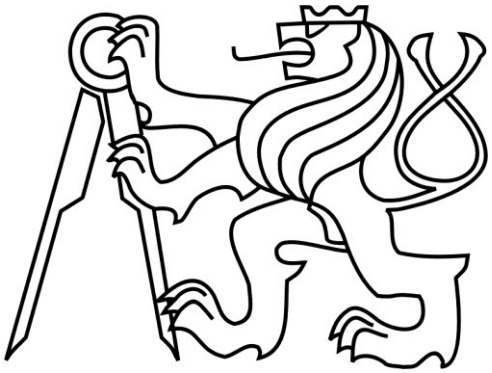
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



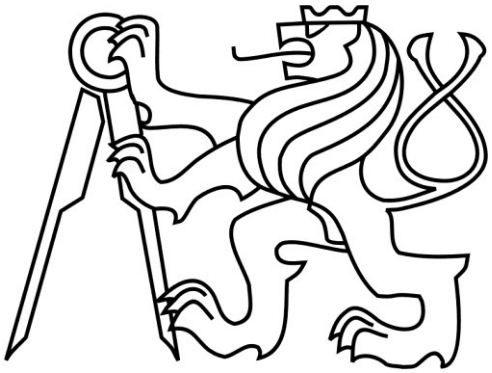
Diplomová práce

Zimní semestr 2018/2019 **Bc. Barbora Holíková**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Diplomová práce

Analýza metod urychlujících nárůst tlakové pevnosti

Analysis of methods for acceleration of compressive strength development

Vedoucí práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Zimní semestr 2018/2019

Bc. Barbora Holíková

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Holíková Jméno: Barbora Osobní číslo: 424467

Zadávající katedra: K133 Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: SI

Studijní obor: NC

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza metod urychlujících nárůst tlakové pevnosti

Název diplomové práce anglicky: Analysis of methods for acceleration of compressive strength development

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte rešerši k tématu urychlení nárůstu tlakové pevnosti:
- Popis běžně používané způsoby jak urychlit nárůst tlakové pevnosti a metody zhodnoťte.
- Posuďte ekonomickou nákladnost jednotlivých metod.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:
- Vyrobte sérii krychlích, které ošetřujte ve vodním prostředí s teplotou 10, 30, 50 a 80 stupňů Celsia. Pro každou sérii vyhodnoťte rychlost nárůstu pevnosti v čase.
- Porovnejte změnu tlakové pevnosti během jejího nárůstu a konečné hodnoty po 28 dnech.
- Zhodnoťte vhodnot teplotního ošetřování pro zvýšení tlakové pevnosti.

Seznam doporučené literatury:
Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000
Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005
Collepardi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 19.9.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

19.9.2018
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržení etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných pracích."

podpis

……. …….

Místo zpracování, celé datum jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat celé své rodině za podporu a pomoc při studiu. Dále bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za odborné vedení a rady při zpracování této diplomové práce. Také bych chtěla poděkovat Ing. Karlu Šepsovi Ph.D., Ing. Romanu Chylíkovi, Ing. Tomáši Trtíkovi za pomoc při práci v laboratořích.

ANOTACE

Tato práce se zabývá urychlením nárůstu počáteční pevnosti betonu. Cílem je zjistit, jaký vliv má použití proteplování na dlouhodobé vlastnosti betonu, především na tlakovou pevnost. Nárůst pevnosti při teplotách 10, 50 a 80 °C byl porovnáván s referenčními vzorky, které byly ošetřovány při teplotě 30 °C. Pevnosti byly zkoušeny na krychlích o rozměrech 100x100x100 mm při stáří vzorků 1, 3, 7, 14 a 28 dní. Použití teploty proteplování 50 °C se jeví jako vhodné, bylo by ovšem třeba porovnávat vlastnosti z dlouhodobého hlediska, ne pouze po dobu 28 dní. Při ekonomickém porovnání vstupních nákladů je proteplování jednoznačně nejméně výhodná varianta urychlování nárůstu počáteční pevnosti betonu. Pro lépe vypovídající zhodnocení ekonomické náročnosti by bylo třeba porovnat náklady ze všech hledisek, ne pouze výrobní náklady.

ANNOTATION

This work deals with the acceleration of compressive strength development. The aim of the thesis is to determine the effect of heat treatment on long-term mechanical properties of concrete, especially on compressive strength. The strength increase at 10, 50 and 80 °C was compared with the reference samples treated at 30 °C. The strength was tested on 100x100x100 mm cubes 1, 3, 7, 14 and 28 days old. The use of 50 °C curing temperature seems to be appropriate but it is necessary to compare the properties in a longer period. When comparing input costs, the heat treatment is clearly the least advantageous option as far as acceleration of the initial strength of concrete is concerned. To get more accurate assessment of economic performance, it should be necessary to compare the costs from all aspects, not just the costs of production.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, nárůst počáteční pevnosti, rychlovazný cement, urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, proteplování

KEY WORDS

Concrete, early-age strength development, rapid-hardening cement, setting and hardening accelerator, heat curing, heat treatment

OBSAH

1. ÚVOD 9

2. URYCHLOVÁNÍ TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ 12

2.1. Průběh hydratace cementu 12

2.2. Rychlovazný cement 15

2.3. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí 16

2.3.1. Urychlovače na bázi chloridu vápenatého 17

2.3.2. Urychlovače na bázi dusičnanů 17

2.3.3. Urychlovače na bázi dusitanů 18

2.3.4. Urychlovače na bázi thiokyanatanů 18

2.3.5. Urychlovače na bázi uhličitanů alkalických kovů 18

2.3.6. Urychlovače na bázi solí karboxylových kyselin 18

2.3.7. Urychlovače na bázi křemičitanů 18

2.3.8. Urychlovače na bázi hlinitanů 19

2.3.9. Urychlovače na bázi síranů 19

2.3.10. Přísada X-SEED 19

2.4. Zvýšená teplota 20

2.4.1. Proteplování betonu 23

2.4.2. Opožděná tvorba ettringitu (DEF) 27

2.4.3. Vnitřní ošetřování 30

2.4.4. Proteplování UHPC 32

2.4.5. Propařování 32

3. VÝROBA VZORKŮ 35

3.1. Úvod 35

3.2. Betonáž 35

3.3. Ošetřování 36

4. ZKOUŠENÍ 39
4.1. Krychelná pevnost v tlaku 39
4.2. Pevnost v příčném tahu 42
5. VYHODNOCENÍ 45
5.1. Nárůst pevnosti 45
5.2. Porovnání pevností 47
6. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 54
7. ZÁVĚR 58
ZDROJE 60

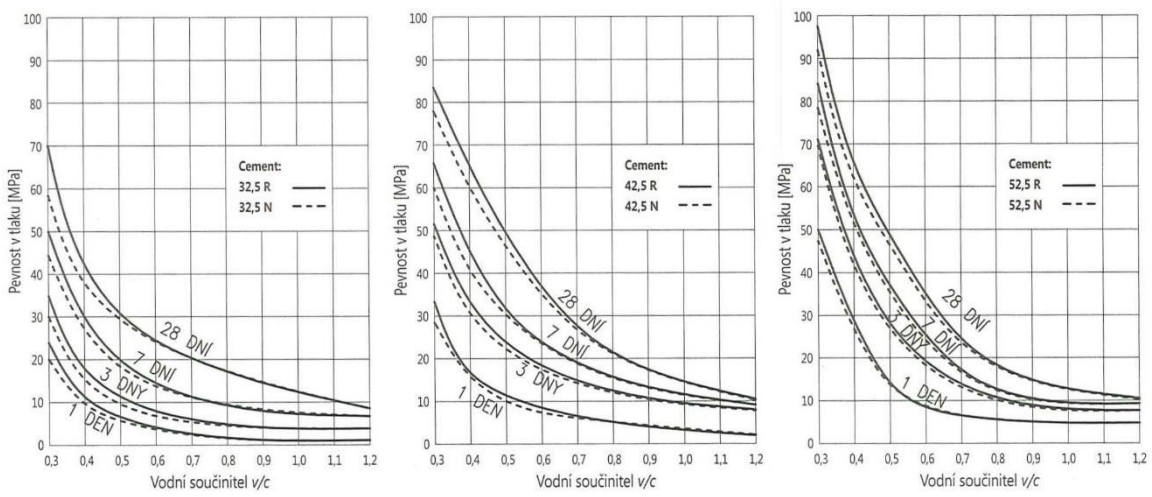
1. ÚVOD

Dnešní doba je charakteristická urychlováním výstavby. U betonových konstrukcí to vede ke zkrácení technologické přestávky a dřívějšímu odbedňování. Také pro výrobce prefabrikátů je vývoj počáteční pevnosti klíčový. Otázkou tedy je, jaká je nejvhodnější metoda pro urychlení nárůstu pevnosti, aby byla zachována kvalita a stavba se příliš neprodražila.

Urychlování tvrdnutí betonu má tudíž zajistit v krátkém časovém intervalu potřebnou pevnost pro manipulaci s prefabrikovanými dílci a možnost opětovného použití formy, případně dřívější možnost odbednění při betonáži na stavbě. Také je využíváno při opravách betonových konstrukcí, nebo ve speciálních případech jako je například torkret beton. Při betonáži za nízkých teplot je výhodný urychlený nárůst hydratačního tepla, kterým je urychlené tvrdnutí doprovázeno.

Urychlené tvrdnutí betonu lze docílit některým z těchto opatření:

- zvýšením teploty
- chemickými přísadami – urychlovači tvrdnutí
- složením betonu a jeho zpracováním (druh a dávka cementu, hodnota vodního součinitele, poměr složek)
- tepelnou izolací ocelových forem a přikrytím povrchu betonu izolační fólií
- použitím cementů s označením R



Obr. 1 vliv vodního součinitele na průměrnou pevnost betonu v tlaku při použití různých cementů [1]

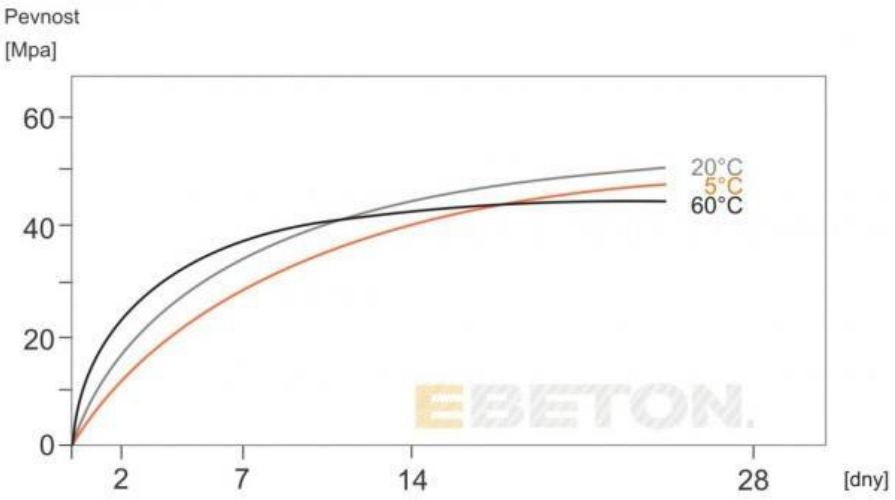
V předchozích grafech (Obr. 1) je znázorněn vliv druhu použitého cementu a vodního součinitele na krychelnou tlakovou pevnost betonu. Tyto grafy vychází z Powersovy teorie, která vyjadřuje danou pevnost jako funkci vodního součinitele a stupně hydratace. Teorie je odvozena z předpokladu dokonale zhutněného betonu a ze vztahu mezi pórovitostí a pevností zatvrdlé cementové pasty.

Každá metoda ovlivňuje nárůst pevnosti jinak, průběh nárůst pevnosti betonu je tedy rozdílný. Nárůst pevnosti je charakterizován pevnostním součinitelem, který je vyjádřen poměrem průměrné pevnosti v tlaku po 2 dnech ($f_{cm,2}$) k průměrné pevnosti v tlaku po 28 dnech ($f_{cm,28}$). Pevnostní součinitel porovnává průběh nárůstu pevnosti (viz Tab. 1). [2]

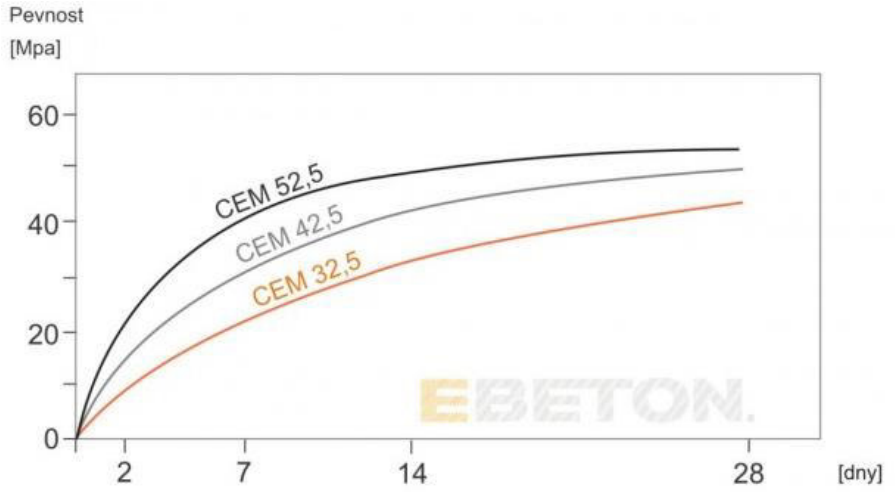
Tab. 1 průběh nárůstu pevnosti betonu při 20 °C [2]

průběh nárůstu pevnosti	předpokládaný pevnostní součinitel
rychlý	$f_{cm,2}/f_{cm,28} \geq 0,5$
střední	$0,5 > f_{cm,2}/f_{cm,28} \geq 0,3$
pomalý	$0,3 > f_{cm,2}/f_{cm,28} \geq 0,15$
velmi pomalý	$f_{cm,2}/f_{cm,28} < 0,15$

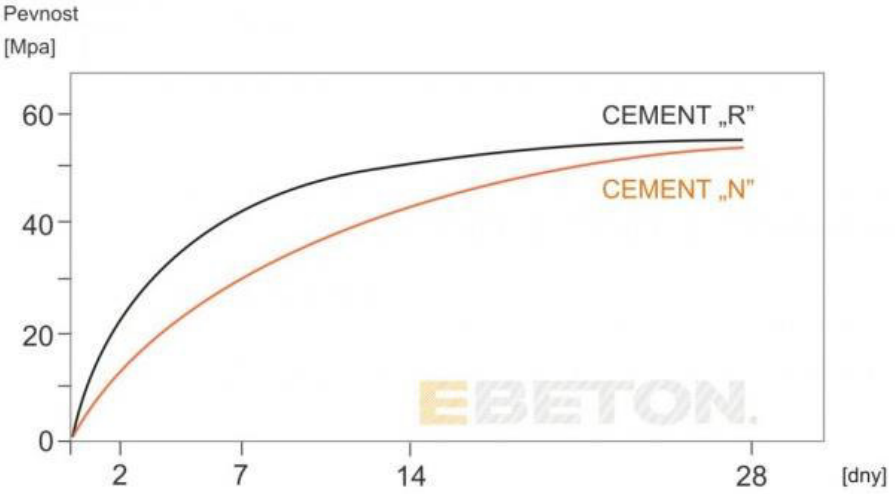
Vývoj pevnosti betonu závisí na vnitřních a vnějších činitelích. Mezi vnější činitele patří teplota prostředí – betonáž v zimě (při nízkých teplotách), betonáž v létě (při vyšších teplotách), betonáž v optimálních (laboratorních) podmínkách, a technologie zpracování. Také hutnění je významným procesem, který ovlivňuje počáteční i konečné pevnosti betonu. Vnitřním činitelem je receptura betonu. Sem můžeme zařadit druh a množství cementu, druh a množství přísad a vodní součinitel. Cement se dle složení dělí na 5 druhů (CEM I – CEM V), dle pevnosti do tříd 32,5, 42,5, 52,5 vyjadřujících pevnost po 28 dnech v MPa, dle počáteční pevnosti po 2 nebo 7 dnech na cement s normální rychlostí tvrdnutí (N) a rychlým tvrdnutím (R). Urychlovací přísady chemicky nebo chemicko-fyzikálně ovlivňují hydrataci cementu. Dají se rozdělit na urychlovače pro použití při běžné betonáži a na urychlovače způsobující extrémně rychlé tuhnutí a tvrdnutí, které se používají například do stříkaných betonů. Při nižším vodním součiniteli roste pevnost betonu rychleji než u betonů s vyšším vodním součinitelem. [3]



Obr. 2 vývoj tlakové pevnosti betonu v závislosti na teplotě prostředí [4]



Obr. 3 vývoj tlakové pevnosti betonu v závislosti na vaznosti cementu [4]



Obr. 4 vývoj tlakové pevnosti betonu v závislosti na použitém cementu [4]

2. URYCHLOVÁNÍ TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ

Všechna opatření používaná pro urychlení nárůstu počáteční pevnosti betonu nějakým způsobem ovlivňují hydrataci cementu. Některé se na reakci cementu s vodou přímo podílí, jiné ji pouze urychlují svým fyzikálním, případně chemicko-fyzikálním působením. Je ovšem třeba dbát na to, aby nebyly zhoršeny konečné vlastnosti betonu (nižší pevnost způsobena nižším stupněm hydratace, nebo opožděnou tvorbou ettringitu).

Mezi nejdůležitější metody patří použití rychlovazných cementů, urychlovačů tuhnutí a tvrdnutí a ošetřování při vyšší teplotě, případně v kombinaci se zvýšeným tlakem.

2.1. Průběh hydratace cementu

V průběhu let bylo odvozeno mnoho teorií popisujících tuhnutí a tvrdnutí cementu, většina však vychází ze dvou základních. První z nich je Le Chatelierova krystalová teorie, podle které probíhá proces ve dvou fázích. V první fázi dochází k rozpouštění cementu ve vodě, ve druhé fázi přesycený roztok krystalizuje do podoby jehličkovitých, vzájemně propojených krystalů. Druhou teorií je Michaelisova koloidní (gelová) teorie, která také předpokládá tvrdnutí ve dvou fázích. Nejprve se tvoří tzv. C-S-H gely na povrchu zrn cementu, při další fázi zrna absorbují vodu z vytvořených gelů, ty se stávají pevnými a nepropustnými.

Hydratace cementu začíná ihned po smíchání s vodou. Je to složitá fyzikálně-chemická reakce, při které se minerální fáze cementu mění na téměř nerozpustné produkty, tzv. hydratační produkty. Ty se vzájemně propojují a vytváří souvislý tmel. Hydratace cementu je exotermní reakce, uvolňuje se při ní hydratační teplo.

Jednotlivé složky cementového slínku nereagují stejnou rychlostí. Hydratace cementu se rozděluje do tří základních period, které jsou charakteristické dobou trvání, probíhajícími reakcemi, uvolňováním hydratačního tepla a vlivem na pevnost cementového tmele, v pozdějších fázích cementového kamene.

