

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vývoj rychlotvrdnoucího betonu pro opravy dopravních  
staveb**

**Development of high-early-strength concrete for the  
transport structures repair**

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

vypracovala: Bc. Markéta Škorpilová

2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škorpilová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **486142**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce a dopravní stavby**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vývoj rychlotvrdnoucího betonu pro opravy dopravních staveb**

Název diplomové práce anglicky:

**Development of high-early-strength concrete for the transport structures repair**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši k tématu urychlení tvrdnutí změnou složení betonu:

- Obecně popište průběh hydratace cementu se zaměřením na faktory ovlivňující rychlost průběhu reakce.
- Popište typy cementů a zhodnoťte je z pohledu rychlosti nárůstu pevnosti.
- V literatuře vyhledejte vhodné přísady pro urychlení tvrdnutí betonu a zhodnoťte je.
- Vyhledejte příklady použití rychlotvrdnoucího betonu při opravách dopravních staveb.

Realizujte experimentální program v následujících bodech:

- Vytvořte zkušební vzorky z různých typů cementu a stanovte počátek tuhnutí. Dále ověřte tlakovou pevnost betonu z těchto cementů v raném stádiu.
- Vytvořte zkušební vzorky z vybraného cementu z předchozího bodu s přidáním vhodné přísady a stanovte počátek tuhnutí. Pro vhodné kombinace ověřte tlakovou pevnost betonu v raném stádiu.
- Vyhodnoťte experimentálně získané výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000  
Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005  
Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006  
[www.ebeton.cz](http://www.ebeton.cz)  
[www.scopus.com](http://www.scopus.com)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **01.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## **Prohlášení**

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

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

V Praze dne 5.1.2024

.....

Bc. Markéta Škorpilová

## **Poděkování**

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

## Abstrakt

Diplomová práce nesoucí název “Vývoj rychlotvrdnouceho betonu pro opravy dopravních staveb“ se zaměřuje na opravy letištních ploch a na materiál, který je na tyto opravy vhodný. Téma práce je relevantní pro praxi a vzniklo na základě spolupráce s provozovatelem letiště v Čáslavi, který stanovil požadavky na specifikace materiálu. Splnění stanovených požadavků se stalo cílem experimentální části práce. Práce se skládá ze dvou hlavních částí – části teoretické a části experimentální.

**V teoretické části** jsou představeny dvě hlavní témata. První kapitola poskytuje přehled o cementobetonových vozovkách na letištích, jejich konstrukci, zatížení, únosnosti, provádění, typických formách poškození a metodách oprav. Druhá kapitola je věnována materiálu, rychlotvrdnoucemu betonu, používaném při opravách v těchto specifických podmínkách. Popisuje jeho složení, mechanismus tvrdnutí a faktory, které tento proces ovlivňují.

**V experimentální části** práce je popsán výzkum, který je zaměřen na analýzu a optimalizaci vlastností rychlotvrdnouceho betonu. Byly testovány různé receptury s cílem charakterizovat časy počátku tuhnutí, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Cílem bylo vytvořit beton, který bude po 24 hodinách dosahovat pevnosti 30 MPa v tlaku a 4 MPa v tahu za ohybu, aby byl zajištěn rychlý návrat do provozu. Jako nejvhodnější byla vyhodnocena receptura obsahující na 1 m<sup>3</sup>: 700 kg kameniva frakce 0/4, 1000 kg kameniva frakce 4/8, 430 kg cementu CEM I 52,5 R, 2,1 kg superplastifikační přísady Stacheplast a 10,75 kg urychlovací přísady Betodur A5.

Výsledky diplomové práce představují přínos pro oblast stavebnictví, kde je požadována minimalizace doby výluky z provozu, jako jsou letiště, silnice a mosty. Klíčovým výstupem je doporučení složení rychlotvrdnouceho betonu, které splňuje specifické požadavky oprav letištních vozovek, avšak lze jej aplikovat i v jiných oblastech dopravního stavitelství.

## Klíčová slova

Rychlotvrdnouceho beton, cementobetonové vozovky, cement, slínkové minerály, hydratace cementu, faktory ovlivňující hydrataci, urychlovací přísady, tlaková pevnost, pevnost v tahu za ohybu



## **Abstract**

The focus of the master's thesis titled "Development of high-early-strength concrete for the transport structures repair" is focused primarily on airport pavement repairs and the material suitable for these repairs. The topic of the thesis emerged from collaboration with the operator of the Čáslav airport, which defined the requirements for the material specifications. Meeting these requirements became the goal of the experimental part of the thesis. Thus, the work consists of two main parts – a theoretical part and an experimental part.

**In the theoretical part**, two main topics are introduced. The first chapter provides an overview of cement concrete pavements at airports, their construction, load-bearing capacity, maintenance, typical forms of damage, and repair methods. The second chapter is dedicated to the material, rapid-hardening concrete, used for repairs under these specific conditions. It describes its composition, the hardening mechanism, and the factors that influence this process.

**The experimental part** of the thesis describes research focused on analyzing and optimizing the properties of rapid-hardening concretes. Tests were conducted on various mixtures, examining their time characteristics of setting, compressive strength, and flexural tensile strength. The goal was to create concrete that would reach a compressive strength of 30 MPa and a flexural tensile strength of 4 MPa after 24 hours, ensuring a quick return to service. The most suitable mixture was found to contain per cubic meter: 700 kg of 0/4 aggregate, 1000 kg of 4/8 aggregate, 430 kg of CEM I 52.5 R cement, 2.1 kg of superplasticizer Stacheplast, and 10.75 kg of accelerator Betodur A5.

The results of the master's thesis represent a contribution to the field of construction, especially for situations where a minimization of service disruption is required, such as at airports, roads, and bridges. The key outcome is the recommendation of a rapid-hardening concrete composition that meets the specific requirements of airport pavement repairs and can also be applied in other areas of transportation construction.

## **Key words**

Rapid-hardening concrete, cement-concrete pavements, cement, clinker minerals, hydration of cement, factors affecting hydration, accelerating admixtures, compressive strength, flexural tensile strength

## Obsah

<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Letištní vozovky .....</b>	<b>12</b>
1.1 Konstrukce letištních vozovek .....	12
1.2 Cementobetonové vozovky .....	12
1.3 Konstrukční vrstvy CB vozovek .....	13
1.4 Typy CB krytů dle technologie vyztužování .....	14
1.5 Realizace CB vozovek .....	15
1.6 Zatížení a únosnost letištních vozovek .....	17
1.6.1 Zatížení letištních vozovek .....	17
1.6.2 Únosnost vozovek .....	18
1.7 Poškození cementobetonových vozovek .....	22
1.8 Diagnostika a hodnocení CB vozovek .....	24
1.8.1 Základní metody diagnostiky .....	24
1.8.2 Hodnocení .....	25
1.9 Opravy CB krytů .....	26
1.9.1 Rapid Runway Repair – RRR .....	27
1.10 Příklady oprav pomocí rychlých betonů z praxe .....	30
1.11 Nekvalitní provádění oprav CB krytů .....	34
<b>2. Materiál .....</b>	<b>36</b>
2.1 Slínekové minerály .....	37
2.2 Cementářské moduly .....	38
2.3 Hydratace cementu .....	40
2.3.1 Teorie hydratace .....	40
2.3.2 Stádia hydratace .....	41
2.4 Hydratované produkty tvořící ztvrdlý cement .....	44
2.5 Faktory ovlivňující hydrataci .....	46
2.5.1 Vliv teploty .....	46
2.5.2 Vliv vlhkosti .....	47
2.5.3 Vliv jemnosti cementu .....	49
2.5.4 Vliv vodního součinitele .....	50
2.5.5 Vliv příměsí .....	52
2.5.6 Vliv přísad .....	53
2.6 Druhy cementů .....	63



<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>66</b>
3.1 Představení experimentu .....	66
3.2 Cíl experimentu.....	66
3.3 Zkoušky cementové pasty .....	67
3.3.1 Stanovení normální konzistence .....	68
3.3.2 Stanovení počátku tuhnutí cementu .....	70
3.4 Výroba betonových zkušebních vzorků .....	73
3.4.1 Receptury betonu .....	73
3.4.2 Použité materiály .....	75
3.4.3 Použité přístroje .....	77
3.4.4 Postup výroby .....	78
3.5 Destruktivní zkoušky betonu .....	79
3.5.1 Zkouška tlakové pevnosti betonu.....	79
3.5.2 Zkouška pevnosti betonu v tahu za ohybu .....	81
3.6 Vyhodnocení výsledků.....	83
3.6.1 Vyhodnocení tlakových pevností.....	83
3.6.2 Vyhodnocení tahových pevností.....	85
3.6.3 Porovnání druhů cementu .....	86
3.6.4 Účinnost urychlovací přísady .....	88
3.6.5 Zhodnocení speciální malty SANATOP TIX .....	90
3.6.6 Ekonomické zhodnocení .....	90
3.6.7 Porovnání výsledků s jinými autory .....	91
<b>4. Závěr .....</b>	<b>94</b>
<b>5. Seznam použitých obrázků .....</b>	<b>95</b>
<b>6. Seznam použitých tabulek.....</b>	<b>97</b>
<b>7. Reference .....</b>	<b>98</b>
<b>8. Přílohy .....</b>	<b>101</b>
8.1 Protokoly z provedených zkoušek .....	101
8.2 Statistické výpočty provedených zkoušek .....	105
8.3 Technické listy, prohlášení o vlastnostech, evidenční listy přístrojů.....	113

## Seznam použitých zkratk:

CB	Cementobeton
RWY	Runway
TWY	Taxiway – pojezdová dráha
APN	Apron – odbavovací dráha
ICAO	International Civil Aviation Organization – Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ESWL	Equivalent Single Wheel Load - Ekvivalentní zatížení
ACN	Aircraft Classification Number - Klasifikační systém
PCN	Pavement Classification Number - Klasifikační systém
LCN	Load Classification Number - Klasifikační systém
IPZ	Index Provozní Způsobilosti
NATO	Severoatlantická aliance
STANAG	Standardization Agreement - standardizační dohoda NATO
C <sub>3</sub> S	trikalciumsilikát
C <sub>2</sub> S	dikalciumpsilikát
C <sub>3</sub> A	trikalciualuminát
C <sub>4</sub> AF	tetrakalciumaluminátferit

## Úvod

Rychlé opravy dopravních staveb jsou klíčové pro udržení plynulosti a bezpečnosti veškerého dopravního provozu, a to nejen v civilní, ale i ve vojenské infrastruktuře. V civilním sektoru mohou být následky zpoždění oprav nepříjemné a mohou způsobit ekonomické ztráty nebo nepohodlí pro veřejnost. V armádním prostředí však mohou mít zpoždění v opravách dopravních staveb, jako jsou silnice, mosty a zejména letiště, mnohem závažnější důsledky. Tato diplomová práce se věnuje vývoji rychlotvrdnoucího betonu, který je klíčovým materiálem pro efektivní a rychlé opravy.

Armádní letiště jsou nezbytnou součástí obranné infrastruktury státu a mají zásadní význam pro národní bezpečnost. Česká republika, která je součástí mezinárodních vojenských aliancí jako NATO, musí být schopna rychle mobilizovat a poskytovat podporu spojencům, což vyžaduje neustálou provozuschopnost. Téma diplomové práce vznikla na základě spolupráce s provozovatelem letiště v Čáslavi, které je jedno ze 4 aktivních vojenských letišť v České republice. Každé vojenské letiště v České republice má své specifické úkoly, vybavení a jednotky, které na něm působí. Vojenské letiště v Čáslavi je vybaveno pro provoz moderních stíhacích letounů JAS-39 Gripen, včetně speciálně upravené vzletové a přistávací dráhy, která umožňuje operace těchto letadel. Dráhy musí splňovat náročné požadavky na nosnost a povrch, aby vyhovovaly charakteristikám a potřebám těchto letounů.

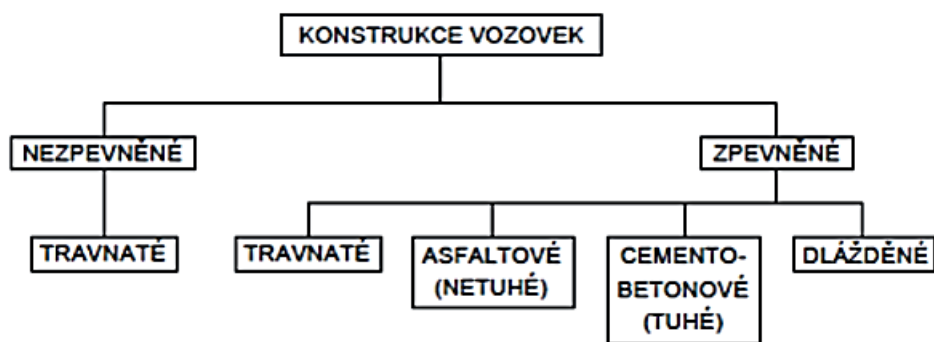
V části teoretické jsou vysvětleny konstrukce letišť a velká část je věnovaná také samotnému materiálu. Zásadní složkou rychlotvrdnoucích betonů je cement, který je spouštěčem procesu tvrdnutí a tuhnutí. Pochopení těchto procesů je podstatné pro správný výběr materiálů a technik, které zajistí rychlou a trvalou opravu. Cílem experimentální části práce je vytvořit beton s takovými mechanickými vlastnostmi, který by mohl být využíván na opravy přistávacích drah stíhacích letounů.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Letištní vozovky

### 1.1 Konstrukce letištních vozovek

Konstrukce letištních vozovek jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií: zpevněné a nezpevněné vozovky. Obě kategorie se dále rozdělují do dalších podkategorií, viz schéma na obrázku 1. [1]



Obrázek 1: Rozdělení konstrukcí vozovek [1]

Níže jsou podrobněji popsány pouze cementobetonové (tuhé) kryty, které se používají na konstrukce letištních ploch.

### 1.2 Cementobetonové vozovky

Cementobetonové vozovky jsou známé svou trvanlivostí, odolností vůči otěru, odolností vůči klimatickým účinkům a minimálními náklady na údržbu. Tyto vozovky se primárně používají při výstavbě dálniční sítě, letištních drah, industriálních ploch a parkovišť s velkým statickým zatížením. Opravy jsou technologicky, časově i ekonomicky náročné, proto je důležité, znát možné mechanismy porušení a snažit se jim předcházet. [5]

### 1.3 Konstrukční vrstvy CB vozovek

Letištní vozovka je tvořena jednotlivými konstrukčními vrstvami, jejichž únosnost klesá směrem k podloží. Tuhé kryty nejsou tolik plastické, tudíž je musíme navrhovat pouze na kvalitním podloží s rovnoměrnou únosností, která nemění svůj objem účinkem mrazu a vlhkosti. Také během provozu musíme neustále sledovat, jestli se podloží nehýbe a nedochází k deformaci vozovky. [9] [5]

Návodem pro volbu tloušťky cementobetonové desky a skladbu podkladních konstrukčních vrstev tuhých vozovek je Katalog vozovek pozemních komunikací a Technické podmínky, TP 170, které mají účinnost od roku 2004. [9]

Mezi vstupní údaje pro práci s TP 170 patří:

- Dopravní zatížení
- Návrhová úroveň porušení
- Charakteristiky zeminy
- Klimatické podmínky

#### Podloží vozovky (aktivní zóna)

Aktivní zóna je horní vrstva zemního tělesa na násypu nebo i v zářezu o tloušťce zpravidla 0,5 m, do níž zasahují vlivy zatížení a klimatu. Podle normy ČSN 73 6133 se v této zóně nedovoluje použít zeminu s objemovou hmotností suché zeminy stanovené Proctorovou zkouškou nižší než  $1600 \text{ kg/m}^3$  a zeminu nevhodnou pro podloží dle normy ČSN 73 6133 o stupni vhodnosti vyšším než VI u násypu a o stupni vhodnosti vyšším než V v zářezu. [9] [5]

#### Ochranná vrstva

Na upravenou pláň se rozprostře ochranná vrstva z nenamrzavých nestmelených materiálů, jako jsou štěrkopísek, mechanicky zpevněná zemina nebo štěrkodeř. U letištních vozovek se nejčastěji využívá štěrkodeř s třídou zrnitosti  $G_E$ , dle kategorie zrnitosti ČSN EN 13285. [9]

Ochranná vrstva je určena zejména k ochraně vozovky před účinky promrzání podloží, také roznáší tlaky do podloží a zabraňuje vzlínání kapilární vody. [9] [5]

### Podkladní vrstva

Podkladní vrstva se obvykle skládá z jedné nebo dvou vrstev. Jejím úkolem je roznášet zatížení od podvozku letadla, které na něj přechází z vrstev krytu, na dostatečně velkou plochu podsypu a podloží. Podkladní vrstva také zajišťuje, aby nedošlo k nepřijatelným deformacím podloží, a také přispívá k ochraně podloží před jeho promrznáním. [9] [5]

Podkladní vrstvy se dělí na stmelené a nestmelené. Nestmelené podkladní vrstvy se používají pro vozovky nižších skupin dopravního zatížení. Pro letištní vozovky se používají stmelené podkladní vrstvy, což znamená, že jsou jednotlivá zrna kameniva nebo zeminy spojena pojivem, kterými může být cement nebo vápno. [9]

### Krycí vrstva

Kryty letištních vozovek jsou tvořeny souborem CB desek, které vzniknou rozdělením celistvého povrchu CB krytu v důsledku vytváření jednotlivých druhů spár. Prováděcí norma ČSN 73 6123-1 dělí cementobetonové kryty podle dopravního významu vozovky a třídy dopravního zatížení do tří skupin: CB I, CB II a CB III. Letištní plochy společně s dálnicemi a silnicemi I. třídy patří do skupiny CB I, která má nejprísnejší požadavky na návrh, materiály, vlastnosti a způsoby provádění. Norma také obsahuje informace o kontrole kvality a přijímacích zkouškách. Na letištních plochách se zpravidla navrhují dvouvrstvé kryty. [9] [5]

## **1.4 Typy CB krytů dle technologie vyztužování**

Existuje několik typů CB krytů dle technologie vyztužování [3][4]:

- Kryt z prostého betonu:

U tohoto typu jsou spáry kotvené, případně bez kotev. Kryt z prostého betonu může být prováděn jako jednovrstvý nebo dvouvrstvý.

- Kryty lehce vyztužené:

Lehce vyztužené kryty obsahují 1 – 5 kg výztuže na 1 m<sup>2</sup>. Výztuž může být v jedné či ve dvou vrstvách. Tento typ se používá hlavně pro rekonstrukční vrstvy.

- Tenká vyztužená CB deska (TEVYCED):  
Deska má tloušťku 100 – 160 mm a je vyztužená KARI sítěmi, při horním i dolním líci.
- Desky s kontinuální výztuží (SPOVYCED):  
Desky s kontinuální výztuží obsahují 7 – 12 kg výztuže na jeden m<sup>2</sup> (stupeň vyztužení je cca 0,75 %). Principem je rozdělení desky na soustavu bloků rozdělených mikrotrhlinami, které jsou navlečeny na podélnou výztuž. Podélná výztuž je spojitá a na obou koncích ukotvena v betonových blocích. Tento typ má využití také při rekonstrukcích dálnic a letišť. U nás je použit ve Strahovském tunelu.

## 1.5 Realizace CB vozovek

CB kryty jsou prováděny pomocí speciálních finišerů v souvislých pásech o různých šířkách. Abychom minimalizovali vznik smršťovacích trhlin, je nutné po betonování v předepsaném čase provést nařezání smršťovacích příčných spár. Tyto spáry se nařezou do určité hloubky, tím se průřez oslabí a samovolně praskne. Takto vytvořené spáry se musí utěsnit, aby se zamezilo vnikání vody. Poloha a rozmístění spár tak určuje velikost jednotlivých desek. [5] [9]



Obrázek 2: Detail smršťovací spáry [11]

Moderní a dnes téměř jediná používaná metoda na letištní plochy je betonování pomocí finišerů s posuvnými bočnicemi, které se posouvají po povrchu podkladní vrstvy. Bednění je vlečeno a beton tedy musí mít takovou konzistenci, aby bylo možné formovat hrany desky. Výška nivelety a rovinnost jsou určeny přesností vedení finišeru, což se zajišťuje buď vodícím drátem nebo laserovým zařízením. Postup práce spočívá v tom, že nejprve nákladní auta s vyklápečí korbou vysypou čerstvý beton před první finišer, který následně beton rozetře přes celou šířku pruhu. Finišer je vybaven zařízením pro roztírání čerstvého betonu až k bočnicím, vibrátory pro hutnění, desku pro zarovnání povrchu a často také zařízením pro umístění kluzných trnů. Celý proces musí být řízen tak, aby finišer nezastavoval a pokládka byla kontinuální, jinak mohou vznikat povrchové nerovnosti a nehomogenita povrchu. [5] [6]



*Obrázek 3 Fotografie provádění CB krytu [5]*

Při použití kotvení příčných spár kluznými trny se využívá takzvaná dvouvrstvá technologie pokládky. Po zhotovení první vrstvy se do čerstvého betonu vkládají trny pomocí automatizovaného vibračního vtlačovacího stroje. Neprodleně po umístění trnů se pokládá druhá vrstva betonu pomocí druhého finišeru obdobným způsobem. Na konci celé soupravy je pracovní plošina nanášející na povrch betonu postřík, filmotvornou látku, která má za úkol zpomalit tuhnutí betonu tak, aby bylo možno povrch následně finálně upravit. [5] [6]



Nedílnou součástí provádění CB krytů je také vytváření dilatačních spár. Tyto spáry určují, kde budou desky dilatovat a tím zamezí tvorbě náhodných trhlin a následnému pronikání povrchové vody těmito trhlinami až do podkladních vrstev. Tvorba dilatačních spár probíhá následovně: řezání spár v tvrdnoucím betonu, rozšíření spár, zkosení hran a těsnění spár. Doba od pokládky k zahájení řezání spár je různá. V krajních případech se pohybuje od 4 hodin do 48 hodin podle denní doby, teploty a působení dalších povětrnostních vlivů. [5] [6] [7]

## 1.6 Zatížení a únosnost letištních vozovek

### 1.6.1 Zatížení letištních vozovek

Únosnost letištní vozovky je definováno jako schopnost přenést zatížení, které je určeno hmotností letadla, typem podvozku, počtem kol na hlavních podvozkových nohách, uspořádáním kol na podvozku a tlakem v pneumatikách. [10][1]

Všeobecně platí, že únosnost musí vyhovovat maximálnímu zatížení kritického letadla pro dané letiště. Toto zatížení se nazývá kritické zatížení. [10][8]

Zatížení letadla na povrch letištní vozovky se přenáší obvykle dvěma hlavními podvozkovými nohami a předním nosovým kolem. Přední nosové kolo přenáší přibližně 10 % celkového zatížení a na hlavní podvozkové nohy pak připadá přibližně zbylých 90 %. Velikost rozhodujícího zatížení vozovky, které je vyvoláno hlavní podvozkovou nohou, závisí na velikosti styčné plochy podvozkových kol. Z tohoto důvodu jsou hlavní podvozkové nohy větších letadel opatřeny dvěma, čtyřmi i více koly. [10][1]

V nejjednodušším případě má hlavní noha podvozku jen jedno kolo a velikosti zatížení se stanoví ze vzorce [8] [10]:

$$A = \frac{Q}{P_0}$$

Kde:

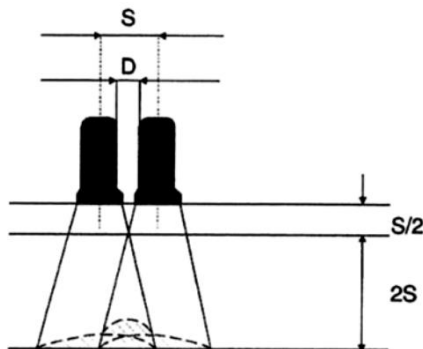
$A$ ... Dotyková plocha pneumatiky [m<sup>2</sup>]

$Q$ ... Zatížení přenášené hlavní podvozkovou nohou [N]

$P_0$ ... Huštění pneumatik [Pa] vynásobené kontrakčním součinitelem, který se pohybuje v rozmezí 1,03 – 1,1



Má-li noha dvě, čtyři nebo více kol, pak zatížení, vyvolávaná jednotlivými koly, se částečně sčítají, respektive překrývají v závislosti na vzájemné vzdálenosti kol a na vlastnostech vozovky viz obrázek 4. Je zde také znázorněna závislost zatížení na tloušťce konstrukce vozovky. [8][10]



Obrázek 4: Průběh zatížení na vozovce při působení dvoukolového podvozku [8]

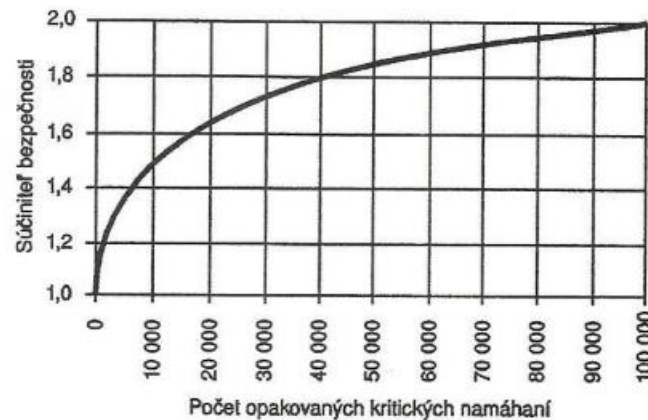
## 1.6.2 Únosnost vozovek

Pro dimenzování vozovky se používá Westergaardova metoda, což je metoda založena na teorii pružnosti, která využívá rovnice rovnováhy a vztahy mezi napětími a deformacemi. Je obzvláště užitečná pro analýzu plošných zatížení. [8] [10]

Kritická místa na letišti jsou především odbavovací plochy a stojánky letadel. Na těchto místech vyvíjí hmotnost letadla maximální sílu, protože je v klidu a výsledná síla působí kolmo na povrch vozovky, což je dáno tím, že má kinetickou energii nulovou a statickou energii maximální. Kromě toho letadlo vytváří vibrace, když jsou jeho motory v provozu, proto jsou také vysoce namáhány i pojezdové dráhy s pomalu se pohybujícími letadly. [10]

Často převládá mylný názor, že nejvíce namáhána je vzletová a přistávací dráha. V okamžiku dotyku letadla a vozovky při přistání má však letadlo ještě dostatečný vztlak a ani při nesprávném přistání, kdy dynamické účinky přesahují 40 % maximální vzletové hmotnosti letadla, zátěž není větší, než kdyby letadlo stálo na místě. [8] [10]

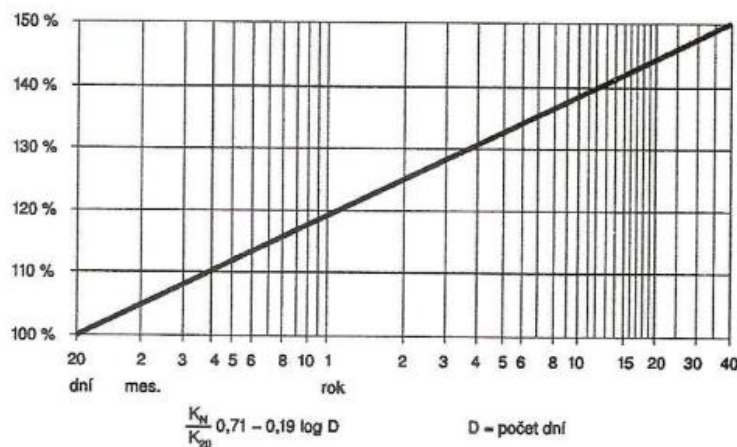
Stejně jako jiné konstrukce, i letištní vozovka má svou únavovou životnost. Například vozovka může být navržena tak, aby vydržela 10000 pohybů s určitým maximálním zatížením. Během provozu se postupně vyčerpává životnost vozovky a její pevnost klesá. [8]



Obrázek 5 Vliv počtu opakování na únosnost desky [8]

Jak je vidět na obrázku 5, po 100 000 opakovaných zatíženích se pevnost v tahu snižuje téměř na polovinu. [8][1]

Na druhé straně s přibývajícím časem roste pevnost betonu. Dá se říci, že beton stárne. Tato vlastnost betonu může do určité míry snížit vliv únavy z opakovaných zatížení a je s ní možné počítat v případě, že zatížení vozovky kritickým letadlem nastane až po několika letech po ukončení výstavby. Průběh stárnutí se odvíjí od zvolené betonové směsi a od její kvality. Všeobecně je možné průběh stoupající pevnosti betonu vyjádřit logaritmickou závislostí uvedenou na obrázku 6. [8][1]



Obrázek 6 Růst pevnosti betonu v tahu [8]

Vlastnosti CB desky jsou při hodnocení konstrukce vzhledem k zatížení charakteristik letadlového podvozku vyjádřeny poloměrem její relativní tuhosti, který je určen následujícím vztahem. [8][10]

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu)k}}$$

kde je:

$D$  ohybová tuhost desky  $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)}$

$E$  modul pružnosti betonu v tahu a tlaku [ $\text{Nm}^{-2}$ ]

$\mu$  Poissonova konstanta  $\mu = 0,15$

$k$  modul reakce podloží [ $\text{Nm}^{-3}$ ]

Z uvedeného vzorce vyplývá, že únosnost vozovky je v rozhodující míře ovlivněna:

- Kvalitou betonu vyjádřené modulem pružnosti betonu  $E$
- Tloušťkou betonové desky  $h$
- Kvalitou podloží charakterizovanou modulem reakce podloží  $k$

### Stanovení únosnosti

Informace týkající se únosnosti letištních vozovek jsou klíčové pro zajištění trvanlivosti vozovky při její optimální životnosti, určení typů letadel, která mohou danou vozovku využívat a jejich maximální vzletové hmotnosti. Naopak jsou tyto informace také důležité pro návrh podvozků letadel tak, aby byly kompatibilní s většinou obvyklých letišť. Skutečná únosnost se v praxi liší od teoretických hodnot a je ovlivněna mnoha faktory. Z tohoto důvodu je skutečná únosnost zjišťována po realizaci pomocí zatěžkávacích zkoušek. [10] [8]

Existují **3 základní metody** posuzování zatížení [10]:

- Ekvivalentní zatížení (Equivalent Single Wheel Load - ESWL):

Tato metoda je používána pro vyjádření účinku podvozku s více koly. Představuje teoretické zatížení, které jednokolový podvozek přenáší na vozovku a které způsobí stejné napětí nebo deformaci jako skutečné zatížení přenášené podvozkem s více koly. [10]

- Klasifikační systém LCN (Load Classification Number):

Klasifikační systém LCN v podstatě nahradil hodnoty ESWL a huštění pneumatik bezrozměrnými klasifikačními čísly, stanovenými pro danou konstrukci letištní plochy buď výpočtem anebo na základě zatěžovacích zkoušek. Metoda LCN byla odvozena od výsledků velkého počtu zkoušek, které prokázaly, že mezi velikostí zatížení vozovek a mezi velikostí plochy, kterou se toto zatížení potřebné k poškození vozovky přenáší na její povrch, je závislost. [10] [8]

- Systém ACN/PCN (Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number):

Systém ACN/PCN je mezinárodně uznávaný standard pro hodnocení únosnosti letištních ploch v kontextu kompatibility s konkrétními typy letadel.

