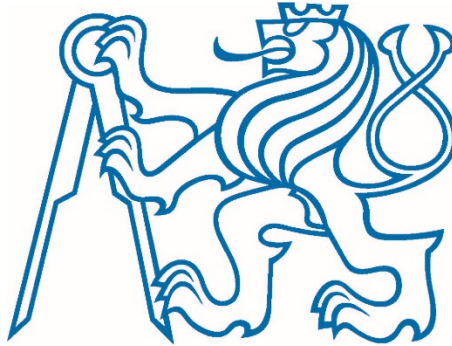


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Experimentální analýza betonu při extrémně nízkých teplotách

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan Ph.D.
Ing. Jakub Holan

Bc. Václav Vild

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Vild Jméno: Václav Osobní číslo: 439054
Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální analýza betonu při extrémně nízkých teplotách

Název diplomové práce anglicky: Experimental Analysis of Concrete at Extremely Low Temperatures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.

Návrh experimentálního programu.

Realizace experimentů.

Vyhodnocení experimentů.

Diskuze a závěr.

Seznam doporučené literatury:

Normy: ČSN EN 206+A1, ČSN EN 934-2, ČSN EN 12390.

PIGEON, M., PLEAU, R. Modern concrete technology 4. Durability of concrete in cold climates, Taylor & Francis Group, 2006.

COLLEPARDI, M. Moderní beton. Praha: ČKAIT, 2009.

SVOBODA, L. Stavební hmoty. Bratislava: Jaga, 2004.

TRTÍK, K. Technologie betonu. ČVUT, 2009.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23. 9. 2019 Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

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“.

30. 9. 2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 19. prosince 2019

Podpis

Poděkování

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucím své diplomové práce a to Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., a Ing. Jakubu Holanovi za ochotné vedení, předané znalosti, podnětné rady při konzultacích, věnovaný čas a zapůjčenou literaturu. Dále bych rád poděkoval Českomoravskému betonu, oddělení BETOTECH s r.o., v Králově Dvoře za spolupráci a možnost využití jejich laboratoře pro své experimenty, zejména Ing. Jiřímu Žáčkovi a Ing. Stanislavu Smiřickému.

V Praze dne 19. prosince 2019

Abstrakt

Ideální teploty pro betonáž, které uvádějí předpisy, se pohybují v rozmezí od 10 °C do 23 °C. Těch však nelze vždy dosáhnout. Je tedy nutné zjistit, jak se beton chová při nízkých teplotách, které mohou nastat v zimním období. Nejnižší doporučená teplota pro betonáž v zimním období je 5 °C. Je tedy zapotřebí zjistit, co se s betonem stane, bude-li teplota nižší.

Hlavním cílem práce je zjistit, jak se bude beton chovat při nízkých teplotách a stanovit teploty, při kterých dochází k nenávratnému poškození struktury betonu. Mezi dílčí cíle spadá zjistit chování betonu při uložení do bednění při nízkých teplotách, vyhodnocení vlivu okolních podmínek na beton, zda dojde k poškození betonu či nikoli a jestli beton dosáhne požadované pevnosti. Součástí práce jsou doprovodné zkoušky ztvrdlého betonu.

Diplomová práce obsahuje teoretickou část a experimentální část. V teoretické části práce jsou zpracována teoretická východiska zabývající se obecným složením betonu s přidáním chemických přísad a zkoušení na zkušebních tělesech. Jsou zde popsány jednotlivé druhy přísad, jejich vliv na čerstvý nebo ztvrdlý beton, normové požadavky a používané chemické látky. Dále je zde popsána metoda zkoušení betonu v tlaku, zkouška odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemicky rozmrazovacích látek a zkouška obsahu vzduchu v betonu.

Experimentální část obsahuje popis zkoušek provedených na vzorcích vystavených nízkým teplotám v různých stavech, které mohou na stavbě nastat. V této části jsou rovněž popsány a diskutovány získané výsledky.

Hlavním přínosem práce je popis chování betonu při nízkých teplotách a stanovení teplot, při kterých dochází k nenávratnému poškození struktury betonu.

Klíčová slova: beton, betonová směs, zkoušky betonu, struktura, experiment, betonáž, pevnosti, nízké teploty

Abstract

The ideal prescribed temperature range for the casting of concrete is between 10 °C to 23 °C. However, these temperatures cannot be always achieved. It is, therefore, necessary to find out how concrete behaves at low temperatures, which can occur in winter. The lowest recommended temperature for the casting of concrete in winter is 5 ° C. It is therefore necessary to determine what happens to the concrete if the temperature is lower.

The main aim of this work is to find out how concrete will behave at low temperatures, and to determine at which temperature irreversible occurs to the concrete structure. Partial objectives include determining the behaviour of concrete when placed in the formwork at low temperatures and to evaluate the influence of environmental conditions on the concrete, i.e. whether or not the concrete is damaged and whether the concrete reaches the required strength. Part of the work are accompanying tests of hardened concrete.

The thesis contains a theoretical part and an experimental part. In the theoretical part of the thesis, are theoretical topics dealing with the general composition of concrete with the addition of chemical additives and testing on concrete test specimens are elaborated. There are described various types of additives, their influence on fresh or hardened concrete, norm requirements and used chemicals. Further, there is described the method of testing concrete in compression, resistance test of cement concrete against the action of water and chemically de-icing substances and test of air content in concrete.

The experimental part contains a description of tests carried out on samples exposed at low temperatures in various states that may occur on the construction site. The results obtained are also described and discussed in this section.

The main contribution of this work is a description of the concrete behaviour at low temperatures and the determination of the temperatures at which irreversible damage to the structure of concrete occurs.

Keywords: concrete, concrete mix, concrete tests, structure, experiment, concreting, strength, low temperatures

Obsah

ÚVOD	1
TEORETICKÁ ČÁST.....	2
1. Složení betonu	3
1.1. Kamenivo.....	3
1.2. Cement	3
1.3. Voda	3
1.4. Přísady	3
1.5. Příměsi.....	10
1.6. Pigmenty.....	12
1.7. Vlákna	12
1.8. Shrnutí informací o přísadách	13
2. Betonáž za nízkých teplot	15
2.1. Nízké teploty – obecně.....	15
2.2. Sníh a led v bednění	15
2.3. Zmrznutí čerstvého betonu	15
3. Opatření při betonáži za nízkých teplot	16
3.1. Cement – hydratační teplo.....	16
3.2. Ohřátí složek betonu	16
3.3. Zakrytí.....	16
3.4. Vyhřívání konstrukce.....	16
4. Zkoušky	18
4.1. Zkouška pevnosti betonu v tlaku	18
4.2. Zkouška odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL).....	21
4.3. Zkouška obsahu vzduchu	24
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
5. Cíl a příprava experimentálního programu	27
5.1. Návrh směsi	27
5.2. Finální směs	33
6. Experimenty.....	34

6.1.	Zkouška provzdušnění.....	34
6.2.	Experiment – Teplota 10 °C.....	36
6.3.	Experiment – Teplota 5 °C.....	42
6.4.	Experiment – Teplota 2 °C.....	44
6.5.	Experiment – Teplota 0 °C.....	47
6.6.	Experiment – Teplota - 5 °C.....	49
6.7.	Experiment – Teplota - 10 °C	52
6.8.	Experiment – Teplota - 15 °C	56
6.9.	Experiment – Teplota - 20 °C a porovnání různých teplot.....	60
6.10.	Průběžné střídání teplot.....	65
6.11.	Rozmrazení	68
6.12.	Vymrzlé bednění.....	73
9.	Diskuze.....	77
	ZÁVĚR.....	79
	LITERATURA	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK.....	84

ÚVOD

Odborná literatura uvádí, že ideální teploty pro betonáž se pohybují v rozmezí od 10 °C do 23 °C. Těchto teplot však nelze vždy dosáhnout. Pro betonáž v zimním období je nutné zjistit, jak se beton chová při nižších teplotách. Literatura uvádí, že nejnižší doporučená teplota pro práci s betonem je 5 °C. Je tedy nutné stanovit, jak se bude beton chovat při vystavení nižším teplotám, než je tato.

Hlavní motivací k vypracování této práce je především má dlouholetá praxe v oboru a zájem o zjištění limitů betonu pro přechod z plastického stavu do stavu tuhého a nabývání na pevnosti. Dané téma experimentů jsem si také vybral z důvodu následného využití v praxi – tj. pro stanovení, kdy je lepší práci přerušit a kdy je možné pokračovat ve výstavbě.

V teoretické části práce se zabývám obecným složením betonu s přidáním chemických přísad a na zkouškami zkušebních těles. Jednotlivé přísady jsou v této části podrobně popsány včetně jejich vlivu na čerstvý nebo ztvrdlý beton. Dále jsou zde popsány normové požadavky a používané chemické látky. V této části je také popsána metoda zkoušení betonu v tlaku, zkouška odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemicky rozmrazovacích látek (CHRL) a zkouška obsahu vzduchu v betonu.

V praktické části jsou popsány navržené experimenty, při kterých je beton vystaven nízkým teplotám a je pozorováno, jak se beton při takových teplotách chová a jakých pevností dosahuje.

Hlavním cílem této diplomové práce je zjistit, při jaké teplotě beton dojde k omezení (zastavení) hydratace cementu a nebude dosažena návrhová hodnota pevnosti betonu. Dílčím cílem práce je zjistit, jaký vliv mají nízké teploty na strukturu betonu.

TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce je rozdělena do čtyř kapitol, přičemž každá kapitola je zaměřena na popis jiné problematiky.

První kapitola je věnována složení betonu. V této části jsou popsány základní složky, ze kterých se beton skládá a jaké složky můžeme do betonu přidat, abychom dosáhli požadovaných vlastností betonu.

Druhá a třetí kapitola se věnuje úpravám před betonáží a technologickým postupům, které můžeme využít při výskytu nízkých teplot na staveništi.

V poslední kapitole jsou popsány normové zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu. Tyto zkoušky jsou je vždy nutné provést pro stanovení chování čerstvé betonové směsi a pro ověření požadovaných vlastností.

1. Složení betonu

„Beton je materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami, příměsemi, s vlákny nebo bez nich. Beton získává své vlastnosti hydratací cementu.“ [N1].

Beton bývá vystaven různému působení prostředí, a aby byl schopný takovému působení odolat, musí jeho složení odpovídat minimálním požadavkům na obsah cementu (pojiva) a vodního součinitele. Požadovaných vlastností je možno dosáhnout přidáním přísad, příměsí a dalších složek. Použití přísad, příměsí a dalších složek je specifikováno v normě ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [N1].

1.1. Kamenivo

Hlavní funkcí kameniva je vytvoření pevné kostry betonu s minimální mezerovitostí. Návrh betonové směsi závisí na druhu kameniva. Kamenivo může být buď drcené nebo těžené a dělí se dle maximální velikosti zrna na drobné do max. průměru zrna 4 mm a hrubé o max. průměru zrna nad 4 mm a dle původu na těžené (písky) a drcené (drtě získávané v lomech). Tato charakteristika se projeví v návrhu potřebné vody na smáčení kameniva. Cementový tmel obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva a vznikne rozpuštěním cementu ve vodě. [4]

1.2. Cement

„Cement je jemně mletá anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi, která po smíchání s vodou v důsledku chemických reakcí tuhne a tvrdne. Díky své konzistenci na sebe dokáže vázat zrna kameniva a vytváří tak kompaktní stavební hmotu tzv. cementový tmel.“ Také cement podléhá evropským normám (ČSN EN 197-1), ve kterých je definováno pět základních druhů cementů a speciální cementy. Nejčastěji používaným pojivem je portlandský cement, jehož hlavní složkou je mletý portlandský slínek. Cement vykazuje řadu chemických a fyzikálních vlastností, které výrazně ovlivňují, jak čerstvou betonovou směs, tak ztvrdlý beton, a je proto důležitou složkou celé směsi.[3]

1.3. Voda

Další důležitou složkou betonu je voda. Pro výrobu betonu se používá takzvaná voda záměsová, která obsahuje dostatečné množství minerálů. Stejně jako kamenivo a cement, i voda podléhá jistým požadavkům, které jsou definovány evropskou normou ČSN EN 1008. Norma především definuje, které vody jsou vhodné a použitelné, ale také vody nepoužitelné. Použitím nevhodné vody může způsobit znehodnocení betonové směsi, korozi použité výztuže a celkovou degradaci konstrukce. [3]

1.4. Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají do čerstvého betonu v procesu míchání za účelem dosáhnout požadované vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu. „Nejpoužívanější formou přísad bývají látky kapalné, ale v některých případech se mohou vyskytovat i jako práškové.“ Jejich přidávané množství se pohybuje v relativně malých dávkách, a to v jednotkách procent hmotnosti cementu a v závislosti na individuálních požadavcích pro konkrétní beton. [1] „Maximální povolená dávka se uvádí dle ČSN EN 206 5 % hmotnosti cementu. Při vyšším množství je nutné prokázat, že

nedochází ke zhoršení vlastností a trvanlivosti betonu. Při dávce menší než 0,2 % hmotnosti cementu je potřeba rozmíchat přísadu v části záměsové vody. Pokud je množství použité přísady vyšší než 3 l/m³ betonu, musí se vzít v úvahu při stanovení vodního součinitele.“ V případě použití více přísad je nutné prokázat vzájemnou snášenlivost průkaznými zkouškami. Přísady do betonu jsou jmenovitě specifikovány požadavky v evropské normě ČSN EN 934-2 - *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Definice, požadavky, shoda, značení a označování štítky* [N2].

Působení přísad je směřováno především na cementovou suspenzi, důležitou roli tudíž hraje druh cementu. Přísady působí na konzistenci betonu (oddalují od sebe zrna cementu nebo stabilizují složky betonu) a na průběh hydratace cementu (urychlují nebo zpomalují tuhnutí a tvrdnutí betonu). Jemněji mleté cementy mají větší reakční plochu, což urychluje průběh fyzikálně chemických procesů po smíchání cementu s vodou. Na druhou stranu může vyšší jemnost mletí způsobit snadnější shlukování zrn cementu. Na účinnost přísad má vliv jak jejich koncentrace, tak i původ a mineralogické složení cementu. [3]

Přísady se dělí podle hlavního účelu na následující typy (ČSN EN 934-2+A1 [N3]):

- vodoredukující plastifikační přísada,
- silně vodoredukující/superplastifikační přísada,
- stabilizační přísada,
- provzdušňovací přísada,
- přísada urychlující tuhnutí,
- přísada urychlující tvrdnutí,
- přísada zpomalující tuhnutí,
- těsnící přísada,
- vodoredukující/plastifikační přísada zpomalující tuhnutí,
- silně vodoredukující/superplastifikační přísada zpomalující tuhnutí,
- vodoredukující/plastifikační přísada urychlující tuhnutí,
- přísada upravující viskozitu.

Tato práce se zabývá chováním betonu při nízkých teplotách, proto se budu zabývat zejména přísadami, které ovlivňují beton při takových podmínkách, ale okrajově se zmíní i o dalších přísadách a příměsích.

1.4.1 Plastifikační přísady

Plastifikační přísady jsou nejdéle a nejčastěji používané přísady, které buď umožňují snížit množství záměsové vody, nebo zlepšují jeho zpracovatelnost. Jejich aplikací můžeme vyrobit beton požadovaných vlastností v čerstvém nebo ve ztvrdlém stavu. Používají se hlavně pro transportbeton, a to pro usnadnění zpracování nebo pro dosažení lepší kvality povrchu a detailů betonové konstrukce. Plastifikační přísady lze použít následujícími způsoby:

- snížení množství záměsové vody, což umožní: - snížení vodního součinitele (w/c) za současného zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu,
- zachování w/c při současné redukcí obsahu cementu, což vede k stejnému výsledku dosažené pevnosti, odolnosti a zpracovatelnosti společně s úsporou materiálových nákladů a ke sníženému vývoji hydratačního tepla a redukce smrštění,
- zachování w/c při současném zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu, zlepšení probetonování detailů konstrukce, snížení plochy pórů na povrchu konstrukce a zrychlení postupu betonáže. [3]

Plastifikátory snižující obsah záměsové vody se dále dělí podle účinků na tři druhy:

- N ... přísada bez vlivu na průběh tuhnutí,
- R ... zpomalující přísada,
- A ... urychlující přísada.

Doporučené dávkování se pohybuje do 3 % hmotnosti cementu dle individuálních požadavků. Záleží také například na druhu přísady a dále na druhu a množství použitého cementu. [3]

Při testování chemických látek jako plastifikačních přísad musí být dosaženo minimálních efektů při porovnávání referenčního betonu a betonu s přísadou. Při stejné konzistenci musí být dosaženo redukce obsahu záměsové vody alespoň o 5 %. Pevnost betonu v tlaku ztvrdlého betonu s touto přísadou v porovnání s referenčním betonem bez přísady musí dosáhnout po 7 dnech i po 28 dnech minimálně 110 % pevnosti referenčního betonu. V dnešní době jsou nabízeny plastifikátory, které udávají dosahující redukci záměsové vody až o 10 %. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší. [4]

1.4.2 Superplastifikační přísady

Superplastifikátory jsou přísady silně snižující potřebné množství záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti a mají stejné způsoby použití jako přísady plastifikační. Použití a dávkování je tedy obdobné jako u výše popsaných plastifikačních přísad (kap. 1.1.1). Rozdílem jsou kompatibilita s cementem, delší doba zpracovatelnosti nebo omezení krvácení betonu. [4]

Rozdíl v účinnosti superplastifikačních a plastifikačních přísad je v odlišném chemickém působení. Plastifikátory se váží elektrostatickými silami na tuhé částice, tedy zrna cementu, a vytváří na nich jednotný záporný náboj. Tento jev způsobuje vzájemné elektrostatické odpuzování jednotlivých zrn cementu a tím zlepšuje podmínky pro dosažení požadované konzistence, snižuje potřebu záměsové vody a tím i vodní součinitel. Superplastifikátory moderní generace na bázi polykarboxylátů jsou tvořeny organickými molekulami s dlouhými řetězci, které se váží na zrna cementu jedním koncem svého řetězce. Druhý konec molekuly superplastifikátoru zůstává volný a rotuje okolo zrn cementu, což způsobuje sférické odpuzování. Toto odpuzování má daleko větší účinek než odpuzování elektrostatické a efekt trvá i po nastartování vzniku hydratačních produktů, které naopak eliminují plastifikační účinek. Tím je zaručena delší doba zpracovatelnosti. [4]

Používají se přísady na bázi následujících organických látek:

- polykarboxyláty (superplastifikátory moderní generace),
- soli a deriváty ligninsulfonanů,
- syntetické vodorozpustné kondenzáty polymerů. [4]

Pro zařazení do kategorie superplastifikátorů musí chemické látky splnit přísnější požadavky v rámci porovnávacích testů směsí se stejnou konzistencí nebo směsí se stejným vodním součinitelem. V prvním případě je nutné snížit obsah záměsové vody alespoň o 12 %. S tím související pevnost betonu v tlaku má být po prvním dnu minimálně 140 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady a po 28 dnech alespoň 115 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady. V druhém případě musí dojít ke zlepšení konzistence. Pro referenční beton po přidání přísady musí být sednutí směsi větší alespoň o 120 mm z původních 30 ± 10 mm a zvětšení rozlití alespoň o 160 mm z původních 350 ± 20 mm. Konzistence čerstvého betonu nesmí klesnout po 30 minutách od přidání přísady pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi bez přísady. Pevnost betonu v tlaku by měla být po 28 dnech alespoň 90 % pevnosti referenčního vzorku bez přísady. Zároveň musí být u obou případů obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší. [3]

1.4.3 Provdzušňovací přísady

Hlavní funkcí provzdušňujících přísad je vytvoření vzduchových bublinek rovnoměrně rozmístěných v čerstvém betonu. Tyto póry slouží jako expanzní prostor při zvětšujícím se objemu krystalů ledu nebo chemických solí (rozmrázovací soli nebo soli v mořské vodě) a eliminují tak tlak v pórovité struktuře cementového kamene. Voda při změně skupenství z kapaliny v led zvětší objem cca o 9 %. Zmrzne-li voda nasáklá do kapilárních pórů v cementovém kameni, vyvozuje pak zvětšený objem ledu tlak na stěny pórů a tím napětí v betonu, které může způsobit vznik trhlin a poškození betonu. Přidání provzdušňovací přísady do čerstvého betonu způsobí, že se v něm během míchání vytvoří potřebné množství drobných pórů, které v betonu zůstanou i po jeho zatvrdnutí ve formě pórů. Póry pak přeruší kanálky ve formě kapilár a vytvoří tak prostor, do kterého může voda mrznoucí v led expandovat. To je důvod, proč jsou betony s rozptýlenými vzduchovými póry odolnější vůči působení mrazu. Používají se do vnějšího prostředí zejména ve vodním, silničním a mostním stavitelství. Dalšími příznivými účinky jsou např. snížení segregace a odměšování vody v čerstvém betonu, snížení spotřeby záměsové vody, nebo zlepšení tekutosti. [W8]

Distribuce a velikost pórů závisí na následujících parametrech

- druh a množství přísady, dávka přibližně 0,05 – 0,5 % hmotnosti cementu pro obsah vzduchu až 6 %,
- množství, druh a jemnost mletí cementu (případně příměsí), čím jemnější mletí, tím větší množství provzdušňující přísady je potřeba. [4]

Důležitou roli má velikost vytvořených bublinek, která se má pohybovat od 0 do 300 μm , a tzv. součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů, neboli spacing factor. Spacing factor je definován jako průměrná maximální vzdálenost kteréhokoliv bodu v cementovém kameni od okraje pórů. Tento parametr se stanovuje mikroskopickým měřením. K měření může být využit automatický přístroj, který pro měření vyžaduje vyleštěný povrch vzorku a vyplněné póry kontrastní látkou (zpravidla bílou), aby mohl rozpoznat dané póry. Druhým způsobem je ruční měření, kdy laborant na naleštěném povrchu pomocí mikroskopu a posuvného zařízení zaznamenává počet a velikost pórů.

V dnešní době se používají různé typy provzdušňovacích přísad. Jsou to buď chemické látky na bázi přirozených pryskyřic, nebo soli mastných kyselin, které mění povrchové napětí vody. [W8]

Dále je možné použít pevné duté tenkostěnné granule tzv. mikrodutinky o průměrech 0,02 až 0,08 mm, které vytvářejí dostatečně hustý systém mikropórů o zaručené velikosti. Jejich dávka se pohybuje mezi 1 až 3 kg/m^3 betonu. U těchto látek je důležité stanovení správné dávky pro dosažení potřebného obsahu vzduchu v betonu tak, aby byla zajištěna správná velikost pórů a jejich rozmístění v betonu. Účinnost provzdušňovací přísady je tedy dána velikostí vzduchových pórů, která by měla být od 0 do 0,300 mm, jejich vzájemnou vzdáleností a součinitelem prostorového rozložení pórů, který by měl být menší než 0,2 mm. Větší vzduchové póry snižují pevnost i trvanlivost betonu. Větší vzdálenost jednotlivých mikropórů pak nemá na trvanlivost betonu pozitivní vliv. „Obsah vzduchu v čerstvém betonu by měl být při použití provzdušňovací

přísady minimálně o 2,5 objemových % větší než u receptury bez přísady a celkový obsah by měl být od 4 do 6 objemových %." Každé procento provzdušnění však snižuje objemovou hmotnost a tím i pevnost betonu v tlaku. [W8]

„S narůstajícím procentem provzdušnění klesá pevnost betonu v tlaku, a to přibližně o 1-3 % na 1 % provzdušnění.“ Při použití musí mít beton pevnost po 28 dnech minimálně 75 % pevnosti referenčního vzorku betonu bez provzdušnění. Provzdušňovací přísady působí pozitivně na zpracovatelnost betonu (bublinky ztekucují beton) a tím mohou přispět ke snížení množství záměsové vody. Při stejné zpracovatelnosti směsi sníží množství vody přibližně o 2 % na 1 % provzdušnění. Zkoušky tohoto efektu se musí provádět pro směsi při stejné konzistenci. [W8]

Při ukládání betonu do bednění pomocí čerpadla na beton může dojít ke ztrátě procenta provzdušnění směsi. Je to dáno tím, pod jak velkým tlakem je beton transportován a zda tlakem dojde k rozkmitání pórů, které se následně dostanou na povrch a dále ven ze směsi. V důsledku Archimedova zákona jsou větší silou nejdříve vytlačovány velké póry, které však nemají pozitivní vliv na odolnost betonu, proti účinkům mrazu a rozmrazovacích prostředků. [W8]

1.4.4 Přísady urychlující tuhnutí

Přísady urychlující tuhnutí urychlují přechod mezi plastickým a tuhým stavem.