Tab. 2 mechanismus hydratace portlandského cementu [5]

Stupeň reakce	Chemické procesy	Fyzikální procesy	Mech. vlastnosti
Předindukční perioda První minuty	Rychlé počáteční rozpouštění alkalických síranů a aluminátů. Počáteční hydratace C_3S (. Vznik fáze Aft (ettringit).	Vysoká rychlost uvolňování hydr. tepla.	Změny ve složení kapal. fáze mohou ovlivnit tuhnutí.
Indukční perioda První hodiny	Úbytek silikátu. Tvorba nukleí CH a C-S-H. Ca^{2+} v roztoku dosahuje úrovně přesycení.	Tvorba produktů počáteční hydratace. Nízká rychlost uvolň. hydr. tepla. Postupný růst viskozity.	Vznik Aft (ettringitu) a AFm (monosulfátu) fází ovlivňující pevnost. Hydratace váp. silikátů určuje počátek a konec ind. periody.
Urychlující stupeň Přibližně 3-12 h	Rychlá chem. reakce C_3S za vzniku C-S-H a CH. Snížení stupně přesycení Ca^{2+} ionty.	Rychlá tvorba C-S-H vedoucí k reálné struktuře za souč. snížení pórovitosti; rychlý vývin hydr. tepla.	Změna plastické v pevnou konzistenci (počátek a konec tuhnutí). Vznik počát. pevností.
Konečný stupeň	Vznik fází C-S-H a CH řízený difuzí. Přeměna ettringitu v monosulfát. Výrazná hydratace belitu.	Snížení vývinu tepla. Postupné snižování pórovitosti. Vývoj pevné struktury.	Postupný nárůst pevností Pórovitost a morfologie hydrat. systému předurčuje konečnou pevnost a trvanlivost cementu – betonu.

- 1. perioda (indukční)

Tato perioda lze rozdělit na dvě období. Předindukční období je velmi krátké, probíhá během prvních minut od smíchání cementu s vodou. Reaguje trikalciumsilikát (C_3S), který má ve slínku největší procentuální zastoupení, proto má největší vliv na vlastnosti zatvrdlého cementu, případně betonu. Vzniká C-S-H gel a portlandit ($Ca(OH)_2$, zkráceně CH)

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

C-S-H gel vykazuje rentgenamorfní charakter, na rozdíl od krystalického portlanditu, nelze tudíž přesně určit jeho složení.

Také probíhá reakce trikalciumaluminátu (C_3A) za přítomnosti sádrovce, přidávaného jako zpomalovač tuhnutí. Zároveň se roztok přesycuje portlanditem, který vytváří alkalické prostředí.

Při větším množství síranů vzniká ettringit

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

Při menším množství síranů vzniká monosulfát

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + 10H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$$

Další reakcí s C_3A a s vodou přechází ettringit na monosulfát

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 2(3CaO \cdot Al_2O_3) + 4H_2O \rightarrow 3(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O)$$

Hydratační teplo se uvolňuje velkou rychlostí.

Druhá část indukční periody nastává po prvních hodinách. Dochází k nárůstu viskozity, ubývá silikátů a tvoří se C-S-H gel a portlandit. Uvolňování hydratačního tepla je pomalé, dále se tvoří ettringit a přechází v monosulfátové destičky.

- 2. perioda (přechod do tuhého skupenství)

Probíhá rychlá reakce C_3A za vzniku dlouhovláknitého C-S-H gelu (kalciumsilikáthydrát) a zvětšují se krystaly portlanditu. Složení C-S-H závisí především na vodním součiniteli, teplotě a stáří. Krystaly hydratačních produktů prorůstají, tím přibližují zrna cementu a narůstá pevnost cementové pasty. Ta závisí na jemnosti mletí, chemickém složení slínku a dalších faktorech, pohybuje se v rozmezí 1–20 MPa. Dochází také k nárůstu měrného povrchu. Dále probíhá hydratace C_4AF (tetrakalciumaluminátferit), která je podobná reakci C_3A, avšak mnohem pomalejší

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 4CaO(OH)_2 + 22H_2O \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O + 4CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 13H_2O$$

Vývin hydratačního tepla je rychlý.

- 3. perioda (vytvoření stabilní struktury)

Hydratační produkty rekrystalizují vlivem difúze vody, snižuje se vývin hydratačního tepla. Ettringit přechází na monosulfát, zmenšuje se velikost vláken C-S-H gelu. Dochází k hydrataci belitu (C_2S), vznikají stejné produkty jako při hydrataci C_3S

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

Toto období lze také rozdělit na 2 období – období klesající rychlosti hydratace (28 dní) a období dozrávání. To závisí na podmínkách, kterým je materiál vystaven, především možnost přístupu vody do struktury a teplotě, může trvat několik let.

Teplota při hydrataci cementu má vliv na rychlost hydratace a vývin hydratačního tepla. S tím souvisí také rozdílná struktura C-S-H gelu. [6] [7] [5]

2.2. Rychlovazný cement

Cement je jednou ze základních složek každého betonu. Složení cementů je ovšem různé. V závislosti na množství slínku a dalších surovin rozlišuje norma ČSN EN 197-1 několik různých druhů cementu rozdělených dle třídy pevnosti a typu cementu. Každá pevnostní třída – 32,5, 42,5 a 52,5 (značení podle pevnosti v MPa po 28 dnech) je vyráběna s normálním nárůstem pevnosti (označení N), nebo s rychlým nárůstem pevnosti (označení R – rychlovazný).

Vysoké počáteční pevnosti rychlovazných cementů jsou dosaženy vhodným mineralogickým složením slínku. Rozhodující jsou především 2 moduly – hydraulický a aluminátový, ty jsou definovány jako hmotnostní podíl obsahu jednotlivých oxidů. Hydraulický modul je definován

$$H_m = \frac{CaO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2}. \qquad (1)$$

Cementy s hydraulickým modulem větším než 2,4 mají vyšší obsah C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) a C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) a mají vyšší počáteční pevnost. S vyšším obsahem CaO také roste hydratační teplo, snižuje se však odolnost vůči agresivním látkám. Aluminátový modul je dán vztahem

$$A_m = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}. \qquad (2)$$

Při A_m větším než 2,5 cementy rychleji nabývají počátečních pevností, avšak více smršťují a snižuje se odolnost proti chemickým vlivům. Také menší množství sádrovce, který se přidává jako zpomalovač tuhnutí, počáteční pevnost zvyšuje.

Tab. 3 Hlavní slínkové minerály – hydratace [1]

	Označení	Zastoupení (%)	Hydratační teplo (kJ/kg)	Rychlost hydratace
C_3S	alit	37-75	500	rychlá
C_2S	belit	5-40	250	střední
C_3A	amorfní fáze	3-15	910	velmi rychlá
C_4AF	brownmillerit	9-14	420	rychlá
CaO	volné vápno	<4	1160	pomalá
MgO	periklas	<6		pomalá

Vlastnosti cementu nezávisí pouze na chemickém a mineralogickém složení, ale i na dalších podmínkách, jako je například jemnost mletí nebo přidání dalších složek a přísad. [1] [8] [6] [5]

2.3. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí

Tuhnutí a tvrdnutí čerstvé betonové směsi jsou dva odlišné pojmy a je potřeba je rozlišovat. Jsou odlišné i z hlediska procesů, které probíhají v různých fázích hydratace cementu. Tuhne čerstvá betonová směs, tvrdnutí znamená nárůst pevnosti již zatuhlého betonu. Urychlovače se dělí na ty, které zkracují počátek tuhnutí, a na přísady zvyšující počáteční pevnost zatuhlé směsi. Některé přísady kombinují oba účinky. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí jsou určeny pro urychlení reakce trikalciumaluminátu a trikalciumsilikátu s vodou.

Podle formy urychlovačů se dělí na urychlovače:

- kapalné vzniklé rozpuštěním anorganických nebo organických solí
- práškové rozpustné anorganické nebo organické soli
- práškové nerozpustné látky
- nerozpustné anorganické soli a sloučeniny dispergované ve vodě

Nejčastějšími látkami používanými jako urychlovače jsou:

- hydroxidy
- halogenidy

- dusitany a dusičnany
- uhličitany
- thiokyanatan
- sírany a thiosírany
- hlinitany
- silikáty
- karboxylové a hydroxykarboxylové kyseliny a jejich soli
- alkanolaminy

Účinnost urychlovačů je závislá na několika faktorech. Prvních z nich je dávka urychlovače. Ta se musí pohybovat v rozmezí určeném výrobcem. Vyšší dávky mohou negativně ovlivnit dlouhodobé pevnosti, případně jiné vlastnosti, naopak nízká dávka může mít téměř nulový účinek. Dalším faktorem je druh a pevnostní třída cementu. Urychlovače dosahují nejvyšší účinnosti při použití s cementem, který obsahuje velké množství trikalciumaluminátu, tedy cementy CEM I, cementy s větším obsahem příměsí obsahují totiž menší množství tohoto minerálu. Dále je účinnost ovlivněna druhem a množstvím dalších přísad, vodním součinitelem a teplotou betonové směsi i okolí. [9] [10]

2.3.1. Urychlovače na bázi chloridu vápenatého

Tyto látky patří mezi nejstarší používané urychlovače. Nejenže urychlují tvrdnutí, ale také zkracují počátek doby tuhnutí. Chlorid vápenatý ($CaCl_2$) urychluje reakci trikalciumaluminátu a trikalciumsilikátu. Nevýhodou jsou korozivní účinky pro ocelovou výztuž, nelze jej tedy použít pro vyztužený beton. Další nevýhodou je možnost výkvětů. [9] [10]

2.3.2. Urychlovače na bázi dusičnanů

Základní složkou těchto urychlovačů je dusičnan vápenatý ($Ca(NO_3)_2$). Při reakci s trikalciumaluminátem a vodou vytváří komplexní sloučeniny, které krystalují podobně jako ettringit. Odebírají přebytečnou vodu ze směsi, ale nebrzdí další hydratační reakce. Směs je tak hutnější a počáteční pevnosti jsou vyšší. Urychlovače na bázi dusičnanů zrychlují tuhnutí již při nižším dávkování, pro urychlení tvrdnutí je dobré je smíchat s jiným urychlovačem. Tyto látky nemají korozivní účinky, tudíž je lze použít i do železobetonu. [9] [10]

2.3.3. Urychlovače na bázi dusitanů

Tyto urychlovače mají jako základní složku dusitan vápenatý ($Ca(NO_2)_2$). Účinnost je přibližně stejná jako u urychlovačů na bázi chloridu vápenatého. Problémem je ale jeho jedovatost, použití je omezené kvůli možnosti ohrožení zdraví a životního prostředí. [9]

2.3.4. Urychlovače na bázi thiokyanatanů

Hlavní složkou těchto přísad je thiokyanatan sodný (NaSCN), draselný (KSCN) nebo vápenatý ($Ca(SCN)_2$). Působí ve fázi tvrdnutí, tudíž se používají spolu s dusičnany nebo dusitany. Nejméně účinný je thiokyanatan draselný, ostatní jsou velmi účinné, dávkování je do 1 % hmotnosti cementu. Thiokyanatany jsou zdraví škodlivé, tudíž je jejich použití omezené. Také korozivně působí na výztuž, jejich použití je obdobné jako u chloridů. Další nevýhodou je obsah alkálií, což může vést k alkalicko-křemičité reakci. [9] [10]

2.3.5. Urychlovače na bázi uhličitanů alkalických kovů

Nejčastěji se používá urychlovač na bázi uhličitanu draselného (K_2CO_3) známý také jako potaš, dále se používá uhličitan sodný (Na_2CO_3), tedy soda. Tyto urychlovače velmi rychle reagují s aluminátý, jsou vhodné především pro stříkaný beton. Pro běžnou betonáž je nutné hydrataci zpomalit použitím citrátu vápenatého. [9] [10]

2.3.6. Urychlovače na bázi solí karboxylových kyselin

Pro tyto urychlovače lze použít některé soli monokarboxylových kyselin, například mravenčan vápenatý – vápenatá sůl kyseliny mravenčí ($Ca(HCOO)_2$). Tato přísada snižuje potřebu záměsové vody při zachování konzistence směsi, nezpůsobuje korozi výztuže ani výkvěty, umožňuje betonáž v zimě. Nevýhodou je nízká rozpustnost ve vodě a vyšší dávkování, což zvyšuje množství alkálií v betonu. [9]

2.3.7. Urychlovače na bázi křemičitanů

Mezi tyto urychlovače patří vodní sklo, což je roztok křemičitanu sodného (Na_2SiO_3). Zkrácení počátku doby tuhnutí spočívá ve velmi rychlé reakci s aluminátý. Zároveň zvyšuje vaznost a lepivost betonu, protože spolu s vodou vytváří gel. Toho se využívá u stříkaného betonu. Nevýhodou je negativní ovlivnění struktury betonu, což vede ke snížení konečné pevnosti betonu. Také vyžaduje větší dávkování (cca 10 % hmotnosti cementu), tudíž zvyšuje podíl alkálií v betonu. [9]

2.3.8. Urychlovače na bázi hlinitanů

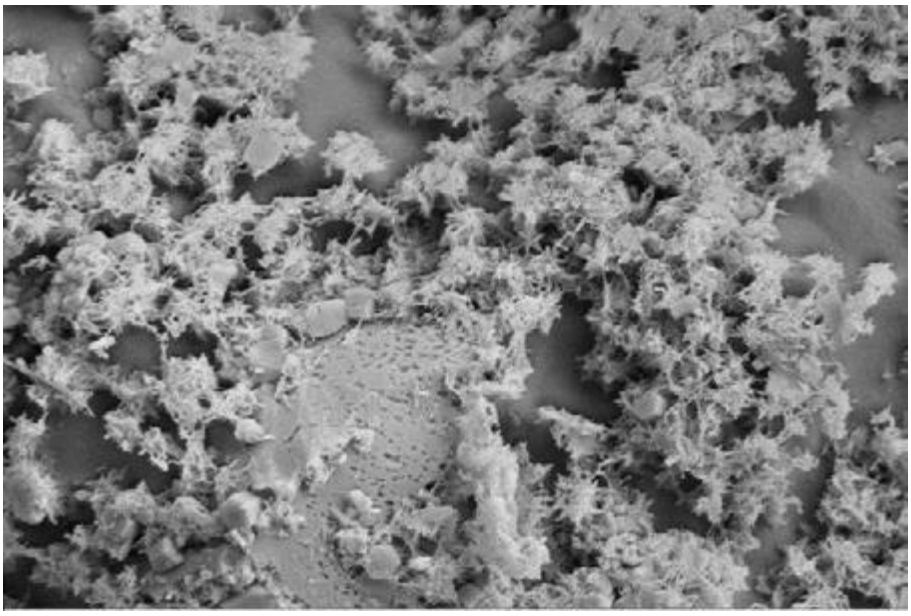
Tyto urychlovače jsou určeny především pro stříkaný beton. Jedná se o urychlovače na bázi hlinitanu sodného (Na_3AlO_3) a hlinitanu draselného ($K_2Al_2O_4$). Hlinitany urychlují reakci sádrovce a trikalciumsilikátu, zpomalují vývoj ettringitu, čím umožní reakci trikalciumaluminátu. Jejich vodný roztok je silně alkalický s pH 12, zvyšují obsah alkálií v betonu. [9]

2.3.9. Urychlovače na bázi síranů

Obvykle se používají urychlovače na bázi síranu hlinitého ($Al_2(SO_4)_3$). Jsou používány převážně pro stříkaný beton. Síran hlinitý reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku ettringitu a hydroxidu hlinitého. Je používán ve směsi s dalšími urychlujícími látkami, výsledkem je přísada, která nezvyšuje obsah alkálií v betonu. [9]

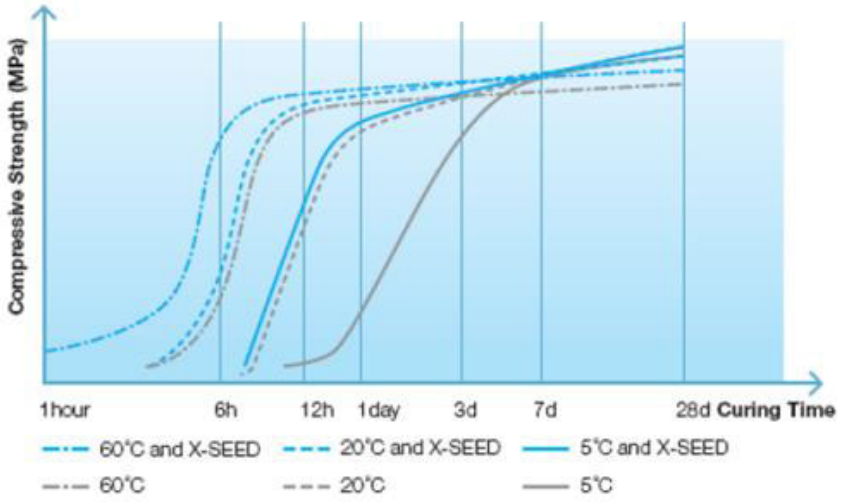
2.3.10. Přísada X-SEED

Přísada urychlující tvrdnutí X-SEED je patent společnosti BASF. Princip fungování této přísady vychází z toho, že při hydrataci cementu krystaly C-S-H přednostně rostou mezi sebou, nikoli na povrchu cementových zrn. Synteticky vyrobené krystaly C-S-H se rozpustí v suspenzi a využívají se jako nukleační materiál. Aktivní krystaly C-S-H potom mohou růst bez energetických bariér na rozdíl od běžného procesu hydratace, nukleační materiál působí jako „krystalizační jádro“.



