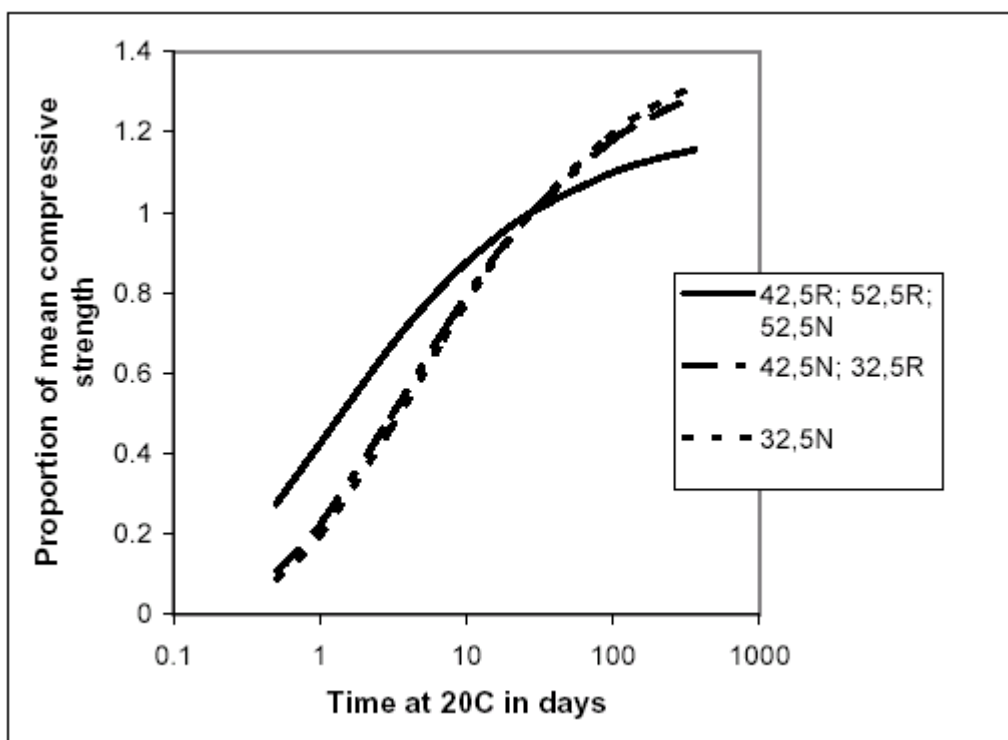
Projektanti používajú mechanické vlastnosti popísané v tejto publikácii pri kontrolách medzných stavoch použiteľnosti (konštrukcie). A preto pre každú vlastnosť je používaná hodnota primeraná k **priemernej** pevnosti (temer vždy) a **nie** hodnota vzťahujúca sa na charakteristickú pevnosť. Pre zjednodušenie sa predpokladá, že je to hodnota charakteristickej pevnosti plus 8 MPa (skúšobná vzorka vo tvare valca) a rovnako hodnota charakteristickej pevnosti plus 10 MPa (skúšobná vzorka vo tvare kocky). Vzhľadom na približný charakter vzťahu medzi mechanickými vlastnosťami a priemernou pevnosťou v tlaku, použitie rezervy 8 (10) MPa je spravidla primerané a nie je žiadne opodstatnenie pre použitie nižšej rezervy.

Avšak existujú situácie, kde použitie hodnoty vzťahujúcej sa k vyššej priemernej pevnosti je primerané. Tieto situácie zahŕňujú:

- tam kde konštrukcia nebude zaťažená počas dlhej doby po zabetónovaní a betón je takého druhu a v takej situácii, kde jeho pevnosť bude pokračovať v náraste a dosiahne hodnoty významne vyššie ako sú hodnoty 28-dňovej pevnosti;
- tam kde návrh čerstvého betónu a priemerná pevnosť závisia na inom faktore ako je predpísaná charakteristická pevnosť, napríklad ak je to hodnota maximálneho vodného súčiniteľa W/C .

4.3 Vývoj pevnosti betónu v čase

Technická norma EN 1992-1-1 v článku 3.1.2(6) uvádza rovnicu pre vývoj pevnosti v tlaku v betóne pri teplote 20°C. Pevnosti v tlaku získané z tejto rovnice (v závislosti na druhu použitého cementu) sú uvedené v obr.2. Avšak je treba poznamenať, že pevnosť získaná po 28 dňoch viacej závisí na type cementu ako na pevnostnej triede cementu. Napríklad percento pevnosti získané v neskoršom období - po 28 dňoch tvrdenia u betónu vyrobeného z cementu CEM I 42,5N bude významne nižšie ako u betónu zhotoveného napríklad z cementov CEM II/B-V 32,5 alebo CEM IIIA 32,5 za podmienky, že je dostatok vody pre pokračovanie hydratácie (druhy cementov sú definované v EN 197-1).



Obr.2: Vývoj pevnosti v tlaku v betóne pri teplote 20°C pre rôzne pevnostné triedy cementu

*Preklad: - Proportion of mean compressive strength = podiel priemernej pevnosti v tlaku
- Time at 20C in days = čas pri 20°C v dňoch*

Ak projektant má informáciu, ktorá ukazuje, že dodávaný betón získa pevnosť oveľa rýchlejšie, táto informácia môže byť použitá napríklad na zníženie pomeru napätie/pevnosť pri výpočte dotvarovania.

EN 1992 nezahrňuje rýchlosť nárastu pevnosti vo vlastnej konštrukcii a táto bude závisieť na [3]:

- druhu betónu (hlavne druhu cementu a jeho množstve);
- teplote pri ukladaní betónu;
- vonkajšej teplote;
- hrúbke časti konštrukcie;
- druhu debnenia.

Ak rýchlosť nárastu pevnosti v určitej časti konštrukcie má byť predpovedaná je potrebné použiť počítačové modelovanie a výpočty tvrdnutia betónu. Výrobca betónu môže byť požiadaný o dodanie niektorých základných informácií, ktoré budú závisieť od duhu modelu, ktorý bude pre výpočet použitý [4], napríklad druh, pevnostná trieda a množstvo použitého cementu a adiabatická krivka vývoja teplôt. Tieto modely predpokladajú, že existuje dostatočné množstvo vody pre hydratáciu, aby táto pokračovala bez prerušenia a čo je možné opodstatnene predpokladať v prvých niekoľkých dňoch po betonáži. Platnosť tohto predpokladu pre dlhodobejšiu predpoveď vyžaduje, aby sa táto posudzovala od prípadu k prípadu.

5. PEVNOSŤ V ŤAHU

5.1 Podklad

Pri navrhovaní betónu (pre betónové konštrukcie) sa pevnosť v ťahu používa pre:

- obecné pri posudzovaní vytvárania trhlín, odporu proti prepichnutiu, posudzovaní súdržnosti a ukotvenia;
- výpočet momentu vzniku trhlín u predpätých prvkov;
- návrh výstuže pre kontrolu šírky a rozloženia trhlín, ako dôsledku obmedzovaného teplotného zmrašťovania v rannom veku betónu;
- nákres diagramov „moment – zakrivenie“ a pri výpočte priehybov. Pri výpočte priehybov vyššia pevnosť v ťahu vedie k menšej miere vytvárania trhlín a menším priehybom;
- návrh nevystužených betónových prierezov, napríklad betónových vozoviek. V tomto prípade chce projektant vysokú pevnosť v ťahu;
- návrh betónu vystuženého vláknami.

Je treba poznamenať, že vysoká pevnosť v ťahu môže vytvoriť svoje vlastné problémy. Napríklad v prípade teplotného zmrašťovania v rannom veku betónu vysoká pevnosť v ťahu vedie k zvýšenému votknutiu a zmrašťovaniu a k väčším vzdialenostiam medzi vzniknutými trhlinami a k vzniku širších trhlín. Aby sa tomu zabránilo vyžaduje sa použitie prídavnej výstuže pre kontrolu trhlín.

Existujú tri „druhy“ pevnosti v ťahu: pevnosť v ohybe (normová skúška na hranoloch), pevnosť v priečnom ťahu (normová skúška na valcoch) a osová pevnosť v ťahu (normová skúška neexistuje).

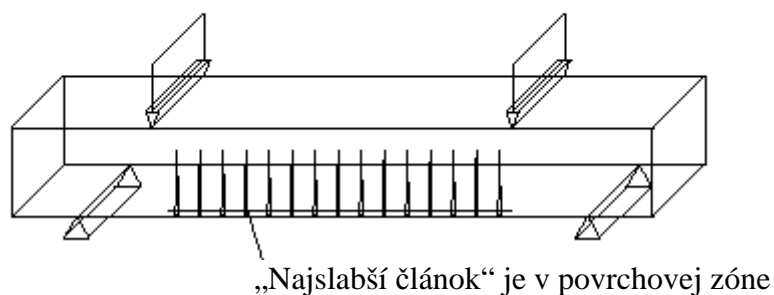
Pre daný betón je dôležité uvedomiť si, že nemôže byť jedná hodnota pre tieto tri druhy pevnosti v ťahu, pretože hodnota zistená pri skúške sa mení so:

- skúšobnou metódou
- rýchlosťou zvyšovania zaťaženia
- veľkosťou vzorky.

Rozdiely v hodnotách sa vysvetľujú princípom „najsľabšieho článku“. Tento predpokladá, že porušenie v ťahu začne v najslabšej časti a ak sa už začalo je veľmi pravdepodobne, že sa bude rýchlo šíriť po priereze. Preto ak je väčšia plocha vystavená ťahu je pravdepodobné, že pevnosť „najsľabšieho článku“ bude nižšia, ako na malej ploche a preto nameraná pevnosť v ťahu bude tiež nižšia.

Praktickým dôsledkom tohto je, že namerané hodnoty pevnosti v ťahu pri použití skúšky v ohybe budú významne vyššie ako tie, ktoré sa získajú pri skúške v priečnom ťahu, ktoré však budú naopak vyššie, ako tie ktoré sú získané za použitia pozdĺžnej jednoosej skúšky v ťahu – pozri obr.3 a-c.

