

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody urychlování tvrdnutí betonu

Acceleration methods of concrete hardening

vedoucí práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

vypracovala: Markéta Škorpilová

2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Škorpilová Jméno: Markéta Osobní číslo: 486142

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Metody urychlování tvrdnutí betonu

Název bakalářské práce anglicky: Methods of accelerating the hardening of concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši na téma teplotního ošetřování betonu se zaměřením na následující body:

- Vliv zvýšené a snížené teploty zrání betonu na tlakovou pevnost.
- Urychlování nárůstu pevnosti betonu pomocí přísad.
- Popište vliv teploty na průběh hydratace cementu.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:

- Z jedné receptury vyrobte sérii krychlí, které necháte zrát v laboratorním prostředí po dobu 28 dnů, ve vodním prostředí po dobu 28 dnů, v prostředí teplého vzduchu a v prostředí teplé vody.
- Na vyrobených vzorcích sledujte tlakovou pevnost betonu.
- Stanovte ideální teplotu ohřevu, která zajistí co v nejkratším čase stejnou tlakovou pevnost jako je normová 28 denní hodnota.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000

Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Šauman, Z.: Maltoviny I, VUT v Brně, 1993

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 14.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

16.2.2022

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s využitím poskytnutých odborných konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci použila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědoma toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon). Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne 12.5.2022

.....
Markéta Škorpilová

Poděkování

Ráda bych poděkovala zejména panu doc. Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za ochotu, vstřícnost a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také mé rodině a příteli za podporu během studia.

Abstrakt

Moje bakalářská práce se nazývá „Metody urychlování tvrdnutí betonu“ a skládá se ze dvou částí, teoretické a experimentální.

Teoretická část se především zaměřuje na proces hydratace cementu a na všechny faktory, které tento proces ovlivňují a tím ovlivňují i výslednou pevnost betonu. Konkrétně je řešena teplota a vlhkost prostředí, ve kterém beton zraje, vodní součinitel cementu, jemnost cementu-neboli měrný povrch a také obsah přísad. Ale aby se tato problematika mohla zkoumat, nejprve je podrobně rozebrán samotný proces hydratace cementu a hydratační teplo, včetně všech procesů a teorií hydratace. Pro lepší orientaci čtenáře v problematice hydratačních procesů cementu je v první části bakalářské práce vysvětleno složení cementu a s tím související mineralogické složení slínku.

Experimentální část byla zaměřena na porovnávání 7denních tlakových pevností u jednotlivých krychelných vzorků o délce stran 100 mm, které byly odlišně ošetřovány při procesu hydratace. Celkem se zkoumalo 8 různých postupů, které se lišily především okolní teplotou, relativní vlhkostí vzduchu, přístupem vzduchu a obsahem přísad.

Celý experiment se prováděl v laboratoři betonových konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT. Plán experimentu a všechny zkoušky byly provedeny pod dozorem vedoucího laboratoře a současně vedoucího mé bakalářské práce panem Ing. Josefem Fládrem, Ph.D..

Klíčová slova

beton, cement, slínek, slínkové minerály, hydratace cementu, hydratační teplo, stádia hydratace, teorie hydratace, faktory ovlivňující hydrataci, vliv teploty na pevnost, vliv vlhkosti na pevnost, urychlování nárůstu pevnosti

Abstract

My bachelor thesis, named Acceleration methods of concrete hardening, is divided into theoretical and experimental part. The main goal of this work was to compare theoretical assumptions with experimental results and provide justification for chosen method.

The theoretical part focuses primarily on cement hydration and all factors impacting the process and the final concrete strength as a result. Specifically, an ambient humidity and temperature at which concrete hardens is discussed. Furthermore, other factors such as water coefficient of cement, fineness, or more precisely specific surface of cement and also the component content are introduced. But in order to address this problematics properly It was necessary to describe the process of cement hydration and hydration heat including all processes and hydration theories first. For the reader to better understand the problematics of hydration processes of cement there is an explanation of cement composition and related mineralogical structure of cement clinker in the first part of this thesis.

The experimental part of this bachelor work is focused on comparing 7 day compressive strength of individual cubic samples with length of each side equal to 100 mm which were treated differently throughout the process of hydration. In total, there were 8 different procedures examined. These procedures differed mostly in ambient temperature, relative humidity, access of air and concentration of ingredients.

The entire experiment was carried out in laboratory of Department of Concrete and Masonry Structures at Faculty of Civil Engineering of Czech Technical University in Prague. The experiment plan and all relevant tests were performed under supervision of the Head of Laboratory and my bachelor thesis supervisor Mr. doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D..

Key words

concrete, cement, clinker, clinker minerals, cement hydration, hydration heat, hydration stages, hydration theory, factors influencing hydration, influence of temperature on strength, influence of humidity on strength, acceleration of strength increase

Obsah

TEORETICKÁ ČÁST	9
1. Úvod.....	9
2. Cement.....	10
3. Složky cementu	10
3.1 Slínkové minerály	10
3.1.1 Alit (C_3S)	11
3.1.2 Belit (C_2S).....	12
3.1.3 Trikalciumaluminát (C_3A).....	12
3.1.4 Brownmillerit – celit (C_4AF).....	12
3.1.5 Skelná fáze.....	13
3.1.6 Vedlejší složky	13
4. Hydratace cementu a hydratační teplo.....	13
4.1 Teorie hydratace	15
4.1.1 La Chatelierova teorie	15
4.1.2 Michaelisova teorie	15
4.1.3 Současná teorie	15
4.2 Stádia hydratace	16
4.2.1 První – indukční	16
4.2.2 Druhé – tuhnutí	17
4.2.3 Třetí – tvrdnutí.....	18
5. Faktory ovlivňující hydrataci cementu	18
5.1 Vliv teploty na průběh hydratace a výslednou pevnost	18
5.2 Vliv vlhkosti na průběh hydratace.....	20
5.3 Vliv jemnosti cementu	21
5.4 Vliv vodního součinitele.....	21
5.5 Vlivy přísad	23
5.5.1 Urychlovací přísady	23
5.5.2 Retardační přísady	23
5.6 Vliv příměsí.....	24
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
6. Představení experimentu	25
7. Použité přístroje	25
8. Výroba zkušebních vzorků.....	28



8.1	Receptura betonové směsi	28
8.1.1	Použité materiály	29
8.2	Betonáž	32
9.	Popis způsobů ošetřování vzorků.....	33
10.	Popis tlakové zkoušky a prezentace výsledků	37
11.	Prezentace výsledků.....	39
12.	Diskuze nad výsledky	43
12.1	Porovnání vzorků zrajících za různých teplot.....	43
12.1.1	Porovnání vzorků zrajících v sušárně za různých teplot	44
12.1.2	Porovnání vzorků zrajících ve vodě za různých teplot	45
12.2	Porovnání vzorků v závislosti na užití urychlovací přísady	46
12.3	Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty v jiných prostředích	47
12.3.1	Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty ve vodě a na vzduchu	47
12.3.2	Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty ve vodě a v sušárně Matest.....	48
13.	Závěr	50
14.	Seznam použitých obrázků.....	52
15.	Seznam použitých tabulek.....	53
16.	Reference	54
17.	Přílohy – protokoly	56

TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Moderní beton, tak jak si ho představujeme dnes, je lidmi využíván zhruba 120 let. Avšak historie betonu zahrnuje období od starověku, kdy egyptští, feničtí, řečtí a římské stavitelé začali používat materiál, který svým charakterem odpovídá dnešnímu betonu. V Jeruzalémě jsou dodnes využívány vodní nádrže z období 1 000 let př. n. l., v Římě vznikly známé stavby jako například jako Appiovy silnice, římské lázně, Koloseum nebo Pantheon.

„Počátky moderního betonu jsou spjaty s poznáním technologie výroby hydraulických pojiv, zejména cementu. Objev potřeby pálení základní suroviny na mez slinutí byl patentován v polovině 19. století. Od Všeobecné světové výstavy v Paříži v roce 1900, se beton používá jako jeden ze základních konstrukčních materiálů.“ [4]

V současné době je beton jedním z nejvyužívanějších stavebních materiálů po celém světě. Díky navýšení pevnosti betonu kombinací kvalitního cementu a betonářské výztuže je dnes možné stavět velmi variabilní tvary konstrukcí. Zmíněná variabilita konstrukčních tvarů je také umožněna díky monolitickým technologiím, které beton nabízí. Cement je spolu s kamenivem a vodou jednou ze tří základních složek betonu. Cement po smísení s vodou vytvoří cementovou pastu, která je velmi snadno zpracovatelná. Při kontaktu těchto dvou látek nastává proces chemických reakcí, který nazýváme hydratace. Díky hydrataci může být beton využívaným konstrukčním materiálem, protože přechází z plastické hmoty, která je tvárná a snadno zpracovatelná, do materiálu, který se vlastnostmi podobá hornině díky svojí pevnosti a mechanické odolnosti. Právě ten fakt, že výsledná pevnost betonu a čas, ve kterém je dosažena, je závislý na procesu hydratace (nikoliv pouze na druhu používaného cementu), mi dal téma pro moji závěrečnou bakalářskou práci.

Na stavební firmy a výrobce prefabrikovaných dílců je v současnosti vyvíjen stále větší tlak z hlediska rychlosti výroby, a proto je dobré vědět, jaké metody urychlují tvrdnutí betonu. Cílem mé bakalářské práce je vyhodnotit 7denní tlakové pevnosti v závislosti na různém ošetřování betonu a na přítomnosti urychlovače. Jednotlivá ošetřování se vzájemně liší teplotou, prostředím a vlhkostí.

2. Cement

Cement je anorganická látka s výraznou hydraulitou. Po smíchání s vodou tuhne a tvrdne na vzduchu i pod vodou a v důsledku hydratačních reakcí vzniká cementový tmel. Po zatvrdnutí si zachová svoji pevnost a objemovou stálost a je schopen odolávat mechanickému namáhání. V současnosti je ve stavebním průmyslu nejpoužívanější portlandský cement a jeho spotřeba se každým rokem výrazně zvyšuje. [2]

Cement podle ČSN EN 197-1, označovaný jako cement CEM, musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a s vodou umožnit výrobu betonu nebo malty zachovávající po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít určitou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost. [9]

3. Složky cementu

Portlandský cement je základní složkou všech moderních hydraulických pojiv a můžeme říci, že jeho hlavní složkou je portlandský slínek. Portlandský slínek se získává výpalem při teplotě přibližně 1 450 °C surovinové moučky (suchý způsob), rychlým ochlazením a následným mletím na požadovanou jemnost. Suroviny pro výrobu portlandského cementu by měly obsahovat složky nezbytné pro výrobu kvalitního portlandského slínku s procentuálně malým množstvím sádrovce jako regulátoru tuhnutí. Základní 3 skupiny surovin pro výrobu jsou vápenaté složky, zeminy (jíly, břidlice) a doplňující korekční složky. Musí obsahovat správné mineralogické složení a musí mít vhodné fyzikálně-chemické vlastnosti. Minerály, které hrají důležitou roli v hydratačních procesech, jsou C_3S (alit), C_2S (belit), C_3A (trikalciumaluminát), C_4AF (brownmillerit) a skelné fáze. [9]

Další složky, které cement obsahuje v různém množství, jsou závislé na typu cementu. Můžeme tedy říci, že jsou to příměsi. Konkrétně se jedná o pucolán, popílek, strusku, křemičitý úlet, kalciovou břidlici anebo vápenec.

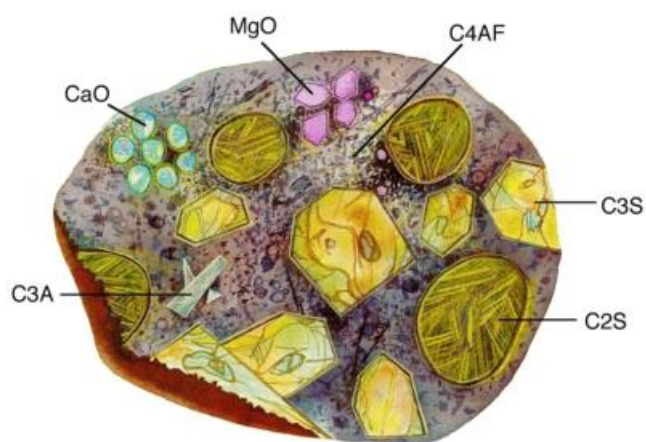
3.1 Slínkové minerály

Portlandský slínek obsahuje více než 20 druhů různých minerálních složek, z nich největší vliv na vlastnosti výsledného cementu mají výše uvedené 4 hlavní slínkové minerály. V tabulce č.1 je pro přehlednost uvedené jejich slovní označení, zkrácený vzorec, chemický vzorec a procentuální podíl ve slínku.



HLAVNÍ SLÍNKOVÉ MINERÁLY				
Slovní název	Zkrácený vzorec	Chemický vzorec	Chemický název	Podíl minerálu ve slínku
Alit	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	trikalciumsilikát (křemičitan trojvápenatý)	45 - 60 %
Belit	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	dikalciumsilikát (křemičitan dvojvápenatý)	15 - 30 %
Amorfni fáze	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	trikalciumaluminát (hlinitan trojvápenatý)	5 - 12 %
Celit	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	tetrakalciumaluminátferit (hlinitoželezitan čtyřvápenatý)	10 - 20 %

Tabulka 1: Hlavní slínkové minerály [10]



Obrázek 1: Schematické znázornění řezu zrnkem portlandského cementu [15]

3.1.1 Alit (C₃S)

Alit je nejdůležitějším slínkovým minerálem. Jedná se o roztok s příměsí trikalciumsilikátu a s příměsí oxidů MgO, Al₂O₃, Na₂O a K₂O. Dnes se jeho obsah pohybuje kolem 65 %, dříve byl podíl nižší z důvodu méně dokonalého chlazení při výrobě. Dosahuje vysokých počátečních i konečných pevností. Vykazuje se vysokou hydratační rychlostí a vysokým vývinem hydratačního tepla, tyto procesy budou následně v práci více probrány (viz kapitola 4). Hodnota hydratačního tepla se pohybuje kolem 500 kJ/kg. Při hydrataci alitu se mimo jiné uvolní hydroxid vápenatý. Hydroxid vápenatý má za následek nízkou odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí, zejména proti působení síranových vod, kdy vzniká sekundární ettringit. Sekundární ettringit se vyznačuje nárůstem objemu až o 270 % původního, což má za následek prakticky dokonalý rozpad cementového kamene a z toho plynoucí havárii konstrukce. [9]

Rovnice hydratace alitu:



3.1.2 Belit (C₂S)

Množství belitu ve slínku je přibližně kolem 20 %, tím pádem má po alitu druhý největší podíl. V minulosti bylo množství belitu ve slínku větší z důvodu nedokonalého chlazení při výrobě. Tento minerál se vyznačuje poměrně dobrými dlouhodobými pevnostmi, ale nízkými pevnostmi počátečními. Je také charakterizován jeho horší melitelností ve srovnání s alitem. Hydratace je pozvolná a hydratační teplo je zhruba 250 kJ/kg, což je výhodou u masivních konstrukcí kvůli udržení menšího teplotního gradientu (viz kapitola 4).

