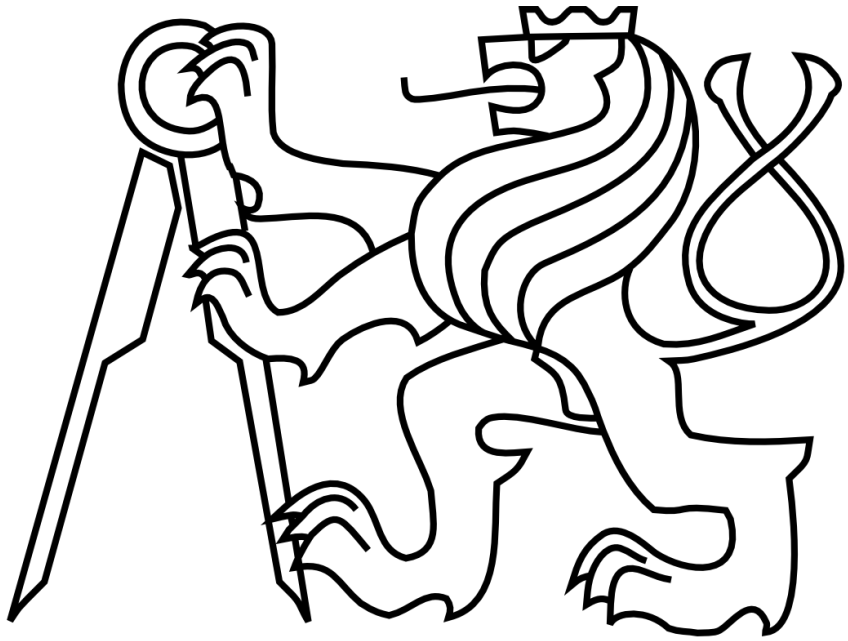
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební



Betonáž za nízkých teplot

Michael Nedvěd, Pavel Vrba, Marek Chmiel

Obsah

Úvod - motivace [3,4]

Význam okolní teploty při betonáži [6]
- Vliv teploty na vývoj pevnosti
- Vliv teploty na organizaci stavby

Vývoj teploty v závislosti na velikosti prvku [3]
- Vstupní hodnoty pro opatření

Opatření při betonáži [2,3,7]
- Zajištění teploty čerstvého betonu při výrobě a jeho dopravě:
- Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí - z hlediska složení betonu:
- Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí v bednění - pasivní:
- Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí v bednění - aktivní:

Podrobnější popis jednotlivých opatření [3]
- Rychlovazné cementy
- Přísady do betonu
- Ochrana konstrukce izolací
- Zaplachtování
- Elekotroohřev

Zmrznutí betonu po uložení do bednění [1,3]
- Uložení betonu bez opatření v teplotách hluboko pod bodem mrazu
- Uložení betonu, jeho následné zmrznutí, tlaková pevnost se nedostatečně vyvine
- Uložení betonu, jeho následné zmrznutí, tlaková pevnost se dostatečně vyvine

Teoretické možnosti hydratace [3]

Závěr

Zdroje

Úvod - motivace *[3,4]*

Pro naší seminární práci jsme si vybrali zajímavé téma betonáže za nízkých teplot. Vzhledem k tomu, že norma ČSN EN 206 v podstatě vůbec nedefinuje opatření při takovéto betonáži se budeme v práci zabývat hlavně normou americkou, konkrétně ACI 306R-10 - Guide to Cold Weather Concreting. Ostatní použité publikace v této oblasti čerpají z velké části z tohoto dokumentu.

Betonáž za nízkých teplot tedy nastane když 3 po sobě jdoucí dny nedosáhne průměrná teplota 5°C a zároveň posledních 12 hodin teplota vzduchu nedosáhla 10°C.