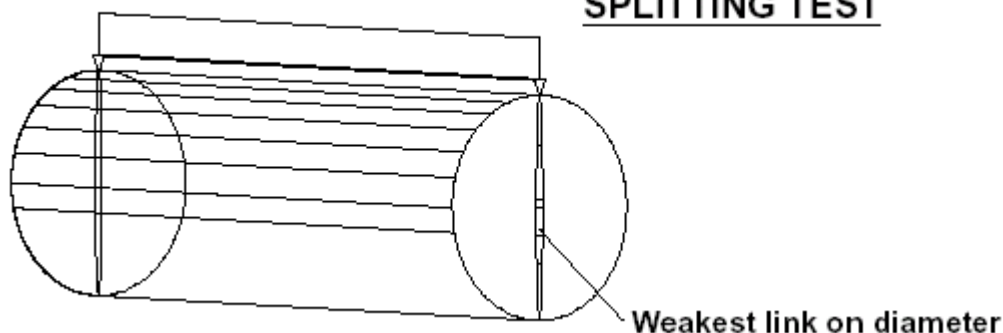
FLEXURAL TEST



Obr.3a: Miesto „najslabšieho článku“ pri ohybovej pevnosti

Preklad: - flexural test = skúška pevnosti v ohybe

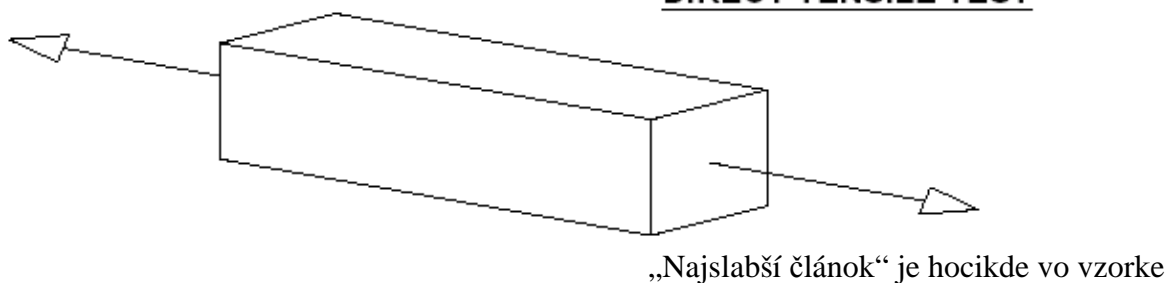
SPLITTING TEST



Obr.3b: Miesto „najslabšieho článku“ pri pevnosti v priečnom ťahu

*Preklad: - splitting test = skúška pevnosti v priečnom ťahu
- Weakest link on diameter = „Najslabší článok“ je v reze (v priemere)*

DIRECT TENSILE TEST



Obr.3c: Miesto „najslabšieho článku“ pri pevnosti v pozdĺžnom ťahu

Preklad: - direct tensile test = skúška osovej pevnosti v ťahu

5.2 Ako sa pevnosťou v ťahu používa v EN 1992-1-1

V EN 1992-1-1 termín „pevnosť v ťahu“ sa definuje ako najvyššie napätie dosiahnuté pri jednoosovom ťahovom zaťažení, napríklad **osová ťahová pevnosť**. obr.3c.

Pre bežné konštrukčné použitie priemerná osová pevnosť v ťahu - f_{ctm} je spojená s charakteristickou valcovou pevnosťou rovnicou:

$$\text{Pre triedy pevnosti v tlaku } \leq C50/60 \\ f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \text{ MPa}$$

$$\text{a pre triedy pevnosti v tlaku } > C50/60 \\ f_{ctm} = 2,12 \times \log_e(1 + ((f_{ck} + 8)/10)) \text{ MPa}$$

Poznámka 1: ($f_{ck} + 8$) je predpokladaná **priemerná** valcová pevnosť. Táto sa používa pri výpočtoch **dobu použiteľnosti** (konštrukcie).

Poznámka 2: Tieto hodnoty predpokladajú, že požiadavka na pevnosť určuje zloženie čerstvého betónu.

Nanešťastie toto (priemerná osová pevnosť v ťahu) je definícia pevnosti v ťahu, ktorá je najmenej známa výrobcovi betónu. Avšak tam kde je pevnosť v ťahu určená **pevnosťou v pričnom ťahu** podľa EN 12390-6, technická norma EN 1992-1-1 dovoľuje aby osová pevnosť v ťahu bola **vypočítaná** z pevnosti v pričnom ťahu a berie sa ako 90% pevnosti v pričnom ťahu:

$$f_{ct} = 0,90 f_{ct,sp}$$

Ak sa použije tento prístup, pevnosť v pričnom ťahu by mala byť založená na skúšaní betónu, ktorý má zloženie zamerané a dávajúce cieľovú priemernú pevnosť, a ktorého výsledkom bude odhad priemernej pevnosti v ťahu.

Pevnosť v ohybe môže byť meraná za použitia skúšobného postupu podľa EN 12390-5, ale v Eurokóde môže byť táto tiež vypočítaná z priemernej osovej pevnosti v ťahu za použitia následovnej rovnice.

Pevnosť v ohybe je vyššia:

$$\text{a) } f_{ctm,fl} = (1,6 - h/1000) f_{ctm}, \text{ kde „h“ je celková výška prvku v mm}$$

alebo

$$\text{b) } f_{ctm,fl} = f_{ctm}$$

Prvá rovnica naznačuje, že pevnosť v ohybe meraná na trámoch o priereze 100×100 mm podľa EN 12390-5 je 1,5-krát vyššia ako osová pevnosť v ťahu.

Pretože pevnosť v ťahu ovplyvňuje vytváranie trhlín od teplotného zmrašťovania v rannom veku (u betónu), EN 1992-1-1 uvádza rovnice pre výpočet pevnosti v ťahu v rôznych dobách tvrdnutia betónu, ale doporučuje, aby tam kde vývoj pevnosti v ťahu v závislosti od času je

dôležitý, musia sa vykonať skúšky, ktoré berú do úvahy vplyvy prostredia a rozmery prvku konštrukcie. Z praktických dôvodov samotná skúška nemôže vyjadriť vplyvy prostredia a rozmery konštrukčného prvku; ale pri použití konceptu tvrdnutia (betónu) je možné vypočítať dobu (čas) tvrdnutia konštrukcie, v ktorej sa očakáva vznik trhlin a skúšať vzorky s takouto dobou tvrdnutia.

5.3 Meranie ťahovej pevnosti

Tam kde sa požaduje pevnosť v priečnom ťahu, mala by sa určiť podľa EN 12390-6. Kde sa požaduje pevnosť v ohybe, táto by mala byť určená podľa EN 12390-5 za použitia 4-bodovej metódy. Zistilo sa, že alternatívna metóda zaťažovania (stredového zaťažovania) dáva výsledky o 13 percent vyššie ako referenčná metóda. Neexistuje žiadna európska alebo medzinárodná norma na meranie osovej pevnosti v ťahu. Ani EN 12390-5 ani EN 12390-6 neobsahujú informáciu o presnosti skúšky.

Skúška pevnosti v ťahu dáva rôzne výsledky. Sherriff [5] ukázal, že variačný súčiniteľ skúšania pevnosti v priečnom ťahu bol viac ako dvojnásobný ako variačný súčiniteľ pri skúške kociek (6,5% v porovnaní s 3,2%). Tiež aj v Eurokóde sa predpokladá vysoký variačný súčiniteľ.

Pri použití kombinácie teórie pravdepodobnosti a počítačovej simulácie Sherriff tiež ukázal, že ak sa má dosiahnuť rozumná pravdepodobnosť zhody, návrhová rezerva výrobcu betónu musí byť stanovená dosť vysoko, aby sa poruchovosť dala ohodnotiť menej ako 1%.

Ryle [6] ukázal, že v laboratórnych podmienkach bolo možné dosiahnuť relatívne nízke chyby pri skúškach pevnosti v priečnom ťahu, ale bežný skúšobný lis, ktorý sa ciachoval pre skúšky kociek, môže pri tom všetkom dávať nespoľahlivé výsledky. Z toho urobil záver, keď povedal, že skúška pevnosti v priečnom ťahu bola nevhodná ako skúška pre preukázanie zhody u betónu.

5.4 Niektoré praktické doporučenia

Vzhľadom na vysokú variabilitu väčšina výrobcov transportbetónu sa bráni pristúpeniu k zmluvám na dodávky betónu na základe stanovenej charakteristickej pevnosti v priečnom ťahu alebo pevnosti v ohybe. V prípade požiadania výrobcovia dodajú informácie o pevnosti v ťahu získané na betóne, ktorý má cieľovú priemernú pevnosť v tlaku pri počiatkových skúškach podľa EN 206-1. Doporučuje sa, aby sa vyrobili najmenej tri (ideálne šesť) vzorky pre skúšku pevnosti v ťahu z každej z troch zmesí, jedna zo zmesí u ktorej je zámerom dosiahnutie cieľovej priemernej hodnoty pevnosti a po jednej zo zmesí s nižšou a vyššou pevnosťou, ako je cieľová priemerná hodnota pevnosti a následne interpolovať výsledky a získať tak pevnosť v ťahu pri vyššej pevnosti ($f_{ck} + 8$) MPa (na valci) alebo cieľovej priemernej pevnosti.

V EN 1992-1-1, článok 3.1.2(9) sa predpokladá, že **nárast pevnosti v ťahu** bude rovnaký ako u pevnosti v tlaku až do doby 27 dní. Pri 28-dňoch a neskôr pevnosť v ťahu používa súčiniteľ nárastu, ktorý je dvojtretinovou mocninou súčiniteľ nárastu používaného pre pevnosť v tlaku. Avšak ak je znalosť nárastu pevnosti v ťahu v čase dôležitá, norma doporučuje skúšanie.