Rovnice hydratace belitu:



Jediným rozdílem mezi hydratací belitu a alitu je množství uvolněného Ca(OH)₂, kdy u hydratace belitu dojde k uvolnění pouze 1 molu Ca(OH)₂, zatímco u hydratace alitu se uvolní moly tři.

3.1.3 Trikalciumaluminát (C₃A)

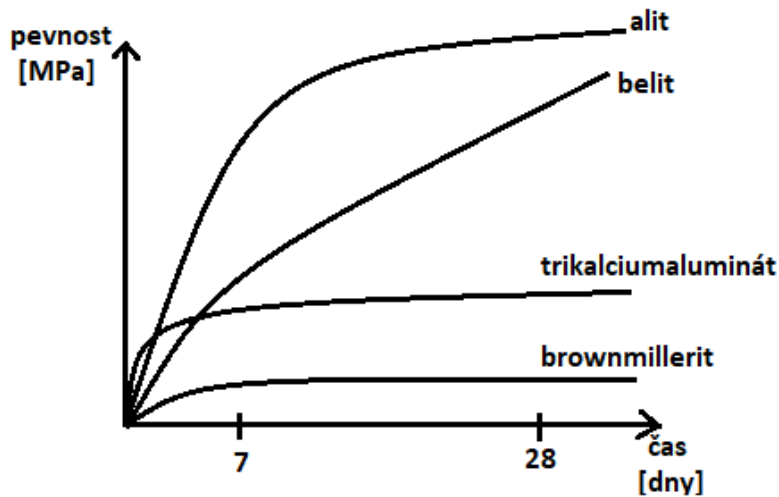
Tento minerál se v portlandském slínku vyskytuje kolem 8-10 %. Má velmi vysokou reaktivnost s vodou, tím pádem rychle tuhne a tvrdne. Právě kvůli tomuto minerálu je do cementu při mletí přidáván sádrovec (5–6 %) jako regulátor tuhnutí. Konečné pevnosti jsou ale poměrně nízké a postupem času degradují. Hodně vysoký vývin hydratačního tepla (860 kJ/kg) má za následek nutnost ošetřování zrajících betonových konstrukcí a nevhodnost použití cementů s vysokým obsahem tohoto minerálu na masivní konstrukce. Trikalciumaluminát je součástí tzv. tmavé mezerní hmoty cementu, také označované jako spojovací. Když má cement nižší zastoupení tohoto minerálu, způsobuje to světlejší zabarvení. [9]

3.1.4 Brownmillerit – celit (C₄AF)

Celit je ve slínku přibližně v množství kolem 10 %. Hydratační teplo nenabývá žádných extrémů (420 kJ/kg). Celit dosahuje nízkých pevností, ale zase má velmi vysokou chemickou odolnost, proto je snaha



o zvýšení jeho obsahu na úkor trikalciumaluminátu. Brownmillerit je součástí tzv. světlé mezerní hmoty cementu. [9]



Obrázek 2: Nárůst pevnosti v čase jednotlivých slínkových minerálů [9]

3.1.5 Skelná fáze

Jedná se o ztuhlou taveninu, vzniklou nedokonalou krystalizací při chlazení slínku. Tvoří společně s trikalciumaluminátem tmavou mezerní hmotu. Množství těchto složek se může pohybovat v rozmezí 2 - 25 %. Obsahuje části C_3A , MgO , CaO a alkálií. Vyznačuje se značnou vazností a má malé smrštění. Také má dobrou odolnost vůči síranovým vodám. [9]

3.1.6 Vedlejší složky

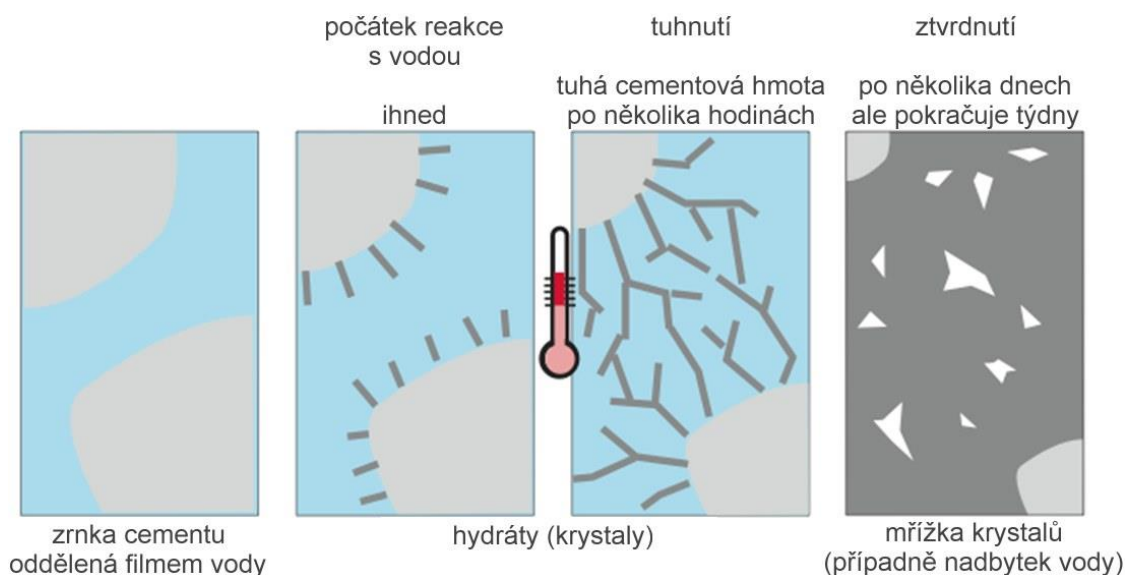
Kromě hlavních slínkových minerálů se ve slínku vyskytuje taky volný MgO a CaO , alkálie, P_2O_5 a chloridy. [9]

4. Hydratace cementu a hydratační teplo

K hydrataci cementu nebo přesněji k hydrataci cementových zrn dochází po smíchání s vodou a v důsledku hydratačních reakcí pak dochází ke vzniku jemných krystalů, které vzájemně prorůstají. Tím nastává tuhnutí (postupná ztráta zpracovatelnosti) a tvrdnutí (postupné nabývání pevnosti). Jinými slovy

proces hydratace je soubor chemických reakcí, při kterých se bezvodné minerální fáze cementu (viz. kapitola 3.1) přemění na nové sloučeniny, které se nazývají hydratační produkty a obsahují chemicky vázanou vodu. Hydratační produkty jsou ve vodě nerozpustné a stálé. Proces hydratace začíná probíhat hned po prvním kontaktu cementových zrněk s vodou, jednotlivé složky slínku však nereagují stejnou rychlostí. První hydratuje trikalciumaluminát, jak je již výše uvedeno, jeho rychlá hydratace musí být zpomalena přidáním retardéru. Na druhém místě z hlediska rychlosti hydratace je celit spolu s alitem a nejpomaleji hydratuje belit.

Tyto procesy hydratace jsou závislé na mineralogickém složení a jemnosti cementu, objemu vody, teplotě, okolní vlhkosti a také na případném obsahu přísad a příměsí. Ukazatelem hydratace je stupeň hydratace, což je podíl hmotnosti zhydratovaného cementu k původní hmotnosti cementu. [4] [12]



Obrázek 3: Hydratace cementu [4]

Při reakci těchto látek dochází k uvolňování hydratačního tepla, jedná se tedy o exotermní chemické reakce. To je velmi zásadní jev z hlediska stavitelství, protože velké množství tepla, které se uvolňuje, způsobuje v tuhoucím betonu napětí, které může mít negativní vliv na výslednou pevnost a trvanlivost.[4]

Měrné hydratační teplo, vyjádřené v kJ/kg, je teplo vyvinuté v daném čase při hydrataci 1 kg cementu. Je závislé na druhu a pevnostní třídě cementu hlavně v počátečním období hydratace. Čím vyšší je obsah portlandského slínku a čím vyšší je jeho jemnost mletí (čím vyšší je pevnostní třída cementu), tím větší je měrné hydratační teplo, vyvinuté v daném časovém období. [1]

Pro nás je měrné hydratační teplo důležité hlavně proto, že výrazně ovlivňuje parametr zvaný teplotní gradient. Teplotní gradient je rozdíl teplot v daném čase mezi nejteplejším místem (uprostřed konstrukce) a nejchladnějším místem v betonu (u bednění). Maximální deformace betonu při namáhání v tahu je přibližně 200 $\mu\text{m}/\text{m}$, proto by teplotní gradient neměl přesáhnout 20 $^{\circ}\text{C}$. Pokud by tato podmínka nebyla dodržena, vzniknou na povrchu betonu trhliny. [1]

4.1 Teorie hydratace

4.1.1 La Chatelierova teorie

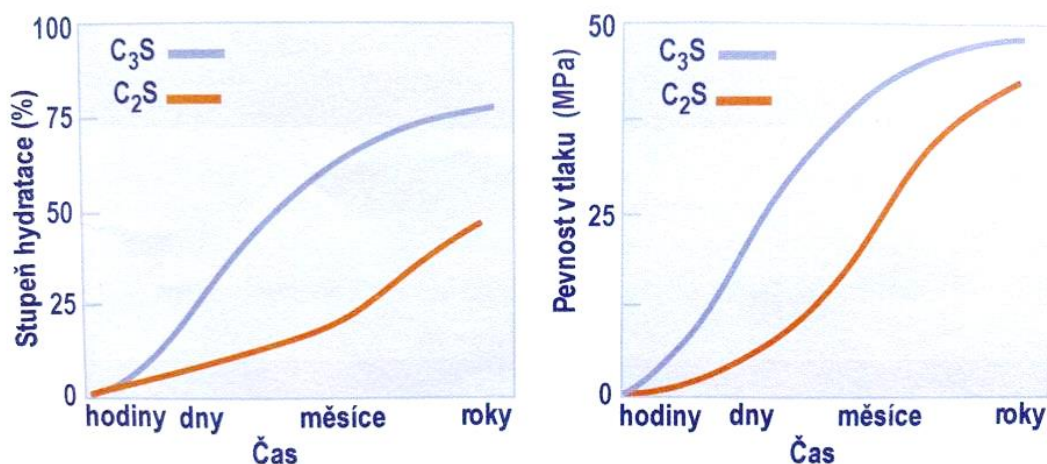
Zjednodušeně La Chatelierova teorie říká, že se jednotlivá zrnka slínku, která jsou obsažena v cementu, disociují ve vodě na ionty. Po určité době dojde k přesycení roztoku a následuje vykrystalizování nebo vysrážení nových hydratačních produktů. Díky krystalizaci se sníží koncentrace a může se rozpouštět další podíl slínku. Během toho probíhá souběžně i zpevňování cementové pasty. Vzniklé jehličkovité nebo destičkovité krystaly se navzájem propojují a vytvářejí síť, která je držena srůsty nebo adhezními silami. Tato teorie bývá také nazývána krystalizační. [9] [13]

4.1.2 Michaelisova teorie

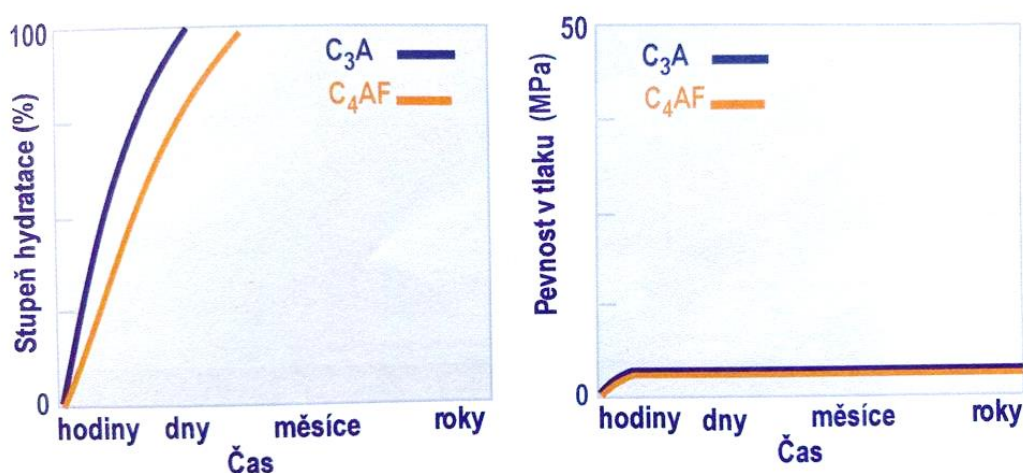
Naopak od předchozí teorie Michaelisova teorie předpokládá, že se na povrchu cementového zrna vytvoří po kontaktu s vodou koloidní vrstva hydrogelu. Během hydratace se voda obsažená v této koloidní vrstvě odsává dovnitř cementového zrníčka a nastává další hydratace. Vlivem této hydratace dochází ke zhutňování a zpěňování cementové pasty. Tato teorie bývá nazývána také koloidní. [9] [13]

4.1.3 Současná teorie

Současná teorie o mechanismu hydratace cementu zjednodušeně spojuje obě předchozí teorie dohromady. Aluminátové slínkové materiály C_3A (trikalciualuminát) a C_4AF (brownmillerit) hydratují krystalizací dle teorie La Chateliera, což hraje důležitou roli během tuhnutí, ale naopak slínkové minerály C_3S (alit) a C_2S (belit) hydratují podle Michaelisovo teorie na C-S-H gely, což hraje důležitou roli během tvrdnutí. Výsledkem je kontinuální tvorba jehličkovitých útvarů mezi zrny cementu až do vytvoření pevné spojovací fáze. [1] [5] [9]



Obrázek 4: Vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku na čase C_3S a C_2S



Obrázek 5: Vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku na čase C_3A a C_4AF [1]

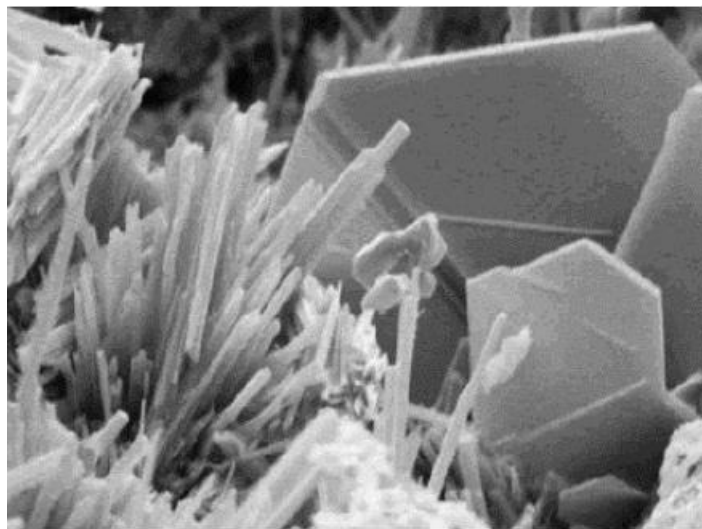
4.2 Stádia hydratace

4.2.1 První – indukční

První stádium se rozděluje na dvě části. První část bývá nazývána předindukční a je zpravidla velmi krátká (10-15 minut). Je pro ni charakteristická velká rychlost uvolňování hydratačního tepla a tvorba krystalů ettringitu (jehličkové krystaly) a hydroxidu vápenatého (hexagonální destičky). Tyto krystaly se usazují na povrchu aluminátových částic (C_3A , C_4AF) a vytváří kolem nich hutný obal. Dochází v něm ke smáčení zrn cementu a suspenze má nenewtonské reologické chování.