Podle předpisu *L14 Letiště* musí být únosnost vozovky určené pro letadla o hmotnosti větší než 5700 kg vyjádřena metodou klasifikačního čísla letadla a klasifikačního čísla vozovky ACN/ PCN. [10] [1] [8]

**ACN** = číslo vyjadřující relativní účinek letadla na vozovku (čtyři typy podloží)

**PCN** = číslo vyjadřující únosnost vozovky při neomezeném počtu pohybů

V praxi je důležité, aby se po letištních vozovkách pohybovala letadla, která mají číslo ACN nižší, nebo minimálně shodné jako je číslo, které vyjadřuje únosnost vozovky, tedy PCN, aby nedocházelo k přetěžování vozovky. V praxi je možné v jednotlivých případech, nebo jen krátkodobě povolit provoz letadel s ACN vyšším než PCN daného letiště. [10] [8]

Kolo o hmotnosti 500 kg s huštěním 1,25 MPa představuje zatížení 1 ACN. Vozovka, která má únosnost odpovídající tomuto zatížení, má únosnost 1 PCN. Z tohoto příkladu

vyplývá, že metoda ACN – PCN je jednoduchá metoda hlášení únosnosti, ale je nutné znát ACN jednotlivých letadel. [10] [1] [8]

Počítačový program, který byl vyvinut firmou Portland Cement Association z USA a poskytnut ICAO, stanovil ACN pro většinu používaných letadel. Hodnoty ACN jednotlivých letadel jsou uvedeny jako příloha v L14. Podobně pro nové typy letadel může ICAO stanovit ACN na základě poskytnutých podkladů. [1] [8]

PCN pro dané letiště se může měnit v čase a může být různé pro jednotlivé části letištní vozovky jako je runway (RWY), Taxiway (TWY) a odbavovací plochy (APN). [8]

## 1.7 Poškození cementobetonových vozovek

U CB vozovek rozeznáváme několik mechanismů poruch způsobených různými faktory. První z nich je únavové praskání vozovky, které se objevuje, když poměrné přetvoření překoná tahovou kapacitu betonu. Tento typ poruchy se běžně projevuje olamováním rohů desky nebo podélnými trhlinami v trajektorii kolového zatížení působícího na desku. Dalším mechanismem poruchy je ztráta podpory desky, vyvolaná selháním podkladního systému, tomuto problému lze předcházet provedením podkladního systému s lepšími a trvanlivějšími materiály. Velký problém především pro desky s velkým počtem příčných spár je vnikání vody a s tím související poškození mrazovými cykly. Tomuto poškození lze předcházet těsněním spár, to ale není proveditelné dokonale voděvzdorně a trvanlivě, nebo použitím provzdušňovačů, čímž se vytvoří prostor pro expanzi vody při zmrznutí. Je samozřejmě i několik dalších faktorů jako je ohlazení povrchu a ztráta protismykových vlastností nebo naopak vytvoření nerovnoměrností na povrchu desky. V neposlední řadě je třeba zahrnout vzniku mapových trhlin vlivem smrštění betonu. [5] [7]

Poruchy CB krytů jsou níže rozepsány do skupin podle jejich vnějších projevů dle TP 62:

- Poruchy povrchu

Do této skupiny patří:

- Jamka
- Výtluk
- Mapové trhlinky
- Koroze povrchu
- Plošný rozpad povrchu
- Povrch narušený požárem

- Poruchy na spárách bez destrukcí

Do této skupiny patří:

- Nefunkční nebo chybějící těsnění podélné spáry
- Nefunkční nebo chybějící těsnění příčné spáry
- Rozestoupená podélná spára
- Rozestoupená příčná spára
- Vzájemný horizontální posun betonových pruhů

- Poruchy na spárách s destrukcemi

Do této skupiny patří:

- Rozpad betonu na podélné spáře
- Rozpad betonu na příčné spáře
- Oprýskaná hrana desky
- Ulomená hrana desky
- Rozdrcený roh na styku desek

- Trhliny

Do této skupiny patří:

- Podélná trhlina
- Oblouková trhlina
- Příčná trhlina
- Šikmá trhlina
- Nepravidelná trhlina
- Ulomený roh desky
- Podélné trhliny vícečetné, v přibližně konstantních vzdálenostech
- Trhlina nad kluzným trnem
- Trhlina nad kotvou
- Trhlina podél konců kotev nebo kluzných trnů

- Deformace nivelety

Do této skupiny patří:

- Rozlomená deska
- Pumpování desky



- Vertikální posun desek na příčné spáře (schůdky)
  - Vertikální posun na podélné spáře
  - Střechovitý zdvih desek
  - Pokles desek
  - Vystřelení desky
  - Nerovnosti na styku cementobetonového a asfaltového krytu
  - Zvlnění cementobetonového krytu
- Jiné poruchy

Do této skupiny patří:

    - Poruchy způsobené alkalicko-křemičitou reakcí kameniva v betonu
    - Porucha odvodnění
    - Provizorní vyspráva / porucha vysprávk

## 1.8 Diagnostika a hodnocení CB vozovek

Pomocí moderních diagnostických zařízení je možné převážně nedestruktivně ověřit parametry pozemních a letištních vozovek. Výsledky diagnostických metod rozepsaných níže poskytují podklady pro zodpovědné rozhodování ve všech fázích projektové přípravy, realizace staveb i následné správy vozovek (údržby a oprav). [5] [12]

Výsledky diagnostických průzkumů mají všestranné využití [12]:

- dávají projektantům podklady pro zodpovědný, technicky správný a ekonomicky optimální návrh opravy nebo rekonstrukce vozovky,
- zhotoviteli díla umožňují sledovat kvalitu prováděných prací,
- objednateli zkontrolovat dílo při jeho převzetí, resp. před uplynutím záruční doby,
- správce komunikací může s využitím výsledků diagnostických prací sledovat průběžně stav vozovek a na základě toho plánovat jejich údržbu a opravy v optimální době a rozsahu

### 1.8.1 Základní metody diagnostiky

Výběr vhodných metod je vždy určen požadovaným využitím výsledků diagnostického průzkumu a aktuálním stavem vozovky. Podle účinku na stavební konstrukce se zkušební



metody dělí na nedestruktivní a destruktivní. Zatímco nedestruktivní zkoušky (měření nerovností, drsnosti, zatěžovací zkoušky apod.) většinou simulují interakci vozidla s vozovkou, destruktivní zkoušky (jádrové vývrty, zkoušky pevnosti materiálu apod.) testují konstrukční materiály až do porušení jejich celistvosti, resp. tvaru. [12] [7]

Základními metodami diagnostiky vozovek jsou [12]:

Nedestruktivní:

- měření proměnných parametrů vozovky (nerovnosti, drsnost, schodky, apod.)
- inventarizace poruch
- měření únosnosti vozovky, resp. podloží

Destruktivní:

- odběr jádrových vývrtů a provádění sond
- zjištění materiálových charakteristik vrstev vozovky – laboratorní zkoušky odebraných vzorků

## 1.8.2 Hodnocení

Výsledky diagnostického průzkumu jsou pak prezentovány přímo měřenými nebo výpočetními fyzikálními veličinami (např. moduly pružnosti), nebo nepřímo, např. pomocí souhrnných mezinárodních klasifikačních indexů [7]:

- PCI – Pavement Condition Index – hodnocení stavu vozovky na základě četnosti a závažnosti registrovaných poruch
- IPZ – Index Provozní Způsobivosti – klasifikace registrovaných poruch povrchu vozovek a dalších měřených parametrů vozovek (nerovnosti, drsnosti) vícebodovou klasifikační stupnicí
- PCN – Pavement Classification Number – klasifikace únosnosti letištních vozovek zohledňující i dopravní zatížení a další vlivy na konstrukci vozovek

Závěrem diagnostického průzkumu může být stanovení charakteristik jednotlivých konstrukčních vrstev nebo celé konstrukce vozovky, případně vyhodnocení určitého klasifikačního indexu. Závěrem může být ale i návrh vhodných opatření k udržení stavu vozovky, případně zvýšení její provozní způsobilosti, resp. výkonnosti. [12]



## 1.9 Opravy CB krytů

Celý proces oprav zahrnující výrobu, dopravu a ukládání betonu včetně všech následných kroků ošetření, dilatování atd. je velmi náročný na technologickou kázeň pracovníků a odborné znalosti techniků i dělníků. Pro správnou funkci je nutno dodržovat velmi úzké meze všech technologických kroků. Každé vybočení z těchto mezí (nedodržení vodního součinitele, nepřesnost dávkování, špatné odhadnutí povětrnostních poměrů na stavbě apod.) znamená těžko napravitelný problém. Ve většině případů následuje buď nedodržení požadovaných parametrů, nebo nutnost čerstvý beton odstranit. Vnější vlivy, které nejvíce působí na proces tuhnutí a tvrdnutí betonu, jsou teplota vzduchu, intenzita slunečního svitu a proudění vzduchu. [14] [7]

### Druhy oprav CB letištních vozovek

V případě vzniku poruchy je nutné realizovat opravu cementobetonové kryty.

Opravy letištních ploch se dělí na:

- Běžné opravy plánované

Plánované opravy jsou prováděny jako součást preventivní údržby s cílem zachovat její bezpečnost a provozuschopnost. Tyto opravy jsou plánovány dopředu a začleněny do rozpočtu letiště. Plánované opravy mohou zahrnovat opravy trhlin, údržbu povrchu, opravy dilatačních spár, obnovu označení, údržbu odvodňovacího systému a další pravidelné úkoly. [7]

- Běžné opravy havarijní

Havarijní opravy jsou reakcí na neočekávané události, jako jsou nehody, přírodní katastrofy nebo jiné mimořádné situace, které narušují bezpečnost nebo provozuschopnost letiště. Tyto opravy vyžadují okamžitou reakci a prioritní pozornost, aby se minimalizovalo riziko pro letecký provoz. Havarijní opravy mohou zahrnovat opravy poškozených panelů, odstraňování nebezpečných překážek, odstraňování trosek nebo další akce k obnovení bezpečnosti. [7]

- Opravy zásadního charakteru

Opravy zásadního charakteru jsou komplexní a významné projekty, které mají za cíl zlepšit nebo změnit strukturu letištní infrastruktury. Mohou být prováděny jako reakce

na změny ve standardech, zvýšení provozu nebo jiné strategické důvody. Tyto opravy mohou vyžadovat dlouhodobý plán a větší investice. Opravy zásadního charakteru mohou zahrnovat výměnu většího souboru CB desek, rozšíření dráhového systému, změny ve struktuře vozovek, instalaci nových technologií a další. [7]

- Rekonstrukce dráhového systému

Rekonstrukce dráhového systému je komplexní projekt, který zahrnuje obnovu a změny na dráhách, včetně jejich povrchu a struktury, aby byla zajištěna dlouhodobá bezpečnost a efektivita provozu. Rekonstrukce dráhového systému mohou zahrnovat nahrazení starého povrchu, včetně zásahu do podkladních a dalších vrstev letištní vozovky. Tyto projekty vyžadují pečlivé plánování a často vedou ke krátkodobým uzávěrám dráhy nebo omezení provozu. [7]

### 1.9.1 Rapid Runway Repair – RRR

Metoda Rapid Runway Repair (RRR), neboli rychlá oprava vzletových a přistávacích drah, má své kořeny ve vojenských strategiích, které vznikly během druhé světové války. Tehdy bylo důležité zajistit, aby letiště poškozená v důsledku nepřátelského bombardování mohla být co nejrychleji obnovena a opět plně funkční pro vojenské operace. [41]

Koncept RRR se začal dále rozvíjet během studené války, kdy NATO a vojenské síly Spojených států a dalších zemí hledaly způsoby, jak zajistit rychlou opravu letištních drah v případě útoku. V této době byly vyvinuty standardizované postupy a speciální opravárenské sady, které umožňovaly efektivní a rychlou reakci na poškození vzletových a přistávacích drah. [41] [42]

V roce 2016 zveřejnilo NATO standardizační dohodu (STANAG) 2929 o této problematice. Poskytuje údaje a prvky užitečné také pro civilní sektor, když je potřeba rychlá oprava. Standardní poškození povrchu je zde definováno jako kráter s reálným průměrem 12 m a maximální hloubkou 3 m. Termín „reálný průměr“ se vztahuje nejen na skutečný kráter způsobený nárazem, ale také na okolní poškozený povrch. Za takových podmínek mohou být použity dvě hlavní kategorie oprav: opravy modulární s prefabrikovanými prvky a opravy na místě. [41] [42]

**V současnosti se využívají tři typy modulárních oprav:**

- Oprava pomocí sklolaminátových rohoží

Nespojitost povrchu se vyplní kamenivem s kontrolovanou granulometrií, které se následně válcuje a vyrovnává s okolním povrchem. Na to se položí sklolaminátová rohož z několika vrstev skleněných vláken impregnovaných polyuretanovými nebo polyesterovými pryskyřicemi. Rohož se nakonec ukotví k povrchu pomocí šroubů. Tato metoda je jednoduchá a rychlá, nejdéle trvá její upevnění. Tato metoda je na obrázku 7. [42]

- Oprava pomocí prefabrikovaných betonových desek:

Betonové desky o rozměrech zpravidla  $1,5 \times 1,5$  m a tloušťce 15 cm se pokládají na vyrovnávaný základ, který je 15 cm pod konečnou úrovní povrchu. Desky mají po obvodu ocelový ochranný profil, dvojitou vnitřní výztuž a dvě drážky pro manipulaci. Systém zajišťuje nosnost a dlouhodobou trvanlivost, avšak je nutné přesně řezat existující povrch tak, aby odpovídal počtu desek. Tato metoda je na obrázku 8. [42]

- Oprava pomocí kovových rohoží:

Prefabrikované kovové prvky jsou vhodné jak pro zapuštění, tak pro pokrytí. Obvykle se používají hliníkové rohože o tloušťce 4 cm díky jejich vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Spojení jsou jednoduchá a přesná, vnější prvky jsou svázány šrouby. Tato metoda je na obrázku 9. [42]



Obrázek 7: kotvení sklolaminátové rohože [42]



Obrázek 9: Prefabrikované betonové desky [42]



Obrázek 8: Kovové rohože [42]

Opravy na místě obnovují kontinuitu povrchu vyplněním kráteru nebo diskontinuity. Používají se rychlotvrdnoucí betony, malty pojené pryskyřicí nebo bitumenové emulze.

### **Jsou možné tři typy zásahů oprav na místě:**

- **Obnova perkolací:**

Kráter je vyplněn materiálem (o průměru 10 – 70 mm), který se při havárii vysypal z kráteru samotného. Následně se do kráteru přidává další kamenivo o vhodné zrnitosti, aby se dosáhlo hladkého vyplnění až do úrovně okolního terénu. Tento materiál slouží jako základní vrstva, která poskytuje podporu pro finální povrch. Pro dokončení opravy se použije perkolace cementových nebo bitumenových pojiv. Perkolace zde znamená, že pojivo proniká skrz zrnitý materiál a spojuje jednotlivá zrna dohromady, čímž se vytvoří pevný a odolný povrch. Zrnitost materiálu použitého pro finální vrstvu se liší v závislosti na typu pojiva. Pro bitumenové pojivo se používá jemnější materiál s velikostí zrn 10–25 mm, zatímco pro cementové pojivo se používá hrubší materiál o velikosti 25–70 mm. [42]

- **Obnova povrchovým vyplněním:**

Tato metoda se používá pro menší poškození, kde hloubka kráteru nevyžaduje hluboké vyplnění. Kráter se nejprve vyplní materiálem s vhodnou zrnitostí, podobně jako v předchozím popsaném případě, avšak vyplnění se provede pouze do výšky 5 – 8 cm pod konečnou úroveň povrchu. Na tuto přípravnou vrstvu se poté aplikuje povrchová vrstva studeného asfaltu. Studený asfalt je směs asfaltového pojiva, kameniva a speciálních přísad, které se mohou aplikovat a kompaktovat při nižších teplotách, což zjednodušuje a urychluje opravy. [42]

- Obnova hlubokým vyplněním:

Tato metoda je vhodná pro větší poškození, kde je potřeba hlubší oprava a větší stabilita opraveného úseku. Kráter se vyplní materiálem do výšky 20–30 cm od konečné úrovně povrchu. Tímto se zajistí, že základní vrstva bude dostatečně silná a stabilní. Po vyplnění a ztuhnutí této základní vrstvy se použije obyčejný beton pro vytvoření finální vrstvy, která obnoví povrch do původního stavu. Obyčejný beton poskytne potřebnou pevnost a odolnost pro náročnější podmínky a je vhodný pro oblasti s vyšší zátěží nebo tam, kde je vyžadována delší trvanlivost opravy. [42]

## 1.10 Příklady oprav pomocí rychlých betonů z praxe

### Oprava stojánky West v Pardubicích

Níže jsou fotografie z opravy CB krytu stojánky West na letišti v Pardubicích. Na obrázku 11 je vidět příprava prostoru CB desky k betonáži, včetně armování a kluzných trnů. Původní konstrukce byla CB deska pouze z prostého betonu, na obrázku 10 je vidět její demolice. Na obrázku 12 je vidět finální betonáž.



Obrázek 12: Demolice poškozeného CB krytu



Obrázek 11: Příprava CB desky k betonáži



Obrázek 10: Finální betonáž

## Oprava dráhy TWY D na civilním letišti v Praze

V roce 2012 byla dokončena první oprava letištní plochy s využitím rychlotvrdnoucích betonů v ČR. Opravu realizovala firma Skanska, a.s.. Kompletní oprava vzletové a přistávací dráhy TWY D na letišti Václava Havla, tehdy ještě pod názvem Praha-Ruzyně, včetně vybourání poškozené plochy proběhla v čase pouhých 72 h při celkové výměře 1 200 m<sup>2</sup>. V praxi to znamenalo, že nebylo nutné toto vytížené letiště uzavírat a omezovat na 30 dnů, ale pouze na 3 dny. [14]

Jelikož se jednalo v Česku o první opravu letištní plochy tohoto druhu, do této doby byly podobné opravy realizovány pouze na silničních stavbách, bylo nutné z technologických důvodů a také vzhledem k požadavkům investora (projektanta) parametry betonu upravit. Například jedním z technologických požadavků bylo, že beton bude zpracováván finišerem ve velké ploše a zároveň šířce (15 m) na rozdíl od daleko menších oprav na pozemních komunikacích, což mělo vliv na požadavek doby zpracovatelnosti. Zpřísňující požadavek projektanta byl také na pevnost betonu. Zde se v době uvedení dráhy do provozu požadoval beton s pevností 45 MPa místo 37 MPa, které se požadují u běžných betonů na vozovky. Z těchto důvodů byly po tři týdny prováděny experimenty v laboratoři a po dokončení laboratorních prací bylo nutno odzkoušet a doladit veškeré podmínky přímo na stavbě (chování betonu v závislosti na použité místní betonárně, dopravní vzdálenosti, použitým zařízením, klimatických podmínkách atd.) [14]



Obrázek 16: Bourání staré betonové desky [14]



Obrázek 15: Armování [14]



Obrázek 14: Betonáž desky finišerem [14]



Obrázek 13: Příprava otvorů pro světelnou signalizaci [14]

## **Opravy na letišti v Curychu**

V roce 2004 Švýcarská firma Concretum realizovala opravu pojezdové dráhy Bravo na mezinárodním letišti v Curychu. Oprava byla provedena betonovým produktem, který nazývají Q-Flash 2/20. V současnosti je opravená plocha stále používána v nezměněné kvalitě. Tato technologie se na tomto letišti používá dodnes a bylo pomocí ní již opraveno přibližně 30 000 m<sup>2</sup> ploch. Firma Concretum prováděla většinu prací od 23 do 6 h, aby byl minimalizován nepříznivý dopad na letecký provoz. Letiště v Curychu kladlo vysoké požadavky na vlastnosti čerstvého betonu, na rychlý nárůst pevnosti a na vysokou trvanlivost betonu. Před opětovným povolením k používání přistávací a vzletové dráhy byla ve specifikaci betonu požadována minimální pevnost v tlaku 16 MPa. Firma Concretum zaručuje pevnost 20 MPa během 2 hodin. [2]

## **Obnova ranveje na istanbulském mezinárodním letišti Sabiha Gökçen**

Mezinárodní letiště Sabiha Gökçen v Istanbulu bylo postaveno v roce 2001. Původní projektovaná kapacita činila 3,5 milionů cestujících, avšak již krátce po jeho otevření se počty odbavených cestujících začaly rychle zvyšovat. V roce 2008 byla kapacita terminálu navýšena na 25 milionů cestujících bez jakýchkoli stavebních prací nebo úprav. Vytížení letiště, činící 25 milionů cestujících ročně, bylo opět překročeno v roce 2015. Takto rychlý nárůst měl samozřejmě negativní dopad na runway. Skutečnost, že letiště ani při tomto hustém leteckém provozu nemá možnost použít alternativní vzletovou a přistávací dráhu, znamená, že správa letiště má velmi omezené možnosti údržby. V roce 2018 proto bylo rozhodnuto, že práce související s opravami ranveje budou prováděny firmou Concretum během nočních uzavírek od 0:50 do 5:50, a to vždy pět dnů v týdnu. Vzhledem k objemu betonu použitému na opravy v roce 2018 se jedná o dosud nejrozsáhlejší projekt aplikace rychletuhnoucího betonu. Požadavkem pro zpětné uvedení ranveje letiště do provozu bylo dosažení minimální pevnosti v tlaku 16 MPa. Očekávaná konzistence betonu byla podobná konzistenci betonu používaného pro zhotovení silničního cementobetonového krytu tak, aby bylo možné provádět výrobu betonu a následnou manipulaci s ním pomocí stávajícího vybavení a stávajícím kvalifikovaným personálem. Beton byl vyráběn v betonárně zřízené speciálně pro tento projekt, jenž byla vzdálená 15 min jízdy od letiště. [2]



Projekt byl zahájen v roce 2018 a od té doby byla opravena ranvej, pojezdové dráhy a odstavné dráhy o celkové výměře 20 000 m<sup>2</sup>. V roce, kdy oprava v Istanbulu začala, se za jednu noc stihlo opravit 75 m<sup>2</sup> (čtyři desky), v současnosti se firmě daří opravovat až 130 m<sup>2</sup> (sedm desek) za noc. Všechn beton na opravu byl ukládán ručně. V současnosti již letiště ročně odbaví 41 milionů cestujících a je tak jedno z nejužších letišť pouze s jednou ranvejí a jedním odbavovacím terminálem. [2]



Obrázek 19: Rozbití a likvidace starých desek [2]



Obrázek 18: Osazování výztuže [2]



Obrázek 21: Uložení betonu pomocí bagru [2];



Obrázek 17: Zhutňování betonu [2]



Obrázek 22: Konečná úprava povrchu [2]



Obrázek 20: Ošetřování betonu přikrytím [2]

## **Oprava odstavných ploch na pařížském letišti Charles de Gaulle**

Firma Concretum se věnovala i opravám největšího pařížského letiště Charles de Gaulle ve Francii. Letiště ročně odbaví 65 milionů cestujících a z důvodu tak vysoké kapacity leteckého provozu je vyloučeno, aby se během oprav přerušil jeho provoz. Práce probíhaly pomocí mobilní míchačky, vhodné pro opravy malých ploch. Oprava probíhala podle harmonogramu, který neměl žádné časové rezervy, a betonové desky se mohly znovu zatěžovat již 30 minut po uložení. Po 4 hodinách od namíchání betonu, dosahoval beton pevnost v příčném tahu 3,3 MPa. Tímto způsobem se ve Francii vyměnilo zhruba 5 000 m<sup>2</sup> původního povrchu. [2]

### **1.11 Nekvalitní provádění oprav CB krytů**

Je zřejmé, že je důležité, aby byly opravy CB vozovek na letištních plochách prováděny kvalitně a odborně. To znamená, že je třeba zajistit dostatečné financování, správné plánování a použití správných technik a materiálů. To vše vede k bezpečným, efektivním a udržitelným letištím.

Nekvalitní opravy CB vozovek jsou v naší zemi bohužel častým jevem. Tato situace je důsledkem řady faktorů, včetně nedostatečného financování, špatného plánování a nesprávné aplikace technik oprav. Mnoho krytů je opraveno pouze povrchně, což vede k tomu, že problémy se brzy vrátí a vyžadují další opravy, což může negativně ovlivnit efektivitu provozu na letišti. V důsledku nekvalitních oprav mohou i letadla utrpět poškození, jako například poškození podvozku nebo pneumatik, což může vést k dalším nákladům a možným bezpečnostním rizikům.

Při opravě na pojezdové dráhy TWY Tango zřejmě nebyla provedena dilatační spára, proto došlo k vystřelení CB desky vlivem klimatických podmínek viz obrázek 23. Často jsou realizace oprav zhotovovány od nekvalifikovaných firem, které tlačí na rychlé provedení a kvalita je upozaděna na úkor ceny a rychlosti.



Obrázek 23: Vystřelená CB deska



Obrázek 24: Připravený prostor k betonáži



Obrázek 25: Provádění betonáže

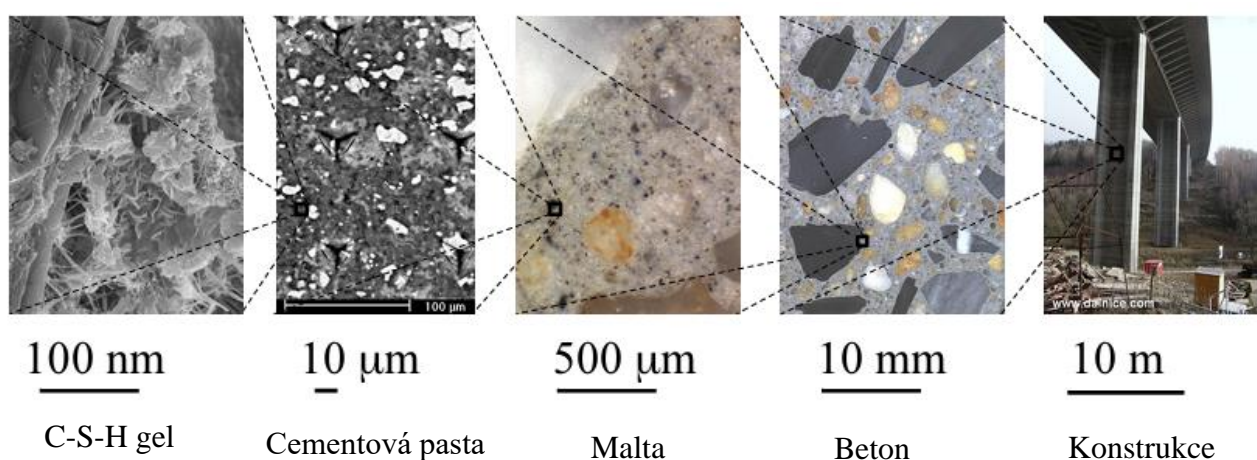
Na obrázku 26 je zaznamenána nevhodná oprava ulomených rohů.



Obrázek 26: Nevhodná oprava ulomených rohů

## 2. Materiál

Tradiční beton je nyní nejvíce vyráběným materiálem na světě s průměrnou spotřebou přes 1 m<sup>3</sup>/osobu/rok. Rychlotvrdoucí beton sloužící pro opravu cementobetonových vozovek se příliš neliší od betonu konstrukčního. Jde o nehomogenní kompozit, který vzniká smísením pojiva (cementu), plniva (kamenivo), vody, přísad a příměsí. Na obrázku 27 je znázorněný přehled materiálu od jeho mikrostruktury až po samotnou konstrukci. Klíčovou složkou, která ovlivňuje mikrostrukturu, tím pádem i vlastnosti a únosnost celé konstrukce, je cement. [16]



Obrázek 27: Přehled materiálu od mikrostruktury až po konstrukci [16]

Cement je práškové hydraulické pojivo, v silniční praxi se využívá převážně jen portlandský cement, příp. ještě v kombinaci s jemně mletou vysokopecní struskou, což však v současné době neumožňují české technické předpisy. Portlandský cement se vyrábí ze surovin bohatých na vápník a hliník, jako je vápenec, jíla či bauxit. Tyto suroviny se pálí v rotační peci při teplotě okolo 1400°C a výsledný produkt, zvaný klinker (slínek), se následně rozemele v kulových mlýnech na jemný prášek. V prášku jsou slínkové minerály, které jsou zcela zásadní pro hydrataci cementu. Existuje několik typů a každý z nich má jedinečné vlastnosti a účinky na finální produkt, z toho důvodu je jejich vzájemný poměr z hlediska výsledného chování betonu velmi zásadní. Níže jsou blíže popsány jednotlivé typy slínkových minerálů i s jejich významem v procesu hydratace. [17]

## 2.1 Slínkové minerály

PŘEHLED SLÍNKOVÝCH MINERÁLŮ					
Slovní název	Zkrácený vzorec	Chemický vzorec	Chemický název	Procentuální podíl ve slínce	Vývin hydratačního tepla
Alit	C <sub>3</sub> S	3CaO.SiO <sub>2</sub>	trikalciumsilikát	65%	500 kJ/kg
Belit	C <sub>2</sub> S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	dikalciumsilikát	20 - 25 %	250 kJ/kg
	C <sub>3</sub> A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	trikalciumaluminát	8-10 %	860 kJ/kg
Celit	C <sub>4</sub> AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	tetrakalciumaluminátferit	10%	420 kJ/kg

Tabulka 1: Přehled slínkových minerálů

### Alit (C<sub>3</sub>S) - trikalcium silikát - (CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub>

Jedná se o nejdůležitější slínkový minerál, který se v cementu vyskytuje v zastoupení kolem 65 %. Má největší vliv na konečné pevnosti betonu a dosahuje i vysokých počátečních hodnot. Charakterizuje se se vysokým vývinem hydratačního tepla (500 kJ/kg). Alit má nízkou odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí, zejména proti působení síranových vod, kdy vzniká sekundární ettringit. [18] [22]

### Belit (C<sub>2</sub>S) – dikalcium silikát - (CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>

Jeho obsah v cementu se pohybuje okolo 20-25 %. Má menší reaktivitu než alit a reaguje s vodou pomaleji. Vyznačuje se nízkými počátečními ale vysokými dlouhodobými pevnostmi. Vývin hydratačního tepla je zhruba poloviční než u alitu (250 kJ/kg). [18] [22]

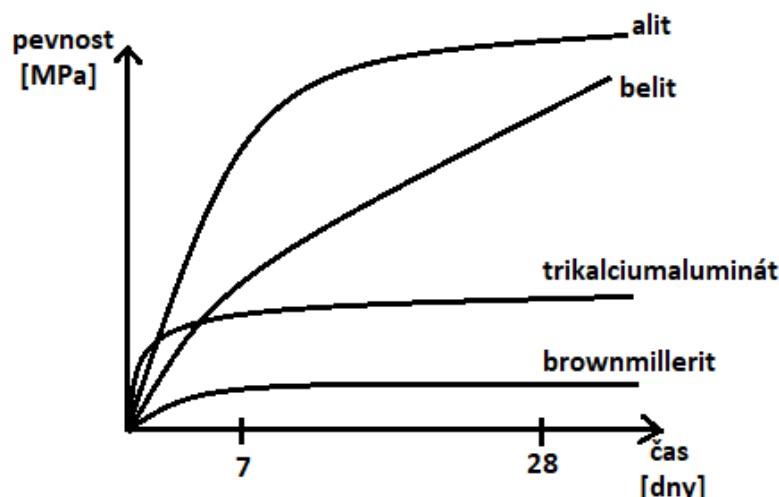
### Trikalcium aluminát (C<sub>3</sub>A) - (CaO)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Jeho obsah v cementu se pohybuje kolem 8-10 %. Má velmi vysokou reaktivitu s vodou, tím pádem rychle tuhne a tvrdne. Právě kvůli tomuto minerálu je do cementu při mletí přidáván sádrovec jako regulátor tuhnutí. Konečné pevnosti jsou ale poměrně nízké a postupem času degradují. Hodně vysoký vývin hydratačního tepla (860 kJ/kg) má za následek nutnost ošetřování zrajících betonových konstrukcí a nevhodnost použití cementů s vysokým obsahem tohoto minerálu na masivní konstrukce. [18] [22]



### Tetrakalcium aluminát ferit ( $C_4AF$ ) - $(CaO)_4 Al_2 O_3 Fe_2 O_3$

Je známý taky jako brownmillerit. Jeho obsah v cementu se pohybuje kolem 10 %. Celit dosahuje nejnižších pevností, ale zase má velmi vysokou chemickou odolnost, proto je v síranovzdorných cementech snaha o zvýšení jeho obsahu na úkor trikalciumaluminátu. Hydratační teplo nenabývá žádných extrémů (420 kJ/kg). [18] [22]



Obrázek 28: Nárůst pevnosti v čase jednotlivých slínkových minerálů [18]

## 2.2 Cementářské moduly

Vysoké počáteční pevnosti cementu jsou dosaženy vhodným mineralogickým složením slínku. Hlavní komponenty cementu ( $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2 O_3$  a  $Fe_2 O_3$ ) musejí být v surovinové směsi zastoupeny v určitých poměrech, které jsou vyjádřeny v tzv. cementářských modulech. Jinými slovy jsou to kvantitativní ukazatele používané ve výrobním procesu cementu. Mezi nejvýznamnější cementové moduly patří hydraulický modul (HM), aluminátový modul (AM) a silikátový modul (SM), které společně ovlivňují vše od chemického složení po fyzikální charakteristiky a výsledné chování cementu v praxi. [19][20]

### Hydraulický modul

Hydraulický modul je definován jako poměr mezi obsahem oxidu vápenatého (CaO) a součtem oxidů křemičitého (SiO<sub>2</sub>), hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a železitého (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) v surovinách pro výrobu cementu. Matematicky je vyjádřen následujícím vzorcem:

$$H_m = \frac{CaO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2}$$

Tento modul je zásadní pro určení rychlosti tuhnutí, pevnosti a trvanlivosti cementu. Vyšší hodnota HM značí větší množství vápna ve směsi, což může vést k rychlejšímu tuhnutí a vyšší počáteční pevnosti, ale může také způsobit horší odolnost vůči agresivnímu prostředí a zpravidla nebývají objemově stálé. V praxi se HM obvykle udržuje v určitém rozmezí, aby se zajistily optimální vlastnosti cementu. Čím větší hydraulický modul, tím větší je hydratační teplo. Tento modul se běžně pohybuje mezi hodnotou 1,9 až 2,4. [19] [20] [21]

### Aluminátový modul

Aluminátový modul je poměr mezi obsahem oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a oxidu železitého (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) v surovinách. Je vyjádřen vzorcem:

$$Am = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Hodnota AM má významný vliv na barvu a teplotu vypalování slínku. Vyšší hodnota AM obvykle znamená, že slínek bude světlejší a může být vypálen při nižších teplotách, zatímco nižší hodnota AM může vést k tmavšímu slínku, který vyžaduje vyšší teploty vypalování. Tento modul se nejčastěji pohybuje mezi hodnotou 1,5 až 2,5. Pokud je cement bílý má hodnotu AM obvykle vyšší než 8. [19] [20] [21]

### Silikátový modul

Silikátový modul (SM) je také důležitým ukazatelem v kontextu výroby cementu. Silikátový modul je definován jako poměr mezi obsahem oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>) a součtem oxidů hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a železitého (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Vzorec pro výpočet silikátového modulu je:

$$S_m = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$



Vyšší hodnota SM naznačuje vyšší obsah  $\text{SiO}_2$  ve směsi, což obvykle vede k pomalejšímu tuhnutí cementu ale vyšší odolnosti vůči agresivnímu prostředí. [19] [20] [21]

## 2.3 Hydratace cementu

Hydratace cementu je zásadní procese, který určuje jak konečné, tak i rané vlastnosti betonu. Během hydratace reaguje cement s vodou a v důsledku hydratačních reakcí pak dochází ke vzniku jemných krystalů, které vzájemně prorůstají, tím nastává tuhnutí (postupná ztráta zpracovatelnosti) a tvrdnutí (postupné nabývání pevnosti). Hydratační produkty jsou ve vodě nerozpustné a stálé.