Při nízkých teplotách dochází k pomalému rozpouštění cementu a zpomalují se chemické reakce. Pomalé chemické reakce pak vedou k nízké rychlosti uvolňování hydratačního tepla, což vede k pomalému nárůstu pevnosti betonu. Nízká teplota pak také způsobuje zamrzání vody v betonu. Používají se například látky na bázi dusitanu vápenatého, dusičnanu vápenatého a dalších. [N1]

Hydratace působí na čerstvý beton v průběhu prvních minutách. Začátek tuhnutí obvykle posunují o 1 až 3 hodiny a zkracují dobu tuhnutí, tedy přechod čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu, obvykle o 1 hodinu. Používají se dva typy urychlovačů tuhnutí, a to na bázi křemičitanu sodného a vodné emulze síranu hlinitého neobsahující alkálie. První jmenované výrazně zkracují dobu tuhnutí přibližně na 10 minut, což má vliv na dlouhodobou pevnost. Druhé jmenované nemají takovou účinnost při snížení doby tuhnutí, ale na druhou stranu nemají vliv na dlouhodobou pevnost betonu. Jejich výhodou je také zdravotní nezávadnost, což se o prvním typu říci nedá. [4]

Pro tento typ urychlovače se hlídá pokles pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, která by neměla klesnout pod 80 % pevnosti referenčního vzorku betonu při stejné konzistenci. Po 90 dnech by měl mít beton už minimálně stejnou pevnost jako referenční vzorek po 28 dnech. Dále počátek doby tuhnutí by měl nastat při 20 °C až po 30 minutách a při 5 °C by měl nastat dříve než 60 % času, kdy nastane počátek doby tuhnutí u kontrolní směsi. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší. [3]

1.4.5 Přísady urychlující tvrdnutí

Přísady urychlující tvrdnutí působí na tvrdnoucí beton v průběhu prvních dní a urychlují vývoj počáteční pevnosti betonu. Také mohou, ale nemusí, mít vliv na tuhnutí betonu. Jsou proto jsou používány v případě potřeby zvýšení jedno až tří denních pevností. To nastane například při prodloužení doby potřebné k odbednění v zimním období, kdy nižší teploty způsobují snížení počátečních pevností, nebo aby beton získal minimální pevnosti 5 MPa. Tato hodnota je hraniční. Pokud má beton pevnosti přes 5 MPa, je schopný odolat mrazu, který se může vyskytnout ve večerních hodinách. Dříve se jako urychlující přísady běžně používaly soli na bázi chloridů, které výrazně zvyšují stupeň hydratace a mají tak vliv na počáteční pevnosti cementové matrice. Problémem u těchto solí je, že jejich ionty napomáhají korozi kovové výztuže v betonu. Z tohoto důvodu se pro vyztužené betony doporučuje používat látky bez obsahu chloridů, mezi které patří například látky na bázi dusitanu a dusičnanu vápenatého, sodného nebo tri-etanolaminu. [3] Urychlovače tvrdnutí jsou v současné době na ústupu a jsou nahrazovány plastifikátory, které ovlivňují nejen počáteční pevnosti, ale i konečné pevnosti betonu snížením množství záměsové vody. U tohoto druhu urychlovače se kontroluje pevnost betonu v tlaku, konkrétně musí při 20 °C po 24 hodinách splnit minimálně 120 % pevnosti referenčního vzorku betonu bez této přísady a alespoň 90 % pevnosti, kterou dosáhne referenční vzorek po 28 dnech. Dále musí při 5 °C po 48 hodinách dosáhnout alespoň na 130 % pevnosti referenčního vzorku. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší. [N1]

1.4.6 Další přísady

Stabilizační přísada je přísada, která zmenšuje odlučování vody z betonu. [N2]

Přísada zpomalující tuhnutí prodlužuje čas počátku přechodu směsi z plastického do tuhého stavu. [N2]

Těsnící přísada zmenšuje kapilární absorpci ztvrdlého betonu. [N2]

Vodoredukující/plastifikační přísada zpomalující tuhnutí vytváří kombinované účinky vodoredukující/plastifikační přísady (hlavní účinek) a přísady zpomalující tuhnutí (vedlejší účinek). [N2]

Silně vodoredukující/superplastifikační přísada zpomalující tuhnutí vytváří kombinované účinky vodoredukující/superplastifikační přísady (hlavní účinek) a přísady zpomalující tuhnutí (vedlejší účinek). [N2]

Přísada upravující viskozitu po přidání do betonu omezuje segregaci zlepšení soudržnosti. [N2]

1.5. Příměsi

Příměsi se v zásadě dělí na dva typy, a to typy inertní a latentně hydraulické.

Příměsi inertního typu se aktivně nepodílejí na procesu hydratace. Jde například o kamennou moučku, práškové pigmenty.

Pro příměsi latentně hydraulické (tzv. druhého typu) jsou charakteristické pucolánové vlastnosti nebo latentní hydraulická projevující se chemicko-fyzikální aktivitou při hydrataci cementového tmelu. Tato hydraulická je aktivována CaOH_2 , který vzniká rozpouštěním cementu.

Tyto příměsi se vyskytují zpravidla ve formě jemných sypkých částic, nebo jsou obsaženy v suspenzích (mikrosilika). Dávkování přísad není zvláště omezeno, jejich dávkování je ve značně větším množství, než tomu je u přísad.

- Inertní příměsi (mleté horniny, kamenná moučka), pigmenty Inertní příměsi se nezúčastňují procesu hydratace,
- Latentně hydraulické (létavý popílek, jemně mletá granulová struska křemičité úlety) nebo pucolány. [1]

Pucolanita je schopnost látky s reakcí oxidu křemičitého v alkalickém prostředí tvrdnout za normální teploty. Podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami, které nazýváme budiče hydraulicity.

1.5.1. Létavý popílek

Popílek je jemný prášek skládající se z kulovitých částic, které vznikají při spalování práškového uhlí. Práškové uhlí se spaluje samotné nebo se spalovaným materiálem. Má pucolánové vlastnosti a skládá se převážně z oxidu křemičitého a hlinitého. [3]

Popílek se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z plynů topenišť otápěných práškovým uhlím.

Zrnitost popílku je závislá na použitých odlučovačích. Z elektrostatických odlučovačů je popílek jemnější než z mechanických.

Popílek se může před jeho použitím upravovat například tříděním, výběrem, proséváním, sušením, smícháváním, mletím, snižováním uhlíku nebo kombinací těchto procesů ve vhodném výrobním zařízení. Takto upravený popílek může sestávat z popílků různých zdrojů. [6]

Podle druhu spalovaného uhlí, lokality a způsobu odlučování z odpadních látek vypouštěných do okolí má proměnlivé mineralogické, chemické a granulometrické složení. Nejvhodnější je popílek z černého uhlí. [3]

Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu a je třeba počítat s vyšší potřebou vody nebo plastifikátoru k dosažení potřebné konzistence. Přidáním popílku lze dosáhnout vyšších dlouhodobých pevností betonu. Příměs popílku snižuje porozitu betonu a tím i zpomaluje karbonataci betonu a nevratné smrštění. Vratné smrštění je způsobeno vysýcháním, nebo naopak vlhnutím betonu.

Maximální množství aktivního popílku m_p , které je povoleno použít při výpočtu vodního součinitele je dáno poměrem popílek/cement $\leq 0,33$ (při použití CEM I), popílek/cement $\leq 0,25$ (při použití CEM II/A).

Při použití latentně hydraulické příměsi se při výpočtu vodního součinitele postupuje dle níže uvedeného vzorce,

$$w = \frac{m_v}{m_c + k * m_p},$$

kde m_v je množství vody [kg/m^3],

m_c je množství cementu [kg/m^3],

m_p je množství příměsi [kg/m^3],

K je hodnota, která je pro příměsi stanovena následovně

popílek	0,4,
struska	0,6,
křemičitý úlet	2,0.

1.5.2. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je prášková latentně hydraulická příměs bílé barvy. Vzniká při výrobě surového železa, kdy vsázka obsahuje i další příměsi, které zhoršují kvalitu surového železa. Proto se do vsázky přidávají struskotvorné přísady. Ze složek hlušiny se vytvářejí lehce tavitelné součásti. Vzniklá struska plave na povrchu surového železa. Na 1 tunu surového železa připadá asi zhruba 0,5 až 0,7 tun strusky. Rudy, které obsahují méně železa, poskytují více strusky. [6] [W9]

Základní složení strusek je oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid manganitý a v malém množství oxid železitý, sulfid vápenatý a sulfid manganatý. [6] [W9]

Struska získaná ve skelné formě je označovaná za strusku granulovanou. Granulace se provádí tak, že se vzduchem nebo vodou rozptyluje tavenina v malých kapkách a vytváří se granule o velikosti cca 4 mm ve skelném stavu. Po granulaci se obsah vody snižuje pod 30% v sušících bubnech. Další způsob granulace je, kdy tavenina strusky je ochlazená vodou a potom ostříkována do vzduchu pomocí rotujícího bubnu. Při tomto postupu je možno získat řadu frakcí strusky od 0 – 4 mm do 4 – 15 mm. [3] [4] [6] [W9]

1.5.3. Křemičitý úlet – Mikrosilika

Křemičitý úlet se skládá převážně z kulovitých částic amorfního oxidu křemičitého menších než 10-6 m s výraznou pucolanitou. Zachycuje se na filtrech jako vedlejší produkt tavicího procesu při výrobě křemíkových kovů a slitin. Může být dodáván, tak jak byl zachycen na filtrech (neaglomerován), po úpravě zvětšení jeho sypané hmotnosti (aglomerován) nebo jako suspenze. Sypaná objemová hmotnost neaglomerované mikrosiliky se pohybuje v rozmezí od 150 kg/m^3 do 350 kg/m^3 a aglomerovaný křemičitý úlet má typickou sypanou hmotnost větší než 500 kg/m^3 . [N10]

Křemičitý úlet je běžně používán spolu s plastifikační a/nebo se superplastifikační přísadou. [N10]

1.6. Pigmenty

Tento typ se na procesu hydratace z pravidla nepodílí, ale není to zcela vyloučeno. A to proto, že nejmenší zrna se mohou tvorby cementového kamene účastnit. Jsou používány práškové pigmenty pro dosažení barevných odstínů betonu s požadavky dle ČSN EN 12878 *Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a vápna – Specifikace a zkušební postupy*[N4]. Barevné pigmenty dodávají betonu různé barevné odstíny a utvářejí tak probarvené betony. Výhodou je rovnoměrně rozmístění pigmentů v celé hloubce betonové směsi a je tak zachována stejná barva i při poškození povrchu, na rozdíl od povrchových úprav. Na konečný barevný odstín betonu má velký vliv použitý odstín cementu a zbarvení kameniva. Při použití běžného portlandského cementu šedé barvy dochází k útlumu jasu barev. Světlych odstínů lze tedy dosáhnout jen s použitím cementu bílé barvy. V tom případě však záleží na architektovi, jak moc si přeje sytou barvu.

1.7. Vlákna

Vlákna můžeme rozdělit do dvou kategorií. Na ocelová vlákna a na syntetická polypropylenová vlákna.

1.7.1. Ocelová vlákna

Ocelová vlákna do betonu musí splňovat požadavky normy ČSN EN 14889-1 a musí odpovídat jedné z následujících skupin a jednomu z tvarů:

1. **Skupina** – podle základního materiálu použitého pro výrobu vláken:
 - Skupina I: za studena tažený drát,
 - Skupina II: vlákna stříhaná z plechu,
 - Skupina III: vlákna oddělovaná z taveniny,
 - Skupina IV: vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
 - Skupina V: vlákna frézovaná z ocelových bloků,
2. **Tvar** – ocelová vlákna mohou být přímá nebo tvarovaná, s přípustnými odchylkami.

Vlastnosti a výhody ocelových vláken v betonu:

- zlepšují pevnost betonů a malt v tahu a v tahu za ohybu (viz reziduální, neboli zbytková pevnost),
- zlepšují houževnatost betonu,
- zlepšují odolnost betonu proti vzniku trhlin, zajišťují rovnoměrné rozdělení trhlin v konstrukci,
- zlepšují smykovou pevnost.

1.7.2. Syntetická polymerová vlákna

Rozdělení:

1. Mikrovlákna s průměrem < 0.30 mm
2. Makrovlákna s průměrem > 0,30 mm

Vlastnosti a výhody polymerových vláken v betonu:

- omezují tvorbu trhlin v betonu a snižují jejich šířku (více tenkých rovnoměrně rozdělených trhlin),
- působí proti plastickému smršťování a omezují tvorbu trhlin způsobených odparem vody z betonu,
- zlepšují houževnatost betonu – zvyšují odolnost proti nárazu a mechanickému poškození,
- prodlužují čas, po který je vyztužený beton schopen odolávat požáru
- jsou nemagnetická, odolná vůči prostředí.

1.8. Shrnutí informací o přísadách

V dnešní době, kdy jsou kladeny velké nároky na únosnost, kvalitu a vzhled betonu, se betonová směs neobejde bez dalších složek. V zimních podmínkách je potřeba dosáhnout co nejrychlejšího nárůstu pevnosti aspoň kolem 5 MPa.

Urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonu je ve stavební praxi velmi důležitým a žádaným zásahem při zhotovování betonových prvků a konstrukcí. Musíme však vzít v úvahu, že pokud použijeme složky zlepšující určité vlastnosti mohou nám tyto složky některé vlastnosti naopak zhoršit a tím nám zvýšit nároky na dodržování přesného technologického postupu. [1]

Základní funkcí přísad tohoto typu je urychlení nárůstu počátečních a krátkodobých pevností. Spojené s urychlením vývinu hydratačního tepla a u mnoha přísad i zkrácení počátku a doby tuhnutí čerstvé betonové směsi. V řadě případů tato vlastnost není žádoucí s ohledem na dodržení požadované doby zpracovatelnosti.

Urychlení tuhnutí a tvrdnutí jsou z hlediska vlastností čerstvé betonové směsi a betonu dva naprosto odlišné pojmy, které je třeba rozlišovat. Jsou odlišné i z hlediska fyzikálně chemických procesů, probíhajících v různých fázích hydratace minerálů v zrnech cementu. Tuhne vždy čerstvá betonová směs; při tvrdnutí se jedná o nárůst pevností již ztuhlého betonu. Většina urychlujících přísad spojuje oba účinky a pokud zkrácení počátku a doby tuhnutí není žádoucí, je třeba si dát pozor na dávkování, případně vzít v úvahu spolupůsobení všech přidaných přísad. [3]

Použité přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí nesmějí mít velký vliv na dlouhodobé pevnosti a další fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. Nejčastěji ovlivňují reologii a stupeň provzdušnění čerstvé betonové směsi. Mění se tak zpracovatelnost a je nutno upravovat skladbu směsi a zejména pak vodní součinitel. Některé přísady také snižují teplotu bodu tání ledu, čímž zabraňují zmrznutí záměsové vody v tuhnuícím betonu.

Usnadňují tak betonáže za mrazu – u některých je uváděna použitelnost až do teploty – 15 °C. Před aplikací urychlujících přísad je vždy třeba ověřit jejich účinky. [5]

Jsou to zejména:

- vliv na průběh a dobu zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi,
- vliv na počátek a dobu tuhnutí čerstvé betonové směsi,
- vliv na počáteční pevnosti betonu,
- vliv na dlouhodobé pevnosti betonu.

Účinky urychlujících přísad jsou závislé na dávce přísady – obecně platí přímá úměrnost mezi dávkou přísady a výší jejího účinku. Neznamená to však, že dávku lze zvyšovat neomezeně. Vyšší dávky mohou tuhnutí příliš urychlit nebo je naopak zabrzdit. Kromě toho mohou při předávkování ovlivnit nežádoucím způsobem dlouhodobé pevnosti betonu, případně jiné vlastnosti betonu. [4] Urychlení tvrdnutí je požadováno obecně při betonážích za nízkých venkovních teplot, kdy se zkracuje doba pro odbedňování. [5]

2. Betonáž za nízkých teplot

2.1. Nízké teploty – obecně

Již při teplotách nižších než + 5°C se zastavuje hydratace betonu, tj. zastavuje se proces tuhnutí a tvrdnutí a bez zvláštních opatření nevzrůstá pevnost betonu. Při teplotách v rozmezí od 0 °C až do 5 °C je beton ohrožen zastavením hydratačního procesu, a proto při nižších teplotách není doporučeno betonovat, protože nevíme, co by se v dané situaci dělo s betonem.

2.2. Sníh a led v bedně

Sníh a led ve styku s čerstvým betonem taje. Při tuhnutí betonu dochází k chemické reakci, při které dochází k vývinu tepelné energie. Roztátý led tak může zvýšit vodní součinitel v oblastech zvýšeného namáhání. Před betonáží je nutné velmi pečlivě odstranit napadaný sníh a led, nejlépe vysušením horkým vzduchem. Je nutné rovněž očistit výztuž od ledu a zahřát ji na teplotu alespoň 0 °C. V žádném případě se nesmí betonovat na zmrzlou a zledovatělou pracovní spáru. V době betonování má být teplota povrchu pracovní spáry vyšší než 0 °C. Mrazem se totiž nakypří původně ztuhlý podklad do velmi nepravidelné hloubky. Při zvýšení teploty nad bod mrazu nastane jeho nepravidelné sesedání, které může způsobit porušení celistvosti uloženého betonu. Betonáž na zeminu je proto nutné zajistit včasnou tepelnou ochranou podloží v dostatečném předstihu před příchodem mrazů a započítím betonářských prací. Teplota betonu před uložením by neměla být nižší než + 5 °C ČSN EN 206. Případně + 10 °C pokud je teplota okolí nižší než + 5 °C. [1] [6]

2.3. Zmrznutí čerstvého betonu

Objem vody se přechodem do tuhého skupenství zvětšuje o 9 %. Tím se vytváří v pórové mikrostruktuře hydraulický tlak a nemá-li beton dostatečnou pevnost, vzniká vlivem napětí v tahu k lokálnímu porušení struktury. To má za následek snížení pevnosti betonu, snížení soudržnosti cementové směsi s kamenivem a také s ocelovou výztuží a může docházet k prokluzu. Proto je třeba dodržovat přesně technologické postupy v raném stádiu betonu. Pokud v tomto období vše proběhne bez komplikací, bude konstrukce schopná odolávat požadovanému namáhání. Česká norma ČSN EN 13670. [N5][W2]

3. Opatření při betonáži za nízkých teplot

3.1. Cement – hydratační teplo

U cementu se musí pozorně dbát na jeho uchování, to by mělo být hlavně v suchu a v zimním období by cement neměl být skladován dlouho. Expirační doba pro cement je stanovena na 3 měsíce. Rychlého vývinu hydratačního tepla je u konstrukcí ohrožených mrazem potřeba, ale je třeba zohlednit vliv tvaru konstrukce z hlediska rozměrů (u masivních konstrukcí je nebezpečí tvorby trhlin rozdílem vývinu tepla na povrchu a uvnitř konstrukce).[W2] [W4]

3.2. Ohřátí složek betonu

Do směsi se přidává buď teplá voda nebo ohřáté kamenivo. Po několika minutách se změní teplota betonové směsi, která by měla mít při ukládání teplotu alespoň 5 °C. Nejvýhodnější je ohřát z hlediska tepelné setrvačnosti kamenivo. Má sice menší měrné teplo než voda, má však 2,6krát vyšší hustotu a jeho objem v betonu je 3,5krát vyšší než vody. Betonovou směs lze také ohřát horkou vodou přímo v míchačce.[W2] [W4]

3.3. Zakrytí

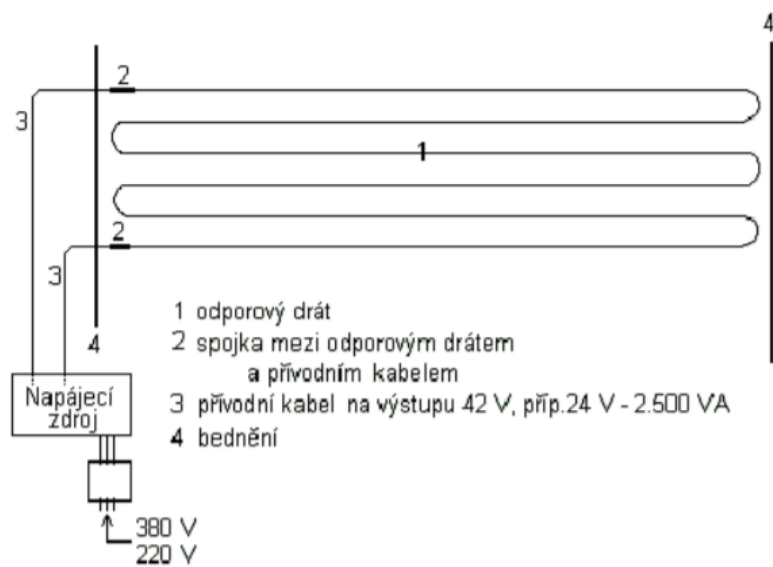
Jednou z možností, jak ochránit beton před zamrznutím, je zakrýt povrch konstrukcí. Vhodné jsou parotěsné plachty či fólie, které jsou zabezpečeny jak po obvodu, tak v místech přesahu proti odkrytí. Pokud by materiál neměl parotěsní funkci, nezadržel by vodu v kontaktu s betonem, ta by se mohla snadno odpařit a povrchová vrstva by neměla dostatek vody na hydrataci.

3.4. Vyhřívání konstrukce

Další variantou, jak ochránit beton před působení nízkých teplot, je vytápět prostor, kde je čerstvě uložený beton. Ideální je dosáhnout teploty nad 10 °C, ale především záleží na okolních podmínkách. Čím nižší teplota, tím hůře jsme schopni teplotu betonové směsi zvýšit. Minimální teplota v okolí betonu by měla být 5 °C, aby nedocházelo ke zpomalování či zastavení hydratace. Důležité je také, aby teplota byla konstantní a nekolísala a beton tak mohl rovnoměrně zrást v bednění. [1]

Elektro ohřev se provádí izolovaným vodičem, který se připevní při armování k výztuži, viz Obrázek 1. Jedná se o vodič, který bude trvale zabudován do konstrukce a dál nebude nijak využit. První složka, která převádí teplo do směsi, je voda, postupem hydratace se stávají přenosné i pevné složky betonu a v konstrukci začíná být přenášeno teplo celou hmotou.[1]

Počáteční teplota nesmí být příliš vysoká, jinak by způsobila rychlejší odpařování vody z betonu a docházelo by k otevírání struktury betonu. Mohla by tak být snížena pevnost betonu a mohlo by dojít ke snížení životnosti konstrukce.