V druhé části indukčního stádia roste viskozita suspenze a vyznačuje se pomalým uvolňováním hydratačního tepla a vznikem zárodků krystalů CH a CSH. Voda a ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} se mohou přes vzniklý obal jen velmi pomalu difundovat. Vzniká krystalizační tlak, díky němu dochází postupně k porušení obalu, čímž jsou vytvořeny znovu podmínky pro vznik ettringitu (jehličkovité krystaly) až do opětovaného vzniku obalu. Celý tento proces se opakuje, dokud koncentrace síranových iontů neklesne pod hodnotu, pod kterou není možná další tvorba ettringitu.

V této fázi probíhají reakce jen na povrchu cementových zrn. Velikost zrn a prostor mezi nimi se významně nemění. Proces končí přibližně 1-2 hodiny od zamíchání. [3] [9]



Obrázek 6: Jehlicovité krystaly ettringitu a destičkovité krystaly $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [7]

4.2.2 Druhé – tuhnutí

Pro druhé stádium je charakteristický silný vývoj hydratačního tepla a rychlá tvorba C-S-H fází. Nejprve vznikají vláknité dlouhé krystaly (cca 100 nm), které společně s ettringitem a hydroxidem vápenatým tvoří obal cementových zrn. Mezi hydratačními produkty dochází ke kontaktu prostřednictvím dlouhých C-S-H vláken, tím se postupně zmenšuje pórovitost, zvyšuje se tuhost a roste pevnost. Vzhledem k tomu se zmenšují i délky vznikajících C-S-H vláken, takže nejdelší vlákna vzniknou v počátku, kdy je dostatek prostoru mezi jednotlivými zrny cementu. Pokud je vysoký vodní součinitel, je tuhnutí pomalejší z důvodu větší vzdálenosti mezi zrny. Stádium končí přibližně po 24 hodinách a můžeme říci, že se jedná o tuhou látku dosahující pevnosti zhruba 1 až 20 MPa v tlaku. [3] [14] [15] [16]

4.2.3 Třetí – tvrdnutí

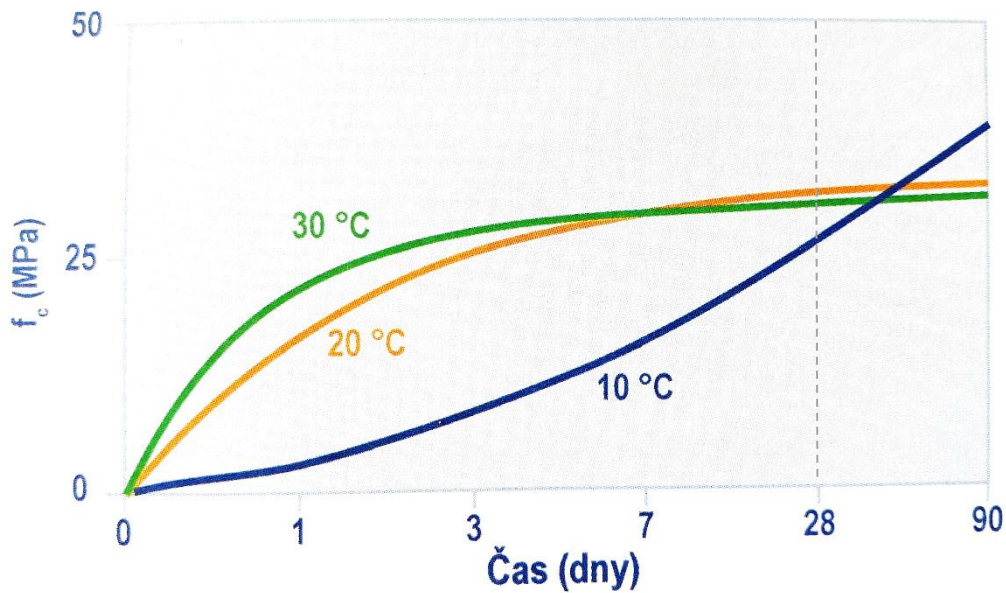
Do tohoto stádia spadá tvrdnutí cementu až po jeho úplnou hydrataci. Můžeme říci, že se jedná o časově neohraničený úsek, protože k úplné hydrataci cementu reálně nikdy nedochází. Vznikají nové fáze, kterými jsou například C_4AH_{13} nebo $C_4(A,F)H_{13}$ a pórový prostor se jimi postupně zaplňuje a zhušťuje. Začíná klesat obsah ettringitu, neboť se mění na monosulfát. C-S-H vlákna se stále zmenšují a na konci hydratace jsou 10 až 100 x menší, než byla na konci druhé fáze. Snižuje se vývin tepla. [3] [14] [15] [16]

5. Faktory ovlivňující hydrataci cementu

Je jasné, že průběh hydratace není vždy stejný. Rychlost hydratace, množství uvolněného hydratačního tepla nebo konečné mineralogické složení závisí na mnoha faktorech jako jsou jemnost cementu, objem vody, okolní teplota, vodní součinitel, okolní vlhkost a také na případném obsahu přísad a příměsí.

5.1 Vliv teploty na průběh hydratace a výslednou pevnost

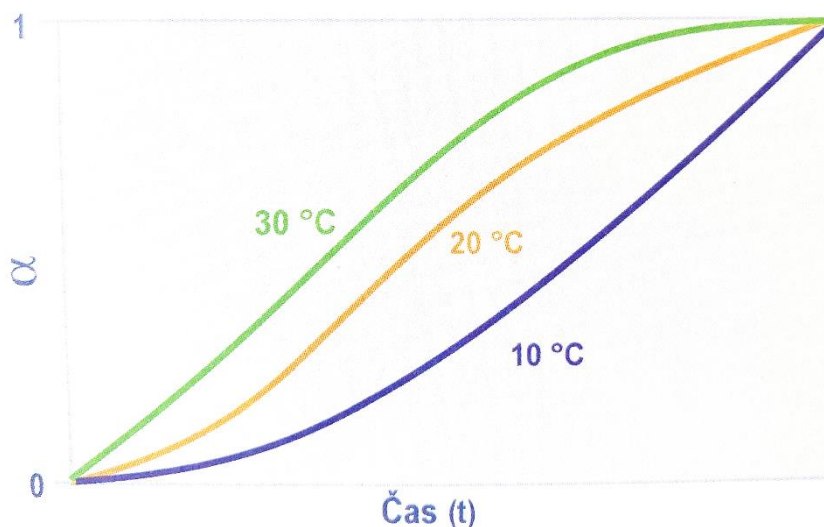
Na obrázku 7 je znázorněno schéma narůstající tlakové pevnosti betonu v čase, zrající při teplotě 10 °C, 20 °C a 30 °C od vybetonování až do stáří 90 dnů. Z obrázku lze vidět, že na počátku (1–7 dní) platí, že čím je nižší teplota, tím je nižší i pevnost v tlaku. Naopak na konci (90 dní) platí, že čím je nižší teplota, tím je vyšší pevnost v tlaku. Pokud ale sledujeme 28denní normovou pevnost v tlaku, vidíme, že se od sebe jednotlivé hodnoty pevnosti v tlaku zásadně neliší.



Obrázek 7: Vliv teploty na vývoj pevnosti [1]

Nízké teploty v zimním období způsobují snížení pevnosti na počátku hydratace. To je dáno chemickými pravidly, kdy platí, že čím nižší teplota, tím menší rychlost reakce hydratace. Avšak na konci platí, čím nižší teplota, tím vyšší pevnost v tlaku, to znamená, že pevnost se nemůže odvíjet pouze od stupně hydratace cementu (α) jak je znázorněno na obrázku 8. [1]

Důležitými parametry, které toto způsobují, jsou obsah a houževnatost C-S-H gelu. V časných stádiích zrání se zvyšuje pevnost díky narůstající teplotě, což je způsobeno vyšším stupněm hydratace. Díky vyššímu stupni hydratace vzrůstá obsah C-S-H gelu. Na druhou stranu v pozdějším období je převažujícím parametrem kvalita vytvořené fáze. Vlákna C-S-H gelu vzniklá při nižší teplotě rostou výrazně pomaleji a jsou kvalitnější – větší a houževnatější.



Obrázek 8: Vliv teploty na stupeň hydratace [1]

Při teplotách okolo 5 °C se hydratace výrazně zpomaluje a pod 0 °C se dokonce se úplně zastavuje. Je jasné, že se vyšší teploty používají k urychlování tvrdnutí betonu (UTB). Za vyšší teploty se považují teploty od 30 °C. Jak je výše zmíněno, vyšší teplota urychluje tvrdnutí cementu a tím ovlivňuje pórovitou strukturu cementového kamene, která je způsobena obsahem vody a vzduchu. Voda a vzduch se se zvyšováním teploty roztahují rozdílně, a tak vzniká různé napětí, které může být příčinou vzniku trhlinek.

V závislosti na druhu cementu jsou doporučeny teploty, při kterých by se mělo proteplování provádět. Pro portlandské cementy jsou doporučeny teploty do 60 °C, pokud se teplota překročí, snižuje se výsledná pevnost betonu. Vhodnější cementy pro proteplování jsou směsné portlandské cementy nebo vysokopecní cement, protože obsahují latentně hydraulické složky (viz kapitola 5.5).

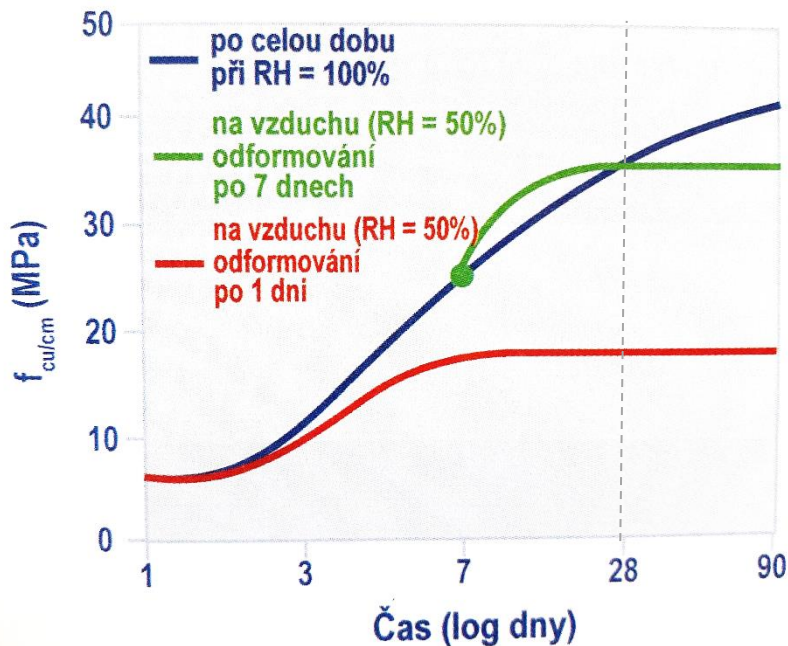
Aby se předešlo úskalím spojeným s teplotou, musí být stavební práce vhodně rozvrženy v průběhu kalendářního roku. V létě je problémem rychlá ztráta zpracovatelnosti, která se často na stavbách nevhodně řeší přidávkem vody při betonáži. Správným řešením by mělo být použití zpomalujících přísad nebo plastifikátorů. V zimních období nastává opačný problém, kterým je zpožděné tvrdnutí a s tím související prodloužení doby výstavby. Opět jsou řešením přísady jako např. urychlovače tvrdnutí. V praxi je pro přípravu betonu používána horká voda, což je také vhodné řešení. Další ze mnoha možností, jak ochránit beton před promrznutím, aby nedošlo k nevratnému poškození, je použití tepelně izolačních materiálů do bednicích prostředků.

5.2 Vliv vlhkosti na průběh hydratace

Při vlhkém uložení pevnost s časem vzrůstá, protože dochází k prodlužování procesu hydratace. Pokud beton zraje v suchém prostředí, probíhá hydratace neúplně nebo se dokonce může úplně zastavit.

Obrázek 7 ukazuje pevnost betonu v tlaku v závislosti na době, po kterou byl ošetřován vodou. Lze jasně vidět, že aby beton dosáhl normované 28denní pevnosti, musí být ošetřován vodou alespoň po dobu 7dní. Pokud by beton nebyl vystaven správné vlhkosti, pak by stupeň hydratace zůstal na nízké hodnotě, to by redukovalo vlákna C-S-H gelu, tím pádem by nemohla růst pevnost cementové pasty. [1][9]

Dodržen vysokou vlhkost je důležité kvůli redukcí smrštění betonu. Pokud je beton vystaven vzduchu s relativní vlhkostí menší než 95 % a vyšší teplotě, nastává přibližně 10-12 hodin po uložení do formy takzvané plastické smrštění. Toto smrštění produkuje tahová napětí. Pokud tahová napětí překročí pevnost v tahu již vzniklého materiálu, beton popraská.



Obrázek 9: Vliv vlhkosti při zrání betonu na výslednou pevnost [1]

Jsou dvě hlavní možnosti, jak zajistit potřebnou vlhkost. Buď ošetřováním betonu vodou nebo zabráněním odparu vody z betonu během zrání (membránové ošetření). Vlhké ošetřování může být provedeno buď nepřetržitým postřikem nebo úplným ponořením do vody. Ošetření pomocí nepropustných membrán je založeno na zabránění odpaření volné vody z povrchu betonu pomocí například plastové fólie nebo nanesením ochranných postřiků.

