



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# MODIFIKACE SLOŽENÍ BETONŮ ZA ÚČELEM ZLEPŠENÍ KLÍČOVÝCH VLASTNOSTÍ RUČNĚ VYRÁBĚNÝCH BETONOVÝCH DÍLCŮ

MODIFICATION OF THE COMPOSITION OF CONCRETES TO IMPROVE THE KEY PROPERTIES OF  
HANDMADE CONCRETE COMPONENTS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Holanec

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Klára Křížová, Ph.D.

BRNO 2023



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Tomáš Holanec
<b>Název</b>	Modifikace složení betonů za účelem zlepšení klíčových vlastností ručně vyráběných betonových dílců
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Klára Křížová, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	20. 11. 2022
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2023

V Brně dne 20. 11. 2022

---

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.  
vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr. h. c.  
děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- [1] Yifei Wang, Lei Lei, Jianhui Liu, Yihan Ma, Yi Liu, Zhiqiang Xiao, Caijun Shi. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials, 2022.
- [2] Biao Luo, Zhengdong Luo, Dehui Wang, Chengpeng Shen, Minmin Xia. Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete, 2021.
- [3] Renan P. Salvador, Dimas A.S. Rambo, Roberto M. Bueno, Silvio R. Lima, Antonio D. Figueiredo. Influence of accelerator type and dosage on the durability of wet-mixed sprayed concrete against external sulfate attack, 2020.
- [4] T. Vehmas, A. Kronlöf, A. Cwirzen. Calcium chloride acceleration in ordinary Portland cement, 2018.
- [5] Tae-Beom Min, In-Sung Cho, Won-Jun Park, Hyun-Kuk Choi, Han-Seung Lee. Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening accelerator and high early strength cement. Construction and Building Materials, 2014.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce je zpracovat téma využití chemických přísad do betonu za účelem zefektivnění ruční výroby betonových dílců. Bude porovnán současný stav složení směsí betonů a jejich následná modifikace, tak aby bylo dosaženo požadované pevnosti a trvanlivosti betonů v kratším časovém úseku.

1. Na základě studia odborných periodik zpracovat rešerši používaných způsobů urychlování tvrdnutí betonu.
2. Teoreticky popsat vliv urychlovacích přísad na hydrataci, mikrostrukturu a vlastnosti betonů.
3. Ze získaných poznatků vlivu urychlovacích přísad na vývoj pevnosti v tlaku a trvanlivost betonu, následně modifikovat stávající složení betonů pro výrobu betonových dílců.
4. Navrhnout a experimentálně ověřit soubor betonů s urychlovací přísadou. Ověřit základní fyzikálně mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu (objemová hmotnost ztvrdlého betonu, pevnost v tlaku a mrazuvzdornost betonu).
5. Ze získaných výsledků zkoušek porovnat účinek urychlovacích přísad na vlastnosti betonu ve srovnání s původním návrhem složení. Zároveň sestavit ekonomické zhodnocení.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT „Úprava, odevzdání a zveřejňování závěrečných prací“ a platné Směrnice děkana „Úprava, odevzdání závěrečných prací na FAST VUT“ (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT „Úprava, odevzdání a zveřejňování závěrečných prací“ a platné Směrnice děkana „Úprava, odevzdání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT“ (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá modifikací stávajícího složení betonů za účelem zlepšení klíčových vlastností ručně vyráběných betonových dílců. Teoretická část práce se soustředí na rešerši používaných způsobů urychlování tvrdnutí betonu, popsán je také vliv chemických urychlovacích přísad na hydrataci, mikrostrukturu a vlastnosti betonů. V experimentální části jsou vyrobeny betony s využitím chemických přísad, které jsou podrobeny zkouškám vybraných vlastností. Závěrem je kromě dosažených výsledků zhodnoceno také ekonomické hledisko sledovaných betonů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Beton, prefabrikovaný beton, urychlovací přísada, urychlování tvrdnutí betonu, pevnost v tlaku, trvanlivost

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis is focused on the modification of existing concrete compositions in order to improve the key properties of handmade concrete elements. The theoretical part of the thesis focuses on a research of the methods used to accelerate the hardening of concrete, the effect of chemical accelerating additives on the hydration, microstructure and properties of concretes is also described. In the experimental part, concretes using chemical additives are produced and tested for selected properties. In addition to the results obtained, the economic aspect of the studied concretes is also evaluated.

## **KEYWORDS**

Concrete, precast concrete, accelerating admixture, accelerating concrete hardening, compressive strength, durability

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLANEC, Tomáš. *Modifikace složení betonů za účelem zlepšení klíčových vlastností ručně vyráběných betonových dílců*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí Ing. Klára Křížová, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Modifikace složení betonů za účelem zlepšení klíčových vlastností ručně vyráběných betonových dílců* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Tomáš Holanec  
autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Kláře Křížové, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení při zpracování mé bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině a přátelům, jmenovitě Tereze Nešporové za ochotu a pomoc při psaní této práce.

# Obsah

1 Úvod .....	10
2 Cíl práce.....	10
3 Urychlování tuhnutí a tvrdnutí betonu.....	11
3.1 Urychlení tvrdnutí betonu pomocí zvýšených teplot.....	11
3.1.1 Proteplování betonu.....	13
3.1.2 Propařování betonu .....	16
3.2 Chemické urychlovací přísady tuhnutí a tvrdnutí.....	17
3.2.1 Chloridové urychlovací přísady .....	18
3.2.2 Dusičnany.....	19
3.2.3 Dusitany .....	19
3.2.4 Thiokyanatany .....	19
3.2.5 Alkalické uhličitany .....	20
3.2.6 Soli karboxylových kyselin.....	20
3.2.7 Křemičitany .....	20
3.2.8 Hlinitany.....	20
3.2.9 Sířany .....	21
3.2.10 Alkanolaminy .....	21
3.2.11 Krystalizační přísady.....	21
3.3 Další metody urychlování tvrdnutí betonu .....	21
4 Vliv urychlujících přísad na hydrataci, mikrostrukturu a vlastnosti betonů.....	23
4.1 Vliv chloridových urychlovacích přísad na hydrataci cementu.....	23
4.2 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na hydrataci cementu.....	25
4.3 Vliv chloridových urychlovacích přísad na mikrostrukturu betonu .....	26
4.4 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na mikrostrukturu betonu .....	27
4.5 Vliv chloridových urychlovacích přísad na vlastnosti betonu.....	28
4.6 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na vlastnosti betonu .....	28
5 Experimentální část .....	31
5.1 Stávající technologie výroby.....	32
5.2 Modifikace stávající technologie a složení betonu .....	34
5.3 Metodika návrhu experimentu .....	34
5.3.1 Zkoušky čerstvého betonu.....	35
5.3.1.1 Zkouška sednutí kužele .....	35
5.3.1.2 Zkouška Vebe .....	36
5.3.1.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu .....	38

5.3.2 Zkoušky ztvrdlého betonu .....	38
5.3.2.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu .....	38
5.3.2.2 Pevnost v tlaku .....	39
5.3.2.3 Stanovení mrazuvzdornosti .....	39
5.3.2.4 Hloubka průsaku tlakovou vodou.....	40
5.4 Návrh složení betonu .....	40
5.4.1 Vstupní suroviny .....	41
5.4.2 Výroba betonů .....	43
5.4.3 Výsledky zkoušek čerstvého betonu .....	43
5.4.4 Výsledky zkoušek ztvrdlého betonu .....	45
6 Diskuse výsledků.....	49
7 Závěr.....	53
8 Zdroje .....	55
9 Seznam obrázků.....	58
10 Seznam tabulek.....	59
11 Seznam grafů .....	60

# 1 Úvod

Prefabrikace betonových stavebních dílců je specifická oblast stavební výroby, která po mnoho let zajišťuje tradiční či specifické výrobky, které nelze nebo je neekonomické vyrobit staveništní monolitickou technologií.

Urychlování tvrdnutí betonu se v moderním stavitelství využívá velmi často. Jedná se o záměrné zvyšování počátečních pevností betonu ve srovnání s přirozeným nárůstem pevností při normovém zrání ( $20 \pm 2$  °C). Dnešní urychlená doba vede ke zkracování technologicky nutné doby potřebné k vyvržení betonu, ať už se jedná o prefabrikovanou výrobu dílců, anebo například o výstavbu silnic. Obecně je možné říci, že urychlování tvrdnutí betonu se používá nejčastěji za účelem zvyšování produkce prefabrikované výroby zrychlenou obrátkovostí forem a pro betonáže za nepříznivě nízkých venkovních teplot nebo při různých sanačních pracích, či opravách betonových konstrukcí. Tato technologie zrychlené výroby a výstavby se opírá o ekonomickou výhodnost a efektivitu. Důležité je upozornění na možné snížení dlouhodobých pevností a trvanlivosti ztvrdlého betonu. V praxi se urychluje mnoha způsoby, ale v zásadě se jedná buď o urychlování pomocí zvýšených teplot nebo pomocí chemických přísad [1][2][3][4].

## 2 Cíl práce

Cílem teoretické části bakalářské práce je zpracování používaných způsobů urychlování tvrdnutí betonu. Dále má práce teoreticky popsat vliv urychlovacích přísad na hydrataci, vlastnosti a mikrostrukturu betonů.

Cílem experimentální části práce je posouzení a porovnání účinků urychlovacích přísad na klíčové vlastnosti betonů, jako jsou například zpracovatelnost, pevnost v různém stáří betonu a trvanlivost. Výstupem experimentální části bude návrh modifikované receptury s požadovanými fyzikálně–mechanickými vlastnostmi a zefektivnění ruční výroby betonových dílců. Dále se vlivem sjednocení návrhu směsí betonů očekává dosažení konstantních výsledků při opakované výrobě, rovněž lze čekat finanční úsporu. Na navržených betonech budou provedeny zkoušky na čerstvém i ztvrdlém betonu, dojde k okomentování výsledků a porovnání receptur.

## 3 Urychlování tuhnutí a tvrdnutí betonu

Procesy tuhnutí a tvrdnutí betonu je nutné rozlišovat, protože se jedná o zcela dva odlišné jevy. Proces tuhnutí zajišťuje přechod čerstvého betonu do zatuhlého, což je doprovázeno ztrátou zpracovatelnosti, zatímco proces tvrdnutí doprovází nárůst pevnosti betonu [1][2].

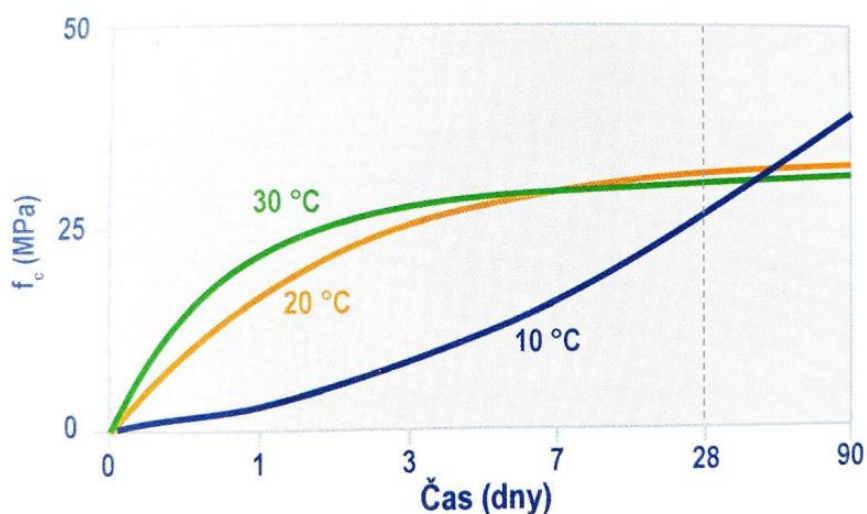
### 3.1 Urychlení tvrdnutí betonu pomocí zvýšených teplot

Technologie urychlování tvrdnutí betonu pomocí tepla si klade za cíl dosáhnout v co nejkratším čase potřebné manipulační pevnosti se spotřebováním minimálního množství tepelné energie [4][5].

Jednou z možností urychlování tvrdnutí betonu je pomocí zvýšených teplot. Tento typ urychlování je způsobován teplotami, které jsou vyšší než 30 °C. Vyšší teploty se používají zejména při výrobě prefabrikovaných dílců a betonového zboží [4][5].

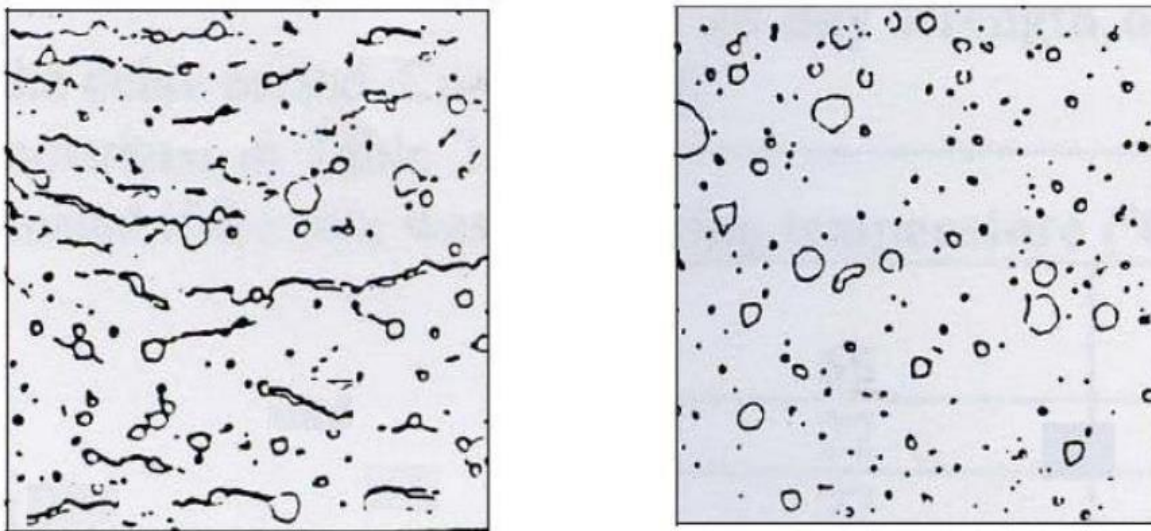
Jako většina chemických reakcí je i hydratace cementu závislá na teplotě. Mimo hydrataci ovlivňuje zvýšená teplota i výslednou strukturu pórů v cementovém kameni. Vzduch a voda se vlivem zvyšující se teploty odlišně objemově roztahují, a tak mohou vlivem různých napětí vznikat trhliny. Proces ohřívání a zchlazování je doprovázen objemovými změnami, které při různých součinitelích délkové teplotní roztažnosti jednotlivých složek betonu mají přímý vliv na výsledné pevnosti a trvanlivost betonu. Při nedodržení zásad a nekontrolování teplot během celého procesu se pokles výsledných hodnot pevností projeví více na pevnosti v tahu než v tlaku, přičemž jejich přibližný poměr může stoupnout z 1:10 až na 1:20. Tento pokles je způsoben pouze povrchovou hydratací cementových zrn, nikoliv hydratací hloubkovou [4][5].

Na obrázku 1 je znázorněn nárůst tlakové pevnosti betonu v čase v závislosti na teplotě zrání. Z obrázku si lze povšimnout, že prvních sedm dní platí, že vedle zvyšujícího se zrání teplotou roste i pevnost v tlaku. U normové dvacetiosmidenní pevnosti lze vidět, že se od sebe pevnosti zásadně neliší, naopak při stáří 90 dnů platí: čím vyšší teplota, tím je pevnost betonu v tlaku nižší [4][5].



Obrázek 1 Vliv teploty zrání na vývoj tlakové pevnosti betonu v čase

Dalším důležitým kritériem před zahájením zvyšování teploty je doba odležení. Při správně zvolené době odležení beton získá potřebnou pevnost mikrostruktury, která zamezí roztažnosti vzduchu a vody v kapilárách, a tím předejde vzniku poruchových trhlin. Tuto problematiku popisuje obrázek 2, na kterém jsou patrné strukturální změny betonu při krátkém a dostatečném odležení. Odležení je možné vynechat pouze při tzv. rychloohřevu, kde se výrazně zkracuje doba proteplovacího cyklu [6].

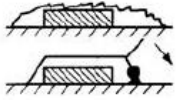
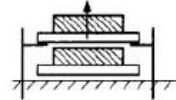
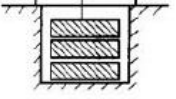
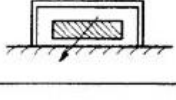
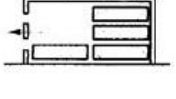
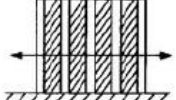


Obrázek 2 Vliv délky odležení betonové směsi na strukturu mikrotrhlin v proteplovaném betonu. vlevo krátké odležení–vznik mikrotrhlin, vpravo dostatečné odležení–struktura není poškozená

Technologie proteplování rozlišuje dva technologické způsoby urychlování tvrdnutí betonu, které se odlišují tím, kde působí teplotní médium. Jedná se o urychlování:

- **Přímé:** vodní pára nebo horký vzduch působí přímo na povrch betonu
- **Nepřímé:** ohřev betonu probíhá přes stěny formy, kde teplotním médiem je horká voda nebo pára

Příklady technologických zařízení pro urychlování tvrdnutí betonu za zvýšených teplot jsou znázorněné na obrázku 3 [7].