Obrázek 1: Půdorysné schéma vyhřívací smyčky z odporového drátu[W5]

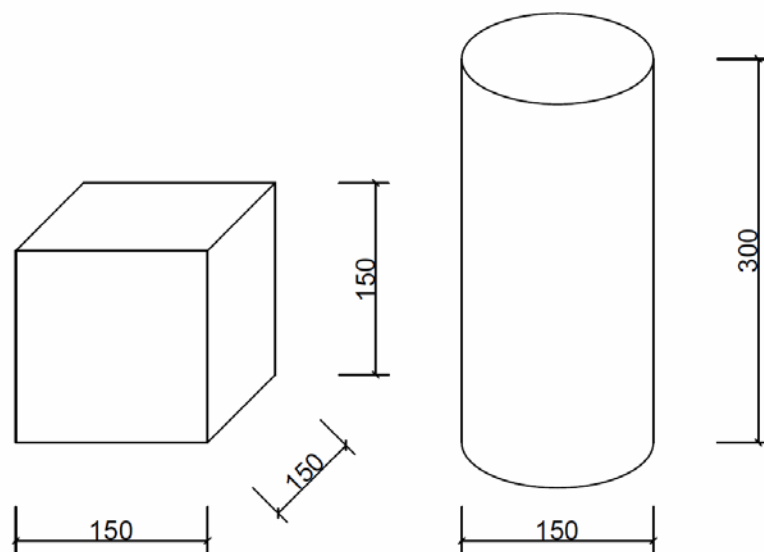
4. Zkoušky

4.1. Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Zkouška se provádí na zkušebních tělesech, na krychli nebo na válci o daných rozměrech. Rozměry krychle jsou 150 x 150 x 150 mm a rozměry válce jsou 150 x 300 mm, viz Obrázek 2. Výsledná pevnost v tlaku zjištěná na válci je vždy menší než pevnost zjištěná na krychli. Důvodem je štíhlostní poměr 1:1 / 1:2. [N1]

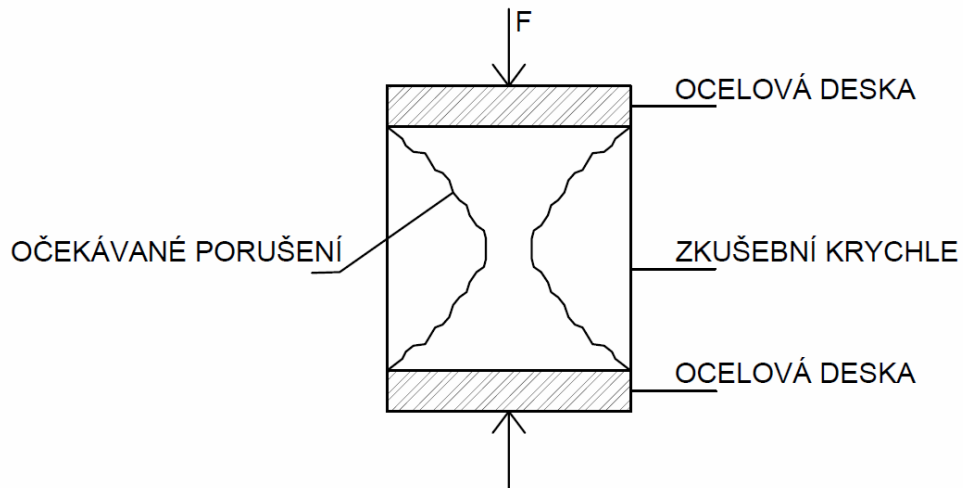
Vzorky jsou uchovávány ve vodě nebo ve vlhkém prostředí. „Vlhkost prostředí má být vyšší než 95 %. Teplota vody 20 °C s odchylkou 2 °C dle ČSN EN 206-1.“ Po 28 dnech jsou vzorky vyňaty, osušeny a překontrolovány jejich rozměry. Pokud vše vyhovuje, položí se těleso do přístroje, vycentruje se a poté se zahájí jeho stlačování předepsanou rychlostí až dojde k jeho porušení. Vždy se zkouší buď jeden nebo více vzorů. U prvku předpokládáme určité porušení, viz Obrázek č. 3, a pokud by došlo k jinému porušení, tak se výsledek zkoušky tohoto vzorku vyloučí. V tomto případě se předpokládá jeho nehomogenita. [N1]

Tvary, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa jsou specifikovány v ČSN EN 12390-1 část-1[N6]. Výroba a ošetřování těles pro zkoušky pevnosti jsou specifikovány v ČSN EN 12390-2 část-2[N7], viz Obrázek 2.



Obrázek 2: Rozměry zkušebních těles

Krychle se zkouší ve směru kolmém na směr hutnění. Tím je zajištěna rovinnost a rovnoběžnost tlačných ploch. U těles ve tvaru válce se musí tlačená plocha upravit, nejlépe zbrusit, viz Obrázek 3.



Obrázek 3: Uspořádání pro zkoušku pevnosti v tlaku

Pevnost betonové krychle se stanoví ze vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c},$$

kde: f_c – pevnost v tlaku [MPa],
 F – maximální síla při porušení [N],
 A_c – zatěžovaná průřezová plocha vzorku.

Zkušební těleso je vloženo do lisu, viz Obrázek 4, kde je stlačován a musí dojít k charakteristickému porušení, viz Obrázek 3. Pokud by k takovému porušení nedošlo, vzorek je vyloučen.



Obrázek 4: Používaný lis (zařízení) na zkoušku v tlaku

Na Obrázku 5 můžeme vidět průběh zkoušky v lisu, kde dochází k porušení vzorku.



Obrázek 5: Těleso po zkoušce v tlaku

4.2. Zkouška odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL)

Využívané metody dle ČSN 73 1326 jsou metoda A a metoda C. Zajímavé je, že v oblasti Čech je beton převážně zkoušen metodou C a v oblasti Moravy převážně metodou A. Tato skutečnost pravděpodobně vychází z požadavků ŘSD. Všechny metody by měly být kompatibilní a vzájemně porovnatelné. Následující část stručně popisuje dvě normou stanovené možnosti zkoušení odolnosti betonu proti CHRL v České republice.

4.2.1. Metoda A – Metoda automatického cyklování I

Při metodě automatického cyklování se zkouší krychle o hraně 150 mm. Vzorky se vloží do misky, kam se následně vlije 3% roztok NaCl tak, aby byl vzorek ponořen na výšku 5 mm. Ve zkušebním cyklu se vzorky podrobí střídavému zmrazování a rozmrazování. Cyklus je rozdělen na zchlazení zkušební plochy na - 15 °C, tato teplota se udržuje po dobu 15 minut. Pak následuje ohřev zkušební plochy na teplotu + 20 °C, tato teplota se opět udržuje po dobu 15 minut. [N9]

Po každých 25 cyklech se vzorky s miskou vyjmou a proudem vody ze stříčky se splaví uvolněné částice ze zkušební plochy do misky. Odpady se následně vysuší při teplotě + 105 °C a hmotnost odpadu se zváží s přesností na 0,1 g. [N9]

4.2.2. Metoda C – Metoda automatického cyklování II

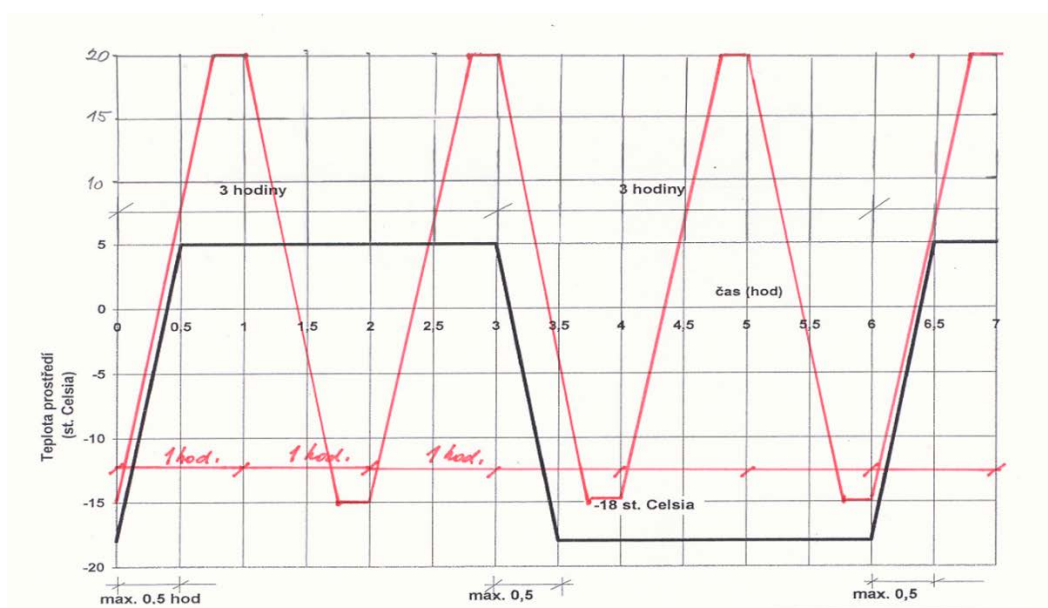
Tato metoda používá automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot působících na celé těleso. Na povrch tělesa, který je ohraničen pryžovou objímkou, je nalit 3% roztok NaCl. Metoda je založena na poznatku, že hlavním faktorem porušování povrchu betonové konstrukce je gradient koncentrace chloridů v povrchové vrstvě betonu. [N9]

Základní zkušební těleso je 50 mm tlustý odřezek z válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm, nebo z vývrtu o průměru 150 mm. Zkušební těleso je opatřeno vodotěsnou objímkou. Na zkušební těleso se nalije voda, která se na něm ponechá nejméně 2 dny, poté se voda odstraní, těleso se umístí do klimatizační komory a nalije se na něj 3% roztok NaCl v tloušťce vrstvy přibližně 5 mm. [N9]

Teplota cirkulujícího vzduchu se cyklicky mění z - 18 °C na + 5 °C, délka jednoho cyklu je 6 hodin. Po každých 25 cyklech se těleso vyjme z klimatizační skříně. Slaný roztok se slije a uvolněné částice se splaví do misky pomocí stříčky. Omytý povrch se okartáčuje hrubším kartáčem a znovu omyje. Pro omyté zkušební těleso se znovu opakuje postup až do 75 cyklů. Uvolněné částice se v misce plně vysuší a stanoví se jejich hmotnost s přesností na 0,1 g a přepočtem na plochu povrchu zkušebního tělesa se stanoví odpad betonu g/m². [N9]

4.2.3. Porovnání metod

Průběh metody A i metody C jsou naznačeny na Obrázku 6, kde je patrný časový rozdíl při zkoušení. Červená křivka znázorňuje metodu A a černá křivka zobrazuje metodu C.



Obrázek 6: Schéma průběhu teploty při metodě C (černá) a A (červená)[6]

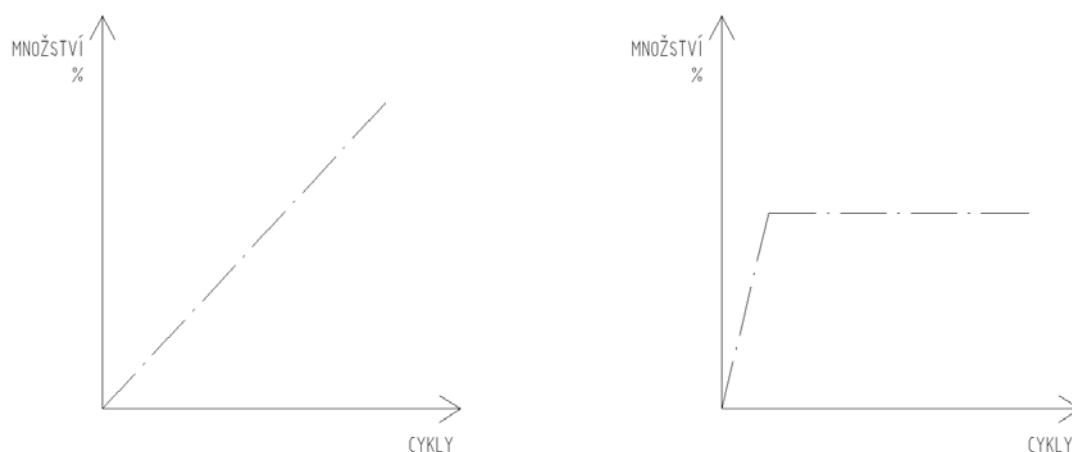
4.2.4. Požadavky

Navrhování betonu se v České republice řídí normami ČSN EN 206+ A1 a ČSN P 73 2404. Dle těchto norem musejí betony pro stupně vlivu prostředí XF1-4 splňovat následující požadavky, viz Tabulka 1:

Pro předpokládanou životnost 50 let	XF1	XF2	XF3	XF4
Max. vodní součinitel	0,55	0,55	0,50	0,45
Min. pevnostní třída	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Min. obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	-	4,0	4,0	4,0
Max. Průsak tlakovou vodou [mm]	50	50	35	35
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování- metoda/početycyklů/odpad [g/m ²]	-	Metoda A 100 cyklů 1250 Metoda C 50 cyklů 1500	-	Metoda A 100 cyklů 1000 Metoda C 75 cyklů 1000

Tabulka 1: F.1.1. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu, životnost 50 let [N2]

Na Obrázku 7 jsou naznačeny výsledky zkoušek CHRL.



Obrázek 7: Výsledky zkoušky CHRL (první graf – nevyhovující; druhý graf – požadující výsledek)

4.3. Zkouška obsahu vzduchu

4.3.1. Čerstvý beton

Pomocí zkoušky obsahu vzduchu se zjišťuje, jaké množství vzduchu se v betonu nachází.

Zkouška probíhá na speciálním přístroji, viz Obrázek 8.



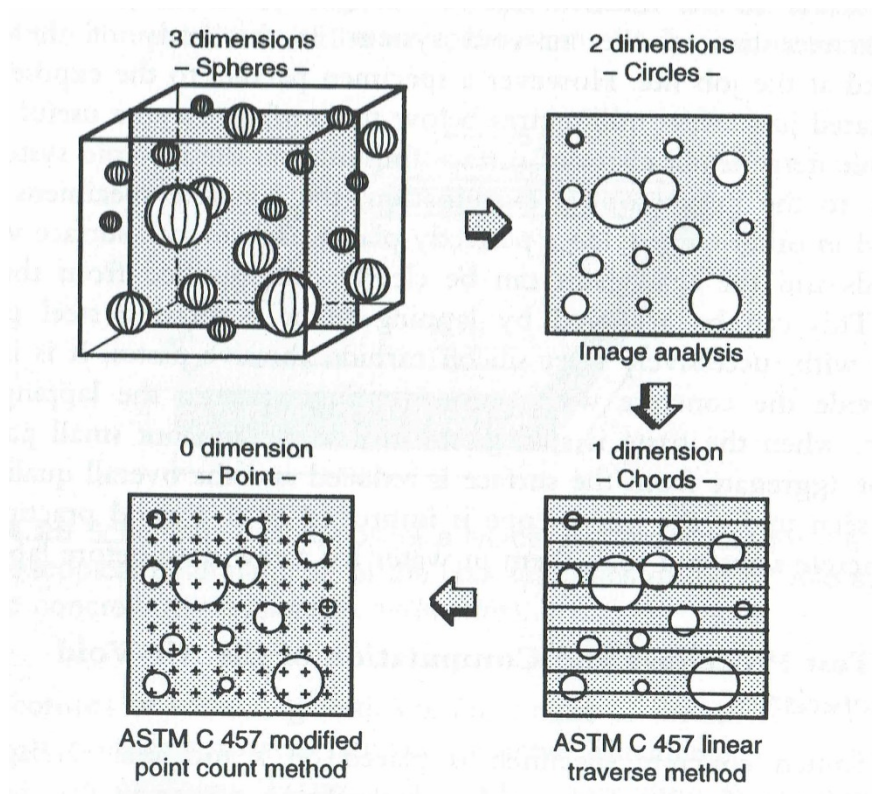
Obrázek 8: Přístroje na měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Do spodního válce zařízení se nalije betonová směs. Obsah této válcové nádoby je 8 l. Následně se na válec připojí měřicí přístroj se dvěma ventily. Na jeden ventil se připojí voda a přístroj se plní do doby, než začne z druhého ventilu voda vytékat. Poté se ventily uzavrou a pomocí pumpičky (součást přístroje) se vyvodí uvnitř komory přístroje tlak vzduchu. Stlačený vzduch se poté uvolní do válce, kde dojde k vtlačení vody do vzduchových pórů směsi. Výsledkem je rozdíl tlaků, který určuje objem vzduchových bublinek v čerstvém betonu.

4.3.2. Ztvrdlý beton – obsah vzduchových mikropórů

Nejprve se vyrobí zkušební vzorky z provzdušněného betonu 150 x 150 x 150 mm. Po uplynutí 56ti dní, kdy beton dosahuje své stanovené pevnosti, se vzorek rozřízne na destičky určité tloušťky. Ty se následně zbrousí a vyleští.

Zkouška se provádí dvěma způsoby, automaticky a nebo ručně. Vzorek se upevní pod mikroskop na pohyblivou destičku. Při automatickém způsobu posouvá destičku servopohon a póry zaznamenává speciální software. Během měření na jedné destičce musí být délka měření 1,5 m, viz Obrázek 9. Při této metodě může dojít k menší odchylce, pokud software započítá póry i v kamenivu, které se do výsledného obsahu vzduchu zkoušky nepočítají. Proto by měla být provedena kontrola vzorku před měřením a určité póry zakrýt černým fixem.

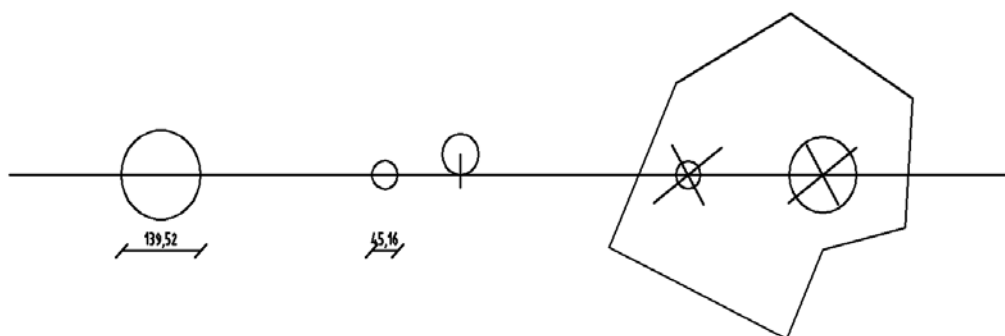


Obrázek 9: Grafický postup obsahu vzduchu v mikropóru [1]

Druhá varianta je ruční metoda, kdy vzorek se potře inkoustem a následně posype křídou. Tento postup umožňuje vidět mnohem menší póry, než vidí lidské oko. Naše oko vidí pór o rozměru 0,5 mm pomocí inkoustu se dostáváme na hodnotu 0,2 mm bez mikroskopu. Zde se opět musí udělat měření dlouhé 1,5 m po řádcích. Tato metoda přímo závisí na laborantovi, jaké póry započítá nebo nezapočítá.

Průměr póru je dán délkou sečny. Pokud není protnut měřicí přímkou nezapočítá se. Pokud se jedná o tečnový dotyk póru, pak o započítatelnosti rozhoduje subjektivní posouzení laborantem, viz Obrázek 10.

Vzdálenost mezi póry musí být maximálně 0,2 mm. Zkouškou dostaneme počet póru o dané velikosti $A_{300}1,8\% = 0,300$ mm. Čím větší máme počet malých uzavřených póru tím je beton více provzdušněn a tím lépe bude odolávat zmrazujícím cyklům.



Obrázek 10: Zobrazení póru ve vzorku a jeho započítávaný rozměr

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce se věnuje zejména nalezení teploty, při které beton nenabývá dostatečné pevnosti. Dále je zde popsáno, jaké následky mají nízké teploty na vzhled a strukturu betonu.

Před samostatnými experimenty byla navržena betonová směs, která byla následně při experimentech používána.

Po navržení směsi započaly experimenty při první teplotě, kterou byla hodnota + 10 °C. První teplota byla zvolena v důsledku toho, že odborná literatura uvádí, že při teplotě + 10 °C beton dosahuje stejných pevností jako beton uložený v laboratorním prostředí. Od této hodnoty byla teplota postupně snižována až na - 20 °C.

5. Cíl a příprava experimentálního programu

Cílem experimentu bylo zjistit, jak se chová čerstvý a ztvrdlý beton vystavený nízkým teplotám. Snahou bylo vytvořit co nejrealnější prostředí s okolními podmínkami, které se mohou vyskytnout na stavbách v zimních obdobích. Hlavní myšlenkou experimentu bylo zjistit, jaký vliv mají nízké nebo dokonce záporné teploty na vlastnosti betonu.

Jelikož se jedná o nízké až záporné teploty, zkoušený beton je navržen s ohledem na tento fakt a v návrhu se tak počítalo s provzdušňující přísadou. Abych zjistil, jak se bude beton chovat, rozhodl jsem se, že budu vycházet z nejnáročnějšího stupně prostředí pro působení mrazu, tedy XF4, a na tento stav bude betonová směs navržena.

Hlavním požadavkem je co nejlépe vystihnout prostředí odehrávající se na stavbě v zimních podmínkách. Chceme, aby nárůst pevnosti byl co nejrychlejší alespoň do hodnoty 5 MPa. Tato hodnota je důležitá z hlediska odolávání mrazu. Při této pevnosti je beton natolik pevný, že by měl odolat případnému zmrznutí.

5.1. Návrh směsi

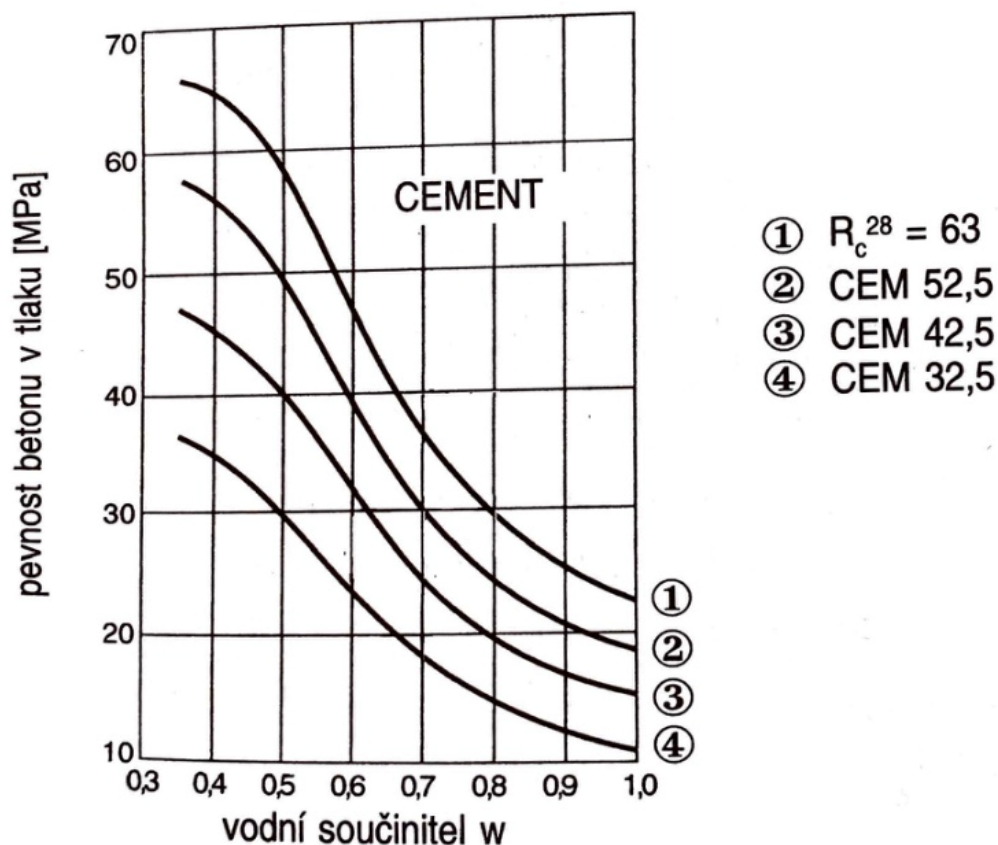
Návrh a úprava receptury probíhaly podle normy *ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* [N1]. Důležitým krokem byl návrh receptury tak, aby odpovídalo množství cementu a vodní součinitel doporučeným hodnotám pro jednotlivé stupně vlivu prostředí.

Po navržení směsi byly vzorky zkoumány ve stáří 1 den, 2 dny, 3 dny, 5 dnů, 28 dní a 56 dní. Tento časový interval je obvyklý pro stanovení vývoje pevnosti betonu.