5.3 Vliv jemnosti cementu

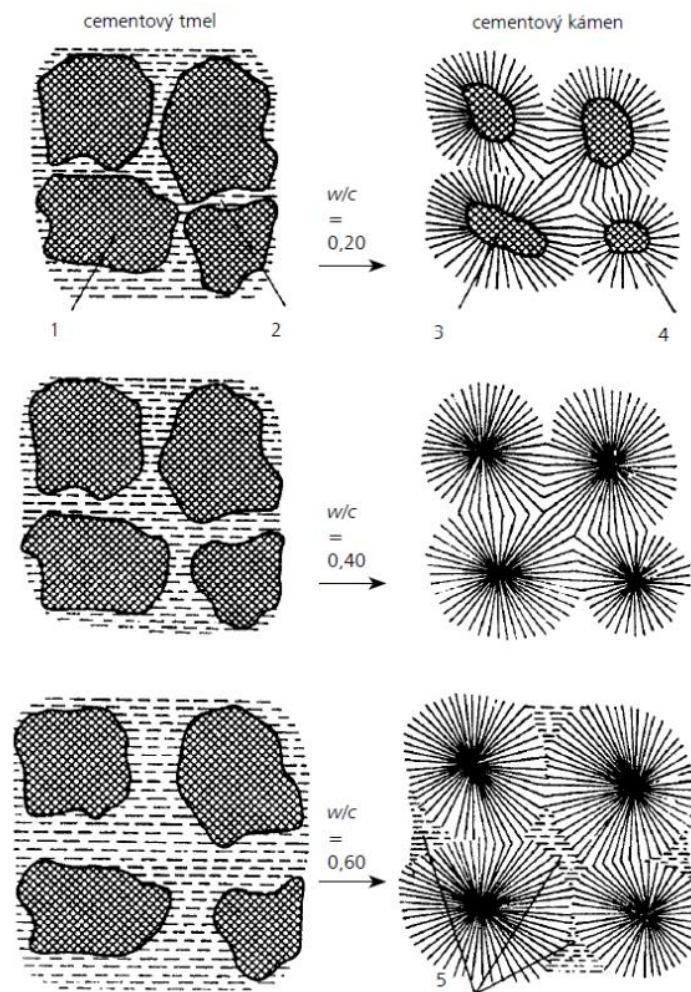
Důležitou roli má také jemnost mletí cementu neboli měrný povrch. Jemnost výrazně ovlivňuje zejména rychlost hydratace a uvolňování hydratačního tepla, zároveň může ovlivňovat i strukturu zhydratovaného cementu. Čím je cement jemnější, tím rychleji nastává tuhnutí a tvrdnutí, kvůli větší reakční ploše. [3] [11]

Uvádí se, že hloubka hydratace jednoho cementového zrna je za půl roku 3-15 μm . Velikosti cementových zrn se pohybují od 8 do 120 μm , takže u velkých zrn k hydrataci vůbec nemusí dojít.

5.4 Vliv vodního součinitele

Vodní součinitel má především vliv na výslednou strukturu cementu, ale má vliv i na rychlost hydratace cementu. Vodní součinitel je poměr účinné vody ku hmotnosti cementu. Pro úplnou hydrataci slínku je potřeba mít vodní součinitel alespoň 0,25, dalších přibližně 13% z hmotnosti cementu se spotřebuje na

vodu vázanou ve vrstvách C-S-H gelu. Pokud tedy vodní součinitel překročí hranici přibližně 0,38 vznikají póry v cementovém kameni. Tyto kapilární póry mají velikost řádově 10^{-5} až 10^{-8} m a snižují výslednou pevnost cementu. Pokud je naopak vodní součinitel menší než 0,38, dojde ke spotřebování vody dříve než jádra cementových zrn zhydratují, dojde ke zpomalení hydratace a důsledkem je opět snížení výsledné pevnosti. [12] [3] [11]



Obrázek 10: Hydratace cementu v závislosti na vodním součiniteli [2]

1 – cementové zrno, 2 – voda, 3 – nezhydratovaný cement
4 – zhydratovaný cement, 5 – kapilární póry

5.5 Vlivy přísad

Přísady do betonu jsou většinou kapalné látky, které se do betonu přidávají za účelem úpravy vlastností v čerstvém nebo ztvrdlém stavu. Existuje celá řada různých druhů přísad. Například plastifikátory umožňují snížit množství potřebné záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti nebo naopak zlepšují zpracovatelnost, provzdušňovací přísady zvyšují odolnost betonu vůči střídavému zmrazování a rozmrazování, hydrofobizační přísady zlepšují vlastnosti proti navlhnutí betonu a tak dále. Co se ale týká rychlosti tvrdnutí betonu, tu ovlivňují urychlovače nebo naopak retardační přísady. [10]

5.5.1 Urychlovací přísady

Urychlovací přísady se dají rozdělit do dvou skupin, na urychlovače tuhnutí cementu a na urychlovače tvrdnutí cementu.

Urychlovače tuhnutí cementu mají na starost zkrátit dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do tuhého. Většinou to bývají látky na bázi hydroxidů, uhličitánů, hlinitanů nebo křemičitanů alkalických kovů. Principem je, že tyto látky urychlují hydrataci C_3A (trikalciumaluminát), při které se uvolní velké množství tepla, a to vede ke zrychlení hydratace C_2S (dikalciumsilikát), a tím ke zvýšení počáteční pevnosti betonu. V praxi mají tyto přísady využití hlavně ve stříkaném betonu nebo v cementových maltách pro utěšňování průniku vody.

Urychlovače tvrdnutí cementu urychlují vývoj počátečních pevností betonu, přičemž mohou a nemusí urychlovat tuhnutí betonu. Jedná se o látky na bázi rozpustných halogenidů, dusitanů, dusičnanů, mravenčanů, tiosíranů nebo tiokyanatanů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Tyto přísady urychlují hydrataci C_3S (trikalciumsilikátu). Dochází ke zvýšenému vývinu hydratačního tepla a k tvorbě CSH gelu v počáteční fázi hydratace. V praxi mají tyto přísady využití hlavně tehdy, když je potřeba rychleji odbednit konstrukci nebo při betonáži v zimních měsících, kdy kompenzují zpomalené tuhnutí vlivem nízkých teplot. [10]

5.5.2 Retardační přísady

Retardační přísady zpomalují tuhnutí cementu to znamená, že brzdí proces hydratace a prodlužují tím dobu přechodu čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu. Většinou se jedná o látky na bázi solí hydroxykarboxylových kyselin nebo na bázi cukrů a jejich derivátů. Přísady z hydroxykarboxylových kyselin mají současně i plastifikační účinky.

Retardační přísady se používají v případech, kdy je třeba prodloužit dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu například při dopravě betonu na větší vzdálenosti nebo se také používají při betonáži v letních měsících, kdy kompenzují zrychlené tuhnutí vlivem vysokých teplot. [10]

5.6 Vliv příměsí

Přísady do betonu jsou většinou práškovité minerální látky, které se přidávají do čerstvého betonu kvůli zlepšení jeho vlastností buď v čerstvém nebo ztvrdlém stavu. Obecně můžeme příměsí rozdělit na dva typy, na inertní (typ I) a pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II). Inertní příměsí se v betonu nepodílí na hydratačních reakcích. Používají se za účelem lepší zpracovatelnosti a jsou to většinou kamenné moučky a práškové pigmenty.

Druhá skupina příměsí mají pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti. Tyto látky se již podílejí na zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu, protože vstupují do hydratačního procesu. Nejčastěji se jako latentně hydraulická příměs používá popílek nebo křemičité úlety.

Popílek, který je označován jako fly ash, je produktem spalování uhlí a v podobě velmi jemně mletého prášku (cca 0,09 mm) je zachycován v odlučovačích z plynů topenišť. Jedná se o kulovité sklovité částice sestávající převážně z SiO_2 a Al_2O_3 a obsahující nejméně 25 % aktivního SiO_2 , který zajišťuje pucolánovou aktivitu (latentní hydraulicitu) podobnou chování cementu. Používá se jako příměs do betonu za mnoha účely. V určitých případech nahrazuje část dávky cementu bez ovlivnění konečných pevností betonu. Optimalizuje křivku zrnitosti kameniva (jako typ I) tím, že zvyšuje podíl jemných částic. Příznivě ovlivňuje proces tuhnutí a tvrdnutí včetně vývinu hydratačního tepla, což je využíváno při betonáži masivních konstrukcí nebo také zvyšuje odolnost betonu v chemicky agresivním prostředí. [9] [10]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6. Představení experimentu

Cílem experimentální části je navázat na poznatky získané v teoretické části této práce. Konkrétně se jedná o zjištění tlakové pevnosti zkušebních těles po 7 dnech zrání, jednak za různých podmínek okolního prostředí a dále v závislosti na přítomnosti urychlovací přísady.

Na začátku experimentu byly vyrobeny vzorky dle konkrétní receptury. Následně se vzorky nechaly týden zrát za průběžného sledování a ošetřování. Závěrem byla provedena tlaková zkouška vzorků na zatěžovacím lisu a její výsledné hodnoty byly zpracovány. Experiment byl prováděn v laboratoři betonových konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

7. Použité přístroje

Pro experiment byly použity níže uvedené přístroje:

- Váha značky Kern EMB, na níž se se vážily již hotové vyrobené vzorky nebo suroviny pro výrobu betonu s nižší hmotností (typu plastifikační přísada nebo urychlovač).
- Váha značky TSCALE, na které se odměřovaly suroviny pro výrobu betonu s vyšší hmotností (například kamenivo)
- Laboratorní míchačka od společnosti SMARTTEST CZ s. r. o. o objemu bubnu 125 litrů, ve které byl připraven beton.
- Vibrační stůl Standart VTS od společnosti Krejčí engineering, s.r.o, pomocí kterého byly vzorky zhutněny.
- Laboratorní sušárna MEMMERT, ve které byly ošetřovány vzorky za určité teploty a určité relativní vlhkosti vzduchu.
- Laboratorní sušárna MATEST, ve které zrály vzorky za určité teploty.
- Vodní lázeň od firmy CONTROLS, ve které probíhal další způsob ošetřování za určité teploty.
- Zatěžovací rám 5000 od firmy BetonSystém, pomocí kterého se zjišťovala pevnost v tlaku jednotlivých zkušebních vzorků.



Obrázek 12: Laboratorní míchačka od společnosti SMARTEST CZ s. r. o.



Obrázek 11: Zatěžovací rám 5000 od firmy BetonSystém



Obrázek 13: Vibrační stůl Standart VTS od společnosti Krejčí engineering, s.r.o



Obrázek 15: Laboratorní sušárna Matest



Obrázek 14: Laboratorní sušárna MEMMERT



Obrázek 16: Vodní nádrž od firmy CONTROLS



Obrázek 17: Váha značky TSCALE

8. Výroba zkušebních vzorků

Bylo zkoumáno 8 různých postupů ošetřování vždy na 6 vzorcích. Celkově tedy bylo vyrobeno 48 betonových vzorků. Použito bylo bednění, ze kterého byly vyrobeny krychle o rozměru strany 100 mm, což znamená, že celkově bylo na vzorky použito 48 litrů betonu.

8.1 Receptura betonové směsi

Pro náš experiment byla zvolena pevnostní třída betonu C30/37 a bylo použito složení betonu s dopočtem hmotností jednotlivých složek pro požadovaný objem.

Z celkových 8 postupů byla na 7 postupů použita receptura 1 (viz tabulka 2) a pouze na 1 postup byla použita receptura 2 (viz tabulka 3). Receptura 1 a receptura 2 se od sebe liší pouze tím, že v receptuře 2 je navíc urychlovač tvrdnutí betonu.

Celý experiment se prováděl ve dvou etapách. V první etapě (7.3.-14.3.2022) se 30 vzorky podle receptury 1, ve druhé etapě (4.4.-11.4.2022) se 12 vzorky podle receptury 1 a se 6 vzorky podle receptury 2.

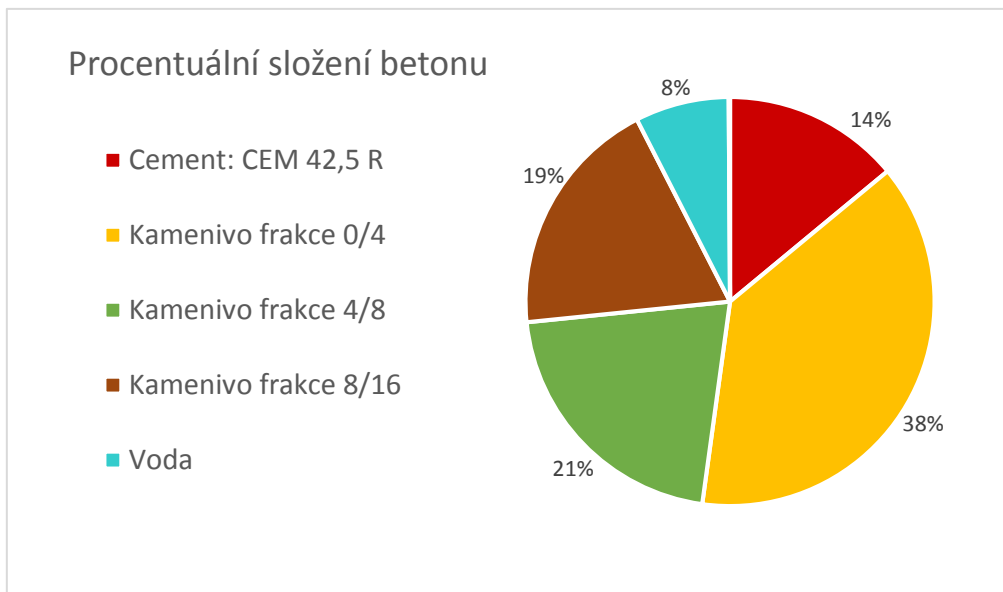
Složky betonu		Množství [kg/m ³]
Cement: CEM 42,5 R		330
Kamenivo	frakce 0/4	900
	frakce 4/8	500
	frakce 8/16	450
Voda		175
Plastifikátor: Stachement 787 0,75%		2,48
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel:		0,53
Objemová hmotnost:		2357,48 kg/m ³

Tabulka 2: Receptura 1

Složky betonu		Množství [kg/m ³]
Cement: CEM 42,5 R		330
Kamenivo	frakce 0/4	900
	frakce 4/8	500
	frakce 8/16	450
Voda		175
Plastifikátor: Stachement 787 0,75%		2,48
Urychlovač: Betodur A3		6,6
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel:		0,53
Objemová hmotnost:		2364,08 kg/m ³

Tabulka 3: Receptura 2





Obrázek 18: Graf procentuálních zastoupení jednotlivých složek betonu v receptuře

8.1.1 Použité materiály

- **Cement**
Jedná se konkrétně o portlandský cement CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a.s.). Jedinou jeho hlavní složkou je portlandský slínek. Pevnost v tlaku po 2 dnech by měla být 28 MPa až 32 MPa a po 28 dnech 57 MPa až 62 MPa. [18]
- **Kamenivo**
Konkrétně se jedná o kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s.. Použity byly tři frakce: 0/4, 4/8 a 8/16.
- **Voda**
Pro záměsovou vodu byla použita voda pitná z vodovodního řadu.
- **Superplastifikační přísada**
STACHEMENT 787 (FM) je superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem s doporučenou dávkou 0,4 – 1,5 % na hmotnost cementu. Výrazně prodlužuje dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu až na 2 hodiny a umožňuje redukci záměsové vody až o 30 %. [17]

- Urychlovací přísada

Betodur A5 (BE) urychluje tvrdnutí a nezhoršuje zpracovatelnost, doporučená dávka je 0,8 – 3,0 % na hmotnost cementu. Tato přísada je založena na bázi vodného roztoku dusičnanu sodného nebo vápenatého. [17]



Obrázek 20: Použitý portlandský cement



Obrázek 19: Urychlovací přísada



Obrázek 21: Urychlovací přísada Stachement



Obrázek 22: Kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 0/4



Obrázek 23: kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 4/8



Obrázek 24: kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 8/16

8.2 Betonáž

Nejdříve bylo naváženo pomocí vah přesné dávky jednotlivých složek dle receptury uvedené v kapitole 8.1. Po důkladném smíchání suchých složek, kameniva a cementu, byl přidána voda a plastifikátor, popřípadě urychlovač. Míchání probíhalo v míchačce tak dlouho, dokud neměl čerstvý beton správnou konzistenci a všechny složky nebyly řádně promíchány.