Obr. 5 schematický kryoskopický snímek X-SEED pořízený elektronovým mikroskopem: Aktivní krystaly rostoucí mezi cementovými zrny [11]

Výrobce deklaruje o 20 % vyšší pevnost v tlaku po 24 hodinách při 20 °C a o 30 % vyšší pevnost po 48 hodinách při 5 °C oproti referenční směsi. Nárůst pevnosti je patrný i při nízké teplotě, je možné přísadu použít i při proteplování pro snížení spotřeby energie. Mezi další výhody patří vyšší trvanlivost a vyšší kvalita betonu oproti proteplování. Také je možné použití cementů s menším obsahem slínku. [11]



Obr. 6 vývoj pevnosti v různých teplotách prostředí (beton se tekutou konzistencí, 380 kg/m³ – CEM I 52,5R) [11]

2.4. Zvýšená teplota

Teplota okolního prostředí má zásadní vliv nejen na rychlost hydratace, ale hraje roli i při míchání, ošetřování a ukládání. Největší vliv má však v počátečních fázích hydratace. Zejména teplota během prvních 3 dnů je považována za kritický faktor, který reprezentuje celou teplotní historii. Korejský výzkum [12] na tomto základě stanovil vztah pro získání 28denní pevnosti pro danou teplotu ošetřování HSC (high strength concrete – vysokopevnostní beton), který je dán následující rovnicí:

$$S_{28} = \left[1{,}5\left(\frac{T_{A3}}{T_r}\right)^{2{,}5}(W/B)^4 + 0{,}97\right](S_{28})_{T_r} \qquad (3)$$

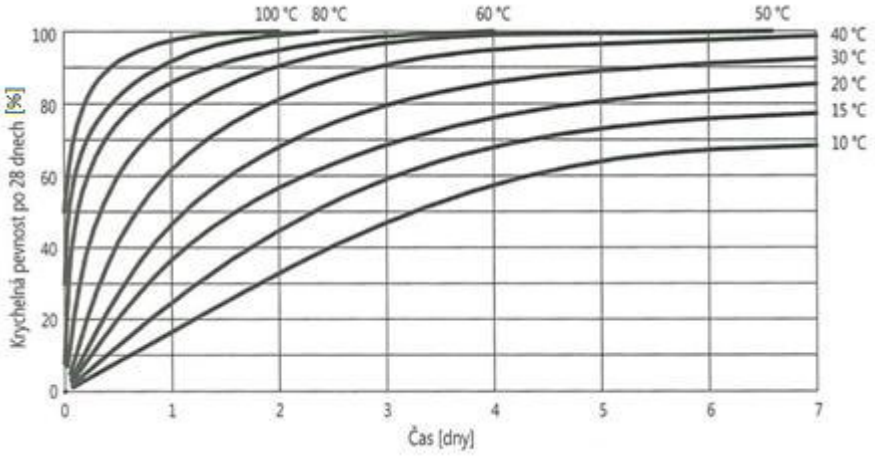
kde S_{28} je 28denní pevnost při zvýšené teplotě,

T_{A3} je průměrná teplota během prvních 3 dní,

T_r je referenční teplota,

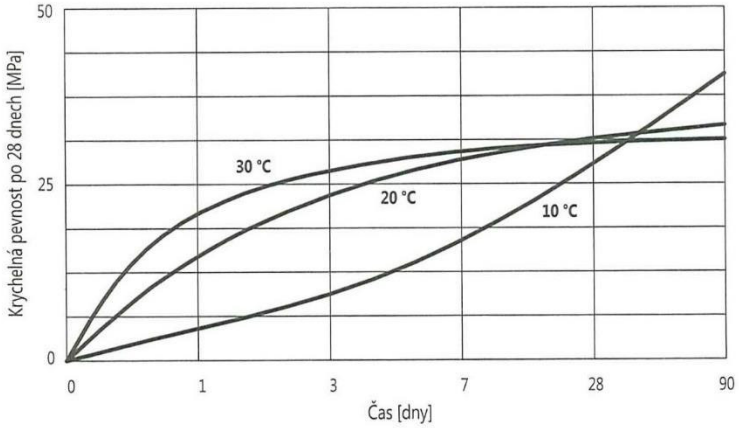
W/B je vodní součinitel,

$(S_{28})_{Tr}$ je 28denní referenční pevnost. [12]



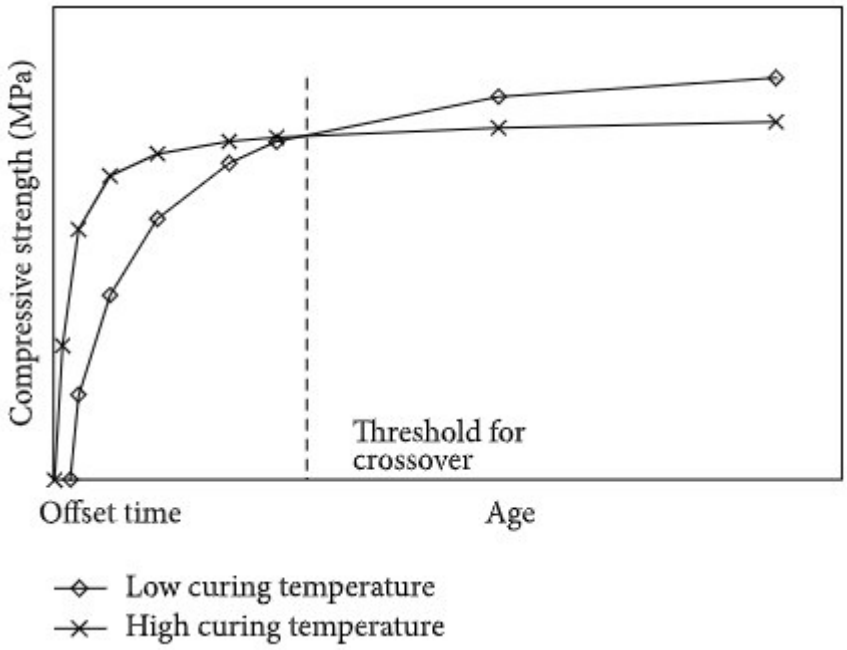
Obr. 7 pevnost betonu v tlaku v % 28denní pevnosti [1]

Z důvodu různých vlastností betonu při různých teplotách norma stanovuje teplotu 20 °C jako teplotu pro měření normových vlastností. Také je důležité znát vztahy mezi pevností stanovenou při normové teplotě a pevnostmi při daných podmínkách.



Obr. 8 vliv teploty na vývoj pevnosti [1]

Z Obr. 8 je patrné, že při vyšší teplotě jsou počáteční pevnosti vyšší, při nižší teplotě je tomu naopak. Za vyšší teploty se považují teploty nad 30 °C. Pevnost ve 28 dnech je u všech teplot přibližně stejná, proto se také uvádí v normách 28denní pevnost. Dále je vidět, že při nižších teplotách je konečná pevnost vyšší. Při zvýšené teplotě nemá velká část hydrátů dostatek času dokonale narůst, to způsobí ztrátu konečné pevnosti. Tento jev je znám jako tzv. „crossover effect“. Tento efekt může být zmírněn snižováním vodního součinitele. [13] [14] [12]



Obr. 9 crossover efekt při vývoji pevnosti betonů ošetřovaných při různých teplotách [12]

Jakou maximální teplotu je možné použít, aby k tomuto jevu nedošlo? Několik norem zabývajících se betonem a výrobky z betonu uvádí určité hranice, ale úplně se neshodují. Například norma ČSN EN 13670 *Provádění betonových konstrukcí* [15] uvádí, že teplota uvnitř betonu nesmí překročit 70 °C, pokud není doloženo zkouškami, že vyšší teploty nebudou mít významný negativní účinek na vlastnosti betonu. Již neplatná norma ČSN 73 2400 *Provádění a kontrola betonových konstrukcí* [16] říká, že se musí provést porovnávací zkoušky pro porovnání vlastností ohřívaného a neohřívaného betonu, pokud ještě nejsou výsledky zkoušek známy, je hranice opět 70 °C. Norma ČSN EN 13369 *Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty* [17] určuje nejvyšší střední teplotu betonu (viz Tab. 4) v závislosti na prostředí a stanovuje podmínky ošetřování.

Tab. 4 podmínky urychlené hydratace [17]

Prostředí výrobku	**Nejvyšší střední teplota betonu T_{mean}[a]**
Převážně suché nebo středně vlhké	$T_{mean} \leq 85$ °C[b]
Mokré nebo střídavě mokré	$T_{mean} \leq 65$ °C
[a] Jednotlivé hodnoty smí být o 5 °C vyšší [b] Pokud 70 °C $< T_{mean} \leq 85$ °C musí se počátečními zkouškami prokázat, že pevnost dosažená po 90 dnech odpovídá vývoji tvrdnutí vzhledem k pevnosti získané po 28 dnech	

Vysoká teplota má ovšem příznivý vliv při použití minerálních příměsí. Používání strusky, popílku, mikrosiliky a dalších pucolánových příměsí je běžné pro zlepšení vlastností betonu, případně pro snížení jeho ceny. Při zahřívání se výrazně zvyšuje reaktivita těchto příměsí, tedy jejich hydratační účinek, a tím se i zvýší pevnost betonu. [13] [18] [19]

2.4.1. Proteplování betonu

Ošetřování má velký vliv na vlastnosti zatvrdlého betonu. Správné ošetřování zvyšuje trvanlivost, pevnost, vodotěsnost, odolnost proti obrusu, objemovou stabilitu, odolnost proti mrazu a rozmrazování. Proteplování je druh ošetřování, při kterém je čerstvý beton záměrně zahříván s cílem urychlit hydrataci cementu. Obvykle je prováděno v uzavřených komorách nebo tunelech. Beton je zde zahříván pomocí páry, nebo radiátory. Sálavé teplo je aplikováno přímými elektrickými topnými prvky, cirkulací teplého vzduchu kolem forem, nebo použitím potrubí s horkou vodou, párou, nebo horkým olejem.

Použití proteplování umožňuje výrobcům prefabrikátů zajištění rychlé dodávky prvků potřebných pro výstavbu. Betonové prvky mohou být proteplovány přes noc, druhý den jsou odformovány a připraveny k použití. Mezi ekonomické výhody proteplování patří například minimalizace skladovacího prostoru a rychlý obrat forem. Tyto aspekty byly zásadním přínosem k úspěchu prefabrikace v minulém století.

Ošetřování betonu při vyšších teplotách má vliv také na smršťování a dotvarování. Smršťování se dá rozdělit na dvě skupiny – smršťování vysycháním a autogenní smršťování, které je způsobené rozdílným objemem hydratovaného cementu a cementu s vodou před hydratací. Když je vodní součinitel nízký, beton nevykazuje téměř žádné smrštění vysycháním. Může však nastat velké autogenní smršťování, zejména u vysokohodnotných betonů. Pokud použijeme proteplování, smršťování probíhá během něj a po ukončení ošetřování žádné další smrštění nenastane. Dotvarování závisí na zatížení a vlastnostech betonu. Dalším faktorem ovlivňujícím dotvarování je způsob ošetřování. Při ošetřování parou nebo při vyšších teplotách se dotvarování sníží až o 50 %. To je výhodné zejména u předpínaných konstrukcí, kde jsou sníženy ztráty předpětí až o 40 %.

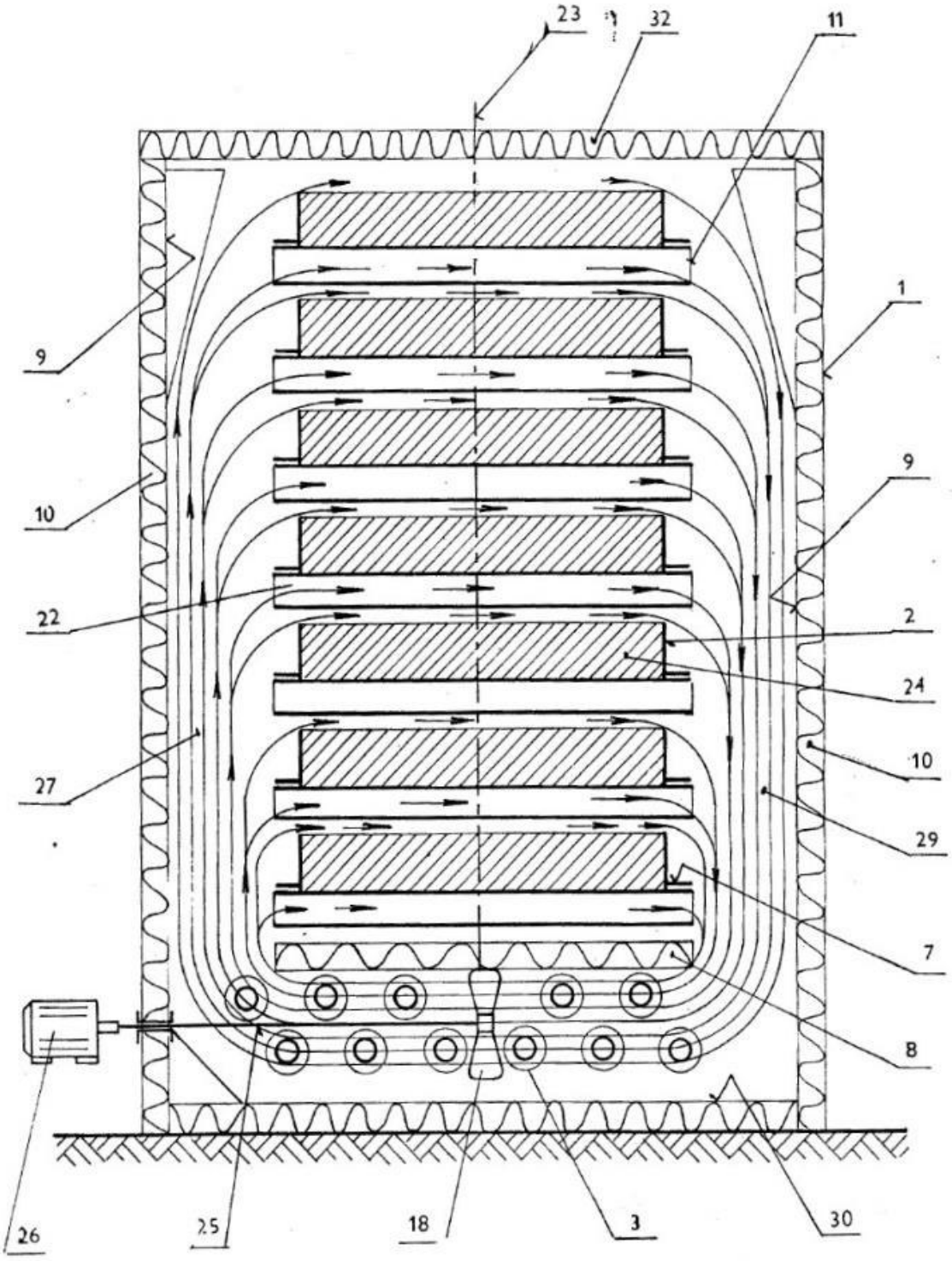
Vedle pozitivního vlivu použití vyšší teploty jsou tu také negativní vlivy. Může dojít k opožděné tvorbě ettringitu (DEF – delayed ettringite formation), což je ve skutečnosti typ vnitřní síranové koroze (ISA – internal sulphate attack). K tomuto jevu dochází v závislosti na

okolních podmínkách a je způsoben reakcí monosulfátů a síranů, při které vzniká ettringit, který má větší objem než vstupní složky a dochází k potrhání betonu. Od konce 70. let minulého století bylo zaznamenáno několik případů poškození trhlinami u prefabrikátů, které byly při výrobě proteplovány. Také jsou známé škody předpjatých železničních pražců, které byly ošetřovány při teplotě až 100 °C. Dnes je prokázáno, že ke zhoršení vlastností dochází, pouze pokud teplota přesahuje asi 60-70 °C a že důvodem vzniku trhlin je právě opožděná tvorba ettringitu. Dalším negativním vlivem je nižší stupeň hydratace, který je způsoben nedostatkem vody potřebné pro hydrataci. [20] [21] [22] [23]

Vlastnosti proteplovaného betonu jsou ovlivněny částečným porušením struktury. Většinou dochází ke snížení pevnosti betonu oproti betonu tvrdnoucím v normálních podmínkách. Snížení pevnosti se výrazně projevuje u pevnosti v tahu než u pevnosti v tlaku, zejména při rychlých změnách teploty (více jak 20 °C/h) a vyšších teplotách proteplování (nad 70 °C). Poměr pevnosti v tahu k pevnosti v tlaku může klesnout z 1:10 až na 1:20. [20]

Technologie tepelného urychlování tvrdnutí betonu si kladou za cíl dosáhnout v krátkém čase potřebných manipulačních pevností dílců s minimální spotřebou tepelné energie. Technologie stanovuje režim proteplování s parametry teploty, času, vlhkosti a přestupu tepla z prostředí do betonu. Podle technologického zařízení se volí příslušné tepelné médium.

Na Obr. 10 je zařízení pro proteplování betonových dílců, československý vynález z roku 1991. Ve své době mělo zařízení mnoho výhod – menší nároky na prostor, stejnoměrné prohřívání dílců, dostatečnou rychlost ohřevu. Ve spodní části komory je umístěno otopné zařízení z žebrových trubek, nad ním je umístěna stínící přepážka pro oddělení otopného zařízení od spodní formy. Trubky jsou vyhřívány parou o teplotě asi 140°C. Vzduch je pomocí ventilátorů prohánět kolem otopných trubek, kde se ohřeje přibližně na 95 °C a dále proudí dutinami ve formách a mezi nimi a tím jim předává teplo. Vzduch ochlazený na teplotu nižší než 80 °C přichází do pravé svislé komory zpět k otopnému zařízení. Po daném časovém úseku se směr proudění obrátí, tím dochází k vyrovnání teplot. [24]



Obr. 10 zařízení pro proteplování betonových dílců, autoři Ing. Štěrba Alain, Ing. Ryšavý Jaroslav [24]

Popis zařízení: 1 – proteplovací zařízení, 2 – forma, 3 – otopné zařízení, 7 – spodní forma, 8 – stínící přepážka, 9 – vnitřní povrch, 10 – podélná stěna, 11 – podélné hrany forem, 18 – osový reverzní ventilátor, 22 – průběžné otvory, 23 – svislá podélná rovina, 24 – betonový dílec, 25 – hřídel, 26 – elektromotor, 27 – svislá mezera tl. 0,5 m, 29 – pravá svislá mezera, 30 – dno, 32 – víko [24]

Režim proteplování je předepsaná a vyzkoušená závislost regulované teploty betonu (většinou však prostředí) v čase. Rozděluje se do 4 period, které jsou definovány teplotou T [°C] a dobou t [hod]

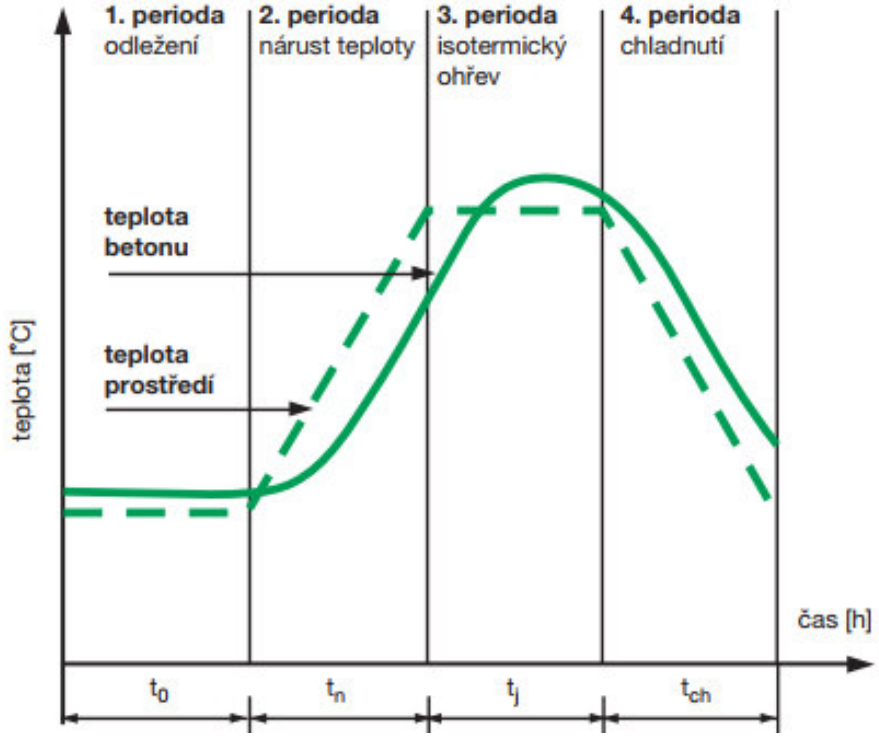
$$t_{UTB} = t_0(T_0) + t_n + t_j(T_j) + t_{ch}(T_{ch}) \qquad (4)$$