Cílem je navrhnout beton C30/37 S4 XF4.

Podle nomogramu z Obrázku 11 jsem odečetl hodnotu vodního součinitele (w/c) 0,43 pro požadovanou pevnost C30/37 a zvolenou pevnostní třídu cementu CEM 42,5. Maximální vodní součinitel pro beton třídy XF4 je 0,45, tedy tato hodnota je splněna.

Dalším krokem bylo zjistit kolik je potřeba vody v litru na 1 m³ betonu v závislosti na konzistenci a granulometrii kameniva – m_v . Abych mohl tuto hodnotu získat, potřeboval jsem křivky zrnitosti.



Obrázek 11: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnost cementu [6]

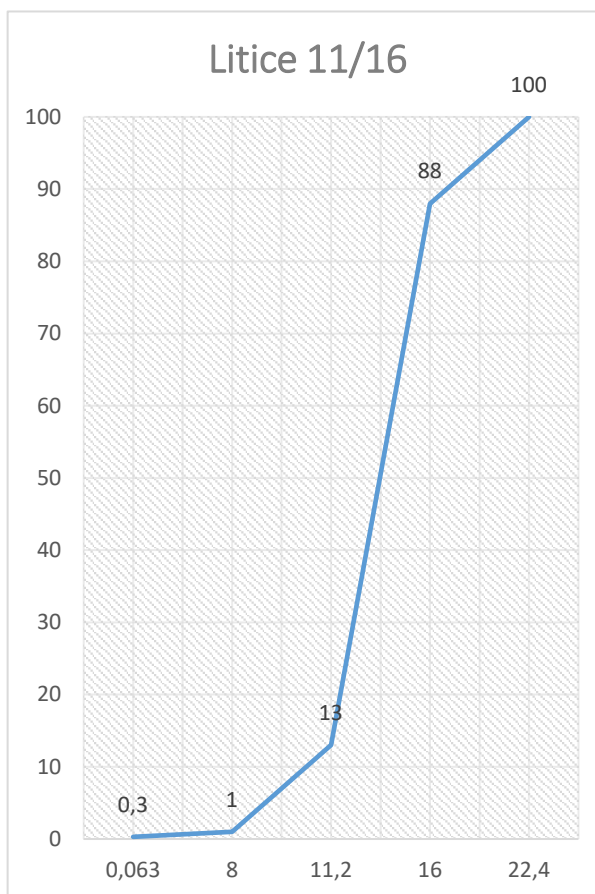
Pro výrobu betonu bylo použito kamenivo 0/4 Černošice 4/8 Černošice a 11/16 Litice. Pro každou frakci byla provedena prosévací zkouška, viz Obrázky 12-14.

Po sestavení křivek zrnitosti, viz Obrázek 12-14, jsem zařadil kamenivo do kategorie B16, tedy kamenivo s průměrnou velikostí. Nenachází se zde ani moc hrubého kameniva a ani moc jemného kameniva. Pro tuto kategorii podle Tabulky 2 je zapotřebí na 1 m³ betonu 204 l vody.

konzistence	křivka zrnitosti								
	A ₈	B ₈	C ₈	A ₁₆	B ₁₆	C ₁₆	A ₃₂	B ₃₂	C ₃₂
C0	160	178	197	139	160	183	133	152	171
S1	166	184	205	145	166	189	137	158	177
S2	176	194	217	155	176	200	145	167	188
S3	192	212	235	170	192	217	159	181	207
S4	204	227	250	181	204	232	171	197	223

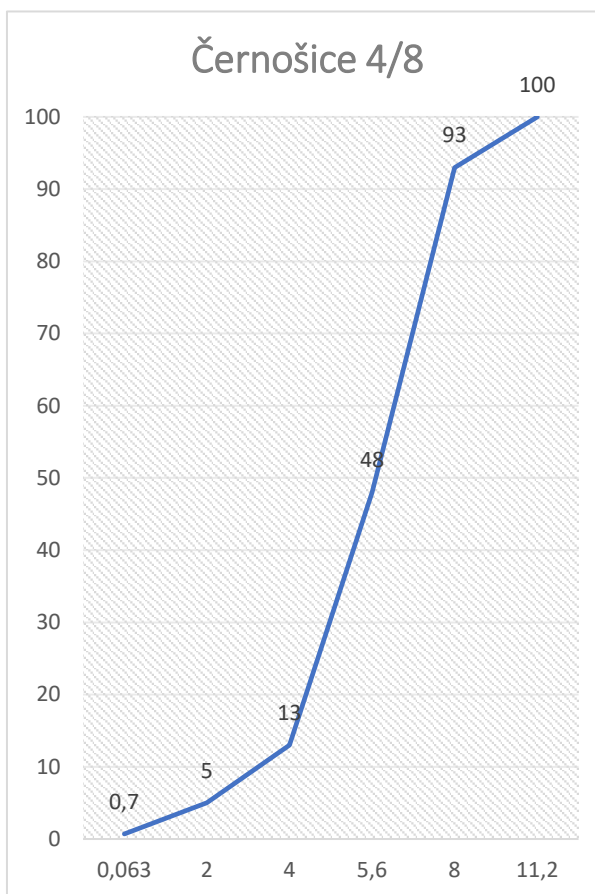
Tabulka 2: Potřeba vody v litru na 1 m³ [6]

Stanovení zrnitosti				
Síto	Jednotka	Zbytek na síť	Propad sítem	
125	% hm.			
90	% hm.			
63	% hm.			
45	% hm.			
31,5	% hm.			
22,4	% hm.	0	100	
16	% hm.	11,7	88	
11,2	% hm.	75,3	13	
8	% hm.	12,3	1	
5,6	% hm.			
4	% hm.	0,2	0	
2,8	% hm.			
2	% hm.			
1,4	% hm.			
1	% hm.			
0,5	% hm.			
0,25	% hm.			
0,125	% hm.			
0,063	% hm.	0,2	0,3	
Vlastnosti kameniva		Identifikace metody	Jednotka	Hodnota
stanovení jemných částic		ČSN EN 933-1	% hm.	0,3



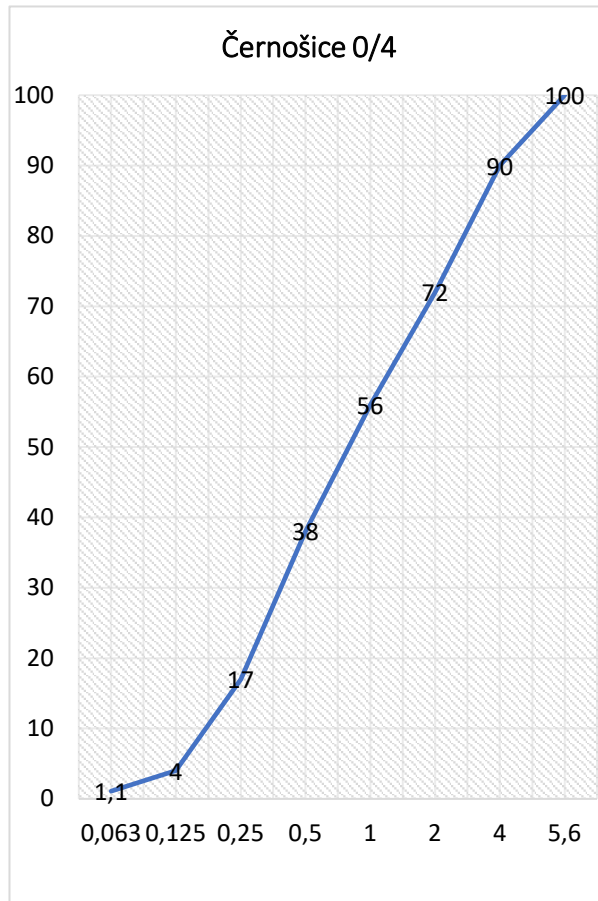
Obrázek 12: Zrnitost frakce 11/16

Stanovení zrnitosti			
Síto	Jednotka	Zbytek na síť	Propad sítem
125	% hm.		
90	% hm.		
63	% hm.		
45	% hm.		
31,5	% hm.		
22,4	% hm.		
16	% hm.		
11,2	% hm.	0	100
8	% hm.	6,8	93
5,6	% hm.	45,2	48
4	% hm.	34,5	13
2,8	% hm.		
2	% hm.	8,9	5
1,4	% hm.		
1	% hm.		
0,5	% hm.		
0,25	% hm.		
0,125	% hm.		
0,063	% hm.	3,9	0,7
Vlastnosti kameniva		Identifikace metody	Jednotka
stanovení jemných částic		ČSN EN 933-1	% hm.
			0,7



Obrázek 13: Zrnitost frakce 4/8

Stanovení zrnitosti			
Síto	Jednotka	Zbytek na síť	Propad sítem
125	% hm.		
90	% hm.		
63	% hm.		
45	% hm.		
31,5	% hm.		
22,4	% hm.		
16	% hm.		
11,2	% hm.		
8	% hm.		
5,6	% hm.	0	100
4	% hm.	10,4	90
2,8	% hm.		
2	% hm.	17,4	72
1,4	% hm.		
1	% hm.	16	56
0,5	% hm.	18,2	38
0,25	% hm.	20,7	17
0,125	% hm.	13,4	4
0,063	% hm.	2,7	1,1
Vlastnosti kameniva		Identifikace metody	Jednotka
stanovení jemných částic		ČSN EN 933-1	% hm.
			1,1



Obrázek 14: Zrnitost frakce 8/16

Po stanovení množství vody jsem mohl vypočítat množství cementu m_c pomocí vztahu, který je uvedený níže.

$$m_c = \frac{m_v}{w},$$

$$m_c = \frac{204}{0,45} = 453 \text{ kg}.$$

Předpokládaný obsah vzduchu je 5 %.

Z rovnice absolutních objemů jsem vypočítal celkové množství kameniva m_k a podle zvolené křivky zrnitosti ho následně rozdělím na jednotlivé frakce.

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} = 1 - \frac{V_z}{100},$$

$$\frac{453}{3100} + \frac{204}{1000} + \frac{m_k}{2650} = 1 - \frac{5}{100},$$

$$m_k = 1589,65 \text{ kg}.$$

Pro předběžné technické výpočty se používají objemové hmotnosti složek:

- Cement CEM I $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$
- Voda $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Kamenivo $\rho_k = 2650 \text{ kg/m}^3$

Pro výrobu betonu bylo použito kamenivo 0/4 Černošice, 4/8 Černošice a 11/16 Litice. Předpokládám stejné objemové hmotnosti jednotlivých frakcí. Pro dosažení co nejvyšší pevnosti byl zvolen poměr frakcí 5 : 2 : 3. Výsledné hmotnosti frakcí jsou následující:

- 0/4 mm.... $0,5 \cdot 1590 = 795 \text{ kg}$
- 4/8 mm.... $0,2 \cdot 1590 = 318 \text{ kg}$
- 8/16 mm.... $0,3 \cdot 1590 = 477 \text{ kg}$

S dávkou provzdušňovací přísady 0,3 % hmotnosti dávky cementu je výsledná hmotnost přísady $453 \cdot 0,003 = 1,359 \text{ kg}$.

Navržené složení záměsi betonu pro objem 1 m^3 po zhutnění:

- Cement CEM I 42,5 453 kg
- Kamenivo frakce 0/4 mm 795 kg
- Kamenivo frakce 4/8 mm 318 kg
- Kamenivo frakce 8/16 mm 477 kg
- Voda 204 kg
- Provzdušňovací přísada 1,36 kg

5.2. Finální směs

Veškeré návrhy betonových směsí musejí být vždy nejprve experimentálně otestovány, aby byly zkontrolovány jejich požadavky.

Aby mohl být proces kontroly vynechán, byl návrh konzultován s vedením společnosti BETOTECH. Po konzultacích s Ing. Jiřím Žáčkem mi byla předána obdobná betonová směs, která již byla experimentálně otestována. S touto směsí jsem dále pracoval.

Finální receptura, která byla použita při experimentech, je uvedena v Tabulce 3.

NAVRŽENÁ BETONOVÁ SMĚS			
SLOŽKY	1 m ³	0,050 m ³	JEDNOTKY
CEM I	414	20,7	kg
VODA	178	8,9	kg
S35	1,49	0,075	kg
MICR. 2	0,41	0,021	kg
0/4 V.Č.	739	36,95	kg
4/8 V.Č.	331	16,55	kg
11/16 Ll.	625	31,25	kg

Tabulka 3: Finální receptura

Pro kontrolu jsem spočetl rovnici absolutních objemů, kdy do rovnice stupují veškeré složky betonové směsi v podílu jejich objemové hmotnosti, viz Tabulka 4. Celkový součet (včetně provzdušnění) musí vyjít roven 1, viz výpočet níže.

		CEM	Voda	0/4	4/8	11/16
Složení (možství) _ m	kg	414,00	178,00	739,00	331,00	625,00
ohj. hm. mat. _ ρ	kg/m ³	3100,00	1000,00	2580,00	2600,00	2844,00

Tabulka 4: Složky betonu včetně objemového množství

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} = 1 - \frac{V_z}{100}$$

$$\frac{414}{3100} + \frac{178}{1000} + \frac{739}{2580} + \frac{331}{2600} + \frac{625}{2844} = 1 - \frac{5}{100}$$

$$0,13 + 0,18 + 0,29 + 0,13 + 0,22 = 1 - 0,05$$

$$0,95 = 0,95 \text{ (poměr složek vyhovuje),}$$

kde V_z je množství vzduchu v betonu (provzdušněný beton má cca 5 % vzduchu). Objem přísad se zanedbává.

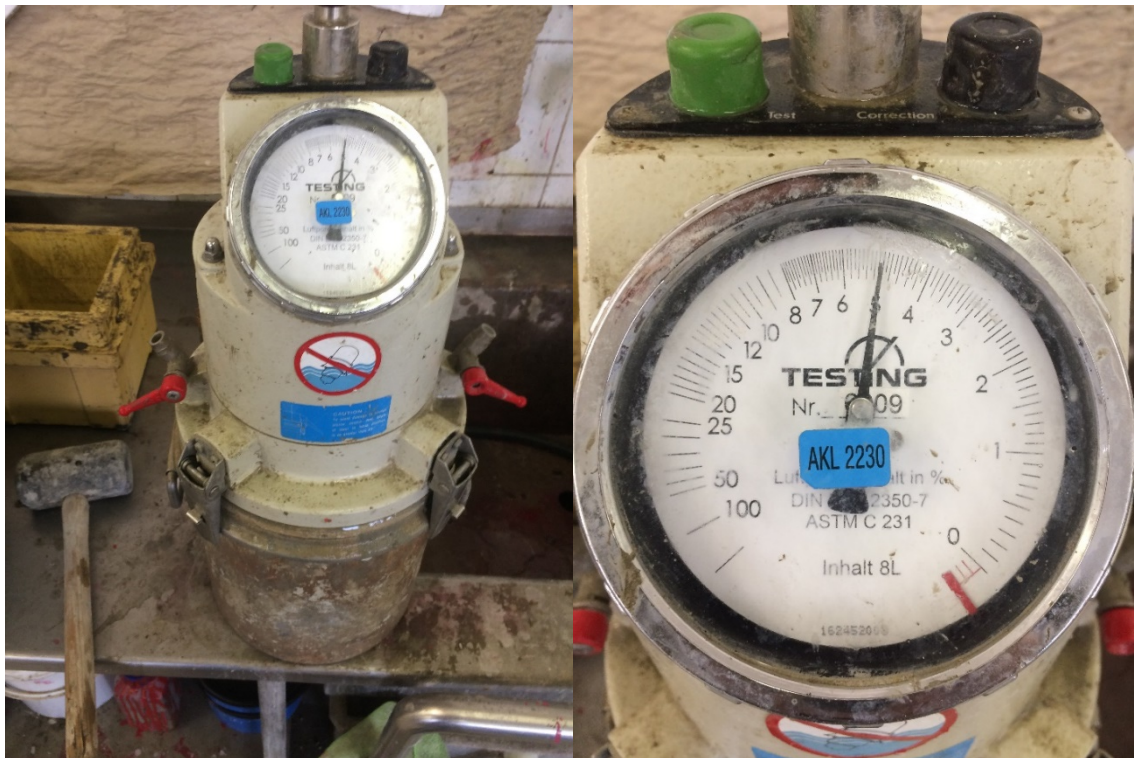
Rovnice absolutních objemů je splněna.

6. Experimenty

6.1. Zkouška provzdušnění

Tato hodnota je velmi důležitá pro beton třídy XF, neboli mrazuvzdorné betony. Pro třídu XF je podle normy ČSN EN 206- 1A [N1] minimální procento provzdušnění 4,0 %. Čím je toto číslo větší, tím více je sktruktura betonu provzdušněna a je více odolná vůči zmrazovacím cyklům. Musíme brát však na vědomí, že čím více pórů bude v betonu, tím více se nám bude snižovat jeho pevnost. Pevnost samotné ztvrdlé cementové pasty bývá ovlivněna zejména hodnotou vodního součinitele (poměr voda/cement), stupněm hydratace cementu, jeho mineralogickým složením, způsobem ošetřování betonu, pórovitostí ztvrdlé cementové pasty a mnoha jinými faktory. Je tedy zřejmé, že pevnost betonu v tlaku, a potažmo i modul pružnosti, může nabývat velice rozdílných hodnot. Otázkou ale je, jakým způsobem se mění modul pružnosti při použití moderních technologií při výrobě betonu. Například použitím provzdušnění v míře okolo 4 % se s přídatkem 1 % vzduchu sníží pevnost v tlaku až o 6 %, a potažmo tedy i modul pružnosti. Provzdušnění sice snižuje pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti, ale při správném rozložení pórů zvyšuje mrazuvzdornost betonu. Správně rozložené póry totiž představují expanzní prostor pro vodu, která se při teplotách nižších než 0 °C mění v led a tím zvětšuje svůj objem až o 9 %. Při použití provzdušněného betonu tedy mnohem méně dochází k degradaci konstrukce způsobené zamrznáním vody ve struktuře betonu. Vše má své pozitiva a negativa, ale v tomto případě si musíme uvědomit, co požadujeme od konstrukce a na to správně navrhnout třídu a pevnost betonu.

Provzdušňovací zkouška byla provedena v prvotní fázi, kdy byla směs umíchána. Do směsi byla přidána provzdušňovací přísada MICKRA 2 v množství 0,021 kg na kubický metr směsi. Látka byla přidána ke konci míchání. Po zamíchání směsi byl beton uložen do ocelové nádoby o objemu 10 l, viz Obrázek 15, která se zvibrovala. Směs dosahovala až po úplný okraj nádoby. Na nádobu byl přidělán měřicí přístroj, který má 2 ventily. Oba se otevřely a do prvního ventilu se nalila voda, dokud z druhého ventilu nevytékala. Následně se oba ventily uzavřely. Na měřicím přístroji byl napumpován tlak, který se pak pustil do betonové směsi a pozoroval se pokles tlaku. Výsledná hodnota provzdušnění byla 5,0 %, viz Obrázek 15.



Obrázek 15: Příklad přístroje na měření procenta provzdušnění

Cílem bylo navrhnout směs, která bude spadat do mrazuvzdorné třídy XF. Hodnota provzdušnění se při každé směsi pohybovala kolem hodnoty 5 %. Požadovaná hodnota podle normy ČSN EN 206 je 4 %. Ze zkoušek mohu vyvodit, že směsi se pohybovaly nad hranicí 4 % a mohu prohlásit, že betonová směs byla správně navržena a může být charakterizována do třídy XF.

Metodu, kterou zde popisuji, můžeme řadit do mechanických metod. Jedná se o velice rychlou metodu, kterou můžeme provést jak v laboratorních podmínkách, tak na staveništi, pokud bychom si chtěli překontrolovat směs, než podepíšeme formulář řidiči autodomíchávače o převzetí. Sice za správnost ručí betonárka, ale pokud má špatné ohlasy, není špatné provést rychlou a nedestruktivní zkoušku.

6.2. Experiment – Teplota 10 °C

Před každým experimentem byly provedeny základní zkoušky směsi pro ověření jejich vlastností. Výsledky zkoušky byly vždy zaznamenány v tabulce, viz Tabulka 5.

1. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	180 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,2 %
	TEPLOTA	14,8 °C
	OBJ. HMOTNOST	2417,7 kg/m ³

Tabulka 5: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 1

Prvním krokem bylo vystavení betonu teplotě přibližně + 10 °C za účelem zjistit, zda budou zaznamenány odlišné parametry betonu než v laboratorním prostředí + 20 °C. Pokud by k tomu došlo, bylo by třeba upravit recepturu. To se ale nestalo, jak je patrné z výsledků zkoušky, viz Tabulka 9. Pro tento experiment bylo vyrobeno 6 vzorků, které se testovaly v časových úsecích 1 den, 2 dny, 3 dny, 5 dnů, 28 dnů a 56 dnů. Důvodem, proč v prvních dnech proběhlo nejvíce zkoušek, je to, že je potřeba zjistit rychlost nárůstu pevnosti s ohledem na rychlost výstavby. V podmínkách stavby není třeba čekat na dosažení 28denních pevností, protože ty jsou uvažovány ve statickém výpočtu pro stadium provozu budovy a tedy plného zatížení konstrukce. Během výstavby je betonová konstrukce zatěžována jen provozem stavby, například se po stropní desce začne chodit, dopravovat a stavět bednění. Proto mě zajímalo, jestli i v zimních podmínkách je takovéto chování možné a jak se ovlivní rychlost výstavby v závislosti na zralosti betonu.

Při výrobě jsem provedl zkoušku sednutí kužele, která vyšla 180 mm, viz Obrázek 16, což odpovídá stupni konzistence S4, jak bylo předpokládáno v návrhu směsi. Další zkouška byla zkouška provzdušnění, kde jsem použil tlakový hrnec, který jsem naplnil betonovou směsí a na stupnici jsem odečetl procento provzdušnění. Pro tuto směs vyšlo provzdušnění 5,2 %.



Obrázek 16: Zkouška sednutí

Vzorky betonu ve formách byly vloženy do mrazícího boxu, kde byla nastavena teplota na 9 °C a byla průběžně kontrolována. Rozptyl teplot nebyl nijak významný. Při prvních třech měřeních stoupla teplota na 10,2 °C. Teplota byla měřena v minutových intervalech pomocí elektronického teploměru. Příčinou zvýšení teploty byl vývoj hydratačního tepla v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí betonu. Po stabilizaci regulačního systému mrazícího boxu teplota klesla na stanovených 9 °C a dále dle záznamů kolísala v rozmezí od 8,5 °C až do 9,2 °C, viz Tabulka 6.

LEDNICE	DATUM	DEN	DATUM	DEN	DATUM	DEN	DATUM	DEN
	26.2.	10,2 °C	5.3.	9,7 °C	12.3.	9,8 °C	19.3.	8,8 °C
	27.2.	10,1 °C	6.3.	9,8 °C	13.3.	9,7 °C	20.3.	8,8 °C
	28.2.	9,2 °C	7.3.	9,8 °C	14.3.	9,7 °C	21.3.	8,6 °C
	1.3.	8,9 °C	8.3.	9,8 °C	15.3.	9,6 °C	22.3.	8,7 °C
	2.3.	8,9 °C	9.3.	9,7 °C	16.3.	9,4 °C	23.3.	8,7 °C
	3.3.	9,1 °C	10.3.	9,9 °C	17.3.	9,2 °C	24.3.	8,8 °C
	4.3.	9,0 °C	11.3.	9,8 °C	18.3.	9,1 °C	25.3.	8,8 °C

Tabulka 6: Simulované teploty v lednici

Kromě šesti chlazených vzorků bylo dále vyrobeno dalších šest vzorků, které byly ponechány v laboratorních podmínkách. V laboratoři teplota skoro vůbec neklesala ani nestoupala, viz Tabulka 7.