Ak sa hľadá informácia o náraste pevnosti v ťahu v čase pre určitý betón, skúšobná metóda musí byť odsúhlasená a potom určená. Doporučuje sa, aby sa výrobcovia mali pokúsiť odsúhlasiť buď pevnosť v priečnom ťahu (EN 12390-6), alebo pevnosť v ohybe za použitia

referenčnej metódy podľa EN 12390-5. Vzhľadom na variabilitu výsledkov skúšok, najmenej tri (ideálne šesť) vzoriek by malo byť skúšaných v každom veku betónu. Pretože ani tieto skúšobné metódy nemajú presné údaje, jedine čo je možné užitočne urobiť s výsledkami je vypočítať priemernú hodnotu. Výsledky skúšok sa vzťahujú k nárastu pevnosti v ťahu v normových skúšobných vzorkách a nie v konštrukcii. Potrebné je počítačové modelovanie a výpočty tvrdnutia (betónu), aby sa tieto údaje previedli na očakávanú pevnosť v ťahu v konštrukcii.

Podľa toho načo sú údaje požadované, zloženie čerstvého betónu pre skúšky by malo byť buď:

- a) také, u ktorého sa očakáva, že dá cieľovú priemernú pevnosť v tlaku; priemerná skúšobná hodnota je potom braná ako priemerná pevnosť v ťahu alebo,
- b) také, u ktorého sa očakáva, že dá charakteristickú pevnosť v tlaku; priemerná skúšobná hodnota je potom braná ako charakteristická pevnosť v ťahu.

5.5 Zvýšenie pevnosti v ťahu

Niektoré obecné prístupy:

- zvýšenie pevnosti v tlaku zvýši pevnosť v ťahu;
- relatívne objemy pasty a kameniva majú malý vplyv na pevnosť v ťahu [7];
- druh hrubého kameniva má významný vplyv na pevnosť v ťahu. Betón, ktorý obsahuje vysokokvalitné drvené hrubé kamenivo má tendenciu mať vyššiu pevnosť v ťahu ako betón z prírodného ťaženého kameniva.

Oceľové vlákna nemenia pevnosť v ťahu samotného betónu, ale v betónových prvkoch regulujú vznik trhlín a pomáhajú vyhnúť sa havarijnému porušeniu.

Polymérové vlákna len pomáhajú regulovať vytváranie trhlín v betóne pokiaľ je tento v plastickom stave.

6. MODUL PRUŽNOSTI

6.1 Podklad

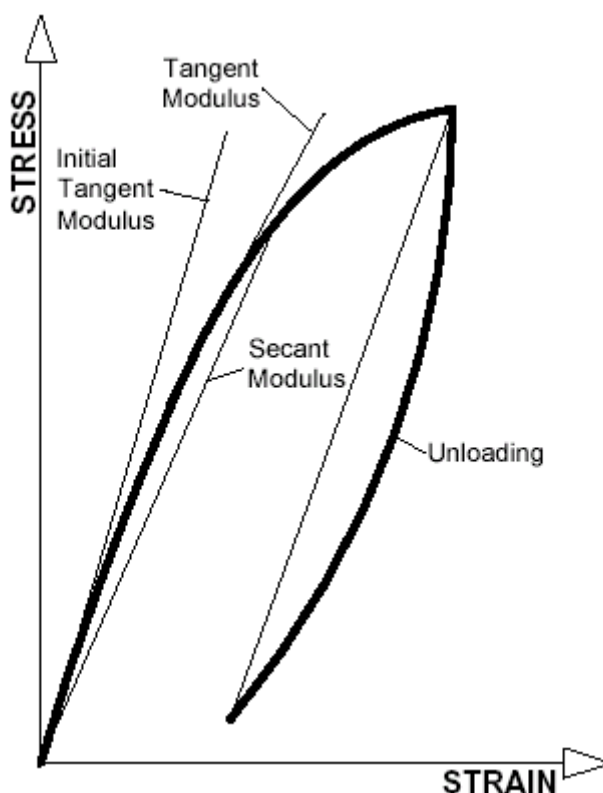
Modul pružnosti („E-hodnota“) betónu je dôležitou vlastnosťou pri navrhovaní:

- používaný pri výpočte priehybov, ktorý je často určujúcim parametrom pri navrhovaní dosiek;
- používaný pri výpočte obsahujúcom predom predpäté alebo dodatočne predpäté prvky;
- tiež ovplyvňuje skrátenie stĺpov pod zaťažením a vplyvom napätí vzniknutých obmedzením pohybov.

Modul môže byť meraný za použitia buď statických alebo dynamických skúšok, tieto dva skúšobné postupy nedávajú rovnaké namerané hodnoty modulu. Statický modul je meraný vynášaním hodnôt deformácie valca pri zaťažovaní (obyčajne 30-40% medzného zaťaženia). Dynamický modul je stanovený vibráciou betónovej vzorky. Výrobcom (betónu) sú skôr známe skúšky stanovovania statického modulu.

E hodnota je pomer medzi napätím (zaťaženie/plocha) a pretvorením (deformácia alebo skrátenie/dĺžka). Pretože betón nie je v skutočnosti pružný materiál, vzťah medzi napätím

a pretvorením nie je konštantný. Používajú sa tri dohodnuté E-hodnoty: sečnicový modul, dotyčnicový modul a začiatkový dotyčnicový modul - pozri obr.4.



Obr.4: Diagram vzťahu „napätie - deformácia“ v betóne (podľa A.M.Neville, „Vlastnosti betónu“)

Preklad: - Stress = napätie; Strain = deformácia; Initial Tangent Modulus = začiatkový dotyčnicový modul; Tangent Modulus = sečnicový modul; Secant Modulus = dotyčnicový modul; Unloading = odľahčenie

Toto sú merania statického modulu. Začiatkový dotyčnicový modul je však približne rovný dynamickému modulu. Je možné vidieť, že dotyčnicový modul je použiteľný len na príslušnú časť krivky napätie/pretvorenie. Obecne najužitočnejšou mierou je sečnicový modul a v EN 1992-1-1 je **sečnicový modul** - E_{cm} , ten ktorý sa používa pri navrhovaní.

V návrhu sa sečnicový modul vypočítava alebo predpokladá z charakteristickej pevnosti v tlaku a upravuje sa dvomi koeficientmi:

- znižuje bezpečnostným koeficientom - γ_{CE} , aby sa dostala hodnota modulu - E_{cd} , ktorý sa použije pri návrhu. Doporučená hodnota γ_{CE} je 1,2.
- pretože E-hodnota je v skutočnosti pozmeňovaná dotvarovaním, Eurokód používa iné zníženie E-hodnoty a to súčiniteľom dotvarovania, ktorý má typicky hodnotu medzi 2 a 3.

E-hodnota upravená týmito dvomi koeficientmi sa nazýva **skutočný modul pružnosti**. Tento je označovaný ako - $E_{c,eff}$ a tento sa používa pri navrhovaní.

Pre krátkodobé zaťaženie betónových prvkov sa používa návrhová hodnota modulu E_{cd} na určenie posunu.

6.2 Ako sa E-hodnota používa v EN 1992-1-1

Ak nie je k dispozícii informácia o betóne, ktorý bude použitý, projektanti musia použiť najnižšiu bežnú európsku hodnotu pre E-hodnotu. Pre kvarcitové kamenivo sa „normálny“ statický modul (sečnicový modul) vypočíta z predpísanej charakteristickej valcovej pevnosti z rovnice:

$$E_{cm} = 22[f_{ck} + 8]/10]^{0.3} \text{ GPa} \quad (f_{ck} \text{ v MPa})$$

Aj keď to text v EN 1992-1-1, v článku 3.1.3(2) takto špeciálne neuvádza, ale rovnica pre kvarcitové kamenivo môže byť tiež použitá pre betóny s kremičitým kamenivom.

Pre vápencové a pieskovcové kamenivo sa hodnota znižuje o 10%, respektíve 30% a pre čadičové kamenivo sa zvyšuje o 20%. Tento prístup predpokladá, že projektant pozná kamenivo, ktoré bude použité; tento prípad zvyčajne nenastáva, pokiaľ dodávateľ (betónu) nie je dopredu vybraný. Len u betónu s veľmi vysokými pevnosťami je druh hrubého kameniva spravidla dopredu známy a často aj predpísaný.

6.3 Meranie E-hodnoty

6.3.1 Skúšobné metódy

Spolu s CEN sa pracuje na vyvinutí skúšobného postupu na meranie statického modulu pružnosti. Pretože tam budú určité predbežné zaťažovacie cykly, aby sa tak odstránil vplyv dotvarovania, hodnota z tejto skúšky sa spravidla sa berie ako približný sečnicový modul. Skúška statického modulu bude publikovaná v sérii skúšok uvedených v EN 12390.

Pri skúške dotvarovania podľa ASTM C 512-02, E-hodnota je určovaná z pretvorenia pri prvom zaťažení. Je založená na rozdielne len medzi dvomi meraniami, nameraná hodnota by mala byť menej spoľahlivá ako hodnota získaná skúškou podľa EN 12390.

Počiatočný dotyčnicový modul môže byť určený dvomi spôsobmi:

- použitím merania ultrazvukovej impulznej rýchlosti. EN 12504-4 neobsahuje postup na prepočet údajov z ultrazvukovej impulznej rýchlosti na počiatočný dotyčnicový modul, ale tento postup je obsiahnutý v BS1881-203. Očakáva sa, že tento postup bude zahrnutý do Národného dodatku k EN 12504-4 vo Veľkej Británii.
- meraním dynamického modulu pomocou oscilátora s meničom frekvencii. Postup pre meranie dynamického modulu pružnosti (\approx počiatočný dotyčnicový modul) je uvedený v BS1881-209.

6.3.2 Návod na skúšanie E-hodnoty.

Pretože priehyb predstavuje súčasť medzných stavov použiteľnosti, priemerná E-hodnota je vhodná a tak zloženia čerstvého betónu by mali byť také, od ktorých sa dá očakávať, že dosiahnú cieľovú priemernú pevnosť v tlaku.