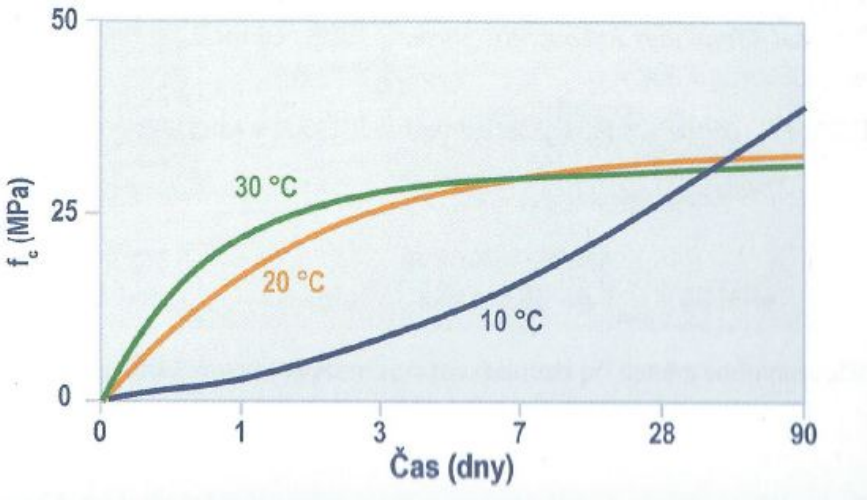
Význam okolní teploty při betonáži *[6]*

Teplota hraje velmi důležitou roli ve vývoji pevnosti betonu. Obzvlášť v počátečních stádiích a v chování betonu při jeho používání. Zásadní vliv má teplota především na:

- vývoj materiálových charakteristik;
- vliv na uspořádání a plánování stavebních prací;
- tepelné ošetřování při betonáži.

Vliv teploty na vývoj pevnosti

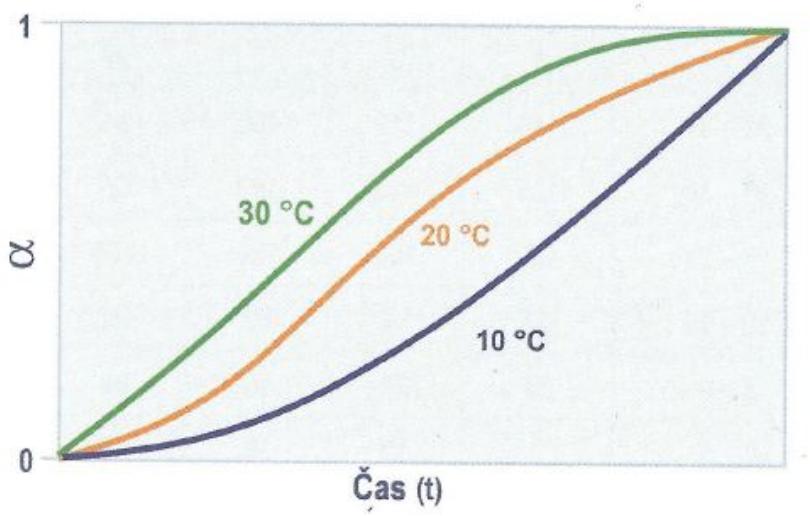
V praxi je beton míchán, ukládán a ošetřován při různých teplotách. Proto je velmi důležité znát vztah mezi normovou pevností při teplotě 20°C a pevnostmi, stanovenými při aktuálních teplotách. Tato skutečnost následně pomůže stanovit reálnou pevnost betonové konstrukce při jakékoli okolní teplotě.



Obr. č.1 - Vliv teploty na vývoj pevnosti, [6]

Graf popisuje vývin pevnosti betonu v tlaku při rozdílných okolních teplotách (10, 20 a 30°C). Ze schémata je patrné, že pevnost v tlaku se v počátečních fázích zvyšuje s teplotou při které je konstrukce realizována. Naopak tomu je s dlouhodobými pevnostmi, kdy při stáří betonu nad 28 dní je pozitivně ovlivněno nižšími teplotami okolí.

Nízké teploty v zimním období způsobují snížení pevnosti v počátečních stádiích. To je dáno obecnými chemickými pravidly, tedy pravidlem, že se snižující se teplotou klesá i rychlost reakce. Klesá tedy i rychlost hydratace cementového tmelu a v souvislosti s tím dochází i k nižšímu nárůstu charakteristik betonu. V pozdějším období platí nerovnost – čím nižší teplota okolí, tím vyšší pevnost. Tato skutečnost je dána dvěma parametry spojené s charakteristikou C-S-H gelu. Obsah vláken C-S-H gelu roste v závislosti na stupni hydratace /alfa/ (tedy s rostoucí teplotou okolí). Zároveň platí, že houževnatost vláken C-S-H gelu závisí na teplotě.



Obr. č.2 - Vliv teploty na stupeň hydratace, [6]

V časných stádiích zrání vzrůstá pevnost v daném čase díky zvyšování teploty. Je to způsobeno tím, že při vyšších teplotách je vyšší rovněž stupeň hydratace a tím vzrůstá obsah vláken C-S-H gelu. Na druhou stranu v pozdějším období je převažujícím faktorem nad kvantitou vláken jejich kvalita. Kvalita vláken je příznivě ovlivněna nižšími teplotami, tedy spíše pomalejším nárůstem vláken C-S-H gelu při nižších teplotách. Při pomalejším nárůstu jsou vlákna větší a kvalitnější.