LABORATOŘ	DATUM	TEPLOTA
	27.2.	18,2 °C
	28.2.	18,2 °C
	1.3.	18,2 °C
	3.3.	18,1 °C
	26.3.	18,1 °C
	9.4.	18,2 °C

Tabulka 7: Laboratorní podmínky

Chlazené i laboratorní vzorky jsem vždy zkoušel ten samý den a v tu samou hodinu. Největší rozdíl pevností je v prvních dnech, kdy beton lépe vyzrál v laboratorních podmínkách. Nicméně pevnost v prostředí + 10 °C byla ve stáří 1 den 19 MPa, což představovalo 83 % pevnosti betonu uloženého v laboratoři (22,9 MPa). V dalších dnech dochází stále k nárůstu pevnosti a po 56 dnech byla pevnost betonu uloženého v mrazícím boxu při teplotě + 10 °C 54,0 MPa, čili téměř 97 % pevnosti betonu zrajícího v laboratorních podmínkách.

Pro výrobu všech směsí byla použita laboratorní míchačka, viz Obrázek 17.



Obrázek 17: Laboratorní míchačka

Z výsledků plyne, viz Tabulky 8 a 9, že teplota prostředí kolem + 10 °C nemá velký vliv na dynamiku vývoje pevnosti betonu. Při teplotách + 10 °C na staveništi je možné provádět betonářské práce prakticky bez omezení. Zvyšování teploty nebo jiná opatření se provádět nemusí postačí jen důsledně dodržovat technologický postup betonování a ošetřování konstrukce.

Protože bylo prokázáno, že při teplotách okolo + 10 °C a tedy i vyšších, nedochází k degradaci pevnosti betonu. Přistoupil jsem tak k experimentu nepříznivějších podmínek pro zrání betonu.

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.1 d.v. 26.2.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		27.2.20	28.2.2019	1.3.2019	3.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
		7,78 kg	7,84 kg	7,70 kg	7,77 kg	7,78 kg	7,78 kg
ZKOUŠKA		22,9 N/mm ²	31,9 N/mm ²	37,6 N/mm ²	42,8 N/mm ²	50,4 N/mm ²	55,9 N/mm ²
		515 kN	717 kN	846 kN	963 kN	1134 kN	1258 kN

Tabulka 8: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek

LEDNICE	p. Vild záměs č.1 d.v. 26.2.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		27.2.2019	28.2.2019	1.3.2019	3.3.2019	26.3.2019	9.4.2019
		7,83 kg	7,81 kg	7,88 kg	7,78 kg	7,74 kg	7,79 kg
ZKOUŠKA 10 °C		19,0 N/mm ²	28,5 N/mm ²	35,9 N/mm ²	40,5 N/mm ²	48,2 N/mm ²	54,0 N/mm ²
		427 kN	641 kN	807 kN	911 kN	1084,5 kN	1215 kN

Tabulka 9: Výsledky zkoušky pevností betonu v tlaku při teplotě 10 °C

Pro experimenty byl využit mrazák, viz Obrázek 18, kam se vešlo přesně 6 vzorků. Důvodem, proč je mezera mezi krychlemi, je to, že beton při hydrataci uvolňuje teplo a pokud by byly vzorky naskládáné vedle sebe, mohlo by dojít k většímu ohřátí a experiment by mohl být zkreslený. Vynechání prostoru mezi vzorky zaručí, že ze všech stran bude na beton působit stejná teplota.



Obrázek 18: Uložení vzorků do mrazícího boxu

6.3. Experiment – Teplota 5 °C

Z první zkoušky, která probíhala při teplotě okolo 10 °C, viz kapitola 6.2., vyplynulo, že tato teplota významně neovlivňuje pevnost betonu. Proto jsem se při druhém experimentu rozhodl snížit teplotu na 5 °C. Byly provedeny základní zkoušky betonu, abych zjistil, že se vlastnosti betonu nebudou výrazně měnit. Byla dodržena počáteční receptura, viz kapitola 5.2., a bylo dosaženo podobných hodnot jako při prvním experimentu. Nejvíce mě zajímalo procento provzdušnění, protože tato hodnota se může nejvíce změnit. Pouhý rozdíl v době míchání může zapříčinit rozdíl v celkovém obsahu vzduchu v betonu a betony již nejsou shodné. Hodnota provzdušnění betonu pro první i druhý experiment vyšla téměř identická, jak můžeme vidět v Tabulce 10.

2. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	190 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,4 %
	TEPLOTA	13,5 °C
	OBJ. HMOTNOST	2399,7 kg/m ³

Tabulka 10: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 2

Testování probíhalo ve stejném intervalu jako v první zkoušce. Bylo vyrobeno 12 forem, kde polovina forem byla vložena do lednice s nastavenou teplotou na 5 °C a polovina forem byla uložena do laboratorního prostředí. Teplota byla monitorována elektronickými teploměry a během celé zkoušky se teplota pohybovala okolo 5 °C, ale byly zaznamenány i výkyvy teploty. Rozdíly byly naměřeny v desetínách, nejnižší naměřená teplota byla 4,8 °C a nejvyšší teplota byla 5,3 °C. Proto lze považovat vytvoření požadovaných podmínek za splněné.

Z výsledků, viz Tabulka 12, je patrné, že teplota má vliv na zrání betonu. Nicméně teplota okolo 5 °C stále moc neovlivní zrání betonu a tím jeho pevnost. Z výsledků pevnosti betonu, viz Tabulka 11 a 12, je možné vidět, že v první den byla pevnost betonu v chladu 20,1 MPa. Beton uložený v chladu měl nižší pevnost a to o 11,5 MPa na rozdíl od betonu, který byl uložen v laboratorním prostředí. Rozdíl byl značný, ale následně k nárůstu pevnosti došlo. Nízká teplota pouze zpomalila proces tvrdnutí betonu, ale výsledná pevnost po 56 dnech 65,0 MPa byla prakticky shodná s pevností betonu uloženého v laboratoři 65,1 MPa. Navíc charakteristická pevnost 30 MPa byla dosažena už ve druhém dni.

Závěrem druhého experimentu lze konstatovat, že teplota kolem + 5 °C nepoškozuje zásadním způsobem beton a jeho mechanické a fyzikální parametry. Pouze posunuje v čase míru jeho zralosti. Na to je třeba pamatovat při postupu výstavby a stanovení vhodného momentu pro odbednění konstrukce.

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.2	KP1 - 27.3.2019	KP2 - 28.3.2019	KP3 - 29.3.2019	KP5 - 31.3.2019	KP28 - 23.4.2019	KP56 - 14.5.2019
	d.v. 26.3.2019	8,10 kg	8,31 kg	8,13 kg	8,12 kg	8,31 kg	8,15 kg
	ZKOUŠKA	31,6 N/mm ²	36,1 N/mm ²	45,6 N/mm ²	46,9 N/mm ²	61,5 N/mm ²	65,1 N/mm ²
		711 kN	811 kN	1025 kN	1056 kN	1384 kN	1466 kN

Tabulka 11: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek

LEDNICE	p. Vild záměs č.2	KP1 - 27.3.2019	KP2 - 28.3.2019	KP3 - 29.3.2019	KP5 - 31.3.2019	KP28 - 23.4.2019	KP56 - 14.5.2019
	d.v. 26.3.2019	8,25 kg	8,07 kg	8,17 kg	8,10 kg	8,24 kg	8,25 kg
	ZKOUŠKA 5 °C	20,1 N/mm ²	31,9 N/mm ²	35,5 N/mm ²	45,1 N/mm ²	48,2 N/mm ²	65,0 N/mm ²
		452,4 kN	718 kN	798 kN	1014 kN	1087 kN	1462 kN

Tabulka 12: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 5 °C

6.4. Experiment – Teplota 2 °C

Z druhého experimentu, kde byla nastavena teplota okolo 5 °C, viz kapitola 6.3., bylo patrné, že tato teplota nemá významný dopad na pevnost betonu. Naměřené pevnostní hodnoty byly pouze nepatrně nižší než při předchozím experimentu. Proto byla při dalším testování betonu teplota snížena o 3 °C. Doporučuje se nebetonovat při nižší teplotě než 5 °C, a proto jsem snížil teplotu o pouhé tři stupně, abych zjistil, jestli dojde k výraznému ovlivnění vlastností betonu.

V první řadě byly provedeny základní zkoušky betonu, a to zkouška sednutí kužele a zkouška provzdušnění, aby se potvrdilo, že směs je opět umíchaná stejně jako v předchozích experimentech. Provzdušňovací zkouška vyšla 5,8 %, tedy hodnota, která se shoduje s předcházejícími směsmi. Zkouška sednutí kužele vyšla také pořádku, viz Tabulka 13.

3. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	200 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,8 %
	TEPLOTA	13,7 °C
	OBJ. HMOTNOST	2363,4 kg/m ³

Tabulka 13: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 3

Testování vzorků bylo provedeno ve stejném intervalu jako v první zkoušce. Bylo vybetonováno 12 forem, kde půlka forem byla vložena do lednice, kde bylo vytvořené prostředí s teplotou 2 °C a druhá polovina forem byla uložena do laboratorního prostředí. Teplota byla monitorována elektronickými teploměry a během celé zkoušky se teplota pohybovala, až na malé výkyvy, na hodnotě 2 °C. Ke změně teploty docházelo tehdy, když byly formy vyňaty z lednice.

První den se opravdu zdálo, že prostředí při teplotě 2 °C opravdu betonu nesevďčí. V prvním dnu byla pevnost betonu v chladu 4,8 MPa, viz Tabulka 14, oproti pevnosti betonu v laboratorních podmínkách, která dosahovala 31,6 MPa, viz Tabulka 15. V první den zkoušení měl beton uložený v chladu nižší pevnost o 26,8 MPa. Rozdíl naměřených hodnot je obrovský a zdálo se, že opravdu betonovat při teplotě 2 °C a uměle nezvyšovat okolní teplotu bude mít veliký dopad na jeho pevnost.

U betonu je vždy důležité, aby začala probíhat hydratace. Pokud by nedošlo k hydrataci, beton by nezačal tuhnout a následně tvrdnout. V experimentu beton sice začal tuhnout, ale otázkou zůstává, co se s ním stane dál. První den byla naměřena extrémně nízká hodnota. Pokud by se pevnost nezměnila a zůstala by na hodnotě 4 MPa, tak minimální teplotou pro betonáž je opravdu hodnota 5 °C, protože zde by ani nepomohly součinitele bezpečnosti. Kdyby nikdo na stavbě neozkoušel pevnost betonu a pokračovalo by se dál ve výstavbě, následky by byly katastrofální.

V druhý den zkoušení však došlo k enormnímu nárůstu pevnosti. Z hodnoty 4,8 MPa se pevnost betonu dostala na neuvěřitelných 20,7 MPa. Za pouhý den se pevnost betonu zčtyřnásobila a následující dny se čím dál tím více přibližovala pevnostem naměřených na vzorcích umístěných v laboratorních podmínkách. Pevnost každým dnem stoupala, a dokonce se po stanovených 28 dnech shodovala s pevností betonu uloženém v laboratorním prostředí.

Z naměřených hodnot lze dojít k závěru, že teplota kolem 2 °C nepoškozuje beton a jeho mechanické a fyzikální parametry. Pouze v prvních dnech dochází k oddalování zrání betonu. Zvyšování okolní teploty, nebo jiná opatření, se provádět nemusí, za předpokladu, že budou důsledně dodrženy technologické postupy betonování a ošetřování konstrukce.

Pokud bude betonáž probíhat při teplotě 2 °C, je zapotřebí vzít v úvahu fakt, že beton zraje pomaleji, a tudíž je vhodné konstrukci ponechat déle zabetonovanou a nezátíženou. Ideální je odmontovat bednění po 5 a více dnech

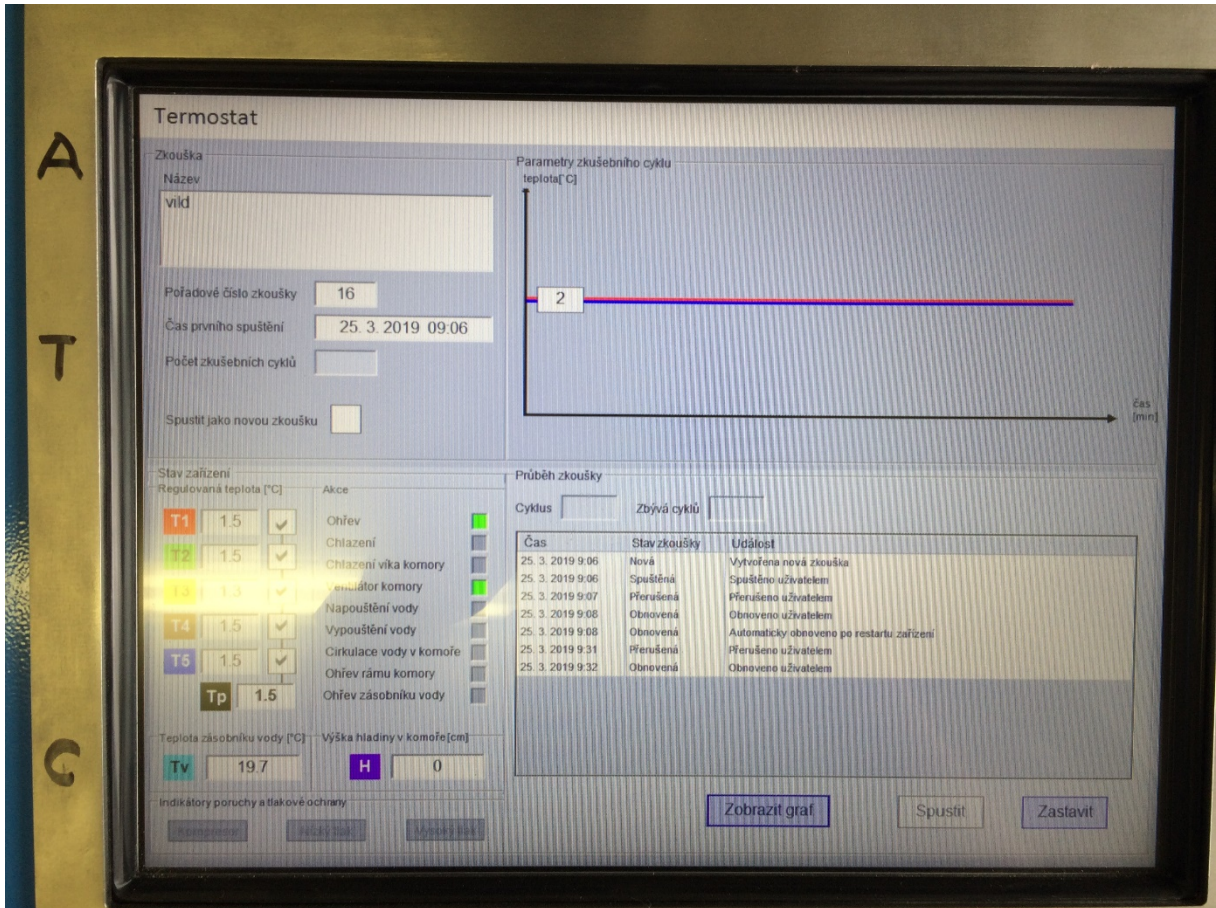
LABORATOR	p. Vild záměs č.2 d.v. 26.3.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		27.3.2019	28.3.2019	29.3.2019	31.3.2019	23.4.2019	14.5.2019
		8,10 kg	8,31 kg	8,13 kg	8,12 kg	8,31 kg	8,15 kg
		31,6 N/mm ²	36,1 N/mm ²	45,6 N/mm ²	46,9 N/mm ²	61,5 N/mm ²	65,1 N/mm ²
711 kN	811 kN	1025 kN	1056 kN	1384 kN	1466 kN		

Tabulka 14: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.2 d.v. 26.3.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		27.3.2019	28.3.2019	29.3.2019	31.3.2019	23.4.2019	14.5.2019
		8,27 kg	8,31 kg	8,10 kg	8,13 kg	8,10 kg	8,13 kg
		4,8 N/mm ²	20,7 N/mm ²	29,6 N/mm ²	34,0 N/mm ²	61,9 N/mm ²	62,4 N/mm ²
107,6 kN	467 kN	667 kN	777 kN	1394 kN	1404 kN		

Tabulka 15: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 2 °C

Teplota byla monitorována speciálními čidly v mrazícím přístroji. Mrazící přístroj byl natolik silný, že nebyly zaznamenány poklesy teploty během celé zkoušky. K poklesu o 0,5 °C došlo pouze při vyndávání forem z mrazícího boxu, a to pouze na 30sekundovou chvíli. Po uzavření mrazáku se teplota snížila a ustálila na požadované 2 °C, viz Obrázek 19. Tento přístroj je vybaven speciálními čidly, která monitorovala prostředí 24 hodin, a byl použit při všech dalších experimentálních zkouškách.



Obrázek 19: Průběh teploty

6.5. Experiment – Teplota 0 °C

Při předchozím experimentu, viz kapitola 6.4., kde byla nastavena teplota 2 °C už byly patrné změny pevnosti betonu v prvních dnech. Na konci experimentu se hodnoty dostaly až k hodnotám získaných v laboratorních podmínkách. Z tohoto důvodu jsem pokračoval dál ve snižování teploty na hodnotu 0 °C.

Nejdříve jsem se musel přesvědčit o totožnosti betonové směsi. Byly provedeny zkoušky sednutí kužele a zkouška provzdušnění, viz Tabulka 16. Po provedení zkoušek se potvrdilo, že směs je opět umíchaná velmi podobně jako v předchozích experimentech. Odečtená hodnota ze stupnice tlakového hrnce byla 5,7 %. Procento provzdušnění se shoduje s předcházejícími směsmi, rozdíl je pouze v desetíně procenta. Zkouška sednutí vyšla 200 mm, což odpovídá stupni konzistence S4, přesně podle požadavků a návrhu směsi.

4. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	200 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,7 %
	TEPLOTA	15,5 °C
	OBJ. HMOTNOST	2372,9 kg/m ³

Tabulka 16: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 4

Při pohledu na výsledky je patrné, že opět v prvním dnu vystavení je pevnost betonu malá, dosahuje 3,5 MPa tedy 9krát nižší hodnoty než u vzorku z laboratorního prostředí. Je zde mírný pokles pevnosti oproti předchozímu experimentu, viz kapitola 6.4. V dalších dnech můžeme vidět značný nárůst pevnosti. Sice se pevnost nezvýšila tak radikálně jako v předchozím experimentu, ale důležité je, že se zvyšuje a beton stále nabývá na pevnosti. Beton nedosahuje hned v prvních dnech takové hodnoty, jako beton, který byl uložen v laboratoři, ale po třech dnech i s velice malou rezervou tuto hranici překonal. Další dny, když se beton testoval, dosahoval vyšších a vyšších hodnot. Po 28 dnech se moc neodlišoval od pevnosti betonu, který zůstal v laboratorním prostředí. Beton uložený v chladu měl nižší pevnost a to o 5 MPa oproti pevnosti betonu v laboratorních podmínkách. Vypadalo to, že i teplota kolem 0 °C nebude mít zásadní vliv na vývoj pevnosti betonu, ale jen na rychlost tvrdnutí. Při poslední zkoušce po 56 dnech, kdy byla pevnost betonové krychle 64,6 MPa, se očekával podobný výsledek i od druhé krychle, která byla uložena v chladícím boxu. Po odzkoušení druhé krychle se však pevnost nepřiblížila první, ale zůstala téměř totožná s předchozí hodnotou naměřenou po 28 dnech, viz Tabulka 17 a 18.

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.3	KP1 - 28.3.2019	KP2 - 29.3.2019	KP3 - 30.3.2019	KP5 - 1.4.2019	KP28 - 25.4.2019	KP56 - 16.5.2019
	d.v. 27.3.2019	8,09 kg	8,12 kg	8,23 kg	8,02 kg	8,17 kg	8,06 kg
	ZKOUŠKA	31,2 N/mm ²	34,6 N/mm ²	47,0 N/mm ²	49,6 N/mm ²	59,8 N/mm ²	64,6 N/mm ²
		703 kN	780,57 kN	1060,3 kN	11189 kN	1349,1 kN	1457,3 kN

Tabulka 17: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

LEDNICE	p. Vild záměs č.3	KP1 - 28.3.2019	KP2 - 29.3.2019	KP3 - 30.3.2019	KP5 - 1.4.2019	KP28 - 25.4.2019	KP56 - 16.5.2019
	d.v. 27.3.2019	8,26 kg	8,18 kg	8,24 kg	8,11 kg	8,13 kg	8,10 kg
	ZKOUŠKA 0 °C	3,5 N/mm ²	17,5 N/mm ²	25,4 N/mm ²	29,0 N/mm ²	54,8 N/mm ²	56,9 N/mm ²
		78,9 kN	394,8 kN	573,1 kN	654,3 kN	1236,2 kN	1283,6 kN

Tabulka 18 Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 0 °C

Z výsledků, viz Tabulky 17 a 18, plyne, že teplota prostředí okolo 0 °C má vliv na dynamiku vývoje pevnosti betonu. Požadovaná hodnota pevnosti, tedy 37 MPa, byla dosažena až po 28 dnech. Při posledním zkoušení po 56 dnech vzorek dosáhl 54,8 MPa, tedy o 80 % větší pevnosti, než byla požadována.

Na základě zjištěných výsledků se zdá, že při teplotách 0 °C na staveništi je možné provádět betonářské práce bez omezení, ale je potřeba zvážit konkrétní podmínky. Zvyšování teploty se provádět nemusí, postačí jen důsledně dodržovat technologický postup betonování a ošetřování konstrukce. V prvních dnech výstavby bych však doporučil zakrýt konstrukci plachtou, aby byl nárůst pevnosti rychlejší a rychlost výstavby se nemusela omezovat.

6.6. Experiment – Teplota - 5 °C

V předcházejícím experimentu bylo dosaženo víc než uspokojivých výsledků. V betonu proběhla hydratace, beton ztuhl a následně vytvrdl a dosáhl hodnoty 54,8 MPa po 28 dnech. Poklesy pevnosti oproti teplotě okolo 0 °C, viz kapitola 6.5., a teploty 2 °C, viz kapitola 6.4., nebyly nijak zvlášť výrazné. Z tohoto důvodu jsem pro další experiment zvolil větší teplotní rozdíl. Pro tento experiment byl beton vystaven teplotě - 5 °C.

Složení směsi se vůbec nezměnilo. Zůstává pořád stejná, viz kapitola 5.2. Pro utvrzení, že směs je opravdu shodná, byly provedeny základní zkoušky, které opět vyšly v souladu s navrženou směsí. Sednutí kuželu vyšlo 195 mm, což řadí směs do kategorie S4 a provzdušnění se opět nelišilo o více než desetinu procenta se srovnáním z předchozích zkoušek, viz Tabulka 19.

5. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	195 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,9 %
	TEPLOTA	19,7 °C
	OBJ. HMOTNOST	2354,2 kg/m ³

Tabulka 19 Naměřené hodnoty betonové směsi č. 5

Při sundání vrchní krytky formy bylo patrné, že voda obsažená v betonové směsi zmrzla a vytvořila malé kapky na povrchu betonu, viz Obrázek 20. Po vyndání krychle z formy byly na povrchu vidět zmrzlé kapky a když se po vzorku přejelo rukou, bylo cítit, jak je vzorek chladný a lehce vroubkatý. Při lehkém doteku zůstávaly na povrchu vzorku viditelné stopy. Po chvílce, když se vzorek místy ohřál, začaly po něm pomalu stékat kapičky vody.



Obrázek 20: Zmrzlý vzorek při teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Doposud byly průběhy tlakových zkoušek pokaždé stejné. Vzorek se vložil do lisu přesně doprostřed čtvercové podložky a při spuštění testu hlava najela na vzorek a začala ho drtit. Při průběhu první tlakové zkoušky prvku, který byl vystaven teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, byl vývoj zkoušky odlišný. Při zatěžování vzorku hlavou lisu nezačala vůbec stoupat pevnost vzorku, ale celý vzorek se začal rosit a od vrchu začaly stékat pramínky vody. Po zmáčknutí vzorku o 2 mm začala naskakovat pevnost zkoušeného vzorku. Výsledek tlakové zkoušky po prvním dnu byl 1,6 MPa.