Již od počátku 20. století probíhá intenzivní výzkum procesu hydratace cementu a bylo vyvinuto několik teorií, které se snaží vysvětlit tento proces. Tyto teorie se liší v tom, jaký aspekt procesu hydratace se pokoušejí vysvětlit, a každá z nich přispívá k lepšímu porozumění tomuto základnímu procesu ve výrobě betonu. [18] [22]

### 2.3.1 Teorie hydratace

Teorie hydratace cementu se často dělí na dvě hlavní kategorie: krystalizační teorii a koloidní teorii. Tyto teorie poskytují různé pohledy na mechanismy, které ovlivňují hydrataci cementu.

#### **Krystalizační teorie** = La Chatelierova teorie

Krystalizační teorie předpokládá, že hydratace cementu je především proces, kdy se zrnka slínku ve vodě rozpustí a tím vytvoří plně nasycený roztok, ze kterého se vysráží nebo vykrytalizují nové hydratační produkty. Vykrytalizováním se sníží koncentrace roztoku a mohou se rozpouštět další zrnka slínku. [23] [18] [22]

#### **Koloidní teorie** = Michaelisova teorie

Koloidní teorie předpokládá, že se na povrchu cementového zrna vytvoří po kontaktu s vodou koloidní vrstva hydrogelu. Během hydratace voda obsažená v této koloidní vrstvě prostupuje difuzí dovnitř slínkového zrníčka a zvyšuje svoji koncentraci, tím dochází k zahušťování gelu a nabývá charakteru pevné látky. [23][18][22]



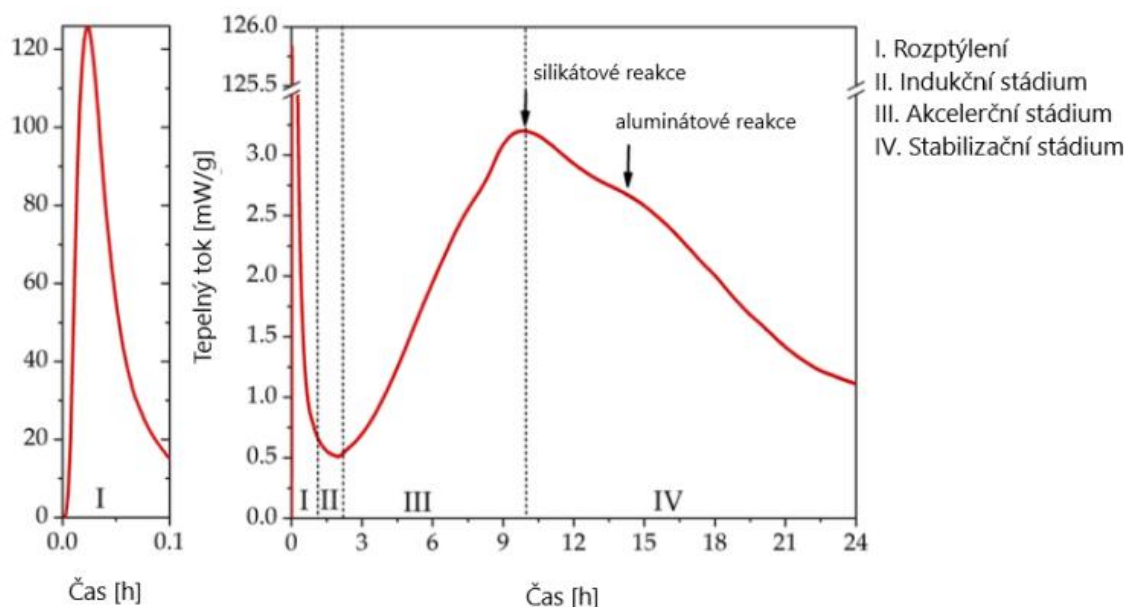
### Současná teorie

Současná teorie o mechanismu hydratace cementu spojuje obě předchozí teorie dohromady. Aluminátové slínkové minerály  $C_3A$  (trikalciumaluminát) a  $C_4AF$  (trikalciumaluminátferit) hydratují krystalizací, tím tvoří strukturu betonu a přispívají k jeho pevnosti. Naopak slínkové minerály  $C_3S$  (alit) a  $C_2S$  (belit) hydratují podle koloidní teorie na C-S-H gely, což napomáhá udržovat homogenitu a kohezi betonu a má vliv na jeho reologické vlastnosti. [23][18][22]

### 2.3.2 Stádia hydratace

Hydratace začíná okamžikem, kdy se do cementu přidá voda. Právě voda spouští chemické reakce mezi různými složkami cementu, které vyústí v tvorbu pevné a odolné hmoty, kterou označujeme jako beton.

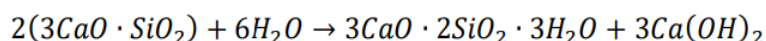
Tento proces probíhá ve čtyřech hlavních fázích, které jsou níže podrobněji popsány. Na obrázku 29 je znázorněná závislost mezi tepelným tokem, který vzniká během hydratace, a časem. [25] [24]



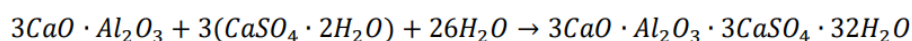
Obrázek 29: Fáze hydratace cementu [26]

## 1. Rozptýlení (0 -10 minut)

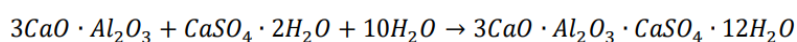
Toto je počáteční fáze, kdy je cement smíchán s vodou, vytvoří se suspenze a částice cementu se začnou rozpouštět ve vodě. V této fázi reaguje trikalciumpsilikát ( $C_3S$ ) a začínají se uvolňovat ionty vápníku ( $Ca^{2+}$ ) a hydroxidové ionty ( $OH^-$ ) do vody. Vzniká C-S-H gel a portlandit ( $Ca(OH)_2$ ). Na rozdíl od krystalického portlanditu, C-S-H gel má amorfni charakter, takže nelze přesně určit jeho složení. [25] [24]



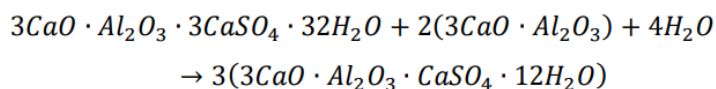
Také probíhá reakce trikalciualuminátu ( $C_3A$ ) s vodou za přítomnosti sádrovce, který je do cementu přidáván jako zpomalovač tuhnutí. Zároveň se roztok přesycuje portlanditem a vytváří se tím alkalické prostředí. [25] [24] [26] Při větším množství síranů vzniká ettringit.



Při menším množství síranů vzniká monosulfát.



Další reakci trikalciualuminátu s vodou přechází ettringit na monosulfát.

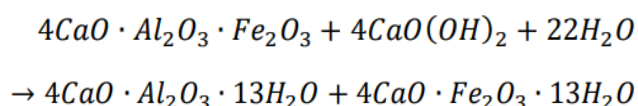


## 2. Indukční stádium (10 minut – 4 hodiny)

Po rozptýlení následuje indukční stádium. Rychle vzrůstající hodnota pH a koncentrace  $Ca^{2+}$  iontů v záměsové vodě snižuje spolu s hydráty vytvořenými na povrchu rozpustnost některých fází slínku. Zvyšuje se viskozita a zpomaluje se vývoj hydratačního tepla. Ubývají silikáty, tvoří se menší množství C-S-H gelu. Pokud je v cementu správně vyvážen poměr mezi množstvím aluminátových fází a síranových iontů, vznikne také malé množství ettringitu. V průběhu tohoto stádia se voda stane nasyceným roztokem  $Ca^{2+}$ , přesto však nedochází ke vzniku portlanditu  $Ca(OH)_2$ . Pravděpodobně je to kvůli malé rychlosti tvorby krystalizačních zárodků v porovnání s tvorbou C-S-H gelu. [25] [24] [26] [18]

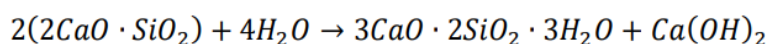
### 3. Akcelerační stádium (4 – 48 hodin)

V tomto stádiu začíná hydratační reakce zase probíhat rychleji a dochází i k rychlému nárůstu teploty. Spustí se díky snížení koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  iontů v roztoku vysrážením pentlanditu. K vysrážení portlanditu dojde, když ve vodě nejsou téměř žádné anionty  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ . Náhlé snížení koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$  iontů opětovně nastartuje rozpouštění všech fází cementu. Voda pokračuje v reakci zejména s  $\text{C}_3\text{A}$ , což vede k tvorbě dlouhovláknitého C-S-H gelu a zvětšují se krystaly portlanditu. Krystaly hydratačních produktů prorůstají a výsledkem je tvorba pevné a porézní struktury, známé jako cementová pasta. Dále dochází k reakci  $\text{C}_4\text{AF}$  s vodou. Reakce je podobná jako u  $\text{C}_3\text{A}$ , ale o hodně pomalejší. [25] [24] [26] [18]



### 4. Stabilizační stádium (2 – 4 dny)

Stabilizační stádium zahrnuje postupné dosažení maximální pevnosti betonu, snižuje se vývin hydratačního tepla. Ettringit přechází na monosulfát, zmenšuje se velikost vláken C-S-H gelu. Dochází k hydrataci  $\text{C}_2\text{S}$ , kde vznikají stejné produkty jako při hydrataci  $\text{C}_3\text{S}$ .



Beton dosahuje svého plného potenciálu pevnosti. Hydratační produkty utvořené v průběhu prvních stadií jsou označovány jako „vnější produkt“, protože rostou ze zrn cementu ven do mezer mezi nimi. Jedná se o porézní a volnou síť vláknitého C-S-H gelu, jehliček ettringitu, destiček monosulfátu a hexagonálních krystalků portlanditu. [25] [28] [26] [18]

### 5. Zralost a dlouhodobá hydratace (4 – 28+ dní)

V tomto stadiu jsou zrna jednotlivých fází slínku pokryta vrstvou hydrátů, která je stále silnější. Molekuly vody obtížněji pronikají touto vrstvou k nehydratovaným částicím slínku. Hydratace se zpomaluje, protože je z větší části kontrolována rychlostí difuze molekul vody vrstvou nově zformovaných

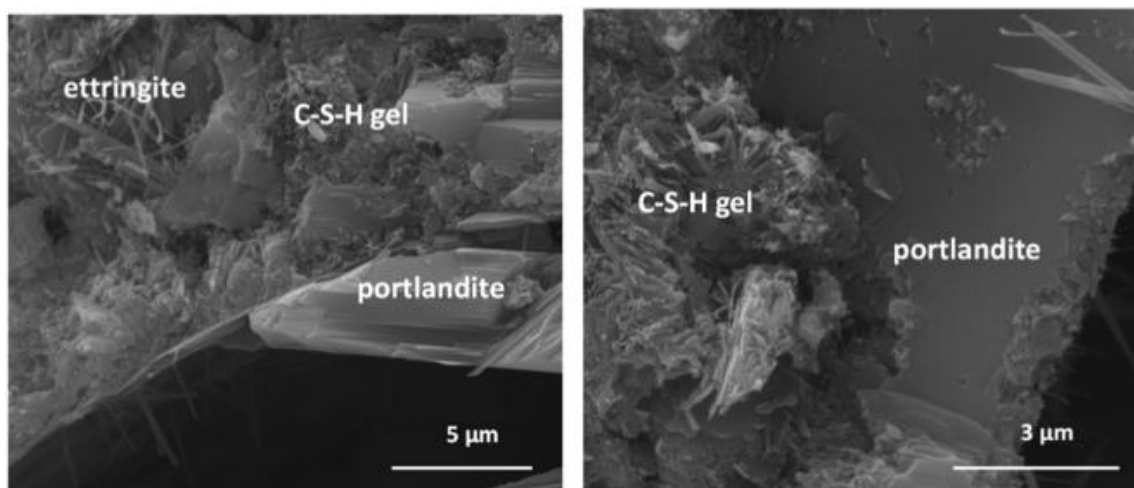


hydrátů. Hydratovaná cementová pasta má vzhled kompaktní amorfnní hmoty, která se označuje jako „vnitřní produkt“.

Hydratace portlandského cementu je ukončena buďto ve chvíli, kdy již není v systému přítomna další nehydratovaná fáze (dobře ošetřený beton o vysokém vodním součiniteli), nebo když voda již nemůže proniknout k nehydratovaným částicím (velmi kompaktní systémy), případně když už není v systému k dispozici volná voda (při velmi nízkém vodním součiniteli). [18] [28] [27] [26]

## 2.4 Hydratované produkty tvořící ztvrdlý cement

Ztvrdlý cement obsahuje komplexní směs hydratovaných produktů, které jsou rozptýleny v mikrostrukturální síti. Tyto složky společně tvoří pevnou a trvanlivou hmotu, která je schopna odolávat mechanickému namáhání a různým povětrnostním vlivům. [25]



Obrázek 30: detail ztvrdlého cementu z elektronového mikroskopu [29]

### Hydrosilikáty (C-S-H gely)

Tento gel je hlavním produktem hydratace a nejvýznamnější složkou pro vývoj pevnosti cementové pasty. Vzniká reakcí mezi trikalciumpsilikátem ( $C_3S$ ) a dikalciumsilikátem ( $C_2S$ ) s vodou. Identifikace přesného složení a struktury hydrosilikátových gelů je obtížná, v literatuře se uvádí řada sloučenin [28][29]:

- $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$  (tobermorit)
- $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  (afwillit)
- $2CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$  (hillebrandit)
- $6CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$  (xonotlit)

### Hydroalumináty

Vznikají hydratací trikalciualuminátu (C<sub>3</sub>A) a mají sklon vytvářet výrazný krystalický charakter. Konečným stabilním produktem dlouhodobé hydratace C<sub>3</sub>A je kubický 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O [28] [26]

### Hydratovaný trikalciualuminát ferit

Při hydrataci C<sub>4</sub>AF a feritů vzniká jako poměrně stálý meziprodukt 4CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·14H<sub>2</sub>O, konečným stálým produktem je 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O a případný přebytek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utvoří amorfní hydroxid. [28] [26]

### Ettringit

Sádrovec, který se přidává k portlandskému slínku jako zpomalovač tuhnutí, přechází do roztoku, který je následkem hydratačních reakcí přesycen Ca(OH)<sub>2</sub>. Za těchto okolností se tvoří při větším množství síranu ettringit (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·30-32H<sub>2</sub>O, označovaný také jako tzv. trisulfát, resp. fáze AFt) při menším množství monosulfát uvedený níže. Vznik ettringitu je pravděpodobně závislý nejen na přítomnosti vhodných chemických komponent, ale také na tlaku při zpracování, kdy se stoupajícím tlakem obsah ettringitu výrazně klesá. Tato reakce je důležitá pro počáteční nastavení a vývoj pevnosti cementové pasty, protože ettringit pomáhá stabilizovat objem a zabráňuje příliš rychlému tuhnutí. Pokud je však vytvoření ettringitu nadměrné nebo pokud dochází k jeho tvorbě v pozdějších fázích tvrdnutí cementu (například v důsledku pozdního přístupu síranů), může to vést k expanzi a trhlinám, což může ohrozit strukturu betonu. [28] [26] [16]

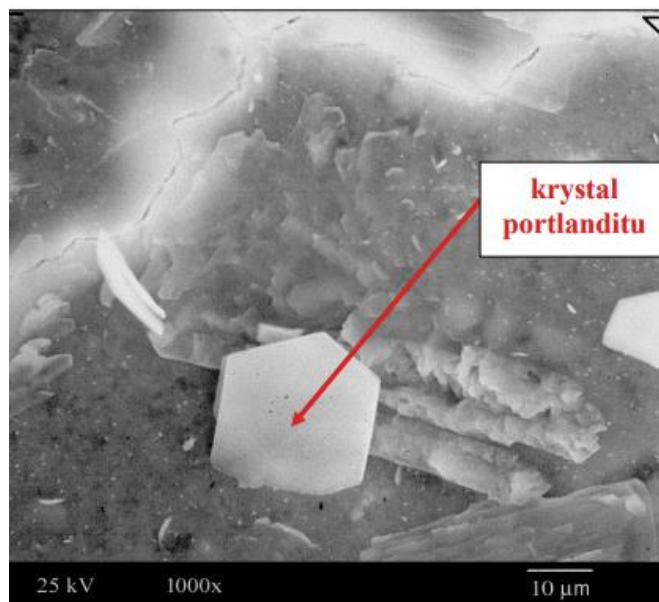
### Monosulfát

Jak je již výše uvedeno, sádrovec, který se přidává k portlandskému slínku jako zpomalovač tuhnutí, přechází do roztoku, který je následkem hydratačních reakcí přesycen Ca(OH)<sub>2</sub>. Za těchto okolností se tvoří při větším množství síranu ettringit a při menším množství monosulfát (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·10-12H<sub>2</sub>, resp. fáze AFm). Monosulfát může vznikat i z ettringitu reakcí s dalšími podíly C<sub>3</sub>A. [28] [18]



## Portlandit

Při smíchání cementu s vodou nastává přesycování roztoku portlanditem ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), který se později vylučuje v jemných krystalcích, nejčastěji destičkovitého tvaru (obrázek 31). Portlandit zvyšuje v tuhoucím cementu pH. [28] [26]



Obrázek 31: Destičkovitý tvar portlanditu z elektronového mikroskopu [28]

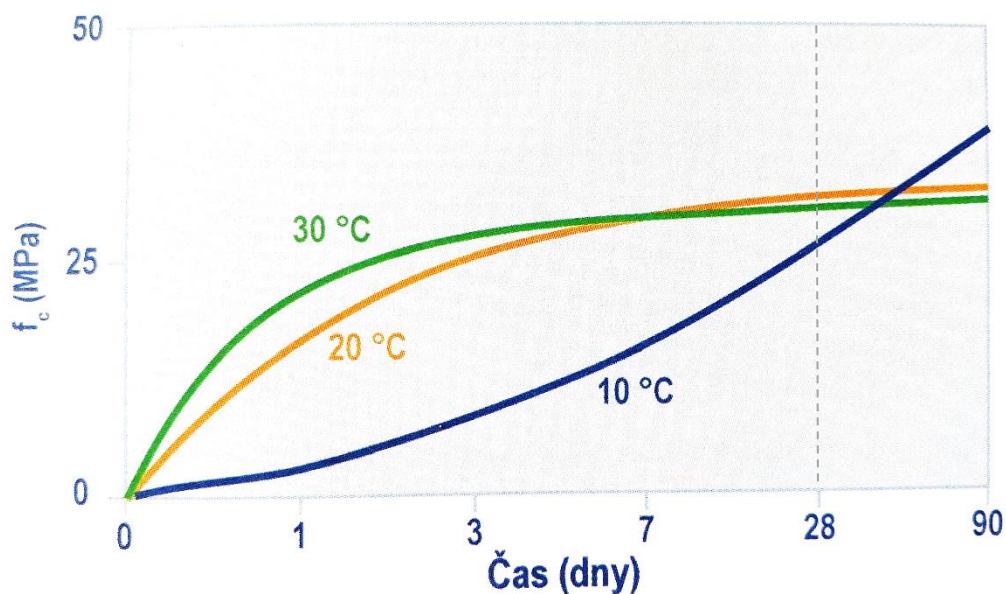
## 2.5 Faktory ovlivňující hydrataci

Hydratace cementu je proces, který je ovlivněn řadou faktorů. Tyto faktory mohou mít významný dopad na rychlost a kvalitu hydratace cementu, a tím i na vlastnosti výsledného betonu. Hlavní faktory se dělí na vnitřní a vnější činitele. Mezi vnitřní činitele ovlivňující hydrataci cementu patří složení cementu, jemnost cementu, vodní součinitel a obsah přísad a příměsí. Do vnějších činitelů se řadí okolní teplota, okolní vlhkost a technologie zpracování. [25]

### 2.5.1 Vliv teploty

Na obrázku 32 je znázorněno schéma narůstající tlakové pevnosti betonu v čase, zrající při různých teplotách od vybetonování až do stáří 90 dnů. Z obrázku lze vidět, že na počátku platí, že čím je nižší teplota, tím je nižší i pevnost v tlaku. Naopak na konci (90 dní) platí, že čím je nižší teplota, tím je vyšší pevnost v tlaku. Pokud však sledujeme 28denní

normovou pevnost v tlaku, vidíme, že se od sebe jednotlivé hodnoty pevnosti v tlaku zásadně neliší. [30]



Obrázek 32: Vliv teploty na vývoj pevnosti [30]

Při teplotách okolo 5 °C se hydratace výrazně zpomaluje a pod 0 °C se dokonce úplně zastavuje. Vyšší teploty se používají k urychlování tvrdnutí betonu. Za vyšší teploty se považují teploty od 30 °C. Jak bylo výše zmíněno, vyšší teplota urychluje tvrdnutí cementu a tím ovlivňuje pórovitou strukturu cementového kamene, která je způsobena obsahem vody a vzduchu. Voda a vzduch se zvyšováním teploty roztahují rozdílně, a tak vzniká různé napětí, které může být příčinou vzniku mikrotrhlinek, které pak snižují výslednou pevnost betonu. V závislosti na druhu cementu jsou doporučeny teploty, které by neměly být překročeny. Pro portlandské cementy jsou doporučeny teploty do 60 °C. [30]

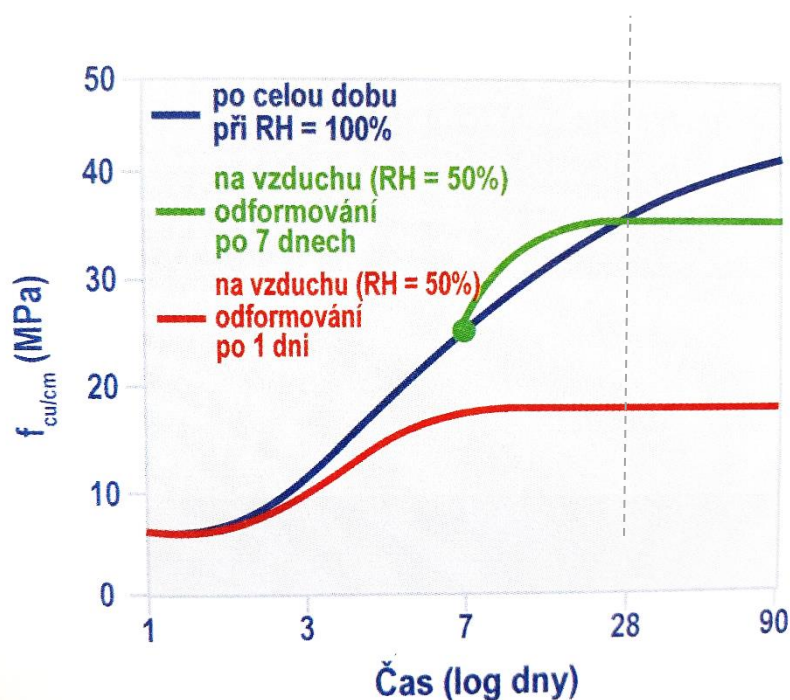
Při vyšších teplotách hydratace probíhá rychleji, je ovšem nezbytné dbát na to, aby nedošlo k vysychání cementové kaše, což by mohlo vést k výraznému zpomalení či dokonce zastavení hydratace. Vlhkost prostředí má tedy také zásadní vliv. [30]

### 2.5.2 Vliv vlhkosti

Při vlhkém uložení pevnost s časem vzrůstá, protože dochází k prodlužování procesu hydratace. Pokud beton zraje v suchém prostředí, probíhá hydratace neúplně nebo se dokonce může úplně zastavit. [30] [18]

Obrázek 33 ukazuje pevnost betonu v tlaku v závislosti na době, po kterou byl ošetřován vodou. Lze jasně vidět, že aby beton dosáhl správné normované 28 denní pevnosti, musí být ošetřován vodou alespoň po dobu 7 dní. Pokud by beton nebyl vystaven správné vlhkosti, stupeň hydratace by zůstal na nízké hodnotě, což by redukovalo vlákna C-S-H gelu, a v důsledku toho by nemohla růst pevnost cementové pasty. [30][18]

Dodržet vysokou vlhkost je důležité kvůli redukcí smrštění betonu. Pokud je beton vystaven vzduchu s relativní vlhkostí menší než 95 % a vyšší teplotě, nastává přibližně 10-12 hodin po uložení do formy takzvané plastické smrštění. Toto smrštění produkuje tahová napětí. Pokud tahová napětí překročí pevnost v tahu již vzniklého materiálu, beton popraská. [30][18]



Obrázek 33: Vliv vlhkosti při zrání betonu na výslednou pevnost [30]

Jsou dvě hlavní možnosti, jak zajistit potřebnou vlhkost. Buď ošetřováním betonu vodou nebo zabráněním odparu vody z betonu během zrání (membránové ošetření). Vlhké ošetřování může být provedeno buď nepřetržitým postřikem nebo úplným ponořením do vody. Principem ošetření pomocí nepropustných membrán je zabránění odpaření volné vody z povrchu betonu například pomocí plastové fólie nebo nanesením ochranných postřiků. [30]



### 2.5.3 Vliv jemnosti cementu

Důležitou roli má také jemnost mletí cementu neboli měrný povrch. Jemnost výrazně ovlivňuje zejména rychlost hydratace a uvolňování hydratačního tepla, zároveň může ovlivňovat i strukturu zhydratovaného cementu. Vzhledem k tomu, že reakce mezi vodou a cementem je reakce povrchová, větší povrchová plocha u jemně namletého cementu umožňuje rychlejší hydrataci. V důsledku rychlejší hydratace může jemně mletý cement poskytnout vyšší počáteční pevnost betonu v krátkém časovém období. Na druhou stranu rychlejší hydratace také znamená, že dojde k rychlejšímu uvolňování tepla, což může být problémem u masivních betonových konstrukcí, kde může nadměrné teplo vést k vnitřním napětím a trhlinám. Jemně mletý cement může vyžadovat více vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti jako hrubě mletý cement, což může ovlivnit vodní součinitel a tím i vlastnosti finálního betonu. Jemně mletý cement může poskytnout vyšší počáteční pevnost, ale může způsobit nižší pevnost v pozdějších stádiích v důsledku rychlejšího vyčerpání cementových zrn pro hydrataci. [31] [18]

Hydratace cementových zrn probíhá postupně od povrchu, přičemž rychlost počáteční penetrace zrn bývá uváděna okolo 0,02  $\mu\text{m}/\text{h}$  pro cementy, které obsahují vyšší zastoupení  $\text{C}_2\text{S}$ . Pro cementy, které obsahují převážně  $\text{C}_3\text{S}$ , se rychlost penetrace přibližuje až k 0,07  $\mu\text{m}/\text{h}$  v prvních 24 hodinách. Avšak rychlost penetrace cementových zrn není možné považovat za časově konstantní veličinu. Rychlost bude postupně klesat v závislosti na vývoji gelových struktur kolem cementového zrna. Uvedené hodnoty naznačují určitý trend rychlosti penetrace. Hloubka penetrace se po 6 měsících uvádí zhruba 3 až 15  $\mu\text{m}$ . Pokud má cementové zrno velikost až 100  $\mu\text{m}$ , dojde k hydrataci pouze povrchové vrstvy cementového zrna, zbytek tedy zůstává nezhydratovaný a plní funkci mikro plniva. [31] [18]

Měrný povrch cementů se pohybuje v rozmezí 225 až 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . U běžných portlandských cementů se však hodnota pohybuje nejvíce kolem 300  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Při tomto měrném povrchu je přibližně 17 % zrn větších než 50  $\mu\text{m}$ , 33 % zrn v rozmezí 25 až 50  $\mu\text{m}$ , 27 % zrn v rozmezí 10 až 25  $\mu\text{m}$ , a 23 % zrn menších než 10  $\mu\text{m}$  [22]. Cementy, s vyšším měrným povrchem rychleji a úplněji hydratují, zvyšují zastoupení menších kapilárních pórů o velikosti  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$  m. Nevýhodou jemněji mletých cementů je energeticky náročnější výroba a větší riziko smrštění z důvodu vyšší spotřeby záměsové vody. [22] [25] [18]

## 2.5.4 Vliv vodního součinitele

Vodní součinitel je definován jako:

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

Kde je:

$w$  ... vodní součinitel [ / ]

$m_v$  ... hmotnost účinné vody (záměsová voda+voda v kamenivu+voda v přísadě) [kg]

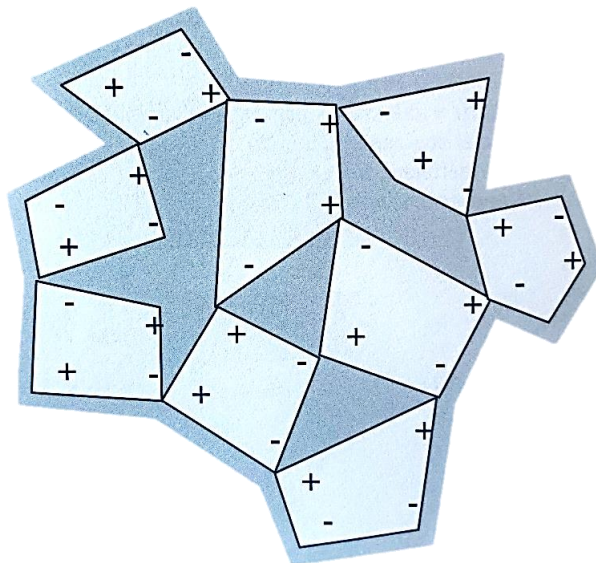
$m_c$  ... hmotnost pojiva (cementu) [kg]

$k$  ... součinitel příměsí [ / ]

$m_o$  ... hmotnost příměsí [kg]

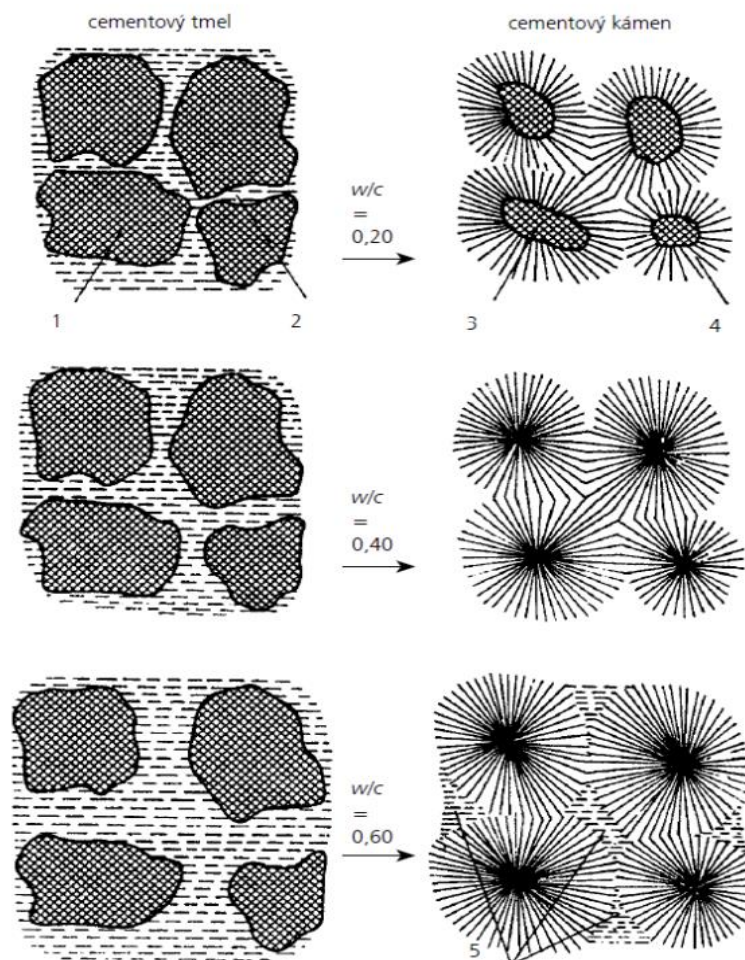
Vzorec uveden výše platí pouze pro cementy typu CEM I a CEM II.