1. perioda – odležení po dobu t_0 s teplotou T_0

2. perioda – nárůst teploty v době t_n z teploty T_0 na teplotu T_j

3. perioda – izotermický ohřev při teplotě T_j po dobu t_j

4. perioda – chladnutí po dobu t_{ch} z teploty T_j na teplotu T_{ch}, případně T_0

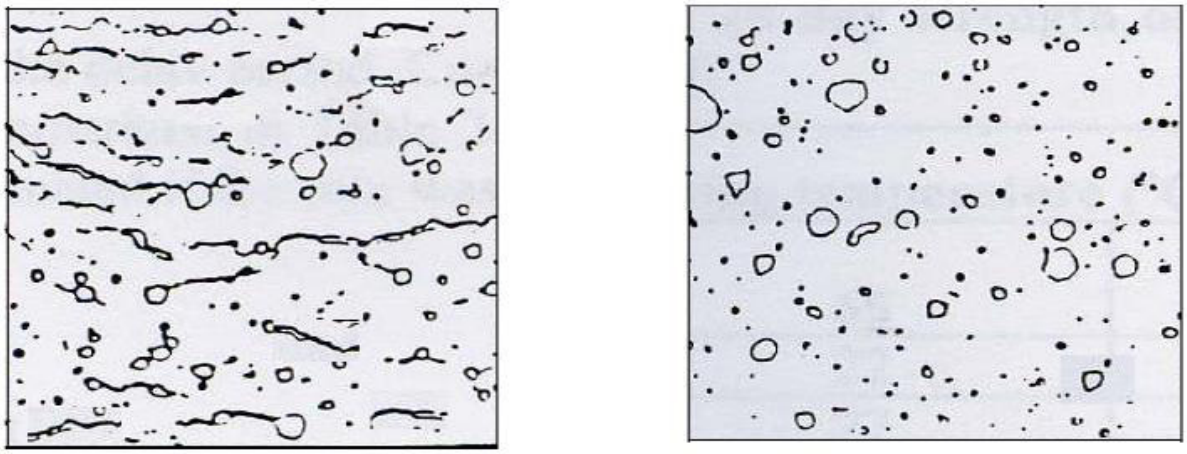


Obr. 11 režim proteplování betonu [2]

Doporučený režim proteplování platí pro běžné betony umístěné v jakémkoli prostředí, kromě suchého prostředí:

- odležení betonu by mělo trvat alespoň 2 hodiny v závislosti na teplotě okolí a použitém cementu, aby beton získal určitou tuhost (sednutí cca 1 cm)
- teplota do 3 hodin od zamíchání nesmí překročit 30 °C
- teplota do 4 hodin nemá překročit 40 °C
- maximální teplota izotermického ohřevu nesmí překročit 70 °C (lépe 60 °C)
- dovolený nárůst teploty je 10–30 °C za hodinu
- dovolený pokles teploty při chladnutí je nejvýše 30 °C za hodinu

Odležení betonu je při proteplování velmi podstatné. Tato perioda umožní betonu dosáhnout dostatečné pevnosti, která je důležitá kvůli pórovité struktuře betonu. Voda a vzduch obsažené v pórech se zvyšováním teploty rozdílně roztahují, vzniká rozdílné napětí, které může vést ke vzniku trhlinek. Celý proces ohřívání a ochlazování betonu doprovází teplotní roztažnost, která při rozdílných součinitelích teplotní roztažnosti složek ovlivňuje výsledné pevnosti betonu.

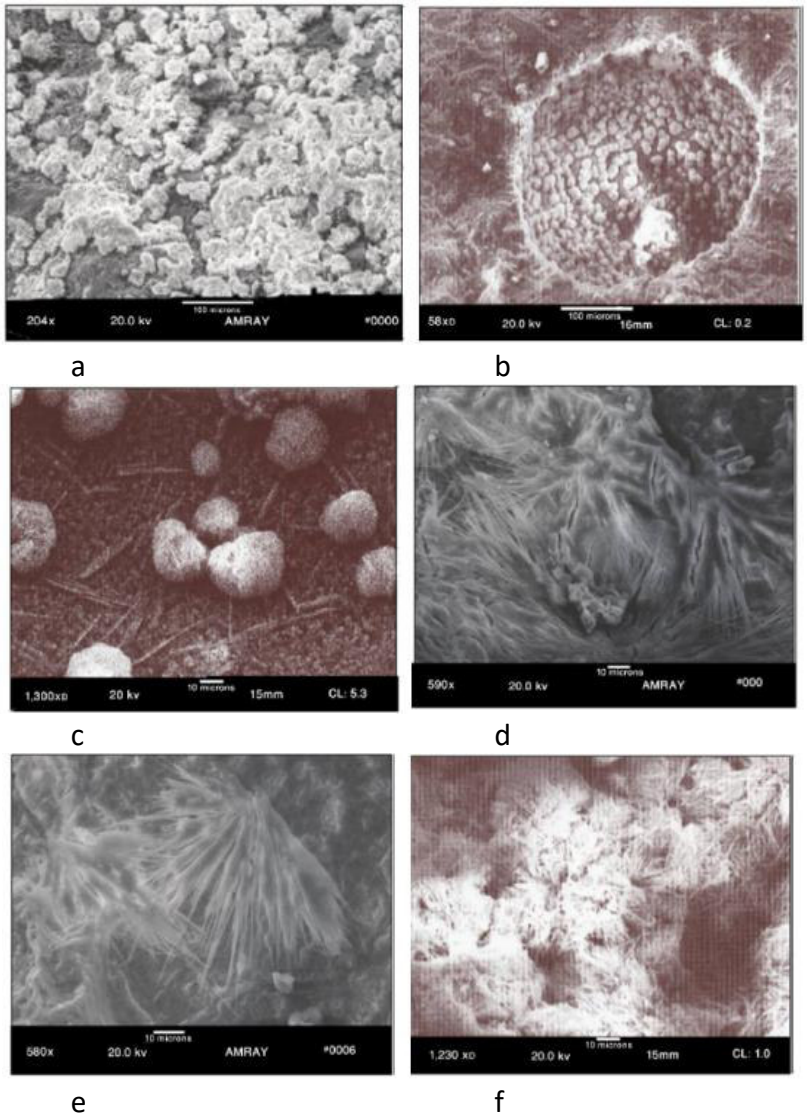


Obr. 12 vliv délky odležení na strukturu proteplovaného betonu [22]; vlevo krátké odležení – vznik mikrotrhlin v cementové pastě, vpravo dostatečné odležení – nepoškozená cem. pasta

Vzhledem k rostoucí ceně energií se proteplování betonu v současné době omezuje a urychlování tvrdnutí betonu se řeší použitím cementů vyšších pevnostních tříd a cementů s označením R. [14] [20] [22]

2.4.2. Opožděná tvorba ettringitu (DEF)

Jak již bylo zmíněno, ettringit ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$) je produkt hydratace portlandského cementu, který vzniká reakcí C_3A se sádrovcem a vodou. Rychlost krystalizace ettringitu je velmi vysoká. Při krystalizaci zvětšuje svůj objem až o 270 %. Tato expanze je žádoucí kvůli snížení smršťování betonu.



Obr. 13 některé formy ettringitu [13]; a – shluky, b – koule, c – koule s jehličkami, d – šupinky, e – šupinky s radiálními jehličkami, f – jehličky

Ettringit může mít několik forem – viz Obr. 13. Morfologie ettringitu závisí na celkovém volném prostoru (velikosti pórů – vodním součiniteli) a na podmínkách, při kterých vzniká. Při nízké koncentraci hydroxylových iontů se tvoří dlouhé štíhlé jehličky, v opačném případě, což je v betonu běžné, vznikají malé tyčinky délky 1-2 µm. Také v přítomnosti vápna se tvoří menší krystaly. Dále má vliv na tvorbu teplota, krystaly vytvořené při teplotě kolem 60 °C jsou výrazně větší než ty, které vznikly při teplotě 25 °C.

Ettringit vzniklý během prvních několika hodin hydratace, tzv. primární (EFE – early formation of ettringite), je důležitou složkou hydratace cementu. Po vyčerpání volných síranů se primární ettringit mění na stabilní monosulfát. Při vystavení vysokým teplotám se ettringit rozkládá, aby mohl být vytvořen později znovu. Opětovná krystalizace je známá jako tzv. opožděná tvorba ettringitu (DEF). [13] [25]

Opožděná tvorba ettringitu je vlastně vnitřní síranová koroze, jejímž zdrojem je ošetřování při teplotě vyšší než 70 °C. Primární ettringit je teplotně rozložen, následně vzniká sekundární ettringit.

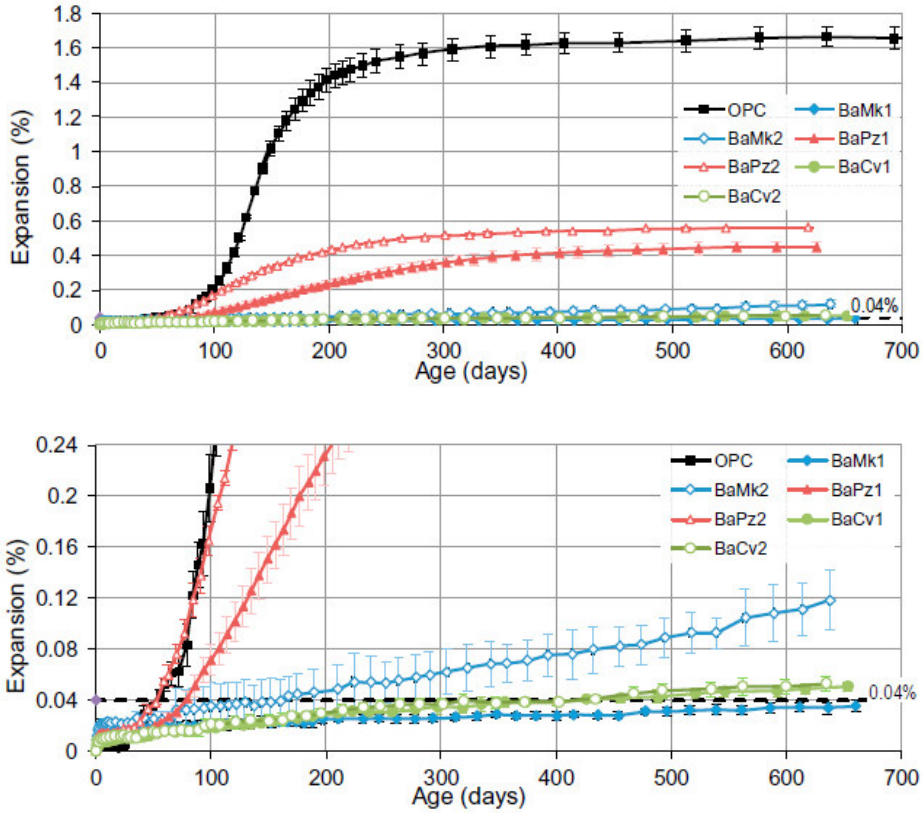
ošetřování při 20 °C: $C - A - H + CaSO_4 + H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$

ošetřování při 70 °C: $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \rightarrow C - A - H + CaSO_4 + H_2O$

DEF nastává v již zatvrdlém betonu. Ettringit rekrystalizuje několik dní po proteplování ve formě malých krystalků rozptýlených v cementové pastě. Rozpínáním ettringitu dochází ke vzniku trhlinek v betonu, drolení, odlupování a tím beton ztrácí svoji pevnost. [14] [19]

Během posledních 20 let byly zkoumány mnohé parametry ovlivňující DEF. Nejdůležitějšími chemickými parametry jsou obsah SO_3 a C_3A v cementu, molární poměr SO_3/Al_2O_3 a obsah zásad. V současnosti neexistuje dostatečný popis komplexního vztahu mezi složením cementu a poškozením DEF. U konkrétního cementového slínku existuje mezní hodnota pro obsah síranů. Ve všech případech hodnoty <3 % hmotn. SO_3 nevedou k expanzi. Cementy se středním obsahem C_3A vykazují expanzi pouze se středním a vysokým obsahem alkálií. Nejdůležitější je, že cementy s nízkým obsahem nebo neobsahující C_3A jsou méně citlivé na DEF.

Použití některých pucolánových příměsí může redukovat, nebo dokonce eliminovat dlouhodobou expanzi související s DEF. Dávkování příměsí je různé, závisí na jejich složení. Kinetika DEF je také výrazně ovlivněna jemností mletí přidaného pucolánu. Jemně mletý pucolán snižuje expanzi, přidání hrubého pucolánu není pouze neúčinné, ale dokonce expanzi urychluje. Francouzský výzkum [26] ukazuje vliv pucolánů na expanzi proteplovaného betonu. Reprezentativní vzorek byl porovnáván s betony, kde bylo 15 % hmotnosti cementu nahrazeno popílkem, metakaolinem a přírodním pucolánem (vždy 2 různá chemická složení od každé příměsi). Beton byl zahříván na teplotu 80 °C, délka proteplovacího cyklu byla 150 h.



Obr. 14 expanze betonu při použití pucolánových příměsí [26]; OPC – referenční vzorek, Mk – metakaolin, Pz – přírodní pucolán, Cv – popílek

Z Obr. 14 je patrná redukce expanze při použití všech příměsí. Pouze při použití popílků (Cv1, Cv2) a metakaolinu s nižším obsahem SO_3 (Mk1) byla dlouhodobá expanze pod hranicí 0,1 %. Použití minerálních příměsí může být řešením pro snížení expanze při DEF, záleží však na jeho složení a jemnosti mletí.

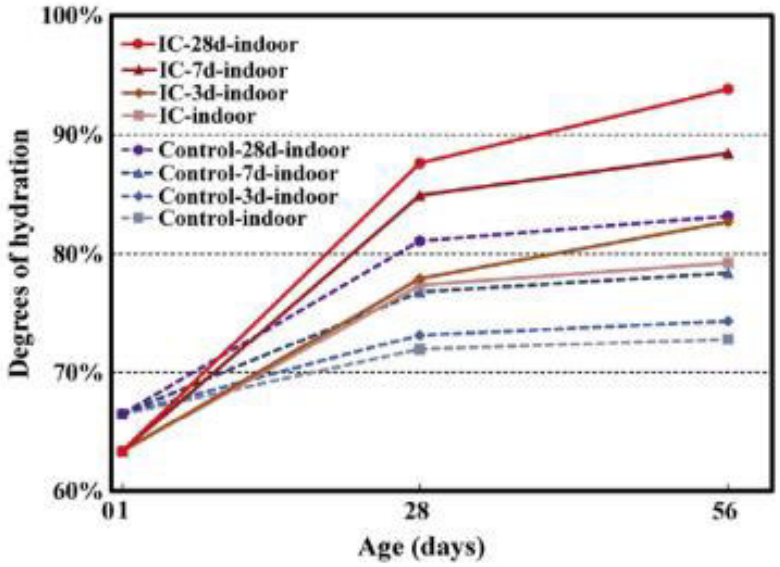
Voda je velmi důležitá pro transport opožděně vzniklého ettringitu v cementové pastě. Normální betony a malty vykazují expanzi pouze tehdy, jestliže absorbují dostatek vody ponořením, nebo jsou-li v prostředí se vzdušnou vlhkostí vyšší než 95 %. Snižující se vodní součinitel vede k husté pastě s nízkou kapilární porézností. To prodlužuje počátek DEF. Dokonce i s hodnotou vodního součinitele 0,4 byla DEF ve vzorcích laboratorních malt, které byly tepelně ošetřeny při teplotě 90 °C, zahájena po 2 letech a dokončena po 8 letech. Nízké okolní teploty zrychlují DEF, a tedy i proces expanze. [27]

2.4.3. Vnitřní ošetřování

Vnitřní ošetřování (IC – internal curing) je metoda ošetřování, která zlepšuje vlastnosti proteplovaného betonu. Při zahřívání je urychlena hydratace cementu, kolem nezhydratovaných zrn slínku se tvoří hustší vrstva hydratačních produktů, která omezuje

další hydrataci. Proteplováním je vlastně snížen maximální dosažitelný stupeň hydratace, což ovlivňuje růst tlakové pevnosti, nepropustnost a trvanlivost betonu.