Tento proces, kdy ze vzorku tekla voda, se opakoval první tři dny. V pátém dnu ze vzorku netekla voda už vůbec a pevnost vzorku narůstala ihned jakmile hlava lisu dorazila na vzorek. Až v pátém dnu vzorek přesáhl návrhovou hodnotu o 4,3 MPa. Po dalším testování, které bylo po 28 dnech beton dosáhl charakteristické hodnoty s rezervou 0,3 MPa, viz Tabulky 20 a 21, ale skutečná změřená pevnost by měla být mnohem větší, protože charakteristická pevnost je 5% kvantil.

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.4	KP1 - 16.5.2019	KP2 - 17.5.2019	KP3 - 18.5.2019	KP5 - 20.5.2019	KP28 - 17.6.2019	KP56 - 15.7.2019
	d.v. 15.5.2019	8,08 kg	8,08 kg	8,15 kg	8,12 kg	8,28 kg	8,24 kg
	ZKOUŠKA	29,8 N/mm ²	37,2 N/mm ²	44,9 N/mm ²	48,1 N/mm ²	62,0 N/mm ²	65,2 N/mm ²
		672 kN	838,8 kN	1012,5 kN	1084,7 kN	1398 kN	1470,2 kN

Tabulka 20: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.4	KP1 - 16.5.2019	KP2 - 17.5.2019	KP3 - 18.5.2019	KP5 - 20.5.2019	KP28 - 17.6.2019	KP56 - 15.7.2019
	d.v. 15.5.2019	8,25 kg	8,07 kg	8,17 kg	8,10 kg	8,24 kg	8,10 kg
	ZKOUŠKA - 5 °C	1,6 N/mm ²	9,2 N/mm ²	17,5 N/mm ²	24,3 N/mm ²	34,8 N/mm ²	37,8 N/mm ²
		36,1 kN	207,5 kN	394,6 kN	547,9 kN	784,7 kN	852,39 kN

Tabulka 21: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě - 5 °C

Při hydrataci betonu dochází k uvolňování teploty. Tento proces proběhl a uvnitř prvku, kde došlo k využití veškeré vody a beton ztvrdnul. Zároveň na prvek při tomto procesu na prvek ze vnějšku působily mírné mrazy, které způsobily, že voda na povrchu i voda v betonové směsi blízko k povrchu zmrzla a nebyla tak využita při hydratačním procesu. Jakmile se začal vyvíjet tlak na betonovou krychli, prvek se začal rozpínat, uvolňovat energii a k největšímu vývoji došlo mezi krychlí a hlavou válce. Proto došlo k mírné deformaci krychle a než se tato část povrchu vyliminovala, mohl působit vytvrdnutý beton. Mráz má taky za účinek vysychání. V prvních třech dnech došlo pouze ke změně skupenství. V následujícím dnu došlo k vyschnutí prvku, a proto při další zkoušce už z betonu nestékaly kapičky vody, ale prvek se choval stejně jako v předchozím testování.

Kdyby byl beton vystaven takovému vlivům na staveništi a nebyl by nijak chráněn proti chladnému počasí, bylo by za třeba vyčkat alespoň pěti dnů. Pokud by nebyla tato doba dodržena, mohlo by dojít k větším deformacím, průhybu a k rozvoji trhlin, což může mít za následek menší trvanlivost stavby.

Na základě zjištěných výsledků se zdá, při teplotách - 5 °C na staveništi je možné provádět betonářské práce, ale je potřeba zvážit konkrétní podmínky. Zvyšování teploty se provádět nemusí, postačí jen důsledně dodržovat technologický postup betonování a ošetřování konstrukce. V prvních dnech výstavby bych však doporučil zakrýt konstrukci plachtou, aby nárůst pevnosti byl rychlejší a rychlost výstavby nemusela být omezena.

6.7. Experiment – Teplota - 10 °C

Při experimentu, kdy byla teplota okolo - 5 °C, viz kapitola 6.6., se začal beton chovat odlišně než v předcházejících experimentech. Zajímalo mě, co se bude dít s betonem dál, vystavím-li ho větším mrazům. Proto jsem se rozhodl snížit teplotu na - 10 °C.

Na začátku experimentu jsem umíchal totožnou betonovou směs a abych se přesvědčil o vlastnostech čerstvého betonu, provedl jsem základní zkoušky čerstvého betonu. Zkouška sednutí kužele vyšla 190 mm, což odpovídá stupni konzistence S4, jak bylo předpokládáno v návrhu. Druhá zkouška na provzdušnění pro tuto směs vyšla 5,7 %, viz Tabulka 22.

6. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	190 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,7 %
	TEPLOTA	21,7 °C
	OBJ. HMOTNOST	2370,7 kg/m ³

Tabulka 22: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 6

Po odejmutí formy byl vzorek opět zmrzlý, ale povrch betonu vypadal odlišně narozdíl od předcházejícího experimentu, viz kapitola 6.6. Po očištění celé krychle byly vidět malé žilky po všech stranách, viz Obrázek 21. Jedná se o krásnou ukázkou, kdy lze poznat, že beton byl vystaven velkým mrazům. Žilkování není nijak hluboké. Největší hloubka dosahuje žilka maximálně milimetru v ostatních případech se jedná o desetiny až setiny milimetru.

Po předchozích experimentech se dalo očekávat, že po prvním dnu nebude pevnost betonu nijak obrovská. Tato domněnka se potvrdila a z první zkoušky vyšla pevnost betonu 0,7 MPa, viz Tabulka 24. Jedná se o velice nízkou pevnost, ale to nebylo žádným překvapením. Při dalších zkouškách byl povrch betonu úplně stejný. Všude byly vidět malé žilky, občas to byl celý svazek žilek, ale nebyly hlubší ani mělčí než v prvním testovaném vzorku. Krásnou ukázkou můžeme vidět na Obrázku 22. Při teplotě - 5 °C beton přesáhl charakteristickou pevnost s rezervou několika MPa. Očekával jsem, že i při nižší teplotě dokáže vzorek dosáhnout požadované pevnosti. Bohužel při všech zkouškách, které proběhly v intervalu 1, 2, 3, 5, 28 a 56 dnů, nedosáhl testovaný vzorek charakteristické hodnoty, ani nepřekročil hranici 10 MPa.



Obrázek 21 Poškození mrazem při teplotě – 10 °C

Závěrem tohoto experimentu můžeme predikovat, že pokud se na povrchu betonu objeví žilkování, je velice pravděpodobné, že beton je trvale poškozen. I kdybychom nechali beton zrát stanovených 28 dní, tak nedosáhne požadované hodnoty a nebude tak schopný přenést zatížení, na které byl naddimenzovaný.

Je-li zapotřebí v takových podmínkách betonovat a investor si nenechá vyvrátit rizika, která mohou nastat, tak zde už se vyplatí investovat do technologie, která nám zvýší teplotu na stavbě. V takových podmínkách bude zapotřebí teplotu zvýšit alespoň o 5 °C. Nabízí se použít tzn. torpéda a celý prostor, který byl vybetonován, pořádně zakrýt plachtami a utěsnit, aby utíkalo co nejmenší množství tepla a co nejdelší dobu topit vedle bednění. Druhou variantou je vložení vodiče k výtuži, které se po vybetonování zapojí do elektrického proudu a začnou beton vyhřívat ze středu, viz kapitola 3.4. Poslední možnou variantou je půjčení bednění, které je na takové podmínky přímo vyrobené a z vnitřní strany se nacházejí tepelné pláty které opět ohřívají beton tentokrát ze vnějšku.

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.5 d.v. 15.5.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		16.5.2019	17.5.2019	18.5.2019	20.5.2019	17.6.2019	15.7.2019
ZKOUŠKA		8,15 kg	8,26 kg	8,23 kg	8,31 kg	8,25 kg	8,34 kg
		31,4 N/mm ²	34,3 N/mm ²	47,8 N/mm ²	49,3 N/mm ²	62,5 N/mm ²	67,6 N/mm ²
		711 kN	811 kN	1025 kN	1056 kN	1384 kN	1522,4 kN

Tabulka 23: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.5 d.v. 15.5.2019	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
		16.5.2019	17.5.2019	18.5.2019	20.5.2019	17.6.2019	15.7.2019
ZKOUŠKA - 10 °C		8,25 kg	8,21 kg	8,19 kg	8,32 kg	8,29 kg	8,12 kg
		0,7 N/mm ²	1,6 N/mm ²	2,7 N/mm ²	5,3 N/mm ²	5,4 N/mm ²	6,8 N/mm ²
		15,8 kN	36,1 kN	60,8 kN	119,5 kN	121,7 kN	153,3 kN

Tabulka 24: Výsledky zkoušky pevnosti betonu při teplotě - 10 °C



Obrázek 22 Poškození mrazem – žilkování při teplotě – 10 °C

6.8. Experiment – Teplota - 15 °C

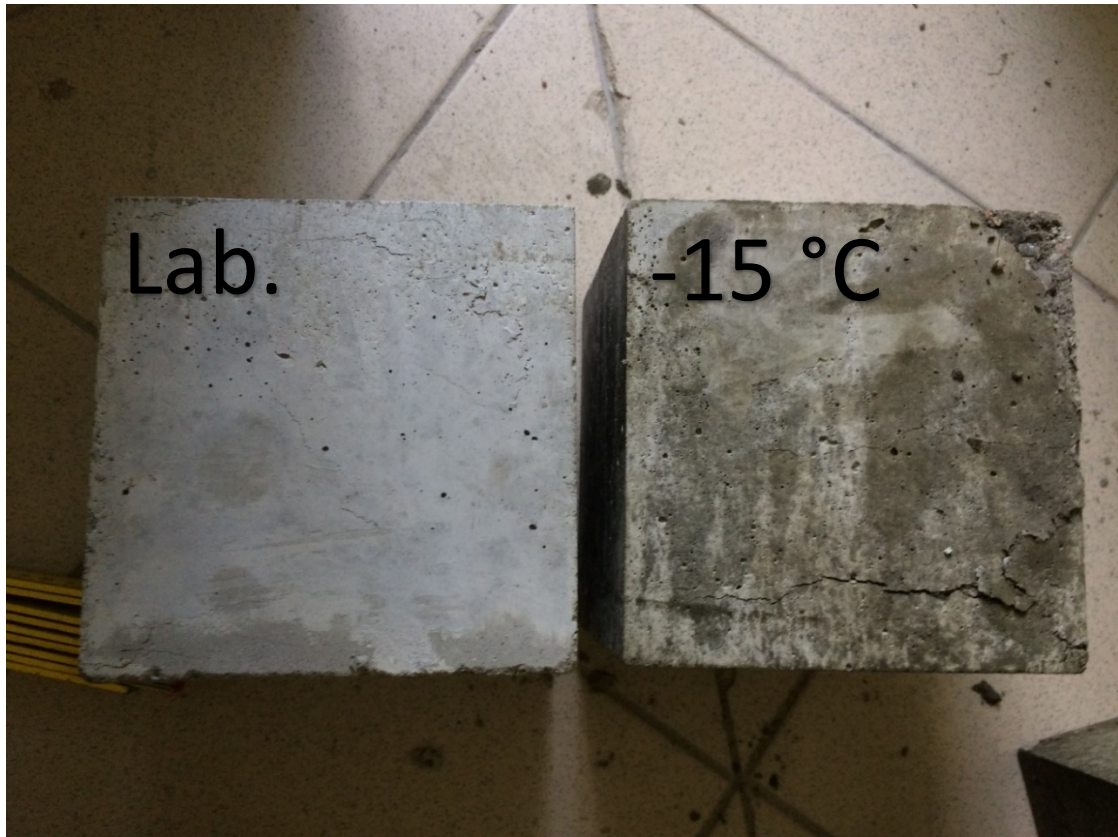
Z experimentu, který probíhal při teplotě okolo - 10 °C, viz kapitola 6.7., vyplynulo, že tato teplota významně ovlivňuje pevnost betonu. Bylo možné vidět i změnu povrchu betonu, ze kterého se dalo predikovat, že beton je poškozen. Zajímalo mě, jestli se budou projevovat další změny, vystavím-li beton ještě větším mrazům.

Byly provedeny základní zkoušky betonu, abych zjistil, že se vlastnosti betonu nebudou významně měnit. Byla dodržena počáteční receptura a bylo dosaženo podobných hodnot jako při předchozích experimentech. Hodnota provzdušnění betonu vyšla 5,5 % a zkouška sednutí kužele vyšla 200 mm, viz Tabulka 25, což opět odpovídá stupni konzistence S4.

7. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	200 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,5 %
	TEPLOTA	22,3 °C
	OBJ. HMOTNOST	2390,6kg/m ³

Tabulka 25: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 7

Při odbednění vzorku bylo opět jasně vidět žilkování po celé jeho ploše. Toto žilkování bylo skoro identické jako na vzorcích testovaných při nižší teplotě, viz kapitola 6.7. Na vzorku bylo opět možné poznat, že byl beton vystaven mrazům. Dokonce bylo žilkování hlubší než v předchozím experimentu. Pokud i u dalších vzorků bude žilkování hlubší, dalo by se konstatovat, že čím hlubší žilkování je, tím byl beton vystaven větším mrazům. Další, co bylo patrné ihned na první pohled, byl vzhled krychle. Jak můžeme vidět na Obrázku 23, vzorek, který se nacházel v laboratorním prostředí, je vysušen a má typickou šedou barvu, narozdíl od vzorku, který byl vystaven mrazům. Nejenom že je krychle nasycená vodou, proto je i tmavší, ale zásadní roli hrály veškeré trhliny. Vzorek je focen před zatěžovací zkouškou, nikoli po ni, a už hned po vyndání z formy jsou patrné trhliny. Nejedná se o nijak malé trhliny v řádu tisícín nebo desetín milimetru, které by tolik nevadily. Zde se jedná o trhliny v řádu milimetrů. Stačilo po ploše přejít a v ruce zůstávaly kousky povrchu a kamínky. Po použití nehtů se ihned začaly odlamovat větší kusy.



Obrázek 23 Laboratorní vzorek versus vzorek vystaven mrazu při teplotě – 15 °C

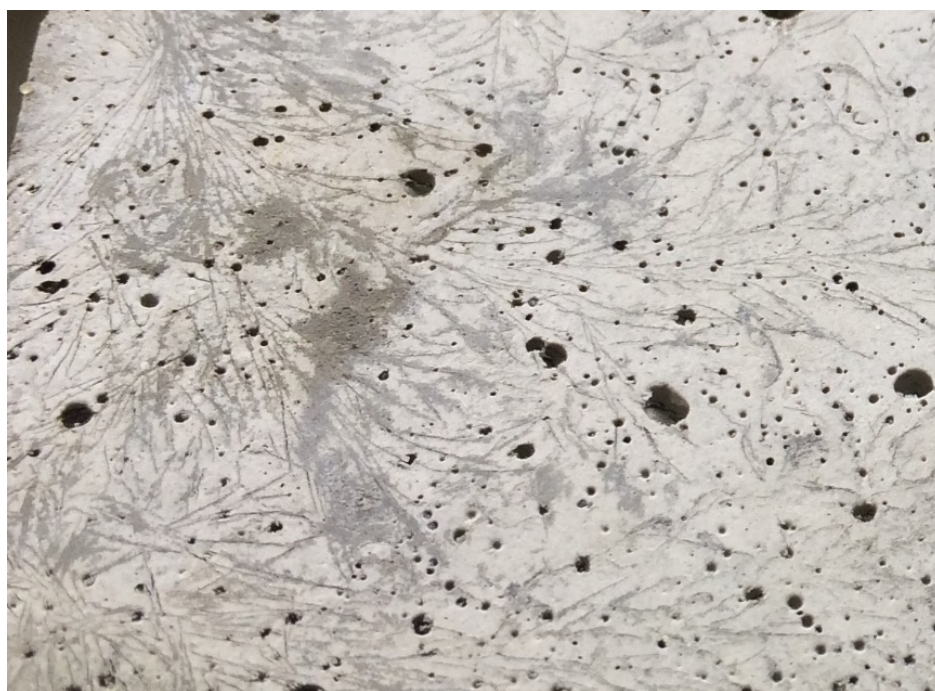
Následující dny, kdy byly vzorky testovány, byl průběh naprosto totožný. Krychle se mi drolily v rukách bez jakéhokoliv většího násilí. Veškeré kraje se odlamovaly a nejhůře na tom byly rohy, ty odpadaly skoro celé. Stačilo trochu zatlačit na roh a ze vzorku odpadávaly centimetry betonu, viz Obrázek 24.

Neočekával jsem převratné výsledky, když jsem viděl, jak byly vzorky poškozené ještě před pevnostní zkouškou, kterou musí podstoupit. Vzorky z laboratorních podmínek dosahovaly podobným pevnostem jako u předcházejících experimentů. Vzorky vystavené mrazu kolem teploty - 15 °C dosahovaly mizivých pevností. Ve stáří jednoho dne byla naměřená pevnost betonu 0,5 MPa tedy 30krát nižší oproti vzorku uloženého v laboratorním prostředí (29,8 MPa). Následující dny se pevnost skoro neměnila. V posledním testování, které proběhlo po 56 dnech, byla pevnost vzorku pouhých 2,2 MPa, viz Tabulky 26 a 27.



Obrázek 24 Samovolné odlamování při teplotě – 15 °C

Beton vystavený takovým podmínkám je úplně znehodnocený, viz Obrázek 26. Dosahuje radikálně nižších pevností a povrch betonu je popraskaný a dochází k neustálému odlupování materiálu. Pokud nedojde k odlamování částí, je možné vidět žilkování, viz Obrázek 25.



Obrázek 25 Detail žilkování při teplotě – 15 °C

Bylo-li by to nevyhnutelné a muselo by se za každých podmínek betonovat, navrhoval bych kombinaci vyhřívání bednění s vyhřívacími vodiči kolem výztuže. Je to jediná možnost, jak ohřát okraj betonu a zabránit tak odlupování krycí vrstvy a jak zajistit, aby vyzrál beton i uprostřed celé konstrukce. Toto řešení by ovšem významně prodražilo celou stavbu.

LABORATOR	p. Vild záměs č.6	KP1 - 15.7.2019	KP2 - 16.7.2019	KP3 - 17.7.2019	KP5 - 19.7.2019	KP28 - 12.8.2019	KP56 - 9.9.2019
	d.v. 14.7.2019	8,20 kg	8,18 kg	8,23 kg	8,29 kg	8,10 kg	8,15 kg
	ZKOUŠKA	29,8 N/mm ²	34,8 N/mm ²	42,6 N/mm ²	48,1 N/mm ²	57,2 N/mm ²	62,3 N/mm ²
		672 kN	784,7 kN	960,6 kN	1084,6 kN	1289,8 kN	1404,8 kN

Tabulka 26: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.6	KP1 - 15.7.2019	KP2 - 16.7.2019	KP3 - 17.7.2019	KP5 - 19.7.2019	KP28 - 12.8.2019	KP56 - 9.9.2019
	d.v. 14.7.2019	8,21 kg	8,09 kg	8,08 kg	8,19 kg	8,26 kg	8,17 kg
	ZKOUŠKA - 15 °C	0,5 N/mm ²	0,9 N/mm ²	1,4 N/mm ²	1,2 N/mm ²	2,0 N/mm ²	2,2 N/mm ²
		11,3 kN	20,3 kN	31,5 kN	27,0 kN	45,1 kN	49,61 kN

Tabulka 27: Výsledky zkoušky pevnosti betonu při teplotě - 15 °C



Obrázek 26 Zničení vrchní vrstvy při teplotě - 15 °C

6.9. Experiment – Teplota - 20 °C a porovnání různých teplot

Z předcházející kapitoly 6.8. je patrné, že beton při teplotě - 15 °C už nenabývá na pevnosti a dochází ke značnému poškození. Beton je vzhledově ale i strukturálně poškozen.

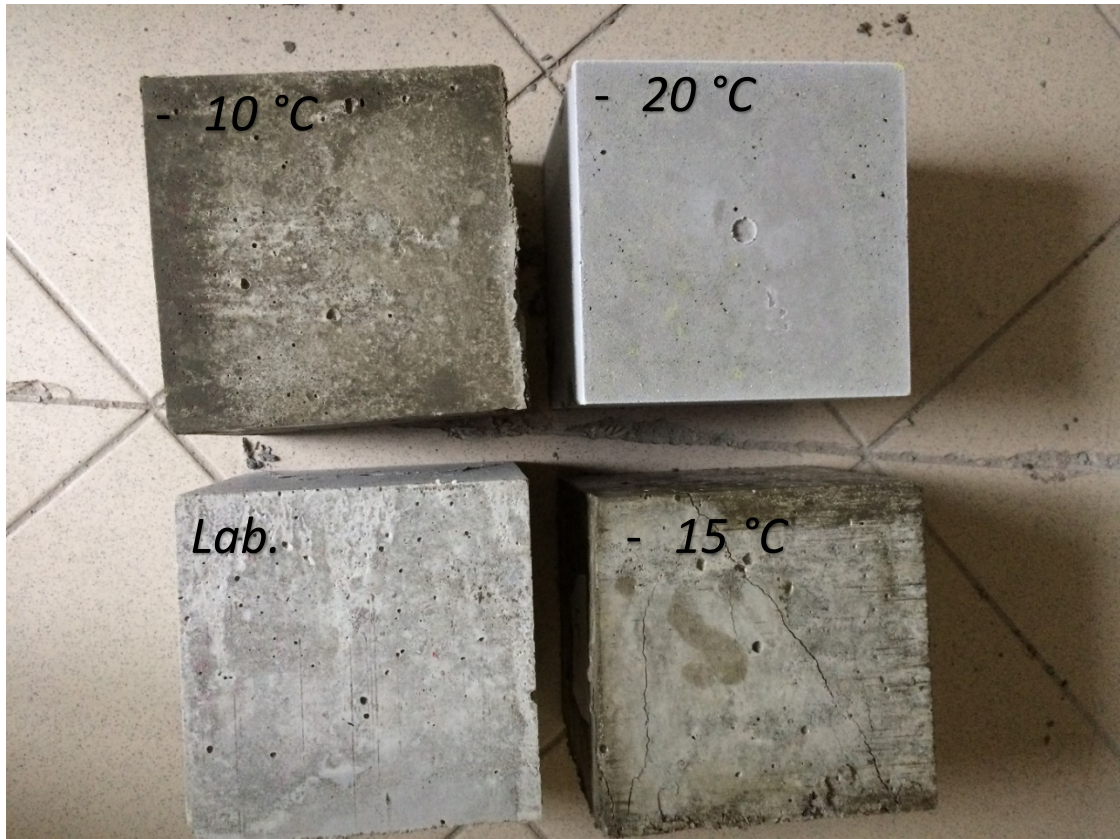
Jelikož se při teplotě - 10 °C se objevily na povrchu žilky a při teplotě - 15 °C byly opět viditelné žilky, ale navíc došlo k rozpadání vzorku, tak mě zajímalo, co se může stát s betonem bude-li vystaven ještě větším mrazům a to teplotě - 20 °C.

Před uložením vzorků do mrazícího boxu jsem pro kontrolu provedl základní zkoušky, abych si ověřil vlastnosti betonové směsi. Zkouška sednutí kužele vyšla 195 mm, což odpovídá stupni konzistence S4, a procento provzdušnění vyšlo 5,3 %, viz Tabulka 28, tedy podobně jako ve všech předcházejících experimentech.

8. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	195 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,3 %
	TEPLOTA	19,2 °C
	OBJ. HMOTNOST	2408,7 kg/m ³

Tabulka 28: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 8

Po vyndání prvního vzorku z formy bylo krásně vidět, jak je beton dokonale zmrzlý, viz Obrázek 27. Na obrázku se nacházejí čtyři vzorky, aby bylo patrné, co se stane s betonem při různých teplotách. Už od pohledu je vidět, který beton byl čemu vystaven a dá se odhadnout, v jakých podmínkách beton vyzrál. U první krychle na Obrázku 27 vlevo nahoře, můžeme vidět, že vzorek není poškozen. Nenachází se na něm žádná prasklina, ale při pohledu z blízka je vidět drobné žilkování. Vzorek byl vystaven teplotě - 10 °C. Druhý vzorek, na obrázku vpravo nahoře, je celý zmrzlý. Není na něm vidět žádné žilkování a ani jeho povrch není poškozen. Jedná se o krychli s dokonalým povrchem a i její hrany jsou dokonale kolmé. Jediné, v čem se tento vzorek liší, je že je celý pokrytý malinkatou vrstvou ledu, viz Obrázek 28. Právě tento vzorek byl vystaven teplotě - 20 °C. Jeho povrch je dokonce kvalitnější než je tomu u krychle, která byla uložena v laboratorních podmínkách při teplotě 21 °C. Na Obrázku 27 se tento vzorek nachází vlevo dole. Jedná se o neporušenou, kvalitní krychli z betonu, která při testování vykáže velkou odolnost oproti ostatním vzorkům na obrázku. V pravém dolním rohu se nachází krychle, která je celá popraskaná, dochází k odlamování kousků a je celá vlhká. Praskliny jsou přes celou plochu a pokud se na ni podíváme z blízka, je celá pokrytá žilkami. Jedná se o vzorek, který byl vystaven teplotě - 15 °C.



Obrázek 27 Rozdílnost vzorků při různých teplotách

LABORATOŘ	p. Vild záměs č.7	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
	15.7.2019	16.7.2019	17.7.2019	19.7.2019	12.8.2019	9.9.2019	
	d.v. 14.7.2019	8,16 kg	8,07 kg	8,32 kg	8,25 kg	8,21 kg	8,29 kg
	ZKOUŠKA	27,8 N/mm ²	38,2 N/mm ²	40,3 N/mm ²	42,8 N/mm ²	63,4 N/mm ²	67,1 N/mm ²
		626,9 kN	861,5 kN	908,7 kN	965,14 kN	1429,7 kN	1513,1 kN

Tabulka 29: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.7	KP1 -	KP2 -	KP3 -	KP5 -	KP28 -	KP56 -
	15.7.2019	16.7.2019	17.7.2019	19.7.2019	12.8.2019	9.9.2019	
	d.v. 14.7.2019	8,25 kg	8,07 kg	8,17 kg	8,10 kg	8,24 kg	8,10 kg
	ZKOUŠKA - 20 °C	1,2 N/mm ²	1,3 N/mm ²	1,7 N/mm ²	2,3 N/mm ²	2,1 N/mm ²	2,0 N/mm ²
		27,0 kN	29,3 kN	38,3 kN	51,8 kN	47,4 kN	45,1 kN

Tabulka 30: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě - 20 °C

Z výsledků, viz Tabulky 29 a 30, je patrné, že opět došlo ke změně chování. Při teplotě - 10 °C se na povrchu vyskytlo žilkování, při teplotě - 15 °C došlo k porušení celého vzorku a při teplotě - 20 °C došlo k úplnému zmrznutí a vytvoření hladkého povrchu. Všechny hrany jsou dokonale ostré, na prvku se nenacházejí žádné kaverny a oproti vzorku z přirozeného prostředí obsahuje tento vzorek zlomek bublinek na povrchu. V tuto chvíli je nutné otestovat, zda bude takový povrch vypadat i po zkoušce, nebo dojde opět k porušení celého povrchu.

Po vložení vzorku do lisu a po spuštění zkoušky začal beton pracovat. Jak můžeme vidět na Obrázku 29, z betonu začaly vytékat kapičky vody, které při stékání ihned zmrzly. Očekávaná pevnost vzorku byla pod hranicí 1 MPa, ale tato hodnota byla překonána. Po prvním dnu byla pevnost větší než tomu bylo u vzorku, který byl vystaven teplotě nižší o 5 °C. První den byla naměřena hodnota 1,2 MPa a při dalších testech se pevnost moc nezvyšovala a pohybovala se kolem 2 MPa. I přesto byla pevnost stále o pár desetin vyšší než při předchozím experimentu, viz kapitola 6.8.

Důvodem, proč byla pevnost vyšší je, že led sám o sobě má velice dobré vlastnosti v tlaku. Spolupůsobení kameniva a ledu, který držel krychli pohromadě, se dosáhlo větší pevnosti než při předchozích experimentech. Tento jev je viditelný na Obrázku 31.



Obrázek 28 Zmrzlý vzorek při teplotě - 20 °C



Obrázek 29 Okamžité zmrznutí vody - 20 °C



Obrázek 30 Výsledek zkoušky - 20 °C



Obrázek 31 Detail porušení povrchu po zatěžovací zkoušce - 20 °C

Před zkouškou bylo sice patrné, že vzorek dosáhl větší kvality, než tomu bylo u vzorku pocházejícího z laboratorního prostředí. Po vyjmutí vzorku z lisu byl ale povrch, který byl zatížen hlavou lisu, zcela poškozený. Po odloupení tenounké vrstvy je vidět, že beton je skrz na skrz zmrzlý, viz Obrázek 30. Pokud se podíváme pozorněji na Obrázek 31, můžeme vidět, jak je vnitřní struktura je provázaná krystalky ledu.

6.10. Průběžné střídání teplot

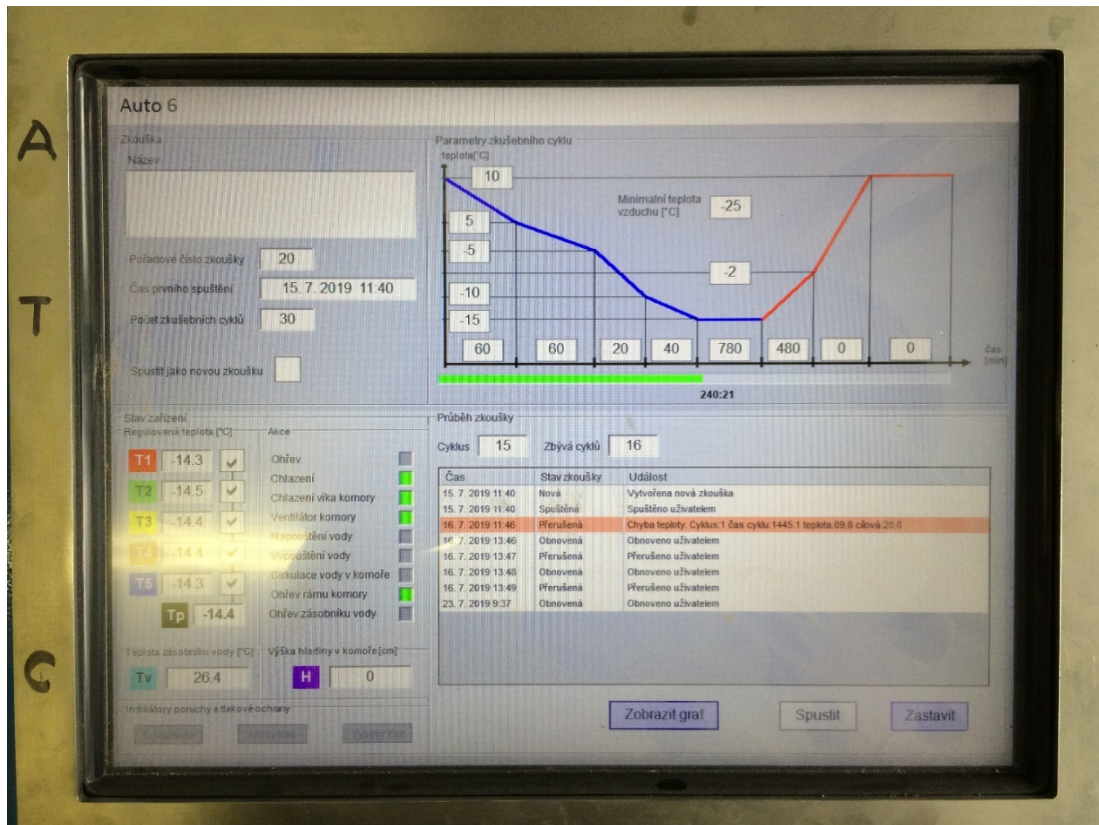
V reálných podmínkách je málo pravděpodobné, že by teplota byla konstantní několik dnů. Skoro vždy dojde k menší či větší změně teploty v průběhu pozorování. To bylo patrné i v předchozích experimentech, kdy pouze po otevření mrazícího boxu na pár sekund došlo k mírnému poklesu teploty. Proto je tento experiment založen na průběžném střídání teploty.

Nejprve jsem si musel nastavit průběh jednoho cyklu. Jeden cyklus představoval jeden den. Teploty byly vymyšleny podle skutečného dění, které se odehrálo před dvěma roky na stavbě. V zimním období se nejčastěji betonuje kolem 12. hodiny. V tuto denní dobu je slunce nejvýše na obloze a je nejvyšší teplota, která může během dne nastat. Při betonáži byla ideální teplota + 10 °C, ale náhle začala teplota klesat a v noci klesla až na - 15 °C. Další dny se teploty už nevrátily na kladnou stupnici a pohybovaly se pouze kolem - 2 °C. Rozhodl jsem se, že podobně zkusím nastavit svůj experiment, viz Obrázek 32. Pro uložení vzorků byla na hodinu nastavena teplota + 10 °C. Následující hodiny docházelo k poklesu teploty. Za další hodinu teplota klesla z + 10 °C na + 5 °C. Po další hodině byla teplota už na - 5 °C. Teplota stále klesala až na hodnotu - 15 °C. Tato hodnota zůstala konstantní po dobu 13 hodin. Tento moment představuje dobu od večera do rána a po ranních hodinách začíná opět teplota stoupat. Teď už teplota vystoupá pouze na - 2 °C a zůstává stejná po dobu 8 hodin, neboli po dobu pracovní směny. Tento průběh se opakoval každý den po dobu 56 dnů. Abych se ujistil, že opravdu vše proběhne podle plánu, nechal jsem první den box prázdný a pozoroval teploty a časy, jestli opravdu dochází ke všem plánovaným změnám, viz Obrázek 33. Chtěl jsem tak předejít neplánovaným chybám. Naštěstí vše proběhlo přesně tak, jak mělo, a druhý den jsem se pustil do výroby vzorků.

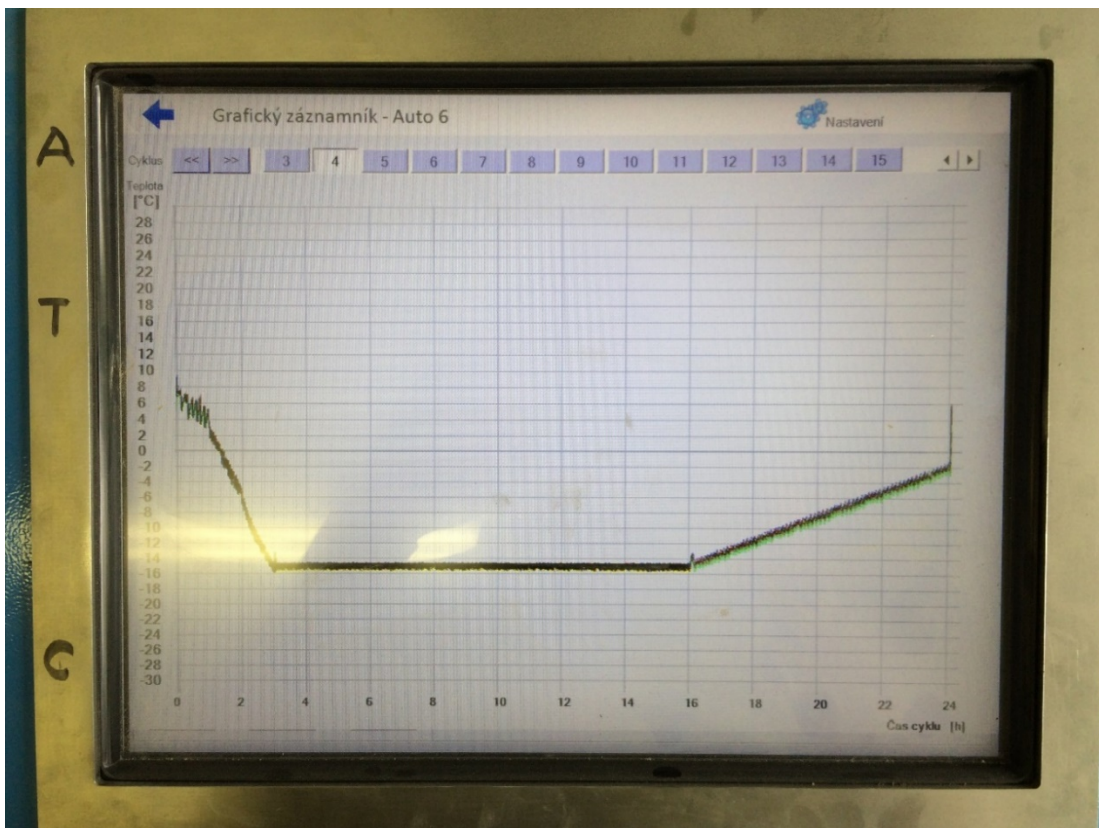
10. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	190 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	6,1 %
	TEPLOTA	14,9 °C
	OBJ. HMOTNOST	2336,2 kg/m ³

Tabulka 31: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 10

Po umíchání betonové směsi jsem se chtěl ujistit, že všechno proběhlo podle plánu a betonové směs je totožná s předchozími. Pro kontrolu jsem provedl zkoušku sednutí kužele a provzdušňovací zkoušku. Opět se povedlo směs namíchat přesně tak, jak byla umíchána na začátku a v průběhu všech experimentů, viz Tabulka 31. Zkouška sednutí kužele vyšla 190 mm a zařadila směs do třídy S4. Provzdušnění vyšlo 6,1 %, což řadí beton do kategorie XF.



Obrázek 32 Nastavení průběhu teploty pro jeden cyklus



Obrázek 33 Skutečný průběh teploty v mrazícím boxu

Z výsledků, viz Tabulky 31 a 32, je patrné, že hydratace proběhla a vzorek získává na pevnosti. Oproti vzorkům získaných v laboratorních podmínkách hydratace probíhá velice pomalu. Zatímco vzorek z laboratorního prostředí dosáhl už v první den 29,8 MPa, vzorek uložený v chladu, který byl vystaven jednomu cyklu, nedosáhl ani poloviční pevnosti. V následujících dnech pevnosti vzorků uložených v laboratorních podmínkách neustále stoupaly. Naopak vzorky vystavené cyklům svoji pevnost tolik neměnily. Stále se pohybovaly pod hranicí požadované pevnosti. V pátém dnu, když už pevnost laboratorního vzorku překračovala charakteristickou pevnost o 32 %, vzorek vystaven pěti cyklům byl stále pod hranicí charakteristické pevnosti.

LABORATOR	p. Vild záměs č.3	KP1 - 24.7.2019	KP2 - 25.7.2019	KP3 - 26.7.2019	KP5 - 28.7.2019	KP28 - 21.8.2019	KP56 - 17.9.2019
	d.v. 26.3.2019	7,74 kg	7,78 kg	7,69 kg	7,65 kg	7,76 kg	7,97 kg
	ZKOUŠKA	29,8 N/mm ²	33,8 N/mm ²	36,7 N/mm ²	39,6 N/mm ²	47,2 N/mm ²	39,5 N/mm ²
		671 kN	761 kN	829 kN	893 kN	1063 kN	887,9 kN

Tabulka 32: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek

MRAZÁK	p. Vild záměs č.3	KP1 - 27.3.2019	KP2 - 28.3.2019	KP3 - 29.3.2019	KP5 - 31.3.2019	KP28 - 23.4.2019	KP56 - 14.5.2019
	d.v. 26.3.2019	7,78 kg	7,84 kg	7,67 kg	7,77 kg	7,76 kg	7,83 kg
	ZKOUŠKA - 15 °C- + 2 °C	11,2N/m m ²	14,2 N/mm ²	10,6 N/mm ²	19,1 N/mm ²	11,3 N/mm ²	12,8 N/mm ²
		252 kN	320 kN	239 kN	430 kN	254 kN	288 kN

Tabulka 33: Výsledky zkoušky s průběžnou změnou teploty



Obrázek 34 Ukázka betonu po provedení 28 cyklů

6.11. Rozmrazení

Během pozorování chování betonu při teplotách pod bodem mrazu, jsem přemýšlel, jestli je beton už natrvalo poškozený, nebo zda by se začala zvyšovat jeho pevnost, pokud by se vystavil vyšším teplotám. Teoreticky, pokud by voda ihned zmrzla a nezačal by proces hydratace, měl by po rozmrazení začít opět hydratovat.

9. ZÁMĚS	složení viz kapitola 5.2.	
	SEDNUTÍ	195 mm
	PROVZDUŠNĚNÍ	5,9 %
	TEPLOTA	15,2 °C
	OBJ. HMOTNOST	2353,0 kg/m ³

Tabulka 34: Počáteční charakteristiky betonové směsi č. 9

Pro tento experiment jsem vystavil beton teplotám - 10 °C, - 15 °C a - 20 °C. Vyššími teplotami jsem se nezabýval, jelikož při teplotě - 5 °C byla konečná pevnost betonové krychle přes 30 MPa. Stanovil jsem časové úseky, jak dlouho bude beton vystaven mrazům a jak dlouho bude vystaven laboratorní teplotě + 21 °C. Abych viděl, jestli se opravdu něco bude dít s betonem, nechal jsem vždy pro daný časový úsek jednu betonovou krychli celou dobu v mrazech a druhá byla vyjmuta dříve.

První zkouška byla provedena po dvou dnech, kdy tři betonové krychle zůstaly celé dva dny v mrazech a další tři byly vystaveny mrazu pouze jeden den a druhý den byly uloženy v laboratorním prostředí. Po pouhém dnu je zde znatelný rozdíl pevností. Pevnosti betonu vystaveného mrazu po dobu dvou dní při teplotě - 10 °C byla 0,9 MPa, při nižší teplotě - 15 °C byla pevnost ještě nižší a to 0,3 MPa, ale při teplotě - 20 °C byla pevnost nejvyšší a to 1 MPa. Druhá zkouška, kde bylo s krychlemi manipulováno a byly přendány do jiné teploty, se pevnosti zvýšily. Při teplotě - 10 °C a následných + 21 °C byla pevnost 4,7 MPa, při teplotě - 15 °C byla naměřena pevnost 3,2 MPa a při nejnižší teplotě 2,9 MPa.

V druhé zkoušce byl prodloužen interval expozice mrazu. Nyní byl beton vystaven dva dny mrazu a na pouhý den byl uložen do laboratorního prostředí. Pro pozorování změny byla provedena zkouška, kdy byl beton vystaven pouze mrazům po celou dobu experimentu. Po třech dnech se pevnost betonu trochu zvýšila. Pevnost betonu při teplotě - 10 °C byl po celou dobu zkoušky byla 1,2 MPa, pro teplotu - 15 °C 1,7 MPa a pro teplotu - 20 °C byla zaznamenána nejvyšší pevnost 2,7 MPa. Pevnosti betonových krychlí, které byly vystaveny mrazu a následně vloženy do prostředí 21 °C, byl rozdíl pevností už znatelně vyšší. Při první manipulaci byla naměřena pevnost 5,3 MPa, při druhé 5,7 MPa a u poslední 6,3 MPa, viz Tabulky 34 až 39.

Pro třetí zkoušku byl zvolen interval pěti dnů. Opět byly první vzorky vystaveny celých pět dnů mrazu, druhé vzorky byly vystaveny třem dnům v mrazech a dvou dnům v laboratorním prostředí a poslední vzorky byly vystaveny mrazům po dobu pěti dnů a po dobu dvaceti tří dnů byly uloženy v laboratorním prostředí. Při teplotě - 10 °C došlo ke zvýšení pevnosti na hodnotu 4,9 MPa, při teplotě - 15 °C došlo k poklesu hodnoty oproti předchozím zkouškám, a to na hodnotu 1,3 MPa, a při teplotě - 20 °C byla pevnost

2,5 MPa. Při experimentu, kdy byl vzorek vystaven třem dnům v mrazu a dvou dnům vyšším teplotám, byl nárůst pevnosti o poznání vyšší u nižších teplot. Při teplotě - 10 °C nedošlo k tak znatelnému zvýšení, zde byla pevnost naměřena 5,8 MPa, ale při teplotě - 15 °C došlo k zvýšení na 8,3 MPa a při teplotě - 20 °C došlo ke zvýšení až o 7,6 MPa, a to na hodnotu 10,1 MPa, viz Tabulky 34 až 39.

Při poslední zkoušce, kdy byly vzorky vystaveny pěti dnům mrazu a poté byly uloženy do prostředí s teplotou + 21 °C, došlo k nejmarkantnějším změnám. Pevnost při teplotě - 10 °C byla pouhých 6,3 MPa, ale při teplotě - 15 °C se pevnost vyšplhala až ke 48,6 MPa a při nejnižší teplotě se pevnost betonové krychle dostala až na neuvěřitelných 51,6 MPa, viz Tabulky 35 až 40.

Z výsledků je patrné, že záleží na tom, při jaké teplotě prvek zmrzl. Během všech zkoušek, které proběhly při teplotě - 10 °C, se s betonem neděly veliké změny. Pevnost byla naměřená, ale pohybovala se jen kolem 5 MPa a ani po delším vystavením ve vyšších teplotách nedošlo ke změně. Zatímco při nižších teplotách byly patrné změny. Při porovnání teplot - 15 °C a - 20 °C byly pokaždé naměřeny vyšší hodnoty u experimentů při teplotě - 20 °C. Ze začátku za to mohl nejspíše led, který při nižší teplotě vytvořil lepší strukturu, a tak vzorek vykazoval větší pevnost.



Obrázek 35 Poškození betonu po třech dnech vystaveného v mrazu - 15 °C



Obrázek 36 Detail poškození betonu po třech dnech vystaveného v mrazu - 15 °C

		celý dva dny	jeden a jeden	celý tři dny	dva a jeden
MRAZÁK	p. Vild záměs č.7	KP2 - 23.9.2019	KP2 - 23.9.2019	KP3 - 24.9.2019	KP3 - 24.9.2019
	d.v. 21.9.2019	8,31 kg	8,28 kg	8,25 kg	8,22 kg
	ZKOUŠKA - 10 °C	0,9 N/mm ²	4,7 N/mm ²	1,2 N/mm ²	5,3 N/mm ²
		20,3 kN	105,8 kN	27,0 kN	119,4 kN

Tabulka 35: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 10 °C

		KP2 - 23.9.2019	KP2 - 23.9.2019	KP3 - 24.9.2019	KP3 - 24.9.2019
MRAZÁK	p. Vild záměs č.7				
	d.v. 21.9.2019	8,09 kg	8,07 kg	8,23 kg	8,24 kg
	ZKOUŠKA - 15 °C	0,3 N/mm ²	3,2 N/mm ²	1,7 N/mm ²	5,7
		6,7 kN	72,1 kN	38,2 kN	128,3 kN

Tabulka 36: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 15 °C

MRAZÁK	p. Vild záměs č.7	KP2 - 23.9.2019	KP2 - 23.9.2019	KP3 - 24.9.2019	KP3 - 24.9.2019
	d.v. 21.9.2019	8,25 kg	8,07 kg	8,17 kg	8,10 kg
	ZKOUŠKA - 20 °C	1,0 N/mm ²	2,9 N/mm ²	2,7 N/mm ²	6,3 N/mm ²
		22,5 kN	65,3 kN	60,8 kN	141,8 kN

Tabulka 37: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 20 °C

MRAZÁK	p. Vild záměs č.7 d.v. 21.9.2019	celých pět dnů	tři a dva	pět dnů a 23
		KP5 - 26.9.2019	KP5 - 26.9.2019	KP28 - 19.10.2019
		8,25 kg	8,15 kg	8,15 kg
		ZKOUŠKA - 10 °C	4,9 N/mm ²	5,8 N/mm ²
	110,4 kN	130,6 kN	141,8 kN	

Tabulka 38: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 10 °C

MRAZÁK	p. Vild záměs č.7 d.v. 21.9.2019	KP5 - 26.9.2019	KP5 - 26.9.2019	KP28 - 19.10.2019	
		8,10 kg	8,05 kg	8,05 kg	
		ZKOUŠKA - 15 °C	1,3 N/mm ²	8,3 N/mm ²	48,6 N/mm ²
		29,2 kN	186,9 kN	1094,4 kN	

Tabulka 39: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 15 °C

MRAZÁK	p. Vild záměs č.7 d.v. 21.9.2019	KP5 - 26.9.2019	KP5 - 26.9.2019	KP28 - 19.10.2019	
		8,24 kg	8,10 kg	8,10 kg	
		ZKOUŠKA - 20 °C	2,5 N/mm ²	10,1 N/mm ²	51,6 N/mm ²
		56,3 kN	195,9 kN	1162,1 kN	

Tabulka 40: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 20 °C



Obrázek 37 Poškození betonu po pěti dnech vystaveného v mrazu - 20 °C



Obrázek 38 Detailnější poškození betonu po pěti dnech vystaveného v mrazu - 20 °C

6.12. Vymrzlé bednění

Když jsem prováděl experimenty při teplotě - 15 °C až - 20 °C, viz kapitoly 6.8. a 6.9., tak měly všechny vzorky hladký povrch a všechny hrany byly dokonale ostré. Zajímalo mě, co se stane, když bude vymrzlé bednění. Dosáhne se lepší pohledovosti, nebo si akorát přiděláme starosti.