Voda je podstatnou složkou betonu, která splňuje dvě základní funkce: fyzikální funkci, protože dává betonu požadované reologické vlastnosti, a chemickou funkci, protože umožňuje hydrataci cementu. Ideální beton může obsahovat pouze takové množství vody, které umožní dosažení maximální pevnosti betonu a zároveň zaručí reologické vlastnosti, potřebné pro zhutnění. Bohužel, současné portlandské cementy zabraňují docílení tohoto ideálního betonu. Zrna cementu, vyznačující se množstvím nenasycených povrchových nábojů, mají výraznou tendenci k flokulaci (shlukování do větších skupin), zejména pokud se dostanou do kontaktu s tak polarizovanou kapalinou, jako je voda. V takové flokuované struktuře se zachycuje část vody uvnitř flokuli a tato voda pak není k dispozici na ztekucení směsi, což je znázorněno na obrázku 34. [24]



Obrázek 34: Schéma částic cementu ve flokulovaném stavu [24]

Pro dosažení určité zpracovatelnosti betonu je nezbytné použít více vody, než je třeba k úplné hydrataci všech cementových zrn. Tato nadbytečná voda, která nikdy nezareaguje s cementem, generuje poréznost hydratované cementové pasty a způsobuje zhoršení mechanických vlastností betonu a pokles jeho trvanlivosti. Protože je nemožné vyrobit portlandský cement, jehož zrna by neflokovala, je pro podpoření hydratace nezbytné použít chemické látky, schopné redukovat přirozený sklon k flokulaci, a tak redukovat množství záměsové vody. Tyto látky budou dále probrány v kapitole 2.6.6 věnující se přísadám. [24]



Obrázek 35: Hydratace cementu v závislosti na vodním součiniteli [33]

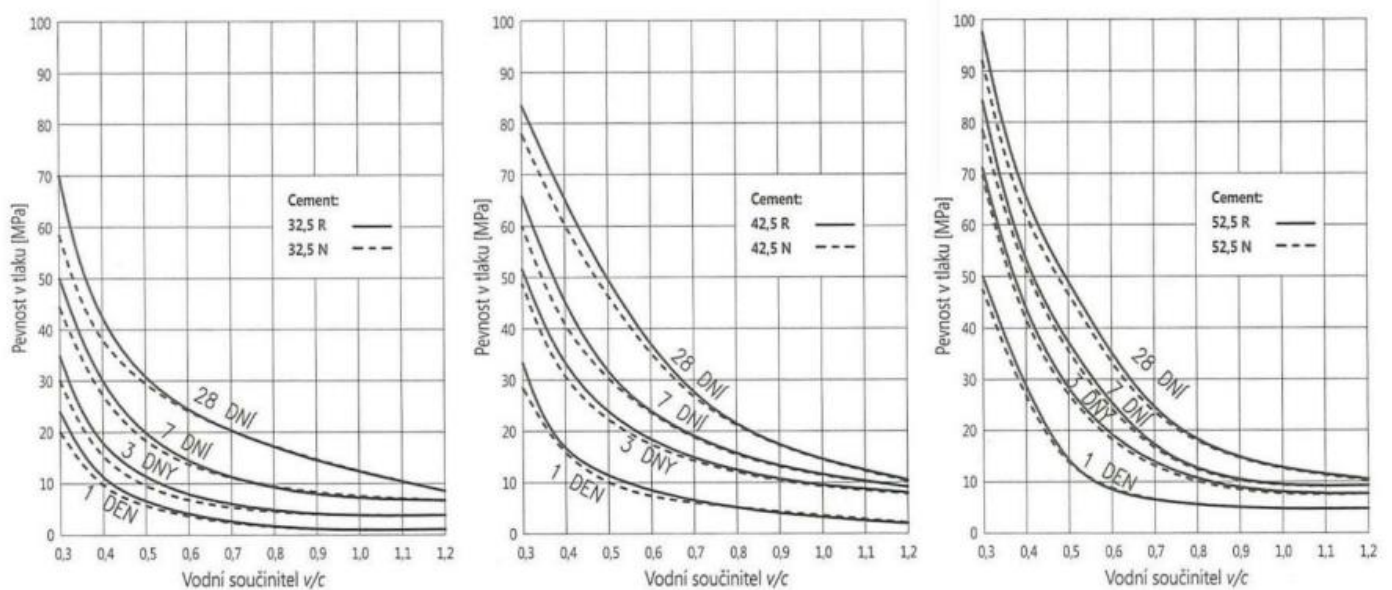
1 – cementové zrno, 2 – voda, 3 – nezhydratované cement

4- zhydratovaný cement, 5 – kapilární póry

Pokud se na problematiku vodního součinitele podíváme z hlediska konkrétních hodnot, tak číselnou hranicí vodního součinitele je přibližně 0,38. Pokud se tato hranice překročí, vznikají póry v cementovém kameni. Tyto kapilární póry mají velikost řádově  $10^{-5}$  až

$10^{-8}$  m a snižují výslednou pevnost cementu. Pokud je naopak vodní součinitel menší než 0,38, dojde ke spotřebování vody dříve než jádra cementových zrn zhydratují. Dojde ke zpomalení hydratace a důsledkem je opět snížení výsledné pevnosti. [22][25][32]

Na obrázku 36 je znázorněn vliv vodního součinitele na krychelnou tlakovou pevnost betonů, vyrobených z různých druhů cementů. Tyto grafy vychází z Powersovy teorie, která vyjadřuje danou pevnost jako funkci vodního součinitele a stupně hydratace. Teorie je odvozena z předpokladu dokonale ztuhlého betonu a ze vztahu mezi pórovitostí a pevností zatvrdlé cementové pasty. [32]



Obrázek 36: znázorněný vliv vodního součinitele na tlakovou pevnost betonů [32]

### 2.5.5 Vliv příměsí

Příměsí do betonu jsou většinou práškovité minerální látky, které se přidávají do čerstvého betonu kvůli zlepšení jeho vlastností v čerstvém nebo ztuhlém stavu. V cementu jsou zastoupeny více jak 5 %, obvykle se však pohybují v rozmezí mezi 10 až 20 %. Obecně můžeme příměsí rozdělit na dva typy, na inertní (typ I) nebo latentně hydraulické látky (typ II). [18][27]

Inertní příměsí se v betonu nepodílí na hydratačních reakcích. Používají se za účelem lepší zpracovatelnosti a optimalizují zrnitostní křivku vhodnými poměry různých frakcí drobného a hrubého kameniva, aby byl minimalizován vliv mezerovitosti. Jedná se o kamenné moučky a práškové pigmenty. [18][27] [35]

Druhá skupina příměsí mají pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti. Tyto látky vstupují do hydratačního procesu. Nejčastěji se jako latentně hydraulické příměsí používá popílek nebo křemičité úlety. [18][27]

Popílek, který je označován jako fly ash, je produktem spalování uhlí a v podobě velmi jemně mletého prášku (cca 0,09 mm) je zachycován v odlučovačích z plynů topenišť. Jedná se o kulovité sklovité částice sestávající převážně z  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a obsahující nejméně 25 % aktivního  $\text{SiO}_2$ , který zajišťuje pucolánovou aktivitu (latentní hydraulicitu) podobnou chování cementu. Používá se jako příměs do betonu za mnoha účely. V určitých případech nahrazuje část dávky cementu bez ovlivnění konečných pevností betonu. Optimalizuje křivku zrnitosti kameniva (jako typ I) tím, že zvyšuje podíl jemných částic. Významně redukuje vývin hydratačního tepla, což je využíváno při betonáži masivních konstrukcí nebo také zvyšuje odolnost betonu v chemicky agresivním prostředí. [18][27]

Křemičitý úlet neboli mikrosilika se skládá z mnohem menších částic než popílek. To znamená, že může proniknout do mnohem menších pórů v betonu, což vede k lepším vlastnostem pevnosti a odolnosti. Mikrosilika je vedlejším produktem výroby křemíkového kovu nebo ferrosilikonu. Popílek na druhé straně je vedlejším produktem spalování uhlí, obvykle v elektrárnách. [27] [35]

### 2.5.6 Vliv přísad

Přísady jsou na rozdíl od příměsí v betonu do 5 % k dávce cementu. Většinou se jedná o kapalné látky, které se přidávají do čerstvého betonu před nebo při míchání za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. [27]

Přísady se dělí dle ČSN EN 934-2+A1 podle hlavního účelu na následující typy:

- Plastifikátory a superplastifikátory
- Urychlující přísady
- Zpomalující přísady
- Provzdušňovací přísady
- Hydrofobizační přísady



- Stabilizační přísady
- Ostatní přísady, které nejsou specifikovány v normě:
  - **Pěnotvorné přísady**, které při smíchání s vodou vytvářejí stabilní pěnu. Pěnobeton má nižší hustotu a je lehčí než tradiční beton, ale zachovává si určité nosné a izolační vlastnosti.
  - **Expanzní přísady**, které se používají ke kompenzaci smrštění betonu během tuhnutí a tvrdnutí.
  - **Biocidní přísady**, které zabraňují růstu mikroorganismů, jako jsou bakterie, řasy, plísně a houby. Tyto mikroorganismy mohou způsobit estetické problémy, jako jsou skvrny a změny barvy, a mohou také přispět k chemickému rozkladu nebo snížení strukturální integrity betonu.
  - **Protikorozní přísady**, které se přidávají do betonové směsi za účelem ochrany výztužných ocelových prvků před korozí.

[27] [25] [40]

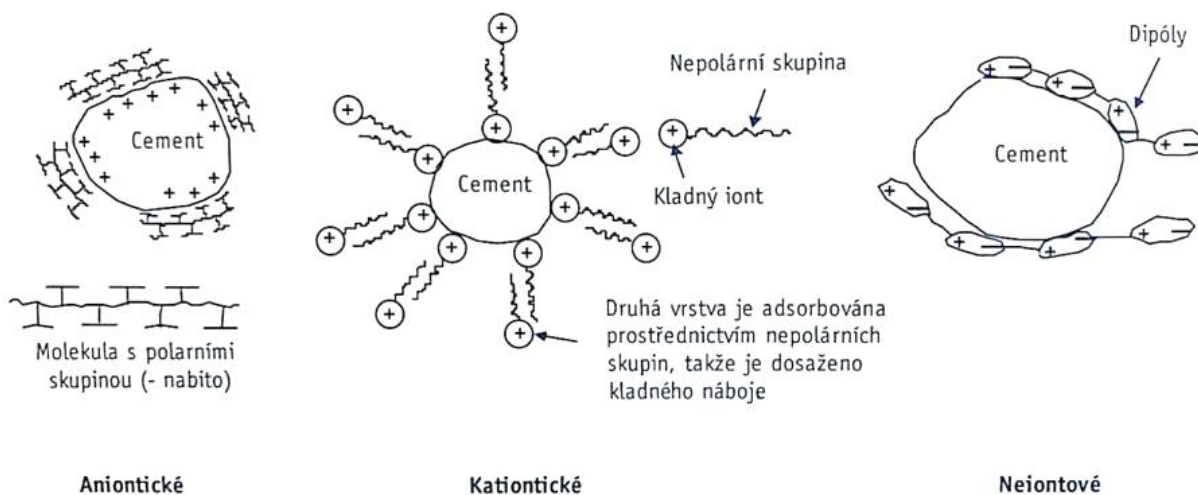
Níže jsou podrobněji rozebrány plastifikační a urychlovací přísady, které mají největší vliv na počáteční pevnosti a také byly použity v experimentální části práce.

### **Plastifikační a superplastifikační přísady**

V kapitole 2.5.4 je vysvětlený vliv množství vody v betonu. Také je zde zmíněno že, zrna cementu se vyznačují vysokým počtem nenasycených povrchových nábojů, což vede k jejich silné tendenci ke shlukování neboli flokulaci, zejména když přijdou do styku s látkou s vysokou polaritou, jako je voda. V důsledku flokulace dochází k zachycení určitého množství vody v těchto shlucích, což znamená, že tato voda není dostupná pro ztekucení betonu. [24] [35]

Organické molekuly, známé svým dispergačním účinkem, mohou být užity k neutralizaci povrchových nábojů na povrchu cementových zrn. Tím mohou redukovat jejich sklon k flokuaci. Tyto molekuly jsou dosud užívány a prodávány jako plastifikátory, superplastifikátory a disperzní činidla (obrázek 37). Co se týče chemismu, mohou být aniontové, kationtové nebo ne-iontové povahy. Plastifikátory aniontového a kationtového typu jsou složeny z molekul, které mají na konci řetězce výrazný náboj. Ten neutralizuje

opačné elektrické náboje na povrchu částic cementu. V případě nepolárních plastifikátorů působí molekuly jako dipóly, obklopující cementové zrno. [24] [35]

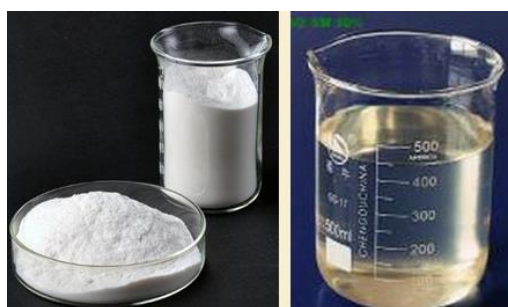


Obrázek 37: Různé druhy dispergujících činidel [24]

Plastifikátory můžeme rozdělit do čtyř základních skupin na základě jejich chemického složení:

- Sulfáty melaminů

Tyto látky se obvykle vyrábějí jako průzračná až lehce žlutá tekutina, nicméně existují i v podobě bílého prášku. Na rozdíl od naftalenových přísad nezpomalují proces tuhnutí. Jelikož obsahují nižší množství sušiny (22 – 40 %), snižuje se riziko předávkování plastifikátorem. Další výhodou je, že nebarví beton. Jsou to jedny z prvních plastifikačních přísad, které se začaly používat, a jsou známy svou vysokou spolehlivostí. [24] [35]



Obrázek 38: Plastifikátory na bázi malaminů [35]

- Sulfáty naftalenů

Většinou se jedná o hnědé kapaliny s množstvím sušiny mezi 40 až 42 %, jsou však k dispozici i jako nahnědlý prášek. Obě formy jsou dodávány jako sodné nebo vápenaté soli, ale sodné jsou častější. Tyto přísady bývají zpravidla levnější, kvůli větší konkurenci na trhu. Výroba těchto ztekuovačů je dosti složitá a existuje řada modifikací. Používají se, když je potřeba udržet vhodnou reologii, protože zpožďují tuhnutí. [24] [35]



Obrázek 39: Plastifikátory na bázi naftalenů [35]

- Lignosulfonáty

Plastifikátory na bázi lignosulfonanu jsou nejstaršími přísadami do betonu, používanými v masovém měřítku. Nejčastěji se používají v kombinaci s meleninovými nebo naftelonovými typy. Někteří výrobci betonů používají lignosulfátové superplastifikátory na začátku míchání a meleninové nebo naftelonové přidávají až na konci míchání, nebo když je na stavbě potřeba upravit zpracovatelnost. Řada výrobců přísad prodává produkty, které jsou směsí naftalenů a lignosulfátů. Plastifikátory na bázi lignosulfátů mohou mít tekutou nebo práškovou podobu. Z hlediska barevnosti je těžké najít rozdíl mezi naftaleny a lignosulfáty, obojí mají téměř shodnou hnědou barvu a také téměř stejnou viskozitu a obsah sušiny. Lignosulfáty jsou ale známý charakterickým karamelovým zápachem. Důvodem rozšíření těchto plastifikátorů je snadná dostupnost suroviny pro jejich výrobu. Plastifikátory na bázi lignosulfonanu se vyrábí z odpadu, který vzniká při výrobě papíru a jsou tedy ekologickou likvidací odpadu papírenského průmyslu. [24] [35]



Obrázek 40: Plastifikátory na bázi lignosulfátů [35]



- Polykarboxyláty

Na konci devadesátých let se na trhu objevily polymery akrylátového typu, označované jako plastifikátory na bázi polykarboxylátů, karboxyléterů nebo polyakrylátů. V těchto typech je aktivní skupinou karboxylová skupina COOH. Tyto přísady jsou označovány jako *superplastifikátory* a mohou mít tekutou nebo práškovou formu. Tekuté přísady mohou mít nažloutlou, světle červenou nebo hnědou barvu. Práškové přísady mají podobu bílého prášku. Polymery dispergují zrna cementů zejména sférickým odpuzováním nikoli elektrostatickým. Tyto typy jsou vícenásobně účinnější než polysulfáty. Redukují potřebné množství záměsové vody o více než 30 procent a jejich dávka je poloviční až třetinová ve srovnání s dobrým polysulfátem. Doba účinnosti těchto ztekucovačů je nejméně jednu hodinu. Extrémním snížením potřebného množství záměsové vody dochází k nárůstům počátečních i konečných pevností betonu. Vzhledem ke schopnosti extrémního ztekucení čerstvých betonů jsou ztekucovače na bázi modifikovaných polykarboxylátu používány i pro výrobu samozhutňovacích betonů. [24] [35]



Obrázek 41: Superplastifikátory [35]

### Urychlovací přísady

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

Urychlovače tuhnutí cementu zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do tuhého. Většinou to bývají látky na bázi hydroxidů, uhličitánů, hlinitanů nebo křemičitanů alkalických kovů. Principem je, že tyto látky urychlují hydrataci  $C_3A$  (trikalciumaluminát), při které se uvolní velké množství tepla, a to vede ke zrychlení hydratace  $C_2S$  (dikalciumsilikát), a tím ke zvýšení počáteční pevnosti betonu. V praxi mají

tyto přísady využití hlavně ve stříkaném betonu nebo v cementových maltách pro utěsňování průniku vody. [27] [35]

Urychlovače tvrdnutí cementu urychlují vývoj počátečních pevností betonu, přičemž mohou a nemusí urychlovat tuhnutí betonu. Jedná se o látky na bázi rozpustných halogenidů, dusitanů, dusičnanů, mravenčanů, tiosíranů nebo tiokyanatanů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Tyto přísady urychlují hydrataci  $C_3S$ . Dochází ke zvýšenému vývinu hydratačního tepla a k tvorbě CSH gelu v počáteční fázi hydratace. V praxi mají tyto přísady využití hlavně tehdy, když je potřeba rychleji odbednit konstrukci nebo při betonáži v zimních měsících, kdy kompenzují zpomalené tuhnutí vlivem nízkých teplot. [27]

Účinnost urychlovače podstatně ovlivňuje druh a pevnostní třída cementu. Největší účinnosti dosahují cementy s vysokým obsahem trikalciumaluminátu ( $C_3A$ ), tj. cementy CEM I. Proto účinek urychlovačů u směsných cementů je vždy menší než u cementů CEM I. [27] [35]

#### ***Rozdíl mezi chloridovými a nechloridovými urychlovači***

Podle chemického složení lze urychlovače pro normální beton rozdělit na chloridové a nechloridové typy. Chloridové urychlovače (např. chlorid vápenatý  $CaCl_2$ ) poskytují ionty chloridu, které mohou urychlit hydratační reakce a zvýšit rychlost tuhnutí betonu. Jejich hlavním negativním dopadem je riziko korozního účinku na ocelovou výztuž v betonu.

Nechloridové urychlovače jsou alternativou, která nepřispívá ke korozním problémům. Mohou to být například alkalické kovy (hydroxid sodný NaOH, hydroxid draselný KOH), nitráty, nitrity, formiáty, alumináty a další složky. Tyto urychlovače fungují různými mechanismy, jako je zlepšení disperze cementových částic, poskytnutí dalších nukleačních míst pro hydratační produkty nebo zvýšení teploty v důsledku exotermních reakcí, které urychlují hydrataci.

#### ***Rozdíl mezi alkalickými a nealkalickými urychlovači***

Dále můžeme rozdělit urychlovače z hlediska pH na alkalické a nealkalické urychlovače. Alkalické urychlovače, jako jsou hydroxid sodný (NaOH) nebo hydroxid draselný (KOH), fungují zvýšením pH hodnoty vodného roztoku v betonové směsi. Vyšší pH hodnota může zvýšit rychlost hydratačních reakcí, protože zlepšuje rozpustnost některých složek cementu a urychluje tvorbu hydratačních produktů, jako je C-S-H gel, který je klíčový pro vývoj pevnosti betonu. Alkalické urychlovače mohou také pomoci při

urychlení hydratace aluminátových fází v cementu, což může vést k rychlejšímu vývoji počáteční pevnosti. Je třeba dávat pozor na možnost křemičito alkalické reakce (ASR), což je chemická reakce mezi alkalickými hydroxidy a reaktivními formami křemičitého skla v kamenivu, která může vést k expanzi a trhlinám v betonu. Proto by měl být výběr a použití alkalických urychlovačů opatrný a zvážený s ohledem na typ použitého kameniva.

Nealkalické urychlovače zahrnují různé sloučeniny, jako jsou nitráty, nitrity, formiáty, alumináty, které mohou urychlovat hydratační procesy jinými mechanismy než zvýšením pH. Nealkalické urychlovače mohou také zvýšit teplotu směsi díky exotermním reakcím, což urychluje hydrataci, zejména v chladnějším počasí. Například alumináty mohou poskytovat další nukleační místa pro hydratační produkty, což umožňuje rychlejší krystalizaci a vývoj pevnosti. [34] [35] [27]

Nejčastěji používané urychlovače:

#### *Chloridové urychlovače*

- Urychlovače na bázi chloridu vápenatého

Urychlovač na bázi chloridu vápenatého, který má chemický vzorec  $\text{CaCl}_2$ , je v běžném betonu nejpoužívanějším druhem urychlovačů. Dokáže významně zkrátit dobu tuhnutí i tvrdnutí cementové pasty. Tento urychlovač se v portlandském cementu používá již od roku 1886. Avšak použití chloridových urychlovačů má své nevýhody. Nejsou vhodné pro železobeton, a navíc se mohou objevit výkvěty, což je nežádoucí zejména u pohledových prvků. [34] [35]

- Urychlovače na bázi alkalických chloridů

Alkalické chloridy, jako je chlorid sodný a draselný, jsou méně účinné než chlorid vápenatý, pokud jde o urychlení tuhnutí a tvrdnutí cementu. Byly formulovány i urychlovače na bázi chloridu složený z chloridu lithného, hydroxidu hlinitého a některých dalších alkalických chloridů, o kterém bylo prohlášeno, že vykazuje vyšší účinnost urychlení než chlorid vápenatý. Kromě vyšších nákladů však také velké množství alkálií zaváděných těmito alkalickými chloridy zvyšuje riziko alkalicko křemičité reakce. Doposud je tedy na trhu jediný komerční urychlovač na bázi chloridů, kterým je výše zmiňovaný – chlorid vápenatý ( $\text{CaCl}_2$ ). [34] [35]



### *Nechloridové urychlovače*

- Urychlovače na bázi dusičnanů

Dusičnany mají nižší účinnost než výše zmiňovaný chlorid vápenatý. Mezi nechloridovými urychlovači je nejběžněji používanou chemickou látkou dusičnan vápenatý, protože může významně zkrátit dobu tuhnutí při nízkých dávkách. Dusičnan vápenatý se obvykle kombinuje s jinými chemikáliemi kvůli jeho nízké účinnosti na počáteční pevnost. Tento typ urychlovačů má jako základní složku tetrahydrát dusičnanu vápenatého ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Dusičnan s trikalciualuminátem a vodou vytváří komplexní sloučeniny, které zvyšují rychlost tvorby hydroxidu vápenatého. Na zvýšení rychlosti tuhnutí nemá u dusičnanů vliv obsah trikalciualuminátu, ale obsah belitu. Nemá korozivní účinky, takže je vhodný i pro železobeton. Ocelovou výztuž chrání dusičnanový iont, který vyvolává tvorbu hydroxidu železnatého. Podle řady technických listů je výrobcí deklarována funkce zabraňovat zmrznutí vody při teplotě pod bodem mrazu, takže umožňují betonáž při nízkých teplotách až do  $-15^\circ\text{C}$ . Funkce jako nemrzoucí přísady ale nebyla prokázána. [34] [35]

- Urychlovače na bázi dusitanu

Urychlovač na bázi dusitanu je produkt, jehož hlavní složkou je dusitan vápenný, chemická sloučenina se vzorcem  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ . Tato látka se vyznačuje svou rozpustností ve vodě a bílými krystaly. Také se používá jako ochrana proti zamrznutí a korozi. Účinnost je přibližně stejná jako účinnost chloridu vápenatého. Problémem použití tohoto urychlovače je, že se v současné době diskutuje, zda není mutagenní, což by mohlo vést ke genetickým změnám a představovat riziko pro zdraví. [34] [35]

- Urychlovače na bázi thiokyanatanů

Thiokyanatany byly v minulosti nazývány také jako sulfokyanatany, thiokyanidy nebo rhodanidy. Hlavní složkou těchto přísad je thiokyanatan sodný ( $\text{NaSCN}$ ), draselný ( $\text{KSCN}$ ) nebo vápenatý ( $\text{Ca}(\text{SCN})_2$ ). Tyto urychlovače působí pouze na proces tvrdnutí, neovlivňují však počáteční tuhnutí. Z tohoto důvodu se často kombinují s jinými urychlovači, zejména s dusitany nebo

dušičnany, které pomáhají posunout i dobu tuhnutí. Protože jsou thiokyanatany klasifikovány jako zdraví škodlivé, používání těchto urychlovačů má klesající tendenci. Další nevýhodou je vysoká cena a potenciální riziko alkalicko-křemičité reakce. Pokud by se překročilo doporučené množství, které je max. 1 % hmotnosti cementu, je thiokyanát vápenatý považován za látku vyvolávající korozní prostředí, což ale nebylo zkouškami prokázáno. Vzhledem k těmto rizikům a nevýhodám je používání thiokyanatanů jako urychlovačů v betonářství na ústupu a v mnoha případech jsou nahrazovány bezpečnějšími a ekonomicky výhodnějšími alternativami. [34] [35]

- Urychlovače na bázi uhličitánů alkalických kovů

Uhličitan draselný ( $K_2CO_3$ ), známý také jako potaš, je běžně používaným urychlovačem založeným na uhličitanech alkalických kovů. Potaš je bílá, výrazně hygroskopická sůl, která je odvozena od kyseliny uhličitě. Jeho vodný roztok vykazuje silné alkalické vlastnosti. Vedle potaše se v praxi využívá i uhličitan sodný ( $Na_2CO_3$ ), obecně známý jako soda. Soda je ve svém bezvodém stavu bílý prášek, který se při kontaktu s vodou rozpouští s uvolňováním tepla způsobeného hydratací. Vodný roztok sody je rovněž silně zásaditý. Potaš funguje jako velmi efektivní urychlovač a je často využíván v aplikacích stříkacího betonu. [35]

- Urychlovače na bázi soli karboxylové kyseliny

Urychlovače na bázi solí karboxylových kyselin jsou běžně používány jak pro zlepšení rychlosti tuhnutí betonu, tak pro ochranu před mrazem. Mravenčan vápenatý,  $Ca(HCOO)_2$ , s pH hodnotou 8,0 je jedním z nejčastěji používaných urychlovačů tohoto typu. Tento urychlovač je srovnatelný s chloridem vápenatým z hlediska účinnosti a nabízí výhody, jako je nekorozivnost a mrazuvzdornost, což z něj činí ideální volbu pro betonářské a zednické práce v chladném období. Mravenčan vápenatý je vhodný pro různé typy betonů a malt, kompatibilní s normou ČSN EN 197, a snižuje potřebu záměsové vody, čímž zlepšuje vlastnosti finálního betonu. Nicméně, mravenčan vápenatý má také svá omezení, jako je nízká rozpustnost ve vodě, což komplikuje jeho dávkování a smíchání s betonovou směsí. Jeho použití je omezeno na práškovou formu a



vyžaduje poměrně vysoké dávky, což může zvýšit obsah alkálií v betonu a potenciálně ovlivnit jeho dlouhodobé vlastnosti. Mravenčan vápenatý není vhodný pro použití s makroporézními a silně savými kamenivými, kterými jsou pempa, keramzit, agloporrit a podobně. [34] [35]

- Urychlovače na bázi křemičitanů

Urychlovačem na bázi křemičitanů je vodní sklo neboli vodný roztok křemičitanu sodného, které je považováno za běžný urychlovač pro stříkaný beton. Vodní sklo, které má chemický vzorec  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , patří díky vysokému pH k zásaditým urychlovačům. Právě díky zásaditému charakteru nastává rychlá chemická reakce s alumináty, čímž se zkrátí počátek doby tuhnutí. Vodní sklo zároveň zvyšuje vaznost a lepivost betonu, protože spolu s vodou vytváří gel. Tohoto se využívá právě u stříkaného betonu, u kterého je potřeba, aby přilnul k podkladu. Problémem je, že u vodního skla dochází k značnému negativnímu ovlivnění struktury betonu, což vede ke snížení konečné pevnosti betonu. Důvodem je přesycení betonu alkáliemi, což může vést k alkalicko-křemičité reakci. [35]

- Urychlovače na bázi hlinitanů

Urychlovače na bázi hlinitanů jsou určeny hlavně pro stříkané betony. Hlinitan sodný ( $\text{Na}_3\text{AlO}_3$ ) a hlinitan draselný ( $\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ) jsou dvě běžné formy těchto urychlovačů. U obou forem se jedná o bílý až nažloutlý prášek, ale také může mít i formu kapaliny. V práškové formě jsou hygroskopické, snadno rozpustné ve vodě a jejich vodný roztok je silně alkalický. Použití hlinitanů způsobuje v betonu velké množství alkálií, což může vést ke zvýšení alkalicko-křemičité reakce. [35]

- Urychlovače na bázi síranů

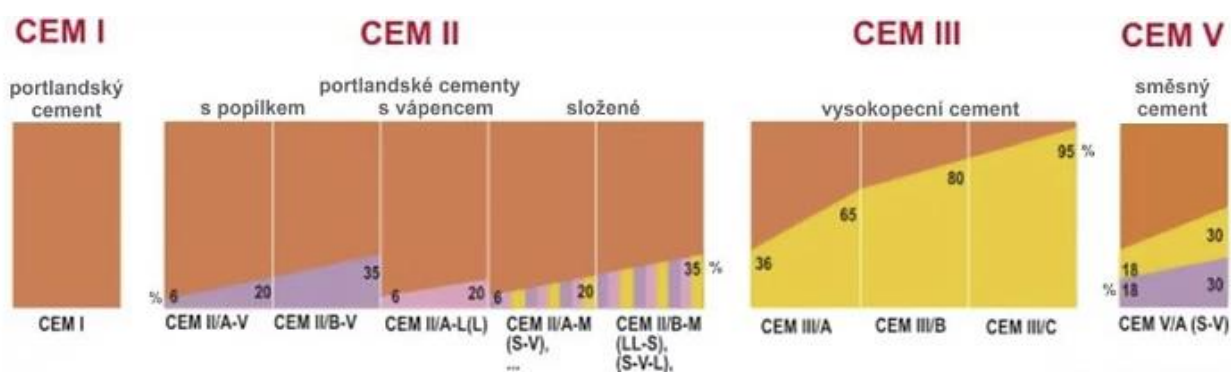
Urychlovače na bázi síranu mají zpravidla základní složku síran hlinitý  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Tyto urychlovače jsou používány téměř výhradně pro výrobu stříkaného betonu. Síran hlinitý má podobu bílého prášku a je rozpustný ve vodě. Při vysoké dávce vyvolá v betonu velmi rychlou chemickou reakci. Síran hlinitý

je často kombinován s dalšími složkami v systémech pro urychlení tuhnutí, včetně organických kyselin jako je kyselina mravenčí, hydroxidu vápenatého a síranu vápenatého. Tato kombinace vede k vytvoření nealkalického přídavného prostředku pro stříkaný beton, který nenavysužuje hladinu alkalických látek v betonu. [36] [35]

## 2.6 Druhy cementů

Obecně platí, že čím je vyšší pevnostní třída cementu a čím méně obsahuje příměsí, tím rychleji probíhá jeho tvrdnutí a tuhnutí. Naopak cementy nižších tříd s vysokým obsahem příměsí tuhnou a tvrdnou pomaleji a jsou vhodné např. pro masivní konstrukce nebo do chemicky agresivního prostředí.

Cementy a jejich značení popisuje ČSN EN 197–1. Dělí se podle několika následujících hledisek [37].



Obrázek 42: Schéma složení jednotlivých druhů cementu [37]

Oranžová barva - portlandský slínek

Fialová barva - popílek (křemičitý)

Růžová barva - vápenec

Žlutá barva - vysokopecní struska

a) podle složení:

Údaje v závorkách uvádějí maximální procentuální obsah jiných složek než slínku. Na obrázku 42 je podíl jiných složek znázorněn jinou barvou než oranžovou.

CEM I	- portlandský cement	(max. 5 % jiných složek)
CEM II	- portlandský cement směsný	(6-35 % jiných složek)
CEM III	- vysokopecní cement	(36-95 % jiných složek)
CEM IV	- pucolánový cement	(max. 55 % jiných složek)
CEM V	- směsný cement	(max. 64 % jiných složek)

b) podle množství příměsí:

A - 6 až 20%

B - 21 až 35%

c) podle konkrétních druhů příměsí:

K - slínek

S - vysokopecní struska

D - křemičitý úlet

P - přírodní pucolány

V - křemičité popílky

W - vápenaté popílky

T - kalcinovaná břidlice

LL, L - vápence

d) podle vaznosti (pevnosti)

číslo uvádí v MPa pevnost / vaznost cementu po 28 dnech.