Obrázek 25: Suroviny těsně před přidáním do míchačky

Čerstvý beton se následně ukládal do vymazaného bednění odformovacím prostředkem. Formy bednění, které byly pro experiment použity, se skládají ze 3 krychlí o vnitřních rozměrech 100x100x100 mm, což odpovídá rozměrům zkušebních vzorků. Čerstvý beton byl ve formách zhuštěn pomocí vibračního stolu.



Obrázek 26: Bednicí formy



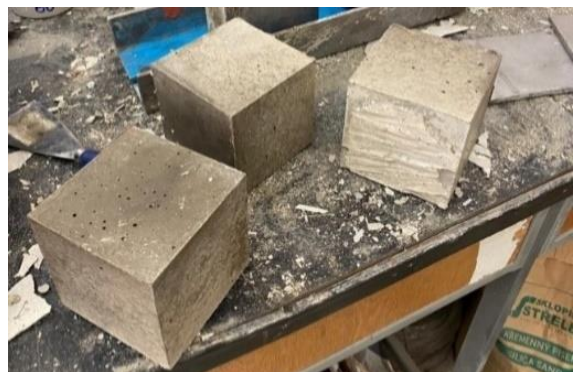
Obrázek 27: Čerstvě zhutněný beton

9. Popis způsobů ošetřování vzorků

Všechny bednicí formy s čerstvým betonem byly po zhutnění zabaleny do fólie omezující přístup vzduchu a uloženy do laboratoře s teplotou vzduchu 22 °C. Po 24 hodinách byly vzorky rozebrány a odbedněny z bednicích forem, označeny popiskem a uloženy ke zrání za různých podmínek. Celkově bylo zkoumáno 8 různých postupů zrání a ke každému postupu bylo vyrobeno 6 vzorků. Postupy jsou popsány v následujícím textu a shrnuty v tabulce 4.



Obrázek 28: Ošetření vzorků fólií po dobu 24 hodin



Obrázek 29: Čerstvě odbedněné vzorky po 24 hodinách po uložení do forem

Vzorky s označením P1 (postup jedna) byly po odbednění ponechány v prostředí laboratoře na vzduchu při teplotě přibližně 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 38 % celých následujících 6 dní.

Vzorky s označením P2 (postup dva) byly po odbednění zabaleny do fólie omezující přístup vzduchu a uloženy do sušárny Matest (viz. kapitola 7) s teplotou 50 °C. V sušárně zrály takto 3 celé dny, poté 1 celý den bez fólie a poté, z důvodu ochlazení před destruktivním zkoušením, byly 2 dny ponechány v prostředí laboratoře při teplotě přibližně 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 38 %.



Obrázek 30: uložení vzorků P1 v prostředí vzduchu laboratoře



Obrázek 31: uložení vzorků P2 do sušárny Matest při 50 °C

Vzorky s označením P3 (postup tři) byly po odbednění uloženy do vodní lázně (viz kapitola 7) při teplotě vody 50 °C. V ohříváné vodě zrály 3 celé dny a poté, z důvodu ochlazení před destruktivním zkoušením, byl vypnut ohřev vody a 3 celé dny vzorky postupně chladly na teplotu 22 °C.

Vzorky s označením P4 (postup čtyři) byly po odbednění uloženy do sušárny MEMMERT (viz kapitola 7) při teplotě 50 °C a při 95 % relativní vlhkosti vzduchu. V těchto podmínkách zrály 3 celé dny a poté na dobu 1 dne byla snížena relativní vlhkost vzduchu na 30 % při stálé teplotě 50 °C. Z důvodu ochlazení před destruktivním zkoušením se nechaly vzorky vychladnout po dobu 2 celých dnů v prostředí laboratoře při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 38 %.



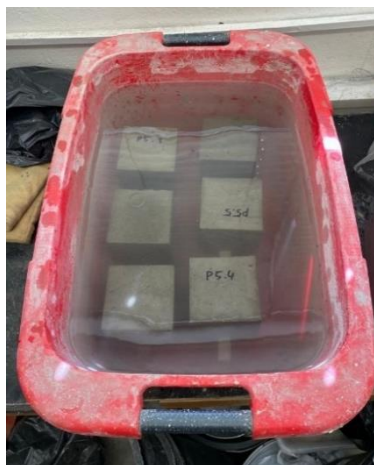
Obrázek 32: Uložení vzorků P3 do vodní nádrže při 50 °C



Obrázek 33: Uložení vzorků P4 do sušárny Memmert

Vzorky s označením P5 (postup pět) byly po odbednění uloženy do vodní nádrže bez ohřevu s teplotou 22 °C. V těchto podmínkách zrály 6 celých dní.

Vzorky s označením P6 (postup šest) jsou jediné, které jsou vyrobeny podle receptury 2 (viz kapitola 8.1). V receptuře 2 je navíc urychlovací přísada. Po odbednění byly vzorky ponechány v prostředí laboratoře na vzduchu při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 38 %, celých následujících 6 dní.



Obrázek 35: Uložení vzorků P5 do vodní nádrže o teplotě 22 °C



Obrázek 34: Uložení vzorků s urychlovačem P6 v prostředí vzduchu laboratoře

Vzorky s označením P7 (postup sedm) byly po odbednění zabaleny do fólie omezující přístup vzduchu a uloženy do sušárny Mates (viz. kapitola 7) s teplotou 70 °C. V sušárně zrály takto 3 celé dny, poté 1 celý den bez fólie a p, z důvodu ochlazení před destruktivním zkoušením, byly 2 dny ponechány v prostředí laboratoře při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 38 %. Tento postup je téměř stejný jako u vzorků P2, ale liší se nastavenou teplotou.

Vzorky s označením P8 (postup osm) byly po odbednění uloženy do vodní lázně (viz. kapitola 7) při teplotě 70 °C. Při této teplotě vody zrály 3 celé dny a poté, z důvodu ochlazení před destruktivním zkoušením, byly na 3 dny uloženy do vodní nádrže bez ohřevu vody, tzn. do vody o teplotě 22 °C. Tento postup je téměř stejný jako u vzorků P4, ale liší se teplotou vody.



Obrázek 36: Uložení vzorků P7 do sušárny Matest o teplotě 70 °C



Obrázek 37: Uložení vzorků P8 do vodní nádrže o teplotě 70 °C

SHRNUTÍ POSTUPŮ OŠETŘOVÁNÍ								
Postup	Receptura	1. den	2. den	3. den	4. den	5. den	6. den	7. den
P1	1	fólie 22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C
P2	1	fólie 22 °C	fólie 50 °C	fólie 50 °C	fólie 50 °C	50 °C	22 °C	22 °C
P3	1	fólie 22 °C	50 °C	50 °C	50 °C	chladnutí	chladnutí	chladnutí
P4	1	fólie 22 °C	50 °C, 95 % RH	50 °C, 95 % RH	50 °C, 95 % RH	50 °C, 30 % RH	22 °C	22 °C
P5	1	fólie 22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C
P6	2	fólie 22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C
P7	1	fólie 22 °C	fólie 70 °C	fólie 70 °C	fólie 70 °C	70 °C	22 °C	22 °C
P8	1	fólie 22 °C	70 °C	70 °C	70 °C	chladnutí	chladnutí	chladnutí

legenda:

bednění	vzduch, 38 % RH	sušárna Matest	voda	sušárna Memmert
---------	-----------------	----------------	------	-----------------

Tabulka 4: Shnutí postupů ošetřování

10. Popis tlakové zkoušky a prezentace výsledků

Pevnost v tlaku se stanoví dle normy ČSN EN 12 390-3 „Stanovení pevnosti betonu v tlaku zkušebních těles“. Jedná se o zkoušku destruktivní, která se provádí na krychli, válci nebo trámku, někdy i na jádrových vývrtech. O každé zkoušce a jejích výsledcích se vede protokol.

Vždy se zkouší minimálně 3 tělesa. Před samotnou zkouškou se ověří geometrie tělesa. Vzorek se očistí a vloží mezi tlačené desky lisu tak, aby byl přesně ve středu tlačných ploch a tlak působil kolmo ke směru hutnění betonu. Těleso je plynule zatěžováno tlakem až do jeho porušení. Pevnost v tlaku vzorku se určí jako poměr maximální zatěžovací síly a kolmé plochy průřezu.

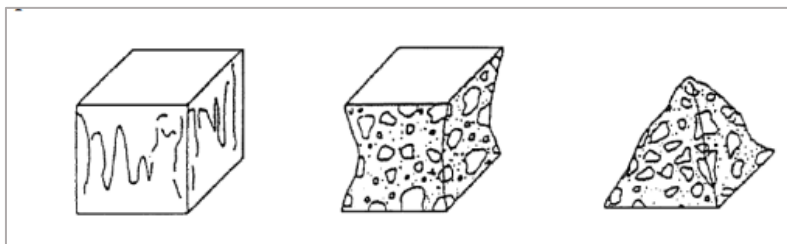
$$f_{cc} = \frac{F_{max}}{A_c}$$

f_{cc} ... pevnost v tlaku [N/mm², MPa]

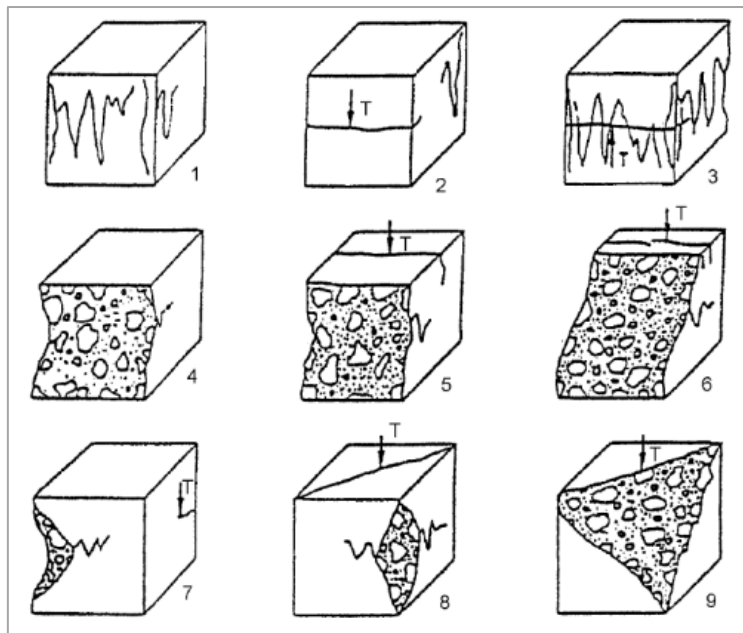
F_{max} ... maximální zatěžovací síla [N]

A_c ... kolmá plocha průřezu [mm²]

Po provedení zkoušky je nutná vizuální kontrola, zda došlo ke správnému tvaru porušení. Příklady správných a nesprávných porušení zkušebních vzorků je znázorněno na obrázcích 38 a 39. [6]



Obrázek 38: Příklady správně porušených vzorků



Obrázek 39: Příklady nesprávně porušených vzorků

V experimentu se jednalo o vzorky tvaru krychle o délce hrany 100 mm a vždy se zkoušelo 6 vzorků z jednoho postupu ošetřování po 7 dnech od uložení do bednicí formy. Před samotnou zkouškou byly vzorky dle postupu daného normou pečlivě zváženy a změřeny pro výpočet objemových hmotností, poté vloženy do zatěžovacího hydraulického lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění. Tlaková síla vzrůstala lineárně v čase. Na obrázku 40 je vidět průběh tlakové zkoušky od prvních trhlin vzorku až do jeho úplného porušení.



Obrázek 40: Sekvence fotek z průběhu zatěžovací zkoušky

11. Prezentace výsledků

Výsledky byly zpracovány dle normy ČSN EN 1990, přílohy D s využitím MS Excel. Níže jsou tabulky, které obsahují u každého z provedených 8 postupů pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků a další statistické údaje, kterými jsou aritmetický průměr, charakteristická pevnost, minimum, maximum a směrodatná odchylka.

Charakteristická pevnost v tlaku je definována jako 5% kvantil a byla vypočtena s využitím předpovědní metody pomocí MS Excel. Směrodatná odchylka byla použita pro výpočet charakteristické pevnosti, ale také udává informaci o tom, nakolik se od sebe navzájem liší jednotlivé případy v souboru zkoumaných hodnot.

$$\overline{f_{cc}} = \frac{\sum f_{cc}}{n}$$

$\overline{f_{cc}}$... aritmetický průměr pevností v tlaku [MPa]

f_{cc} ... pevnosti v tlaku [MPa]

n ... počet vzorků [1]

$$s_{fc} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (f_{cc} - \overline{f_{cc}})^2}$$

s_{fc} ... směrodatná odchylka [MPa]

f_{cc} ... pevnosti v tlaku [MPa]

$\overline{f_{cc}}$... aritmetický průměr pevností v tlaku [MPa]

POSTUP 1:

POSTUP 2 :

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P1.1	34,58
P1.2	42,31
P1.3	32,52
P1.4	35,00
P1.5	41,67
P1.6	34,95

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,1}} &= 36,84 \\ s_{fc,1} &= 4,10 \\ f_{ck,1} &= 30,10 \\ \min_1 &= 32,52 \\ \max_1 &= 42,31 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P2.1	42,29
P2.2	48,04
P2.3	48,15
P2.4	41,83
P2.5	49,70
P2.6	34,93

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,2}} &= 44,16 \\ s_{fc,2} &= 5,58 \\ f_{ck,2} &= 44,16 \\ \min_2 &= 34,93 \\ \max_2 &= 49,70 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

POSTUP 3:

POSTUP 4:

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P3.1	37,55
P3.2	43,16
P3.3	41,71
P3.4	30,38
P3.5	33,10
P3.6	37,69

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,3}} &= 37,26 \\ s_{fc,3} &= 4,89 \\ f_{ck,3} &= 29,22 \\ \min_3 &= 30,38 \\ \max_3 &= 43,16 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P4.1	42,24
P4.2	41,85
P4.3	43,55
P4.4	38,36
P4.5	46,08
P4.6	46,75

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc4}} &= 43,14 \\ s_{fc4} &= 3,07 \\ f_{ck4} &= 38,09 \\ \min_4 &= 38,36 \\ \max_4 &= 46,75 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$



POSTUP 5:

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P5.1	33,45
P5.2	36,81
P5.3	31,30
P5.4	31,22
P5.5	34,04
P5.6	28,43

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,5}} &= 32,54 \\ s_{fc,5} &= 2,88 \\ f_{ck,5} &= 27,80 \\ \min_5 &= 28,43 \\ \max_5 &= 36,81 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

POSTUP 6:

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[MPa]
P6.1	40,76
P6.2	36,43
P6.3	38,11
P6.4	35,21
P6.5	41,00
P6.6	38,55

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,6}} &= 38,34 \\ s_{fc,6} &= 2,30 \\ f_{ck,6} &= 34,56 \\ \min_6 &= 35,21 \\ \max_6 &= 41,00 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

POSTUP 7:

vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[Mpa]
P7.1	38,31
P7.2	35,68
P7.3	33,44
P7.4	40,77
P7.5	39,82
P7.6	39,08