Tyto poznatky vedly ke stanovení doby měření charakteristické pevnosti betonu na 28 dní. Patrné je tak z prvního grafu, kdy ve 28 dnech se vyrovnává vliv kvality a kvantity vláken C-S-H gelu čímž dochází k minimalizaci vlivu teploty na měřený prvek.

Informace o nárůstu materiálových charakteristik v závislosti na čase a teplotě, které popisuje přiložená tabulka je užitečné znát. Například na staveništi, pro stanovení dostatečné pevnosti betonu pro odformování nebo vnesení předpětí.

Tab. č.1 - Tabulka vlivu teploty na vývoj pevnosti v betonu, [6]

TEPLOTA (°C)	PEVNOST (%) V ČASE (dní):				
	1	3	7	28	90
31 - 37	140	115	100	95	90
24 - 30	125	110	100	95	95
17 - 23	100	100	100	100	100
10 - 16	35	35	80	100	120
6 - 9	15	25	50	90	110
0 - 5*	0	10	30	40	50

Vliv teploty na organizaci stavby

Aby se předešlo určitým úskalím spojeným s betonáží na stavbě, je vhodné proces výstavby vhodně rozvrhnout a dodržovat pravidla pro dané období. V zimním období dochází k problémům s nárůstem počáteční pevnosti betonovaného prvku.

Dochází tak k prodlužování doby výstavby jednotlivých fází a zároveň může dojít k ovlivnění trvanlivosti konstrukce. V chladných obdobích je tedy vhodné dodržet následující pravidla:

- betonáž by neměla být prováděna v pozdních odpoledních hodinách, po nichž v noci přijde ještě větší pokles teplot;
- složky betonu, zvláště pak kamenivo, by neměly být vystaveny přímým nízkým teplotám nebo promrznutí;
- pro betonáž za chladných podmínek je vhodnější použití cementu CEM I 32,5R nebo CEM I 42,5R, než CEM I 32,5N;
- použitá voda, by měla být předehřátá a měla by být přidávána ke kamenivu ještě před vmícháním cementu;
- měly by být použity bezchloridové urychlovače tvrdnutí;
- použité plastifikátory by měly počáteční hydrataci spíše urychlovat;
- konečný povrch betonovaného prvku by měl být chráněn tepelně izolačními materiály, aby byl zpomalen únik tepla generovaného při hydrataci cementu a aby mohla být udržena zvýšená teplota betonu oproti okolní teplotě (což má pozitivní vliv na šíření trhlin).

V případech kdy se okolní teplota pohybuje blízko 0°C, je možné očekávat náhlé mrazíky. V takovém případě hrozí riziko nevratného poškození mladého betonu (pevnost betonu $f_c < 5$ MPa). Je proto vhodnější nechat betonáž až na příhodnější teplotní podmínky.

Naopak v letních měsících je hlavním problémem ztráta zpracovatelnosti čerstvého betonu, způsobená rychlejším procesem hydratace při vyšší teplotě. Aby se tomuto jevu předešlo, je možné část záměsové vody nahradit drceným ledem, nebo použít přísady zpomalující hydrataci cementu.

Vývoj teploty v závislosti na velikosti prvku *[3]*

Tab. č.2 - vliv rozměru prvku na minimální teplotu betonu, [3]

Teplota vzduchu		Nejmenší rozměr prvku [mm]			
		<300	300-900	900-1800	>1800
		Minimální teplota betonu při ukládání			
		13	10	7	5
		Minimální teplota betonu při přepravě			
nad -1	[°C]	16	13	10	7
-18 až -1	[°C]	18	16	12	10
pod -18	[°C]	21	18	16	13
		Maximální přípustný pokles teploty za 24h po ukončení ochrany			
		28	22	17	11