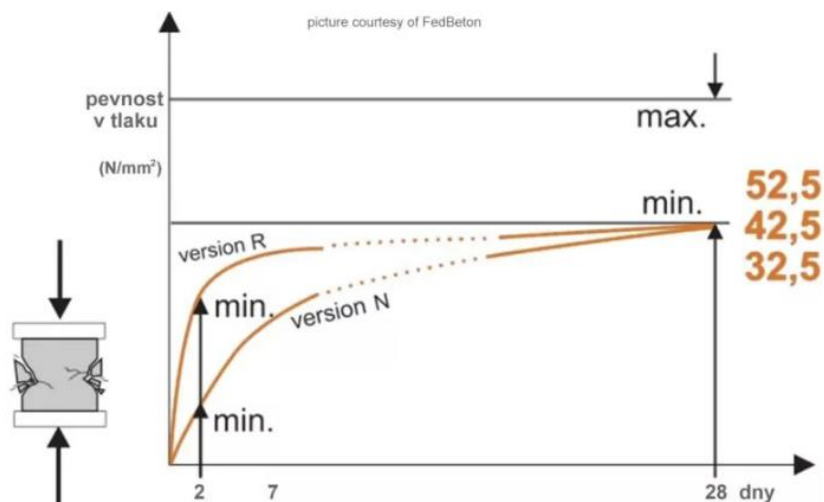
- 32,5,
- 42,5
- 52,5

e) podle rychlosti vývoje počátečních pevností:

N - normální

R - rychlý

L - pomalý



Obrázek 43: Rozdíl vývoje počátečních pevností [37]



Na trhu existuje mnoho různých typů cementu, které se liší svým složením a vlastnostmi. Ačkoliv dva cementy mohou mít stejné označení, jako například CEM I 42,5 R, nemusí to nutně znamenat, že mají identické složení nebo vlastnosti. Norma EN 197-1 totiž stanovuje jen základní požadavky na složení a vlastnosti cementu, ale neudává například mineralogické složení, které je zcela zásadní a je blíže popsáno v kapitole 2.1. Mineralogické složení a mikrostruktura cementu jsou dány surovinami a výrobními procesy, které mohou mít jednotliví výrobci odlišné.

Pokud se zaměříme na rozdíl mezi cementy 42,5 a 52,5, pravděpodobně zjistíme že odlišnost mají v jemnosti mletí a poměru slínekových minerálů, s čím je spojena rozdílná teplota pálení. Cement 52,5 obvykle obsahuje vyšší množství  $C_3S$ , který je hlavním přispěvatelem k rychlé tvorbě pevnosti. Význam jemnosti mletí cementu je podrobněji popsán v kapitole 2.5.3. Čím je cement jemnější, tím rychleji nastává tuhnutí a tvrdnutí, kvůli větší reakční ploše.



## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Představení experimentu

V rámci experimentální části práce byly provedeny laboratorní testy na vzorcích betonu připravených dle stanovených receptur. Vzorky se podrobily různým zkouškám za účelem stanovení jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Výsledky těchto testů poslouží k vyhodnocení vhodnosti použití rychlotvrdnoucích betonů pro opravy letištních ploch a k doporučení pro praxi.

Důležitou součástí experimentální části práce je také ověření teoretických poznatků uvedených v teoretické části. V následujících kapitolách jsou podrobně popsány metodologie a postupy experimentálního výzkumu, včetně přípravy vzorků, provedení testů a analýzy získaných dat. Experiment byl prováděn v laboratoři betonových konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

### 3.2 Cíl experimentu

Díky spolupráci s provozovatelem letiště v Čáslavi byly stanoveny požadavky na vlastnosti betonu, u kterého bude po 24 hodinách dosahovat tlaková pevnost 30 MPa a tahová pevnost za ohybu 4 MPa. Cílem práce je najít beton odpovídající těmto požadavkům. Zkoumány budou navržené betony z cementu CEM 42,5 R a z cementu CEM 52,5 R a následně oba tyto druhy s obsahem urychlovacích přísad. Navíc bude testována maltová směs SANATOP TIX, která je určena pro celoplošné i lokální sanační opravy všech typů betonů a betonových konstrukcí. Tyto materiály budou podrobeny zkouškám začátku doby tuhnutí, pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

### 3.3 Zkoušky cementové pasty

V experimentu byly provedeny zkoušky pro stanovení normální konzistence a stanovení počátku doby tuhnutí cementu, které byly provedeny dle normy ČSN EN 196-3.

#### Použité zkušební přístroje:

- Vicatův přístroj s ručním ovládáním s penetračním válečkem s délkou nejméně 45 mm a průměrem  $10,00 \pm 0,05$  mm. Celková hmotnost pohyblivé části je  $330 \pm 1$  g.
- Vicatův přístroj automatický VICATRONIC Matest – pro měření začátku doby tuhnutí – s jehlou o průměru 5 mm, celková hmotnost pohyblivé části musí být  $300 \pm 1$  g
- Automatická míchačka pro cementovou pastu značky MATEST



Obrázek 45: Automatický Vicatův přístroj



Obrázek 44: Ruční Vicatův přístroj



Obrázek 46: Automatická míchačka pro cementovou pastu [38]

#### **Použité materiály:**

- Cement - CEM I 42,5 R (od firmy Českomoravský cement, a.s.).
- Cement – CEM I 52,5 R - SR 5 white (od firmy Aalborg portland cementir holding)
- Sanační malta – SANATOP TIX Jemný (od firmy Stachema)
- Urychlovací přísada - Betodur A5 (od firmy Stachema)
- Destilovaná voda

Aby se mohl stanovit počátek tuhnutí cementu, je potřeba nejdříve určit správný poměr vody ku cementu, který zajistí kaši normální hustoty. Tato hustota je nastavena tak, aby byla kaše snadno zpracovatelná a aplikovatelná, ale zároveň aby měla dostatečnou pevnost a odolnost po zatvrdnutí.

#### **3.3.1 Stanovení normální konzistence**

Principem je, že cementová kaše projevuje určitý odpor proti vnikání normalizovaného penetračního válečku. Čím více vody kaše obsahuje, tím menší odpor vůči válečku projevuje. Hledá se přesné množství vody, potřebné pro takovou kaši, do které penetrační váleček pronikne do hloubky o předepsané hodnotě.

### 3.3.1.1 Postup

Naváží se 500 g cementu a zvolené množství vody (např. 125 g). Každá dávka kaše se míchá míchačkou na cementy dle normy ČSN EN 196. V co nejkratším čase do míchačky vneseme vodu a cement. Je potřeba dbát na to, aby nedošlo ke ztrátám, a tím i ke změně poměru. Míchačka se uvede do provozu nízkou rychlostí. Čas, ve kterém je zapnuta míchačka, je nazýván „nulový čas“. Zapnutím míchačky začínáme měřit čas 90 sekund. Poté míchání zastavíme na dobu 30 sekund, během níž se stěrkou setře všechna cementová kaše, která ulpí na stěnách a spodní části nádoby a umístí se do středu nádoby. Míchačka se uvede znovu do chodu nízkou rychlostí na dalších 90 sekund. Celková doba chodu míchačky je 3 minuty.

Vicatův prstenec a podložní destička se potře odformovacím prostředkem. Po zamíchání se kaše bez nadměrného hutnění naplní s přebytkem do Vicatova prstence, umístěného na podložní destičce. Vzduch v kaši se odstraní poklepáním prstence. Přebytek kaše se z horní části prstence odstraní opatrným pilovitým pohybem pomocí vhodné pomůcky a povrch se uhladí.

Vicatův přístroj s předem připojeným penetračním válečkem se před zkouškou nastaví do nulové polohy. Vicatův prstenec na podložní destičce se ihned po uhlazení povrchu kaše postaví na střed pod penetrační váleček. Penetrační váleček se posune dolů tak, aby byl ve styku s povrchem cementové kaše. V této poloze zůstane 1 – 2 sekundy, aby se zabránilo počáteční rychlosti nebo většímu zrychlení pohyblivé části. Poté se pohyblivá část náhle uvolní a penetrační váleček se nechá vnikat svisle do středu cementové kaše. Uvolnění válečku musí být provedeno 4 minuty  $\pm$  10 sekund po "nulovém čase". Odečet na stupnici se provede nejdříve 5 sekund po ustálení polohy penetračního válečku nebo 30 sekund po uvolnění penetračního válečku podle toho, co nastane dříve.

Odečtená hodnota, která udává vzdálenost mezi spodní plochou penetračního válečku a podložní destičkou, se zaznamená do protokolu o zkoušce spolu s obsahem vody v cementové kaši v procentech ku hmotnosti cementu. Po každé zkoušce se penetrační váleček ihned očistí. Zkouška se opakuje s cementovými kašemi, obsahujícími různé množství vody tak dlouho, až je dosaženo vzdálenosti mezi spodní plochou penetračního válečku a podložní destičkou  $6 \pm 2$  mm. Obsah vody se uvede s přesností 0,5 % jako obsah vody potřebný pro normální konzistenci.

### 3.3.1.2 Vyhodnocení

V tabulce 2 jsou uvedena množství vody pro jednotlivé cementové pasty. Z tabulky je vidět, že je potřeba o něco více záměšové vody do cementu CEM 52,5 R než do cementu CEM 42,5 R, což je v souladu s částí teoretickou. Také je jasně vidět, že se množství vody nepatrně sníží, pokud je do cementové pasty přidána urychlovací přísada.

MNOŽSTVÍ VODY NA KAŠI NORMÁLNÍ HUSTOTY			
Typ materiálu	Množství cementu	Množství vody	Množství vody/cementu
	[g]	[g]	[%]
CEM 42,5 R	500	140	28,0%
CEM 52,5 R	500	155	31,0%
CEM 42, 5 R+ urychlovač	500	129,5	26,0%
CEM 52,5 R + urychlovač	500	140	28,0%
Malta SANATOP TIX	500	68	13,5%

Tabulka 2: Množství vody na kaši normální hustoty

U maltové směsi SANATOP TIX je výrobcem doporučeno 70 až 74 g vody. Množství vody potřebné na kaši normální hustoty je nižší, než je uvedeno v technickém listě výrobku.

## 3.3.2 Stanovení počátku tuhnutí cementu

### 3.3.2.1 Postup

Vicatův prsteneček se naplní cementovou kaší normální konzistence umíchanou dle postupu popsaném v kapitole 3.3.1.1. Naplněný prsteneček se uloží na podložní destičku do nádoby, doplní se vodou tak, aby povrch kaše byl nejméně 5 mm pod hladinou a vloží se do prostředí s kontrolovanou teplotou při  $20,0 \pm 1^\circ\text{C}$ . Poté se nádoba s podložní destičkou a prstencem postaví pod jehlu automatického Vicatova přístroje. Přístroj je naprogramován tak, aby automaticky provedl měření v předem stanovených intervalech (v našem případě po 5 minutách). Jehla se každých 5 minut posune dolů tak, aby byla ve styku s povrchem cementové kaše. V této poloze zůstane 1–2 sekundy, aby se zabránilo počáteční rychlosti nebo většímu zrychlení pohyblivé části. Poté se pohyblivá část náhle uvolní a jehla se nechá

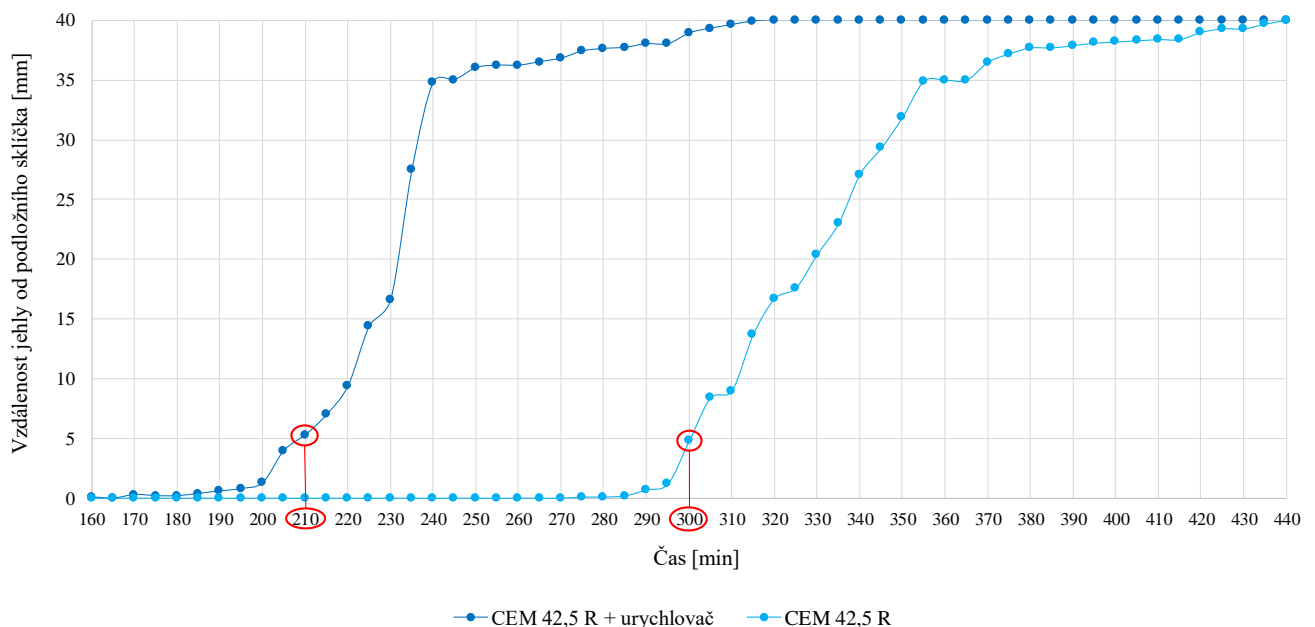
vnikat svisle do cementové kaše. Odečet na stupnici se provede po ustálení polohy jehly nebo 30 sekund po uvolnění jehly, podle toho, co nastane dříve.

Hodnota, která udává vzdálenost mezi koncem jehly a podložní destičkou se zaznamená do protokolu o zkoušce spolu s dobou, která uplynula od nulového času. Vpichy jehly se opakují na stejné cementové kaši v prstenci v různých místech (nejméně 8 mm od okraje prstence, 5 mm od sebe a nejméně 10 mm od předchozího vpichu).

Začátek doby tuhnutí je doba, která uplynula od "nulového času" do doby, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou je  $6 \pm 3$  mm jako počátek tuhnutí cementu s přesností 5 minut.

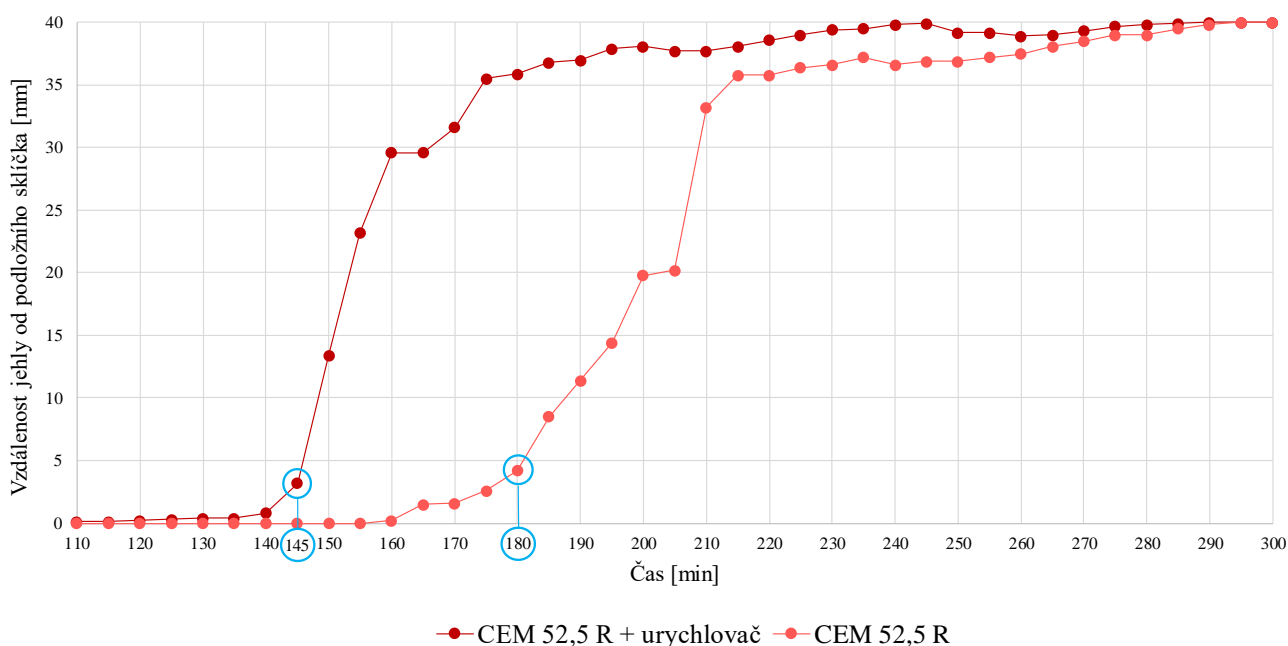
### 3.3.2.2 Vyhodnocení

Čas, který je stanoven jako počátek tuhnutí je v grafech na obrázku 47 a 48 zakroužkovaný. Jedná se o stav, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou je  $6 \pm 3$  mm.



Obrázek 47: Záznam z automatického Vicatova přístroje

Na obrázku 47 je graf znázorňující hloubky penetrace jehly Vicatova přístroje v cementu CEM 42,5 R v čase. Světle modrá křivka znázorňuje pouze cement, zatímco tmavě modrá křivka znázorňuje cement obsahující urychlovač. Urychlovač posunul čas začátku tuhnutí o 90 minut, což je o 30 %. Dle technických listů by měl tento druh cementu bez urychlovací přísady mít počátek tuhnutí ve 211. minutě, což se experimentem nepotvrdilo.



Obrázek 48: Záznam z automatického Vicatova přístroje

Na obrázku 48 je graf znázorňující hloubky penetrace jehly Vicatova přístroje v cementu CEM 52,5 R v čase. Světle červená křivka znázorňuje čistý cement, zatímco tmavě červená křivka znázorňuje cement obsahující urychlovač. Urychlovač posunul čas začátku tuhnutí o 35 minut, což je o necelých 20 %. Dle technických listů by měl tento druh cementu bez urychlovací přísady mít počátek tuhnutí ve 110.-160. minutě, což se experimentem nepotvrdilo.

Níže je pro přehlednost uvedena tabulka 3 s jednotlivými cementy a jejich časy začátku tuhnutí.

ZAČÁTEK DOBY TUHNUTÍ	
Typ materiálu	Čas [min]
CEM 42,5 R	300
CEM 52,5 R	180
CEM 42,5 R + urychlovač	210
CEM 52,5 R + urychlovač	145

Tabulka 3: Začátek doby tuhnutí cementových past



Speciální maltová směs SANTOP TIX, byla také podrobena zkoušce začátku tuhnutí, bohužel výsledky nejsou odpovídající, kvůli nehomogenitě směsi. Záznamy z Vicatova přístroje výrazně oscillovaly. Začátek doby tuhnutí byl dle záznamu pouze odhadnut na 210. minutu.

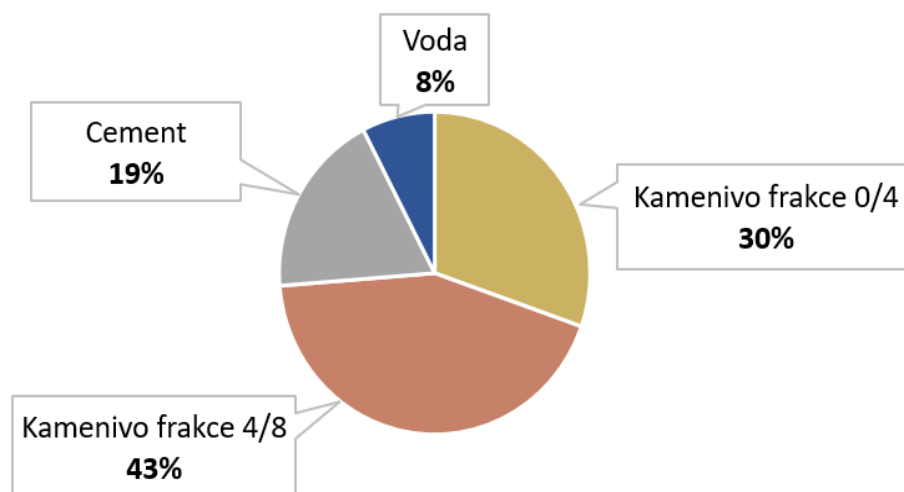
### 3.4 Výroba betonových zkušebních vzorků

Celkově bylo na experiment vyrobeno 70 zkušebních těles na které bylo spotřebováno přes 100 litrů betonu.

#### 3.4.1 Receptury betonu

Hlavním předmětem experimentu bylo zkoumání betonových vzorků z cementu CEM I 42,5 R a vzorků z cementu CEM I 52,5 R z hlediska brzkého nárůstu pevnosti a dále jejich porovnání v závislosti na obsahu urychlovací přísady. Dále byla zkoumána speciální maltová směs SANATOP TIX s polypropylenovými vlákny, určena pro celoplošné i lokální sanační opravy všech typů betonů a betonových konstrukcí.

Níže jsou uvedeny tabulky s jednotlivými recepturami. Na obrázku 49 je graf procentuálního zastoupení jednotlivých složek betonu.



Obrázek 49: Procentuální zastoupení jednotlivých složek v betonu

<b>Receptura 1</b>		
Složky betonu		Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Kamenivo	frakce 0/4	<b>700</b>
	frakce 4/8	<b>1000</b>
Cement	CEM I 42,5 R	<b>430</b>
Voda		<b>175,0</b>
Přísady:	Plastifikátor	<b>2,1</b>
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel		<b>0,41</b>
Objemová hmotnost		<b>2307 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabulka 7: Receptura 1

<b>Receptura 2</b>		
Složky betonu		Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Kamenivo:	frakce 0/4	<b>700</b>
	frakce 4/8	<b>1000</b>
Cement:	CEM I 52,5 R	<b>430</b>
Voda		<b>180,0</b>
Přísady:	Plastifikátor	<b>2,1</b>
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel		<b>0,42</b>
Objemová hmotnost		<b>2312 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabulka 4: Receptura 2

<b>Receptura 3</b>		
Složky betonu		Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Kamenivo:	frakce 0/4	<b>700</b>
	frakce 4/8	<b>1000</b>
Cement:	CEM I 42,5 R	<b>430</b>
Voda		<b>175,0</b>
Přísady:	Plastifikátor	<b>2,1</b>
	Urychlovač	<b>10,75</b>
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel		<b>0,41</b>
Objemová hmotnost		<b>2318 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabulka 6: Receptura 3

<b>Receptura 4</b>		
Složky betonu		Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Kamenivo:	frakce 0/4	<b>700</b>
	frakce 4/8	<b>1000</b>
Cement:	CEM I 52,5 R	<b>430</b>
Voda		<b>180,0</b>
Přísady:	Plastifikátor	<b>2,1</b>
	Urychlovač	<b>10,75</b>
Charakteristiky betonu		
Vodní součinitel		<b>0,42</b>
Objemová hmotnost		<b>2323 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabulka 5: Receptura 4

<b>maltová směs SANATOP TIX</b>	
Složky	Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Maltová směs SANATOP TIX	<b>1720</b>
Voda	<b>284,8</b>
Charakteristiky směsi	
Objemová hmotnost	<b>2005 kg/m<sup>3</sup></b>

Tabulka 8: Receptura maltové směsi SANATOP TIX

### 3.4.2 Použité materiály

Níže jsou podrobně uvedeny použité materiály, které byly na experiment použity. V přílohách jsou ke každému materiálu technické listy.

#### Kamenivo

Do betonu bylo použito kamenivo od firmy Kámen Zbraslav a.s. o dvou frakcích: 0/4 a 4/8. Maximální velikost kameniva 8 mm byla zvolena z několika důvodů:

- Menší kamenivo obvykle zlepšuje zpracovatelnost.
- S menší frakcí se zvyšuje měrný povrch kameniva. Je potřeba více cementové pasty k obalení. To může vést k lepšímu spojení mezi kamenivem a pastou a tím i k vyšší pevnosti betonu.
- Menší kamenivo poskytuje kvalitnější a snadnější povrchovou úpravu.



Obrázek 51: Kamenivo frakce 4/8

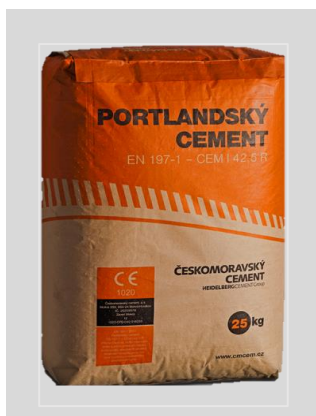


Obrázek 50: Kamenivo frakce 0/4

#### Cementy

Použity byly dva druhy cementů a jedna speciální malta.

- CEM I 42,5 R - od firmy Českomoravský cement, a.s
- CEM I 52,5 R - SR 5 white - od firmy Aalborg portland cementir holding
- Sanační malta – SANATOP TIX - od firmy Stachema



Obrázek 54: CEM I 42,5 R



Obrázek 53: malta SANATOP TIX



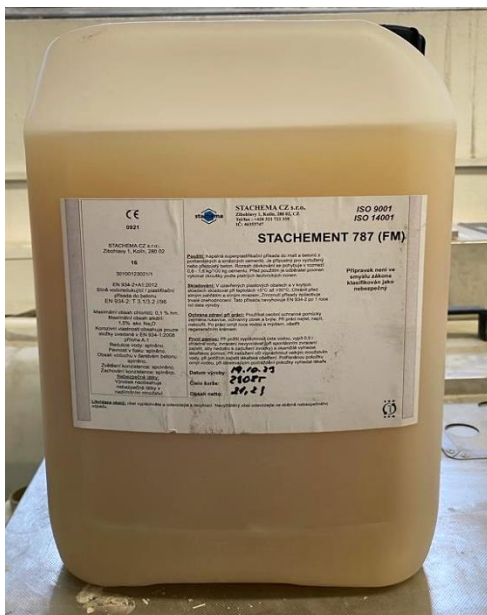
Obrázek 52: CEM I 52,5 R

## Voda

Pro záměsovou vodu byla použita pitná voda z vodovodního řádu.

## Přísady

- Urychlovací přísada Betodur A5 – od firmy STACHEMA
  - Bezchloridová urychlovací přísada na bázi dusičnanu vápenatého. Tento druh urychlovací přísady je podrobně rozebrán v teoretické části v kapitole 2.5.6. Urychlovací přísada byla použita v maximální dávce doporučené výrobcem, která je 3 % hmotnosti cementu.
- Superplastifikační přísada STACHEMENT 787 (FM) – od firmy STACHEMA
  - Superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů. Tento druh plastifikátorů je také podrobně rozebrán v teoretické části v kapitole 2.5.6.



Obrázek 55: Superplastifikační přísada



Obrázek 56: Urychlovací přísada

### 3.4.3 Použité přístroje

- Váha značky Kern EMB, na níž se vážily již hotové vyrobené vzorky nebo suroviny pro výrobu betonu s nižší hmotností (například přísady).
- Váha značky TSCALE, na které se odměřovaly suroviny pro výrobu betonu s vyšší hmotností (například kamenivo).
- Laboratorní míchačka od společnosti SMARTEST CZ s.r.o. o objemu bubnu 125 litrů, ve které byl připraven beton.
- Vibrační stůl Standart VTS od společnosti Krejčí engineering, s.r.o, pomocí kterého byly vzorky hutněny.



Obrázek 58: Laboratorní míchačka



Obrázek 59: Vibrační stůl Standart VTS



Obrázek 57: Váha značky TSCALE

### 3.4.4 Postup výroby

Vzorky byly vyráběny, aby se mohly podrobit tlakové zkoušce a zkoušce tahu za ohybu. Z toho důvodu bylo použito dvoje bednění. Krychle o rozměru strany 100 mm a trámce o rozměrech 400x100x100 mm.

Nejdříve byly naváženy pomocí vah přesné dávky jednotlivých složek receptury. Po důkladném smíchání suchých složek, kameniva a cementu, byla přidána voda a plastifikátor, popřípadě urychlovač. Míchání probíhalo v míchačce tak dlouho, dokud neměl čerstvý beton správnou konzistenci a všechny složky nebyly řádně promíchány.

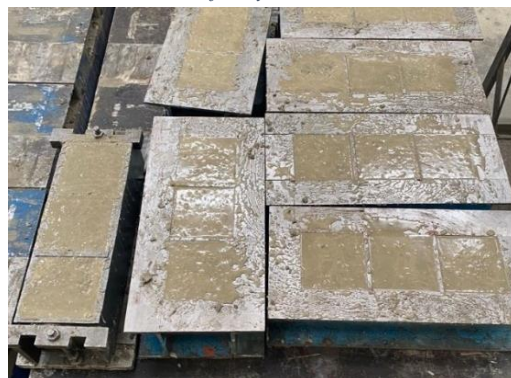
Poté se čerstvý beton ukládal do bednění vymazaného odformovacím prostředkem, ve kterém byl zhutněn pomocí vibračního stolu. Následně beton zrál v laboratorním prostředí, kde nebyly regulovány okolní podmínky. Průměrně se teplota v laboratoři pohybuje kolem 23° C a vlhkost vzduchu kolem 40 %.



Obrázek 62: Suroviny těsně před přidáním do míchačky



Obrázek 60: Bednící formy



Obrázek 61: Čerstvý zhutněný beton

### 3.5 Destruktivní zkoušky betonu

Destruktivní zkoušky betonu slouží pro posouzení nebo ověření mechanických vlastností materiálu. Tyto zkoušky vedou k trvalému poškození nebo zničení testovaného vzorku, ale poskytují přesné a spolehlivé údaje o jeho pevnostních charakteristikách. V experimentu byly použity dvě základní zkoušky: tlaková zkouška a zkouška tahu za ohybu – čtyřbodová. Použity byly zatěžovací stroje FP100 a ZD100 od firmy BetonSystém viz obrázek 63 a 64.

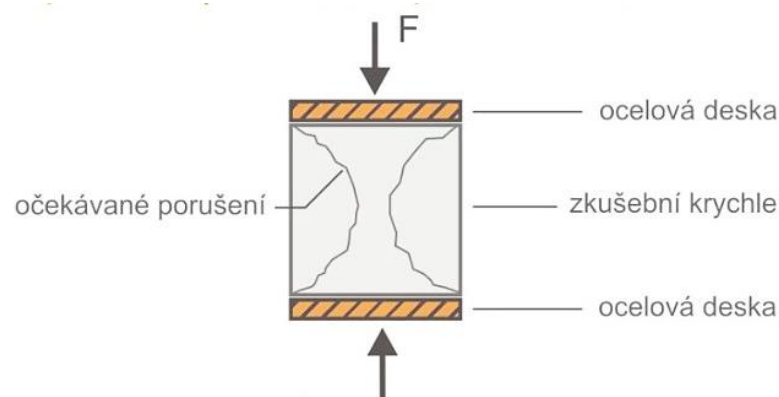


Obrázek 63: zatěžovací stroj ZD100



Obrázek 64: Zatěžovací stroj FP100

#### 3.5.1 Zkouška tlakové pevnosti betonu



Obrázek 65: Schéma zkoušky tlakové pevnosti [37]

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

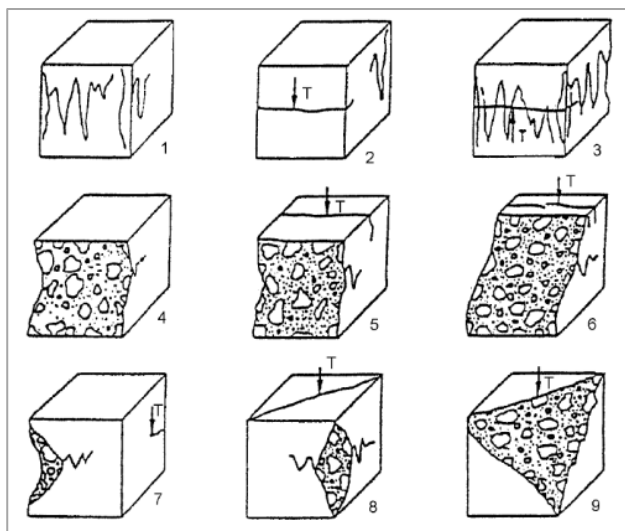
Vždy se zkouší minimálně 3 tělesa. Před samotnou zkouškou se ověří geometrie tělesa. Vzorek se očistí a vloží mezi tlačené desky lisu tak, aby byl přesně ve středu tlačných ploch a tlak působil kolmo ke směru hutnění betonu. Těleso je plynule zatěžováno tlakem až do jeho porušení. Pevnost v tlaku vzorku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

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

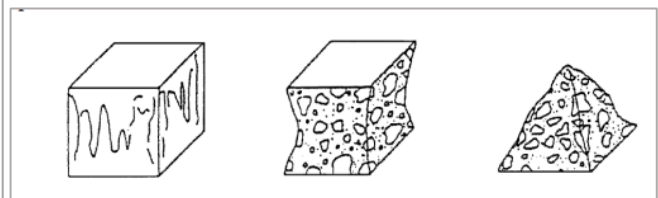
Kde:

- $f_{cc}$  ... pevnost v tlaku [N/mm<sup>2</sup>, MPa]
- $F_{max}$  ... maximální zatěžovací síla [N]
- $A_c$  ... kolmá plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]

Po provedení zkoušky je nutná vizuální kontrola, zda došlo ke správnému tvaru porušení. Příklady správných a nesprávných porušení zkušebních vzorků je znázorněno na obrázcích 65 a 66. [6]



Obrázek 66: Příklady nesprávně porušených vzorků



Obrázek 67: příklady správně porušených vzorků

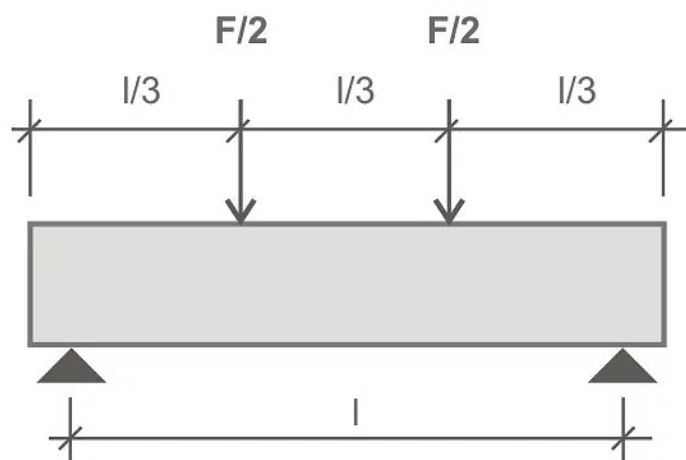




Obrázek 68: Sekvence fotek z průběhu zatěžovací zkoušky

### 3.5.2 Zkouška pevnosti betonu v tahu za ohybu

Tahová pevnost se stanoví dle normy ČSN EN 12390-5 „Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles“. Pevnost v tahu za ohybu byla zkoumána, neboť ta přispívá k odolnosti vůči pojezdu po vozovce. Je to zkouška, která se provádí na betonovém trámci rozměrů 400x100x100 mm. Vždy se zkouší nejméně tři vzorky. Před zkouškou je potřeba ověřit geometrii tělesa a pak ho správně osadit do zkušebního lisu kolmo na směr hutnění. Podle způsobu zatížení se jedná o tři nebo čtyřbodové (viz obrázek 68) uspořádání. V tomto experimentu byl použit čtyřbodový ohyb. Rychlost zatěžování má být konstantní v rozsahu od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s.