Pri výbere skúšobného stroja pre tieto skúšky sa musí postupovať starostlivo. Skúšobné stroje, ktoré sa ciachujú pre skúšky kociek môžu byť nevhodné pre skúšky modulov. Náchylnosť k problémom majú skúšobné stroje s vysokým výkonom - veľkým maximálnym zaťažením (ťažké tlačné dosky) a skúšobné stroje, kde guľové uloženie nemá dostatočnú voľnosť

rotovať. Existencia týchto problémov môže byť odhalená, ak sú veľké rozdiely medzi tromi nameranými údajmi pretvorenia.

Ak sa používa nameraná E-hodnota, projektant by mohol zvážiť použitie znižujúceho čiastkového bezpečnostného koeficientu - γ_{CE} , povedzme 1,1 namiesto bežného 1,2, dávajúceho vyššiu návrhovú hodnotu. Ešte nižší bezpečnostný koeficient sa nedoporučuje, pretože tu bude neistota spojená s nameranou hodnotou a variabilitou výroby.

Početné výskumné práce uviedli, že namerané E-hodnoty sú nižšie (niekedy významne nižšie), ako hodnoty získané pri použití rovnice uvedenej v Eurokóde. V čase prípravy tejto správy neboli známe príčiny týchto rozdielov.

6.4 Zvýšenie hodnoty modulu pružnosti

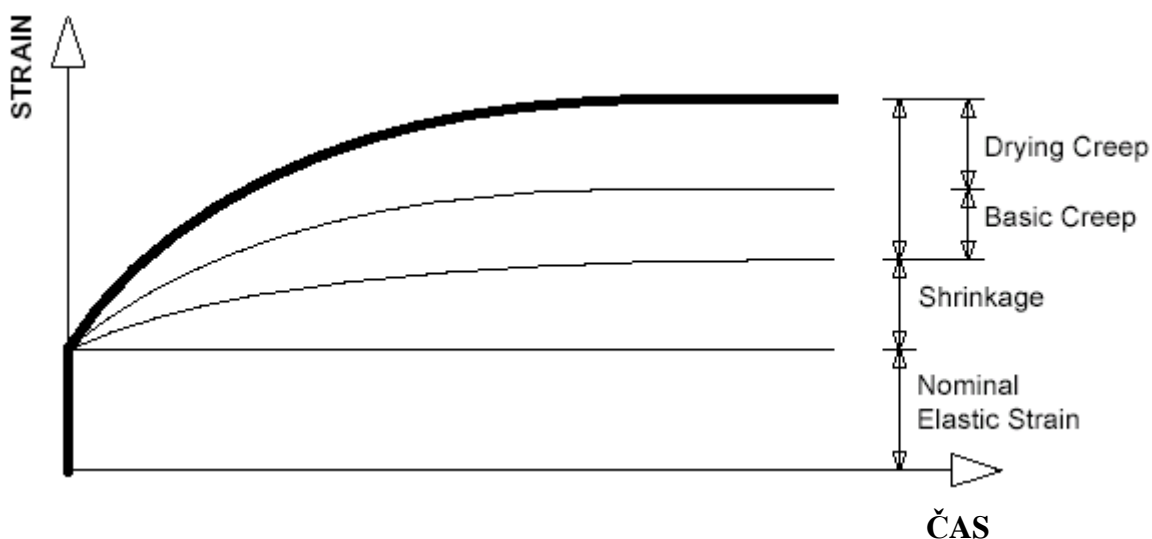
Existuje niekoľko faktorov, ktoré sa musia vziať v úvahu:

- obecné, E-hodnota môže byť zvýšená zvýšením charakteristickej pevnosti – princíp je podkladom pre rovnicu uvedenú v odseku 6.2. Avšak pre zvýšenie modulu o 20% je nutné zvýšiť pevnosť betónu o najmenej tri pevnostné triedy, čo je veľmi drahé riešenie;
- pretože väčšia časť objemu betónu je tvorená kamenivom, E-hodnota kameniva bude mať významný vplyv na výslednú E-hodnotu betónu. Výber kameniva s vyššou E-hodnotou zvýši modul pružnosti betónu. Vo väčšine prípadov nebude mať výrobca (betónu) informáciu o module kameniva, ale všeobecne sa uznáva, že tento je úmerný k špecifickej hmotnosti kameniva.
- E-hodnota betónu je funkciou E hodnôt jeho dvoch hlavných zložiek – pasty a kameniva. Spravidla E-hodnota kameniva je väčšia z týchto dvoch zložiek a tak zvýšenie objemu kameniva môže zvýšiť E-hodnotu betónu – okolo 5% [7]. Ak sa to porovná s vplyvom druhu kameniva je to malé zvýšenie, ale návrh zloženia betónu (pomerný objem kameniva a pasty) je prinajmenšom niečo, nad čím má výrobca kontrolu, zatiaľ čo druh používaného kameniva často nemôže byť zmenený.

7. Dotvarovanie

7.1 Podklad

Dotvarovanie je definované ako postupný nárast deformácie (pretvorenia) v čase pri použití konštantného napätia, pri zohľadnení ostatných na čase závislých deformáciách, ktoré však nie sú spojené s použitým napätím, napríklad zmrašťovanie, napučovanie, tepelná deformácia – pozri obr.5. Napríklad ak sa odstráni debnenie z dosky táto sa prehne. Tento počiatočný priehyb vzniká vzhľadom na pružné pretvorenie. Avšak postupom času sa doska bude vplyvom viacerých faktorov postupne viac prehýbať, jedným z hlavných faktorov bude dotvarovanie. Pretože pretvorenie od dotvarovania je spravidla 2,0 až 4,0 násobkom pružného pretvorenia [8], priehyb spôsobený dotvarovaním môže byť niekoľko násobne väčší, ako počiatočný priehyb a preto ho musí s ním projektant uvažovať. Vôľa pre ďalší pohyb sa musí urobiť pri upevňovaní tuhých, krehkých priečok pod betónovými doskami a nosníkmi.



Obr.5: Časovo závislé deformácie betónu vystavenému trvalému zaťaženiu - zmena v napätí zaťaženej a vysychajúcej vzorky (podľa A.M.Neville, „Vlastnosti betónu“)

Preklad: Strain = deformácia; Drying Creep = dotvarovanie z vysychania; Basic Creep = základné dotvarovanie; Shrinkage = zmršťovanie; Nominal Elastic Strain = základná pružná deformácia.

Dotvarovanie tiež zníži úroveň predpätia v predpätých betónových prvkoch a u stĺpov spôsobí skrátenie stĺpa a postupný prenos zaťaženia z betónu na výstuž.

Dotvarovanie v ťahu môže byť tiež prínosom vtedy ak čiastočne uvoľní napätia vyvolané inými obmedzovanými pohybmi, napríklad zmršťovaním od vysychania, tepelným zmršťovaním alebo zaťažením. Zatiaľ čo mechanizmus dotvarovania od ťahu a dotvarovania od tlaku môže byť odlišný, pri navrhovaní sa bežne predpokladá, že súčiniteľ dotvarovania od ťahu a od tlaku je rovnaký [1].

Obecne dotvarovanie závisí od okolitej vlhkosti, rozmerov prvku a zloženia betónu. Vplyva naňho tiež doba tvrdnutia betónu, v ktorej bol po prvýkrát zaťažený a trvanie a veľkosť zaťaženia.

7.2 Ako sa dotvarovanie používa v EN 1992-1-1

Deformácia z dotvarovania sa vypočíta z súčiniteľu dotvarovania a z priemerného sečnicového modulu pružnosti a je daná ako:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / 1,05 E_{cm})$$

kde $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ = deformácia od dotvarovania v čase $t = \infty$

$\varphi(\infty, t_0)$ = súčiniteľ dotvarovania v čase $t = \infty$

σ_c = konštantné tlakové napätie aplikované v čase $t = \infty$

Poznámka: výraz $1,05 E_{cm}$ je v skutočnosti dotyčnicový modul E_c , ktorý sa zobral ako 1,05 násobok sečnicového modulu.

Pre interiérové podmienky (relatívna vlhkosť = 50%) a exteriérové podmienky (relatívna vlhkosť = 80%) sú dané diagramy pre stanovenie **súčiniteľa dotvarovania** $\phi(\infty, t_0)$ s podmienkou, že betón nie je vystavený napätiu väčšiemu ako 45% charakteristickej pevnosti v čase zaťaženia. Ak aplikované napätie prekročí túto hodnotu budú v betóne mikrotrhliny, čo zvýši dotvarovanie a preto v EN 1992-1-1 sú uvedené rovnice, ktoré zohľadňujú túto nelinearitu dotvarovania.

7.3 Meranie dotvarovania

7.3.1 Skúšobné metódy

Metóda podľa **ASTM C 512-02** je metódou, ktorá meria celkové dotvarovanie (základné dotvarovanie plus dotvarovanie od vysychania) betónu. Pretože niektoré normové podmienky sú definované je tiež prípustné tieto meniť tak, aby sa dostala informácia týkajúca sa určitého projektu. Vybetonuje sa šesť valcov o priemere 150 mm, dva sa použijú pre skúšky pevnosti, dva sa použijú pre skúšky dotvarovania a dva sa ponechajú bez zaťažovania, aby sa mohli určiť zmeny pretvorenia bez zaťaženia, napríklad tie, ktoré vznikajú zmrašťovaním od vysychania a autogénnym zmrašťovaním. V čase nanosenia zaťaženia by použité zaťaženie nemalo vyvolať napätie v tlaku väčšie ako 40% z pevnosti v tlaku. Odčítania s urobia okamžite, keď sa zaťaženie nanese a potom po 2 a 6 hodinách; a potom v stanovených intervaloch až do doby 1 roku od nanosenia zaťaženia. Stanovený je postup pre výpočet rýchlosti dotvarovania.