Zařízení	Použití	Spotřeba páry [kg.m <sup>-3</sup> ]	Schéma	Poznámka
plachta poklop	provizorní řešení, dílce vyráběné na místě	600–900 450–700		použitelné jen na stavbách, nelze užit v uzavřených prostorách, odklopné nebo přenosné poklapy
stoh	plošné dílce	150–250		malá potřeba plochy, využívají se pro nepřímý ohřev
jáma	plošné a tyčové dílce	150–350		uspořádání pod nebo na úrovni haly, dílce se přemisťují jeřábem
tunel	různé dílce vyráběné kontinuálně	200–400		dílce se nepřetržitě posunují v tunelu, strop kanálu je využitelný jako výrobní plocha
komora	různé dílce	200–400		je vhodná pro menší dílce, vyvážka i navážka vozíky, nebo je v komoře umístěno posouvací zařízení na etážové rovnání dílců s podložkami
sdužené prohřívané formy	lze použít pro tyčové, plošné i prostorové dílce – nepřímý ohřev	150–250		využívané univerzálně pro nepřímý ohřev v různých bateriových formách

Obrázek 3 Přehled typů proteplovacích zařízení

### 3.1.1 Proteplování betonu

Proteplování betonu se široce využívá v případě prefabrikovaných betonových prvků. Jedná se o druh ošetřování, při kterém se čerstvý beton záměrně zahřívá s cílem urychlit hydratační reakci cementu, a tím i proces tuhnutí a tvrdnutí betonu [7].

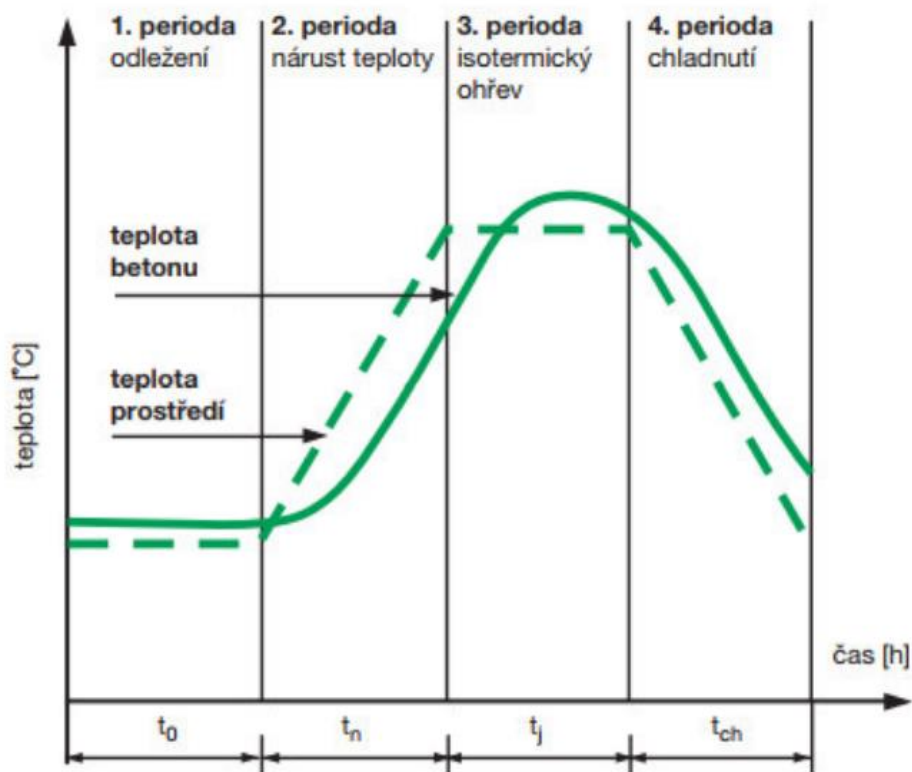
Proteplování umožňuje výrobcům rychlé dodávky prefabrikovaných prvků, rychlé vnášení předpětí do předpínaných výrobků, rychlý obrat forem a minimalizaci skladovacích prostorů. Ošetřování betonu má také vliv na smršťování a dotvarování [7][8].

Jedním z negativních vlivů použití proteplování může být opožděná tvorba ettringitu, což je ve skutečnosti typ síranové koroze. K tomuto jevu dochází reakcí síranů a monosulfátů, při které vzniká ettringit, který má větší objem, než mají reaktanty, což může vést k negativním projevům na betonu [1].

Tato technologie se řídí stanoveným režimem proteplování, který je znázorněn na obrázku 4, což je vyzkoušená a předepsaná závislost regulované teploty betonu a rozděluje se do čtyř period definovaných teplotou  $T$  [°C] a dobou  $t$  [hod]. Je závislá na čase, teplotě, vlhkosti a přestupu tepla z prostředí do betonu. Tepelné medium se volí podle technologického zařízení [8].

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

1. perioda–odležení po dobu  $t_0$  s teplotou  $T_0$
2. perioda–nárůst teploty v době  $t_n$  z teploty  $T_0$  na teplotu  $T_j$
3. perioda–izotermický ohřev při teplotě  $T_j$  po dobu  $t_j$
4. perioda–chladnutí po dobu  $t_{ch}$  z teploty  $T_j$  na teplotu  $T_{ch}$ , případně  $T_0$



Obrázek 4 Režim proteplování betonu

Tento doporučený režim proteplování platí pro všechny betony umístěné mimo suché prostředí a zde jsou uvedeny jeho zásadní pravidla:

- fáze odležení betonu by měla trvat alespoň 2 hodiny
- do 3 hodin od zamíchání nesmí teplota překročit 30 °C
- do 4 hodin od zamíchání nesmí teplota překročit 40 °C
- max. teplota ohřevu nesmí překročit 60 °C
- dovolený pokles teploty při chladnutí je max. 10 °C za hodinu

V současnosti se od proteplování betonu upouští a urychlování je řešeno pomocí urychlujících přísad, použití cementů vyšších pevnostních tříd a cementů Rapid (R), a to z důvodu finanční náročnosti technologie a stále se zvyšujícím cenám energií [1][7][8].

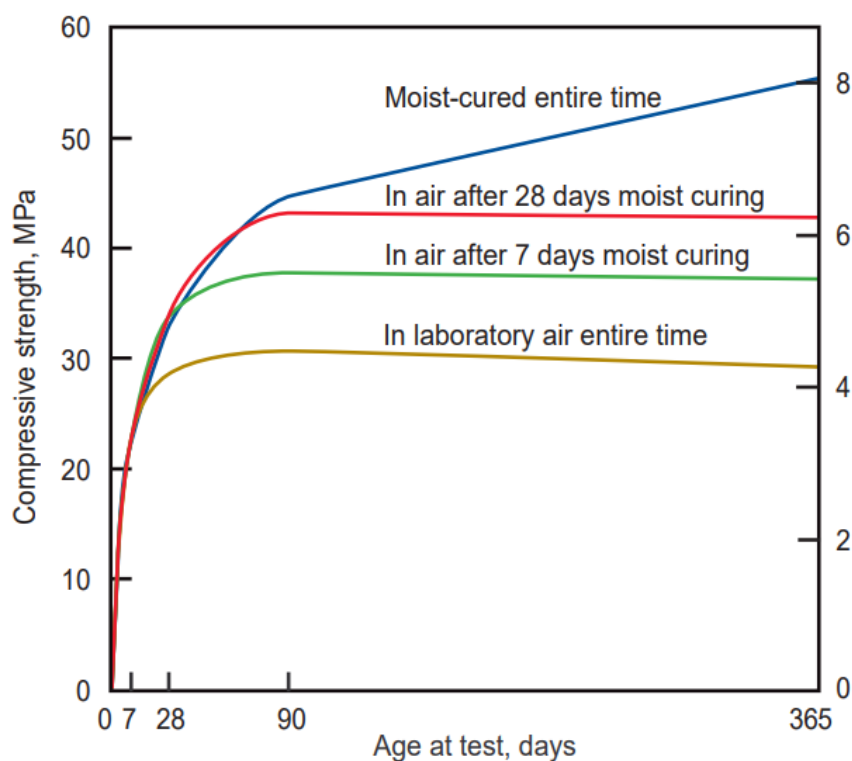
### 3.1.2 Propařování betonu

Další metodou urychlování tvrdnutí betonu pomocí zvýšených teplot je propařování za zvýšeného nebo běžného tlaku. Propařování obvykle probíhá ve speciálním prostoru k tomu určenému pod plachtou nebo folií, jak je znázorněno na obrázku 5, přičemž se začíná propařovat až po dosažení počátku tuhnutí. Při vhodném způsobu propařování dojde k významnému urychlení hydratace cementu. Dále má také velký vliv na pucolánové reakce, které v propařovaném betonu mohou probíhat snadněji a ve větší míře. Mimo urychlení hydratačních reakcí má tato technologie také pozitivní vliv na redukci smršťování a dotvarování [9][10][11].



Obrázek 5 Propařování betonu pod folií

Teplota propařování se udržuje kolem 60 °C do doby, než beton dosáhne požadovaných pevností. Užití vyšších teplot je neekonomické a může vést k poškození betonu opožděnou tvorbou ettringitu [9][10][11].



Obrázek 6 Vliv doby vlhkého propařování na vývoj pevnosti betonu v čase

### 3.2 Chemické urychlovací přísady tuhnutí a tvrdnutí

Chemické urychlovací přísady jsou látky, které se přidávají do čerstvého betonu za účelem zlepšení vlastností betonu v čerstvém nebo ztvrdlém stavu. Mimo urychlovací přísady lze mezi přísady zařadit například i přísady plastifikační, které umožňují snížit množství záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu anebo provzdušňovací přísady, které mají pozitivní dopad na odolnost betonu vůči střídavému zmrazování a rozmrazování. Většinou se jedná o kapalné nebo práškové látky, které se rozdělují do skupin na urychlovací přísady tuhnutí a urychlovací přísady tvrdnutí betonu, přičemž některé z nich působí na oba zmíněné procesy [4].

Urychlovací přísady tuhnutí zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do tuhého stavu. Tyto přísady mají uplatnění zejména u stříkaných betonů. Zrychlují hydrataci  $C_3Al$  (trikalciumaluminátu), při které se vyprodukuje značné množství tepla, což vede k urychlení hydratace  $C_2S$  (dikalciumsilikátu) a tím ke zvýšení počátečních pevností. Většinou se jedná o látky uhličitanů, hlinitanů, hydroxidů a křemičitanů alkalických kovů [13].

Urychlovací přísady tvrdnutí mohou kromě tvrdnutí ovlivňovat i dobu tuhnutí a jsou to látky, které zapříčiňují rychlejší náběh počátečních pevností betonové směsi. Do této skupiny se řadí látky rozpustných halogenidů, dusitanů a dusičnanů, mravenčanů, thiosíranů nebo thiokyanatanů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Tyto látky zrychlují hydrataci  $C_3S$  (trikalciumsilikátu), která vede k vývinu hydratačního tepla a vytvoření C–S–H gelu v počáteční fázi hydratace. V praxi se používají zejména při betonáži za nízkých teplot nebo k urychlení možnosti odbednění konstrukce [13].

Jejich účinnost je podmíněna několika faktory. Prvním z faktorů je použitý cement. Nejvyšších účinností bývá dosaženo při použití portlandských cementů CEM I, které obsahují nejvíce  $C_3A$  (trikalciumaluminátu). U portlandských směsných cementů je jejich účinek zpravidla nižší. Dalším podstatným faktorem je dávkování urychlovací přísady. Nejzásadnějším faktorem je druh aniontu a druh doprovodného kationtu. Kombinací a prověřováním některých aniontů a kationtů v rámci této skupiny byly zjištěny jejich urychlující účinky. V sestupném pořadí podle účinku by se daly seřadit následovně [13][15]:

**Kationty:**  $Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+} > Li^+ > K^+ > Na^+ \approx Cs^+ > Rb^+$

**Anionty:**  $Cl^- \approx Br^- > SCN^- > I^- > NO_3^- > ClO_4^-$

Rozmezí dávkování je stanoveno výrobcem a jejich nedodržení je spojeno s riziky ovlivnění vlastností betonu. Dávka na spodním prahu doporučeného dávkování nemusí mít téměř žádný účinek, naopak překročení nejvyšší přípustné dávky urychlovací přísady může mít negativní dopad na vlastnosti ztvrdlého betonu [4][12][13][14][15][16].

### 3.2.1 Chloridové urychlovací přísady

Chloridové urychlovací přísady, zejména chlorid vápenatý, patří mezi nejstarší přísady do betonu a jeho použití bylo zaznamenáno již v roce 1866. Je velice dostupný, vysoce účinný a levný, působí jako urychlovací přísada tvrdnutí a zároveň zkracuje počátek doby tuhnutí. Hlavní nevýhodou chloridových urychlovacích přísad je jejich korozivní účinek. Z tohoto důvodu se mohou používat pouze v prostém betonu, přičemž použití v železobetonu je zakázané. Wang a kolektiv navrhnul urychlovací přísadu na bázi chloridu lithného, hydroxidu hlinitého a některých dalších alkalických chloridů, které mají údajně

vyšší účinnost než chlorid vápenatý. Jeho nevýhodou je vysoká cena a velké množství alkálií, které vnáší do betonu a zvyšující riziko vzniku alkalicko–křemičité reakce, která vede k destrukci betonu. Chlorid vápenatý jako jediná vyspělá chloridová urychlovací přísada na trhu se v praxi dává v rozmezí 1–2 % z hmotnosti cementu [13][14][15][16].

### 3.2.2 Dusičnany

Ramachandran zjistil, že dusičnan vápenatý ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) zkracuje dobu tuhnutí již při malém množství, ale nevykazuje žádný vliv na náběh počátečních pevností. Aby fungoval jako urychlovací přísada tvrdnutí, musí se kombinovat s dalšími chemikáliemi, například s trietanolaminem nebo thiokyanátem sodným. Tyto látky lze použít i v železobetonu a do jisté míry mohou fungovat jako nemrznoucí přísady do betonů a malt. Mezi nechloridovými urychlovacími přísadami je dusičnan vápenatý nejpoužívanější urychlovací látkou [14][15].

### 3.2.3 Dusitany

Jejich základní složkou je dusitan vápenný  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ . Účinnost je téměř srovnatelná s chloridem vápenatým. Používají se jako nemrznoucí přípravky a inhibitory koroze. Jsou považovány za nejlepší urychlovací přísady tuhnutí betonu, jejich použitelnost je však omezená, z důvodu jejich toxicity a negativního dopadu na životní prostředí [13][14][15].

### 3.2.4 Thiokyanatany

Na rozdíl od dusitanů a dusičnanů thiokyanatany působí na vývoj počátečních pevností betonu a často se kombinují s dříve zmíněnými dusičnany k urychlení tuhnutí. Hlavní složkou těchto přísad je thiokyanatan sodný, vápenatý nebo draselný. Justnes zjistil, že směs thiokyanatanu sodného s dusičnanem vápenatým může eliminovat retardační účinky lignosulfonátů a poskytnout jednodenní pevnosti jako u vzorků s přídatkem chloridu vápenatého. Jedná se o látky, které jsou klasifikovány jako zdraví škodlivé a jejich použití je omezené. Další nevýhodou je vysoký obsah alkálií, což může vést k alkalicko–křemičité reakci a následné degradaci betonu. Stejně jako chloridové urychlovací přísady působí na ocelovou výztuž velmi korozivně, a proto je jejich oblast použití shodná s přísadami na bázi chloridů [13][15][16].

### 3.2.5 Alkalické uhličitany

Uhličitan sodný ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a uhličitan draselný ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) jsou zástupci této skupiny. Tyto uhličitany velmi rychle podněcují tuhnutí trikalciumaluminátu a jsou vhodné hlavně do stříkaných betonů. Jejich uplatnění je ve všech oblastech, kde je požadované velmi rychlé ztuhnutí a ztvrdnutí betonu. Jejich rychle tuhnoucí vlastnosti lze eliminovat přidáním retardéru [15][16].