Obrázek 69: Zatěžovací schéma zkoušky tahu za ohybu

Pevnost v tahu ohybem je dána následujícím vztahem:

$$f_{cf} = \frac{Fl}{b * h^2}$$

Kde:

$f_{cf}$  ... pevnost v tahu ohybem [Mpa]

$F$  ... maximální zatížení [N]

$l$  ... čisté rozpětí mezi podporami [mm]

$d_1, d_2$  ... rozměry příčného řezu tělesem [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.



Obrázek 70: Betonový vzorek osazený ve zkušebním přístroji

### 3.6 Vyhodnocení výsledků

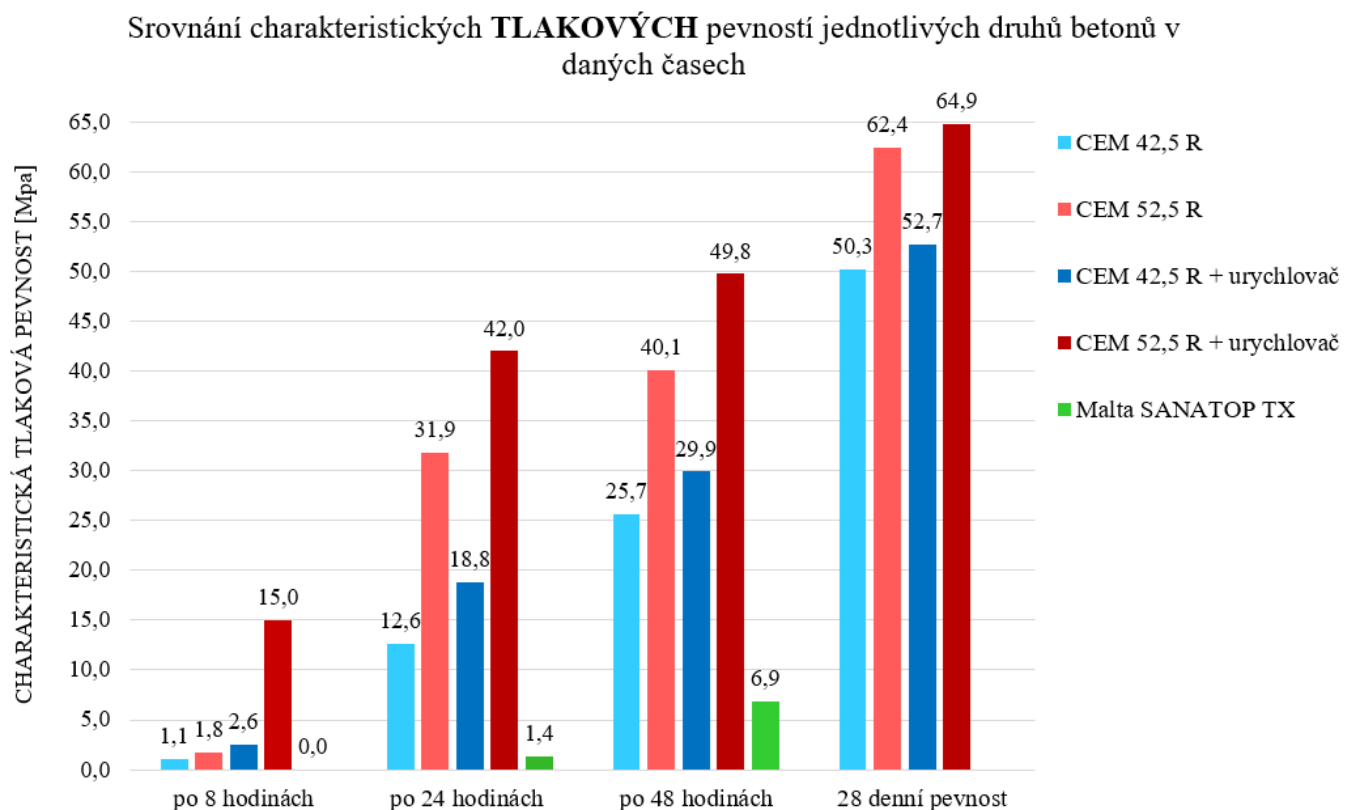
Výsledky byly zpracovány dle normy ČSN EN 1990, přílohy D s využitím MS Excel. Zkoušky rané pevnosti byly provedeny po 8, 24 a 48 hodinách po uložení čerstvého betonu do bedně. Normové pevnosti byly odzkoušeny po 28 dnech.

#### 3.6.1 Vyhodnocení tlakových pevností

Na obrázku 70 je sloupcový graf znázorňující srovnání charakteristických tlakových pevností jednotlivých druhů betonu v časech 8, 24, 48 hodin a 28 dní.

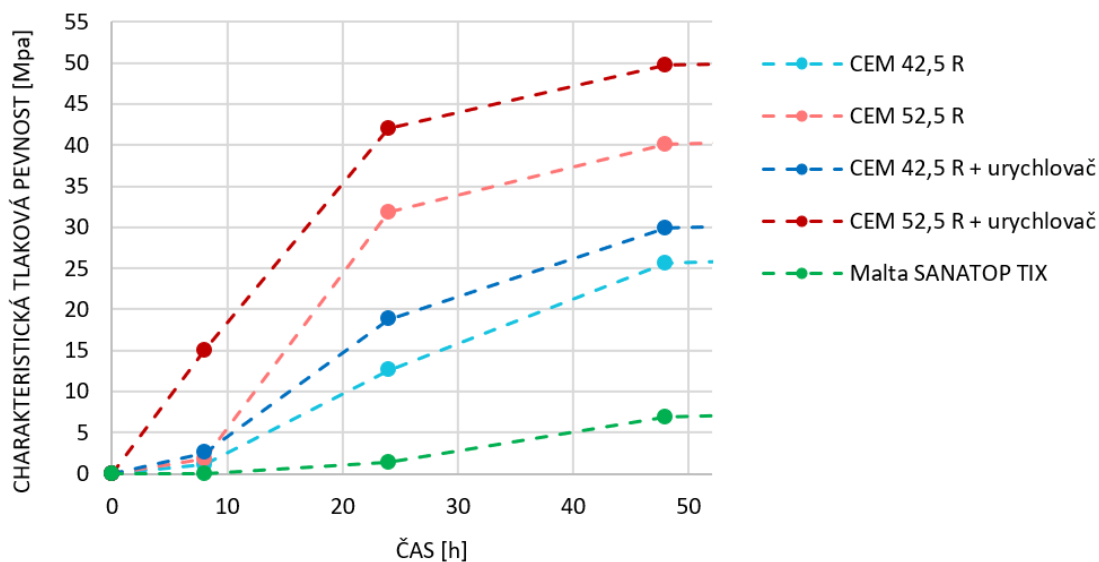
Dle předpokladu, jasně nejvyšších hodnot dosáhly vzorky vyrobené z CEM 52,5 R s přidaným urychlovačem. Cíl, aby beton dosahoval po 24 hodinách 30 MPa splnily vzorky vyrobené z CEM 52,5 R jak s urychlovačem, tak bez něj.

Naopak nečekaně nízké pevnosti dosáhly vzorky ze speciální maltové směsi SANATOP TIX s polypropylenovými vlákny. Po 8 hodinách krychle vyrobené z tohoto produktu byly stále v procesu tuhnutí, nikoli v procesu tvrdnutí. Krychle po odbednění byly plastické a jejich tvar byl možný narušit pouhou manipulací. Po provedení tlakových zkoušek byl produkt vyhodnocen jako nevyhovující a nebyl podroben dalšímu zkoumání.



Obrázek 71: Sloupcový graf tlakových pevností

Na obrázku 72 je znázorněný graf nárůstu raných tlakových pevností v čase. U betonu vyrobeného z CEM I 52,5 s urychlovačem je vidět od začátku téměř lineární nárůst až do času 24 hodin, kde se nárůst tlakové pevnosti zpomalí. U ostatních vzorků lze zrychlení pozorovat až po 8 hodinách.



Obrázek 72: Nárůst tlakových pevností v čase

Pro přehlednost je níže uvedená tabulka 9 s tlakovými charakteristickými hodnotami.

CHARAKTERISTICKÉ TLAKOVÉ PEVNOSTI [Mpa]				
popis vzorků	po 8 hodinách	po 24 hodinách	po 48 hodinách	28 denní pevnost
CEM 42,5 R	<b>1,1</b>	<b>12,6</b>	<b>25,7</b>	<b>50,3</b>
CEM 52,5 R	<b>1,8</b>	<b>31,9</b>	<b>40,1</b>	<b>62,4</b>
CEM 42,5 R + urychlovač	<b>2,6</b>	<b>18,8</b>	<b>29,9</b>	<b>52,7</b>
CEM 52,5 R + urychlovač	<b>15,0</b>	<b>42,0</b>	<b>49,8</b>	<b>64,9</b>
Malta SANATOP TX	<b>0,0</b>	<b>1,4</b>	<b>6,9</b>	/

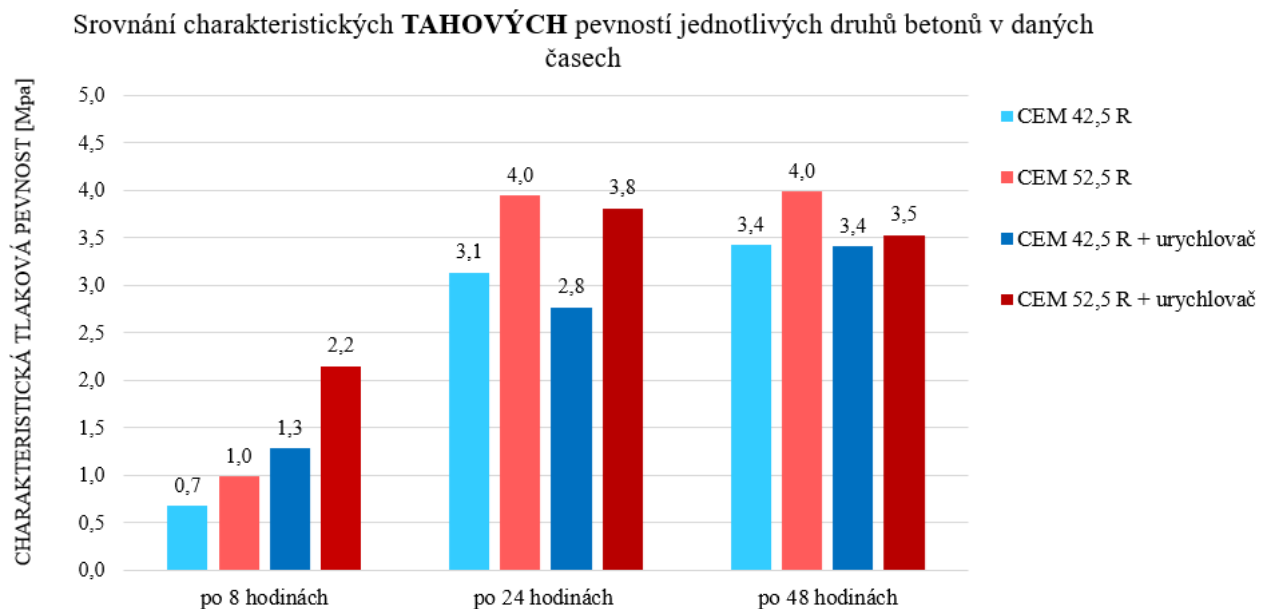
Tabulka 9: Charakteristické tlakové pevnosti

Podle charakteristických 28denních tlakových pevností jednotlivé druhy betonu zařazeny dle normy ČSN EN 206-1+A2 do jednotlivých pevnostních tříd:

- Beton z CEM I 42,5 R – **C40/50**
- Beton z CEM I 52,5 R – **C50/60**
- Beton z CEM I 42,5 R + urychlovač – **C40/50**
- Beton z CEM I 52,5 R + urychlovač – **C50/60**

### 3.6.2 Vyhodnocení tahových pevností

Na obrázku 73 je graf znázorňující srovnání charakteristických tahových pevností jednotlivých druhů betonu v časech 8, 24 a 48 hodin



Obrázek 73: Sloupcový graf tahových pevností

Cíl, aby beton dosahoval po 24 hodinách 4 MPa splnily pouze vzorky vyrobené z CEM 52,5 R bez urychlovací přísady. Kdyby se však experiment prováděl ve větším měřítku, je velmi pravděpodobné, že by stanovených požadavků dosáhl i beton vyrobený z CEM 52,5 R s urychlovací přísadou. V tabulce 10 je srovnání charakteristických pevností a aritmetických průměrů naměřených hodnot. Charakteristická pevnost materiálu je nižší než průměrná pevnost, aby se zohlednila možná variace ve vlastnostech materiálu a zajistila, že konstrukce zůstane bezpečná i ve výjimečném případě. Kdyby bylo měřených vzorků více, rozdíl mezi těmito statistickými hodnotami by klesal.

TAHOVÉ PEVNOSTI [Mpa]						
Popis vzorků	8 hodin		24 hodin		48 hodin	
	Průměr	Charakteristická hodnota	Průměr	Charakteristická hodnota	Průměr	Charakteristická hodnota
CEM I 42,5 R	0,9	0,7	3,4	3,1	3,7	3,4
CEM I 52,5 R	1,1	1,0	4,3	4,0	4,4	4,0
CEM I 42,5 R + urychlovač	1,4	1,3	3,3	2,8	3,6	3,4
CEM I 52,5 R + urychlovač	2,3	2,2	4,0	3,8	4,0	3,9

Tabulka 10: Srovnání charakteristických pevností a aritmetických průměrů

Charakteristická pevnost betonu je statistickým parametrem, který je definován jako hodnota pevnosti v tlaku, pod kterou se očekává, že bude mít méně než 5 % vzorků betonu nižší pevnost. Jinými slovy, pokud provedeme testy na určitém množství vzorků betonu ze stejné receptury, 95 % těchto vzorků by mělo mít pevnost vyšší, než je charakteristická pevnost. Větší soubor dat může vést k nižší směrodatné odchylce, na které je závislá charakteristická hodnota, pokud budou data konzistentní (málo rozptýlená). Směrodatná odchylka vypovídá o tom, nakolik se od sebe navzájem typicky liší jednotlivé případy v souboru zkoumaných hodnot.

Požadavky na tlakovou pevnost splnil beton vyrobený z CEM 52,5 R jak s urychlovačem, tak bez něj. Požadavky na tahovou pevnost splnil pouze beton z CEM 52,5 bez urychlovače. Velikou výhodou betonu vyrobeného z CEM 52,5 s urychlovačem je velmi vysoká pevnost po 8 hodinách.

### 3.6.3 Porovnání druhů cementu

V tabulkách 12 a 13 je vyčísleno, jaký vliv má použití jiného druhu cementu na rychlost nárůstu pevnosti. Použity byly cementy CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R, jejichž technické listy jsou v příloze.

**CEM I 52,5 R** dánský bílý cement Aalborg White je rychle tvrdnoucí portlandský cement s vysokými hodnotami počátečních a standardních pevností. Je vyráběn z vysoce čistého vápence a velmi jemně mletého písku neboli z tzv. bílého kameniva (bílá žula, bílý mramor a rozdrcený pálený křemen). Dle většiny státních norem jej lze charakterizovat jako cement s nízkým obsahem alkálií (méně než 0,3 %) a vysokou odolností vůči působení síranů (obsah minerálu  $C_3A$  v cementovém slínku je menší než 5 %). Jeho měrný povrch je **400 m<sup>2</sup>/kg**.

**CEM I 42,5 R** je od společnosti Českomoravský cement, a.s., která je jedním z předních výrobců stavebních materiálů v České republice. Tento druh je široce používán ve stavebnictví pro výrobu betonu a stavebních hmot. Jeho měrný povrch je **409 m<sup>2</sup> /kg**.

CEMENT CEM I 52,5 R		CEMENT CEM I 42,5 R	
Minerál	% zastoupení	Minerál	% zastoupení
C <sub>3</sub> S	70	C <sub>3</sub> S	59,4
C <sub>2</sub> S	16	C <sub>2</sub> S	14,4
C <sub>3</sub> A	5	C <sub>3</sub> A	5,5
C <sub>4</sub> AF	1	C <sub>4</sub> AF	7,7

Tabulka 11: Slinkové složení cementů

Zajímavé je, že použitý cement CEM I 52,5 R má nižší hodnotu měrného povrchu než použitý cement CEM I 42,5 R i přesto, že dle teoretické části práce by se hodnoty očekávaly naopak. Z toho vyplývá, že za rozdíl v rychlosti nabývání pevnosti může mineralogické složení nikoli jemnost mletí. Porovnání mineralogického složení je v tabulce 11. CEM I 52,5 R má vyšší procentuální podíl alitu a belitu na úkor ostatních dvou minerálů. Vyšší obsah alitu, může zvyšovat počáteční pevnost. Zajímavé však je, že obsah trikalciumaluminátu, který má největší reaktivitu s vodou a dosahuje tím vysokých počátečních pevností, je u CEM I 52,5 R nižší.

Aby se vysvětlila vyšší rychlost nárůstu pevnosti u CEM I 52,5 R byl porovnán obsah ostatních složek. Konkrétně jsem se zaměřili na **obsah sádrovce**, který se do cementu přidává právě za účelem zpomalení tuhnutí. U cementu CEM I 52,5 R je jeho obsah **4 %**, zatímco u cementu CEM I 42,5 R **5,4 %**.

Za vyšší rychlost nárůstu pevnosti u CEM I 52,5 R oproti CEM I 42,5 R může vyšší obsah alitu a nižší obsah sádrovce.

Níže jsou uvedeny tabulky 12 a 13, kde je vyčísleno kolikrát vyšší pevnost nabýval beton vyrobený CEM I 52,5 R než beton vyrobený z CEM I 42,5 R.

POROVNÁNÍ CEMENTŮ								
Druh cementu v betonu	pevnost v tlaku po 8 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 24 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 48 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 28 dnech	navýšení pevnosti
	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]
<b>CEM 42,5 R</b>	1,10	<b>1,6 krát</b>	12,6	<b>2,5 krát</b>	25,7	<b>1,6 krát</b>	50,3	<b>1,2 krát</b>
<b>CEM 52,5 R</b>	1,78		31,9		40,1		62,4	

Tabulka 12: Porovnání typu cementu TLAK



POROVNÁNÍ CEMENTŮ						
Druh cementu v betonu	Tahová pevnost po 8 hodinách	navýšení pevnosti	Tahová pevnost po 24 hodinách	navýšení pevnosti	Tahová pevnost po 48 hodinách	navýšení pevnosti
	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]
<b>CEM 42,5 R</b>	0,68	<b>2,6 krát</b>	3,1	<b>1,3 krát</b>	3,4	<b>1,2 krát</b>
<b>CEM 52,5 R</b>	1,78		4,0		4,0	

Tabulka 13: Porovnání typu cementu TAH

### 3.6.4 Účinnost urychlovací přísady

V tabulce 14 je účinnost urychlovače v závislosti na druhu cementu. V tabulce je vyčísleno kolikrát je tlaková pevnost betonů s urychlovací přísadou v daných čase vyšší než u betonů bez ní. Čím dříve byly zkoušky provedeny, tím více se projevil vliv přísady na tlakové pevnosti. U 28 denní tlakové pevnosti je procentuální vliv velmi malý.

ÚČINOST URYCHLOVACÍ PŘÍSADEY TLAK									
Popis vzorků		pevnost v tlaku po 8 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 24 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 48 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 28 dnech	navýšení pevnosti
		[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]
CEM 42,5 R	bez urychlovače	1,10	<b>2,3 krát</b>	12,6	<b>1,5 krát</b>	25,7	<b>1,2 krát</b>	50,3	<b>1,0 krát</b>
	s urychlovačem	2,57		18,8		29,9		52,7	
CEM 52,5 R	bez urychlovače	1,78	<b>8,4 krát</b>	31,9	<b>1,3 krát</b>	40,1	<b>1,2 krát</b>	62,4	<b>1,0 krát</b>
	s urychlovačem	15,04		42,0		49,8		64,9	

Tabulka 14: Účinnost urychlovací přísady na tlakovou pevnost

Překvapivě se může jevit vliv na nárůst pevnosti u betonu vyrobeného z CEM 52,5 R po 8 hodinách. Zde je pevnost u vzorků s přísadou více než 8krát větší než u vzorků, kde přísada nebyla použita. Vysvětlením, proč zde má urychlovač mnohonásobně větší vliv než u druhého cementu, je poměr slínekových minerálů s chemickým působením urychlovací přísady. Jak bylo vysvětleno v teoretické části této práce, dusičnan vápenatý, který se nachází v urychlovací přísadě, poskytuje volné kationty  $\text{Na}^+$ , které mohou interagovat s povrchem cementových částic a zvýšit iontovou sílu roztoku. Tím se zvýší rychlost hydratace silikátů v cementu, což vede k rychlejšímu vývoji C-S-H, gelu a tím k dřívější pevnější struktuře. Vyšší podíl silikátů (viz tabulka 15) v CEM I 52,5 je důvodem proč má zde urychlovací přísada po 8 hodinách mnohonásobně větší vliv než u vzorků vyrobených



z CEM I 42,5 R. Zjednodušeně řečeno, účinek dusičnanu vápenatého jako urychlovací přísady je výraznější u cementů s vyšším obsahem silikátových minerálů, protože zde může více přispět k rychlosti hydratačních reakcí, které jsou klíčové pro vývoj pevnosti v počátečních fázích tuhnutí betonu.

ÚČINOST URYCHLOVACÍ PŘÍSADY TAH							
Popis vzorků		po 8 hodinách	navýšení pevnosti	po 24 hodinách	navýšení pevnosti	po 48 hodinách	navýšení pevnosti
		[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]
CEM 42,5 R	bez urychlovače	0,68	<b>1,9 krát</b>	3,1	<b>0,88 krát</b>	3,4	<b>1,00 krát</b>
	s urychlovačem	1,29		2,8		3,4	
CEM 52,5 R	bez urychlovače	0,99	<b>2,2 krát</b>	4,0	<b>0,97 krát</b>	4,0	<b>0,88 krát</b>
	s urychlovačem	2,15		3,8		3,5	

Tabulka 15: Účinnost urychlovací přísady na tahovou pevnost

V tabulce 15 je vyčíslen vliv urychlovací přísady na tahovou pevnost. Po 8 hodinách přísada přibližně zdvojnásobila tahovou pevnost u obou typů cementů.

Nečekané výsledky nastaly po 24 a 48 hodinách, které jsou v tabulce 15 zvýrazněny červenou barvou. Urychlovač zde všechny tahové pevnosti nepatrně zhoršil. Zatímco tlaková pevnost byla u obou směsí s urychlovačem vyšší ve všech měřených intervalech (8, 24 a 48 hodin), tahová pevnost může být ovlivněna jinými faktory, jako jsou trhliny a smrštění, které jsou pro tahovou pevnost kritičtější než pro tlakovou. K vývoji mikrotrhlin může vést právě rychlé tuhnutí a smrštění. Když urychlovač časově zkrátí procesy tuhnutí a tvrdnutí betonu, může dojít k nerovnoměrnému vytvrzování a vývoji teplotních gradientů uvnitř betonového prvku. Toto může vést k vnitřnímu napětí, které překročí tahovou pevnost betonu, a tím vznikají mikrotrhliny. Urychlovače také mohou způsobit, že beton rychleji ztrácí vodu a smršťuje se. Pokud je smrštění nerovnoměrné nebo je betonový prvek omezen ve svém volném smrštění (například, je-li spojen s jinými konstrukčními prvky, což ale není tento případ), může to také vést ke vzniku mikrotrhlin.

### 3.6.5 Zhodnocení speciální malty SANATOP TIX

Překvapivě nízkých pevností dosáhla speciální směs SANATOP TIX s polypropylenovými vlákny. Směs je určena pro celoplošné i lokální sanační opravy a dle technických listů by pevnost v tlaku měla přesahovat hodnotu 45 MPa. Z těchto důvodů byla směs zařazena do experimentu, aby byla sledována její raná pevnost. Po 8 hodinách od zhotovení, byly vzorky stále v plastickém stavu, tudíž nepřenášely téměř žádné zatížení. Po 24 hodinách charakteristická pevnost vzorků dosáhla pouze 1,4 MPa. Po 48 hodinách měla charakteristická pevnost malty hodnotu 6,9 MPa.

Důvodem tak nízkých počátečních pevností mohlo být použití vyšší dávky vody, než je doporučeno výrobcem. Výrobce doporučuje do 25 kg směsi přidat 3,5 – 3,7 kg vody. Ve výrobě se nejdříve postupovalo v dávkování dle technického listu, ale při těchto hodnotách se směs nespojila a místy se jednalo o sypký materiál. Z toho důvodu byla dávka zvýšena na 4,1 kg vody do 25 kg suché směsi, což je přibližně o 10 % více.

Dalšímu zkoumání (zkouška tahu za ohybu) nebyla tato speciální malta vystavena, protože byla vyhodnocena jako nevyhovující. Směs SANATOP TIX s polypropylenovými vlákny není na rychloopravy letištních ploch vhodná.

### 3.6.6 Ekonomické zhodnocení

Cenové srovnání	
Druh betonu	Kč/m <sup>3</sup>
Beton z cementu CEM 42,5 R	<b>3 617 Kč</b>
Beton z cementu CEM 42,5 R + urychlovač	<b>4 033 Kč</b>
Beton z cementu CEM 52,5 R	<b>6 219 Kč</b>
Beton z cementu CEM 52,5 R + urychlovač	<b>6 635 Kč</b>

Tabulka 16: Cenové srovnání betonů

Výše je uvedena tabulka 16, kde jsou vzestupně seřazeny jednotlivé druhy betonů dle ceny za 1 m<sup>3</sup> betonu. Čím rychlejší nárůst pevnosti, tím vyšší náklady na výrobu betonu.

Výroba bílého cementu (CEM 52,5 R) je náročnější než výroba běžného šedého cementu, což odráží i vyšší cena bílého cementu na trhu. Výpal bílého cementu se obvykle pohybuje v rozmezí 1350–1450 °C, zatímco pro šedý portlandský cement je to obvykle

okolo 1450-1500 °C. Nižší teplota výpalu pomáhá udržet bílou barvu cementu, protože vyšší teploty podporují redukci železnatých sloučenin na železo, což vede k tmavšímu zbarvení produktu. Zároveň mají světlé cementy sníženou dávku  $C_4AF$ , který obsahuje  $Fe_2O_3$  a ten má tmavě červenou až hnědou barvu (viz obrázek 74.), čímž cement výrazně ztmavuje. Navíc, při výrobě bílého cementu se používají alternativní paliva nebo metody spalování, které minimalizují tvorbu  $NO_x$  a dalších barevných oxidů. Tímto způsobem se zachovává bílá barva výsledného produktu.



Obrázek 74:  $Fe_2O_3$  (oxid železitý) [39]

### 3.6.7 Porovnání výsledků s jinými autory

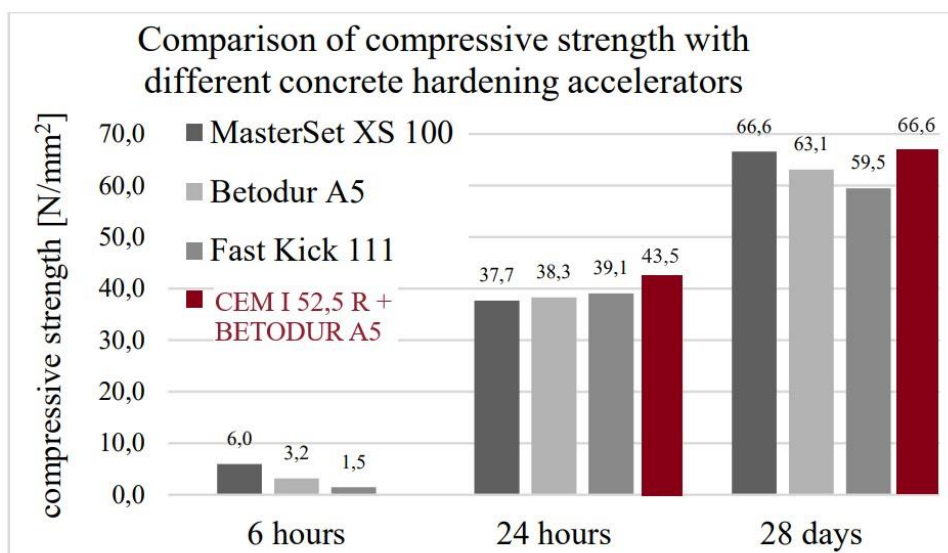
Níže jsou porovnány výsledky této diplomové práce s výsledky závěrečné práce, která nese název „Analýza vlivu přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí samozhutnitelného betonu“ z roku 2019. Jejím autorem je Ondřej Šmíd, DiS z dopravní fakulty Jana Pernera. Důvod srovnávání právě s touto prací je, že v experimentální části byl použit stejný cement CEM I 52,5 R a urychlovací přísada Betodur A5 jako byla použita při tomto experimentu.

POROVNÁNÍ ÚČINOSTI URYCHLOVACÍ PŘÍSADY					
Popis vzorků		po 24 hodinách	navýšení pevnosti	pevnost v tlaku po 28 dnech	navýšení pevnosti
		[Mpa]	[-]	[Mpa]	[-]
Hodnoty z cizí práce	CEM I 52,5 R bez urychlovače	21,5	<b>1,2 krát</b>	70,7	<b>1,0 krát</b>
	CEM I 52,5 R s urychlovačem	26,7		70,7	
Vlastní hodnoty	CEM I 52,5 R bez urychlovače	31,9	<b>1,3 krát</b>	62,4	<b>1,0 krát</b>
	CEM I 52,5 R s urychlovačem	42,0		64,9	

Tabulka 17: Porovnání hodnot s jiným autorem

Vliv urychlovací přísady po 24 hodinách je velice podobný. Číselně jsou jeho hodnoty tlakové pevnosti výrazně nižší než v této práci, důvodem je pravděpodobně jiná receptura betonu, která bohužel není zveřejněna. Cizí práce je zaměřena na zhodnocení urychlovacích přísad od různých výrobců nikoliv na dosažení vysokých pevností v krátkém časovém měřítku.

Dále byly výsledky porovnány s prací s názvem „*Optimization of heavy weight concrete composition and process of prefabrication for prefabricated shielding cladding tiles*“ jejíž autory jsou Hela, Jancarikova, Louda a Jobanek. Práce je z roku 2018 a zaměřuje se na optimalizaci složení těžkého betonu v kombinaci s efektivní prefabrikací, což je důvodem zkoumání receptur lišících se v druhu urychlovače. Jedním ze třech použitých urychlovačů je Betodur A5, který byl použit i v této práci.