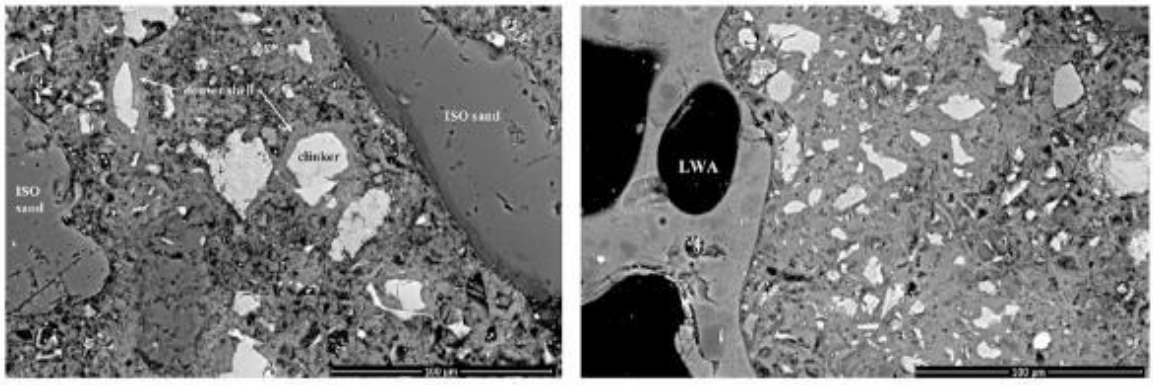
Proteplené vzorky jsou obvykle ukládány venku, kde jsou vystaveny aktuálnímu počasí. Při těchto podmínkách není betonu poskytnuto dostatečné množství vody pro další hydrataci. Vnitřní ošetřování může poskytnout potřebnou vodu po celou dobu hydratace. Tato metoda spočívá v tom, že je část jemného kameniva nahrazena předem vlhčeným lehkým kamenivem nebo superabsorpčními polymery. Voda je postupně uvolňována a plní roli ošetřovací vody. Na rozdíl od ošetřování vnější vodou, kdy je penetrace pouze několik milimetrů, IC zajišťuje rovnoměrnou distribuci v celém objemu cementové pasty. Zatvrdlý beton má oproti referenčním vzorkům nižší konečnou pevnost, dochází k tomu ale kvůli náhradě jemného kameniva lehkým kamenivem, které má nižší pevnost, nikoli kvůli horší kvalitě betonu způsobené nedostatečnou hydratací. [23] [28] [29]



Obr. 15 stupeň hydratace u proteplovaného betonu [28]

Na Obr. 15 je porovnání stupně hydratace u proteplovaného betonu při použití vnitřního ošetřování (plná čára) a bez použití IC (čárkovaná čára). Vzorky byly zahřívány na teplotu 55 °C, délka proteplovacího cyklu byla 11 h, dále byly skladovány v různých podmínkách: Control/IC-indoor – kontrolní skupina a skupina s použitím vnitřního ošetřování, po proteplování byly vzorky skladovány uvnitř. Control/IC-3d/7d/28d-indoor – po proteplovacím cyklu byly vzorky skladovány v běžném prostředí (venku) po dobu 3, 7, 28

dní a poté byly skladovány uvnitř. Je patrné, že vnitřní ošetřování je účinnou metodou pro zvýšení stupně hydratace, tudíž i kvality betonu. [28]



Obr. 16 obrázek z elektronového mikroskopu vzorků Control-indoor (vlevo) a IC-indoor (vpravo) po 28 dnech [28]

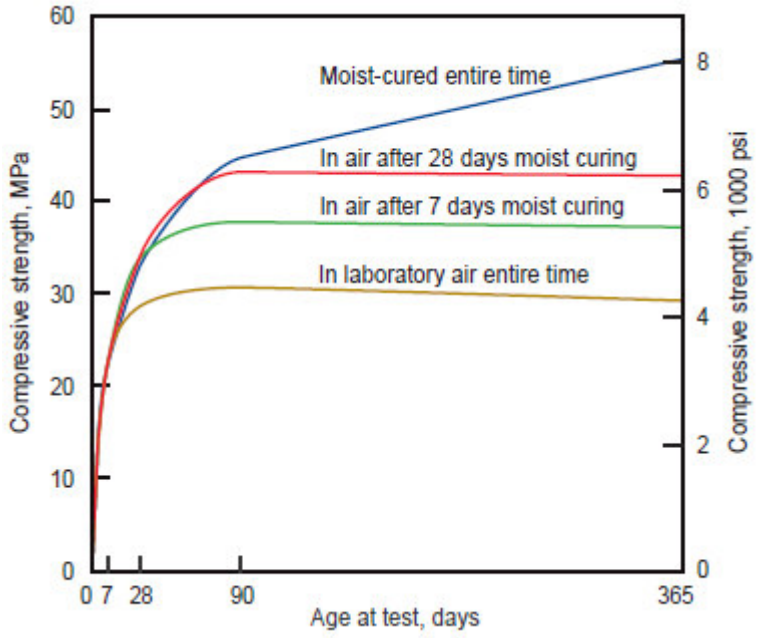
2.4.4. Proteplování UHPC

Ultra vysokohodnotný beton (ultra-high performance concrete – UHPC) je velmi kompaktní jemnozrnný nebo hrubozrnný typ betonu, který byl vyvinut jako nový stavební materiál během posledního desetiletí. Proteplování je jednou z fází při výrobě UHPC, která je nezbytná k dosažení pevnosti v tlaku vyšší než 150 MPa charakteristické pro UHPC. Proteplování může také urychlit autogenní smršťování, nebo snížit součinitel dotvarování. To je výhodné zejména u předpjatých konstrukcí, kde jsou tímto sníženy ztráty. Ve většině případů se používá teplota ošetřování 90-200 °C. Pro běžné betony vyrobené z cementů, které jsou citlivé na zahřívání, je dobře známo, že teploty nad 70 °C mohou způsobit zpožděnou tvorbu ettringitu, rušivý proces během životnosti betonu. Použití vyšší teploty pro proteplování UHPC vyvolává otázku, zda existuje nebezpečí DEF během živostnosti betonu ovlivňující jeho charakteristiky. Na druhou stranu vyšší teplota podstatně zvyšuje pucolánovou aktivitu příměsí, které jsou do vysokohodnotných betonů přidávány. [27] [19]

2.4.5. Propařování

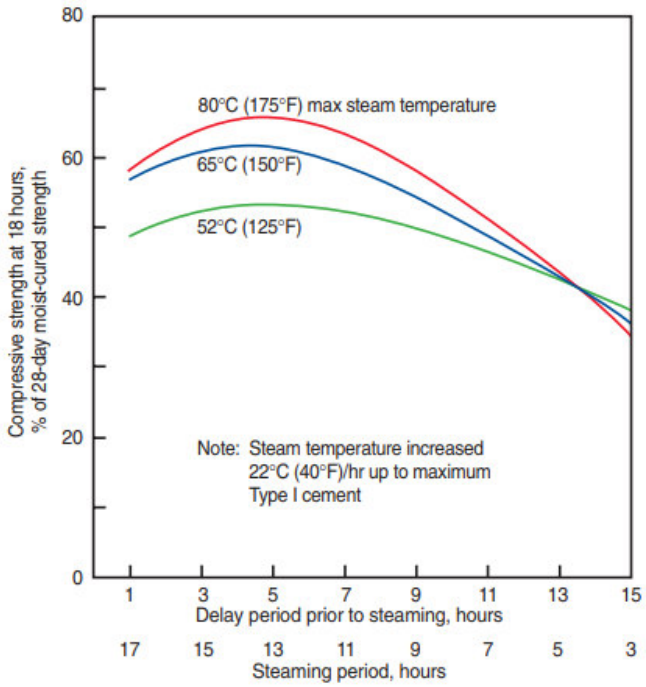
Jednou z metod, jak můžeme beton zahřívat, je použití páry neboli propařování. Běžně jsou používány 2 různé metody: pára při běžném tlaku (pro monolit a velké prefabrikáty) a vysokotlaká pára (pro menší prefabrikáty). Propařování za normálního tlaku se obvykle provádí v uzavřeném prostoru, aby se minimalizovaly ztráty tepla a vlhkosti. K vytvoření tohoto prostoru se používají plachty. Aplikace páry do uzavřeného prostoru by měla nastat až po dosažení počátku tuhnutí betonu, maximální počáteční pevnost je

dosažena při počátečním odležení v délce 3-5 h. Propařovací teplota je udržována okolo 60 °C, dokud beton nedosáhne požadované pevnosti. Při použití vyšší teploty než cca 60-70 °C nedojde k výraznému nárůstu pevnosti, tyto teploty jsou tedy neekonomické a mohou vést k poškození opožděnou tvorbou ettringitu. Při použití teploty nad 70 °C musí být bezpečnost ověřena zkouškami nebo historickými daty, aby nedošlo k nepřípustnému snížení konečné pevnosti.



Obr. 17 vliv délky propařování (a vlhkosti) na vývoj pevnosti betonu [23]

Teploty betonu jsou monitorovány na exponovaných místech prvku. Monitorování pouze teploty vzduchu není dostatečné, protože hydratační teplo může způsobit nárůst vnitřní teploty betonu. Kromě nárůstu počáteční pevnosti má propařování další výhody, např. redukci smršťování a dotvarování, stejně jako při proteplování. [23]



Obr. 18 vztah mezi pevností a dobou odležení a propařování [23]

3. VÝROBA VZORKŮ

3.1. Úvod

Cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv má zvýšená teplota na růst pevností betonu a na konečné pevnosti. Všechny vzorky byly vyrobeny z uvedené receptury (Tab. 5), kterou navrhl Ing. Josef Fládr, Ph.D. Z každé záměsi bylo vyrobeno 24 zkušebních krychlí 100x100x100 mm, které byly vystaveny různým teplotám. Na těchto krychlích byly zkoušeny pevnosti v tlaku a v příčném tahu.

Tab. 5 dávkování složek

složka	popis	kg/m^3
cement	42,5 R Mokrá	650
voda		175
vodní součinitel	v/c	0,27
kamenivo čedič	8-16	360
	4-8	478
	0-4	780
superplastifikátor	SK OLD	29
mikrosilika	SK	80

3.2. Betonáž

Práce byly prováděny v laboratoři na Stavební fakultě ČVUT. Kvůli omezenému počtu forem a prostoru v proteplovací, příp. chladící komoře bylo vyráběno pouze 24 vzorků pro každou teplotu.

Obr. 19 suroviny pro výrobu jedné série vzorků

Nejprve byly naváženy všechny složky podle příslušné receptury, potom byla vyrobena betonová směs. Nejprve bylo do míchačky nasypáno kamenivo s cementem. Po 30 sekundách míchání byla přidána mikrosilika a míchání trvalo dalších 300 sekund (5 minut). Nakonec byla přidána voda spolu se superplastifikátorem, míchání pokračovalo opět po dobu 30 sekund. Mezi tím byly formy opatřeny odbedňovacím nátěrem.

Obr. 20 vybetonované zhutněné vzorky

Formy byly ocelové, jedna forma obsahovala 3 krychle oddělené přepážkami. Plnění forem bylo po třetinách, hutnění bylo prováděno na vibračním stole. Vzorky byly odbedněny po 24 h od betonáže.

3.3. Ošetřování

Vzorky byly betonovány při teplotě 25 ± 1 °C. Aby bylo možné posoudit vliv teploty na pevnosti, byly ošetřovány při teplotách 10, 30, 50 a 80 °C. Vzorky zrající při teplotě 10 °C byly po dvouhodinovém odležení umístěny do chladící komory KD 20.5 a chlazeny rychlostí 10 °C/hod pomocí studeného vzduchu při téměř 100 % vlhkosti. Další série vzorků byla ponechána v teplotě zkušební laboratoře, která byla 30 ± 1 °C (zajištěno solárními zisky v letním období a odpadním teplem z proteplovací komory). Před odbedněním byly vzorky zakryté fólií, aby nedocházelo k odpařování vody, po odbednění byly ponořeny do vody.

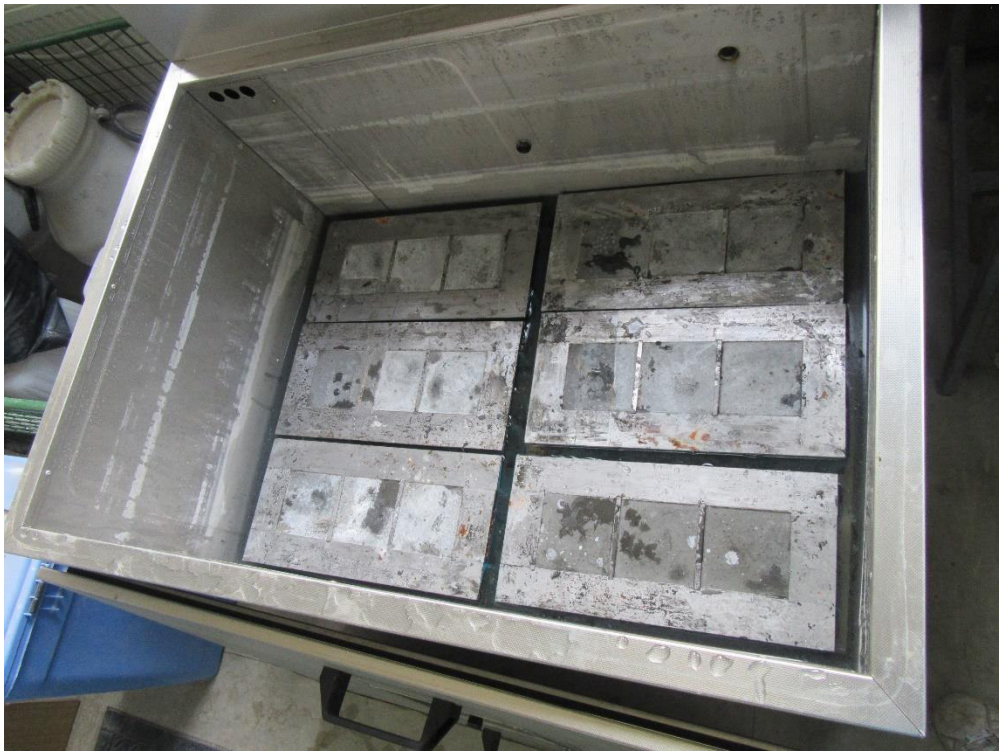
Obr. 21 vzorky umístěné v chladící komoře

Zbylé krychle byly zahřívány v proteplovací komoře od firmy Controls Group, model 55-C0194/D (Obr. 22). Před odbedněním byly vzorky zahřívány párou, která vznikla zahříváním vody v komoře, a ocelovými formami. Po odbednění byly vzorky ponořené do vody v komoře.

Obr. 22 proteplovací komora [30]

Krychle, které tuhnuly a tvrdnuly při teplotě 50 °C, byly umístěny do proteplovací komory vyhřáté na danou teplotu asi hodinu po betonáži. Poslední série ošetřovaná při

nejvyšší teplotě (80 °C) byla umístěna do komory po dvouhodinovém odležení a zahřívána rychlostí 20 °C/h na teplotu 99 °C, ve které byly vzorky až do odbednění. Po odbednění byla teplota snížena na 80 °C. Všechny vzorky byly při dané teplotě ošetřovány až do doby, kdy byly zkoušeny.



Obr. 23 umístění neodbedněných vzorků v proteplovací komoře

4. ZKOUŠENÍ

4.1. Krychelná pevnost v tlaku

Zkouška tlakové pevnosti byla provedena na krychlích o hraně 100 mm. Vzorky byly zkoušeny po 1, 3, 7, 14 a 28 dnech od betonáže. Krychle byly vkládány mezi desky lisu kolmo na směr hutnění. Před začátkem zkoušky byla ověřena jejich geometrie a byly zváženy. Byly zkoušeny vždy 3 krychle. Krychelná pevnost se potom stanoví ze vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A} \qquad (5)$$

kde f_c je pevnost vzorku v tlaku [MPa],

F maximální dosažená síla [N],

A tlačená plocha [mm^2].

Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách.

Tab. 6 tlakové pevnosti – teplota 10 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	tlačená plocha (A)	dosažená síla (F)	pevnost (f_c)	průměrná pevnost
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	mm^2	kN	MPa	MPa
1	100,2	98,7	99,9	2 580,7	2 613	9 890	114,14	11,5	10,7
1	100,4	98,5	100,2	2 552,6	2 578	9 889	104,99	10,6	
1	100,1	98,2	99,9	2 556,7	2 601	9 830	98,80	10,0	
4	100,0	100,1	99,5	2 537,6	2 546	10 012	652,91	65,2	63,9
4	100,5	99,3	100,4	2 550,3	2 546	9 980	631,61	63,3	
4	100,2	100,5	100,7	2 568,7	2 532	10 071	637,16	63,3	
7	100,4	99,0	100,6	2 560,3	2 562	9 934	773,50	77,9	72,5
7	100,1	98,9	100,2	2 516,1	2 534	9 905	701,26	70,8	
7	100,1	99,7	100,4	2 542,9	2 540	9 975	687,37	68,9	
14	99,8	98,6	99,8	2 495,8	2 542	9 839	880,00	89,4	87,4
14	100,5	100,1	100,2	2 545,1	2 525	10 054	910,00	90,5	
14	100,0	99,5	100,2	2 535,9	2 544	9 952	820,00	82,4	
28	99,8	100,0	100,5	2 549,4	2 545	9 972	952,59	95,5	96,4
28	100,5	99,4	100,1	2 538,3	2 541	9 982	989,35	99,1	
28	100,3	99,7	100,3	2 548,2	2 541	10 000	944,23	94,4	

Tab. 7 tlakové pevnosti – teplota 30 °C

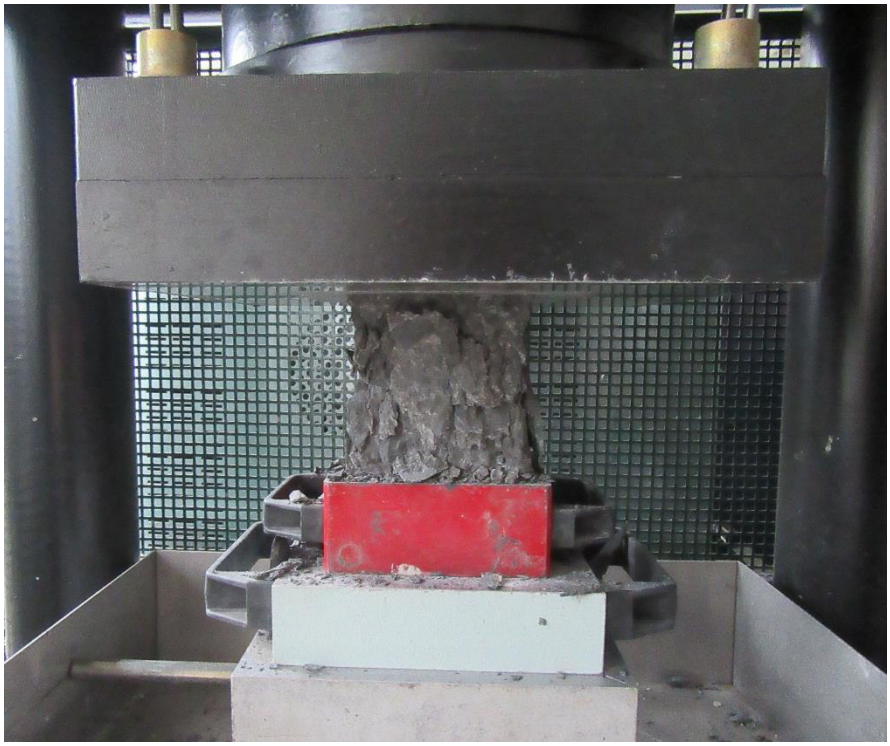
stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	tlačená plocha (A)	dosažená síla (F)	pevnost (f_c)	průměrná pevnost
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	mm^2	kN	MPa	MPa
1	100,0	100,7	100,1	2 568,5	2 547	10 069	611,42	60,7	59,8
1	100,0	100,3	100,1	2 558,6	2 550	10 028	586,05	58,4	
1	99,8	100,6	99,9	2 572,5	2 565	10 042	606,24	60,4	
3	100,0	99,6	100,0	2 552,9	2 565	9 956	1 000,58	100,5	96,6
3	100,0	100,4	100,3	2 563,5	2 548	10 034	973,54	97,0	
3	100,2	98,7	99,9	2 528,8	2 560	9 889	911,67	92,2	
7	99,9	100,0	100,0	2 552,9	2 558	9 985	1 194,70	119,6	114,3
7	100,5	99,5	100,0	2 567,8	2 569	9 998	1 159,50	116,0	
7	100,3	96,8	100,1	2 478,0	2 551	9 705	1 041,70	107,3	
14	100,2	98,5	99,7	2 494,6	2 537	9 866	1 207,11	122,4	127,3
14	100,0	101,0	99,7	2 567,7	2 551	10 100	1 307,68	129,5	
14	100,0	99,4	100,0	2 553,5	2 569	9 938	1 291,57	130,0	
28	100,2	99,8	100,0	2 555,2	2 557	9 998	1 428,82	142,9	142,6
28	100,3	99,5	100,1	2 556,3	2 560	9 979	1 422,34	142,5	
28	100,0	98,7	100,4	2 532,9	2 568	9 873	1 404,18	142,2	