### 3.2.6 Soli karboxylových kyselin

Nejběžnější urychlovací přísadou z této skupiny je mravenčan vápenatý  $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ . Největším problémem při použití této látky je její nízká rozpustnost ve vodě (16g/100g vody při pokojové teplotě) a její komerční dostupnost pouze v práškové podobě, což může generovat problémy s dávkováním. Tato přísada funguje jako prostředek proti mrazu, který umožňuje práci s betonem až do teploty  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ . Při srovnání mravenčanu vápenatého s chloridem vápenatým bylo zjištěno, že při použití mravenčanu vzniká více doprovodného ettringitu, což může mít za následek vyšší počáteční pevnosti betonů [14][17].

### 3.2.7 Křemičitany

Typickým zástupcem je roztok křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), známý jako vodní sklo. Je to klasická urychlovací přísada pro stříkaný beton, který má na trhu významné zastoupení. Při jeho použití dochází k negativnímu ovlivnění struktury betonu a snížení konečných pevností. Navíc vnáší do betonu velké množství alkálií, což může vést k alkalicko–křemičité reakci a degradaci betonu [14].

### 3.2.8 Hlinitany

Urychlovací přísady na hlinitanové bázi se rozlišují na hlinitan sodný a draselný. Obě látky se používají v práškové i kapalně formě především u stříkaných betonů. Hlinitany urychlují reakci alitu se sádrovcem a tím brzdí vývoj ettringitu, což vyvolává okamžitou reakci trikalciumaluminátu, která je u stříkaných betonů žádoucí. Opět jsou tyto látky vysoce alkalické a hrozí alkalicko–křemičitá reakce [14].

### **3.2.9 Sírany**

Jejich základní složkou je síran hlinitý. Používají se v kombinaci s dalšími urychlujícími látkami, jako nealkalická přísada výhradně do stříkaných betonů [14].

### **3.2.10 Alkanolaminy**

Jsou organické chemické látky, které mohou zkracovat dobu tuhnutí a mohou mít pozitivní vliv na počáteční pevnosti betonu, nicméně dlouhodobé pevnosti snižují. Jejich použití je primárně v cementářství, kde se používají jako pomocné složky při energeticky náročném mletí. Mezi nejčastější alkanolaminy patří triethanolamin (TEA), triisopropanolamin (TIPA) nebo diethanolisopropanolamin (DEIPA). Aggoun zjistil, že směs kombinace aminů s dusičnanem vápenatým příznivě ovlivňuje dobu tuhnutí a tvrdnutí běžného betonu [15][18][19].

### **3.2.11 Krystalizační přísady**

Tuto technologii vyvinula a patentovala společnost BASF, která se zabývá moderními urychlovacími přísadami tvrdnutí betonu a je založená na použití synteticky vyrobených krystalů C–S–H. Díky přísadě X–SEED je nyní možné rozpustit syntetické krystaly C–S–H a použít je jako nukleační materiál v roztoku mezi cementovými zrny. Výrobce uvádí, že ztvrdlá směs s přísadou X–SEED nevykazuje žádné mikrostrukturální změny v porovnání s běžně zhydratovaným betonem [20][21].

Další výhodou je možnost použití přísady s cementy, které mají nižší obsah slínku. Oproti proteplovaným betonům mají betony s přísadou X–SEED vyšší kvalitu a trvanlivost [20][21].

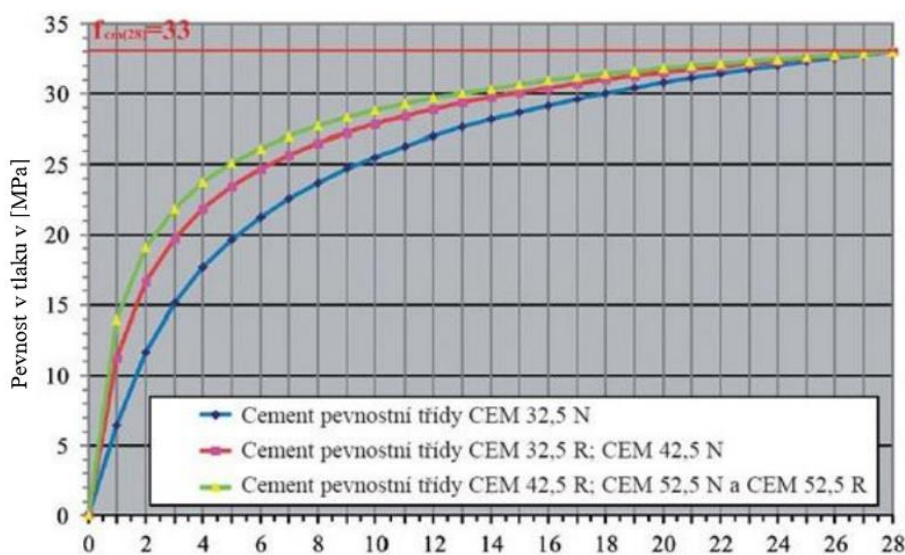
V krystalizačních přísadách je velký potenciál, nicméně existuje celá řada odpůrců, kteří ve svých studiích účinky této přísady významně snižují nebo úplně vyvracejí a své argumenty podporují vysokou ekonomickou náročností a díky tomu preferují jiné metody [20][21].

## **3.3 Další metody urychlování tvrdnutí betonu**

Rychlost tvrdnutí betonu lze v praxi ovlivnit i jednoduchými a známými postupy, které lze účinně aplikovat spolu s výše uvedenými metodami. Nejzásadnějším faktorem je výběr druhu cementu. Rychlost hydratační reakce je závislá na měrném povrchu cementu, přičemž

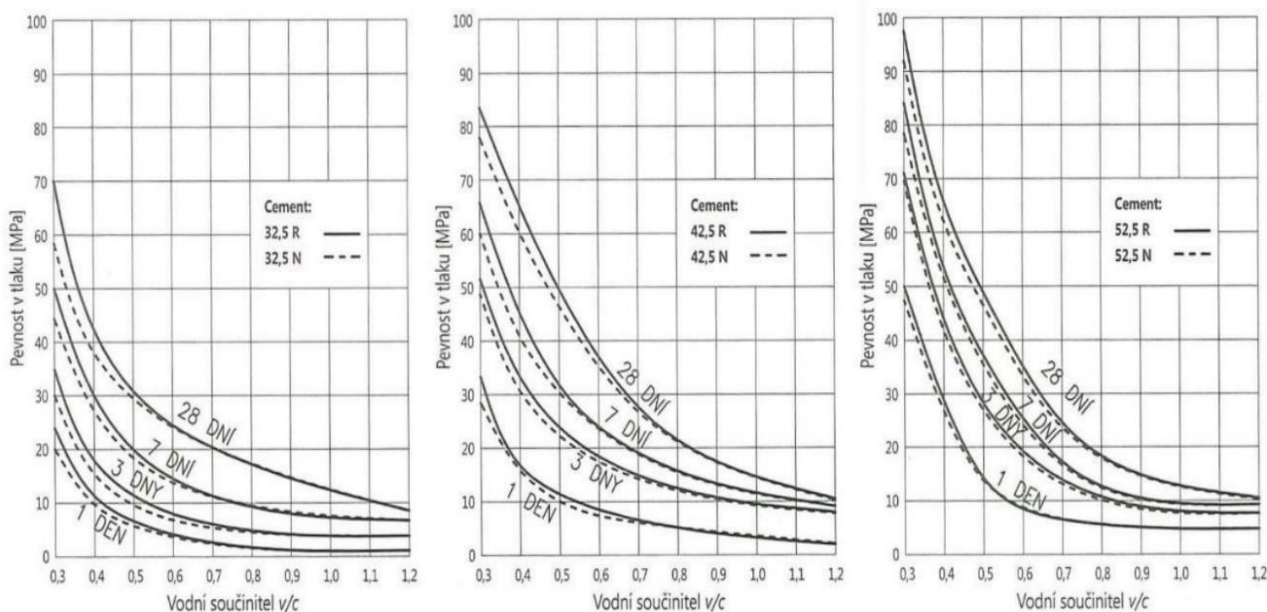
při větším měrném povrchu je cement reaktivnější a nárůst pevností rychlejší. Tento fakt lze ovlivnit výběrem cementu co nejvyšší pevnostní třídy, aktivačním mletím cementové suspenze, kde dochází ve speciálních míchačkách za velmi vysokých otáček k mechanickému otírání cementových zrn a zvětšování jejich měrného povrchu, nebo revibrací ztuhlého betonu [4][7].

U cementů se také sleduje jejich druh, protože portlandský cement má rychlejší náběh pevností než například cement směsný. V neposlední řadě je vhodné použít cement s označením Rapid, což znamená rychlý náběh počátečních pevností. Následující obrázek číslo 7 demonstruje, jakou roli hraje výběr druhu cementu na vývin pevností betonu v prvních 28 dnech stáří betonu [4][22].



Obrázek 7 Vliv použitého cementu na vývoj pevností betonu

Dále urychlení tvrdnutí betonu lze ovlivnit izolováním forem či návrhem složení betonu, a to zejména nízkým vodním součinitelem. Beton s nižším vodním součinitelem nabývá na pevnostech rychleji než beton s vyšším vodním součinitelem. Tímto faktem argumentují technologové při doporučení užívání plastifikačních přísad, díky kterým lze vodní součinitel úspěšně snižovat při zachování stejné zpracovatelnosti celé směsi. Důležitost vodního součinitele na náběh pevností při použití různých cementů shrnuje obrázek 8 [8][22].

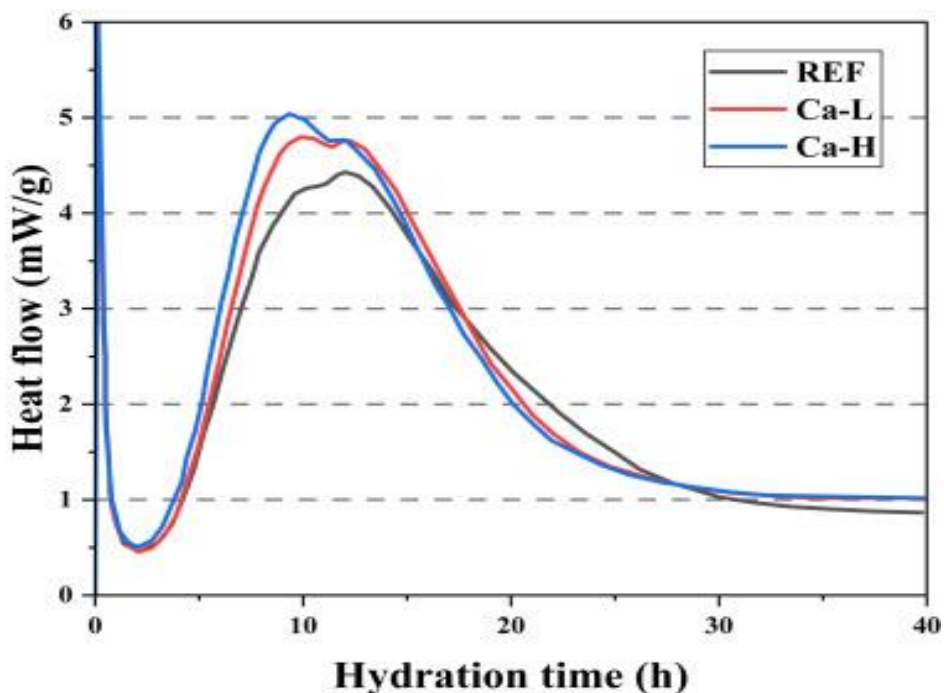


Obrázek 8 Vliv vodního součinitele na pevnost betonu v tlaku v různém stáří betonu při použití různých druhů cementů

## 4 Vliv urychlujících přísad na hydrataci, mikrostrukturu a vlastnosti betonů

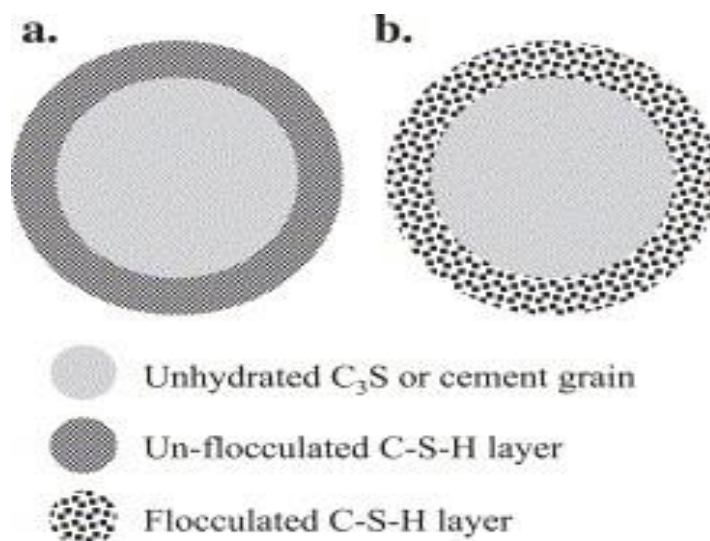
### 4.1 Vliv chloridových urychlovacích přísad na hydrataci cementu

Skupina pod vedením Henga Chena provedla rozsáhlou termodynamickou studii pomocí izotermické kalorimetrie zaměřené na studium cementů s urychlovacími přísadami, a to zejména chloridem vápenatým, jakožto typickým zástupcem chloridových akceleratorů. Chloridová urychlovací přísada výrazně zkracuje počátek hydratace  $C_3S$  a také maximální tepelný tok hydratace cementové pasty. Závěrem z měření bylo zjištění, že chlorid vápenatý skutečně podporuje hydrataci cementu, jak je znázorněno na obrázku 9. Důvodem urychlení reakce je vyšší rychlost rozpouštění  $C_3S$ . Dále dokázali, že rychlost rozpouštění  $C_3S$  se zvyšuje s vyšší koncentrací vápníku, což znamená, že jeho koncentrace by mohla být klíčovým faktorem urychlujícího účinku anorganických urychlujících přísad. Kromě jeho urychlujícího účinku na portlandský slínek bylo dokázáno, že urychluje hydrataci strusky v portlandských směsných cementech [24][25].



Obrázek 9 Vývoj tepla portlandského cementu s přidavkem chloridu vápenatého

Ve studii M.C.G. Juengera bylo zjištěno pomocí rentgenové transmisní mikroskopie, že  $\text{CaCl}_2$  má schopnost ovlivňovat flokulaci hydrofilních koloidních částic jako jsou C-S-H gely. Struktura cementu s přidavkem  $\text{CaCl}_2$  má nehomogenní a otevřenější mikrostrukturu s nižší hustotou a zvětšeným středním průměrem pórů, které umožňují snadnější difúzi vody přes C-S-H vrstvu a rychlejší hydrataci  $\text{C}_3\text{S}$  [25][26].



Obrázek 10 Účinky chloridu vápenatého na flokulaci cementového zrna

## 4.2 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na hydrataci cementu

Dusitany a dusičnany ovlivňují mechanismus tuhnutí podobně jako chloridy. Tyto urychlovací přísady zvyšují koncentraci vápníku, která spouští krystalizaci hydroxidu vápenatého a tím urychluje hydrataci  $C_3S$ . Svoji přítomností v cementové pastě zvyšuje rychlost a zkracuje dobu do maximálního tepelného toku [25].