Tabulka ukazuje, že minimální teplota je funkcí velikosti průřezu betonového prvku, protože tepelné ztráty jsou pro menší části mnohem vyšší (tenčí prvek rychleji promrzne). Tato minimální teplota se pohybuje od 5 ° C (pro části větší než 180 cm) do 13 ° C (pro části menší než 30 cm). Na pracovišti je tato teplota obvykle zajištěna dočasně vyhřívanými skříněmi umístěnými nad bedněním. Je však třeba dbát na to, aby topná tělesa nepřispěla k rychlému vysoušení betonu. Vzhledem k tomu, že hydratační teplo v betonovém prvku se rozvíjí především během prvních tří dnů, není teplo z vnějších zdrojů vždy nutné, jestliže teplo uvolněné hydratací může být vhodně konzervováno. Toho lze dosáhnout vložením izolačních přikrývek na neformované povrchy a použitím izolačních forem. Polystyren, uretanová pěna, pěnový vinyl, minerální vlna a celulózová vlákna jsou materiály běžně používané při výrobě izolačních přikrývek. Sláma je stále populární, i když není tak účinná jako deky.

Vstupní hodnoty pro opatření

- intenzita mrazu
- teplotní rozdíly den/noc , oslunění/stín
- intenzita větru
- intenzita deště / sněžení
- tvar a objem betonované konstrukce
- kombinace uvedených vlivů

Opatření při betonáži *[2,3,7]*

Zajištění optimální teploty betonu při jeho ukládání, jeho ochrany po dobu, než nabude potřebnou pevnost a tím i odolnost vůči mrazu lze dosáhnout několika způsoby (častěji však kombinací několika z nich).

Zajištění teploty čerstvého betonu při výrobě a jeho dopravě:

- ohřevem záměsové vody,
- ohřevem kameniva
- ohřev cementu

Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí - z hlediska složení betonu:

použít betony s vyšším vývinem hydratačního tepla, tzn.:

- dát přednost cementům s vyšším obsahem slínku (CEM I, CEM II/A-B)
- použít cementy s rychlým náběhem počátečních pevností (označují se písmenem "R"),
- použít přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu.
- provzdušňovací přísady

Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí v bednění - pasivní:

- zakrytí konstrukce (fólií, deskami apod.).

Zajištění teploty betonu při tuhnutí a tvrdnutí v bednění - aktivní:

- zaplachtování části konstrukce nebo objektu a foukání horkého vzduchu pod plachty,
- elektroohřev betonu uloženého v bednění.

Podrobnější popis jednotlivých opatření *[3]*

Rychlovazné cementy

Cementy s označením “R“ mají zvýšený nárůst hydratačního tepla, díky kterému je konstrukce ohřívána zevnitř. (32,5 R; 42,5 R;52,5 R)

Přísady do betonu

Urychlující přísady - zrychluje nárůst pevnosti

Superplastifikátory - snížení vodního součinitele (w/c), rychlejší náběh počátečních pevností betonu

Zimní přísady - nižší množství alkálií ovlivňuje alkalicko-křemičitou reakci a vznik trhlin, které mohou tímto vznikat.

Tab č.3 - množství použití zimní přísady pro jednotlivé teploty, [3,7]

Dávkování/Teplota	+5°C	0°C	-5°C	-10°C
Litrů (kg) na 50 kg cementu	0,32 (0,4kg)	0,55 (0,7kg)	0,77 (0,95kg)	1 (1,25kg)
Litrů v 1m^3 betonu (350 kg cementu)	2,24	3,85	5,39	7

Ochrana konstrukce izolací

Cílem je ochránit konstrukci proti vysokým ztrátám tepla, které by mohly nastat. Ochrana pomocí izolačních přikrývek (polystyren, minerální vata, geotextilie,.....).

Zaplachtování

Zakrytí konstrukce (objektu) plachtou a foukání horkého vzduchu pod plachtu.

Elekotroohřev

Ohřev betonu se provádí pomocí izolovaného topného drátu o průměru D = 3 mm, který je napájený bezpečným napětím (např. 3 x 42 V) z transformátoru o výkonu 2,5 kVA, 4 kVA, 5 kVA nebo 6,3 kVA zapojeného na napájecí síť 3 x 400 V. Izolovaný drát zůstane ztracený v konstrukci.

Zmrznutí betonu po uložení do bednění *[1,3]*

V praxi nastávají 3 situace:

1. Uložení betonu bez opatření v teplotách hluboko pod bodem mrazu

Při této situaci beton po uložení zamrzne ještě předtím než započne proces hydratace. Vazby mezi částečkami cementu ideálně vůbec neexistují. Jedinou komplikací zůstává nutnost převibrování směsi po rozmrznutí, která nastává z důvodu změny objemu záměsové vody při zmrznutí a následnému utvoření velkého množství pórů.