Podľa Brooksa [9] je zariadenie pre skúšku podľa ASTM C 512 veľké a drahé, pričom výskumní pracovníci majú tendenciu používať menšie a lacnejšie zariadenie.

V sérii skúšobných noriem EN 12390 nie je žiadna európska skúška pre dotvarovanie, avšak je vo vývoji skúšobná metóda pre materiály na opravy (betónových konštrukcií). Táto metóda je definovaná v prEN 13584-2 a používa hranoly (40 × 40 × 160mm), čo ju však robí nevhodnou pre väčšinu bežných betónov. Začali sa tiež práce na metóde ISO (ISO/WD 1920-Y), ale táto je len v stave návrhu textu pre príslušnú technickú komisiu.

7.3.2 Návod pre skúšky dotvarovania

Niektoré obecné záležitosti, ktoré je treba vziať v úvahu:

- betón vystavený napätiu sa bude viac dotvarovať, ak súčasne vysycha. Dotvarovanie bez vysychania sa nazýva „základné dotvarovanie“ a prídavné dotvarovanie, ktoré je dôsledkom vysychania sa nazýva „dotvarovanie od vysychania“. A preto by skúšky dotvarovania mali byť urobené v takých podmienkach prostredia, ktoré sa čo najviac približujú podmienkam prostredia na stavbe (v ktorých je betónová konštrukcia);
- dotvarovanie je tiež funkciou pevnosti betónu v čase nanosenia zaťaženia: čím vyššia je pevnosť pri nanosení zaťaženia, tým nižší je pomer napätie/pevnosť a nižšie je aj dotvarovanie;
- dokonca i pri rovnakom pomere napätie/pevnosť je dotvarovanie menšie, ak je zaťaženie nanosené na betón s vyšším vekom. Z tohto dôvodu každý skúšobný postup potrebuje odraziť vek konštrukcie, pri ktorej bude táto zaťažená;
- dotvarovanie bude rásť s časom, avšak sa predpokladá, že približne po 30 rokoch bude už konštantné. Zrejme nie je príliš praktické vykonávať skúšky po takúto dobu. Približne 50% konečného dotvarovania sa objaví počas prvých 2 až 3 mesiacov a 90% po 2 až 3

rokoch. Čím je dlhšia doba skúšania, tým presnejšia je predpoveď dlhodobého dotvarovania. Gilbert [8] preskúmal matematické formulácie pre tvar závislosti súčiniteľa dotvarovania a časových kriviek a získal viac použiteľné formulácie. Došiel tiež k záveru, že rovnice pre predpoveď konečného dotvarovania na základe údajov o dotvarovaní po 28 dňoch boli nespoľahlivé, a preto sa doporučuje dlhšia skúšobná doba;

- vysoké teploty majú významný vplyv na dotvarovanie. Avšak v bežných rozsahoch teplôt, v akým bývajú konštrukcie vystavené, vplyv teploty je relatívne malý v porovnaní s vplyvom vlhkosti.

Pre bežné interiérové podmienky, kde sa vyžadujú určité údaje pre projekt, používajú sa normové požiadavky podľa ASTM C 512-02 a ako hodnota pomeru napätie/pevnosť sa môže použiť hodnota 40%. V niektorých situáciách bude nutné meniť skúšku raz alebo viackrát nasledovnými spôsobmi:

- vyšší pomer napätie/pevnosť;
- menený pomer napätie/pevnosť;
- rozdielne teploty;
- menené teploty;
- rozdielne relatívne vlhkosti;
- menené relatívne vlhkosti;
- čas skúšky.

Skúšobné podmienky, ktoré odrážajú vyššie uvedené a na ktoré sa pravdepodobne narazí počas výstavby, by mali byť vybrané a stanovené. Z celkového dotvarovania, časť dotvarovania od vysychania je funkciou pomeru plochy ku objemu a pretože nie je bežnou praxou meniť veľkosť vzoriek, môže byť nevyhnutné vziať v úvahu najhorší prípad alebo skúšať pri rôznych relatívnych vlhkostiach a interpolovať pre rôzne časti sekcie.

Základné materiály (zložky), ktoré sa plánujú použiť pre konštrukciu by sa mali použiť v skúšobnom betóne a pevnosť skúšobnej zmesi by sa mala stanoviť tak, aby bola v rozsahu f_{ck} až $(f_{ck} - 4)$.

Poznámka 1: Dotvarovanie je väčšie u menej pevného betónu, aj keď pomer napätie/pevnosť je rovnaký a preto použitie pevnosti nižšej ako je priemerná hodnota dáva nízky koeficient bezpečnosti.

Poznámka 2: Nevyhnutné môže byť zvýšenie pevnosti betónu, ak návrh čerstvého betónu sa riadi inými faktormi, napr. maximálnou hodnotou vodného súčiniteľa (pomer voda/cement).

Rovnica 1 uvedená v ASTM C 512-2 by sa mala použiť pre výpočet rýchlosti dotvarovania a pre deformáciu od dotvarovania, povedzme po 30 rokoch. Rovnica sa môže tiež použiť pre výpočet súčiniteľa dotvarovania (čo je v rozpore s jeho predpokladmi, tak ako je to v EN 1992-1-1) delením deformácie od dotvarovania nameraným plastickým pretvorením.

7.4 Zníženie dotvarovania

Niektoré úvahy:

- kľúčovým faktorom pri dotvarovaní je **pomer napätie/pevnosť v čase nanosenia zaťaženia** a tak zvýšenie pevnosti pred nanesením zaťaženia môže významne znížiť

dotvarovanie. Tam kde pri nanosení zaťaženia napätie prekročí 45% charakteristickej pevnosti sa môže objaviť nelineárne dotvarovanie a to zvýši celkové dotvarovanie;

- dotvarovanie prebieha v cementovej paste a tak zvýšenie **objemu kameniva** zníži dotvarovanie;
- dotvarovanie je ovplyvnené **pórovitosťou cementovej pasty** (súčiniteľ w/c) a tak vysoko pevnostný betón bude mať menšie dotvarovanie, ako betón s nízkou pevnosťou pri rovnakom pomere napätie/pevnosť. To však môže byť kompenzované vplyvom zvýšeného objemu cementovej pasty vo vysoko pevnostnom betóne. Počas hydratácie je pórovitosť cementovej pasty znižovaná a tak pre daný betón a pomer napätie/pevnosť, dotvarovanie sa znižuje keď narastá pevnosť, napr. ak sa predĺži doba medzi betonážou a nanosením zaťaženia;
- pretože kamenivo obmedzuje dotvarovanie v cementovej paste, čím tuhšie je kamenivo (vyššia E-hodnota), tým menšie je dotvarovanie;
- použitý **druh cementu** je dôležitý, ak je doba nanosenia zaťaženia fixná. Cementy, ktoré hydratujú rýchlejšie budú mať vyššiu pevnosť v čase nanosenia zaťaženia a tým nižší pomer napätie/pevnosť a nižšie dotvarovanie. Avšak tam, kde je pomer napätie/pevnosť je rovnaký pri nanosení zaťaženia a prostredie bude také, že pevnosť bude naďalej rásť cementy, ktoré zvyšujú svoju pevnosť po nanosení zaťaženia rýchlejšie budú mať nižšie dotvarovanie. Toto vysvetľuje jav, že betóny obsahujúce popolček a vysokopecnú trosku majú tendenciu mať nižšie dotvarovanie;
- prítomnosť **výstuže** môže významne znížiť dotvarovanie a to sa musí vziať v úvahu počas procesu navrhovania. Tento aspekt zníženia dotvarovania nemôže výrobca betónu ovplyvniť;
- za predpokladu, že doba nanosenia zaťaženia fixná, výrobca betónu má určitý vplyv na hodnotu koeficientu dotvarovania, pretože tento je ovplyvnený druhom použitého cementu (alebo hlavne rýchlosťou nárastu jeho pevnosti) a pevnosťou betónu;
- pretože deformácia z dotvarovania je funkciou E-hodnoty betónu, faktory ovplyvňujúce modul (pružnosti) tiež ovplyvňujú dotvarovanie.

8. ZMRAŠŤOVANIE

8.1 Podklad

Zmrašťovanie je kombináciou autogénneho zmrašťovania a zmrašťovania od vysychania. **Autogénne zmrašťovanie** sa objavuje počas tuhnutia (betónu) a je spôsobené vnútorným spotrebovaním vody počas hydratácie. Objem hydratačných produktov je menší ako pôvodný objem nezhydratovaného cementu a vody a toto zníženie objemu spôsobuje ťahové napätia a má za následok zmrašťovanie. V bežnom betóne autogénne zmrašťovanie je menej ako 100 μ ale u vysoko pevnostného betónu s nízkou vodným súčiniteľom, autogénne zmrašťovanie môže byť väčšie ako zmrašťovanie od vysychania.

Pri vodnom súčiniteli $w/c \geq 0,4$ je autogénne zmrašťovanie dostatočne malé a môže byť zanedbané. Pri nižších hodnotách w/c sa musí autogénne zmrašťovanie vziať v úvahu. V praxi to spôsobuje ťažkosti, pretože neexistuje žiadna dohodnutá skúšobná metóda alebo skúšobná doba a hodnoty uvádzané v literatúre sa značne líšia od 200 do 1200 μ .

Zmrašťovanie od vysychania je spôsobené stratou vody z betónu vyparovaním do atmosféry. Obecné je táto stratená voda z cementovej pasty, ale u niekoľko málo druhov kameniva, je hlavná strata vody a príspevok k hodnote zmrašťovania od vysychania betónu, spôsobená kamenivom v betóne. Zmrašťovanie od vysychania je relatívne pomalé a napätia, ktoré vyvoláva sú čiastočne vyvažované ťahovým dotvarovaním.

Rýchlosť zmršťovania od vysychania závisí na relatívnej vlhkosti (RH) okolitého vzduchu a od „imaginárnej veľkosti“ sekcie ($2 \times$ plocha prierezu betónu / obvod vystavený vysušovaniu). Ak relatívna vlhkosť vzduchu narastá zmršťovanie od vysychania klesá. Ak „imaginárna veľkosť“ narastá zmršťovanie od vysychania klesá.