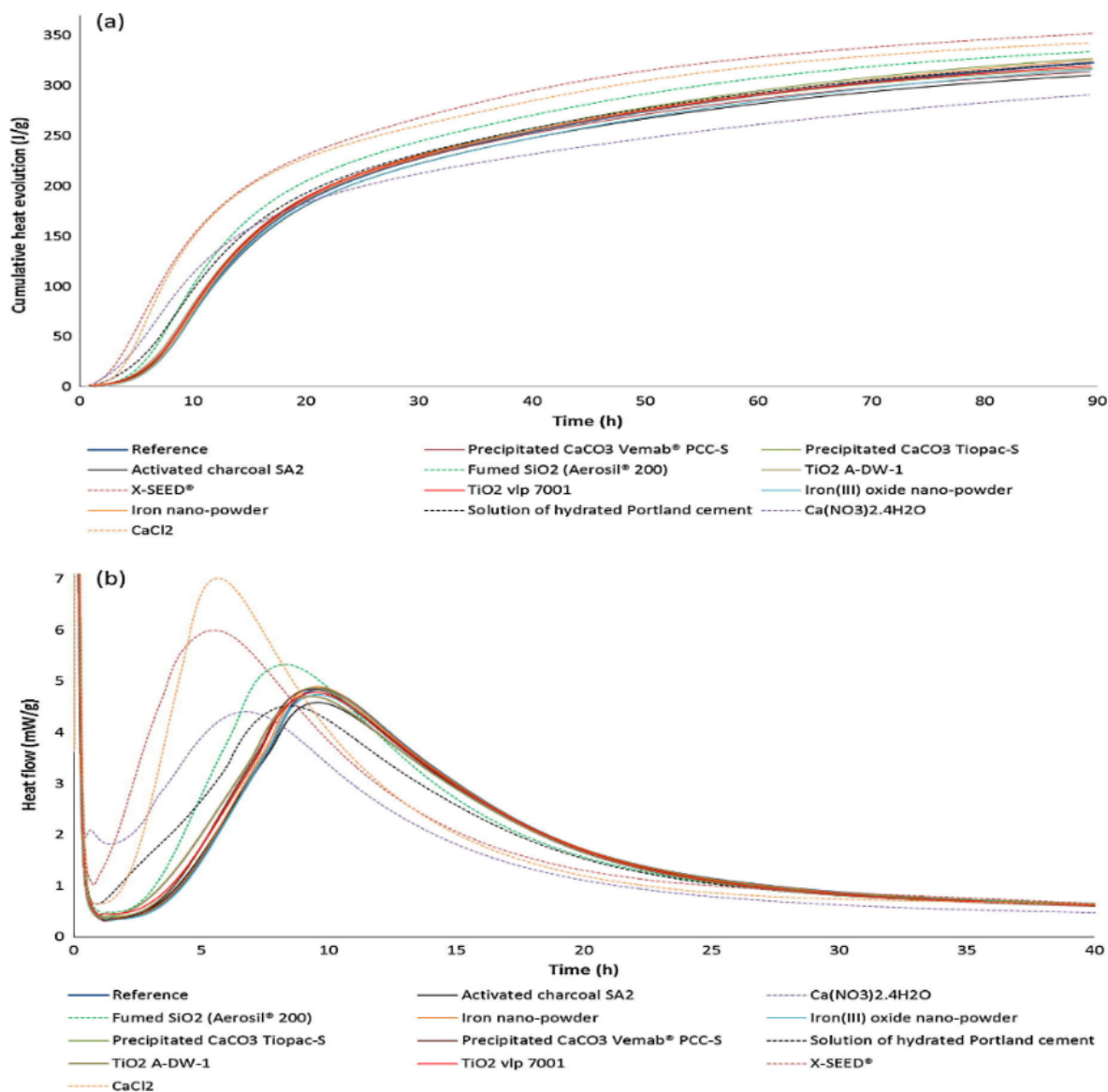
Thiokyanatany na rozdíl od dusitanů a dusičnanů ovlivňují pouze proces tvrdnutí. Ve srovnání s chloridy a dusitany nebo dusičnany mohou podporovat větší množství vzniku hydroxidu vápenatého a tím hydrataci  $C_3S$  [25].

Mravenčan vápenatý stejně jako výše uvedené urychlovací přísady působí na hydrataci  $C_3S$  a urychluje tvorbu C–S–H. Jeho anionty  $HCOO^-$  oproti vápenatým iontům  $Ca^{2+}$  difundují mnohem snadněji do vrstev  $C_3S$ . Jeho urychlující účinek je při srovnání například s chloridovými urychlovacími přísadami nižší, což souvisí s velkou velikostí jednotlivých aniontů, které složitěji pronikají do hydratovaných vrstev  $C_3S$  [13][25][29].

Ramachandran zjistil, že alkanolaminová urychlovací přísada TEA, pokud je přidána v množství do 0,1 % z hmotnosti cementu, urychluje hydrataci  $C_3A$  a  $C_3S$ . Při větších dávkách může retardovat hydrataci  $C_3S$ , urychlovat tvorbu  $C_3A$  a ettringitu, což má za následek zhoršený vývoj pevností betonu [13].

Krystalizační přísady díky své malé velikosti jednotlivých částic zaplňují mikrostrukturu nanočásticemi, které mají významný urychlující účinek na tvorbu C–S–H gelu, což má za následek urychlení procesu hydratace. Nicoleau a kolektiv ve své studii uvádí, že 4% přídavek krystalizační přísady do betonu zrychlí ranou hydrataci cementu až o 80 %, přičemž hlavním důvodem je zde výrazné zvýšení reaktivity  $C_3S$  [27][28].

Následující obrázek popisuje provedenou studii zaměřenou na izotermickou kalorimetrii prováděnou P. Bostem a kol. za účelem srovnání jednotlivých průmyslových nebo laboratorně používaných urychlujících přísad a jejich dopad na rychlost hydratace cementu. Obrázek 11 část a) popisuje kumulativní naměřenou hodnotu tepla cementové pasty vždy s 1% přídavkem urychlovací přísady k hmotnosti cementu, přičemž nejvyšších hodnot dosáhla směs s přísadou X–SEED a  $CaCl_2$ . Část b) popisuje vývin tepla v závislosti na čase a opět nejlepšími výsledky bylo dosaženo s totožnými přísadami [27][30].



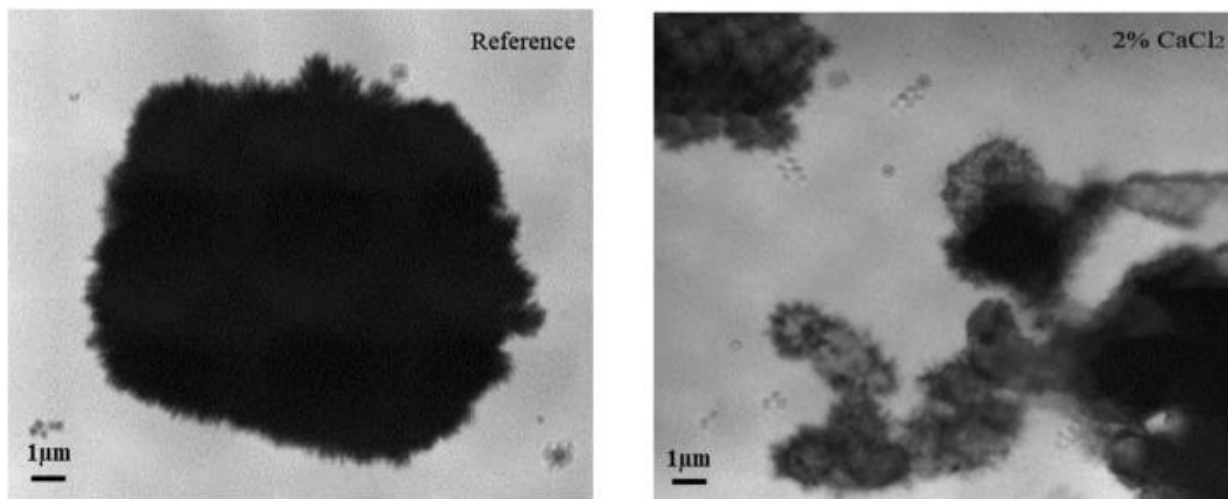
Obrázek 11 Vliv typu urychlující přísady na rychlost hydratace portlandského cementu

### 4.3 Vliv chloridových urychlovacích přísad na mikrostrukturu betonu

Chlorid vápenatý působí na pórovou strukturu betonu odlišně v závislosti na jeho poměrné dávce. Platí pravidlo, že se zvyšující se dávkou přísady roste pórovitost, kterou lze přičíst hustší síti hydratačních produktů. Naopak při přidání nižší dávky chloridu vápenatého pod 1 % se pórovitost betonu snižuje [13].

Gartner a kol. pozoroval pomocí rentgenové transmisní mikroskopie hydratační produkty na povrchu zrn  $C_3S$  s morfologií snopu pšenice a při porovnání referenčního vzorku se vzorkem s přidavkem 2 %  $CaCl_2$  zjistil, že chlorid vápenatý skutečně urychluje

tvorbu produktů C–S–H, tyto produkty však mají menší hustotu než u referenčního vzorku [13][13].



Obrázek 12 Mikroskopické snímky C<sub>3</sub>S past po dvou hodinách hydratace

#### 4.4 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na mikrostrukturu betonu

Pokud jde o dusičnany, chovají se dost podobně, jako chloridové přísady. V dávkách nižších, než je 1 % snižují pórovitost betonu a při vyšších dávkách dodávají směsi opačný efekt. Svoji přítomností mění vzhled portlanditu na velmi velké shluky z malých neorientovaných částí [31].

Thiokyanáty obecně snižují pórovitost betonu, přičemž beton s thiokyanátem sodným dosahuje nižší pórovitosti a v souvislosti s tím vyšší pevnosti v tlaku, i když oproti thiokyanátu draselnému produkuje nižší množství hydratačního tepla [32].

Vliv mravenčanu vápenatého na poréznost betonu studoval Heikal, který zjistil, že přídavek 0,5 % snižuje pórovitost pasty z portlandského cementu i dalších pucolánových cementových past. C–S–H po přidání malé dávky mravenčanu změnil vzhled z tyčinkovitého tvaru na malé kompaktní struktury [29].

TEA a TIPA v malých dávkách do 0,1 % zjemňují pórovou strukturu ztvrdlého betonu, a to díky zvýšenému stupni hydratace [13].

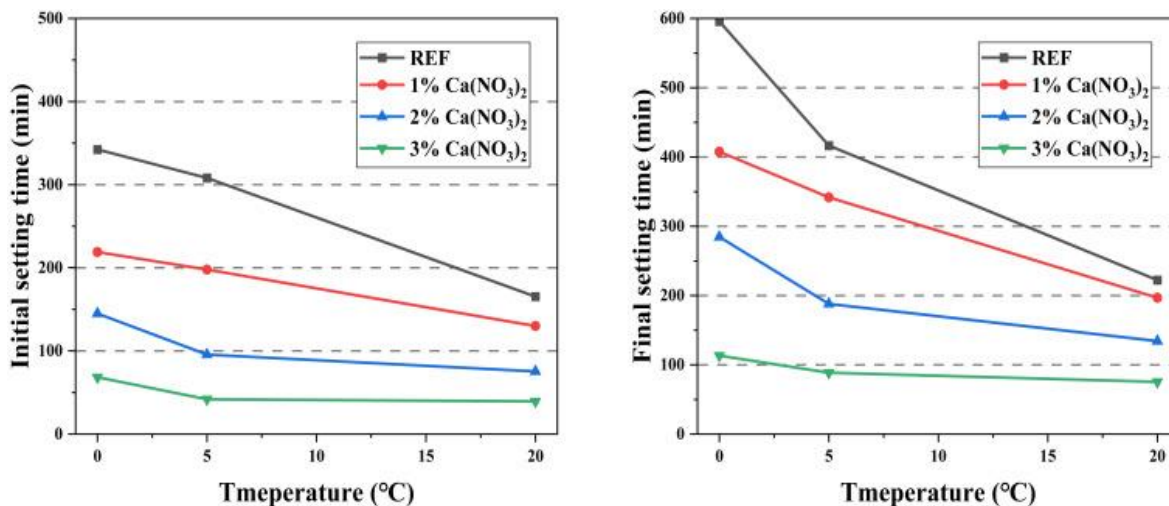
Krystalizační přísady X-SEED ovlivňují pórovou strukturu stejně jako přísada TIPA, přičemž její přidání má za následek větší zastoupení mikropórů ve struktuře betonu, které pozitivně ovlivňují trvanlivost betonu [27].

## **4.5 Vliv chloridových urychlovacích přísad na vlastnosti betonu**

Chloridové urychlující přísady podléhají obecné zásadě, že by akcelerátory neměly negativně ovlivňovat zpracovatelnost klasické betonové směsi. Bylo zjištěno, že chlorid vápenatý má mírné plastifikační účinky na klasický beton, což jinými slovy znamená, že snižuje potřebné množství záměsové vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti. Jak už bylo uvedeno výše,  $\text{CaCl}_2$  může velmi významně zkrátit počáteční i konečnou dobu tuhnutí, a navíc může působit proti retardačnímu účinku některých plastifikačních přísad. Všeobecně je známo, že chlorid vápenatý významně zvyšuje počáteční pevnosti betonu, ale neexistuje shoda na tom, zda zvyšuje i dlouhodobé pevnosti. Dále většina studií uvádí nelineární zvyšující se smrštění betonu při zvyšující se dávce chloridu vápenatého, což demonstruje důležitost sledování praktického dávkování pro optimalizaci rizika vzniku trhlin. Jejich největší nevýhodou je patrně nemožnost použití do železobetonu, kde svou přítomností podporují vznik koroze výztuže a tím výrazně zkracují jeho trvanlivost [13][25].

## **4.6 Vliv nechloridových urychlovacích přísad na vlastnosti betonu**

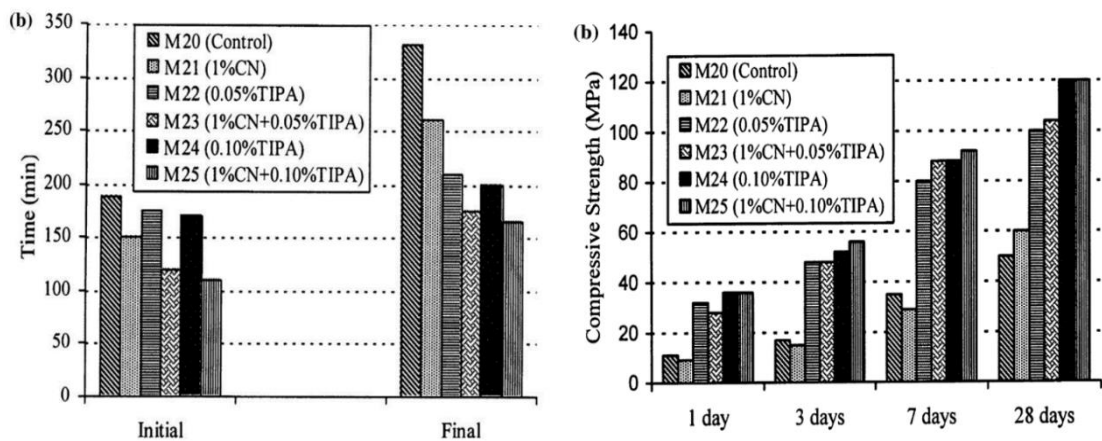
Obdobně jako chloridové přísady, tak i dusičnan vápenatý a nově vyvinutá urychlovací přísada obsahující TEA a X-SEED, mírně zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu, zatímco ostatní nechloridové urychlovací přísady mají opačný účinek. Z toho titulu je nutné urychlovací přísady vhodně kombinovat s plastifikačními přísadami. Dále bylo potvrzeno, že dusičnan vápenatý významně ovlivňuje počátek a konec tuhnutí portlandského cementu, a to zejména při nízkých teplotách. Vliv množství přidané urychlovací přísady na počáteční a konečné doby tuhnutí cementové pasty v závislosti na teplotě lze pozorovat na obrázku 13 [13].



Obrázek 13 Vliv množství přidávané urychlovací přísady na počáteční (vlevo) a konečné (vpravo) doby tuhnutí cementové pasty při různých teplotách

Ohledně vlivu nechloridových urychlovacích přísad na pevnost betonu v tlaku bylo provedeno několik studií, které se zabývaly vlivem nechloridových urychlovacích přísad na pevnost betonu v tlaku. V některých případech došlo ke zlepšení rané i dlouhodobé pevnosti a v jiných případech se projevily negativní účinky. Tyto rozdílnosti jsou ovlivněny různými faktory, jako jsou například typy urychlovacích přísad, jejich dávkování nebo typ použitého cementu [25].

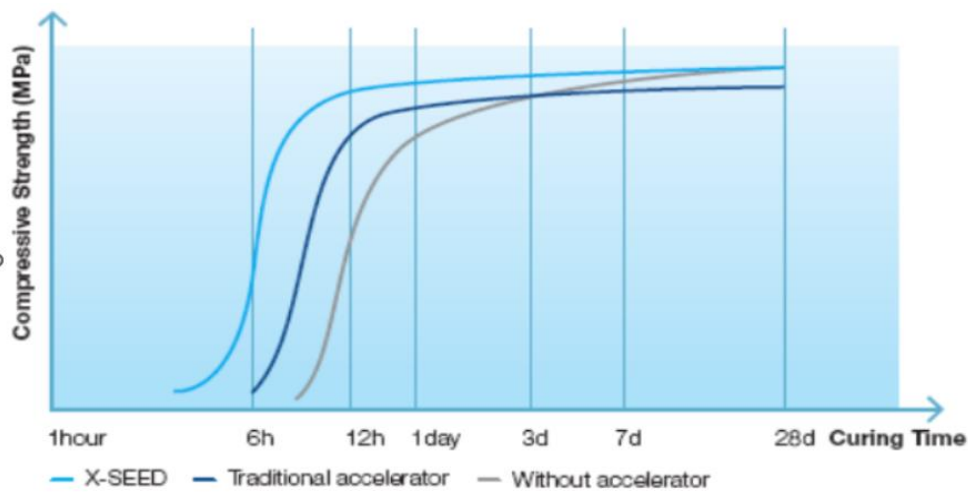
Výzkumem, který porovnával vliv přidávky vybraných urychlovacích přísad, včetně jejich kombinace, bylo zjištěno, že dusičnan vápenatý je dobrá urychlovací přísada tuhnutí, ale na vývoj pevností nemá významný vliv. Úplně opačně dopadla urychlovací přísada TIPa. Ta významně podpořila náběh pevností betonu ve všech sledovaných časech. Jak lze vypožorovat z obrázku 14, jako optimální řešení se jeví synergické použití obou látek, kde došlo jak k urychlení tuhnutí, tak i k významnému náběhu pevností betonu [25][33].