2. Uložení betonu, jeho následné zmrznutí, tlaková pevnost se nedostatečně vyvine

Nejnepříznivější pro beton, vazby C-S-H gelu se potrhají natolik že už se znovu nedokáží obnovit. Jediná možnost jak problém vyřešit je beton vybourat a prvek vybetonovat znovu.

3. Uložení betonu, jeho následné zmrznutí, tlaková pevnost se dostatečně vyvine

Beton dosáhne dostatečné pevnosti, která je pro 1 cyklové zatížení mrazem stanovena podle experimentů na 500psi (cca 3,5MPa). Pro vícecyklovou odolnost je minimální pevnost stanovena na 1500 psi (cca 10,3 Mpa).

Tab č.4 - potřebná doba zrání betonu pro dosažení 1 cyklové odolnosti, [3]

Tabulka - 1 cyklová odolnost v závislosti na čase [hod], w/c a teplotě					
	w/c	5°C	10°C	15°C	20°C
Portlandský cement - běžný	**0,4**	35	25	15	12
	0,5	50	35	25	17
	0,6	70	45	35	25
Rychlovazný cement	**0,4**	20	15	10	7
	0,5	30	20	15	10
	0,6	40	30	20	15

V tabulce (Tab. č.4) je uvedena experimentálně určená doba, po které již odpovídající beton v odpovídajícím prostředí dokáže odolat 1 cyklu zmrznutí a rozmrznutí. Z tabulky je zřejmý požadavek na co nejmenší vodní součinitel a co nejrychlejší náběh pevnosti použitého cementu.

Teoretické možnosti hydratace *[3]*

Hydratace může laboratorně probíhat až do teploty -10°C. Limitem se stává bod tání vody 0°C. Co se ale stane když voda v betonu zmrzne? U betonu, který ještě nenabyl potřebné pevnosti je jev podobný nasyceným půdám, u kterých vlivem zmrznutí obsažené vody dojde k efektu “zdvihu” vlivem rozdílného objemu vody a ledu o asi 10%. Zmrznutí vody se tedy snažíme za každou cenu zabránit a to zejména v době kdy beton nemá dostatečnou pevnost (3,5 MPa).

Nejdůležitějším faktorem se ukázal být charakter mrazu. Nejnepříznivější varianta se pro beton ukázal být cyklický mráz, který dokáže poškodit i beton ošetřovaný po 24 hodin ve 20°C. Naopak zkoušky prokázali, že neexistuje žádná spojitost mezi odolností vůči mrazu mladého betonu a konečnou pevností toho samého betonu.

Neošetřený prvek vybetonovaný v chladném prostředí, znehodnocený beton, [5]

Závěr

Po zhodnocení všech rizik a nutných opatření při betonáži za nízkých teplot je zřejmé že nejlepším opatřením je se betonáži vyhnout. Pokud je situace taková, že není jiná možnost, případně je to z finančního hlediska stále výhodné je vhodné přistoupit již ve fázi projektu k co nejvyššímu užití prefabrikátů a celkovému omezení mokrého procesu na stavbě. Velký vliv mají také rozměry prvku, kdy prvky velmi vylehčené (obecně prvky s velkým podílem plocha/objem) není téměř možné v zimě vybetonovat bez komplikací, či extrémně vysokých nákladů na ošetřování. Je proto vhodné již ve fázi příprav uvažovat betonáž za nízkých teplot.

Pokud okolnosti nedovolí jinak, je nutná komunikace investora, projektanta a zhotovitele ohledně postupu při betonáži, nutnosti použití speciálních opatření a dalších finančních nákladů spojených s betonáží. Norma ČSN překvapivě nestanovuje žádné konkrétní požadavky, proto je vhodné se po spolehlivém řešení porozhlédnout v zahraničí, zejména pak v USA.

Zdroje

[1] NEVILLE, Adam M. *Properties of concrete*. 5th ed. New York: Pearson, 2011. ISBN 978-0273755807.

[2] M. PIGEON AND R. PLEAU. *Durability of Concrete in Cold Climates*. Hoboken, 1995. ISBN 978-020-3860-786.

[3] REPORTED BY ACI COMMITTEE 306. *Guide to cold weather concreting*. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute, 2010. ISBN 978-087-0313-974.

[4] ČSN EN 206 (732403) *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* ÚNMZ, 20

[5] *A Question For The Cold Weather Concrete Guys* [online]. 2006 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.contractortalk.com/f48/question-cold-weather-concrete-guys-73273/

[6] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

[7] *EBeton: Specialista na beton* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.ebeton.cz