Uvažovanie s vplyvom zmršťovania je bežnou súčasťou procesu navrhovania a pre tento proces by sa zmršťovanie malo odhadnúť. Ak je zmršťovanie obmedzované je pravdepodobné, že sa objavia trhliny. V predpäťom betóne ma zmršťovanie za následok stratu predpätia a v asymetricky vystuženom betóne to zvýši priehyb.

8.2 Ako sa zmršťovanie používa v EN 1992-1-1

Zmršťovanie sa uvažuje ako suma autogénneho zmršťovania a zmršťovania od vysychania.

8.2.1 Konečné autogénne zmršťovanie sa vypočíta z predpísanej charakteristickej valcovej pevnosti a je dané rovnicou:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6}$$

a v čase „t“ dní, autogénne zmršťovanie je:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \varepsilon_{ca}(\infty) \times (1 - \exp(-0,2t^{0,5}))$$

8.2.2 Nominálna hodnota neobmedzovaného zmršťovania od vysychania sa vypočíta s pomocou komplexnej rovnice v EN 1992-1-1, Príloha B so zohľadnením hodnôt v EN 1992-1-1, tabuľka 3.2. Údaje použité na zostavenie týchto rovníc sú veľmi staré a rovnice odrážajú starú technológiu betónu, kde napríklad nízky vodný súčiniteľ sa dosiahol použitím väčšieho množstva cementu a nie použitím prísad. Eurokód uvádza, že priemerné hodnoty uvedené v tabuľke majú súčiniteľ variácie 30%.

Výraz „neobmedzovaný“ znamená neobmedzovaný výstužou alebo susednými prierezmi betónu. Obmedzenie zmršťovania cementovej pasty spôsobené kamenivom je v tabuľke vzaté v úvahu. Tabuľka uvádza nominálne neobmedzované zmršťovanie od vysychania v rozsahu od 0,60 do 0,28% pri relatívnej vlhkosti 40%.

Nominálne zmršťovanie od vysychania závisí na veku, kedy je kvantifikácia požadovaná a na „imaginárnej veľkosti“. Čím je prierez hrubší tým je zmršťovanie od vysychania menšie v každom danom čase.

Postupy v EN 1992-1-1 sa zaoberajú rovnakým spôsobom všetkými betónmi rovnakého druhu, bez ohľadu na druh kameniva. V norme nie je uvedené uvedenie si faktu, že vysoké zmršťovanie od vysychania sa môže tiež objaviť, ak sa použije určitý druh kameniva.

8.3 Meranie zmršťovania

8.3.1 Skúšobné metódy

Každá skúška **zmrašťovania od vysychania** na betóne dá celkové zmrašťovanie od vysychania, t.j. kombinované zmrašťovanie cementovej pasty a kameniva, pokiaľ nie je obmedzované výstužou.

Skúšobná metóda podľa ASTM C157/C na meranie zmrašťovania od vysychania betónu používa tri 75 alebo 100mm hranoly (v závislosti na maximálnom zrne kameniva), ktoré sú okolo 285mm dlhé. Po jednom dni vo forme a krátkej dobe uloženia vo vode nasýtenej vápnom sa zmeria dĺžka vzorky. Potom je vzorka uložená vo vode nasýtenej vápnom počas ďalších 27 dní, kedy sa urobí druhé odčítanie dĺžky. Vzorky sú potom skladované v klimatizačnej komore pri teplote $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ a $50\pm 4\%$ relatívnej vlhkosti počas 64 týždňov a vykonávajú sa merania dĺžky v stanovených termínoch. Rýchlosť zmrašťovania od vysychania bude funkciou veľkosti vzoriek.

V sérii skúšobných noriem EN 12390 nie je žiadna európska skúška pre zmrašťovanie od vysychania, avšak vo vývoji je skúšobná metóda pre materiály na opravu (betónových konštrukcií). Táto metóda je definovaná v EN 12617-4 a používa hranoly o rozmeroch $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$, čo ju však robí nevhodnou pre väčšinu bežných betónov.

Začali sa práce na metóde ISO (ISO/WD 1920-X), ale táto je len v stave návrhu textu pre technickú komisiu a je založená na austrálskej skúšobnej metóde (AS 2350.13-1995).

Pretože zmrašťovanie od vysychania je spojené s hraničnou dobou použiteľnosti (konštrukcie), zloženia čerstvého betónu použité pre skúšanie tejto vlastnosti by malo byť také, aby sa dalo od neho očakávať, že dá cieľovú priemernú pevnosť betónu. Ak skúška zmrašťovania od vysychania používa relatívnu vlhkosť, je zaujímavé získané hodnoty pri krátkodobých skúškach vložiť do rovnice uvedenej v článku 3.9 v EN 1992-1-1: 2003 a vypočítať základné (neobmedzované výstužou) pomerné pretvorenie zo zmrašťovania od vysychania. Za predpokladu proporcionálnych zmien je tiež možné odhadnúť zmrašťovanie od vysychania pri inej relatívnej vlhkosti.

Zmrašťovanie od vysychania kameniva sa meria na betóne za použitia skúšky uvedenej v EN 1367-4. Vo Veľkej Británii, kde sa vyskytuje kamenivo s vysokým zmrašťovaním od vysychania, norma pre betón stanovuje limit pre zmrašťovanie od vysychania kameniva a to hodnotou 0,075%. Projektant môže zmierniť túto požiadavku, pričom sa očakáva, že bude brať v úvahu z toho vyplývajúce vyššie zmrašťovanie. Zmrašťovanie od vysychania získane touto skúškou by sa nemalo brať ako základné (neobmedzované výstužou) pomerné pretvorenie zo zmrašťovania od vysychania samotného betónu.

Neexistuje žiadna európska alebo medzinárodná norma pre meranie **autogénneho zmrašťovania**.

8.4 Zníženie zmrašťovania

8.4.1 Potenciálne **autogénne zmrašťovanie** bežného betónu je malé ($< 100 \mu$) a je len malý úžitok z pokusov chcieť ho ďalej znížiť. U vysoko pevnostného betónu vyrobeného s nízkym vodným súčiniteľom, hodnoty autogénneho zmrašťovania môžu prekročiť hodnoty zmrašťovania od vysychania. Pretože nízky vodný súčiniteľ a vysoký obsah cementu sú určené inými požiadavkami, existuje len malý priestor pre zníženie autogénneho zmrašťovania. Avšak ak môže byť znížený objem pasty, autogénne zmrašťovanie sa tiež zníži.

8.4.2 Zmrašťovanie od vysychania je spôsobené stratou vody z cementovej pasty a v niektorých prípadoch i z kameniva. Obsah kameniva a jeho vlastnosti sú preto dôležité:

- kamenivo obmedzuje zmrašťovanie cementovej pasty a tak, čím vyšší je objem kameniva (v betóne), tým nižšie je zmrašťovanie. Zvýšenie objemu kameniva zo 71 na 74% zníži zmrašťovanie od vysychania približne o 20% [9];
- čím je vyššia E-hodnota kameniva, tým je nižšie zmrašťovanie od vysychania;
- ak sa kamenivo tiež zmrašťuje, spôsobí to menšie obmedzovanie zmrašťovania cementovej pasty a zmrašťovanie od vysychania betónu bude vyššie. Tam, kde musí byť zmrašťovanie od vysychania minimalizované, malo by sa použiť kamenivo s nízkym zmrašťovaním od vysychania;
- zvýšenie maximálneho zrna kameniva by malo mať za následok nižší objem pasty a tým znížiť zmrašťovanie od vysychania, ale toto musí byť vyvážené oproti možnému nárastu krytia výstuže;
- použitie prísad za účelom dosiahnutia požadovaného vodného súčiniteľa a konzistencie bez zvýšenia obsahu cementu, zníži zmrašťovanie od vysychania [7];
- pri danom objeme kameniva, betón s vyšším vodným súčiniteľom bude mať vyššie zmrašťovanie od vysychania, ako betón s nízkym vodným súčiniteľom [7];
- Môžu sa tiež použiť špeciálne prísady na zníženie zmrašťovanie od vysychania.

9. TEPLTNÁ ROZŤAŽNOSŤ

9.1 Podklad

Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti betónu je mierou napätia vznikajúceho v betóne po rovnomernej zmene teploty, kde betón nie je obmedzovaný ani vnútorne tyčami výstuže ani nemá externé zdroje votknutia. Spravidla je vyjadrená v mikrónoch na stupeň C a je spravidla v rozpätí od 8 do 13 mikrónov / °C.

Pretože sa teplota betónu mení, tento sa rozťahuje alebo sťahuje ako reakcia na túto zmenu (teploty). Toto má v konštrukcii viaceré následky, počínajúc potrebou umožniť, aby spoje boli prispôbené na pohyb konštrukcie, až po potrebu vystuženia pre kontrolu šírky trhlín, ak teplotné zmršťovanie je obmedzované. Teplota stúpa vzhľadom na teplo uvoľňované pri hydratácii z cementu a prímiesí (pozri kapitolu 11). Následné sťahovanie pri ochladzovaní (betónu) môže viesť k vzniku trhlín od teploty v rannom veku betónu [4]. Ak má byť výsledná šírka trhlín kontrolovaná výstužou, požadované množstvo výstuže je priamo úmerné k súčiniteľu teplotnej rozťažnosti betónu. Zníženie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti vedie k úmernému zníženiu požadovaného množstva výstuže na kontrolu trhlín.

Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti nie je konštantný a mení sa s vekom (betónu) a obsahom vlhkosti. Polovične vyschnutý betón má mierne vyšší súčiniteľ teplotnej rozťažnosti ako betón nasýtený vodou [9].