Tab. 8 tlakové pevnosti – teplota 50 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	tlačená plocha (A)	dosažená síla (F)	pevnost (f_c)	průměrná pevnost
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	mm^2	kN	MPa	MPa
1	100,1	99,2	100,0	2 565,5	2 584	9 926	891,30	89,8	89,4
1	100,0	98,2	100,1	2 523,1	2 568	9 817	881,30	89,8	
1	99,9	100,3	100,1	2 575,0	2 569	10 016	889,07	88,8	
3	100,2	99,4	99,7	2 555,8	2 573	9 962	1 308,44	131,3	128,2
3	100,0	100,0	100,2	2 548,9	2 542	10 007	1 295,27	129,4	
3	100,2	98,4	100,0	2 524,8	2 560	9 862	1 220,59	123,8	
7	99,9	100,0	99,8	2 575,2	2 583	9 990	1 542,18	154,4	142,1
7	100,2	100,0	99,9	2 556,2	2 554	10 017	1 416,59	141,4	
7	100,4	98,2	99,9	2 519,9	2 557	9 861	1 288,42	130,7	
14	99,8	98,7	100,1	2 523,4	2 559	9 847	1 446,60	146,9	135,4
14	99,9	98,0	100,0	2 503,3	2 557	9 793	1 262,12	128,9	
14	100,0	99,6	100,1	2 536,7	2 544	9 963	1 299,90	130,5	
28	99,8	97,6	100,4	2 490,5	2 516	9 743	1 418,82	145,6	146,5
28	100,2	98,7	100,0	2 541,6	2 516	9 889	1 471,42	148,8	
28	100,1	99,7	100,3	2 552,6	2 516	9 978	1 447,34	145,1	

Tab. 9 tlakové pevnosti – teplota 80 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	tlačená plocha (A)	dosažená síla (F)	pevnost (f_c)	průměrná pevnost
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	mm^2	kN	MPa	MPa
1	100,2	100,2	100,0	2 522,6	2 515	10 034	849,15	84,6	86,3
1	99,6	98,6	100,2	2 460,1	2 501	9 817	905,81	92,3	
1	99,8	102,0	100,2	2 558,8	2 508	10 184	834,62	82,0	
3	99,9	102,9	100,0	2 586,2	2 516	10 281	976,87	95,0	94,0
3	100,1	99,9	100,1	2 519,1	2 517	10 001	935,94	93,6	
3	100,3	101,9	100,1	2 557,9	2 499	10 228	956,31	93,5	
7	100,6	103,2	100,3	2 586,2	2 516	10 377	996,13	96,0	103,0
7	100,0	102,8	100,4	2 592,8	2 512	10 280	1 075,04	104,6	
7	99,8	100,6	100,4	2 545,6	2 523	10 047	1 090,41	108,5	
14	101,6	100,1	100,4	2 566,5	2 513	10 167	1 035,77	101,9	103,7
14	99,9	99,9	100,2	2 530,8	2 531	9 985	1 053,74	105,5	
14	100,0	99,4	99,6	2 502,5	2 528	9 934	1 030,77	103,8	
28	100,7	100,1	100,1	2 550,0	2 529	10 073	1 086,89	107,9	107,5
28	100,1	101,6	100,0	2 552,4	2 510	10 169	1 099,67	108,1	
28	100,1	103,0	100,1	2 609,9	2 529	10 310	1 098,93	106,6	



Obr. 24 porušený vzorek – zkouška pevnosti v tlaku

4.2. Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu se zkouší na stejných tělesech jako pevnost v tlaku, tedy na krychlích o hraně 100 mm. Před začátkem zkoušky se opět ověří geometrie a vzorky se zváží. Krychle jsou v lisu zatěžovány liniově, tahová napětí jsou vyvozována nepřímo soustředěným tlakovým namáháním. Na rozdíl od zkoušení tlakové pevnosti byly zkoušeny pouze 2 krychle. Pevnost v tahu se stanoví ze vzorce:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \qquad (6)$$

kde f_{ct} je pevnost vzorku v příčném tahu [MPa],

F maximální dosažená síla [N],

l délka dotykové přímky [mm],

d příčný rozměr tělesa [mm].

Převod na pevnost v osovém tahu je vynásobením pevnosti v příčném tahu konstantou 0,9. Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách.

Tab. 10 tahové pevnosti – teplota 10 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	dosažená síla (F)	pevnost (f_{ct})	průměrná pevnost	osový tah
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	kN	MPa	MPa	MPa
1	100,6	99,4	101,1	2 593,9	2 593	5,54	0,35	0,36	0,33
1	100,3	98,9	100,5	2 584,0	2 593	5,82	0,37		
4	100,2	99,8	100,6	2 548,4	2 535	3,27	0,21	0,23	0,21
4	99,9	100,8	99,5	2 553,5	2 547	4,11	0,26		
7	99,8	99,5	100,1	2 531,5	2 548	41,80	2,67	2,69	2,42
7	99,4	99,9	100,1	2 574,8	2 592	42,42	2,70		
14	99,9	98,0	99,5	2 497,8	2 562				
28	100,3	100,2	100,0	2 532,4	2 520	37,72	2,40	3,48	3,13
28	100,3	100,0	100,6	2 537,3	2 515	72,08	4,56		

Při zkoušení 14denní pevnosti došlo k chybě lisu a nebyla zaznamenána max. dosažená síla, není tedy možné tuto pevnost stanovit.

Tab. 11 tahové pevnosti – teplota 30 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	dosažená síla (F)	pevnost (f_{ct})	průměrná pevnost	osový tah
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	kN	MPa	MPa	MPa
1	99,9	100,0	100,0	2 553,5	2 547	30,84	1,96	2,17	1,95
1	100,0	100,0	100,1	2 578,7	2 578	37,42	2,38		
3	100,0	99,0	100,3	2 549,9	2 568	75,42	4,84	4,93	4,44
3	100,2	101,7	99,7	2 585,3	2 546	79,95	5,03		
7	100,2	100,0	100,0	2 577,9	2 574	61,49	3,91	3,53	3,18
7	100,1	99,8	100,0	2 540,8	2 545	49,34	3,15		
14	100,1	100,6	100,0	2 565,5	2 547	119,41	7,56	6,99	6,29
14	100,0	99,5	99,9	2 554,4	2 568	100,26	6,42		
28	100,2	100,2	100,0	2 565,5	2 560	45,46	2,89	2,89	2,60

Tab. 12 tahové pevnosti – teplota 50 °C

stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	dosažená síla (F)	pevnost (f_{ct})	průměrná pevnost	osový tah
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	kN	MPa	MPa	MPa
1	100,1	98,7	100,2	2 530,8	2 558	47,69	3,07	2,89	2,60
1	100,0	100,4	100,1	2 581,2	2 567	42,84	2,71		
3	100,1	99,5	100,0	2 572,3	2 585	75,14	4,81	4,18	3,76
3	100,2	100,6	100,6	2 588,7	2 555	56,49	3,55		
7	99,9	100,3	100,0	2 559,9	2 555	49,30	3,13	3,38	3,04
7	100,1	99,3	100,2	2 550,9	2 562	56,76	3,63		
14	100,0	97,7	100,3	2 519,8	2 573	89,49	5,82	5,82	5,23
28	100,1	97,9	100,0	2 535,4	2 588	72,95	4,74	5,27	4,75
28	99,9	98,9	100,1	2 532,5	2 562	90,22	5,80		

Tab. 13 tahové pevnosti – teplota 80 °C

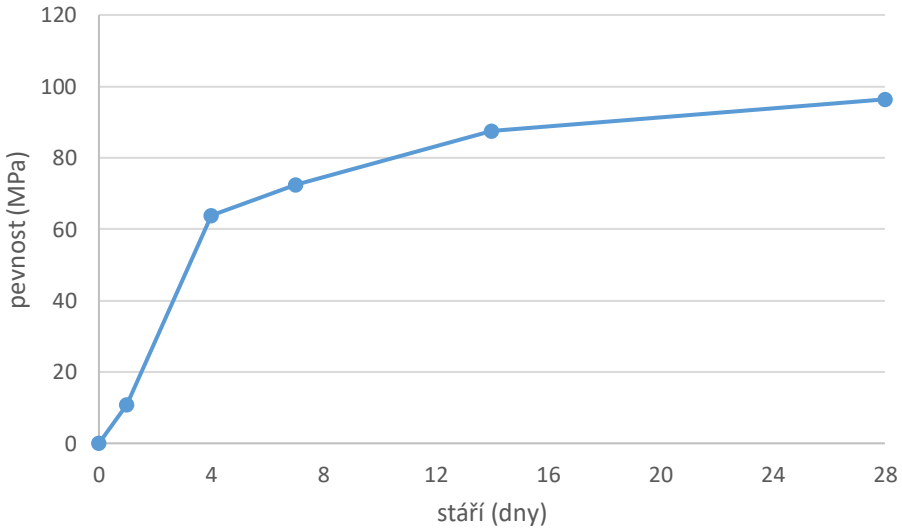
stáří	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	dosažená síla (F)	pevnost (f_{ct})	průměrná pevnost	osový tah
	délka	šířka	výška						
dny	mm	mm	mm	g	kg/m^3	kN	MPa	MPa	MPa
1	100,0	98,7	100,4	2 522,7	2 546	65,92	4,24	3,90	3,51
1	100,0	99,8	100,3	2 532,7	2 532	55,92	3,56		
3	100,1	99,7	100,4	2 519,2	2 514	46,92	2,98	4,57	4,12
3	100,2	100,8	100,4	2 548,6	2 512	97,95	6,16		
7	100,4	100,7	100,0	2 528,7	2 499	43,46	2,75	1,96	1,77
7	100,1	103,8	100,1	2 601,0	2 499	19,23	1,18		
14	99,6	99,8	100,2	2 512,5	2 520	94,68	6,02	6,02	5,42
28	100,8	103,2	99,9	2 608,3	2 509	35,96	2,22	4,20	3,78
28	100,1	101,0	100,0	2 565,2	2 538	97,99	6,18		

Obr. 25 porušený vzorek – zkouška pevnosti v příčném tahu

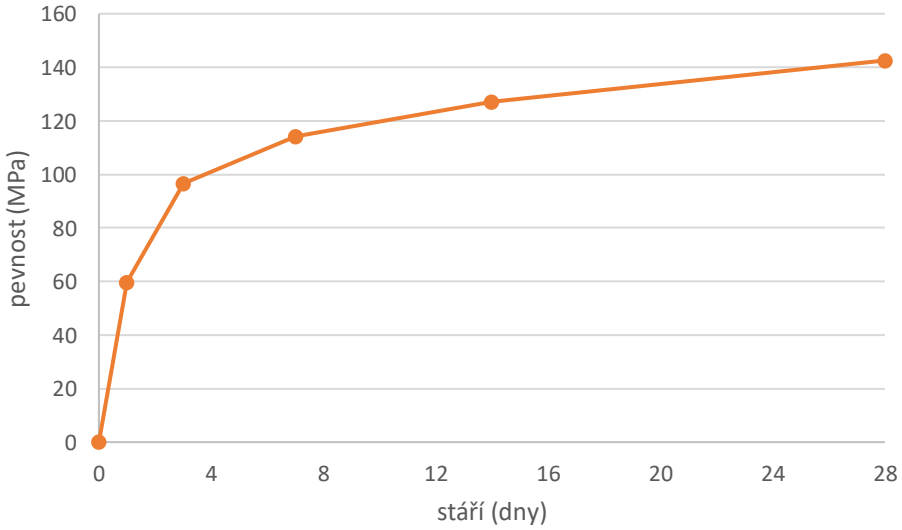
5. VYHODNOCENÍ

5.1. Nárůst pevnosti

V následujících grafech je znázorněn růst pevností při daných teplotách. Průběhy přibližně odpovídají předpokladům, pro zjednodušení je průběh mezi měřenými hodnotami považován za lineární. Z grafů je zřejmé, že teplota má na růst výrazný vliv. Při teplotě 10 °C je růst nejpomalejší, což je patrné ze sklonu úseček grafu v prvních dnech tvrdnutí.



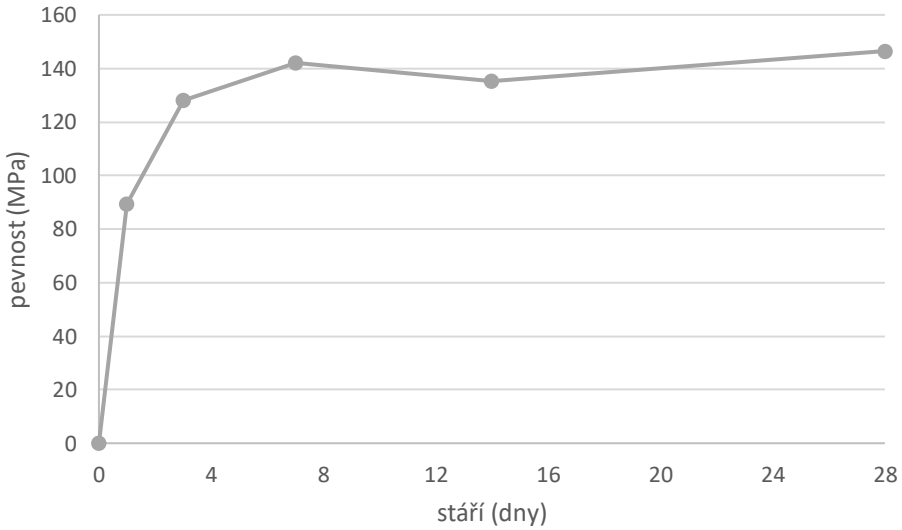
Obr. 26 nárůst pevnosti při teplotě 10 °C



Obr. 27 nárůst pevnosti při teplotě 30 °C

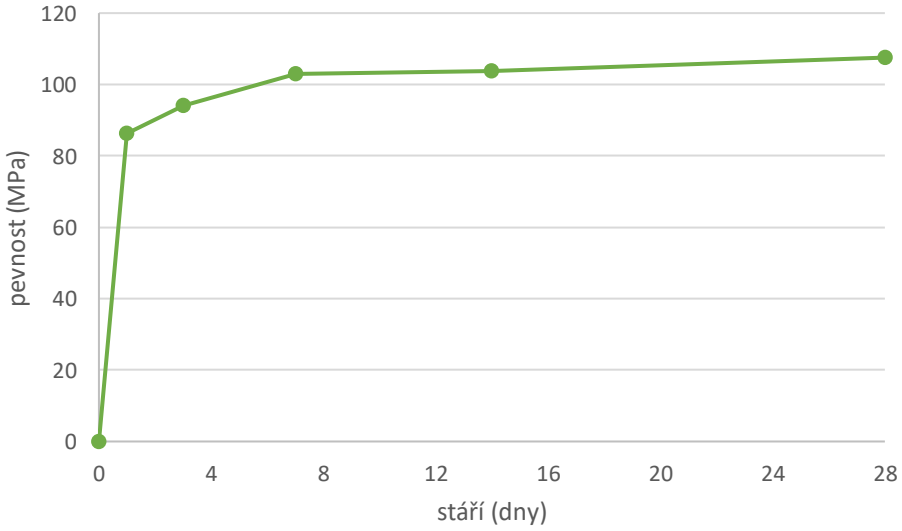
Teplota 30 °C je uváděna jako normální, nebo mírně zvýšená. Nárůst pevnosti betonu odpovídá běžně udávaným průběhům (např. Obr. 4 – použití cementu „R“, Obr. 8 a další).

Pokud se podíváme na růst pevnosti při teplotě 50 °C, vidíme nepatrný pokles pevnosti při stáří 14 dní. Tento pokles byl pravděpodobně způsoben lokálními vadami vzorků.



Obr. 28 nárůst pevnosti při teplotě 50 °C

Nejrychlejší nárůst pevnosti byl u vzorků, které byly nejdříve zahřáty na 99 °C během prvních 24 hodin a dále uchovány ve vodě o teplotě 80 °C. Tato skutečnost je patrná jak z grafu – nejstrmější úsečky spojující počáteční pevnosti, tak z velikosti pevnostního součinitele, který má nejvyšší hodnotu (viz kapitola 5.2). Tento nárůst mohl být částečně ovlivněn pucolánovou reakcí mikrosiliky, protože při zvýšení teploty výrazně roste její reaktivita.

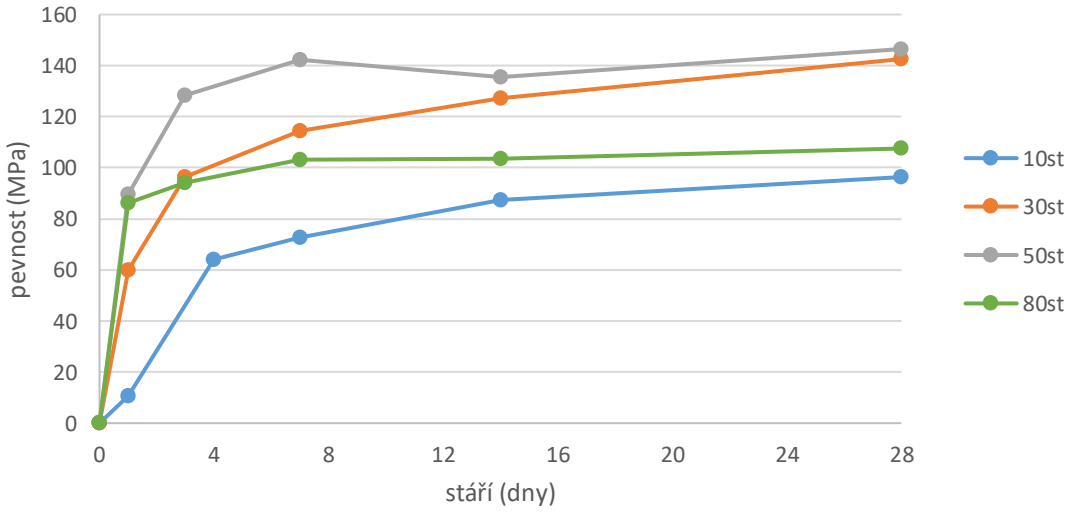


Obr. 29 nárůst pevnosti při teplotě 80 °C

5.2. Porovnání pevností

V následujících grafech je porovnání vývoje tlakových pevností při daných teplotách. V prvním grafu (Obr. 30) jsou shrnuty nárůsty pro různé teploty. Zde je dobře vidět, že při teplotě ošetřování 80 °C se křivka nárůstu pevnosti dostane pod křivku referenčního nárůstu přibližně kolem 3. dne zrání. To dokazuje nevhodnost použití této vysoké teploty na pevnost betonu, kdy nárůst není již tak vysoký a konečná pevnost je mnohem nižší.