Obrázek 75: Porovnání hodnot

Na obrázku 75 je sloupcový graf s hodnotami průměrných tlakových pevností po 6 hodinách, 1 dni a 28 dnech. Graf je doplněn o červené sloupce, které znázorňují hodnoty průměrných tlakových pevností betonu vyrobeného z CEM I 52,5 R s urychlovací přísadou, které byly naměřeny při této práci. Při našem experimentu nebyla zkoušena průměrná tlaková pevnost po 6 hodinách, ale po 8. Průměrná 8 hodinová tlaková pevnost dosahovala hodnoty 15,8 MPa, z toho důvodu lze předpokládat, že by hodnota po 6 hodinách velmi pravděpodobně přesahovala 6 MPa.

V práci od jiného autora byl vyhodnocen jako nejlepší druh urychlovací přísady MasterSet XS 100 od společnosti Master builders solutions. Je otázkou, zda by použití

tohoto druhu urychlovače při našem experimentu mohlo hodnoty tlakových pevností zvýšit. Použití produktů od různých výrobců se obecně nedoporučuje, protože neexistuje záruka, že spolu budou přísady správně reagovat, což může vést k nežádoucím výsledkům. Při našem experimentu byla použita i plastifikační přísada od firmy Stachema, od které je právě i výše zmiňovaná urychlovací přísada Betodur A5. Je tedy možnost, že při kombinaci dvou přísad od různých firem bychom nedosáhli očekávaných výsledků.



## 4. Závěr

Teoretická část práce představila komplexní pohled na konstrukční požadavky letištních drah a na charakteristiky požadovaných materiálů. Byla zdůrazněna kritická role cementu jako základního prvku rychlotvrdnoucích betonů a byl vysvětlen proces tvrdnutí a tuhnutí, který je nezbytný pro efektivní opravy.

V experimentální části byl úspěšně vytvořen beton, který splnil stanovený cíl dosažení požadované pevnosti 30 MPa v tlaku a 4 MPa v tahu za ohybu po 24 hodinách. Tento výsledek je zásadní pro aplikace, kde je časový faktor kritický a kde je nutné zajistit minimální dobu výpadku provozu. Provedené porovnání vlastností vybraných betonů potvrdilo předpoklady stanovené na základě teoretických poznatků a ukázalo, že vyvinutý beton je vhodný pro rychlé opravy.

Z pěti zkoumaných druhů betonů bylo tohoto výsledku dosaženo u jednoho druhu, pokud se jedná o charakteristické pevnosti, a to konkrétně u betonu vyrobeného z CEM I 52,5 R bez urychlovací přísady. Důvodem, proč beton s urychlovací přísadou v experimentu nesplnil kritéria, je, že přísada nepatrně snížila rané pevnosti v tahu za ohybu, nicméně hodnotu tlakových pevností vzorků výrazně zvyšovala. Vzorky s přísadou po 24 hodinách dosahovaly přes 65 % své normové tlakové pevnosti, zatímco stejné vzorky bez přísady dosahovaly necelých 50 %. Pokud bychom se zaměřili na pevnosti po 8 hodinách zjistili bychom, že vzorky s urychlovací přísadou dosahovaly přes 23 % své normové pevnosti, zatímco vzorky bez ní, necelá 3 %. Navíc pokud by se výsledek tahových pevností počítal jako průměr ze zkoušených vzorků nikoli jako charakteristická hodnota, stanovených hodnot by dosáhl i tento beton. Taky je velmi pravděpodobné, že pokud by se experiment prováděl na větším množství vzorků, limitů by bylo dosaženo i u charakteristických pevností. Z výše zmíněných důvodů vyhodnocuji beton vyrobený z CEM I 52 R s urychlovací přísadou jako nejvhodnější variantu, i přesto, že nesplnil předem stanovené požadavky.

Předmětem zkoumání byla i maltová směs SANATOP TIX, která je určena pro celoplošné i lokální sanační opravy všech typů betonů a betonových konstrukcí. Tento produkt byl po experimentálních zkouškách vyhodnocen jako zcela nevhodný pro opravu letištních ploch.

Závěrem lze říci, že výsledky této práce mají významný dopad na opravy letištních drah nebo jiných dopravních konstrukcí. Výzkum a vývoj rychlotvrdnouceho betonu přispívá k zajištění bezpečnosti a plynulosti provozu jak v civilním prostředí, tak na vojenských letištích, kde je to nezbytné pro zachování obranyschopnosti a operativní připravenosti České republiky a její schopnosti plnit závazky vyplývající z mezinárodních aliancí.

Tato práce může sloužit jako základ pro další výzkum a inovace v oblasti stavebních materiálů, a přispět tak k rozvoji technologií a metod pro rychlé opravy.

## 5. Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Rozdělení konstrukcí vozovek [1].....	12
Obrázek 2: Detail smršťovací spáry [11] .....	15
Obrázek 3: Fotografie provádění CB krytu [5] .....	16
Obrázek 4: Průběh zatížení na vozovce při působení dvoukolového podvozku [8] .....	18
Obrázek 5: Vliv počtu opakování na únosnost desky [8].....	19
Obrázek 6: Růst pevnosti betonu v tahu [8].....	19
Obrázek 9: kotvení sklolaminátové rohože [42] .....	28
Obrázek 8: Prefabrikované betonové desky [42] .....	29
Obrázek 7: Kovové rohože [42].....	29
Obrázek 10: Finální betonáž .....	30
Obrázek 11: Příprava CB desky k betonáži .....	30
Obrázek 12: Demolice poškozeného CB krytu .....	30
Obrázek 13: Příprava otvorů pro světelnou signalizaci [14].....	31
Obrázek 14: Betonáž desky finišerem [14].....	31
Obrázek 15: Armování [14] .....	31
Obrázek 16: Bourání staré betonové desky [14] .....	31
Obrázek 17: Zhutňování betonu [2] .....	33
Obrázek 18: Osazování výztuže [2] .....	33
Obrázek 19: Rozbíjení a likvidace starých desek [2].....	33
Obrázek 20: Ošetřování betonu přikrytím [2].....	33
Obrázek 21: Uložení betonu pomocí bagru [2].....	33
Obrázek 22: Konečná úprava povrchu [2] .....	33
Obrázek 24: Připravený prostor k betonáži.....	35
Obrázek 25: Vystřelená CB deska .....	35
Obrázek 23: Provádění betonáže.....	35
Obrázek 26: Nevhodná oprava ulomených rohů.....	35
Obrázek 27: Přehled materiálu od mikrostruktury až po konstrukci [16].....	36
Obrázek 28: Nárůst pevnosti v čase jednotlivých slínkových minerálů [18].....	38
Obrázek 29: Fáze hydratace cementu [26].....	41
Obrázek 30: Detail ztvrdlého cementu z elektronového mikroskopu [29] .....	44

Obrázek 31: Destičkovitý tvar portlanditu z elektronového mikroskopu [28] .....	46
Obrázek 32: Vliv teploty na vývoj pevnosti [30].....	47
Obrázek 33: Vliv vlhkosti při zrání betonu na výslednou pevnost [30] .....	48
Obrázek 34: Schéma částic cementu ve flokulovaném stavu [24].....	50
Obrázek 35: Hydratace cementu v závislost na vodním součiniteli [33].....	51
Obrázek 36: Vliv vodního součinitele na tlakovou pevnost betonů [32] .....	52
Obrázek 37: Různé druhy dispergujících činidel [24] .....	55
Obrázek 38: Plastifikátory na bázi malaminů [35] .....	55
Obrázek 39: Plastifikátory na bázi naftalenů [35].....	56
Obrázek 40: Plastifikátory na bázi lignosulfátů [35] .....	56
Obrázek 41: Superplastifikátory [35].....	57
Obrázek 42: Schéma složení jednotlivých druhů cementu [37].....	63
Obrázek 43: Rozdíl vývoje počátečních pevností [37] .....	64
Obrázek 44: Ruční Vicatův přístroj .....	67
Obrázek 45: Automatický Vicatův přístroj .....	67
Obrázek 46: Automatická míchačka pro cementovou pastu [38] .....	68
Obrázek 47: Záznam z automatického Vicatova přístroje .....	71
Obrázek 48: Záznam z automatického Vicatova přístroje .....	72
Obrázek 49: Procentuální zastoupení jednotlivých složek v betonu.....	73
Obrázek 50: Kamenivo frakce 0/4 .....	75
Obrázek 51: Kamenivo frakce 4/8 .....	75
Obrázek 52: CEM I 52,5 R .....	75
Obrázek 53: Malta SANATOP TIX .....	75
Obrázek 54: CEM I 42,5 R .....	75
Obrázek 55: Superplastifikační přísada .....	76
Obrázek 56: Urychlovací přísada.....	76
Obrázek 57: Váha značky TSCALE .....	77
Obrázek 58: Laboratorní míchačka .....	77
Obrázek 59: Vibrační stůl Standart VTS .....	77
Obrázek 60: Bednicí formy .....	78
Obrázek 61: Čerstvý zhutněný beton .....	78
Obrázek 62: Suroviny těsně před přidáním do míchačky .....	78
Obrázek 63: zatěžovací stroj ZD100.....	79
Obrázek 64: Zatěžovací stroj FP100 .....	79



Obrázek 65: Schéma zkoušky tlakové pevnosti [37] .....	79
Obrázek 66: Příklady nesprávně porušených vzorků .....	80
Obrázek 67: příklady správně porušených vzorků .....	80
Obrázek 68: Sekvence fotek z průběhu zatěžovací zkoušky .....	81
Obrázek 69: Zatěžovací schéma zkoušky tahu za ohybu .....	81
Obrázek 70: Betonový vzorek osazený ve zkušebním přístroji .....	82
Obrázek 71: Sloupcový graf tlakových pevností .....	83
Obrázek 72: Nárůst tlakových pevností v čase .....	84
Obrázek 73: Sloupcový graf tahových pevností .....	85
Obrázek 74: Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (oxid železitý) [39] .....	91
Obrázek 75: Porovnání hodnot .....	92

## 6. Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Přehled slínekových minerálů .....	37
Tabulka 2: Množství vody na kaši normální hustoty .....	70
Tabulka 3: Začátek doby tuhnutí cementových past .....	72
Tabulka 4: Receptura 2 .....	74
Tabulka 5: Receptura 4 .....	74
Tabulka 6: Receptura 3 .....	74
Tabulka 7: Receptura 1 .....	74
Tabulka 8: Receptura maltové směsi SANATOP TIX .....	74
Tabulka 9: Charakteristické tlakové pevnosti .....	84
Tabulka 10: Srovnání charakteristických pevností a aritmetických průměrů .....	86
Tabulka 11: Slínekové složení cementů .....	87
Tabulka 12: Porovnání typu cementu TLAK .....	87
Tabulka 13: Porovnání typu cementu TAH .....	88
Tabulka 14: Účinnost urychlovací přísady na tlakovou pevnost .....	88
Tabulka 15: Účinnost urychlovací přísady na tahovou pevnost .....	89
Tabulka 16: Cenové srovnání betonů .....	90
Tabulka 17: Porovnání hodnot s jiným autorem .....	91

## 7. Reference

- [1] KAZDA, Antonin a Robert CAVES. *Airport Design and Operation*. 1. Emerald Publishing Limited, 2015. ISBN 1784418706.
- [2] NÄGELE, Felicia. Rychletvrtnoucí beton pro sanaci cementobetonových ploch. *BETON*. 2023, 2023(1), 4.
- [3] *Pavement Interactive*, [online]. 2023 [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: <https://pavementinteractive.org/>
- [4] KUDRNA, Prof. Ing. Jan a Ing. Květoslav URBANEC. *Stavba, oprava a rekonstrukce cementobetonových vozovek*. Fakulta stavební, 2018. Přednáška. ČVUT.
- [5] KOVÁŘ, Ing. Jiří a Ing. Daniel HOUŠTECKÝ. BETON UNIVERSITY. *Technologie provádění CB krytů* [online]. 2021 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.betonuniversity.cz/>
- [6] RŮŽIČKA, Ing. Jan. *Provádění cementobetonových vozovek* [online]. 2021 [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/>
- [7] Jan Zajíček. *Technologie stavby vozovek*. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2014.
- [8] KAZDA, Antonín. *Letiská*. 2. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1995. ISBN 80-7100-240-2.
- [9] LEHOVEC, František a Miroslav KAUN. Volba konstrukce cementobetonové silniční vozovky a zkušenosti s cementobetonovými kryty. *Beton*. 2001, (2), 3.
- [10] KAUN M., ROJAN J. *Letiště*. Vyd. 2. Vydalo České vysoké učení technické v Praze, Vydavatelství ČVUT, 17-60
- [11] Smršťovací spára. In: *Docplayer* [online]. 2015 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12641735-Cementobetonove-kryty.html>
- [12] JAREŠ, Jiří, Luděk MALIŠ a Lubomír PŘÍLESKÝ. ÚLOHA DIAGNOSTIKY PŘI VÝSTAVBĚ BETONOVÝCH SILNIČNÍCH A LETIŠTNÍCH VOZOVEK. *Beton*. 6/2005n. 1., 5.
- [13] LEONELLI, Federico Leonelli, Paola Di MASCIO a Antonello GERMINARIO. Laboratory and On-Site Tests for Rapid Runway Repair. *Applied Sciences* [online]. 2017, 20 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/journal/applsc>
- [14] ŠRŮTKA, Jiří. OPRAVA DRÁHY TWY D NA LETIŠTI PRAHA-RUZYNĚ POMOCÍ TECHNOLOGIE „RYCHLÝCH“ BETONŮ. *Beton*. 4/2012n. 1., 3.
- [15] HLOBIL, Michal a Vít ŠMILAUER. Mikromechanický víceúrovňový model lomu pro pevnost v tlaku míchaných cementových past. *Research Gate* [online]. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/297723293\\_Micromechanical\\_multiscale\\_fracture\\_model\\_for\\_compressive\\_strength\\_of\\_blended\\_cement\\_pastes](https://www.researchgate.net/publication/297723293_Micromechanical_multiscale_fracture_model_for_compressive_strength_of_blended_cement_pastes)
- [16] ŠMILAUER, Vít. *Introduction to cementitious materials*. Czech Technical University in Prague. Přednáška. CTU.
- [17] K. Hlavatý a B. Slánský a V. Šmilauer a R. Dvořák. Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek - část ii. *Silniční obzor*, 7-8(1):193 – 197, 2019.

- [18] ŠAUMAN, Zdeněk. Maltovin. Vysoké učení technické v Brně, 1993 ISBN 80-214-0509-0.
- [19] ADÁMEK, J., NOVOTNÝ, B., KOUKAL, J. Stavební materiály. Brno: CERM, 1997. 1.vyd. 205 s. il. ISBN 80-241-0631-3
- [20] JELÍNEK, P. Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských pojiv). Ostrava: vlastní náklad, 2004. 241 s., ISBN 80-239-2188-6.
- [21] ČAPÁKOVÁ, Iveta. *Technologie betonu*. Jihlava, 2012. Digitální učební materiál. Investice do rozvoje vzdělávání.
- [22] MAEKAWA, CHAUBE a KISH. Modelling of Concrete performance [online]. London: E & FN Spon, 1999.
- [23] HLAVÁČ, Jan. Základy technologie silikátů Praha: : Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-816-88.
- [24] PIERRE-CLAUDE a AÏTCIN. Vysokohodnotný beton. Praha: ČKAIT, 2005. ISBN 9788086769394.
- [25] PYTLÍK, Petr. Technologie betonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997. ISBN 80-214-077904.
- [26] Investigation of the Incompatibilities of Cement and Superplasticizers and Their Influence on the Rheological Behavior. *Materials*. 2020, 2020(13), 21.
- [27] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. Stavební hmoty 1 [online]. FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA [cit. 2022-05-10]. Dostupné z:
- [28] HYDRATAČE CEMENTOVÉHO BETONU [online]. VŠCHT [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglcfindmkaj/https://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska\_c.6.pdf. Přednáška. VŠCHT.
- [29] FRIAS, Moises a Raquel MENCÍA. *Concrete/Glass Construction and Demolition Waste (CDW) Synergies in Ternary Eco-Cement-Paste Mineralogy* [online]. [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4661>
- [30] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Sokolská 15, Praha 2: informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [31] BRIKI, Yosra, Maciej ZAJAC a Moohsen Ben HABA. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. *Cement and Concrete Research* [online]. 2021, (147), 8 [cit. 2023-12-21].
- [32] KREJCI, SEHNOUŠEK a SEJNOHA. Structure-subsoil interaction in view of transport processes in porous media. Czech Technical University in Prague, 2001.
- [33] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty [online]. 4. vydání. Praha, 2018 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodl/sh/>
- [34] WANG, Yifei; LEI, Lei; LIU, Jianhui a LIU, Yi. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. Online. *Cement and Concrete Composites*. 2022, roč. 1, č. 134, s. 13. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104762>. [cit. 2023-11-27].
- [35] ING. VETCHÝ, Jan. Přísady do betonů a malt. MCT [online]. 2015 [cit. 2023-11-03]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-ii/>

- [36] DAL NEGRO, MALTESE, REINSTADLER a LUBOR BACIK. Using advanced admixture to enhance accelerator Performance in sprayed concrete. *Tunel* [online]. 21(3), 5 [cit. 2023-11-27]. Dostupné z: [https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2012/3/tunel\\_3\\_12-5.pdf](https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2012/3/tunel_3_12-5.pdf)
- [37] BETON. *Ebeton* [online]. [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/casopis-beton-3/>
- [38] Matest. In: *Matest* [online]. [cit. 2023-12-22]. Dostupné z: <https://www.matest.com/en/concrete-testing-equipment/astm-standard-compression-machines/>
- [39] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-12-25].
- [40] TRTÍK, Karel. *Technologie betonu*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [41] Rapid Runway Repair (RRR): An Optimization for Minimum Operating Strip (MOS) Selection [online]. Ohio, USA, 2007 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://scholar.afit.edu/etd/3025/>. Thesis. AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- [42] LEONELI, Federico, Paola di MASCIO a Antonello GERMINARIO. Laboratory and On-Site Tests for Rapid Runway Repair. *APPLIED SCIENCES* [online]. 20 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/11/1192>

#### POUŽITÉ NORMY:

ČSN 73 6133

ČSN EN 13285

ČSN 73 6123-1

ČSN EN 934-2+A1

ČSN EN 197-1

ČSN EN 196-3

ČSN EN 12390-3

ČSN EN 12390-5

ČSN EN 1990



ČSN EN 206+A2

## 8. Přílohy

### 8.1 Protokoly z provedených zkoušek



Protokoly TLAK po 8 hodinách:



 <b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> <b>FAKULTA STAVEBNÍ</b> Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz <b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b> 												
<b>Zpráva o zkoušce</b>			ze dne: 13.11.23					Číslo protokolu : 1_markéta				
											Poznámka : po 8 hodinách	
Výsledky laboratorních zkoušek												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Délka mm	Šířka mm	Výška mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	
1	1	100,55	99,65	2422,7	436,0	2423	13.11.2023	13.11.2023	1/3	2,08	0,208	CEM I 42,5
1	2	99,9	99,5	2393,4	436,0	2402	13.11.2023	13.11.2023	1/3	2,00	0,201	
1	3	98,2	99,9	2364,8	436,0	2409	13.11.2023	13.11.2023	1/3	2,08	0,212	
2	1	98,2	99,7	2338,3	436,0	2383	13.11.2023	13.11.2023	1/3	6,20	0,633	CEM I 52,5
2	2	99,7	100,0	2386,5	436,0	2395	13.11.2023	13.11.2023	1/3	6,24	0,626	
2	3	100,0	100,3	2392,0	436,0	2385	13.11.2023	13.11.2023	1/3	7,10	0,708	
4	1	99,0	100,0	2333,2	436,0	2359	13.11.2023	13.11.2023	1/3	10,70	1,081	CEM I 42,5 + urychlovač
4	2	99,8	99,8	2361,4	436,0	2371	13.11.2023	13.11.2023	1/3	10,92	1,10	
4	3	100,1	98,8	2342,3	436,0	2371	13.11.2023	13.11.2023	1/3	12,30	1,24	
3	1	97,8	100,1	2057,0	436,0	2123	13.11.2023	13.11.2023	1/3	0,42	0,04	SANATOP TIX
3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Typ zkoušky : Tlak			Zkoušel: Markéta Škorpilová									
Druh vzorku : Krychle 100x100x100			Vypracoval: Markéta Škorpilová									
Teplota : 22 °C			Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									
Relativní vlhkost : 40%			Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									

 <b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> <b>FAKULTA STAVEBNÍ</b> Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz <b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b> 												
<b>Zpráva o zkoušce</b>			ze dne: 20.11.23					Číslo protokolu : 4_markéta				
											Poznámka : po 8 hodinách	
Výsledky laboratorních zkoušek												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka mm	Výška mm	Délka mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	
5	1	100,3	99,3	100,2	2377,4	2381	20.11.2023	20.11.23	1/3	159,79	16,0	CEM I 52,5 + urychlovač
5	2	99,8	99,6	100,0	2371,5	2386	20.11.2023	20.11.23	1/3	154,99	15,6	
5	3	100,3	98,5	100,3	2359,6	2380	20.11.2023	20.11.23	1/3	155,68	15,8	
Typ zkoušky : Tlak			Zkoušel: Markéta Škorpilová									
Druh vzorku : Krychle 100x100x100			Vypracoval: Markéta Škorpilová									
Teplota : 22 °C			Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									
Relativní vlhkost : 38%			Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									





Protokoly po 24 hodinách:

<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>												
<b>FAKULTA STAVEBNÍ</b>												
		šukrova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut										
<b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b>												
<b>Zpráva o zkoušce</b>				ze dne: 14.11.23				Číslo protokolu : 2_markéta				
											Poznámka : po 24 hodinách	
<b>Výsledky laboratorních zkoušek</b>												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa	
1	1	98,6	99,9	99,7	2357,3	2402	13.11.2023	14.11.2023	1	135,10	13,7	CEM I 42,5
1	2	98,2	99,9	99,9	2345,7	2393	13.11.2023	14.11.2023	1	129,72	13,2	
1	3	99,8	100,0	100,0	2386,8	2392	13.11.2023	14.11.2023	1	136,68	13,7	
2	1	100,0	100,1	100,2	2371,3	2365	13.11.2023	14.11.2023	1	329,82	33,0	CEM I 52,5
2	2	100,0	99,8	100,2	2376,8	2375	13.11.2023	14.11.2023	1	324,63	32,5	
2	3	100,1	100,5	100,2	2388,5	2371	13.11.2023	14.11.2023	1	332,43	33,1	
3	1	100,0	99,4	100,1	2061,4	2070	13.11.2023	14.11.2023	1	21,81	2,2	Stachema
3	2	100,3	99,4	100,3	2078,0	2078	13.11.2023	14.11.2023	1	21,65	2,2	
3	3	100,2	98,9	100,0	2054,4	2075	13.11.2023	14.11.2023	1	17,54	1,8	
4	1	99,9	100,9	99,9	2369,0	2353	13.11.2023	14.11.2023	1	201,48	20,0	CEM I 42,5 + urychlovač
4	2	99,9	101,0	99,8	2365,1	2350	13.11.2023	14.11.2023	1	207,33	20,6	
4	3	100,0	101,1	100,1	2378,6	2351	13.11.2023	14.11.2023	1	212,60	21,0	
Typ zkoušky : Tlak				Zkoušel: Markéta Škorpilová								
Druh vzorku : Krychle 100x100x100				Vypracoval: Markéta Škorpilová								
Teplota : 22 °C				Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.								
Relativní vlhkost : 38%				Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.								

<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>												
<b>FAKULTA STAVEBNÍ</b>												
		šukrova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut										
<b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b>												
<b>Zpráva o zkoušce</b>				ze dne: 21.11.23				Číslo protokolu : 5_markéta				
											Poznámka : po 24 hodinách	
<b>Výsledky laboratorních zkoušek</b>												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa	
5	1	97,5	100,0	100,0	2309,3	2369	20.11.2023	21.11.2023	1	419,85	43,1	CEM I 52,5 + urychlovač
5	2	99,8	100,1	99,9	2378,7	2383	20.11.2023	21.11.2023	1	438,73	43,9	
5	3	99,7	100,0	99,8	2359,9	2372	20.11.2023	21.11.2023	1	432,31	43,4	
Typ zkoušky : Tlak				Zkoušel: Markéta Škorpilová								
Druh vzorku : Krychle 100x100x100				Vypracoval: Markéta Škorpilová								
Teplota : 22 °C				Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.								
Relativní vlhkost : 38%				Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.								

Protokoly po 48 hodinách:

<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>												
<b>FAKULTA STAVEBNÍ</b>												
		Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz										
<b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b>												
<b>Zpráva o zkoušce</b>						ze dne: 14.11.23		Číslo protokolu		: 3_markéta		
										Poznámka : po 48 hodinách		
<b>Výsledky laboratorních zkoušek</b>												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa	
1	1	100,6	99,8	100,5	2370,0	2350	13.11.2023	15.11.2023	2	347,89	34,7	CEM I 42,5
1	2	100,1	100,5	100,3	2365,0	2344	13.11.2023	15.11.2023	2	313,55	31,2	
1	3	100,2	100,4	100,6	2395,0	2367	13.11.2023	15.11.2023	2	308,20	30,6	
3	1	100,1	100,1	100,5	2040,0	2024	13.11.2023	15.11.2023	2	74,84	7,5	CEM I 52,5
3	2	100,0	99,3	100,4	2025,0	2030	13.11.2023	15.11.2023	2	71,65	7,2	
3	3	100,1	98,7	100,3	2000,0	2016	13.11.2023	15.11.2023	2	71,53	7,2	
4	1	100,1	100,5	100,1	2365,0	2348	13.11.2023	15.11.2023	2	311,13	30,9	Stachema
4	2	100,1	98,1	100,2	2305,0	2343	13.11.2023	15.11.2023	2	307,97	31,4	
4	3	100,0	99,0	100,3	2330,0	2347	13.11.2023	15.11.2023	2	314,90	31,8	
2	1	100,2	100,6	99,5	2355,0	2350	13.11.2023	15.11.2023	2	436,08	43,3	CEM I 42,5 + urychlovač
2	2	99,7	100,1	100,0	2370,0	2375	13.11.2023	15.11.2023	2	460,54	46,1	
2	3	100,2	100,4	100,0	2375,0	2362	13.11.2023	15.11.2023	2	449,50	44,7	
Typ zkoušky : Tlak			Zkoušel: Markéta Škorpilová									
Druh vzorku : Krychle 100x100x100			Vypracoval: Markéta Škorpilová									
Teplota : 22 °C			Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									
Relativní vlhkost : 38%			Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									

<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>												
<b>FAKULTA STAVEBNÍ</b>												
		Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz										
<b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b>												
<b>Zpráva o zkoušce</b>						ze dne: 22.11.23		Číslo protokolu		: 6_markéta		
										Poznámka : po 48 hodinách		
<b>Výsledky laboratorních zkoušek</b>												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa	
5	1	100,1	98,5	100,0	2336,0	2370	20.11.2023	22.11.2023	2	515,26	52,3	CEM I 52,5 + urychlovač
5	2	100,1	99,2	100,1	2355,7	2371	20.11.2023	22.11.2023	2	527,57	53,1	
5	3	100,4	98,4	100,0	2333,8	2363	20.11.2023	22.11.23	2	537,07	54,4	
Typ zkoušky : Tlak			Zkoušel: Markéta Škorpilová									
Druh vzorku : Krychle 100x100x100			Vypracoval: Markéta Škorpilová									
Teplota : 22 °C			Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									
Relativní vlhkost : 38%			Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.									



Protokoly po 28 dnech:

<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> <b>FAKULTA STAVEBNÍ</b> Hájkova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz <b>ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b>												
												
<b>Zpráva o zkoušce</b>						ze dne: 28.12.23			Číslo protokolu : 7_markéta			
									Poznámka : po 28 dnech			
<b>Výsledky laboratorních zkoušek</b>												
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak		Poznámka ke zkoušce
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost	
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa	
1	1	100,0	96,8	100,7	2271,1	2552	30.11	28.12.2023	28	530,80	54,8	CEM I 42,5
1	2	99,9	101,2	99,7	2328,6	2313	30.11	28.12.2023	28	519,96	51,5	
1	3	100,1	99,2	100,5	2289,0	2293	30.11	28.12.2023	28	524,42	52,8	
3	1	99,6	100,2	100,0	2321,4	2328	30.11	28.12.2023	28	655,40	65,7	CEM I 52,5
3	2	99,6	100,4	100,0	2340,1	2339	30.11	28.12.2023	28	688,09	68,8	
3	3	99,5	100,4	100,1	2339,0	2340	30.11.23	28.12.2023	28	642,14	64,3	
4	1	100,0	96,8	100,7	2271,0	2328	30.11.23	28.12.2023	28	543,53	56,1	CEM I 42,5 + urychlovač
4	2	100,2	101,1	100,2	2337,6	2303	30.11.23	28.12.2023	28	555,34	54,8	
4	3	99,9	99,0	100,1	2297,0	2320	30.11.23	28.12.2023	28	590,53	59,7	
2	1	100,2	99,9	99,7	2320,8	2325	30.11.23	28.12.2023	28	669,83	66,9	CEM I 52,5 + urychlovač
2	2	98,3	99,8	100,0	2296,7	2342	30.11.23	28.12.2023	28	660,94	67,4	
2	3	99,8	100,5	99,9	2338,7	2332	30.11.23	28.12.2023	28	656,25	65,4	
Typ zkoušky			: Tlak			Zkoušel: Markéta Škorpilová						
Druh vzorku			: Krychle 100x100x100			Vypracoval: Markéta Škorpilová						
Teplota			: 23 °C			Vedoucí laboratoře: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.						
Relativní vlhkost			: 39%			Kontroloval: doc. Ing Josef Fládr, Ph.D.						