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,7}} &= 37,85 \\ s_{fc,7} &= 2,77 \\ f_{ck,7} &= 33,30 \\ \min_7 &= 33,44 \\ \max_7 &= 40,77 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

POSTUP 8:

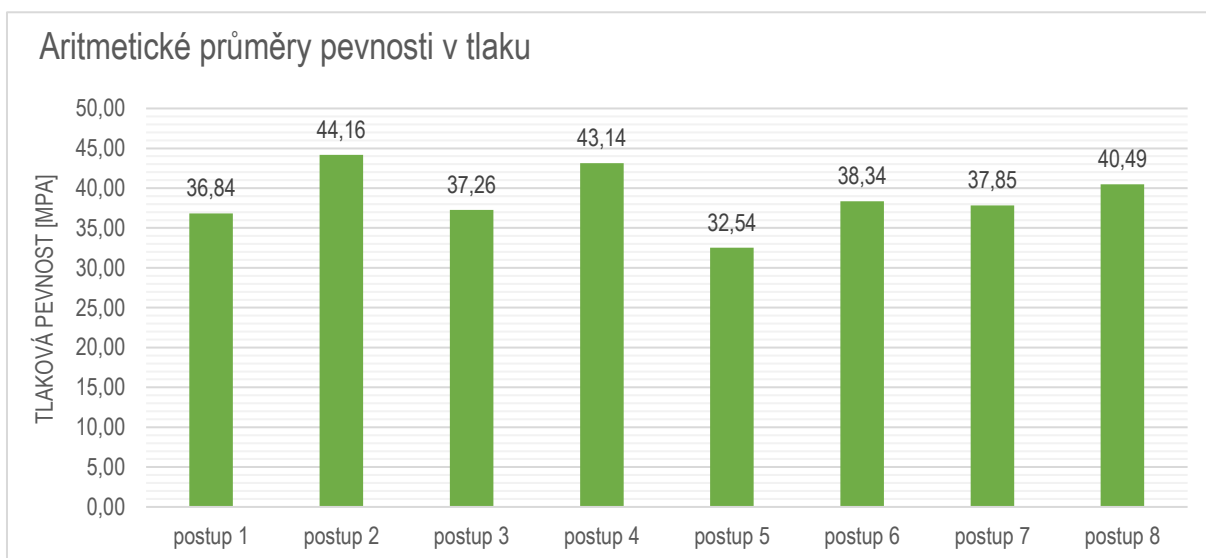
vzorek	naměřená hodnota (F_{cc})
	[Mpa]
P8.1	44,20
P8.2	39,77
P8.3	44,91
P8.4	41,73
P8.5	30,85
P8.6	41,50

$$\begin{aligned} \overline{f_{cc,8}} &= 40,49 \\ s_{fc,8} &= 5,09 \\ f_{ck,8} &= 32,13 \\ \min_8 &= 30,85 \\ \max_8 &= 44,91 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

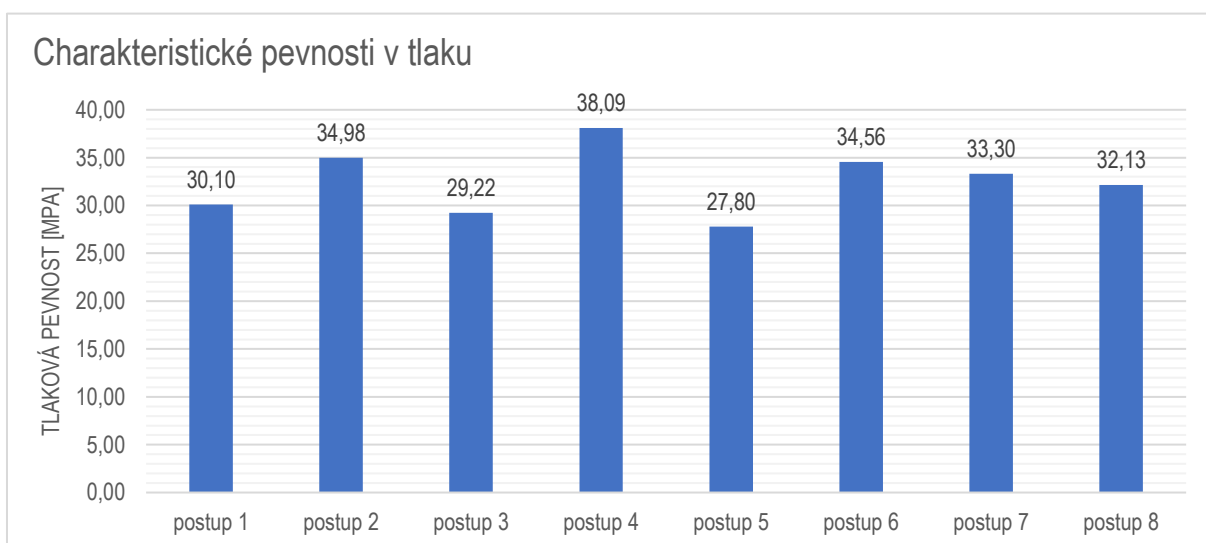


Ze sloupcových grafů na obrázcích 41 a 42, je jasně vidět, že největší pevnosti bylo dosaženo u vzorků s označením postupů P2 a P4, což znamená u vzorků, které zrály za omezeného přístupu vzduchu v sušárně Matest (viz kapitola 7) při teplotě 50 °C a u vzorků, které zrály v sušárně Mammert (viz kapitola 7) při teplotě 50 °C a při 95 % relativní vlhkosti vzduchu. Postup P2 dosáhl nejvyšších hodnot, pokud se srovnávají aritmetické průměry dosažených pevností v tlaku a postup P4 dosahuje nejvyšších hodnot, pokud srovnáváme výsledky charakteristických pevností v tlaku.

Naopak nejnižších pevnosti bylo dosaženo u vzorků s označením postupu P5, což jsou vzorky, které zrály ve vodní nádrži bez ohřevu při teplotě 22 °C, a to jak v aritmetickém průměru, tak v charakteristické pevnosti.



Obrázek 41: Aritmetické průměry pevností v tlaku



Obrázek 42: Charakteristické pevnosti v tlaku

12. Diskuze nad výsledky

Celý experiment se prováděl na dvě etapy. V první etapě byly vytvořeny vzorky s postupem ošetřování 1 až 5 a v závislosti na výsledcích byly zhotoveny další vzorky s postupem ošetřování 6 až 8.

Po získání výsledků z první etapy bylo jasné, že nejvhodnější způsob pro získání co nejvyšší tlakové pevnosti je ošetřování v sušárně Matest (viz kapitola 7) za omezeného přístupu vzduchu nebo v sušárně Mammert (viz kapitola 7) za regulované vlhkosti vzduchu při teplotě 50 °C. Rozdíl mezi těmito dvěma postupy byl zanedbatelný. Z toho vyplývá, že fólie docílila stejných vlhkostních poměrů jako sušárna Mammert, ve které byla vlhkost strojově regulována. Proto ve druhé etapě byla použita už jen sušárna Matest.

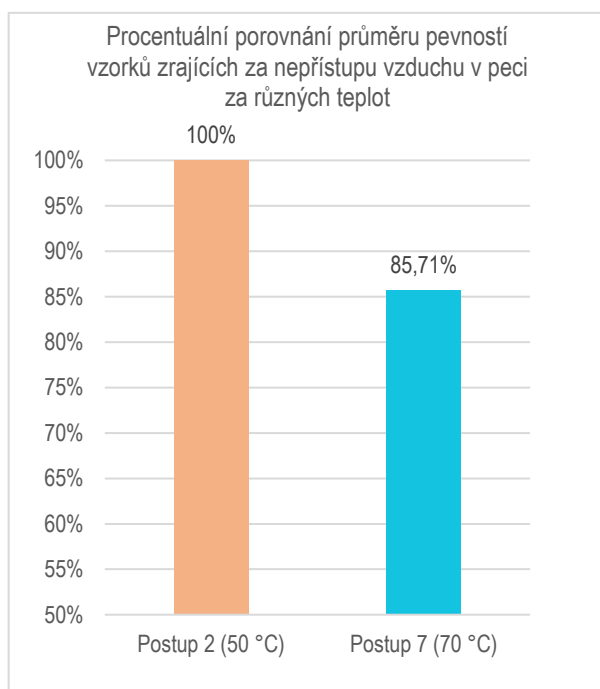
12.1 Porovnání vzorků zrajících za různých teplot

V teoretické části práce v kapitole 4 bylo konstatováno, že na začátku zrání betonu platí, že čím je vyšší teplota, tím je vyšší i pevnost v tlaku, ale zároveň by teplota neměla překročit hranici 60 °C aby neklesla výsledná pevnost. Proto byla pro pokračování experimentu v postupech 7 a 8 zvolena teplota 70 °C, abychom mohli pozorovat výsledný rozdíl pevností.

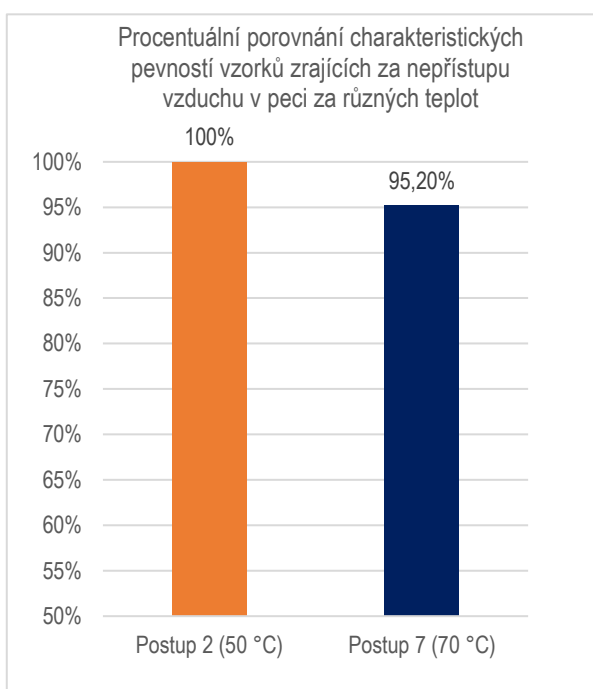


12.1.1 Porovnání vzorků zrajících v sušárně za různých teplot

Vzorky postupů P2 a P7 měly při zrání identický způsob ošetřování až na rozdílné nastavení teploty (viz kapitola 9). Vzorky postupu P2 byly ošetřovány v sušárně Matest při 50 °C a vzorky postupu P7 při 70 °C. Když se porovnají výsledky tlakových pevností, je zřejmé, že vyšších pevností dosáhly vzorky postupu P2. V aritmetickém průměru se jedná konkrétně o hodnoty 44,16 MPa a 37,85 MPa, což je rozdíl téměř 6,3 MPa. To znamená, že vzorky zrající při teplotě 70 °C dosahují přibližně 85 % pevnosti vzorků zrajících při 50 °C, jak lze vidět na obrázku 43. Pokud by se ale hodnotili charakteristické pevnosti, rozdíl mezi postupy P2 a P7 bude mnohem méně výrazný, viz obrázek 44. Vzorky zrající při teplotě 70 °C dosahují přibližně 95 % pevnosti vzorků zrajících při 50 °C. Tento rozdíl je způsobený rozdílnou směrodatnou odchylkou. Z uvedeného vyplývá, že zvýšení teploty na 70 °C při ošetřování vzorků mělo očekávaně negativní vliv na jejich výslednou pevnost.



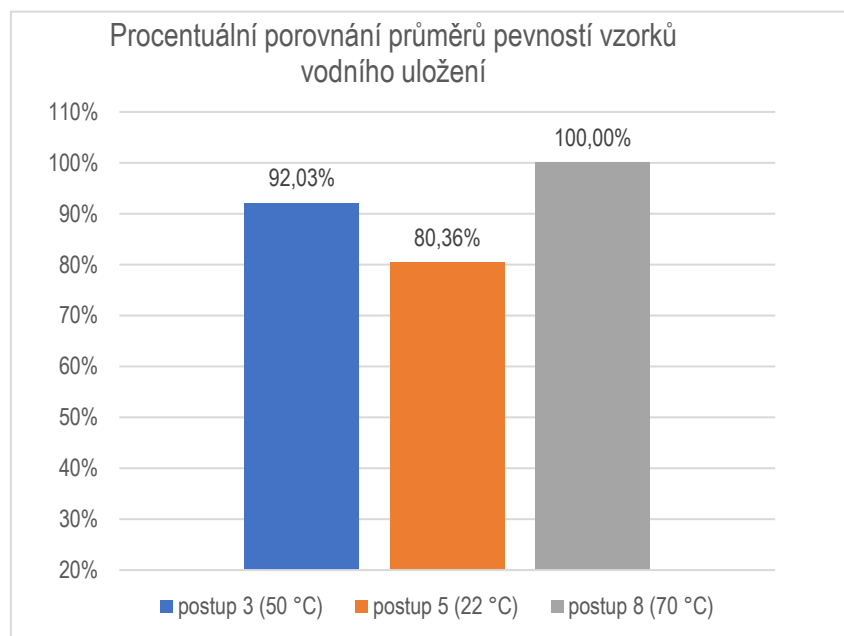
Obrázek 43: Procentuální porovnání průměru pevností vzorků v sušárně Matest



Obrázek 44: Procentuální porovnání charakteristických pevností vzorků v sušárně Matest

12.1.2 Porovnání vzorků zrajících ve vodě za různých teplot

Vzorky postupů P3, a P5 a P7 měly při zrání identický způsob ošetřování až na rozdílné nastavení teploty (viz kapitola 9). Vzorky byly ošetřovány ve vodě. Nejnižších pevností v tlaku dosáhly vzorky postupu P5, tedy ty, které zrály ve vodě při teplotě 22 °C. Střední hodnoty pevností mají vzorky postupu P3, tedy ty, které zrály ve vodě při teplotě 50 °C. Nejvyšší hodnoty pevností mají vzorky postupu P8, které zrály ve vodě při teplotě 70 °C. Konkrétně se jedná o hodnoty aritmetických průměrů pevností 32,54 MPa, 37,26 MPa a 40,49 MPa. Na obrázku 45 lze vidět, že vzorky, které zrály ve vodě při 22 °C, dosáhly přibližně 80 % pevnosti vzorků zrajících ve vodě při teplotě 70 °C. V tomto případě se teoretický předpoklad o hraniční teplotě 60 °C, pokud se snažíme dosáhnout co nejvyšší pevnosti, nepotvrdil.