9.2 Ako sa súčiniteľ teplotnej rozťažnosti používa v EN 1992-1-1

Eurokód uvádza, že pokiaľ nie je dostupná presnejšia informácia, hodnota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti sa môže uvažovať: 10 mikrónov / °C.

9.3 Meranie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti

V CEN, ISO alebo ASTM neexistuje **žiadna normová metóda** pre meranie teplotnej rozťažnosti. Existuje provizórna metóda pripravená Americkou dopravnou organizáciou – AASHTO (TP 60-00-2004), ktorá však vyžaduje zariadenie, ktoré nie je voľne dostupné. Používajú sa rôzne interné metódy (výskumných ústavov). Typicky by meracie body mali byť pripojené na betónovú vzorku, ktorá je uložená na valčekových ložiskách vo vodnej nádrži. Vzorka je ponechaná vo vode, pokiaľ sa teplota (vzorky a vody) nevyrovná a potom sa urobí sada meraní. Vzorka je potom ohrievaná povedzme na 80°C a udržiavaná pri tejto teplote pokiaľ sa táto teplota nedosiahne po celej jej výške (v celej vzorke). Odčíta sa druhá sada meraní a vypočíta sa súčiniteľ teplotnej rozťažnosti. Zloženia čerstvého betónu pre skúšku by malo byť také, aby sa dalo očakávať, že dosiahne cieľovú priemernú pevnosť v tlaku a že toto bude na strane bezpečnosti.

9.4 Zníženie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti

Pretože hlavný objem v betóne predstavuje kamenivo, použitie kameniva s nízkym súčiniteľom teplotnej rozťažnosti zníži súčiniteľ teplotnej rozťažnosti výsledného betónu.. Tabuľka 2 (z [4]) zobrazuje typické hodnoty.

Zníženie objemu pasty bude viesť k malému zníženiu súčiniteľa teplotnej rozťažnosti, táto zmena je však podstatne menšia ako zmena, ktorá sa dosiahne zmenou druhu kameniva.

Hrubé kamenivo/ skupina hornín	Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
	Hornina	Vodou nasýtený betón
rohovec alebo pazúrik	7,4 – 13,0	11,4 – 12,2
kremenec, kvarcit	7,0 – 13,2	11,7 – 14,6
pieskovec	4,3 – 12,1	9,2 – 13,3
mramor	2,2 – 16,0	4,4 – 7,4
kremitý vápenec	3,6 – 9,7	8,1 – 11,0
žula	1,8 – 11,9	8,1 – 10,3
diabas	4,5 – 8,5	priemer: 9,2
čadič	4,0 – 9,7	7,9 – 10,4
vápenec	1,8 – 11,7	4,3 – 10,3
glaciálny štrk (z ľadovcovej doby)		9,0 – 13,7
ľahké (hrubé a drobné)		5,6 – 6,7
ľahké kamenivo hrubé a drobné prírodné kamenivo		7,0 – 9,5

Tabuľka 2 Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti hrubého kameniva a betónu

10. POŽIARNA ODOLNOSŤ

10.1. Podklad

Betón je nehorľavý a nepodporuje šírenie plameňov. Ak je vystavený ohňu, netvorí žiaden dym, otravné plyny alebo emisie a neprispieva k požiarnej záťaži. Preto neprekvapuje, že Európska komisia dala betónu najvyššie možné požiarne označenie, menovite A1.

Betón prenáša teplo malou rýchlosťou, čo z neho robí účinné tienenie medzi jednotlivými miestnosťami a za typických podmienok požiaru, udrží si betón väčšinu svojej pevnosti.

Účinok ohňa na betón sa prejavuje **stratou pevnosti základnej hmoty a odlupovaním** povrchovej vrstvy betónu. Strata pevnosti betónu začína okolo 300°C, ale hlavné straty sa objavajú pri teplote 500°C a viac. Vzhľadom na pomalý prenos tepla v betóne, vysoké teploty sa spravidla obmedzujú na povrchovú zónu a tak prierez (konštrukčného prvku) si uchová väčšinu svojej pevnosti. Odlupovanie sa môže objaviť u väčšiny druhov betónov, ale jeho závažnosť závisí na druhu kameniva, kvalite betónu a obsahu vlhkosti. Niekedy sa môže prejavovať explozívne odlupovanie, spôsobené vodou meniacou sa na paru a zvyšujúcou tlak pary v póroch v betóne. S narastajúcou kvalitou betónu sa znižuje jeho schopnosť zmierňovať vytváranie tlaku pary a tak odlupovanie je viacej pravdepodobné v kvalitnom betóne. Dokonca aj keď sa objaví odlupovanie, celistvosť ostatného betónu je spravidla postačujúca.

10.2. Ako sa požiarou odolnosťou zaoberá EN 1992-1-1

Informácia o požiarnej odolnosti je uvedená v EN 1992 Časť 1-2, kapitola 3 a tiež v EN 1991-1-2: Účinky požiaru. V časti 1-2 sa robí rozdiel medzi kremičitým a vápencovým kamenivom, pričom druhé spomenuté má lepšie chovanie (odolnosť voči požiaru) pri danej teplote.

Norma EN 1992-1-2 uvádza tri metódy určenia postačujúcej požiarnej odolnosti. Sú to: tabuľkové údaje, zjednodušená výpočtová metóda a progresívna výpočtová metóda. Pre väčšinu budov sa použijú jednoduché tabuľky predpísaných osových vzdialeností. Osová vzdialenosť je vzdialenosť od povrchu betónu do stredu výstuže. V špeciálnych prípadoch sa môžu použiť požiaro-technické výpočtové metódy, pri ktorých sa vypočítava úroveň požiaru a požiarou odolnosť.

10.3. Ako sa meria požiarou odolnosť

CEN vyvinula súbor požiarnych skúšobných metód na zisťovanie odolnosti, neporušiteľnosti a izolačných schopností (konštrukčných) prvkov. Tieto metódy nemôžu byť použité pre skúšky na betónových vzorkách.

10.4. Zlepšenie požiarnej odolnosti betónu

Vo väčšine bežných prípadoch možno považovať betón za dostatočne požiarne odolný, a preto ďalej uvádzané zlepšenie vlastností nie je potrebné. Pre niekoľko extrémnych situácií sa môže požadovať zvýšenie požiarnej ochrany alebo odolnosti. Niektoré možné prístupy sú nasledovné:

- použitie vápencového kameniva namiesto kremičitého kameniva, akým je pazúrik;
- použitie betónu z ľahkého kameniva. Ak je tento suchý, jeho chovanie (požiarou odolnosť) počas ohňa je veľmi dobré, ale laboratórne skúšky ukazujú, že jeho chovanie je nedostačujúce, ak je nasýtený vodou v čase začiatku požiaru [10];
- hlinitanový cement má väčšiu odolnosť voči strate pevnosti oproti iným druhom cementu. Zatiaľ čo tento cement je široko používaný pre nekonštrukčné aplikácie, napr. žiaruvzdornú výmurovku, stále ešte pokračujú odborné diskusie o vhodnosti jeho použitia v konštrukciách, a preto je treba sledovať lokálne podmienky (použitia);
- vyhnutie sa použitiu vysoko pevnostného betónu, betónu s nízkou permeabilitou (priepustnosťou), ktorý je viacej náchylný k odlupovaniu. Avšak iné dôvody veľmi pravdepodobne prevážia nad dôvodmi z požiarnej odolnosti a je tu málo prakticky použiteľná možnosť na zníženie kvality betónu. Zvážiť by sa malo použitie polypropylénových vlákien – pozri nižšie uvedené;
- použitie polypropylénových vlákien sa ukázalo ako veľmi účinné pre zlepšenie požiarnej odolnosti. Predpokladá sa, že sa vlákna roztavia a absorbujú do cementovej

mriežky; dutiny po vláknach potom vytvoria expanzné komôrky pre paru, čím sa znižuje riziko odlupovania. Je tu však ešte stále potreba ďalšieho výskumu, aby sa potvrdil tento mechanizmus [10].

V skutočnosti pri projektovaní je bežný prístup zlepšiť požiarnu odolnosť určitého (konštrukčného) prvku skôr ako samotného betónu. Najrozšírenejší prístup je zvýšenie krytia výstuže. Toto môže byť urobené priamo zvýšením hrúbky betónového krytia (výstuže) alebo nepriamo použitím základnej omietky a sadrovej povrchovej úpravy. Tam kde by strata funkčnosti mohla mať vážne následky, nadbytočné vrstvy betónu boli pridané, tieto obsahujú sieťovinu z nerezu.

11. ADIABATICKÝ RAST TEPLÔT

11.1. Podklad

Pre kontrolu vzniku trhlin v rannom veku betónu, môže špecifikátor (projektant) určiť medznú hodnotu rýchlosti nárastu teploty v betóne. Aby sa tomu vyhovel, obecné sa vyžadujú určité počiatkové skúšky čerstvého betónu navrhovaného zloženia a/alebo skúšky vo veľkom – priamym odberom vzoriek pri betónovaní. Pretože skúšky vo veľkom sú drahé, odberateľ môže požadovať, aby výrobca betónu urobil určité počiatkové skúšky betónu a môže určiť maximálny adiabatický nárast teploty. V praxi nie sú dostupné adiabatické (t.j. kompletne izolované od vonkajších podmienok) skúšobné zariadenia a tak výrobca môže použiť len aproximáciu (priblíženie sa) k adiabatickému nárastu teploty.

11.2. Meranie približnej hodnoty adiabatického nárastu teploty

Navrhovaný betón je plnený do formy, ktorá má malú tepelnú hmotnosť, napr. tenkostenná plastická nádrž, izolovaná zo všetkých strán vrstvou expandovaného polystyrénu o hrúbke najmenej 100mm (čím je hrúbka väčšia, tým lepšie). Veľkosť skúšobnej vzorky by mala byť kocka s hranou najmenej 300mm. V strede vzorky je umiestnený termoelektrický článok a vývoj teploty v čase je zakreslený do diagramu. Teplota bude narastať počas niekoľkých dní, prípadne začne klesať, pretože toto nie je skutočné adiabatické zariadenie. Maximálna teplota sa môže považovať za technické priblíženie sa k adiabatickému nárastu teploty.