Obrázek 14 Vliv vybraných urychlovacích přísad na dobu tuhnutí a pevnosti v tlaku

Heikal, popisuje ve svých studiích, že mravenčan vápenatý v dávce 0,75 % z hmotnosti cementu zkracuje počátek a konečnou dobu tuhnutí portlandského cementu přibližně o 30 %. Dále uvádí při stejné dávce urychlovací přísady 90% nárůst 28 denní pevnosti v tlaku cementové pasty při srovnání s referenčním vzorkem. Toto tvrzení vyvrací Lota, z provedených experimentů přináší tvrzení, že mravenčan při určitých dávkách snižuje 28 denní pevnost. Později bylo zjištěno, že pevnost v tlaku je úzce spjatá s obsahem  $C_3A$  v použitém cementu [25][29].

Další výzkum sledoval vliv přísady X-SEED, kde bylo zjištěno, že největším přínosem této urychlující přísady je právě vliv na nárůst počátečních pevností betonu, a to při nízkých, běžných, a dokonce i zvýšených teplotách. Tento účinek přísady je porovnán s tradiční přísadou na obrázku 15 [20].



Obrázek 15 Vývoj pevností betonů v závislosti na čase (s krystalizační přísadou, s tradiční urychlovací přísadou, bez urychlovací přísady)

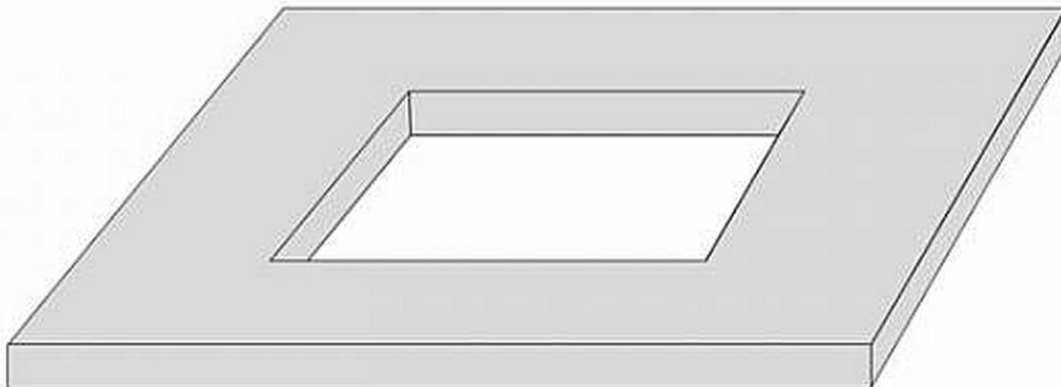
Zkoumání vlivu nechloridových urychlovacích přísad na trvanlivost a mrazuvzdornost betonu je dlouhodobým tématem a v souvislosti s tím je řešen několika výzkumnými studii. Ukázalo se, že nechloridové urychlovací přísady mohou mít na tyto vlastnosti různé účinky v závislosti na jejich konkrétním typu, přičemž je podstatné jejich dávkování. Obecně je známo, že dusičnan vápenatý významně zlepšuje mrazuvzdornost betonu, a to tak, že svým účinkem vytváří mnohem hutnější mikrostrukturu. Dále také dusičnan vápenatý působí jako jeden z nejúčinnějších inhibitorů koroze a často se přidává do nechloridových urychlovacích přísad jako ochrana před korozi ocelové výztuže. Zcela opačný účinek má thiokyanát sodný, který se považuje za korozivní látku, ale při nižších dávkách do 1 % je považován za bezpečný [13][25].

## 5 Experimentální část

V této kapitole je představen ručně vyráběný betonový výrobek, stávající technologie ruční výroby typizovaných betonových prvků, následné důvody a očekávání modifikace stávajícího složení betonu. Ze získaných teoretických poznatků vlivu urychlovacích přísad na klíčové vlastnosti betonových dílů bude modifikováno stávající složení betonu.

Betonový základový díl, je nezbytnou součástí při montáži urnových pomníků. Při montáži pomníku dojde k umístění betonového dílu do štěrkopískového lože. Po vyrovnání se do středového otvoru umístí betonová nebo plastová urnová schránka a následně se přistoupí k samotné montáži jednotlivých kamenných prvků. Tento způsob zakládání urnových pomníků má výhodu v jeho stabilitě, celistvosti a především efektivitě. Pomocí tohoto prefabrikovaného dílu lze provést kompletní montáž na jeden výjezd bez nutnosti technologické přestávky.

Půdorysný rozměr prefabrikovaného výrobku přesně kopíruje velikost kamenných komponentů, aby neznehodnocovala okolí pietního místa. Typická a nejčastější výrobní velikost je 1000 × 800 mm. Na obrázku číslo 16 je základový díl znázorněn.



Obrázek 16 Betonový základový díl

## 5.1 Stávající technologie výroby

Technologie výroby začíná u vstupních surovin. Na výrobní provozovnu v Opočně se dováží drobné těžené kamenivo frakce 0–4 mm z Lípy nad Orlicí a hrubé drcené kamenivo (amfibolit) frakce 4–8 mm z nedaleké lokality Mastý. Pro veškeré betonářské účely je využíván polský cement ze závodu Odra s označením CEM I 42,5 R. Tento cement je využíván zejména pro svoji dostupnost v lokalitě výroby oproti cementům z české výroby. Přísady a příměsi do betonu nejsou v současnosti používány.

Dalším metodickým krokem je odměřování surovin. Tato fáze probíhá archaickým způsobem pomocí lopaty a na základě zkušenosti pracovníka. Suroviny jsou postupně společně s vodou přidávány do míchačky v přibližném poměru cement : písek : štěrk (2 : 5 : 1). Voda se do míchačky přidává podle potřeby a požadované zpracovatelnosti.

K homogenizaci směsi se používá samospádová (gravitační) míchačka, která pro prefabrikovanou výrobu není příliš vhodná. Betony namíchané v těchto míchačkách nejsou dokonale zhomogenizované, prodlužuje se doba míchání oproti míchačkám s nuceným oběhem. Celková kvalita betonu vystupujícího z tohoto způsobu zpracování není dobrá [7].

Po namíchání betonu dojde k jeho převozu pomocí stavebního kolečka k vibračnímu stolu, kde jsou připraveny ocelové formy na ocelové podložní desce. Tato podložní deska se po vybetonování dílce pomocí vysokozdvíhného vozíku přesune do vertikálního stojanu, kde je s výrobkem uložena, než dojde k jeho odformování. Po uložení použité desky do stojanu

se vytáhne deska nová a betonáž může pokračovat. Na obrázcích číslo 17 a 18 je vidět standardně používaný vibrační stůl a vertikální úložný stojan.



Obrázek 17 Vertikální úložný stojan



Obrázek 18 Vibrační stůl

Samotné plnění formy probíhá až po důkladném nanesení separačního prostředku. Následně dojde k částečnému naplnění formy, krátkému zhutnění pomocí vertikální vibrace na vibračním stole, následnému uložení výztužných kari sítí, doplnění formy a finálnímu zhutnění a urovnání povrchu. Po vytvoření dílce dojde k jeho překrytí igelitovou folií nebo příležitostnému zkrápění vodou, aby nedocházelo k příliš rychlému odpařování vody z betonové směsi.

Následující pracovní den po betonáži dojde k odformování výrobku a očištění formy. Samotný výrobek zraje v dílně přibližně jeden týden a poté se převeze na venkovní sklad. Ze skladu si je poté odebírají montážní dělníci podle svých potřeb.

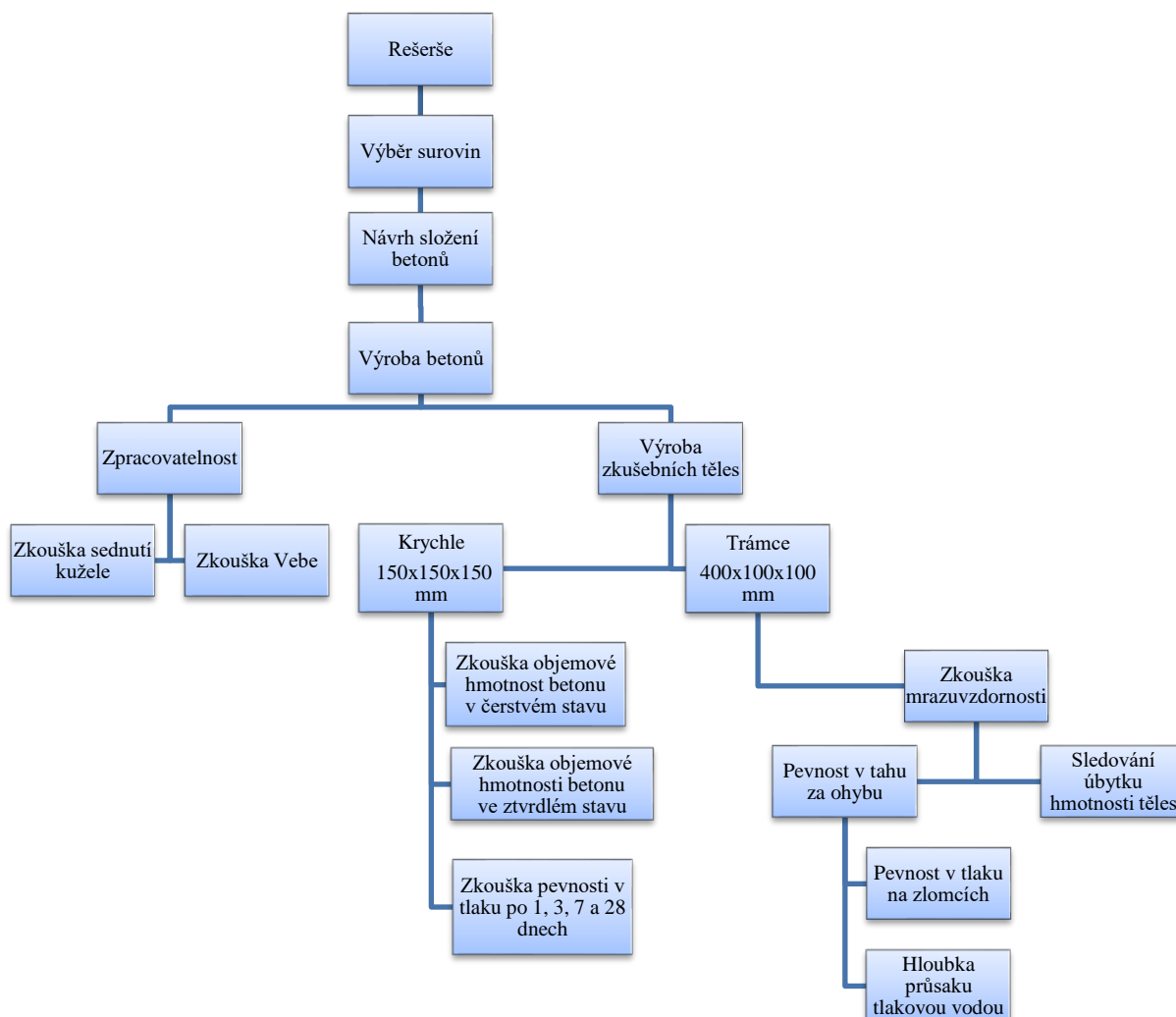
## **5.2 Modifikace stávající technologie a složení betonu**

Úpravou technologie a návrhem nové receptury se očekává zisk sjednoceného návrhu složení betonu, který bude vykazovat konstantní vlastnosti a zabezpečí vyšší výslednou kvalitu vyráběných prefabrikovaných dílců, dále se očekává efektivnější a rychlejší výroba vlivem vyšší obrátkovosti forem. Posledním očekávaným přínosem je snížení výrobní ceny betonu.

V prvé řadě bude nutné stávající vybavení rozšířit o váhu, kde bude možné navažovat přesné dávky jednotlivých vstupních surovin do betonové směsi. Další přínosnou a potřebnou změnou by byl nákup laboratorní míchačky s nuceným oběhem. Mezi její hlavní výhody patří zejména významně kratší doba míchání, která je potřebná k dosažení kvalitně zhomogenizovaného čerstvého betonu a k možnosti výroby většího objemu míchaného betonu.

## **5.3 Metodika návrhu experimentu**

Metodika experimentu byla rozvržena do jednotlivých chronologicky navazujících etap. Návrh složení betonů vycházel ze získaných teoretických poznatků a obvyklých zvyklostí. Dále byl sestaven plán zkoušek, kdy na základě získaných výsledků bude možné zkonstatovat jaké vlastnosti lze očekávat a zda navržené betony vyhoví stanoveným požadavkům.



Obrázek 19 Metodika řešení

### 5.3.1 Zkoušky čerstvého betonu

V této kapitole budou teoreticky popsány a vysvětleny zkoušky na čerstvém betonu, které byly provedeny v rámci této bakalářské práce.

#### 5.3.1.1 Zkouška sednutí kužele

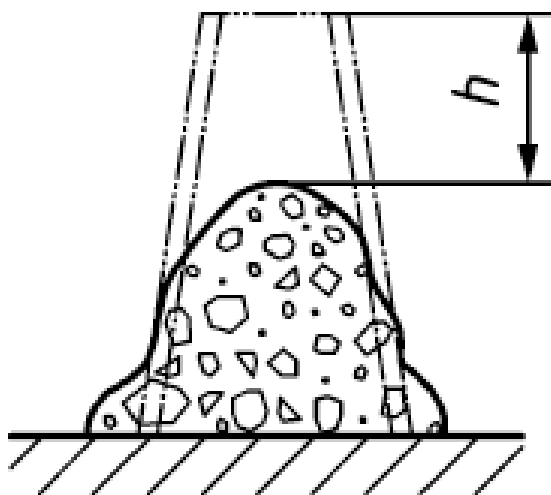
Tato zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12350–2 [34], Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Jedná se o zkoušku čerstvého betonu, která nám udává konzistenci.

Pro tuto zkoušku je potřeba Abramsův kužel, propichovací tyč, násypka a podkladní deska. Po navlhčení všech pomůcek dojde k plnění komolého Abramsova kužele ve třech vrstvách a to tak, že každá vrstva se hutní pomocí propichovací tyče 25 vpichy. U hutnění je nutné dbát na to, aby propichovací tyč mírně zasahovala do předchozí vrstvy, aby díky tomu

došlo k jejich vzájemnému propojení. Po naplnění kužele se odstraní násypka a horní povrch formy se urovná pomocí zednické lžice. Následně je kužel zvedám plynulým svislým tahem po dobu 2 až 5 sekund. Po ustálení výšky betonu se změří pokles nejvyššího bodu betonové směsi oproti výšce kuželu. Hodnota sednutí se zaokrouhlí na nejbližších 10 mm. Podle hodnoty se poté zařídí směs do třídy stupně sednutí [34].

Tabulka 1 Hodnoty sednutí a jejich zařídění podle normy ČSN EN 12350–2 [34]

Stupeň sednutí	Sednutí [mm]
S1	10–40
S2	50–90
S3	100–150
S4	160–210
S5	>210



Obrázek 20 Zkouška sednutí kužele

### 5.3.1.2 Zkouška Vebe

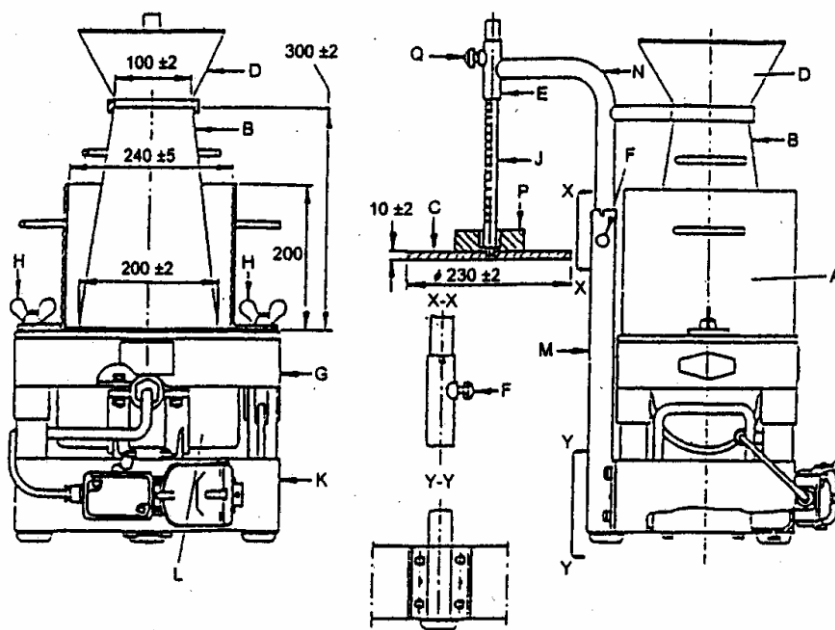
Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12350–3 [35], Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe. Pokud změřený čas při této zkoušce je kratší než 5 sekund a delší než 30 sekund, pak tato zkouška není vhodná.