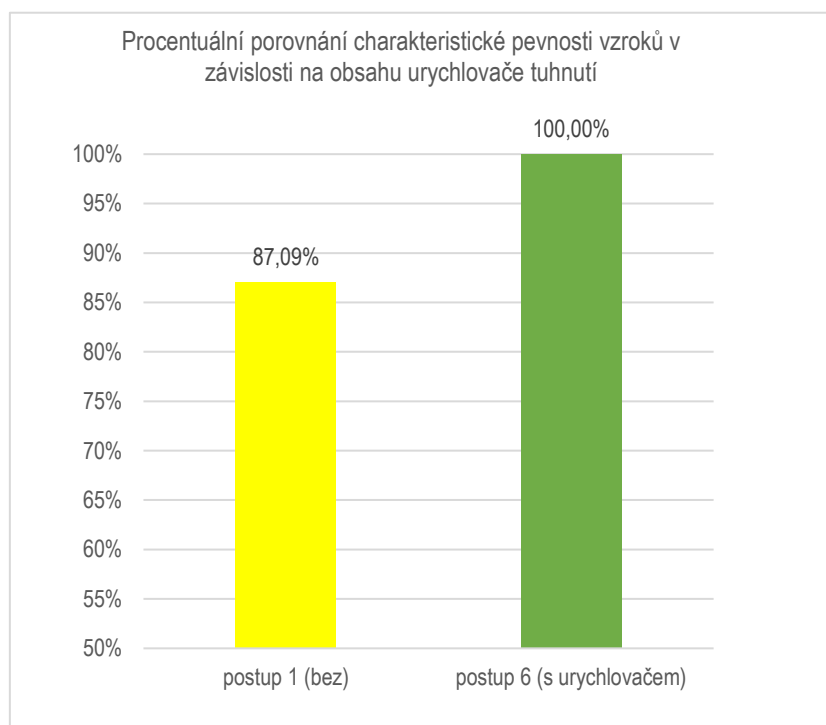
Obrázek 45: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků vodního uložení

Odlíšnost výsledku experimentu oproti teorii může být způsobena tím, že způsob ošetřování nebyl zcela identický, protože ochlazování vody z teploty 70 °C udržovalo vzorek déle v prostředí teplejším, tedy v prostředí vhodném pro hydrataci. Záznam stroje ukázal, že po vypnutí ohřevu teplota vody klesala a to následujícím způsobem:

- po 24 hodinách na 49,5 °C
- po 48 hodinách na 39,6 °C
- po 72 hodinách na 34,3 °C

12.2 Porovnání vzorků v závislosti na užití urychlovací přísady

V teoretické části bakalářské práce (viz kapitola 5.5.1) byl tento vliv na hydrataci a výslednou pevnost betonu popsán. Postup ošetřování u vzorků postupů P1 a P6 byl identický (viz kapitola 9). Lišila se receptura (viz. kapitola 8.1) tím, že vzorky postupu P6 v sobě měly navíc přidanou urychlovací přísadu. Z výsledků těchto dvou postupů je zřejmé, že vzorky s přísadou dosáhly po 7 dnech vyšší tlakové pevnosti než vzorky bez přísady. Při porovnání charakteristické tlakové pevnosti je rozdíl téměř 4,5 MPa. Konkrétně charakteristické pevnosti nabývají hodnot 30,10 MPa a 34,56 MPa. Vzorky bez urychlovače dosáhly 87 % pevnosti vzorků s urychlovačem, jak je znázorněno na obrázku č. 46. V tomto případě se splnil teoretický očekávaný předpoklad.



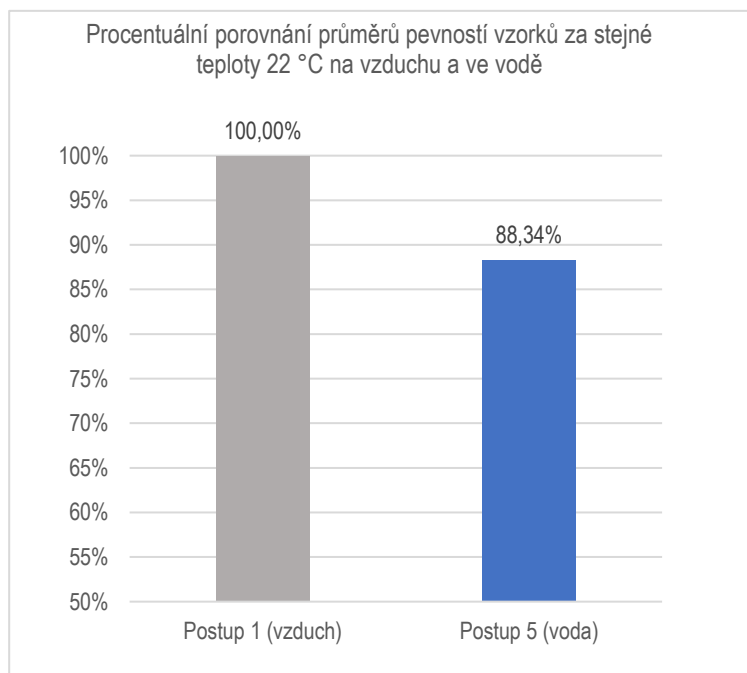
Obrázek 46: procentuální porovnání charakteristických pevností vzorků v závislosti na obsahu urychlovače tuhnutí.

12.3 Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty v jiných prostředích

12.3.1 Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty ve vodě a na vzduchu

Jedná se o vzorky postupů P1 a P5. Vzorky postupu P1 byly ponechány v prostředí laboratoře na vzduchu při teplotě 22 °C a vzorky s postupem P5 byly uloženy do vodní lázně o teplotě 22 °C. Přesný postup ošetření je uveden výše (viz kapitola 9). Vzorky na vzduchu dosáhly průměrné pevnosti 36,83 MPa, zatímco vzorky ve vodě jen 32,54 MPa. Jak je patrné z obrázku 47, beton ošetřovaný ve vodě dosáhl jen zhruba 88 % pevnosti betonu ošetřovaného na vzduchu.

V teoretické části (viz kapitola 5.2) je popsán vliv vlhkosti prostředí na zrání betonu, a to tak, že beton ošetřovaný ve vodě nabývá pevnosti rychleji než beton ošetřovaný na vzduchu. Teoretický předpoklad se nepotvrdil.

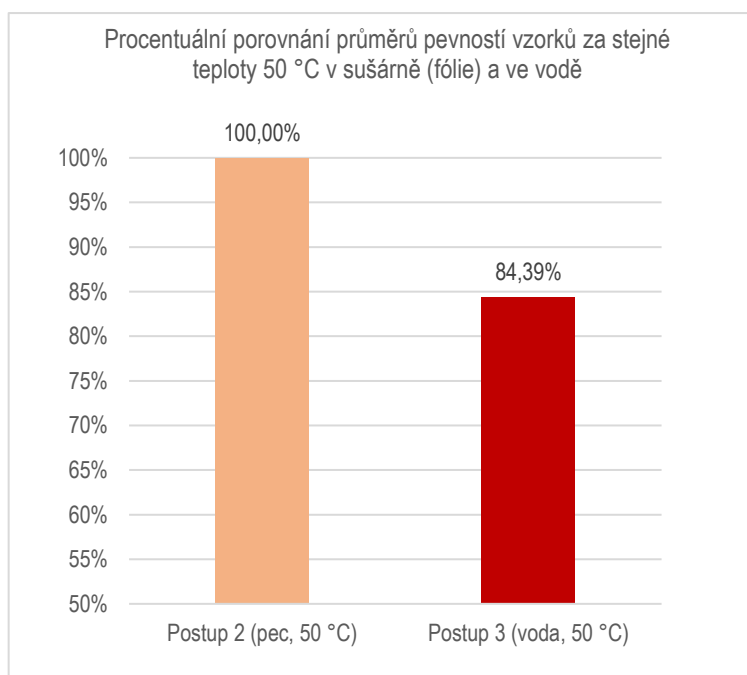


Obrázek 47: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků za stejné teploty 22 °C na vzduchu a ve vodě

12.3.2 Porovnání vzorků zrajících za stejné teploty ve vodě a v sušárně Matest

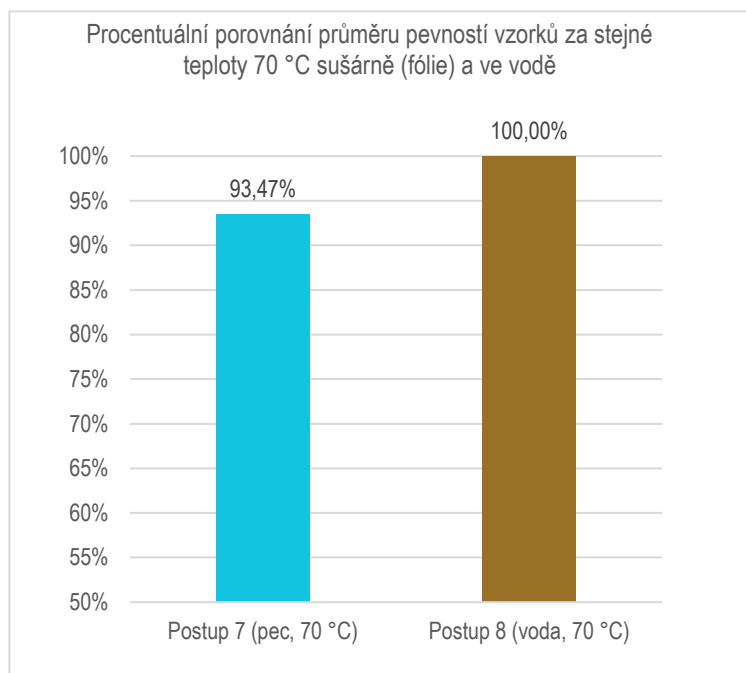
Jedná se o vzorky postupů P2 a P3, které byly ošetřovány při teplotě 50 °C a o vzorky postupů P7 a P8, které byly ošetřovány při teplotě 70 °C. Přesný postup ošetření je uveden výše (*viz kapitola 9*). V teoretické části (*viz kapitola 5.2*) je popsán vliv vlhkosti prostředí na zrání betonu, a to tak, že beton ošetřovaný ve vodě nabývá pevnosti nejrychleji.

Ze srovnání výsledků vzorků postupů P2 a P3 na obrázku 48 je zřejmé, že lepších pevností dosáhli vzorky uložené v sušárně Matest, a to zruha o 15 %. Teoretický předpoklad se nepotvrdil.



Obrázek 48: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků za stejné teploty 50 °C v sušárně (ve fólii) a ve vodě

Odlišná je situace při srovnání výsledků vzorků postupů P7 a P8 na obrázku 49. Lepších výsledků dosáhly vzorky, které zrály ve vodě, a to o necelých 7 %. Teoretický předpoklad se potvrdil



Obrázek 49: Procentuální porovnání průměru pevností vzorků za stejné teploty 70 °C sušárně (fólie) a ve vodě

13. Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo vyhodnotit faktory ovlivňující zrání betonu a tím jeho 7denní tlakovou pevnost. Zrealizovala jsem experiment v laboratoři betonových konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT, ze kterého jsem získala data pro zpracování výsledků. Porovnávala jsem různé postupy ošetřování a také význam obsahu urychlovací přísady. Bakalářskou práci dělím na část teoretickou a experimentální.

V teoretické části práce jsem popsala především samotný proces hydratace při zrání betonu a faktory, které mohou hydrataci ovlivňovat. Také jsem uvedla podrobně mineralogické složení portlandského slínku, jenž je jedinou hlavní složkou portlandského cementu a ovlivňuje zásadním způsobem hydrataci.

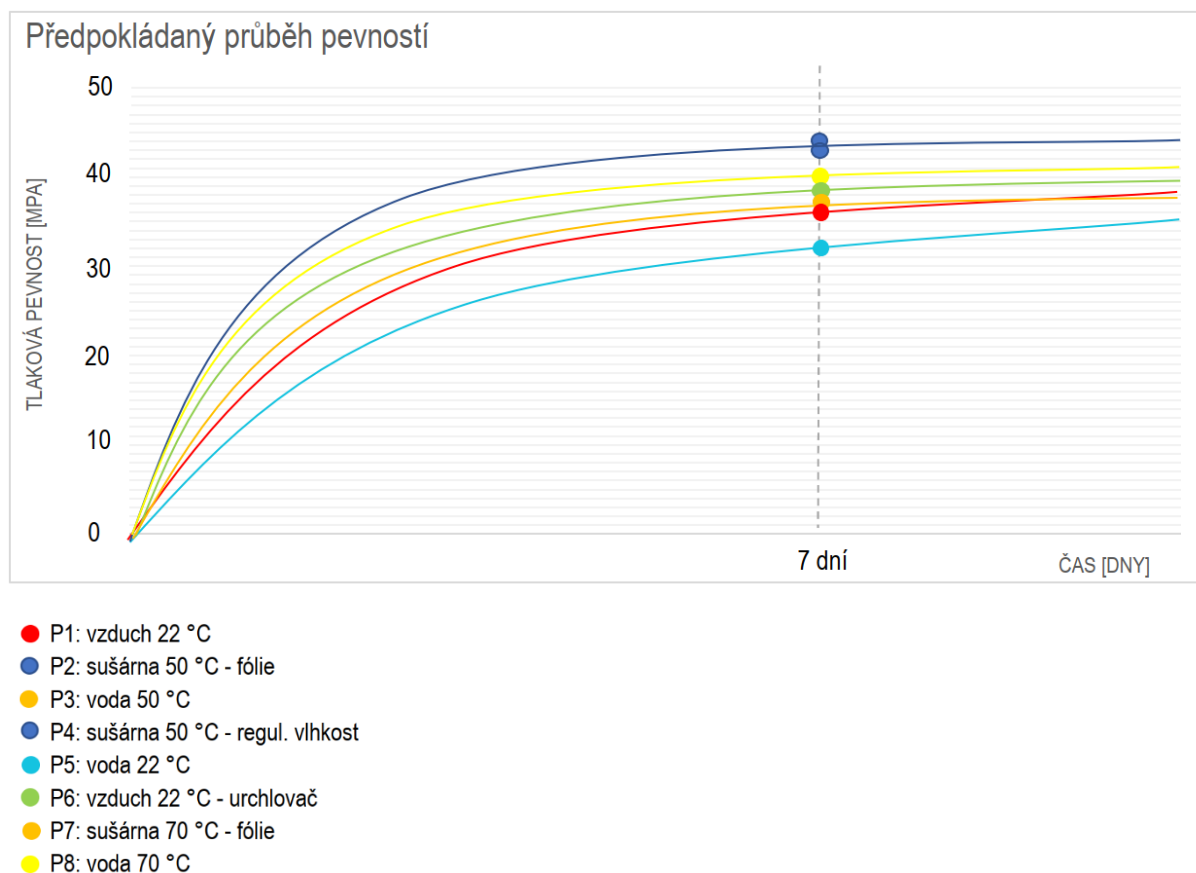
V části experimentální jsem vyhodnotila získaná data z laboratoře a výsledky srovnala s teorií. Protokoly ze zkoušek přikládám přílohou k této práci. V práci jsem použila fotografie, které jsem pořídila v průběhu experimentu.

Jako nejlepší postup ošetřování z hlediska 7denní pevnosti v tlaku dopadl ten, při kterém byly vzorky ošetřovány ve fólii a při teplotě 50 °C. Naopak nejnižších pevností dosáhl postup, při kterém byly vzorky ošetřovány ve vodě při teplotě 22 °C. Při něm pevnost v tlaku dosáhla pouze 73,7 % pevnosti postupu s nejlepším výsledkem. Pro přehlednost jsem do jednoduché tabulky seřadila všechny zkoumané postupy ošetřování podle tlakové pevnosti.