11.3. Zmenšovanie hodnoty adiabatického nárastu teploty

Hlavne cement vytvára teplo, s určitým príspevkom pridania prímies typu II, preto kľúčovou úlohou pri kontrole priebehu adiabatického nárastu teploty je zníženie obsahu cementu a použitie takých druhov cementov, ktoré obsahujú väčšie podiely sekundárnych hlavných zložiek cementu (t.j. všetkých prímies, nie slinku). Malo by sa uvažovať s použitím cementov s nízkym alebo veľmi nízkym hydratačným teplom. Ak je určujúcou vlastnosťou pri návrhu zloženia čerstvého betónu pevnosť, výrobcom sa doporučuje zmenšiť množstvo použitého portlandského cementu a použiť prísady na zníženie hodnoty w/c, aby sa tak dosiahla požadovaná pevnosť. Ak je pritom dosiahnutie požadovanej konzistencie problémom, má sa uprednostniť použitie jemných zložiek kameniva (fileru) pred zvýšením množstva cementu.

12. PRAKTICKÉ ASPEKTY DODÁVOK BETÓNU

Ak sa vyžaduje dodávka betónu, na ktorý sú špeciálne požiadavky na tieto technické vlastnosti, výrobcovia betónu sa môžu po prvý krát stretnúť s takými požiadavkami a tiež so špeciálnymi skúšobnými metódami. Rovnako aj projektanti/specifikátori a stavebné spoločnosti môžu mať veľmi malú skúsenosť s ich použitím alebo so stanovením požiadaviek,

a preto je pravdepodobné, že budú prenesené na dodávateľa betónu, a tak za týchto okolností vzťah výrobca – kupujúci je obzvlášť dôležitý. Výrobca by nemal podceňovať množstvo práce a času potrebného na dosiahnutie zhody s týmito špeciálnymi požiadavkami, toto musí objasniť aj kupujúcemu.

Výroba. Nakupujúci nemusí rozumieť obmedzeniam výroby transportbetónu. Nemusí napríklad rozumieť, že výrobca môže mať prevádzkové problémy pri výrobe betónu z kameniva, ktoré sa zvyčajne nenachádza na jeho skládke kameniva v betonárni, zvlášť ak ide o malé množstvá. Nemusí porozumieť určitým ťažkostiam (tiež riziku a zvýšeným nákladom) pri dodávkach malých množstiev veľmi špeciálneho betónu, dokonca aj vtedy, keď betón nemusí mať úplne novú receptúru.

Skúšanie. Z tohto dokumentu je jasné, že veľa skúšok, ktoré sú požadované, nie sú normovými skúškami. Požiadavky na skúšanie (a na interpretáciu výsledkov) by mali byť jasne určené a vopred odsúhlasené, tiež hranice možnosti jednotlivých skúšobných metód by mali byť vyjasnené kupujúcemu, ktorému nemusí byť známa variabilita skúšok alebo pojmy, akými sú (napr.) priemerná a charakteristická hodnota vlastnosti.

Obecne možno povedať, že výrobca by to mal považovať za príležitosť dostať sa k zákazníkovi, aby títo mali lepšie pochopenie technických schopností priemyslu, ale aj realitu výroby betónu.

13. ZISTENÁ POTREBA ĎALŠIEHO VÝSKUMU A VÝVOJA

V mnohých oblastiach neexistuje postup a skúšobná metóda na stanovenie základných hodnôt na základe skúšok. Preto sa vyžaduje ďalší výskum a vývoj na zabezpečenie skúšobných postupov a metód na meranie:

- súčiniteľa dotvarovania;
- konečného autogénneho zmršťovania;
- základného zmršťovania od vysychania;
- súčiniteľa teplotnej rozťažnosti.

Z obchodného hľadiska sa musí zväziť odskúšaniu možných prínosov z použitia predpísaných reálnych návrhových hodnôt, založených na skutočných materiáloch, predpokladaných pre ľubovoľný projekt, skôr než na „bezpečných“ európskych hodnotách.

14. NORMOVÉ METÓDY MERANIA FYZIKÁLNYCH VLASTNOSTI

Vlastnosť	Normové skúšky	Poznámky
Pevnosť v tlaku, valce, kocky	EN 12390-3	
Pevnosť v priečnom ťahu	EN 12390-6	
Pevnosť v ohybe	EN 12390-5	
Osová ťahová pevnosť	Žiadne normy	
Statický modul pružnosti (sečnicový modul)	EN norma pre skúšobnú metódu sa vyvíja	

Vlastnosť	Normové skúšky	Poznámky
Dynamický modul pružnosti (= počiatočný dotýčnicový modul)	EN 12504-4 BS1881-209.	Táto EN pre určenie rýchlosti ultrazvukového impulzu (RUI) nepopisuje prepočet (RUI) na počiatočný dotýčnicový modul. Tento postup môže byť uvedený v národných prílohách. Postup pre meranie dynamického modulu pružnosti (\approx počiatočný dotýčnicový modul)
Dotvarovanie	Žiadna EN norma ASTM C 512-02 ISO/WD 1920-Y	Meranie celkového dotvarovania + dotvarovanie vysychaním Meranie dotvarovania v tlaku
Zmrašťovanie od vysychania betónu	Žiadna EN norma ASTM C 157/C ISO/WD 1920-X	
Zmrašťovanie od vysychania kameniva	EN 1367-4	Hoci je merané na betóne, <i>nemeria</i> základné (neobmedzované výstužou) deformácie od vysychania betónu.
Autogénne zmrašťovanie	Žiadna norma	
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti	Žiadna norma	

LITERATÚRA

Európske a iné národné normy

- EN 1992-1 Eurokód 2: Navrhovanie betónových konštrukcií
Časť 1-2 – Obecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby
Časť 1-2 – Obecné pravidlá -
- EN 197-1 Cement. Časť 1: Zloženie, špecifikácie a kritéria pre preukazovanie zhody cementov na všeobecné použitie
- EN 206-1 Betón: Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda
- EN 12390-3 Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 3:
- EN 12390-5 Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 5:
- EN 12390-6 Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 6:
- EN 12504-4 Skúšanie betónu. Časť 4: Určenie rýchlosti ultrazvukového impulzu
- EN 12617-4 Výrobky a systémy na ochranu a pre opravy betónových konštrukcií – Skúšobné metódy – Časť 4: Stanovenie zmrašťovania a expanzie.
- prEN 13584-2 Výrobky a systémy na ochranu a pre opravy betónových konštrukcií – Skúšobné metódy – Časť 2: Stanovenie dotvarovania.
- ENV 13670 Zhotovovanie betónových konštrukcií
- EN 13791 Posúdenie pevnosti betónu v tlaku na konštrukciách alebo betónových prefabrikátoch.

- BS EN 1367-4 Stanovenie zmrašťovania od vysychania. (Poznámka: pre kamenivo)
- BS 1881-203 Doporučenia pre meranie rýchlosti ultrazvukového impulzu v betóne.
- BS 1881-209 Doporučenia pre meranie dynamického modulu pružnosti.

ASTM C 157/C Normová skúšobná metóda pre meranie dĺžkových zmien tvrdnúcej hydraulikkej cementovej malty a betónu.

ASTM C 512-02 Normová skúšobná metóda pre meranie dotvarovania betónu v tlaku. Americká organizácia pre dopravu, AASHTO, TP 60-00 (2004). Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti betónu z hydraulického cementu.

AS 2350.13-1995: Metódy skúšania portlandského a zmesných cementov – Stanovenie zmršťovania od vysychania mált z portlandského a zmesných cementov.

Medzinárodné normy

ISO/WD 1920-X Skúšky betónu. Časť X: Stanovenie zmršťovania od vysychania v betóne na vzorkách pripravených na stavenisku alebo v laboratóriu

ISO/WD 1920-X Skúšky betónu. Časť Y: Stanovenie dotvarovania betónových valcov vystavených tlaku

INÁ LITERATÚRA

1. GILBERT, R.I.: Návrhové vlastnosti materiálov – zmeny navrhované pre AS3600.
2. BEEBY, A.: Prečo potrebujeme duktilitu (tvárnosť) v železobetónových konštrukciách? Concrete, máj 2004, zv.38, č.5, str. 27-29.
3. HARRISON, T.A.: Debnenie skracujúce čas – kritéria, predpoklady a metódy hodnotenia. CIRIA správa č.136, 1995 ISBN 0 86017 431 X
4. HARRISON, T.A.: Kontrola vzniku trhlin od tepla v rannom veku betónu. CIRIA správa č.91, revidované vydanie 1992 ISBN 0 86017 329
5. SHERIF, T.: Kontrola transportbetónu za použitia nepriamej ťahovej skúšky – hodnotenie DoE požiadaviek. Institute of Concrete Technology, Projekt progresívnej technológie betónu, 1972
6. RYLE, R.: Vplyv skúšobných zariadení na pevnosť v priečnom ťahu. RMC technická správa č.77, september 1973.
7. DHIR, R.K., TITTLE, P.A.J. a McCARTHY, M.J.: Úloha množstva cementu pri určovaní trvanlivosti betónu. Univerzita v Dundee, zmluva pre BSI (BSI výskumná zmluva č.33/3/16 (CC 1629)), máj 2001.
8. GILBERT, R.I.: Vplyvy času v betónových konštrukciách. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1988.
9. BROOKS, J.: Pružnosť, zmršťovanie, dotvarovanie a teplotné pohyby. Advanced Concrete Technology – Vlastnosti betónu, vydané Johnom Newmanom a Ban Seng Choo, ISBN 0 7506 5104 0, 2003.
10. CATHER, R.: Betón a požiarne zaťaženie. Advanced Concrete Technology – Vlastnosti betónu, vydané Johnom Newmanom a Ban Seng Choo, ISBN 0 7506 5104 0, 2003.