Pokud je beton ošetřován při nižší teplotě (10 °C), je počáteční nárůst pomalejší. Při porovnání křivek pro teploty 10 °C a 30 °C je vidět, že přibližně od 3. dne je rychlost nárůstu stejná (křivky jsou přibližně rovnoběžné).



Obr. 30 porovnání nárůstu tlakových pevností

Další možností, jak lze porovnat nárůst pevnosti, je pomocí pevnostního součinitele, jak je uvedeno v úvodu. Ten je definován jako poměr průměrné 2denní a 28denní pevnosti. Jelikož 2denní pevnost není změřena, pro zjednodušení ji stanovíme z lineárního průběhu nárůstu mezi 1denní a 3denní (4denní) pevností, ve skutečnosti by byla nejspíše o trochu vyšší. Vyhodnocení je provedeno podle Tab. 1.

- 10 °C

  $f_{cm,2} \doteq 28{,}5$ MPa

  $f_{cm,28} = 96{,}4$ MPa

  $f_{cm,2}/f_{cm,28} = 0{,}30 \rightarrow$ střední nárůst pevnosti

- 30 °C

  $f_{cm,2} \doteq 78{,}2$ MPa

  $f_{cm,28} = 142{,}6$ MPa

  $f_{cm,2}/f_{cm,28} = 0{,}55 \rightarrow$ rychlý nárůst pevnosti

- 50 °C

  $f_{cm,2} \doteq 108{,}8$ MPa

  $f_{cm,28} = 146{,}5$ MPa

  $f_{cm,2}/f_{cm,28} = 0{,}74 \rightarrow$ rychlý nárůst pevnosti

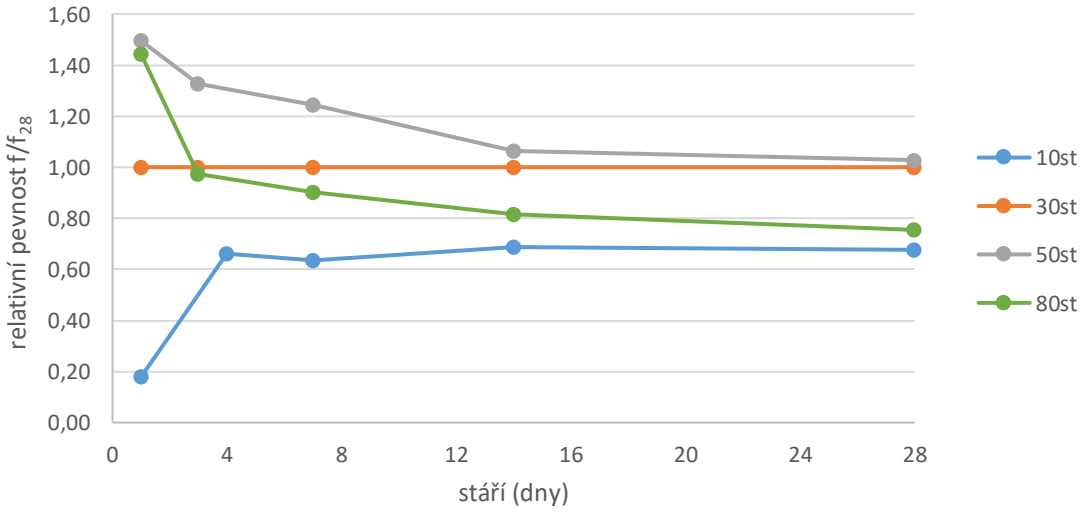
- 80 °C

  $f_{cm,2} \doteq 90{,}2$ MPa

  $f_{cm,28} = 107{,}5$ MPa

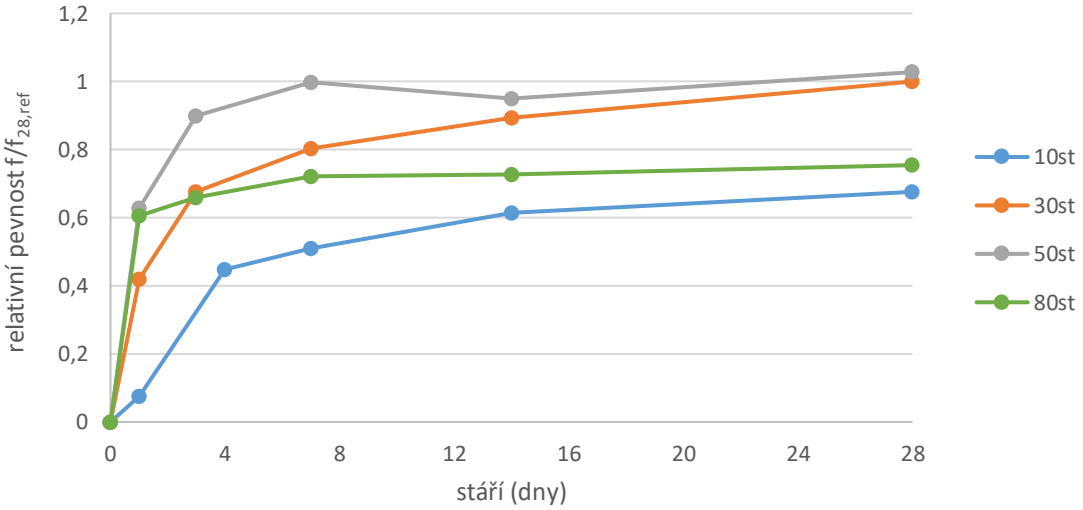
  $f_{cm,2}/f_{cm,28} = 0{,}84 \rightarrow$ rychlý nárůst pevnosti

Ve druhém grafu (Obr. 31) je porovnání relativních tlakových pevností. Toto porovnání ukazuje, kolikrát je daná pevnost vyšší nebo naopak nižší než daná referenční pevnost. Při teplotě ošetřování 80 °C je konečná pevnost pouze 75 % referenční pevnosti. Pokud by tento graf byl pro dlouhodobější pevnosti, křivka pro teplotu ošetřování 10 °C by měla protnou křivku referenční a dostat se nad ni. Dále je vidět, že při teplotě ošetřování 50 °C se křivka postupně přibližuje k referenční křivce. Bylo by tedy vhodné zabývat se také dlouhodobými pevnostmi, zda nemá tato teplota negativní vliv.



Obr. 31 porovnání dílčích relativních tlakových pevností

V posledním grafu (Obr. 32) je porovnání relativních pevností vzhledem k referenční pevnosti po 28 dnech. Tento poměr je v literatuře často udáván, jelikož je porovnáván s vypočtenými pevnostmi, které jsou taktéž obvykle stanoveny jako procento 28denní pevnosti, které chceme dosáhnout.



Obr. 32 relativní nárůst tlakových pevností

Hodnoty průměrných 28denních pevností zkoušeného betonu přesahují hodnotu pro pevnostní třídu C55/67 (f_{cm} = 63 MPa), která je udávána jako hranice pro vysokopevnostní beton. Zkoušený beton je tedy vysokopevnostní (HSC). Lze použít rovnici (3) pro stanovení předpokládané 28denní pevnosti v závislosti na teplotě ošetřování, respektive na průměrné teplotě během prvních 3 dnů. Jako referenční bude uvažována pevnost vzorků zrajících při teplotě 30 °C.

$$S_{28} = \left[1{,}5\left(\frac{T_{A3}}{T_r}\right)^{2{,}5}(W/B)^4 + 0{,}97\right](S_{28})_{T_r} \qquad (3)$$

- vodní součinitel se zohledněním mikrosiliky jako pojiva W/B = 0,24
- referenční teplota T_r = 30 °C
- referenční pevnost $(S_{28})_{Tr}$ = 142,6 MPa
  - teplota 10 °C

    T_{A3} = 10 °C

    S_{28} = 138,4 MPa
  - teplota 50 °C

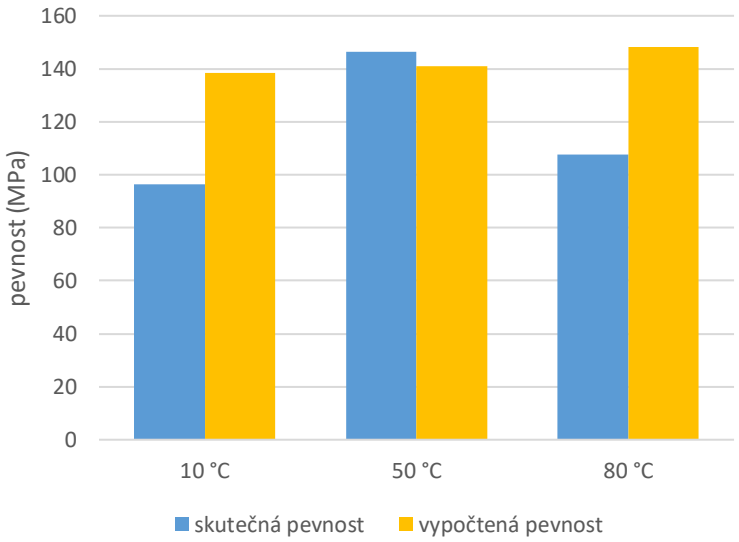
    T_{A3} = 50 °C

S_{28} = 140,9MPa

- teplota 80 °C

  T_{A3} = 86,3 °C

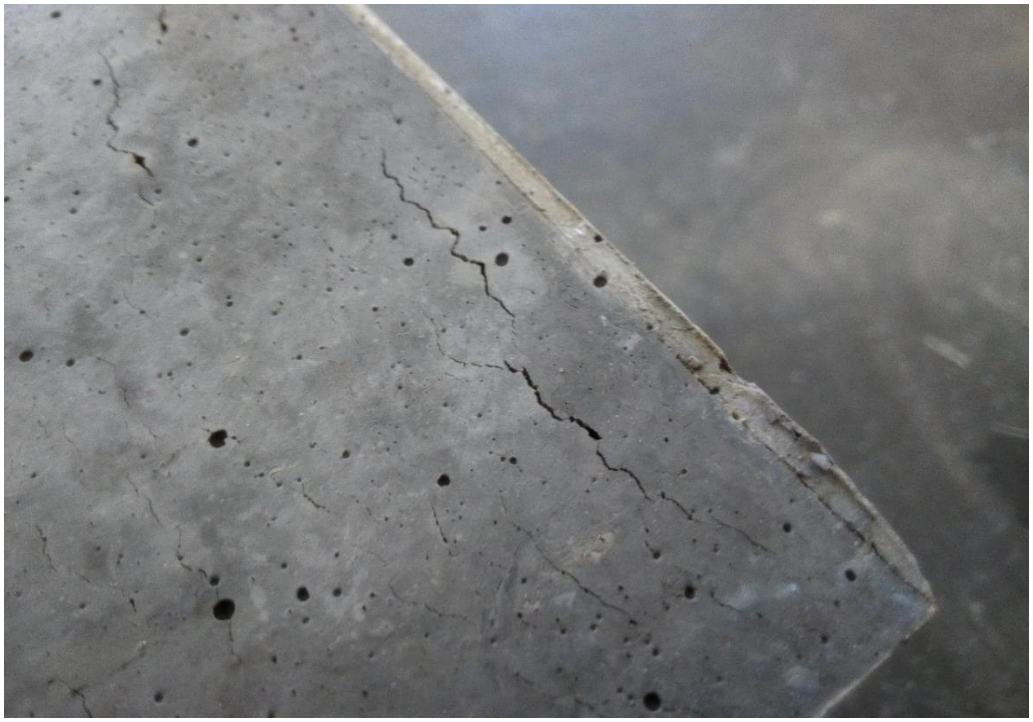
  S_{28} = 148,3 MPa



Obr. 33 porovnání skutečné a vypočtené pevnosti

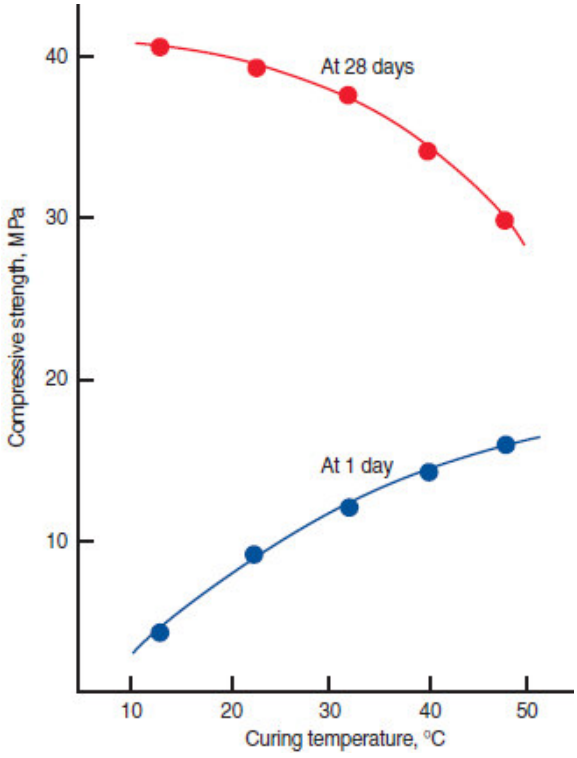
Z grafu je vidět, že pouze při teplotě 50 °C byla skutečná pevnost vyšší než vypočtená. Při nízké teplotě pravděpodobně nedošlo k dostatečné hydrataci mikrosiliky, se kterou počítá vodní součinitel ve vzorci (W/B – water/binder = voda/pojivo). Při teplotě 80 °C byly v betonu značné trhliny, které snížily konečnou pevnost.

Obr. 34 trhliny v betonu ošetřovaném při teplotě 80 °C



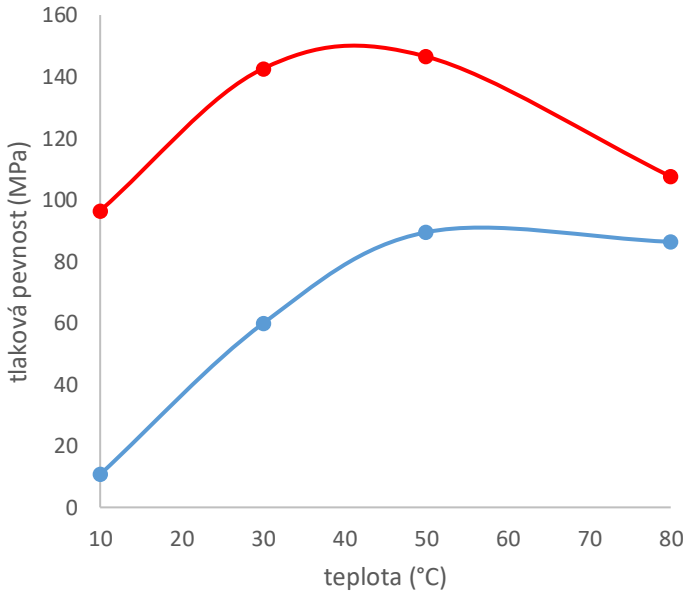
Obr. 35 detail trhlin

V následujících grafech je porovnání 1denní a 28denní pevnosti při různých teplotách. V prvním grafu (z literatury [23]) je 1denní pevnost s vyšší teplotou vyšší, u 28denní pevnosti je tomu naopak.



Obr. 36 závislost 1denní a 28denní pevnosti na teplotě – graf z literatury [21]

Ve druhém grafu (z experimentů) je s vyšší teplotou vyšší 1denní pevnost (modrá křivka), kromě nejvyšší teploty, což je pravděpodobně způsobeno trhlinami v betonu (viz Obr. 34 a Obr. 35), jinak křivka odpovídá předpokladům. Závislost 28denní pevnosti na teplotě neodpovídá průběhu z literatury (Obr. 36). 28denní pevnost při teplotě ošetřování 10 °C nemůže být vyšší než při teplotě 20 °C, k tomu dochází až po delší době zrání. Rozdíl při teplotě 50 °C může být způsoben prostředím, ve kterém beton zraje. V našem případě byl beton umístěn v proteplovací komoře a byl ponořen ve vodě. Pokud byl beton z experimentu, ze kterého vychází graf v literatuře, vystaven běžným podmínkám, mohlo být dosaženo nižšího stupně hydratace kvůli nedostatku vody, a tudíž i nižší pevnosti.



Obr. 37 závislost 1denní a 28denní pevnosti na teplotě – graf z experimentů (modrá křivka – 1denní pevnost, červená křivka – 28denní pevnost)

Z rovnice normového zrání lze přibližně stanovit, kdy bude dosaženo 28denní pevnosti referenčních vzorků při různých teplotách ošetřování. Tuto dobu stanovíme pro teplotu ošetřování 10 °C.

$$M_z = \sum (T + a)^n \cdot \Delta t \qquad (7)$$

kde M_z je hodnota normového zrání (K·h, K·d),

Δt je doba, kdy působí teplota T (h, d),

T je teplota ošetřování (°C),

a je konstanta – pro 0-30 °C a = 10, pro T > 30 °C a = 30,

n je konstanta – pro 0-30 °C n = 1, pro T > 30 °C n = 2. [20]

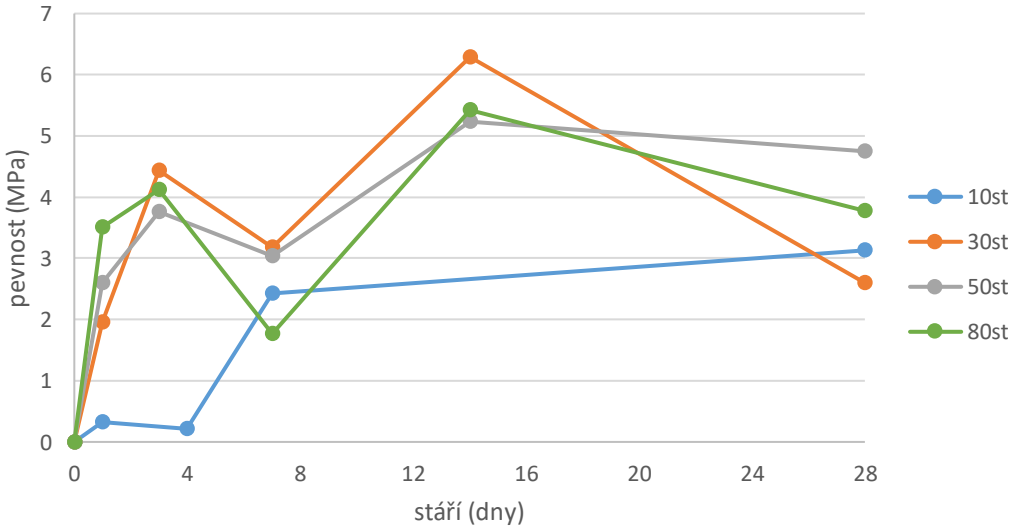
Nejprve stanovíme hodnotu normového zrání z referenčních vzorků.

$M_z = (30 + 10)^1 \cdot 28 = 1120$ K·d

Dosazením této hodnoty a úpravou rovnice získáme dobu potřebnou k dosažení dané pevnosti ve dnech.