Bednicí formy jsem vymazal olejem a uložil do mrazícího boxu, kde byla nastavená teplota na - 20 °C. Bednicí formy jsem nechal v tomto prostředí uložené přes noc, stejně tak jak by se to mohlo stát i na stavbě. Druhý den jsem umíchal stejnou betonovou směs jako při předchozích experimentech. Veškeré parametry se shodovaly.

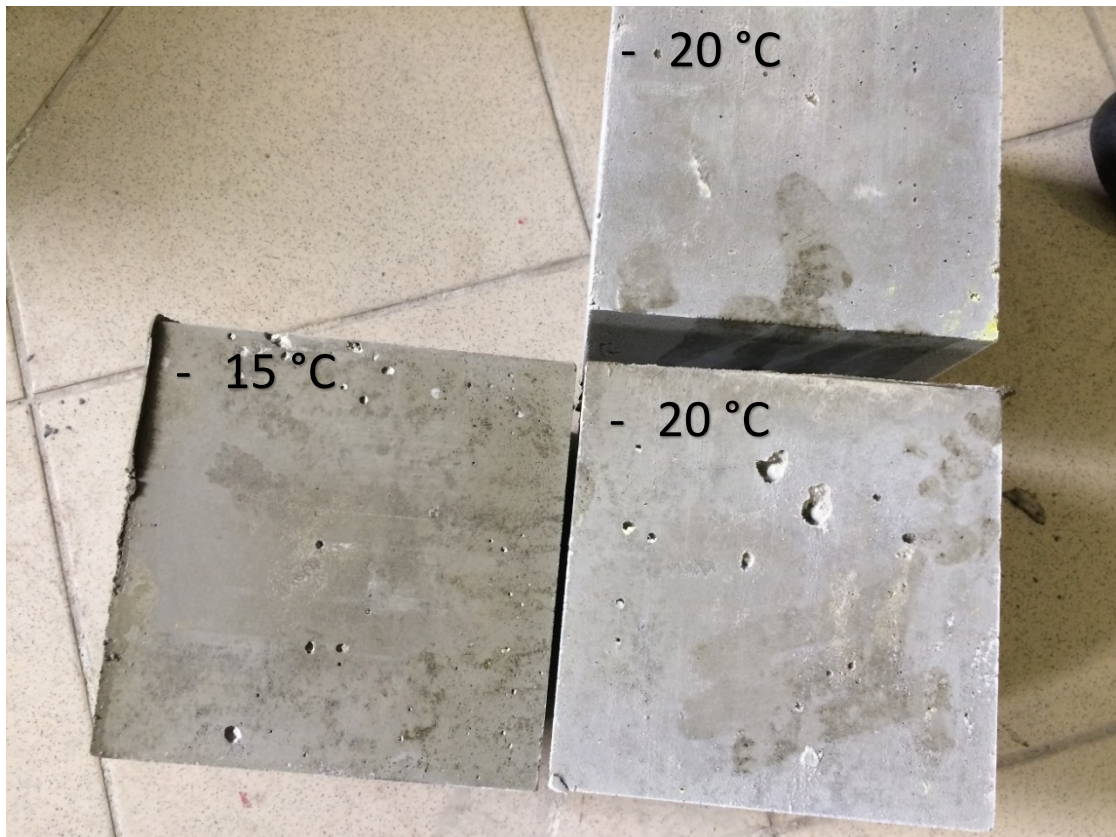
Jakmile jsem vyndal bednicí formy, ihned jsem je naplnil betonovou směsí. První vzorek jsem po naplnění neprodleně vrátil do stejného prostředí na 24 hodin. Může se stát, že by nepřišlo ihned lepší počasí a vzorek by tak byl vystaven stejným podmínkám. Tento vzorek můžeme vidět na Obrázku 39 úplně nahoře vpravo. Druhý vzorek byl opět vložen do stejného prostředí jen o 10 hodin později. Během těchto 10 hodin byl vzorek uložen v lednici, kde se vyskytovala teplota okolo 0 °C. Předpokládal jsem, že může během pracovní směny dojít ke zlepšení počasí. Vzorek se nachází na Obrázku 39 dole na pravé straně. Poslední vzorek, který se nachází na obrázku dole vlevo, byl opět vystaven vymrzlému bednění. Tentokrát však nebyl tento vzorek uložen zpátky do mrazivého prostředí, ale byl uschován po celou dobu v lednici, kde byla nastavena teplota 0 °C a po 10 hodinách teplota stoupla na + 5 °C.

Už na první pohled jde vidět, že každý prvek vypadá odlišně. Nejlepšího povrchu bylo dosaženo u vzorku, který byl vystaven po celou dobu mrazu. Obsahoval nejmenší počet kaveren (štěrková hnízda) a i nejméně bublinek. Co se týče hran a pravidelnosti, tak i zde má tento vzorek navrch. Tedy vzorek vystavený mrazům dosáhl nejlepšího vizuálního hodnocení po všech stránkách.

V předchozí kapitole 6.10. bylo popsáno, že vzorek vystaven teplotám okolo - 20 °C dosáhl ve 28. den podobné pevnosti jako vzorek uložený v laboratorním prostředí. Proto jsem se rozhodl vzorky testovat až po uplynutí 28 dnů. Tentokrát mi nešlo o pevnosti vzorku, ale pouze o to, zda se vyskytnou nějaké následky toho, že beton byl uložen do vymrzlých bednicích forem.

Po uplynutí 28 dnů jsem odzkoušel všechny vzorky. Všechny vzorky po této době opravdu dosahovaly pevnostem nad 50 MPa, takže na vývoj pevnosti betonu to nemělo tak výrazný vliv. Požadovaná pevnost je 37 MPa, a to bylo splněno i s 15 MPa rezervou. Po zatížení vzorků se ovšem projeví následky, jak můžeme vidět na Obrázku 40. Vnitřní struktura poškozena není, díky tomu že vzorky dosáhly takových pevnostních hodnot, ale po celém obvodu došlo k popraskání a k odlupování částí betonu, viz Obrázek 41. U všech hran došlo k rozpadnutí a odloupení, takže hrany už nebyly pravouhlé a ostré, ale byly ošklivě „okousané“. Každý roh ihned během prvních pár sekund při testování v lisu odpadl, viz Obrázek 42.

Na první pohled se mohlo zdát, že vymrzlé bednění bude mít kladný efekt na konečný stav vzhledu, ale ukázalo se, že tomu tak není. Sice beton jako takový poškozen není, ale vizuálně působí lépe malé kaverny a menší nedokonalosti než milimetrové praskliny a odlupování betonu. Praskliny nám dávají vědět, že se s konstrukcí něco děje. Upozorňují nás na určité nebezpečí, a proto kdyby se tyto praskliny objevily na stavbě, mohl by se někdo obávat nejhoršího, ačkoliv tomu tak nemusí být.



Obrázek 39 Betony ve vymrzlém bednění



Obrázek 40 Ukázka betonu po zatížení při - 15 °C



Obrázek 41 Ukázka betonu po zatížení – praskliny a odlupování - 15 °C



Obrázek 42 Ukázka betonu po zatížení – odloupení rohu - 20 °C

9. Diskuze

Z prvního experimentu, kde byla nastavena teplota prostředí okolo + 10 °C, lze říci, že tato teplota nemá velký vliv na dynamiku vývoje pevnosti betonu. Při teplotách + 10 °C na staveništi je možné provádět betonářské práce prakticky bez omezení. Zvyšování teploty, nebo jiná opatření, se provádět nemusí, postačí jen důsledně dodržovat technologický postup betonování a ošetřování konstrukce.

Při vystavení betonu teplotám od + 10 °C do 0 °C lze konstatovat, že tyto teploty nepoškozují zásadním způsobem beton a jeho mechanické a fyzikální parametry. Pouze posouvají v čase míru jeho zralosti, a tím pádem dochází i ke zpomalení nárůstu pevnosti. Na to je třeba pamatovat při postupu výstavby a stanovení vhodného momentu pro odbednění konstrukce. Zvyšování okolní teploty, nebo jiná opatření, se provádět nemusí za předpokladu, že budou důsledně dodrženy technologické postupy betonování a ošetřování konstrukce.

Při experimentu, kde bylo vytvořené umělé prostředí s teplotou - 5 °C, dochází k výraznému zpomalení nárůstu pevnosti v prvních dnech zrání. Na základě zjištěných výsledků se zdá, při teplotách - 5 °C na staveništi je možné provádět betonářské práce, ale je potřeba zvážit konkrétní podmínky. Zvyšování teploty se provádět nemusí, postačí jen důsledně dodržovat technologický postup betonování a ošetřování konstrukce. V prvních dnech výstavby bych však doporučil zakrýt konstrukci plachtou, aby byl nárůst pevnosti rychlejší a rychlost výstavby se nemusela omezovat.

Při teplotách nižších než - 5 °C je zapotřebí konstrukci chránit a zvyšovat okolní teplotu alespoň na 0 °C. Pokud by k takovému opatření nedošlo a beton by byl vystaven mrazům, došlo by k jeho výraznému poškození. Na povrchu by se objevilo žilkování, což je známka toho, že byl beton vystaven mrazům. Tím pádem by byl porušen nejen jeho povrch, ale i struktura. Beton vystavený takovým podmínkám je zcela znehodnocený. Dosahuje radikálně nižších pevností, které se pohybují do 5 MPa a s časem se nezvyšují.

Při střídání teplot, kde v první fázi byla nastavena teplota + 2 °C a postupně klesala až na hodnotu - 15 °C, hydratace probíhá, ale vzorek získává na pevnosti velice pomalu. Dochází k poškození mechanickofyzikálních parametrů. Po uplynutí 56 dní vzorek, který byl vystaven chladu, nepřekročil charakteristickou hodnotu pevnosti. Oproti tomu vzorek, který byl uložen v laboratorním prostředí, přesáhl charakteristickou hodnotu pevnosti o 32 %.

Při experimentu, kdy byla využita vymrzlá forma, se na první pohled zdálo, že díky tomu dosáhneme lepší kvality povrchu a pohledovosti, jelikož krychle měla po odbednění dokonalý tvar. Všechny hrany byly dokonale kolmé, byl zde menší počet kaveren a bublinek. Bohužel se ale ukázalo, že tomu tak není. Po odzkoušení vzorku se projevil následky experimentu. Vnitřní struktura poškozena není, jelikož po 28 dnech dosahovaly vzorky vyšších pevností, než bylo požadováno. V průběhu zkoušek však došlo k popraskání krychle po celém povrchu a k odlupování částí betonu. U všech hran došlo k rozpadnutí a odloupení, takže hrany už nebyly pravoúhlé a ostré, ale byly ošklivě „okousané“. Každý roh ihned během prvních pár sekund při testování v lisu odpadl.

Pokud betonáž proběhne v takovýchto podmínkách, musí se beton vždy odzkoušet Schmidtovým kladívkem, aby byla potvrzena kvalita betonu. Pokud by se na povrchu betonu objevilo žilkování, tedy známka toho, že beton byl vystaven mrazivým podmínkám během zrání, je velice pravděpodobné, že po odzkoušení betonu Schmidtovým kladívkem nebude pevnost dosahovat charakteristické hodnoty. Dokonce může být tato hodnota být až třetinová, v takovém případě nezbývá nic jiného než beton z konstrukce odstranit. Odstranění betonu je velmi náročné a taky nákladné, takže stojí za to zvážit všechna rizika, která mohou nastat a rozhodnout se, jestli je nezbytné riskovat a betonovat v takových podmínkách. Pokud ano, je nutné zvolit co nejlepší opatření, která pomohou betonu dosáhnout co nejlepších vlastností.

ZÁVĚR

Byl realizován rozsáhlý experimentální program, při kterém bylo vyrobeno a odzkoušeno celkem 123 betonových těles. Provedeny byly zkoušky objemové hmotnosti, sednutí, tlakové zkoušky a provzdušňovací zkoušky. Z výsledků a z jejich vyhodnocení lze učinit celou řadu zajímavých závěrů.

Z prvních experimentů je patrné, že pokud vystavíme beton teplotám do 5 °C, tak se s ním absolutně nic nestane a dosahuje stejných pevností a kvality jako v laboratorním prostředí.

Při nižších teplotách není beton stále porušen, ale už je zde pomalejší přechod z plastického stavu do tuhého a zpomalený náběh pevnosti. Tento jev se děje do teploty 0 °C od této teploty se již projevují značné následky. Beton nedosahuje charakteristické pevnosti a už od - 5 °C dál nedosahuje ani návrhové pevnosti po 28 dnech.

Beton vystaven nižším teplotám než je - 5 °C musíme začít chránit foliemi, přitápět pod/vedle konstrukce, nebo použít jinou technologii, která dokáže prostor vyhřát minimálně na teplotu + 5 °C. Beton bychom neměli ukládat na povrchy, které mají nižší teplotu než - 1 °C a je i zapotřebí odstranit sníh a led.

Po všech provedených experimentech není možné říci, že od teploty - 5 °C beton nedosáhne charakteristické hodnoty a je poškozen. Tato situace může nastat i za nižších, ba naopak vyšších teplot. Všechny experimenty byly tvořeny v laboratorním prostředí, kde se nevyskytují přírodní vlivy jako je například studený vítr nebo svit slunce. I tyto vlivy se podílejí na celkovém výsledku. Na stavbě může mít bednění nižší teplotu, než měly použité formy, a i betonová směs může dorazit s nižší teplotou. Formy mohly izolovat beton více než izoluje bednění a mohlo tak dojít ke zkreslení výsledků. Všechny tyto faktory musíme vzít v úvahu při rozhodování.

Nejde s úplnou přesností říci, kdy přestat betonovat. Vše záleží na okolních podmínkách, na dostupné technologii a i na konkrétní konstrukci, která se bude provádět.

**„BETON JE IDEÁLNÍ STAVEBNÍ MATERIÁL. JE TO ŽIVÝ TVOR, KTERÉHO
JE MOŽNÉ PŘIZPŮSOBIT JAKÉKOLIV FORMĚ, JAKÉKOLIV POTŘEBĚ,
JAKÉMUKOLIV NAPĚTÍ.“**

(P.L.NERVI)

LITERATURA

Webové zdroje:

[W1] Hot Weather Concreting – ppt download. *SlidePlayer - Upload and Share your PowerPoint presentations* [online]. Copyright © 2019 SlidePlayer.com Inc. [cit. 6.8.2019]
Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/9883746/>

[W2] Betonování v zimě | eBeton – Specialista na beton *eBeton / eBeton - Specialista na beton* [online] Copyright © [cit. 8.9.2019]
Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/betonovani-v-zime>

[W3] Zkoušení betonu | eBeton – Specialista na beton *eBeton / eBeton - Specialista na beton* [online] Copyright © [cit. 10.9.2019]
Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/zkouseni-betonu>

[W4] Pro betonování v zimě je hraniční teplotou -5 °C. *Chytré bydlení - rekonstrukce, koupelny, design interiéru...* [online] Copyright © 2011 [cit. 15.9.2019]
Dostupné z: <http://www.chytre-bydleni.cz/pro-betonovani-v-zime-je-hranicni-teplotou-5-c>

[W5] *mct - beton a betonové výrobky* [online] Copyright © X6 [cit. 20.9.2019]
Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/betonovani-v-zime/>

[W6] Things Have Changed. *Free-Ed.Net* [online]
Dostupné z: <https://www.waybuilder.net/free-d/Resources/Trades/Construction/ConcreteMasonry/default.asp?uNum=1&iNum=0510>

[W7] Document Moved. PCA - The Portland Cement Association - America's Cement Manufacturer Net [online]
Dostupné z: <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-construction/>

[W8] *Beton University* [online] Copyright © [cit. 5.10.2019]
Dostupné z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1025>

[W9] Českomoravský beton – výroba betonu, doprava betonu a čerpání betonových směsí. *Českomoravský beton – výroba betonu, doprava betonu a čerpání betonových směsí* [online]. Copyright © Českomoravský beton, a.s. 2019 [cit. 12.10.2019]
Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz>

Knižní zdroje:

- [1] M. Pigeon and R. Pleau, Modern concrete technology 4 Durability of concrete in cold climates, Taylor & Francis Group, 2006 ISBN 0-419-19260-3
- [2] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] SVOBODA, Luboš, stavební hmoty. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 978-80-260-4972-2
- [4] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [5] TRTÍK, Karel. Technologie betonu. vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [6] Českomoravský cement, a.s., Příručka technologa Beton, suroviny, výroba, vlastnosti 1. vyd. Českomoravský cement, a.s., nástupnická společnost Beroun 660

Normy:

- [N1] ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [N2] ČSN EN 934-2 - Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Definice, požadavky, shoda, značení a označování štítky
- [N3] ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace
- [N4] ČSN EN 12878 Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a vápna
- [N5] ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí
- [N6] ČSN EN 12390-1 část-1 Tvary, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa
- [N7] ČSN EN 12390-2 část-2 Výroba a ošetřování těles pro zkoušky pevnost
- [N8] ČSN EN 12390 Zkoušení ztvrdlého betonu, ČNI, 2007
- [N9] ČSN 73 1326 -Z1, Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látkách. ICS 91.100.30. Praha: Český
- [N10] ČSN EN 13263-1 +A1, Křemičitý úlet do betonu – Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Půdorysné schéma vyhřívací smyčky z odporového drátu[W5]	17
Obrázek 2: Rozměry zkušebních těles	18
Obrázek 3: Uspořádání pro zkoušku pevnosti v tlaku	19
Obrázek 4: Používaný lis (zařízení) na zkoušku v tlaku.....	20
Obrázek 5: Těleso po zkoušce v tlaku.....	20
Obrázek 6: Schéma průběhu teploty při metodě C (černá) a A (červená)[6].....	22
Obrázek 7: Výsledky zkoušky CHRL (první graf – nevyhovující; druhý graf –požadující výsledek	23
Obrázek 8: Přístroje na měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu	24
Obrázek 9: Grafický postup obsahu vzduchu v mikropórů [1].....	25
Obrázek 10: Zobrazení pórů ve vzorku a jeho započítávaný rozměr	25
Obrázek 10: Grafický postup obsahu vzduchu v mikropórů [1] Chyba! Záložka není definována.	
Obrázek 11: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnost cementu [6] .	28
Obrázek 12: Zrnitost frakce 11/16.....	29
Obrázek 13: Zrnitost frakce 4/8.....	30
Obrázek 14: Zrnitost frakce 8/16.....	31
Obrázek 15: Přístroj na měření procenta provzdušnění	35
Obrázek 16: Zkouška sednutí.....	37
Obrázek 17: Laboratorní míchačka.....	39
Obrázek 18: Uložení vzorků do mrazícího boxu	41
Obrázek 19: Průběh teploty	46
Obrázek 20: Zmrzlý vzorek při teplotě – 5 °C	50
Obrázek 21 Poškození mrazem při teplotě – 10 °C	53
Obrázek 22 Poškození mrazem – žilkování při teplotě – 10 °C	55
Obrázek 23 Laboratorní vzorek versus vzorek vystaven mrazu při teplotě – 15 °C.....	57
Obrázek 24 Samovolné odlamování při teplotě – 15 °C.....	58
Obrázek 25 Detail žilkování při teplotě – 15 °C	58
Obrázek 26 Zničení vrchní vrstvy při teplotě – 15 °C	59
Obrázek 27 Rozdílnost vzorků při různých teplotách.....	61
Obrázek 28 Zmrzlý vzorek při teplotě - 20 °C.....	62
Obrázek 29 Okamžité zmrznutí vody - 20 °C	63
Obrázek 30 Výsledek zkoušky - 20 °C	63
Obrázek 31 Detail porušení povrchu po zatěžovací zkoušce - 20 °C.....	64
Obrázek 32 Nastavení průběhu teploty pro jeden cyklus	66
Obrázek 33 Skutečný průběh teploty v mrazícím boxu.....	66
Obrázek 34 Ukázka betonu po provedení 28 cyklech	67
Obrázek 35 Poškození betonu po třech dnech vystaveného v mrazu - 15 °C.....	69
Obrázek 36 Detail poškození betonu po třech dnech vystaveného v mrazu - 15 °C	70
Obrázek 37 Poškození betonu po pěti dnech vystaveného v mrazu - 20 °C.....	72
Obrázek 38 Detailnější poškození betonu po pěti dnech vystaveného v mrazu - 20 °C	72
Obrázek 39 Betony ve vymrzlém bednění.....	74
Obrázek 40 Ukázka betonu po zatížení při - 15 °C	75

Obrázek 41 Ukázka betonu po zatížení – praskliny a odlupování - 15 °C	75
Obrázek 42 Ukázka betonu po zatížení – odloupení rohu - 20 °C	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: F.1.1. z normy ČSN P 73 2404, Mezní hodnoty pro složení betonu, živostnost 50 let [N2]	23
Tabulka 2: Potřeba vody v litru na 1 m ³ [6]	28
Tabulka 3: Finální receptura	33
Tabulka 4: Složky betonu včetně objemového množství	33
Tabulka 5: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 1	36
Tabulka 6: Simulované teploty v lednici	38
Tabulka 7: Laboratorní podmínky	38
Tabulka 8: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek	40
Tabulka 9: Výsledky zkoušky pevností betonu v tlaku při teplotě 10 °C	40
Tabulka 10: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 2	42
Tabulka 11: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek	43
Tabulka 12: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 5 °C	43
Tabulka 13: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 3	44
Tabulka 14: Výsledky zkoušky pevností betonu z laboratorních podmínek	45
Tabulka 15: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 2 °C	45
Tabulka 16: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 4	47
Tabulka 17: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	48
Tabulka 18 Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě 0 °C	48
Tabulka 19 Naměřené hodnoty betonové směsi č. 5	49
Tabulka 20: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	51
Tabulka 21: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě - 5 °C	51
Tabulka 22: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 6	52
Tabulka 23: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	54
Tabulka 24: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě - 10 °C	54
Tabulka 25: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 7	56
Tabulka 26: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	59
Tabulka 27: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě - 15 °C	59
Tabulka 28: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 8	60
Tabulka 29: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	61
Tabulka 30: Výsledky zkoušky pevností betonu při teplotě – 20 °C	61
Tabulka 31: Naměřené hodnoty betonové směsi č. 10	65
Tabulka 31: Výsledky zkoušky z laboratorních podmínek	67
Tabulka 32: Výsledky zkoušky s průběžnou změnou teploty	67
Tabulka 34: Počáteční charakteristiky betonové směsi č. 9	68
Tabulka 35: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 10 °C	70
Tabulka 36: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 15 °C	70
Tabulka 37: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 20 °C	71
Tabulka 38: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 10 C°	71

Tabulka 39: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 15 °C	71
Tabulka 40: Výsledky zkoušky rozmrazení vystavené teploty - 20 °C	71