## 8.2 Statistické výpočty provedených zkoušek

### 8 hodinové tlakové pevnosti :

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P1.1	1,24
P1.2	1,23
P1.3	1,18

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	1,86
P2.2	1,92
P2.3	1,88

aritmetický průměr=	1,217	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	1,889	$m_{fc}$
medián=	1,232	$Md$	medián=	1,878	$Md$
směrodatná odchylka=	0,035	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	0,032	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,029	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,017	$v_{fc}$
šikmost=	-1,581	$w_{fc}$	šikmost=	1,386	$w_{fc}$
maximum=	1,177	$max$	maximum=	1,864	$max$
minimum=	1,242	$min$	minimum=	1,925	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	1,104	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	1,782	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	2,77
P3.2	2,77
P3.3	2,89

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	16,04
P3.2	15,60
P3.3	15,75

aritmetický průměr=	2,808	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	15,797	$m_{fc}$
medián=	2,766	$Md$	medián=	15,753	$Md$
směrodatná odchylka=	0,074	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	0,223	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,026	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,014	$v_{fc}$
šikmost=	1,732	$w_{fc}$	šikmost=	0,863	$w_{fc}$
maximum=	2,765	$max$	maximum=	15,600	$max$
minimum=	2,894	$min$	minimum=	16,040	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	2,571	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	15,045	$f_{ck}$



**24 hodinové tlakové pevnosti :**

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P1.1	13,72
P1.2	13,22
P1.3	13,70

aritmetický průměr=	13,549	$m_{fc}$
medián=	13,704	$Md$
směrodatná odchylka=	0,281	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,021	$v_{fc}$
šíkmost=	-1,726	$w_{fc}$
maximum=	13,224	$max$
minimum=	13,719	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	12,626	$f_{ck}$

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	32,97
P2.2	32,51
P2.3	33,06

aritmetický průměr=	32,844	$m_{fc}$
medián=	32,965	$Md$
směrodatná odchylka=	0,294	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,009	$v_{fc}$
šíkmost=	-1,541	$w_{fc}$
maximum=	32,508	$max$
minimum=	33,058	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	31,863	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	19,99
P3.2	20,55
P3.3	21,03

aritmetický průměr=	20,524	$m_{fc}$
medián=	20,554	$Md$
směrodatná odchylka=	0,524	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,026	$v_{fc}$
šíkmost=	-0,255	$w_{fc}$
maximum=	19,986	$max$
minimum=	21,033	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	18,826	$f_{ck}$

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	43,07
P3.2	43,93
P3.3	43,38

aritmetický průměr=	43,461	$m_{fc}$
medián=	43,378	$Md$
směrodatná odchylka=	0,434	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,010	$v_{fc}$
šíkmost=	0,825	$w_{fc}$
maximum=	43,074	$max$
minimum=	43,930	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	42,023	$f_{ck}$

**48 hodinové tlakové pevnosti :**

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ ) [MPa]
P1.1	34,66
P1.2	31,17
P1.3	30,65

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	43,29
P2.2	46,14
P2.3	44,69

aritmetický průměr=	32,160	$m_{fc}$
medián=	31,174	$Md$
směrodatná odchylka=	2,179	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,068	$v_{fc}$
šikmost=	1,619	$w_{fc}$
maximum=	30,649	$max$
minimum=	34,658	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	25,652	$f_{ck}$

aritmetický průměr=	44,706	$m_{fc}$
medián=	44,695	$Md$
směrodatná odchylka=	1,425	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,032	$v_{fc}$
šikmost=	0,036	$w_{fc}$
maximum=	43,287	$max$
minimum=	46,137	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	40,136	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ ) [MPa]
P3.1	30,93
P3.2	31,36
P3.3	31,80

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	52,26
P3.2	53,13
P3.3	54,38

aritmetický průměr=	31,366	$m_{fc}$
medián=	31,362	$Md$
směrodatná odchylka=	0,437	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,014	$v_{fc}$
šikmost=	0,035	$w_{fc}$
maximum=	30,930	$max$
minimum=	31,805	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	29,923	$f_{ck}$

aritmetický průměr=	53,261	$m_{fc}$
medián=	53,135	$Md$
směrodatná odchylka=	1,066	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,020	$v_{fc}$
šikmost=	0,526	$w_{fc}$
maximum=	52,264	$max$
minimum=	54,385	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	49,784	$f_{ck}$



**28 denní tlakové pevnosti :**

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P1.1	54,80
P1.2	51,46
P1.3	52,80

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	65,70
P2.2	68,82
P2.3	64,27

aritmetický průměr=	53,020	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	66,261	$m_{fc}$
medián=	52,796	$Md$	medián=	65,699	$Md$
směrodatná odchylka=	1,681	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	2,327	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,032	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,035	$v_{fc}$
šikmost=	0,589	$w_{fc}$	šikmost=	1,024	$w_{fc}$
maximum=	51,461	$max$	maximum=	64,266	$max$
minimum=	54,802	$min$	minimum=	68,818	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	50,254	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	62,43	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	56,12
P3.2	54,85
P3.3	59,72

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	66,92
P3.2	67,36
P3.3	65,40

aritmetický průměr=	56,894	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	66,559	$m_{fc}$
medián=	56,116	$Md$	medián=	66,923	$Md$
směrodatná odchylka=	2,528	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	1,030	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,044	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,015	$v_{fc}$
šikmost=	1,255	$w_{fc}$	šikmost=	-1,390	$w_{fc}$
maximum=	54,847	$max$	maximum=	65,397	$max$
minimum=	59,721	$min$	minimum=	67,358	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	52,736	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	64,865	$f_{ck}$

**8 hodinové tahové pevnosti :**

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P1.1	0,75
P1.2	0,98
P1.3	1,00

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	1,03
P2.2	1,15
P2.3	1,10

aritmetický průměr=	0,910	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	1,095	$m_{fc}$
medián=	0,980	$Md$	medián=	1,103	$Md$
směrodatná odchylka=	0,139	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	0,064	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,153	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,059	$v_{fc}$
šikmost=	-1,692	$w_{fc}$	šikmost=	-0,564	$w_{fc}$
maximum=	0,750	$max$	maximum=	1,027	$max$
minimum=	1,000	$min$	minimum=	1,155	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	0,681	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	0,989	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	1,45
P3.2	1,40
P3.3	1,32

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	2,30
P3.2	2,26
P3.3	2,48

aritmetický průměr=	1,391	$m_{fc}$	aritmetický průměr=	2,348	$m_{fc}$
medián=	1,399	$Md$	medián=	2,300	$Md$
směrodatná odchylka=	0,064	$s_{fc}$	směrodatná odchylka=	0,119	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,046	$v_{fc}$	variační koeficient=	0,051	$v_{fc}$
šikmost=	-0,496	$w_{fc}$	šikmost=	1,520	$w_{fc}$
maximum=	1,324	$max$	maximum=	2,260	$max$
minimum=	1,451	$min$	minimum=	2,484	$min$
kvantil=	0,050	$p$	kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	1,286	$f_{ck}$	charakteristická hodnota=	2,152	$f_{ck}$



**24 hodinové tahové pevnosti :**

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P1.1	3,27
P1.2	3,43
P1.3	3,64

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P2.1	4,19
P2.2	4,53
P2.3	4,15

aritmetický průměr=	3,446
medián=	3,426
směrodatná odchylka=	0,186
variační koeficient=	0,054
šikmost=	0,476
maximum=	3,270
minimum=	3,641
kvantil=	0,050
charakteristická hodnota=	3,139

$m_{fc}$   
 $Md$   
 $s_{fc}$   
 $v_{fc}$   
 $w_{fc}$   
 $max$   
 $min$   
 $p$   
 $f_{ck}$

aritmetický průměr=	4,289
medián=	4,189
směrodatná odchylka=	0,205
variační koeficient=	0,048
šikmost=	1,668
maximum=	4,152
minimum=	4,525
kvantil=	0,050
charakteristická hodnota=	3,951

$m_{fc}$   
 $Md$   
 $s_{fc}$   
 $v_{fc}$   
 $w_{fc}$   
 $max$   
 $min$   
 $p$   
 $f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	2,97
P3.2	3,32
P3.3	3,61

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	3,88
P3.2	3,99
P3.3	4,09

aritmetický průměr=	3,300
medián=	3,325
směrodatná odchylka=	0,322
variační koeficient=	0,097
šikmost=	-0,337
maximum=	2,967
minimum=	3,609
kvantil=	0,050
charakteristická hodnota=	2,772

$m_{fc}$   
 $Md$   
 $s_{fc}$   
 $v_{fc}$   
 $w_{fc}$   
 $max$   
 $min$   
 $p$   
 $f_{ck}$

aritmetický průměr=	3,989
medián=	3,994
směrodatná odchylka=	0,106
variační koeficient=	0,027
šikmost=	-0,222
maximum=	3,880
minimum=	4,092
kvantil=	0,050
charakteristická hodnota=	3,814

$m_{fc}$   
 $Md$   
 $s_{fc}$   
 $v_{fc}$   
 $w_{fc}$   
 $max$   
 $min$   
 $p$   
 $f_{ck}$

## 48 hodinové tahové pevnosti :

CEM I 42,5 R

CEM I 52,5 R

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P 1.1	3,52
P 1.2	3,80
P 1.3	3,86

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P 2.1	4,40
P 2.2	4,70
P 2.3	4,18

aritmetický průměr=	3,728	$m_{fc}$
medián=	3,797	$Md$
směrodatná odchylka=	0,181	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,049	$v_{fc}$
šikmost=	-1,462	$w_{fc}$
maximum=	3,523	$max$
minimum=	3,865	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	3,430	$f_{ck}$

aritmetický průměr=	4,425	$m_{fc}$
medián=	4,400	$Md$
směrodatná odchylka=	0,263	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,060	$v_{fc}$
šikmost=	0,424	$w_{fc}$
maximum=	4,175	$max$
minimum=	4,700	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	3,99	$f_{ck}$

CEM I 42,5 R + urychlovač

CEM I 52,5 R + urychlovač

vzorek (i)	naměřená hodnota
	( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P 3.1	3,55
P 3.2	3,56
P 3.3	3,78

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P 3.1	3,86
P 3.2	4,40
P 3.3	3,86

aritmetický průměr=	3,631	$m_{fc}$
medián=	3,557	$Md$
směrodatná odchylka=	0,132	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,036	$v_{fc}$
šikmost=	1,730	$w_{fc}$
maximum=	3,553	$max$
minimum=	3,784	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	3,414	$f_{ck}$

aritmetický průměr=	4,039	$m_{fc}$
medián=	3,861	$Md$
směrodatná odchylka=	0,310	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,077	$v_{fc}$
šikmost=	1,732	$w_{fc}$
maximum=	3,860	$max$
minimum=	4,397	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	3,530	$f_{ck}$



**8 hodinové tlakové pevnosti :**

malta SANATOP TIX

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	0,00
P3.2	0,00
P3.3	0,00

aritmetický průměr=	-	$m_{fc}$
medián=	-	$Md$
směrodatná odchylka=	-	$s_{fc}$
variační koeficient=	-	$v_{fc}$
šikmost=	-	$w_{fc}$
maximum=	-	$max$
minimum=	-	$min$
kvantil=	-	$p$
charakteristická hodnota=	-	$f_{ck}$

**24 hodinové tlakové pevnosti :**

malta SANATOP TIX

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	2,19
P3.2	2,17
P3.3	1,77

aritmetický průměr=	2,045	$m_{fc}$
medián=	2,171	$Md$
směrodatná odchylka=	0,238	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,116	$v_{fc}$
šikmost=	-1,716	$w_{fc}$
maximum=	1,770	$max$
minimum=	2,193	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	1,354	$f_{ck}$

**48 hodinové tlakové pevnosti :**

malta SANATOP TIX

vzorek (i)	naměřená hodnota ( $F_{ci}$ )
	[MPa]
P3.1	7,46
P3.2	7,21
P3.3	7,24

aritmetický průměr=	7,304	$m_{fc}$
medián=	7,236	$Md$
směrodatná odchylka=	0,138	$s_{fc}$
variační koeficient=	0,019	$v_{fc}$
šikmost=	1,679	$w_{fc}$
maximum=	7,213	$max$
minimum=	7,463	$min$
kvantil=	0,050	$p$
charakteristická hodnota=	6,854	$f_{ck}$



## 8.3 Technické listy, prohlášení o vlastnostech, evidenční listy přístrojů

# Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list

září 2023



### Charakteristické vlastnosti:

- rychlý nárůst pevností
- vysoká počáteční pevnost
- vysoká konečná pevnost
- rychlý vývin hydratačního tepla
- vyšší celkové hydratační teplo

### Použití:

- betony běžných a vyšších pevnostních tříd
- betony s rychlým nárůstem pevnosti
- předpínané betony
- suché omítkové směsi a malty
- betonové zboží

### Český cement:

- Symbol v národních barvách odkazuje na český původ zboží a českou identitu.
- Značka reprezentuje nový přístup, pokrok a úspěchy českého cementářského průmyslu.



### Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků, respekt k životnímu prostředí, důraz na bezpečnost zaměstnanců a hospodárné využívání energetických zdrojů patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN ISO 45001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001
- Management hospodaření s energií ČSN EN ISO 50001



### Způsob dodání:

- volně ložený v autocisternách nebo železničních vagonch Raj
- balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na vratných paletách o celkové hmotnosti 1,4 t

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95–100 %
Doplňující složka		0–5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

# CEM I 42,5 R

## Portlandský cement

### EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list  
září 2023

Fyzikální a mechanické vlastnosti			Chemické vlastnosti			
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	17,0	EN 196-1	Obsah SO <sub>3</sub> [%]	2,97*	EN 196-2
	2 dny	30,3*	EN 196-1	Obsah Cl <sup>-</sup> [%]	0,052*	EN 196-2
	7 dní	50,3	EN 196-1	Na <sub>2</sub> O ekvivalent [%]	0,64*	EN 196-2
	28 dní	60,6*	EN 196-1	Nerozpustný zbytek [%]	0,88*	EN 196-2
	56 dní	65,9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,26*	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	90 dní	67,9	EN 196-1	*Průměrné hodnoty získané z měsíčních statistických dat za rok 2022		
	1 den	4,3	EN 196-1	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr <sup>6+</sup> v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).		
	2 dny	6,3*	EN 196-1			
	7 dní	8,1	EN 196-1			
	28 dní	9,0*	EN 196-1			
Normální konzistence [%]	56 dní	9,6	EN 196-1			
	90 dní	9,7	EN 196-1			
Počátek tuhnutí [min]	27,2*	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]	211*	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]	286*	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	0,8*	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	409*	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v autocisterně	3130	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v síle	1070	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Hydratační teplo [J·g <sup>-1</sup> ]	1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
	7 dní	314	EN 196-11			

#### Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404

Bez rizika	Koroze způsobená karbonatácí				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>a)</sup>	✓ <sup>a)</sup>	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

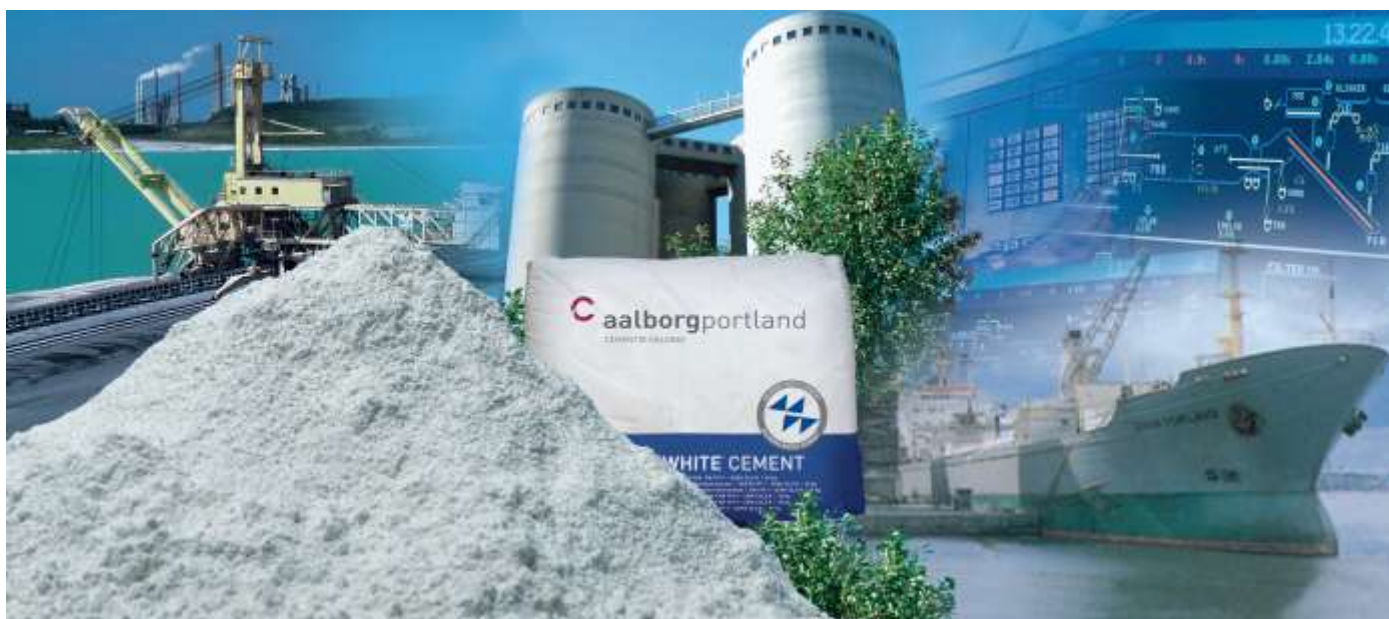
# CEM I 52,5 R – SR 5 white Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Aalborg Portland A/S – Závod Aalborg (Dánsko)

Technický list

prosinec 2017



## Charakteristické vlastnosti:

- vysoká bělost
- velmi vysoký nárůst pevnosti
- stálost fyzikálních a chemických vlastností
- přirozeně nízký obsah alkálií
- vysoká odolnost proti síranům

## Použití:

- bílé a barevné betony
- betonové zboží
- suché směsi
- estetické účely

## Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků a respekt k životnímu prostředí, patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001

## Způsob dodání:

- balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na jednorázových nevratných dřevěných paletách o celkové hmotnosti 1,5 t

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95–100 %
Doplňující složka		0–5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

# CEM I 52,5 R – SR 5 white

## Portlandský cement

### EN 197-1

Výrobce: Aalborg Portland A/S – Závod Aalborg (Dánsko)

**Technický list**  
prosinec 2017

Fyzikální a mechanické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	21–27	EN 196-1
	2 dny	40–48	EN 196-1
	7 dní	53–65	EN 196-1
	28 dní	66–76	EN 196-1
Bélost [%]		85–89,5	DIN 5033
Normální konzistence [%]		30	EN 196-3
Počátek tuhnutí [min]		110–160	EN 196-3
Konec tuhnutí [min]			EN 196-3
Objemová stálost [mm]		0,5	EN 196-3, Le Chatelier
Měrný povrch [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ]		400	EN 196-6, Blaine
Měrná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		3090–3190	EN 196-6
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		1080	Odhad. Mění se vlivem míry setřesení cementu, doby uskladnění nebo velikosti a zaplnění nádoby.
Hydratační teplo [J·g <sup>-1</sup> ]	7 dní	350	EN 196-8

Chemické a mineralogické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Obsah [%]	MgO	0,6	EN 196-2
	SO <sub>3</sub>	1,8–2,3	EN 196-2
	Cl <sup>-</sup>	≤ 0,04	EN 196-2
	Na <sub>2</sub> O	≤ 0,3	EN 196-2
	Cr <sup>6+</sup>	≤ 0,0002	EN 196-10
Nerozpustný zbytek [%]		0,1	EN 196-2
Ztráta žíháním [%]		1	EN 196-2
Obsah [%]	C <sub>3</sub> S	73	
	C <sub>2</sub> S	16	
	C <sub>3</sub> A	5	
	C <sub>4</sub> AF	1	

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>a)</sup>	✓ <sup>a)</sup>	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsí (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

# SANATOP TIX

Sanační cement-polymerová  
reprofiláční malta



## Specifikace výrobku

Modifikovaná cement-polymerová malta dle ČSN EN 1504-3: cementová reprofiláční malta R4, vyhovuje TP ŘSD kap. 31 i TP SSBK.

## Popis výrobku

SANATOP TIX je jednosložková, tixotropní, cement-polymerová, objemově kompenzovaná, reprofiláční maltová směs s polypropylenovými vlákny, určena pro celoplošné i lokální sanační opravy všech typů betonů a betonových konstrukcí.

Dodává se ve dvou zrnitostech:

- **Hrubý**, určená pro aplikační tloušťku 10-80 mm
- **Jemný**, určená pro aplikační tloušťku 3-30 mm
- **Color (barevná)**, určená pro aplikační tloušťku 3-30 mm

Aplikační tloušťkou se myslí tloušťka čerstvého materiálu naneseného na konstrukci v jedné vrstvě.

## Charakteristika

- Vysoká přídržnost k oceli i betonu.
- Aktivní protikorozní ochrana.
- Vysoká odolnost proti mrazu a chemickým rozmrazovacím prostředkům.
- Dobré pasivační schopnosti (pH faktor ztvrdlé hmoty je větší než 12)
- Jednoduché zpracování a aplikace

## Vlastnosti výrobku

- |   |  |
|---|--|
| • Objemová hmotnost:  | Zaručené hodnoty<br>min. 1800/kg/m <sup>3</sup>        |
| • Pevnost v tlaku:  | min. 45 MPa  |
| • Modul pružnosti:  | min. 20 GPa  |
| • Přídržnost k podkladnímu betonu:  | min. 2,0 MPa   |
| • Odolnost proti působení CHRL při<br>75 cyklech NaCl odpad-požadavek:<br>(odpad po 125 cyklech-měřeno) | max. 1000g/m <sup>2</sup><br>průměr 50g/m <sup>2</sup> |
| • Vodotěsnost:  | max. 50 mm   |
| • Spotřeba na 10 mm tloušťky:   | 18 – 21 kg/m <sup>2</sup>                              |

## Příprava podkladu

Podklad musí být únosný, pevný, čistý, zbavený prachu, solných výkvětů, nečistot a nesoudržných částí, bez biologického napadení. Dilatační spáry je nutné zachovat funkční.

Povrch konstrukce musí být očištěn až na soudržný podklad s pevností v tahu min. 1,5 MPa. Degradovaný beton se odstraní tak, aby byly zcela odhaleny zkorodované části ocelové výztuže. Odbourané místo se ohraničí cca 3mm hlubokým kolmým zářezem (na tupo), pomocí ruční úhlové brusky s diamantovým kotoučem. Takto připravený beton se otrýská vysokotlakým vodním paprskem

# SANATOP TIX

Sanační cement-polymerová  
reprofiláční malta



s rotační tryskou o minimálním tlaku 100 MPa (běžný domácí vysokotlaký vodní čistič tuto hodnotu nedosahuje). Tím dojde k očištění celého povrchu a vytvoření vhodného podkladu pro následnou reprofilaci. Pokud není možné použít vysokotlaký vodní paprsek, musí se odbourání provést pomocí sbíjecích kladiv či jiné vhodné techniky. Poté je třeba důkladně zrevidovat povrch, zda nedošlo k jeho hloubkovému narušení (vytvoření prasklin, naštíplých míst a podobně). Takovéto defekty je třeba opět odbourat. Poté se musí povrch důkladně omýt či odsát (zbavit prachu).

Před zahájením reprofilace musí být v dostatečném předstihu podkladní beton provlhčen natolik, aby došlo k nasycení vnitřního pórového systému vodou. Vlhčení se provádí například zednickou štětkou, při větší ploše lze použít vodní tlakové zařízení s výkonem omezeným na minimum. Vlhčení se opakuje několikrát po sobě, dokud je podklad savý. Povrch musí být vlhký v celé ploše, pokud se jedná o vodorovné konstrukce, nesmí na nich zůstat viditelná voda.

Při pochybnostech o vhodnosti podkladu doporučujeme kontaktovat technického zástupce firmy STACHEMA CZ.

## Příprava malty

SANATOP TIX se připraví vsypáním 25kg suché směsi do vody:

- **SANATOP TIX hrubý 25kg** do 3,1-3,4 litru vody
- **SANATOP TIX jemný 25kg** do 3,5-3,7 litru vody
- **SANATOP TIX color 25kg** do 3,6-3,9 litru vody

Míchejte pomocí pomaloběžného míchadla (cca. 200-400 ot/min) po dobu min. 2 minuty, čímž se vytvoří homogenní malta. Vrtuli míchadla držte neustále ponořenou pod hladinou malty, aby nedocházelo ke vnášení vzduchu do směsi. Poté nechte hmotu 5 minut odstát a opět krátce zamíchejte. Doba zpracovatelnosti je do 40 minut (při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50%). Zvýšení obsahu vody vede ke zhoršení garantovaných vlastností.

## Ochrana výztuže-Antikorozní nátěr

Odhalená zkorodovaná výztuž musí být v celém profilu zcela zbavena rzi – nejlépe opískováním. Pokud se u statické výztuže objeví významné zmenšení průřezu například vlivem proreznutí, v opravě dále nepokračujeme a raději vyhledáme odborné posouzení statika. Optimální stupeň očištění je Sa 2 ½ (výztuž musí být bez rezavých skvrnek a musí mít v celé ploše typickou ocelově modrou barvu). Do pěti hodin po opískování, se na očištěnou výztuž, středně tvrdým štětcem, nanáší ve dvou vrstvách pasivační přípravek na bázi cementu – ARMATOP. Celková tloušťka obou nátěrů je min. 0,8 mm. Čekací doba mezi prováděním jednotlivých nátěrů je min. 4 hodiny (při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50%). Nátěr musí být proveden na celém povrchu odhalené výztuže.

## Použití- Adhezní můstek

Na povrch betonu připravený dle postupu popsaného výše, je nezbytné nanést jeden nátěr spojovacího můstku ARMATOP. Spojovací můstek se nanáší zásadně zednickou štětkou s hrubšími štětiniami, v maximální vrstvě 0,4 mm tak, aby se důkladně zatřel do obnaženého betonového povrchu (podklad mírně prosvítá přes nanesenou vrstvu adhezního můstku). Nanesení silné vrstvy spojovacího můstku může ohrozit celkovou přidržitost provedené reprofilace.

# SANATOP TIX

Sanační cement-polymerová  
reprofiláční malta



Následná vrstva reprofilační malty se zatírá ocelovým hladítkem do zavadlého (matného), ještě nezaschlého povrchu adhezního můstku tzv. „živý do živého“, tak aby došlo k dokonalému spojení nanášených vrstev. (Pro aplikace na stěny či podhledy je jeho použití vhodné, není však nezbytné.)

## Reprofilace na vodorovný povrch ošetřený ARMATOPem, stěny nebo podhledy

Opravné malty SANATOP se používají ve třech zrnitostech:

- **SANATOP TIX hrubý** - pro tloušťku čerstvé vrstvy 10-80 mm
- **SANATOP TIX jemný** - pro tloušťku čerstvé vrstvy 3-30 mm
- **SANATOP FIN** - pro tloušťku čerstvé vrstvy 1-3mm

Výběr vhodné malty se řídí dle vrstvy požadované reprofilace, popřípadě dle požadavků na další úpravy povrchu. První tenká vrstva malty se zatírá ocelovým hladítkem do zavadlého (matného), ještě nezaschlého povrchu adhezního můstku tzv. „živý do živého“, tak aby došlo k dokonalému spojení nanášených vrstev. Kvalita nanesení malty na podklad výrazně ovlivní celkové vlastnosti a přídržnost reprofilace.

Následná vrstva reprofilační malty se nanáší tak, aby nedocházelo k vytváření nedokonalých spojů (vzduchových separačních mezer), které by mohly narušit přídržnost mezi jednotlivými vrstvami. Finální úprava se provádí ocelovým hladítkem bez použití vody, tak aby došlo ke srovnání malty do výše původního povrchu. Na styku původního materiálu a malty ukončíme zarovnáním tak, aby nedošlo k přetažení malty na původní povrch mimo reprofilovanou oblast (neroztírat do „ztracena“). Pro vytvoření celistvého vzhledu (barevného sjednocení) sanovaného povrchu, doporučujeme použít sanační stěrku SANATOP FIN. Doba zpracovatelnosti malty je cca 45 minut (při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50%). (Pro aplikace na stěny či podhledy je vhodné použít adhezní můstek ARMATOP, není to však nezbytné.)

## Ošetřování

Za běžných podmínek musí být opravy chráněny min. 10 dní před přímým slunečním zářením a několikrát denně vlhčeny např. pomocí konve s kropítkem, zahradního postřikovače, nebo vodního tlakového zařízení s výkonem omezeným na minimum. V místech kde nelze zajistit pravidelné vlhčení, je po zavadnutí opravené plochy nutné její povrch ochránit proti odpařování vody např. zakrytím PE fólií nebo nanesením přípravku proti odpařování vody (výrobek NOVAPOR ze sortimentu firmy STACHEMA CZ). Aplikace se provádí celoplošně, zahradním postřikovačem nebo válečkem. V případě, že na sanovaný povrch bude prováděna další povrchová úprava, např. barvou, je nutné provést důkladné očištění ploch od zbytků NOVAPORu teplou vodou, popř. s přídavkem saponátu (odmastit).

Při teplotách, kdy je přes den okolo +10° C se doporučuje maltu pouze zakrýt proti odpařování vody a ošetřování vodou provádět až po jejím důkladném zatvrdnutí. Při vyšších teplotách je naopak nezbytné ošetřovat hmotu důkladněji (častěji a déle).

Ošetřování malty má zásadní vliv na vznik smršťovacích trhlin a výslednou kvalitu a životnost reprofilace.

## Klimatická omezení

Pro všechny aplikované hmoty platí respektování klimatických podmínek pro jejich použití. Nelze s nimi pracovat při teplotách vzduchu nebo podkladu nižších než 5° C nebo vyšších než 35° C.

# SANATOP TIX

Sanační cement-polymerová  
reprofiláční malta



Je-li nutné krátkodobě překlenout extrémní podmínky, může se tak stát pouze za předpokladu přijmutí zvláštních opatření a pod kontrolou technického zástupce firmy STACHEMA CZ.

## Skladování

Materiál je mírně hygroskopický. Ve vzduchotěsných obalech v suchém prostředí je skladovatelný 12 měsíců. Materiál není hořlavý. Při skladování dodržujte platné právní předpisy BOZP a ochrany ŽP.

## Balení

Papírové pytle s PE vložkou po 25 kg.

## Bezpečnost práce a ochrana zdraví

*(podrobněji viz Bezpečnostní list výrobku)*

Výrobek patří mezi nebezpečné pro zdraví. Přítomné složky mají dráždivý účinek na pokožku a sliznici. Rozmíchaná směs s vodou je vysoce alkalická. Nebezpečné je zejména požití a vstříknutí rozmíchané směsi do očí. Při práci je třeba používat osobní ochranné pracovní pomůcky zabraňující přímému styku pokožky a očí, zejména vhodný pracovní oděv, ochranné pracovní rukavice, obličejový štít nebo ochranné brýle a protiprachový respirátor. Při práci nejíst, nepít, nekouřit. Před každou přestávkou a po skončení práce je třeba ruce a znečištěnou pokožku důkladně umýt vodou a následně ošetřit reparačním krémem.

Pro výrobu tohoto produktu je používán cement s redukováným obsahem Cr<sup>6+</sup> ve smyslu vyhlášky č. 221/2004 Sb. v platném znění.

## První pomoc

*(podrobněji viz Bezpečnostní list výrobku)*

Projeví-li se zdravotní potíže po manipulaci s přípravkem, vždy při zasažení očí a při požití a v případě pochybností nebo při přetrvávajících potížích vyhledejte lékařskou pomoc a ukažte bezpečnostní list nebo obal. Vždy je nutné zajistit postiženému duševní klid a zabránit prochlazení. Při bezvědomí umístěte postiženého do stabilizované polohy na boku, s mírně zakloněnou hlavou; zásadně nepodávejte nic ústy (tekutiny). V případě zástavy dechu a srdeční činnosti zahajte resuscitaci. Informujte lékaře o poskytnuté první pomoci. **Při nadýchání:** přerušit expozici, odvést postiženého na čerstvý vzduch. **Při styku s kůží:** odstranit zasažený oděv, kůži omýt velkým množstvím vody. Po omytí ošetřit vhodným reparačním krémem. **Při zasažení očí:** Pokud má postižený kontaktní čočky, odstranit je z očí, okamžitě vyplachovat proudem čisté vody min. 10 minut při rozevřených víčkách. Zásadně nepoužívat žádné neutralizační roztoky. Vyhledejte vždy lékařské ošetření. **Při požití:** ihned vypláchnout ústa vodou, vypít asi 0,5 litru chladné vody, nevyvolávat zvracení. V případě spontánního zvracení zabránit vdechnutí zvratků.

Ve všech vážnějších případech léčbu postiženého konzultovat:

Klinika nemocí z povolání, Toxikologické informační středisko, Na Bojišti 1, 128 08 Praha 2, tel. 224 91 92 93.



# SANATOP TIX

Sanační cement-polymerová  
reprofiláční malta



## Upozornění

Technický list má pouze informativní charakter. Používání výrobku vyžaduje odzkoušení podle platných technických norem.

Pro další dokumenty jako Certifikát, Prohlášení o shodě, Bezpečnostní list, Podmínky pro skladování přísad apod. se obraťte na výrobce popř. dodavatele tohoto produktu.

Výrobce směsi je STACHEMA CZ s. r. o., Zibohlavy 1, Kolín, 28002 IČ: 46353747

STACHEMA CZ s. r. o. nepřebírá odpovědnost za případné škody způsobené neodborným používáním výrobku a neručí za kvalitu výrobku plněného do obalů odběratele.

Datum revize: 27. 07. 2015

**CE ISO 9001**

**STACHEMENT F**  
**PROHLÁŠENÍ O VLASTNOSTECH**  
**č. 10500001000/1**

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:

**EN 934-2: T 3.1/3.2 //54**

2. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:

**Superplastifikační přísada do betonu dle EN 934-2+A1:2012**

3. Jméno, firma nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle čl. 11 odst. 5:

**STACHEMA CZ s.r.o.**  
**Hasičská 1, Zibohlavý**  
**280 02 Kolín**

4. Případně jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce, jehož plná moc se vztahuje na úkoly uvedené v čl. 12 odst. 2:

**Nebyl ustanoven**

5. Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků, jak je uvedeno v příloze V:

**Systém 2+**

6. Harmonizovaná norma a oznámený subjekt

Harmonizovaná norma: **ČSN EN 934-2 + A1:2012**

Oznámený subjekt: **Oznámený subjekt č. 0921- QDB se sídlem Mainzer Landstraße 55 D-60329 Frankfurt am Main provedl počáteční inspekci v místě výroby a řízení výroby ve výrobním závodě i průběžného dohledu, posuzování a schvalování řízení výroby u výrobce v souladu se systémem 2+ a vydal: Certifikát řízení výroby číslo 0921-CPR-2000.**

## 7. Vlastnosti uvedené v prohlášení

Základní charakteristiky	Vlastnost	Harmonizované technické specifikace
Obsah chloridových iontů	≤ 0,1 hm. %	EN 934-2
Obsah alkálií	≤ 8 %	EN 934-2
Korozivní vlastnosti	Výrobek obsahuje složky: thiokyanatan sodný, uvedené v příloze A.2 z EN 934-1:2008	EN 934-2
Redukce vody (při stejné konzistenci)	Ve zkušební směsi ≥ 12 % ve srovnání s kontrolní směsí	EN 934-2
Pevnost v tlaku (při stejné konzistenci)	Po 1 dnu: Zkušební směs ≥ 140 % kontrolní směsi Po 28 dnech: Zkušební směs ≥ 115 % kontrolní směsi	EN 934-2
Obsah vzduchu v čerstvém betonu (při stejné konzistenci)	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi	EN 934-2
Zvětšení konzistence (při stejném vodním součiniteli)	Zvětšení sednutí ≥ 120 mm z původních (30 ± 10) mm Zvětšení rozlití ≥ 160 mm z původních (350 ± 20) mm	EN 934-2
Zachování konzistence (při stejném vodním součiniteli)	30 minut po přidání přísady neklesne konzistence zkušební směsi pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi	EN 934-2
Pevnost v tlaku (při stejném vodním součiniteli)	Po 28 dnech: zkušební směs ≥ 90 % kontrolní směsi	EN 934-2
Obsah vzduchu v čerstvém betonu (při stejné vodním součiniteli)	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi	EN 934-2
Nebezpečné látky	Viz MSDS	EN 934-2

8. Příslušná technická dokumentace a/nebo specifická technická dokumentace (čl. 36 – 38 nařízení (EU) č.305/2011)

### Nevtahuje se

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Bc. Martin Váša, výrobní ředitel

Zibohlavý, 7.1.2015

(místo a datum vydání)



(podpis)