$1120 = (10 + 10)^1 \cdot (t - 0) \rightarrow t = 1120 : 20 =$ <u>56 dní</u>

Při teplotě 10 °C by bylo dosaženo 28denní pevnosti referenčních vzorků za 56 dní.



Obr. 38 nárůst tahových pevností

V grafu na Obr. 38 je porovnání vývinu tahových pevností. Většina uvedených pevností je stanovena jako průměrná pevnost 2 vzorků. Pokud se vrátíme zpět k tabulkám, kde jsou uvedené výsledky zkoušek (Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 a Tab. 13), uvidíme, že často je jedna z průměrovaných hodnot mnohem nižší než ta druhá. To potom způsobí nečekané skoky v průběhu nárůstu pevností. Tyto nízké pevnosti mohou být způsobeny například lokálním snížením pevnosti vzorku, nedokonalým osazení vzorku do zkušebního lisu, chybou měření. Chyba měření se projevuje hlavně u počátečních pevností vzorků ošetřovaných při teplotě 10 °C, kde tahová pevnost nepřekročí 0,5 MPa.

6. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Každá metoda urychlování nárůstu pevnosti je jinak finančně náročná. U většiny těchto metod platí, že čím rychlejší je nárůst pevnosti, tím vyšší jsou vstupní náklady. Vyšší vstupní náklady ale ještě nemusí znamenat, že tato metoda není výhodná. Vstupní náklady mohou být kompenzovány například snížením nároků na skladovací prostor nebo zvýšením ceny za dřívější dodání, urychlením výroby díky možnosti dřívějšího odbednění a dalšími výhodami. Tyto faktory ale nejsou v této práci hodnoceny kvůli nedostatku podkladů.

Zde budou tedy porovnány pouze vstupní náklady. Jako referenční cena bude stanovena cena cementu 42,5 N v množství 650 kg na m^3 betonu. Tato cena bude porovnána s cenou při zvýšení množství cementu o 20 %, použití rychlovazného cementu místo cementu s normálním nárůstem pevnosti, použitím urychlovače v množství 1,6 % hmotnosti cementu a proteplováním při použití teploty 50 °C.

Stanovení referenční ceny

Běžná cena cementu pevnostní třídy 42,5 s normálním nárůstem pevnosti se pohybuje kolem 65-80 Kč za pytel o hmotnosti 25 kg. V přepočtu na 1 kilogram je to 2,60-3,20 Kč/kg, průměrná cena je tedy 2,90 Kč/kg. Při dávce 650 kg cementu na m^3 betonu je to

650 · 2,90 = **1885 Kč/m^3**

Zvýšení dávky cementu

Při zvýšení dávky cementu o 20 % bude hmotnost cementu na m^3 betonu 780 kg. Cena za toto množství bude 780 · 2,90 = 2262 Kč/m^3

Zvýšení ceny oproti referenční je 2262 – 1885 = **377 Kč/m^3**

Použití rychlovazného cementu

Cena rychlovazného cementu pevnostní třídy 42,5 je asi 80-100 Kč za 25kilogramový pytel. V přepočtu na 1 kilogram je to 3,20-4,00 Kč/kg, průměrná cena je tedy 3,60 Kč/kg. Při dávce 650 kg cementu na m^3 betonu je to 650 · 3,60 = 2340 Kč/m^3

Zvýšení ceny oproti referenční je 2340 – 1885 = **455 Kč/m^3**

Použití urychlovače

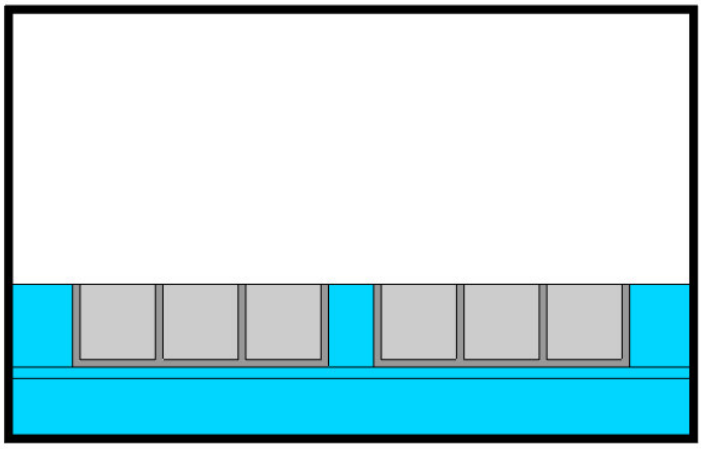
Cena urychlovače Betodur A5 Stachema je 19,50 Kč bez DPH, což odpovídá ceně 23,60 Kč s DPH. Pokud je dávkování urychlovače stanoveno jako 1,6 % hmotnosti cementu, je hmotnost použitého urychlovače 650 · 0,016 = 10,4 kg na m^3 betonu. Cena urychlovače by byla 10,4 · 23,60 = **245,44 Kč/m^3**, což je v tomto případě i rozdíl v ceně.

Použití proteplování

Při použití proteplování je to složitější. Nelze jednoznačně stanovit, za kolik se dá ohřát m^3 betonu, záleží na mnoha faktorech. Cena závisí především na rozměrech prvku, metodě proteplování, době proteplování, typu bednění a mnoha dalších. V tomto případě je stanovena cena za m^3 betonu proteplovaného v komoře Controls Group 55-C0194/D (viz kapitola 3.3).

Předpoklady výpočtu:

- vnitřní rozměr nádrže – 900x640x560 mm
- 6 ks ocelových forem, tloušťka stěn a vnitřních přepážek formy 10 mm, vnější rozměr forem 340x120x110 mm
- formy jsou položeny na ocelovém roštu, objem roštu zanedbán
- každá forma obsahuje 3 krychle o velikosti 100x100x100 mm
- hladina vody dosahuje horní hrany forem, výška hladiny ode dna je 200 mm
- zbytek nádrže je naplněn vzduchem
- nádrž je izolována 10 mm polypropylenu, tepelná vodivost λ = 0,20 W/mK
- počáteční teplota je 20 °C, konečná teplota 50 °C
- rychlost ohřevu 20 °C/h
- příkon nádrže je 4500 W
- délka cyklu 8 h
- průměrná cena za 1 kWh je 4,10 Kč



Obr. 39 schéma nádrže pro výpočet

Postup výpočtu:

1) stanovení objemů

voda $V_w = 0,9 \cdot 0,64 \cdot 0,2 – 6 \cdot 0,34 \cdot 0,12 \cdot 0,11 = 0,088272\ m^3$

vzduch $V_a = 0,9 \cdot 0,64 \cdot (0,56 – 0,2) = 0,20736\ m^3$

beton $V_b = 6 \cdot 3 \cdot 0,1^3 = 0,018\ m^3$

ocel $V_o = 6 \cdot (0,34 \cdot 0,12 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,34 \cdot 0,1 \cdot 0,01 + 4 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,01)$

$V_o = 0,008928\ m^3$

2) výpočet tepla, které je potřeba dodat – bez ztát

Objemové hmotnosti:

voda $\rho_w = 1000\ kg/m^3$

vzduch $\rho_a = 1,2\ kg/m^3$

beton $\rho_b = 2300\ kg/m^3$

ocel $\rho_o = 7850\ kg/m^3$

Měrné tepelné kapacity:

voda $c_w = 4,18\ kJ/kg°C$

vzduch $c_a = 1,003\ kJ/kg°C$

beton $c_b = 0,88\ kJ/kg°C$

ocel $c_o = 0,46\ kJ/kg°C$

Ohřívání ze 20 °C na 50 °C → $\Delta t = 30$ °C

Celkové potřebné teplo beze ztrát:

$Q = (V_w \cdot \rho_w \cdot c_w + V_a \cdot \rho_a \cdot c_a + V_b \cdot \rho_b \cdot c_b + V_o \cdot \rho_o \cdot c_o) \cdot \Delta t = 13\ 136,9\ kJ = 3,65\ kWh$

na m^3 betonu 3,65/0,018 = <u>202,73 kWh</u>

3) výpočet ztrát

Když je nárůst teploty 20 °C/h, potom:

- teoretický výkon $P = 4,5\ kW \cdot 1\ h = 4,5\ kWh$
- teplo potřebné pro $\Delta t = 20$ °C → $Q_{20°C} = 8\ 757,9\ kJ = 2,43\ kWh$
- účinnost $\eta = Q_{20°C}/P = 0,54$

Při započtení ztrát je potřebné množství elektrické energie na ohřátí 1 m^3 betonu:

202,73/0,54 = <u>375,43 kWh</u>

Při rychlosti ohřevu 20 °C/h bude teploty 50 °C dosaženo za 1,5 h, zbylých 6,5 h bude teplota pouze udržována a budou kompenzovány ztráty prostupem.

Velikost ztrát prostupem:

- plocha nádrže $A = 2 \cdot (0{,}9 \cdot 0{,}64 + 0{,}9 \cdot 0{,}56 + 0{,}64 \cdot 0{,}56) = 2{,}8768\ m^2$
- prostup tepla $U = 0{,}01/0{,}20 = 0{,}05\ W/m^2K$

Pro rozdíl teplot 30 °C, ploše nádrže 2,8768 m^2 a době udržování 6,5 h je potřebná el. energie na kompenzaci ztrát: $0{,}05 \cdot 2{,}8768 \cdot 30 \cdot 6{,}5 = 28{,}05$ Wh pro 0,018 m^3 betonu (nádrž)

Na 1 m^3 betonu: 28,05/0,018 = 1558,3 Wh = 1,56 kWh

Celková el. energie potřebná pro 8hodinový cyklus: 375,43 + 1,56 = 376,99 kWh

4) stanovení ceny

Při průměrné ceně 4,10 Kč/kWh je celková cena na 1 m^3 $376{,}99 \cdot 4{,}10 =$ **1545,66 Kč/m^3**, což je opět rozdíl v ceně.

Ve výpočtu je zanedbán vliv hydratačního tepla, které by částečně redukovalo potřebu el. energie potřebnou pro ohřev. Množství vzniklého hydratačního tepla je závislé na přesném složení konkrétního cementu.

7. ZÁVĚR

Proteplování je jedna z metod pro urychlení nárůstu počáteční pevnosti betonu. Výsledky provedených experimentů ukazují, že proteplování při teplotě 50 °C je vhodné pro zvyšování počáteční pevnosti vysokopevnostního betonu dané receptury. Nárůst pevnosti byl vyšší než při referenční teplotě a nedošlo ke snížení konečné pevnosti. Před případným uvedením do praxe by bylo nutné zkoušet vzorky v delším časovém horizontu. Z časových a kapacitních vzorků nebylo možné vyrobit více vzorků a zkoušet například 90denní pevnost.

Při ošetřování při teplotě 80 °C byl potvrzen negativní vliv použití teplot vyšších než 60-70 °C. Ačkoli byl nárůst pevnosti nejrychlejší, 3denní pevnost již byla nižší než referenční a po 28 dnech bylo dosaženo pouze 75 % referenční pevnosti. Dále byly viditelné značné trhliny v betonových vzorcích. Z těchto důvodů je použitá teplota nevhodná.

Pro posouzení vlivu zvýšené teploty na tahovou pevnost by bylo třeba použít jinou zkušební metodu, nebo vyrobit větší množství vzorků pro eliminaci chyby. Z průběhu nárůstu pevností stanovených zkouškami nelze vliv teploty posoudit.

Nelze přesně určit, jak dlouho je vhodné beton zahřívat. U vysokopevnostního betonu bylo dosaženo pevnosti téměř 60 MPa po 24 hodinách v běžných podmínkách, pevnost potřebná k manipulaci s dílci je obvykle kolem 20 MPa. Při zahřívání na 50 °C je 1denní pevnost téměř 90 MPa. Stačilo by tedy zahřívat například pouze přes noc, kdy je možné částečně využívat nižší ceny elektrické energie při dvoutarifní sazbě. Tím by byly alespoň částečně sníženy náklady na proteplování.

Z ekonomického posouzení vstupních nákladů vychází proteplování jako nejméně efektivní metoda. Pro reálné posouzení ekonomické náročnosti by bylo třeba zahrnout mnoho dalších faktorů, jako například možnost rychlejšího odbednění a opětovného použití forem, velikost skladovacích prostorů a náklady na skladování, nebo zvýšení ceny výrobku za rychlé dodání. Při zahrnutí všech těchto vlivů může být poměr nákladů různých metod opačný. Při reálném použití proteplování také záleží na použité metodě proteplování, velikosti a tvaru prvku, teplotě proteplování a konkrétním složení použitého betonu.

V současné době u nás není proteplování používáno při výrobě betonů běžných pevností. V porovnání s použitím urychlovačů je tato metoda ekonomicky i technicky náročnější a při jejím použití vzniká více emisí. Vzhledem ke snižování emisí a spotřeby

elektrické energie není tato metoda pro nárůst pevnosti betonu příliš efektivní. Navíc proteplování může mít několik vedlejších účinků, které zhoršují konečné vlastnosti betonu. Budoucnost proteplování je tedy v odstranění negativních vlivů a snížení produkce emisí. Při rozšíření produkce prefabrikátů z vysokopevnostního betonu může být proteplování využíváno díky jeho příznivého vlivu na reaktivitu pucolánových příměsí.

ZDROJE

[1] K. Kolář a P. Reiterman, Betonujeme svépomocí, Praha: Grada, 2010.

[2] Českomoravský Beton, Českomoravský Cement a Českomoravský Štěrk, „Příručka technologa Beton," 2010. [Online]. Available: http://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a_uploaded_prirucka-technologa-beton.pdf. [Přístup získán únor 2018].

[3] Bc. Marek Horský, Ing. Ivana Lusová a Ing. Peter Briatka, Ph.D., „ČINITELE OVLIVŇUJÍCÍ RYCHLOST NÁRŮSTU PEVNOSTI BETONU I," 8 srpen 2013. [Online]. Available: https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/cinitele-ovlivnujici-rychlost-narustu-pevnosti-betonu-i.. [Přístup získán únor 2018].

[4] Svaz výrobců betonu, „Vývoj pevnosti betonu," EBETON, [Online]. Available: http://www.ebeton.cz/pojmy/vyvoj-pevnosti-betonu. [Přístup získán únor 2018].

[5] Prof. Dr. Ing. Zdeněk Šauman, DrSc., Maltoviny I, Vysoké učení technické v Brně, 1993.

[6] doc. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D., doc. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D. a prof. Ing. Jiří Hošek, DrSc., Materiálové inženýrství I, Praha: ČVUT V Praze, 2011.

[7] J. Ščučka a P. Martinec, Stavební hmoty 1, Ostrava: FAST VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013.

[8] Doc. Ing. Jiří Adámek, CSc., Ing. Bohumil Novotný, CSc. a Ing. Jan Koukal, Stavební materiály, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1996.

[9] Ing. Jan Vetchý, „Přísady do betonů a malt II," 2015. [Online]. Available: https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-ii/. [Přístup získán květen 2018].

[10] Stavební komunita, „Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu," 2009. [Online]. Available: https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/urychlovace-tuhnuti-atvrdnuti-betonu. [Přístup získán duben 2018].

[11] V. Trefil, „Snížení nákladů na výrobu prefabrikátů použitím moderní přísady urychlující trvdnutí," 2013. [Online]. Available: https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Czech%20(Czech%20Republic)/Bo%C5%BEury/SN%C3%8D%C5%BDEN%C3%8D%20N%C3%81KLAD%C5%AE%20NA%20V%C3%9DROBU%20PREFABRIK%C3%81T%C5%AE%20POU%C5%BDIT%C3%8DM%20MODERN%C3%8D%20P%C5%98%C3%8DSADY%. [Přístup získán květen 2018].

[12] Keun-Hyeok Yang, Jae-Sung Mun a Myung-Sug Cho, „Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete," 2015. [Online]. Available: https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/965471/. [Přístup získán červenec 2018].

[13] Hasim Abdul Razak a Fathollah Sajedi, „The effect of a heat treatment on the compressive strength of cement-slag mortars," 2011. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911003074. [Přístup získán červenec 2018].

[14] M. Collepardi, Moderní beton, Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009.

[15] *ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí,* Praha: ÚNMZ, 2010.

[16] *ČSN 73 2400 Provádění a kontrola betonových konstrukcí,* Praha: ÚNMZ, 1987.

[17] *ČSN EN 13369 Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty,* Praha: ÚNMZ, 2013.

[18] Derabla Riad a Benmalek Mohamed Larbi, „Acceleration of the Hardening of Concrete Made with Mineral Admixtures by Using a Heat Treatment Process," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267152418_Acceleration_of_the_Hardening_of_Concrete_Made_with_Mineral_Admixtures_by_Using_a_Heat_Treatment_Process. [Přístup získán červenec 2018].

[19] A. Cwirzen, „The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete," 2006. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/250071779_The_effect_of_the_heat-treatment_regime_on_the_properties_of_reactive_powder_concrete. [Přístup získán červenec 2018].

[20] Doc. Ing. Rudolf Hela, CSc., Technologie betonu, Brno: VÚT Brno, 2005.

[21] P. Havlásek, „Modely pro dotvarování a smršťování betonu," 2010. [Online]. Available: http://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/1/15/Bazant_2010_havlasek.pdf. [Přístup získán září 2018].

[22] S. O. Ekolu, „Heat curing practice in concrete precasting technology - problems and future directions," 2006. [Online]. Available: https://ujcontent.uj.ac.za/vital/access/manager/Repository/uj:16773. [Přístup získán červenec 2018].

[23] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff a William C. Panarese, „Design and Control of Concrete Mixtures - chapter 12 - Curing concrete," 2002. [Online]. Available: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap12.pdf. [Přístup získán červenec 2018].

[24] Štěrba Alain a Ryšavý Jaroslav, „Zařízení pro proteplování betonových dílců," [Online]. Available: http://skpatents.com/8-270759-zarizeni-pro-proteplovani-betonovych-dilcu.html. [Přístup získán květen 2018].

[25] Bc. Lenka Hučínová, „Studium vlastností synteticky vyrobeného ettringitu, Diplomová práce," 2018. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=167224. [Přístup získán říjen 2018].

[26] Yasser Amine, Nordine Leklou a Ouali Amiri, „Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes," 2015. [Online]. Available:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217356655. [Přístup získán červenec 2018].

[27] M. Schmidt, E. Fehling a C. Geisenhanslüke, „Ultra High Performance Concrete (UHPC),“ Kassel, 2004.

[28] Shuai Nie, Shuguang Hu, Fazhou Wang, Pan Yuan, Yaohong Zhu, Junneng Ye a Yunpeng Liu, „Internal curing - A suitable method for improving the performance of heat-cured concrete,“ 2016. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816309047. [Přístup získán červenec 2018].

[29] Ing. Jaroslav Kadlec, „Konstrukční vlastnosti ultralehkých betonů a jeho optimální využití v konstrukcích,“ 2017. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=166122. [Přístup získán únor 2018].

[30] Controls S.p.A., „CONTROLS GROUP,“ [Online]. Available: http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/programmable-accelerated-curing-tanks.php. [Přístup získán říjen 2018].