Pro tuto zkoušku je potřeba Abramsův kužel, násypka, propichovací tyč, zařízení pro zkoušku Vebe a stopky. Nejdříve dojde k navlhčení všech používaných pomůcek. Do hrncové nádoby na přístroji se umístí Abramsův kužel, který se plní přes násypku ve třech vrstvách. Každá vrstva se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí. Při hutnění je nutné

vpichy zasahovat do předchozí již ztuhlé vrstvy, aby došlo k jejich vzájemnému propojení. Po naplnění formy dojde k odstranění násypky a urovňování povrchu. Poté se se forma svisle vzhůru zvedne a oddělí od betonu. Dále se kruhová průhledná deska přiloží na povrch betonu, opatrně se spustí až k hornímu povrchu betonu, spustí se vibrace a současně i stopky. Zkouška se ukončí ve chvíli, kdy je celá kruhová deska zespod omočena cementovým mlékem. Výsledný čas je zaokrouhlen na nejbližší celou sekundu. Podle naměřeného času se čerstvý beton zatřídí do třídy podle Vebe [35].

Tabulka 2 Hodnoty zkoušky Vebe a jejich zařazení podle normy ČSN EN 12350-3 [35]

Třída	Naměřený čas [s]
V0	$\geq 31$
V1	30-21
V2	20-11
V3	10-6
V4	5-3



Obrázek 21 Konzistometr (přístroj Vebe)

### 5.3.1.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Tato zkouška vychází z normy ČSN EN 12350–6 [36], Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Nicméně byl použit zjednodušený laboratorní postup, jehož výsledky jsou dostačující.

Objemová hmotnost čerstvého betonu je závislá na hmotnosti čerstvého betonu a objemu formy, ve které je zkušební těleso vytvářeno. V tomto případě byly použité formy na výrobu zkušebních krychlí o hraně 150 mm. Nejdříve byly krychle natřeny separačním prostředkem, poté zváženy na laboratorní váze s přesností na 0,01 kg a následně plněny betonovou směsí na vibračním stole. Plnění probíhalo ve dvou vrstvách za současného hutnění vibrací z vibračního stolu. Po zhutnění, očištění a urovnání povrchu krychlí došlo k jejich následnému zvážení na laboratorních vahách s přesností 0,01 kg [36].

Výsledná objemová hmotnost čerstvého betonu se spočítá podle následujícího vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} [kg/m^3]$$

- D objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m<sup>3</sup>
- m<sub>1</sub> hmotnost prázdné nádoby [kg]
- m<sub>2</sub> hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem [kg]
- V objem nádoby [m<sup>3</sup>]

### 5.3.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

V následující kapitole budou popsány zkoušky, které byly provedeny na betonu ve ztvrdlém stavu.

#### 5.3.2.1 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Zkouška byla prováděna podle ČSN EN 12390–7 [37], Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Tato veličina je závislá na hmotnosti zkušebního tělesa ve ztvrdlém stavu a na jeho objemu. Zkouška se provádí tak, že se těleso po odformování zváží na laboratorních vahách a následně se změří jeho rozměry pomocí posuvného měřítka [37].

Výsledná objemová hmotnost ztvrdlého betonu se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$D = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

- D     objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m<sup>3</sup>  
m     hmotnost zkušební tělesa [kg]  
V     objem zkušební tělesa [m<sup>3</sup>]

### 5.3.2.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla prováděna podle ČSN EN 12390–3 [38], Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Tato veličina vyjadřuje závislost vnější síly působící na zkušební těleso vůči jeho zatěžované ploše až do doby, kdy nastane jeho porušení. Zkouška byla provedena na sadě zkušebních krychlích o hraně 150 mm ve stáří 1, 3, 7 a 28 dnů. Zkouška se provádí tak, že se nejdříve změří rozměry zatěžovaného vzorku, ze kterých se následně vypočítá zatěžovaná plocha. Poté se zkušební těleso usadí na střed tlačných desek do zkušebního zařízení a osadí se tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění zkušební tělesa. Zatěžuje se konstantní rychlostí až do porušení vzorku [38].

Výsledná pevnost v tlaku se spočítá podle následujícího vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [MPa]$$

- $f_c$      pevnost v tlaku zaokrouhlena na 0,1 MPa  
F     maximální síla zatěžující těleso při porušení [N]  
 $A_c$      průřezová zkušební plocha tělesa, na kterou působí zatížení [mm<sup>2</sup>]

### 5.3.2.3 Stanovení mrazuvzdornosti

Stanovení mrazuvzdornosti betonu se provádí podle normy ČSN 73 1322 [39]. Jedná se o zkoušku, při které se vodou nasycené betonové trávce střídavě zmrazují a rozmrazují [39].

Tato zkouška se provádí na trávčích, které dosáhly stáří 28 dnů. Před začátkem zkoušky je nutné tělesa vložit do vodní lázně po dobu třech dnů, aby se nasýtily vodou. Po třech dnech uložení ve vodě se trávce vyjmou z vody, povrchově osuší, změří se jejich rozměry a zváží se. Na referenční sadě se provede pevnost v tahu za ohybu a po případě i pevnost v tlaku na zlomcích trávců. Druhá sada vzorků se uloží do zmrazovacího zařízení, kde probíhá střídavé zmrazování a rozmrazování. Jeden zmrazovací cyklus je složen ze

4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Při zmrazování musí být teplota mrazícího prostředí  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a ve druhé fázi při rozmrazování  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [39].

Po ukončení cyklování se zkušební trávce povrchově osuší, stanoví se jejich rozměry a zváží se. Následně se zkouší pevnost v tahu za ohybu a zpravidla i pevnost v tlaku na zlomcích. Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnostního úbytku zkušebních těles a součinitel mrazuvzdornosti, což je poměr průměrných hodnot pevností v tahu za ohybu zmrazovaných trávců k pevnostem referenčních trávců. Beton je vyhodnocen jako mrazuvzdorný na takový počet cyklů, při kterých součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 % [39].

#### **5.3.2.4 Hloubka průsaku tlakovou vodou**

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12390–8 [40]. Zkouška se provádí na tělesech starších 28 dní. V rámci bakalářské práce byly použity některé poloviny referenčních trávců po stanovení pevnosti v tahu za ohybu, které byly upraveny na krychle o hraně cca 100 mm [40].

Zkouška probíhá tím způsobem, že se těleso upne do zkušebního zařízení a nechá se na něj působit vodní tlak 500 kPa po dobu 72 hodin. Po uplynutí stanovené doby se těleso vyjme ze zařízení, rozlomí se v polovině a měří se zaznamenaná největší hloubka průsaku s přesností na milimetry. Výsledkem zkoušky je největší hloubka průsaku tlakové vody v milimetrech [40].

### **5.4 Návrh složení betonu**

Složení referenční receptury se odvíjelo podle běžných zvyklostí a zkušeností pracovníka ve výrobě. Přesné složení betonu nebylo možné vlivem nekvalifikované pracovní síly a nedostatečného vybavení opakovaně dodržet, ale pouze přibližně napodobit. Pro účely bakalářské práce a pro představu jaké množství jednotlivých složek do receptury vstupuje, byly suroviny naváženy a složení referenčního betonu bylo alespoň přibližně napodobeno a dopočítáno. Po nahlédnutí do tabulky složení bylo jasné, že se musí velmi výrazně snížit dávka cementu, která je ve stávající výrobě značně nadhodnocena. S ohledem na zpracovatelnost čerstvého betonu bylo dále možné upravit poměr mezi použitými typy kameniv.

První i druhá navržená modifikovaná receptura obsahovala stejné množství cementu i kameniva, ale oproti referenčnímu betonu obsahovala výrazně nižší dávku cementu, která by měla vést k finanční úspoře. Dále byl změněn poměr mezi jednotlivými frakcemi kameniva a to tak, že se zvýšil podíl hrubší frakce kameniva, a to na takovou hodnotu, která je akceptovatelná z hlediska finální úpravy povrchu a manipulace s čerstvou betonovou směsí. Navíc se očekává, že by tato změna měla mít pozitivní dopad na fyzikálně–mechanické parametry ztvrdlého betonu.

Na základě získaných znalostí z teoretické části bakalářské práce byla do obou navržených receptur zakomponována urychlovací přísada, a to v prvním případě v nižší dávce v kombinaci s plastifikační přísadou a v druhém případě ve větším množství bez plastifikační přísady. Zavedením urychlovací přísady do složení betonu by mělo dojít ke kompenzaci snížené rychlosti tvrdnutí betonu, zapříčiněnou sníženou dávkou cementu. Plastifikační přísada snižuje množství vody potřebné k dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu a mohlo by dojít ke zvýšení pevnosti a zlepšení trvanlivosti ztvrdlého betonu. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 3 Složení receptur betonů

Vstupní složky		1 m <sup>3</sup>		
Receptura		1-REF	2	3
Cement CEM I 42,5 R Odra	[kg]	575	350	350
Kamenivo	DTK 0–4 mm Lípa nad Orlicí	[kg]	1438	1200
	HDK 4–8 mm Masty	[kg]	288	515
Voda	[l]	220	123	170
Plastifikační přísada CHRYSO®Fluid Premia 590	% z m <sub>c</sub>	-	0,9	-
	[l]	-	3,15	-
Urychlovací přísada CHRYSO®Xel AD	% z m <sub>c</sub>	-	0,8	1,6
	[l]	-	2,8	5,6

#### 5.4.1 Vstupní suroviny

- **Cement**

Ve všech recepturách byl použit cement CEM I 42,5 R z polské cementárny Odra.

Tabulka 4 Technické parametry použitého cementu

Druh cementu	Pevnost v tlaku [MPa]		Počátek tuhnutí [min]	Objemová stálost [mm]
	Po 2 dnech	po 28 dnech		
CEM I 42,5 R	24,0	50,9	238	0,8

- **Kamenivo**

Všechny receptury obsahovaly dvě frakce kameniva:

DTK 0–4 mm vodou prané, Lípa nad Orlicí

HDK 4–8 mm, Mastý

- **Voda**

Záměsová voda byla použita pitná z vodovodního řádu.

- **Plastifikační přísada**

V první navržené receptuře byla použita superplastifikační přísada CHRYSO®Fluid Premia 590 na bázi nově patentovaných polymerů – PCE. Tato přísada je určena zejména pro prefabrikaci s požadavky na nízký vodní součinitel a vysoké krátkodobé a konečné pevnosti betonu. Zvyšuje pohyblivost betonu, dále snižuje lepivost a omezuje tixotropní chování. Dále zlepšuje celkovou homogenitu a kompaktnost betonové směsi.

- **Urychlovací přísada**

Urychlovací přísada byla použita v obou navržených recepturách. Konkrétně se jednalo o CHRYSO®Xel AD. Tato urychlovací přísada tvrdnutí betonu katalyzuje počáteční hydratační reakce cementu, čímž urychluje počátek tuhnutí a tvrdnutí betonu. Dále zabraňuje poškození čerstvého betonu mrazem. Obsahuje rozpustné minerální soli a organické látky, jejichž kombinovaný účinek ovlivňuje hydratační reakce betonu. Používá se především pro prefabrikaci, předpjatý beton a transportní beton.

## 5.4.2 Výroba betonů

Po navržení receptur následovala etapa samotné výroby betonů. Míchání betonů probíhalo v laboratorní míchačce s nuceným oběhem. Nejprve proběhla homogenizace použitých frakcí kameniv, dále byl přidán cement a následně byla přidána záměsová voda až do fáze, kdy zpracovatelnost čerstvého betonu odpovídala stávající výrobě. U modifikovaných receptur byly navíc do zavlhlé směsi přidány chemické přísady. Po zamíchání následovala kontrola konzistence čerstvého betonu. Při návrhu receptur nebylo pevně určeno množství záměsové vody, ale hledaná konzistence se řídila vizuálním a hmatovým posouzením doplněné o normové zkoušky konzistence čerstvého betonu a následným rozhodnutím, zda lze namíchaný materiál při dané konzistenci bezproblémově zpracovat ve výrobě.

První referenční receptura byla z důvodu nadbytečného množství cementu velmi lepkavá a měla sklon vytvářet sbalky. Stav čerstvého betonu nepříznivě ovlivnil práci, ukládání do forem a finální povrch. Druhá receptura nevykazovala totožné problémy jako stávající receptura a dosáhla uspokojivé zpracovatelnosti. Pomocí superplastifikační přísady se podařilo snížit vodní součinitel, ale přesto pravděpodobně kvůli nižší dávce cementu v receptuře se s betonem dobře pracovalo. Třetí receptura, kde nebyla použita superplastifikační přísada, obsahovala nejvyšší dávku urychlovací přísady, která začala poměrně brzy působit již po namíchání betonu, což negativně ovlivnilo zpracovatelnost a následné zpracování čerstvého betonu.

## 5.4.3 Výsledky zkoušek čerstvého betonu

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty zkoušek zpracovatelnosti a objemové hmotnosti čerstvého betonu.

Tabulka 5 Hodnoty zkoušky sednutí kužele a její vyhodnocení

Receptura	Sednutí kužele [mm]	Klasifikace podle sednutí kužele
1-REF	40	S1
2	0	S0
3	15	S1

Tabulka 6 Hodnoty zkoušky Vebe a její vyhodnocení

Receptura	Zkouška Vebe [s]	Klasifikace podle Vebe
<b>1-REF</b>	-	-
<b>2</b>	8	V3
<b>3</b>	6	V3

Po zkouškách zaměřené na konzistenci čerstvého betonu následovala etapa výroby zkušebních těles. Od každé receptury bylo vyrobeno 8 krychlí o hraně 150 mm, které se plnily na laboratorním vibračním stole. Krychle posloužily ke stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu pomocí zjednodušené laboratorní metody, dále pak k určení objemové hmotnosti betonu ve ztvrdlém stavu, a především pro stanovení pevnosti v tlaku po 1, 3, 7 a 28 dnech. Podle použité normy by měla být pevnost v tlaku stanovena vždy na 3 zkušebních tělesech, avšak pro účely bakalářské práce byla pevnost v tlaku stanovena na 2 zkušebních krychlích.

Tabulka 7 Tabulka objemových hmotností čerstvého betonu

Receptura	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>1-REF</b>	2270
<b>2</b>	2370
<b>3</b>	2280

Následovala výroba betonových trámců o rozměrech 400 × 100 × 100 mm. Trámce byly vyrobeny primárně pro zkoušku mrazuvzdornosti betonu, a to v počtu 4 kusů od každé receptury. Norma, podle které se postupovalo říká, že by se mělo pro zkoušku použít minimálně 6 těles, přičemž 3 referenční a 3 zmrazované, ale pro účely této práce se počet zkušebních těles snížil na 2 referenční a 2 zmrazované. Po stanovení pevnosti v tahu za ohybu referenčních trámců byla z důvodu získání doplňujících údajů o pevnosti betonu, provedena zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích trámců. Z vyrobených betonů dle jednotlivých receptur byly z trámců vyřezány zkušební tělesa o rozměrech cca 100 × 100 × 100 mm, na kterých byla provedena zkouška stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou.

Po výrobě všech zkušebních těles, byly všechny vzorky uloženy v laboratorním prostředí, na vzduchu při standardní laboratorní teplotě, aby se docílilo co nejlepší simulace prostředí, které je ve výrobně stávajících betonových dílců.

#### 5.4.4 Výsledky zkoušek ztvrdlého betonu

Následovala etapa zaměřená na ověření vlastností ztvrdlého betonu. Část této fáze se zaměřovala na stanovení základních fyzikálně mechanických vlastností ztvrdlého betonu. Jednalo se zejména o pevnosti betonu v tlaku po 1, 3, 7 a 28 dnech doplněné o stanovení objemové hmotnosti. Vzhledem k tomu, že se jednalo o receptury sestavené pro prefabrikovanou výrobu betonových dílců, bylo stěžejní sledovat náběh raných pevností, které jsou klíčové pro brzké odformování, snadnou manipulaci a celkovou efektivitu výroby betonových dílců. Následovaly zkoušky trvanlivosti betonu. Vzhledem k prostředí, kde se finální výrobek používá a způsobu užití, byla zvolena jako stěžejní zkouška trvanlivosti mrazuvzdornost betonu. Její výsledky byly dále doplněny o hodnoty ze zkoušky odolnosti proti hloubce průsaku tlakovou vodou. Další vlastnosti ztvrdlého betonu nebylo vzhledem k charakteru použití potřeba sledovat.