POSTUPY OŠETŘOVÁNÍ SEŘAZENÉ DLE PRŮMĚRNÉ TLAKOVÉ PEVNOSTI		
postupy ošetřování		\bar{f}_{cc}
postup P2	fólie 50 °C	44,16 MPa
postup P4	50 °C, 95 % RH	43,14 MPa
postup P8	voda 70 °C	40,49 MPa
postup P6	vzduch 22 °C, urychlovač	38,24 MPa
postup P7	fólie 70 °C	37,85 MPa
postup P3	voda 50 °C	37,26 MPa
postup P1	vzduch 22 °C	36,84 MPa
postup P5	voda 22 °C	32,54 MPa

Tabulka 5: Postupy ošetřování seřazené dle průměrné tlakové pevnosti

Na obrázku č. 50 jsou zaznamenány hodnoty pevností všech zkoumaných postupů 7. den od uložení do bednicích forem. Průběh křivek je mým teoretickým odhadem vývoje pevností. Abych mohla určit přesný průběh těchto křivek, musela bych experiment rozšířit a měřit tlakovou pevnost ve více časových intervalech. Takový experiment by mohl být přínosem například pro prefabrikovanou výrobu z důvodu možnosti dřívějšího odbedňování a tím zefektivnění práce.



Obrázek 50: Odhadnutý časový průběh pevností

14. Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Schematické znázornění řezu zrnkem portlandského cementu [15]	11
Obrázek 2: Nárůst pevnosti v čase jednotlivých slínekových minerálů [9].....	13
Obrázek 3: Hydratace cementu [4]	14
Obrázek 4: Vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku na čase C ₃ S a C ₂ S	16
Obrázek 5: Vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku na čase C ₃ A a C ₄ AF [1].....	16
Obrázek 6: Jehlicovité krystaly etringitu a destičkovité krystaly Ca(OH) ₂ [7]	17
Obrázek 7: Vliv teploty na vývoj pevnosti [1].....	19
Obrázek 8: Vliv teploty na stupeň hydratace [1]	19
Obrázek 9: Vliv vlhkosti při zrání betonu na výslednou pevnost [1]	21
Obrázek 10: Hydratace cementu v závislost na vodním součiniteli [2].....	22
Obrázek 12: Zatěžovací rám 5000 od firmy BetonSystém.....	26
Obrázek 11: Laboratorní míchačka od společnosti SMARTEST CZ s. r. o.....	26
Obrázek 13: Vibrační stůl Standart VTS od společnosti Krejčí engineering, s.r.o	26
Obrázek 15: Laboratorní sušárna MEMMERT	27
Obrázek 14: Laboratorní sušárna Matest	27
Obrázek 16: Vodní nádrž od firmy CONTROLS	27
Obrázek 17: Váha značky TSCALE	27
Obrázek 18: Graf procentuálních zastoupení jednotlivých složek betonu v receptuře	29
Obrázek 19: Urychlovací přísada	30
Obrázek 20: Použitý portlandský cement	30
Obrázek 21: Urychlovací přísada Stachement	30
Obrázek 22: Kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 0/4	31
Obrázek 23: kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 4/8	31
Obrázek 24: kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. frakce 8/16.....	31
Obrázek 25: Suroviny těsně před přidáním do míchačky	32
Obrázek 26: Bednicí formy	33
Obrázek 27: Čerstvě ztuhlý beton.....	33
Obrázek 28: Ošetření vzorků fólií po dobu 24 hodin	33
Obrázek 29: Čerstvě odbedněné vzorky po 24 hodinách po uložení do forem	33
Obrázek 30: uložení vzorků P1 v prostředí vzduchu laboratoře	34
Obrázek 31: uložení vzorků P2 do sušárny Matest při 50 °C.....	34
Obrázek 32: Uložení vzorků P3 do vodní nádrže při 50 °C	35

Obrázek 33: Uložení vzorků P4 do sušárny Memmert	35
Obrázek 34: Uložení vzorků P5 do vodní nádrže o teplotě 22 °C	35
Obrázek 35: Uložení vzorků s urychlovačem P6 v prostředí vzduchu laboratoře	35
Obrázek 36: Uložení vzorků P7 do sušárny Matest o teplotě 70 °C	36
Obrázek 37: Uložení vzorků P8 do vodní nádrže o teplotě 70 °C	36
Obrázek 38: Příklady správně porušených vzorků.....	37
Obrázek 39: Příklady nesprávně porušených vzorků	38
Obrázek 40: Sekvence fotek z průběhu zatěžovací zkoušky	38
Obrázek 41: Aritmetické průměry pevností v tlaku.....	42
Obrázek 42: Charakteristické pevnosti v tlaku	42
Obrázek 43: Procentuální porovnání průměru pevností vzorků v sušárně Matest.....	44
Obrázek 44: Procentuální porovnání charakteristických pevností vzorků v sušárně Matest.....	44
Obrázek 45: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků vodního uložení	45
Obrázek 46: procentuální porovnání charakteristických pevností vzorků v závislosti na obsahu urychlovače tuhnutí.....	46
Obrázek 47: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků za stejné teploty 22 °C na vzduchu a ve vodě.....	47
Obrázek 48: Procentuální porovnání průměrů pevností vzorků za stejné teploty 50 °C v sušárně (ve fólii) a ve vodě	48
Obrázek 49: Procentuální porovnání průměru pevností vzorků za stejné teploty 70 °C sušárně (fólie) a ve vodě.....	49
Obrázek 50: Odhadnutý časový průběh pevností.....	51

15. Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Hlavní slínkové minerály [10]	11
Tabulka 2: Receptura 1	28
Tabulka 3: Receptura 2	28
Tabulka 4: Shrnutí postupů ošetřování.....	36

16. 1Reference

- [1] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Sokolská 15, Praha 2: informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty [online]. 4. vydání. Praha, 2018 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodasl/sh/>
- [3] PYTLÍK, Petr. Technologie betonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997. ISBN 80-214-077904.
- [4] EBETON. EBETON [online]. 153 00 Praha 5 – Radotín: BETON TKS, 2021 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz>
- [5] PIERRE-CLAUDE a AÏTCIN. Vysokohodnotný beton. Praha: ČKAIT, 2005. ISBN 9788086769394.
- [6] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv. New generation cement concretes. 1. vydání. Košice Technická univerzita Košice, Stavební fakulta, 2008 s. ISBN 978-80-553-0040-5
- [7] Ettringite. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ettringite>
- [8] MALINOVSKÝ, Vít. Beton a betonové konstrukce. 2015. Přednáška. ČVUT fd.
- [9] ŠAUMAN, Zdeněk. Maltovin. Vysoké učení technické v Brně, 1993 ISBN 80-214-0509-0.
- [10] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. Stavební hmoty 1 [online]. FAST VŠB -TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~khe0007/podklady_vyuka/hmotyII/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf
- [11] KREJČÍ, SEHNOUTEK a ŠEJNOHA. Structure-subsoil interaction in view of transport processes in porous media. Czech Technical University in Prague, 2001.
- [12] MAEKAWA, CHAUBE a KISH. Modelling of Concrete performance [online]. London: E & FN Spon, 1999.
- [13] HLAVÁČ, Jan. Základy technologie silikátů Praha: : Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-816-88.
- [14] BÁRTA. Chemie a technologie cementu Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [15] TAYLOR. Cement chemistry 2. Londýn: Thomas Telford Publishing, 1997. ISBN 0727725920.
- [16] ROUSEKOVÁ a BAJZA. Technológia betónu. Bratislava: JAGA GROUP, 2006. ISBN 80-8076-032-2.
- [17] STACHEMA: Přísady do betonu [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/>
- [18] STAVEBNINY DEK [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/>

NORMY:

ČSN EN 1990


ČSN EN 12 390-3

ČSN EN 197-1




17. Přílohy – protokoly

- protokol tlakové zkoušky ze dne 13.3.2022

 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STAVEBNÍ Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ												
Zpráva o zkoušce			ze dne:		14.03.22		Číslo protokolu		:		PT_BC1/2022	
Akce			: BP_Škorpilová									
Výsledky laboratorních zkoušek												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa	Objem. hmot.	Datum		Stáří vzorku	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Délka	Šířka	Výška			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm	g	kg/m ³	d.m.r.	d.m.r.	dny	kN	MPa	
1	P1	100,0	100,5	99,8	2336,1	2330	07.03.2022	14.03.22	7	347,39	34,6	Ošetřování na vzduchu laboratoře
2	P1	100,2	99,7	100,1	2320,0	2323	07.03.2022	14.03.22	7	422,27	42,3	
3	P1	100,8	100,0	100,4	2352,7	2325	07.03.2022	14.03.22	7	327,82	32,5	
4	P1	100,0	101,3	100,9	2354,0	2304	07.03.2022	14.03.22	7	354,51	35,0	
5	P1	100,6	101,0	100,2	2334,3	2294	07.03.2022	14.03.22	7	423,31	41,7	
6	P1	99,9	98,7	100,5	2288,6	2309	07.03.2022	14.03.22	7	344,78	34,9	
1	P2	100,5	99,2	100,1	2318,2	2324	07.03.2022	14.03.22	7	421,31	42,3	Ošetřování v peci na 50 stupňů
2	P2	100,2	101,2	100,4	2371,7	2330	07.03.2022	14.03.22	7	487,11	48,0	
3	P2	100,5	99,1	102,5	2388,7	2339	07.03.2022	14.03.22	7	479,80	48,2	
4	P2	102,0	101,1	100,7	2410,1	2319	07.03.2022	14.03.22	7	431,54	41,8	
5	P2	100,8	99,9	100,3	2370,5	2347	07.03.2022	14.03.22	7	500,65	49,7	
6	P2	100,0	100,9	100,1	2358,4	2337	07.03.2022	14.03.22	7	352,32	34,9	
1	P3	100,22	98,84	100,11	2310,15	2330	07.03.2022	14.03.22	7	371,93	37,5	Ošetřování ve vodní nádrži na 50 stupňů
2	P3	100,51	100,02	101,2	2408,85	2368	07.03.2022	14.03.22	7	433,85	43,2	
3	P3	100,69	100,86	100,78	2401,1	2346	07.03.2022	14.03.22	7	423,58	41,7	
4	P3	100,16	100,11	99,9	2364,05	2360	07.03.2022	14.03.22	7	304,59	30,4	
5	P3	100,22	102,02	100,28	2426,85	2367	07.03.2022	14.03.22	7	338,43	33,1	
6	P3	100,38	100,21	100,08	2403,3	2387	07.03.2022	14.03.22	7	379,16	37,7	
1	P4	99,8	101,2	99,9	2330,4	2311	07.03.2022	14.03.22	7	426,62	42,2	Ošetřování v klimakomoře na 50 stupňů
2	P4	99,8	99,9	99,8	2323,9	2336	07.03.2022	14.03.22	7	417,12	41,9	
3	P4	99,9	100,7	99,8	2351,8	2342	07.03.2022	14.03.22	7	438,00	43,6	
4	P4	100,0	100,5	100,3	2360,4	2342	07.03.2022	14.03.22	7	385,51	38,4	
5	P4	100,0	99,5	100,3	2346,4	2350	07.03.2022	14.03.22	7	458,54	46,1	
6	P4	100,2	98,8	100,1	2310,2	2330	07.03.2022	14.03.22	7	463,08	46,7	
1	P5	100,28	99,15	100,09	2359,25	2371	07.03.2022	14.03.22	7	332,62	33,5	Ošetřování ve vodě při 22 stupních
2	P5	100,79	100,59	100,61	2432,05	2384	07.03.2022	14.03.22	7	373,20	36,8	
3	P5	100,2	99,97	100,61	2402,9	2384	07.03.2022	14.03.22	7	313,55	31,3	
4	P5	100,41	101,43	100,63	2431,35	2372	07.03.2022	14.03.22	7	317,97	31,2	
5	P5	101,06	100,94	100,59	2400,1	2339	07.03.2022	14.03.22	7	347,20	34,0	
6	P5	100,45	100,78	100,81	2411,35	2363	07.03.2022	14.03.22	7	287,78	28,4	
Typ zkoušky			: Tlak				Zkoušel			: Markéta Škorpilová		
Druh vzorku			: Krychle 100x100x100				Vypracoval			: Markéta Škorpilová		
Teplota			: 22 °C				Vedoucí laboratoře			: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		
Relativní vlhkost			: 38%				Kontroloval			: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		

- protokol tlakové zkoušky ze dne 11.4.2022

 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STAVEBNÍ Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ												
Zpráva o zkoušce			ze dne: 11.04.22				Číslo protokolu :					
Zákazník												
Akce : BK_Škoprilová												
Výsledky laboratorních zkoušek												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Délka mm	Šířka mm	Výška mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	
1	P6	99,8	100,2	100,2	2288,8	2283	04.04.2022	11.04.22	7	407,78	40,8	urychlovač
2	P6	100,6	100,1	100,3	2284,5	2263	04.04.2022	11.04.22	7	366,82	36,4	
3	P6	98,2	99,7	100,0	2249,2	2299	04.04.2022	11.04.22	7	373,05	38,1	
4	P6	99,1	100,1	100,1	2268,0	2284	04.04.2022	11.04.22	7	349,17	35,2	
5	P6	99,3	100,1	100,2	2284,8	2293	04.04.2022	11.04.22	7	407,70	41,0	
6	P6	99,7	99,8	100,2	2271,6	2277	04.04.2022	11.04.22	7	383,81	38,5	
1	P7	98,6	100,2	100,6	2284,2	2298	04.04.2022	11.04.22	7	378,43	38,3	pec 70 stupňů
2	P7	100,0	99,7	100,0	2297,8	2303	04.04.2022	11.04.22	7	355,85	35,7	
3	P7	99,4	99,9	100,2	2282,3	2292	04.04.2022	11.04.22	7	332,32	33,4	
4	P7	99,2	100,3	100,1	2268,5	2279	04.04.2022	11.04.22	7	405,43	40,8	
5	P7	100,8	100,2	100,1	2321,1	2295	04.04.2022	11.04.22	7	402,20	39,8	
6	P7	100,1	99,9	100,3	2314,0	2307	04.04.2022	11.04.22	7	390,70	39,1	
1	P8	98,4	99,9	100,0	2342,0	2382	04.04.2022	11.04.22	7	434,62	44,2	vodní nádrž 70 stupňů
2	P8	96,7	99,9	100,1	2297,4	2375	04.04.2022	11.04.22	7	384,27	39,8	
3	P8	98,1	99,8	100,6	2323,0	2358	04.04.2022	11.04.22	7	439,77	44,9	
4	P8	98,1	100,2	99,7	2325,2	2374	04.04.2022	11.04.22	7	409,96	41,7	
5	P8	98,5	99,9	100,4	2374,2	2402	04.04.2022	11.04.22	7	303,70	30,8	
6	P8	99,6	101,0	99,9	2362,7	2353	04.04.2022	11.04.22	7	417,35	41,5	
Typ zkoušky			: Tlak				Zkoušel			: Markéta Škoprilová		
Druh vzorku			: Krychle 150x150x150				Vypracoval			: Markéta Škoprilová		
Teplota			: 22 °C				Vedoucí lab.			: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		
Relativní vlhkost			: 38%				Kontroloval			: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		