Tabulka 8 Výsledky vývoje objemových hmotností v různých dnech od výroby

Receptura	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m <sup>3</sup> ]							
	po 1 dni		po 3 dnech		po 7 dnech		po 28 dnech	
<b>1-REF</b>	2260	2240	2250	2230	2220	2220	2190	2180
	2220		2210		2220		2170	
<b>2</b>	2350	2350	2350	2340	2330	2330	2340	2330
	2350		2330		2330		2320	
<b>3</b>	2240	2250	2240	2240	2240	2240	2220	2230
	2260		2240		2240		2240	

Z tabulky je patrné, že u všech namíchaných betonů se postupem času snižuje objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu. Tento jev zapříčiňuje záměsová voda, která se postupně ze zkušebních těles vytrácí. V případě receptury 1-REF došlo k nejvyššímu poklesu objemové hmotnosti betonu. Tento výsledek odpovídá očekávání, jelikož tato receptura obsahovala nejvyšší dávku záměsové vody.

Tabulka 9 Výsledky vývoje pevností v tlaku v různých dnech od výroby

Receptura	Pevnost v tlaku na krychlích [MPa]							
	po 1 dni		po 3 dnech		po 7 dnech		po 28 dnech	
<b>1-REF</b>	22,9	22,0	33,7	33,3	40,7	40,8	46,0	45,9
	21,1		32,8		40,9		45,8	
<b>2</b>	25,0	25,9	42,6	40,9	49,2	48,9	53,6	53,4
	26,7		39,1		48,6		53,1	
<b>3</b>	15,0	14,2	23,9	24,0	31,8	32,1	34,8	36,3
	13,4		24,0		32,4		37,8	

V tabulce 9 je uveden souhrn všech hodnot pevností betonů v tlaku na zkušebních krychlích. Zde se potvrdil fakt, že vliv vodního součinitele a plastifikačních přísad má velmi výrazný vliv na mechanické vlastnosti betonu. Dále se ukázalo, že vyšší dávka cementu ve složení betonu neznamena automaticky vyšší dosaženou pevnost betonu.

Nejvyšší pevnost betonu v tlaku je dosažena ve všech sledovaných dnech na receptuře 2. Naopak nejnižších hodnot ze všech sledovaných dnech bylo dosaženo u receptury 3. Při porovnání výsledků receptury 2 a 3 se prokázala důležitost plastifikační přísady.

Tabulka 10 Výsledky pevností v tlaku na zlomcích trámů po 28 dnech

Receptura	Pevnost v tlaku na zlomcích referenčních trámů po 28 dnech [MPa]	
<b>1-REF</b>	42,3	44,0
	43,9	
	45,7	
<b>2</b>	52,2	52,4
	54,9	
	50,0	
<b>3</b>	36,1	34,7
	33,1	
	34,9	

Výsledky z tabulky 10 ze zlomků zkušebních trámů sloužily jako rozšiřující hodnoty výsledků pevností betonu v tlaku získaných ze zkušebních krychlí. Tyto výsledky přímo

korelují s hodnotami ze zkušebních krychlí, přičemž rozdíly mezi nimi jsou v rozptylu 0 až 5 %.

Tabulka 11 Výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou

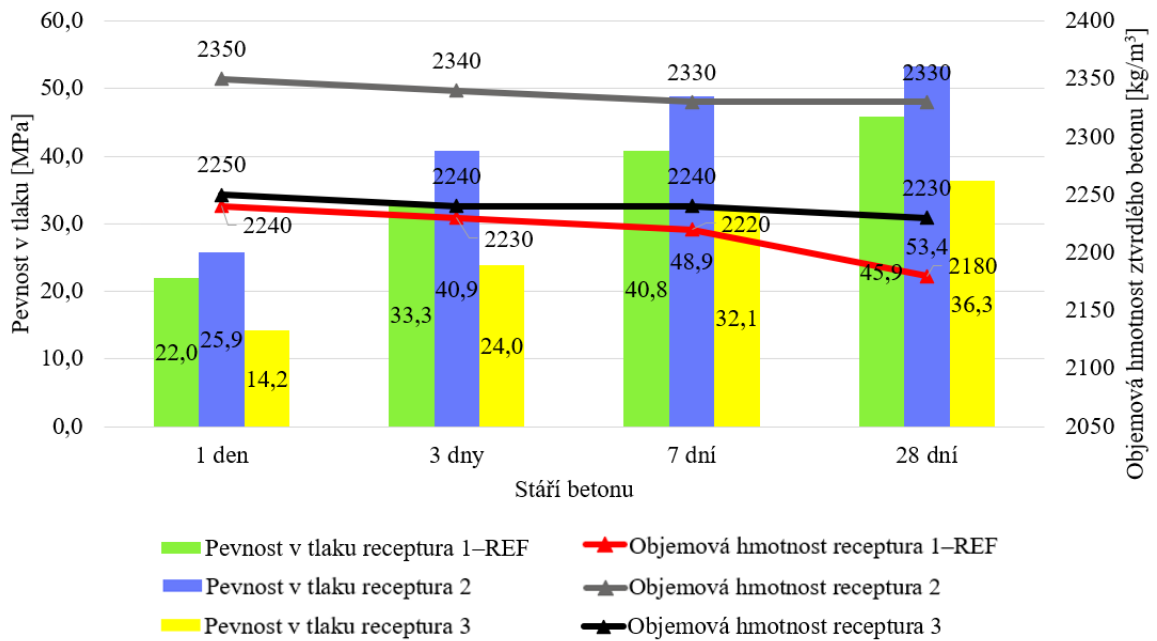
Receptura	Hloubka průsaku tlakovou vodou [mm]
<b>1-REF</b>	21
<b>2</b>	0
<b>3</b>	5

U výsledků této zkoušky se opět potvrdila důležitost návrhu složení betonu a získání požadované zpracovatelnosti i za pomoci plastifikační přísady. Receptura 2 obsahující tuto přísadu dosáhla nejlepších výsledků. Nejméně příznivých výsledků dosáhla stávající receptura 1-REF, kde se projevila nekompaktní struktura, zapříčiněná neodborným návrhem složení s vysokým obsahem záměsové vody a zhoršenou schopností uložení do forem, tj. nebylo dosaženo dokonalého ztuhnutí čerstvého betonu.

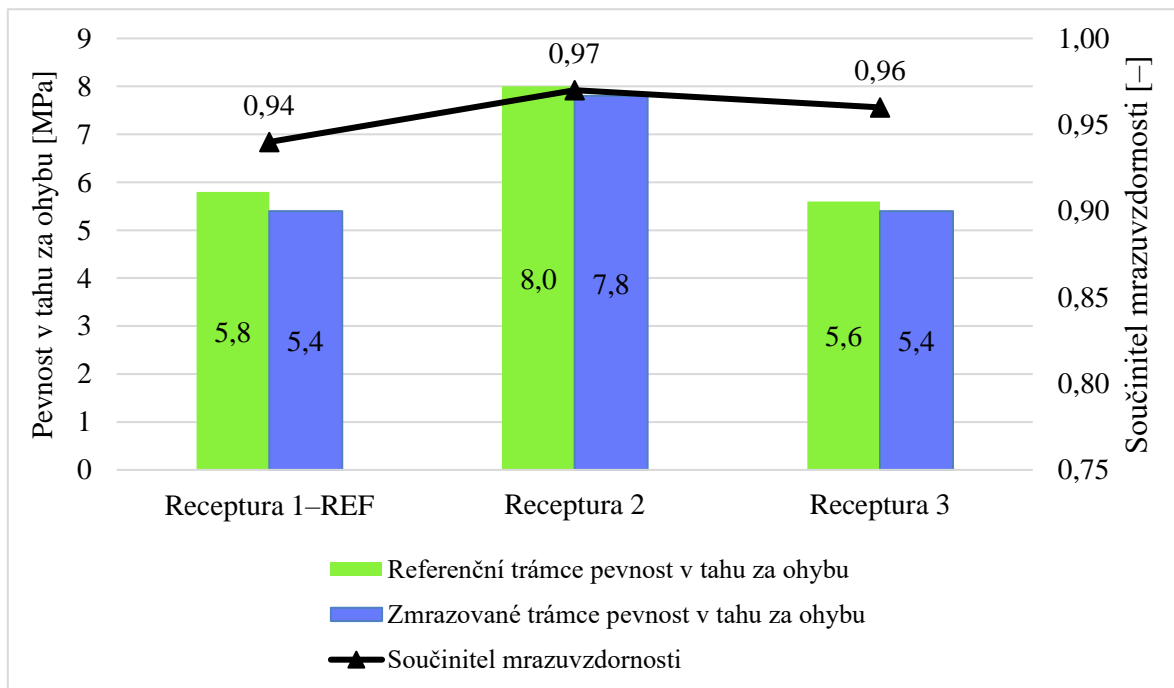
Tabulka 12 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti betonu

Receptura	Úbytek hmotnosti [%]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]				Součinitel mrazuvzdornosti po 50 cyklech
		Referenční		Zmrazované		
<b>1-REF</b>	0,36	5,7	5,8	5,3	5,4	0,94
	0,54	5,8		5,6		
<b>2</b>	0,20	8,2	8,0	7,9	7,7	0,97
	0,16	7,8		7,6		
<b>3</b>	0,33	5,4	5,6	5,6	5,4	0,96
	0,25	5,8		5,2		

U všech receptur došlo pouze k mírnému snížení pevností v tahu za ohybu a podle součinitele mrazuvzdornosti po 50 cyklech lze všechny betony klasifikovat jako mrazuvzdorné.



Graf 1 Grafické znázornění vývoje v čase objemových hmotností a pevnosti v tlaku sledovaných betonů



Graf 2 Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu a indexu mrazuvzdornosti sledovaných betonů

## 6 Diskuse výsledků

Složení betonu ovlivňuje veškeré vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. U zkoušených betonů bylo nejdůležitější sledovat dodržení požadované konzistence, náběh pevností betonu v tlaku a jeho trvanlivost.

Jako zkouška konzistence čerstvého betonu byla vybrána metoda sednutí kužele, která byla dále u modifikovaných receptur doplněna o zkoušku Vebe, jelikož se bakalářská práce zabývá tématem výroby prefabrikovaného výrobku vyráběného ze sušší konzistence. Referenční receptura 1–REF dosahovala hodnoty sednutí kužele 40 mm, což ji řadí do stupně sednutí kužele S1. Receptura 2 dosáhla nejnižšího stupně sednutí S0 za dosažení hodnoty sednutí 0 mm a třídy V3 za hodnotu 8 sekund podle Vebe. Receptura 3 dosáhla 15 mm sednutí kužele, což opět odpovídá stupni S1 a třídy V3 za 8 sekund podle Vebe.

Nejnižší hodnoty objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu dosáhla referenční receptura 1–REF a to  $2270 \text{ kg/m}^3$ . Receptura 3 dosáhla  $2280 \text{ kg/m}^3$  a výrazně nejvyšší hodnoty dosáhla receptura 2 a to  $2370 \text{ kg/m}^3$ . Zvýšená hodnota je pravděpodobně zapříčiněná plastifikační přísadou, která pomohla ztekutit čerstvý beton a došlo k lepšímu zhutnění a vytvoření hutnější struktury. Obecně lze hodnoty objemových hmotností čerstvého betonu zvýšit použitím intenzivnější vibrace, kterou se podaří lépe vytěsnit přebytečný vzduch nebo lze také upravit složení betonu.

Objemové hmotnosti betonu ve ztvrdlém stavu byly sledovány po 1, 3, 7 a 28 dnech na zkušebních krychlích vždy před stanovením pevnosti betonu v tlaku. Podle předpokladu docházelo u všech receptur se zvyšujícím se stářím k jejich snižování a tím korespondovaly s hodnotou z čerstvého stavu, která byla vždy vyšší. Totožně jako u čerstvého betonu, receptura 1–REF vykazovala hodnoty nejnižší, a to v rozmezí od  $2240 \text{ kg/m}^3$  po 1 dni do  $2180 \text{ kg/m}^3$  po 28 dnech. Nejvyšších hodnot dosahovala receptura 2, a to v rozmezí  $2350 \text{ kg/m}^3$  po 1 dni a  $2330 \text{ kg/m}^3$  po 28 dnech. Receptura 3 v raném stáří dosahovala podobných hodnot jako receptura 1–REF, ale se zvyšujícím se stářím se výsledky začínaly více lišit. Po 1 dni dosáhla hodnoty  $2250 \text{ kg/m}^3$  a po 28 dnech klesla pouze na  $2230 \text{ kg/m}^3$ .

Jak již bylo uvedeno výše, pevnost betonu v tlaku se prováděla na zkušebních krychlích po 1, 3, 7 a 28 dnech. Nejvyšších výsledků bylo dosaženo ve všech sledovaných stářích betonu u receptury 2, která jako jediná obsahovala plastifikační přísadu. Tato

receptura dosáhla po 1 dni pevnost 25,9 MPa, což je téměř 50 % z pevnosti v tlaku po 28 dnech, která vyšla 53,4 MPa. Hodnota po 3 dnech byla 40,9 MPa a po 7 dnech 48,9 MPa. Z těchto výsledků vyplývá, že toto složení betonu má velmi rychlé nárůsty počátečních pevností. Receptura 1–REF neobsahující žádnou chemickou přísadu dosáhla postupně těchto pevností: 22,0 MPa po 1 dni, 33,3 MPa po 3 dnech, 40,8 MPa po 7 dnech a 45,9 MPa ve stáří 28 dní. Při porovnání této receptury s recepturou 2, byly pevnosti ve všech sledovaných dnech v průměru o 14 až 18 % nižší. Suverénně nejnižších hodnot dosáhla receptura 3, která oproti modifikované receptuře 2 neobsahovala plastifikační přísadu, ale navíc obsahovala vyšší dávku urychlovací přísady. Tato receptura dosáhla po 1 dni pevnosti v tlaku 14,2 MPa, po 3 dnech 24,0 MPa, po 7 dnech 32,1 MPa a po 28 dnech 36,3 MPa. Tyto hodnoty jsou v porovnání s recepturou 2 vždy nižší, a to ve stáří 1 a 3 dnů přibližně o 41–45 % a ve stáří 7 a 28 dní přibližně o 32–34 %. Dvacetiosmidenní pevnosti v tlaku byly dále rozšířeny o pevnosti získané na zlomcích referenčních trámčů použité pro zkoušku mrazuvzdornosti. Tyto hodnoty korelují s hodnotami získané ze zkušebních krychlí a jsou vždy o 2 až 4 % nižší. Ze všech těchto výsledků pevností a porovnání receptur 2 a 3 je patrné, že plastifikační přísada a s ní související nižší vodní součinitel hrají významnou roli při nárůstu počátečních i konečných pevností.

Hloubka průsaku tlakovou vodou vyšla nejhůře u receptury 1–REF, kde byl průsak tlakovou vodou 21 mm. Nejlepšího výsledku opět dosáhla receptura 2, kde nedošlo k žádnému průsaku. Receptura 3 vykázala hloubku průsaku 5 mm.

Po vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti se všechny receptury prokázaly jako mrazuvzdorné, jelikož u žádné z receptur nedošlo k poklesu součinitele mrazuvzdornosti pod hodnotu 0,75. Nejlépe si opět vedla receptura 2, kde hodnota součinitele mrazuvzdornosti vyšla 0,97. Receptura 3 dosahuje hodnoty součinitele mrazuvzdornosti 0,96 a nejnižší hodnotu dosahuje receptura 1–REF a to 0,94. Protože mrazuvzdornost betonu přímo souvisí s jeho objemovou hmotností, je tedy evidentní, že se snížením objemové hmotnosti se snižuje i mrazuvzdornost materiálu. Obě tyto zkoušky trvanlivosti betonu dopadly podle očekávání nejlépe pro recepturu 2 a nejhůře pro recepturu 1–REF.

V následujících tabulkách je uvedena přibližná cenová kalkulace sledovaných betonů. Cena cementu je získána ze stavebnin, kde dochází k jeho nákupu, ceny kameniv jsou čerpány z dostupných internetových ceníků z příslušných závodů, cena vody je získána

z ceníku lokálního distributora pitné vody. Ceny použitých chemických přísad byly získány od společnosti CHRYSO Chemie s. r. o. Veškeré ceny byly pro názornost přepočítány na 1 tunu suroviny a jsou uvedeny bez DPH.

Tabulka 13 Cenová kalkulace surovin receptury 1-REF

<b>Referenční receptura 1-REF</b>				
<b>Vstupní složky</b>		<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>	<b>Cena surovin bez DPH [Kč/t]</b>	<b>Cena v 1 m<sup>3</sup> betonu [Kč]</b>
Cement CEM I 42,5 R Odra		575	3920	2254,0
Kamenivo	DTK 0–4 mm Lípa nad Orlicí	1438	170	244,5
	HDK 48 mm Mastý	288	575	165,6
Voda		220	103	22,7
			Cena celkem bez DPH	<b>2 686,7 Kč</b>

Tabulka 14 Cenová kalkulace surovin receptury 2

<b>Receptura 2</b>				
<b>Vstupní složky</b>		<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>	<b>Cena surovin bez DPH [Kč/t]</b>	<b>Cena v 1 m<sup>3</sup> betonu [Kč]</b>
Cement CEM I 42,5 R Odra		350	3920	1372,0
Kamenivo	DTK 0–4 mm Lípa nad Orlicí	1200	170	204,0
	HDK 4–8 mm Mastý	515	575	296,1
Voda		123	103	12,7
Plastifikační přísada CHRYSO®Fluid Premia 590		3,15	65000	204,8
Urychlovací přísada CHRYSO®Xel AD		2,8	39000	109,2
			Cena celkem bez DPH	<b>2 198,7 Kč</b>

Tabulka 15 Cenová kalkulace surovin receptury 3

<b>Receptura 3</b>				
<b>Vstupní složky</b>		<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>	<b>Cena surovin bez DPH [Kč/t]</b>	<b>Cena v 1 m<sup>3</sup> betonu [Kč]</b>
Cement CEM I 42,5 R Odra		350	3920	1372,0
Kamenivo	DTK 0–4 mm Lípa nad Orlicí	1200	170	204,0
	HDK 4–8 mm Mastý	515	575	296,1
Voda		170	103	17,5
Urychlovací přísada CHRYSO®Xel AD		5,6	39000	218,4
			<b>Cena celkem bez DPH</b>	<b>2 108,0 Kč</b>

Z čistě ekonomického hlediska vychází pro výrobu finančně nejzajímavější receptura 3, jelikož oproti původní receptuře 1–REF obsahuje výrazně nižší dávku cementu, který i tak v tomto složení betonu tvoří více než 50 % ceny použitých surovin. Receptura 2 vychází přibližně o 4 % dražší, při srovnání s recepturou 3, ale vykazuje výrazně lepší fyzikálně mechanické vlastnosti. Dále receptura 2 obsahuje suverénně nejdražší použitou položku, kterou je plastifikační přísada, nicméně její vysoká cena se v malém použitém množství do celkové ceny za 1 m<sup>3</sup> betonu nijak dramaticky neprojevila.

Na základě dosažených výsledků pevností v tlaku sledovaných v různém stáří betonu a výsledků mrazuvzdornosti je možné zkonstatovat, že použití chemických přísad je vhodná cesta, jak zefektivnit stávající výrobu typizovaných betonových dílců.

Avšak, po analýze získaných výsledků by bylo vhodné modifikované receptury 2 a 3 zkombinovat a dále upravit. Z pohledu zpracovatelnosti bude do složení jednoznačně zakomponována plastifikační přísada a z důvodu urychlení nárůstu pevností i urychlovací přísada. Dále díky charakteru ručně vyráběných typizovaných betonových dílců a jejich způsobu použití by bylo možné dále redukovat množství použitého cementu, jelikož výsledky pevností dosahují hodnot, které zde nejsou potřebné. Finální receptura by měla dosahovat pevností třídy C 30/37 maximálně C 35/45. V následující tabulce je uvedeno navržené složení betonu, které by mohlo vést k dosažení všech požadavků na finální výrobek i s ohledem na finanční náročnost.

Tabulka 16 Navrhovaná finální receptura

Vstupní složky		1 m <sup>3</sup>
Cement CEM I 42,5 R Odra	[kg]	330
Kamenivo	DTK 0–4 mm Lípa nad Orlicí	[kg]
	HDK 4–8 mm Mastý	[kg]
Voda	[l]	122
Plastifikační přísada CHRYSO®Fluid Premia 590	% z m <sub>c</sub>	0,9
Urychlovací přísada CHRYSO®Xel AD	% z m <sub>c</sub>	0,9

## 7 Závěr

Téma bakalářské práce se zabývalo modifikací složení betonů za účelem zlepšení klíčových vlastností ručně vyráběných betonových dílců. Cílem teoretické části bylo zpracovat téma používaných způsobů urychlování tvrdnutí betonu a získání obecných znalostí z této problematiky. Dále byl řešen vliv urychlovacích přísad na hydrataci, mikrostrukturu a další vlastnosti betonu, jako je například trvanlivost, vývoj pevností a zpracovatelnost. Z teoretické části je nejzajímavější kapitola věnovaná moderní urychlovací přísadě tvrdnutí betonu X-SEED, která je založena na použití synteticky vyrobených krystalů. Jak bylo uvedeno v teoretické části, tato přísada má velmi významný vliv na rychlost hydratace a náběh pevností betonu, dále má podle výrobců vliv na zastoupení mikropórů, které pozitivně ovlivňují trvanlivost betonu. Ze získaných znalostí z provedeného studia odborných periodik s ohledem na způsob, místo a účel použití, bylo vyhodnoceno, že by v experimentální části bylo vhodné použít urychlovací přísadu obsahující dusičnany a thiokyanatany. Kombinace těchto látek byla vybrána na základě jejich vlastností a účinků.

Cílem experimentální části bylo modifikovat stávající složení betonu pro ruční výrobu betonových dílců s použitím urychlovací přísady a provést ekonomické zhodnocení navrženého řešení v porovnání se stávajícím stavem.

Nejsledovanější hodnoty pevností betonu v tlaku byly ve stáří 1 a 28 dní. Jednodenní pevnosti z toho titulu, protože jsou důležité pro odformování a případnou manipulaci s výrobkem. Dvacetiosmidenní pevnosti z toho důvodu, neboť jsou klíčové pro určení pevnostní třídy betonu. Největší pevnost v tlaku po 1 dni byla zaznamenaná u modifikované receptury 2 a to 25,9 MPa tato hodnota dosáhla 49 % 28 denní pevnosti, která vyšla

53,4 MPa. V porovnání s referenční recepturou 1–REF, která v 28 dnech dosáhla hodnoty 45,9 MPa, jsou tyto hodnoty vyšší přibližně o 15 %. Výrazně nejslabších hodnot dosáhla modifikovaná receptura 3 a to po 1 dni 14,2 MPa a po 28 dnech 36,3 MPa. Další důležitou zkouškou, která byla provedena byla mrazuvzdornost betonu. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že po 50 cyklech jsou všechny betony mrazuvzdorné. Dalšími výsledky byly hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou, které vyšly podle očekávání nejpříznivěji pro recepturu 2 s nulovou hodnotou průsaku.

Následně proběhlo cenové porovnání navržených receptur, kde lépe dopadly obě modifikované receptury v porovnání s referenční recepturou 1–REF. Je nutné podotknout, že uvedené ceny nezahrnují cenu práce potřebnou k výrobě betonu, ale pouze jejich surovinové náklady.

Výsledky provedených zkoušek v experimentální části bakalářské práce prokázaly, že zavedení chemických přísad do výroby by s sebou přineslo očekávaná pozitiva. V první řadě by došlo ke zefektivnění stávající výroby vlivem rychlejšího nárůstu pevností, dále by došlo k dosažení konstantních a kvalitnějších výsledků při každé výrobě prefabrikovaných prvků a v neposlední řadě by mělo dojít i ke snížení ekonomické náročnosti vyráběných betonových výrobků.

## 8 Zdroje

- [1] AĚTCIN, P.-C. 19 - Accelerators. In: Woodhead Publishing, 2016, s. 405-413. ISBN 978-0-08-100693-1.
- [2] TÁBORSKÝ, Ing. Tomáš a Petr SCHLATTAUER. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu. Realizace staveb. 2009.
- [3] ŠAFRATA, Ing. Jiří. Betony s rychlým náběhem pevností. ASB-Portal. 2008.
- [4] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb.st- Modul BJ04 – M01 Technologie Betonu I. Brno, 2005.
- [5] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [6] OKOLU, S O. Heat Curing Practice in Concrete Precasting Technology – problems and future directions. South Africa: School of Civil and Environmental Engineering, University of the Witwatersrand, 2006.
- [7] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb.st- Modul BJ09 – M01 Technologie stavebních dílců. Brno, 2005.
- [8] Českomoravský Beton, Českomoravský Cement, Českomoravský Štěrk. Příručka technologa Beton. 2010.
- [9] NIE, Shuai, Shuguang HU, Fazhou WANG, Pan YUAN, Yaohong ZHU, Junneng YE a Yunpeng LIU. Internal curing – A suitable method for improving the performance of heat-cured concrete. Construction and Building Materials. 2016, 122, 294-301. ISSN 0950-0618.
- [10] KOSMATKA, Steven H. a Canadian Portland Cement Association. Design and control of concrete mixtures: Curing Concrete. Ottawa, 2002.
- [11] BLAIS, Pierre Y. a Marco COUTURE. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure. PCI Journal. Chicago, 1999.
- [12] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. Stavební hmoty 1: Beton. Ostrava, 2013. FAST VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.

- [13] WANG, Yifei, Lei LEI, Jianhui LIU, Yihan MA, Yi LIU, Zhiqiang XIAO a Caijun SHI. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*. 2022, 134, 104762. ISSN 0958-9465.
- [14] VETCHÝ, Jan. Přísady do betonů a malt II. 2015.
- [15] MYRDAL, Roar. Accelerating admixtures for concrete. SINTEF REPORT Building and Infrastructure Concrete and Innovation Center, Project No: 3D006020. 2007/01/01, 1-35.
- [16] TÁBORSKÝ, Tomáš a Petr SCHLATTAUER. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu. *Realizace staveb*. 2009.
- [17] RAMACHANDRAN, V.S. *Concrete Admixtures Handbook: Properties Science and Technology*. Noyes Publications, 1984. ISBN 978-0815509813.
- [18] XU, Zhiqiang, Weifeng LI, Jinfeng SUN, Yueyang HU, Kai XU, Suhua MA a Xiaodong SHEN. Research on cement hydration and hardening with different alkanolamines. *Construction and Building Materials*. 2017, 141, 296-306. ISSN 0950-0618.
- [19] AGGOUN, Salima, Mustapha ZOUAOUI, N. CHIKH a R. DUVAL. Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages. *Construction and Building Materials – CONSTR BUILD MATER*. 2008/02/01, 22, 106-110.
- [20] TREFIL, Vladislav. Snížení Nákladů na výrobu prefabrikátů pomocí moderní přísady urychlující tvrdnutí. 2013.
- [21] DENG, Zuiliang, Weishan WANG, Guimin LU, Lefeng FU a Baicun ZHENG. Effect of New Hardening Accelerator on the Strength of Segment Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2021, 36(3), 387-391. ISSN 1993-0437.
- [22] HORSKÝ, Marek, Ivana LUSOVÁ a Peter BRIATKA. Činitele ovlivňující rychlost nárůstu pevnosti betonu I: ASB-Portal. 2013.

- [23] HORSKÝ, Marek, Ivana LUSOVÁ a Peter BRIATKA. Činitele ovlivňující rychlost nárůstu pevnosti betonu II: ASB-Portal. 2013.
- [24] CHEN, Heng, Pan FENG, Shaoxiong YE, Qinfei LI, Pengkun HOU a Xin CHENG. The influence of inorganic admixtures on early cement hydration from the point of view of thermodynamics. *Construction and Building Materials*. 2020, 259, 119777. ISSN 0950-0618.
- [25] DORN, Tobias, Oliver BLASK a Dietmar STEPHAN. Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. *Construction and Building Materials*. 2022, 323, 126554. ISSN 0950-0618.
- [26] JUENGER, M.C.G., P.J.M. MONTEIRO, E.M. GARTNER a G.P. DENBEAUX. A soft X-ray microscope investigation into the effects of calcium chloride on tricalcium silicate hydration. *Cement and Concrete Research*. 2005, 35(1), 19-25. ISSN 0008-8846.
- [27] LI, Haoxin, Yuhang XIANG a Chao XU. Effect of C–S–H seed/PCE nanocomposites and triisopropanolamine on portland cement properties: Hydration kinetic and strength: Hydration kinetic and strength. *Journal of Building Engineering*. 2022, 57, 104946. ISSN 2352-7102.
- [28] NICOLEAU, L., E. SCHREINER a A. NONAT. Ion-specific effects influencing the dissolution of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2014, 59, 118-138. ISSN 0008-8846.
- [29] HEIKAL, Mohamed. Effect of calcium formate as an accelerator on the physicochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(6), 1051-1056. ISSN 0008-8846.
- [30] BOST, Pascal, Marine REGNIER a Matthieu HORGNIES. Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*. 2016, 113, 290-296. ISSN 0950-0618.
- [31] JUSTNES, H. a E.C. NYGAARD. Changes in the microstructure of cement paste and concrete due to calcium nitrate addition. In: American Concrete Institute, ACI Special Publication. 1997, s. 657-672.

- [32] WISE, T., V.S. RAMACHANDRAN a G.M. POLOMARK. The effect of thiocyanates on the hydration of portland cement at low temperatures. *Thermochimica Acta*. 1995, 264, 157-171. ISSN 0040-6031.
- [33] CHIKH, N., Mustapha ZOUAOUI, Salima AGGOUN a R. DUVAL. Effects of calcium nitrate and triisopropanolamine on the setting and strength evolution of Portland cement pastes. *Materials and Structures*. 2008/01/01, 41, 31-36.
- [34] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1301
- [35] ČSN EN 12350-3. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška Vebe. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1201
- [36] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1301.
- [37] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1302.
- [38] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1302.
- [39] ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1969. Třídící znak 73 1322.
- [40] ČSN EN 12390-8. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak 73 1302.

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Vliv teploty zrání na vývoj tlakové pevnosti betonu v čase .....	12
Obrázek 2 Vliv délky odležení betonové směsi na strukturu mikrotrhlin v protěpovaném betonu. vlevo krátké odležení–vznik mikrotrhlin, vpravo dostatečné odležení–struktura není poškozená .....	12
Obrázek 3 Přehled typů protěpovacích zařízení .....	13
Obrázek 4 Režim protěpování betonu .....	15
Obrázek 5 Propařování betonu pod folií .....	16
Obrázek 6 Vliv doby vlhkého propařování na vývoj pevnosti betonu v čase .....	17

Obrázek 7 Vliv použitého cementu na vývoj pevností betonů.....	22
Obrázek 8 Vliv vodního součinitele na pevnost betonu v tlaku v různém stáří betonu při použití různých druhů cementů .....	23
Obrázek 9 Vývoj tepla portlandského cementu s přidavkem chloridu vápenatého .....	24
Obrázek 10 Účinky chloridu vápenatého na flokulaci cementového zrna .....	24
Obrázek 11 Vliv typu urychlující přísady na rychlost hydratace portlandského cementu ..	26
Obrázek 12 Mikroskopické snímky C <sub>3</sub> S past po dvou hodinách hydratace.....	27
Obrázek 13 Vliv množství přidané urychlovací přísady na počáteční (vlevo) a konečné (vpravo) doby tuhnutí cementové pasty při různých teplotách .....	29
Obrázek 14 Vliv vybraných urychlovacích přísad na dobu tuhnutí a pevnosti v tlaku betonu .....	30
Obrázek 15 Vývoj pevností betonů v závislosti na čase (s krystalizační přísadou, s tradiční urychlovací přísadou, bez urychlovací přísady) .....	30
Obrázek 16 Betonový základový díl .....	32
Obrázek 17 Vertikální úložný stojan .....	33
Obrázek 18 Vibrační stůl.....	33
Obrázek 19 Metodika řešení.....	35
Obrázek 20 Zkouška sednutí kužele .....	36
Obrázek 21 Konzistometr (přístroj Vebe) .....	37

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty sednutí a jejich zařídění podle normy ČSN EN 12350–2 [34].....	36
Tabulka 2 Hodnoty zkoušky Vebe a jejich zařídění podle normy ČSN EN 12350–3 [35]	37
Tabulka 3 Složení receptur betonů .....	41
Tabulka 4 Technické parametry použitého cementu.....	42
Tabulka 5 Hodnoty zkoušky sednutí kužele a její vyhodnocení .....	43
Tabulka 6 Hodnoty zkoušky Vebe a její vyhodnocení.....	44
Tabulka 7 Tabulka objemových hmotností čerstvého betonu .....	44
Tabulka 8 Výsledky vývoje objemových hmotností v různých dnech od výroby .....	45
Tabulka 9 Výsledky vývoje pevností v tlaku v různých dnech od výroby .....	46
Tabulka 10 Výsledky pevností v tlaku na zlomcích trámů po 28 dnech .....	46
Tabulka 11 Výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou.....	47

Tabulka 12 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti betonu.....	47
Tabulka 13 Cenová kalkulace surovin receptury 1–REF .....	51
Tabulka 14 Cenová kalkulace surovin receptury 2 .....	51
Tabulka 15 Cenová kalkulace surovin receptury 3 .....	52

## **11 Seznam grafů**

Graf 1 Grafické znázornění vývoje v čase objemových hmotností a pevnosti v tlaku sledovaných betonů .....	48
Graf 2 Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu a indexu mrazuvzdornosti sledovaných betonů .....	48