

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

**VLIV SÍRANOVÉ KOROZE NA MATERIÁLOVÉ
VLASTNOSTI BETONU PŘI BĚŽNÝCH A VYSOKÝCH
TEPLOTÁCH**

**EFFECT OF SULPHATE ATTACK ON MATERIAL PROPERTIES OF CONCRETE
AT NORMAL AND HIGH TEMPERATURES**

Diplomová práce

Bc. Petr Holeček

Vedoucí práce:

Ind. Radek Štefan, Ph.D.

Ing. Roman Chylík

2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Holeček Jméno: Petr Osobní číslo: 468319
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv síranové koroze na materiálové vlastnosti betonu při běžných a vysokých teplotách
Název diplomové práce anglicky: Effect of sulphate attack on material properties of concrete at normal and high temperatures
Pokyny pro vypracování:
Rešerše literatury
Příprava experimentu
Provedení a popis experimentu
Vyhodnocení
Závěr

Seznam doporučené literatury:
GLASSER, F. P., J. MARCHAND, a E. SAMSON. Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. Cem. Concr. Res., 38(2):226–246, 2008. ISSN 0008-8846.
P. Liu, Y. Chen, W. Wang, and Z. Yu. Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions. Chem. Phys. Lett., 745:137254, 2020.
F. Liu, Z. You, A. Diab, Z. Liu, C. Zhang, and S. Guo. External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles. Constr. Build. Mater., 249:6118224, 2020.
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 29.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

.....
Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

4.1.2022

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

Prohlášení

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

V Praze 1.1.2022

.....

Bc. Petr Holeček

Poděkování

Tímto bych rád velmi poděkoval vedoucím mé diplomové práce panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D. a panu Ing. Romanu Chylíkovi za ochotu a vstřícnost během konzultací, za veškeré rady a připomínky, a především za pomoc při zpracování experimentů. Tato diplomová práce byla vytvořena v rámci projektu Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS21/040/OHK1/1T/11.

Obsah

| | |
|---|------------|
| Prohlášení | III |
| Poděkování | IV |
| Abstrakt | III |
| Abstract | IV |
| Seznam použitých symbolů a zkratek | V |
| 1 Úvod | 1 |
| 1.1 Motivace..... | 1 |
| 1.2 Stanovení výzkumné otázky | 1 |
| 1.3 Cíle práce | 1 |
| 2 Současný stav poznání | 2 |
| 2.1 Charakteristika betonu | 2 |
| 2.2 Složky betonu..... | 2 |
| 2.2.1 Cement | 2 |
| 2.2.2 Kamenivo | 4 |
| 2.2.3 Voda | 4 |
| 2.2.4 Přísady a příměsi | 5 |
| 2.3 Degradční procesy betonu | 6 |
| 2.3.1 Fyzikální degradace betonu | 6 |
| 2.3.2 Vliv zvýšených teplot na betonové konstrukce..... | 6 |
| 2.3.3 Chemická degradace betonu | 8 |
| 2.3.4 Vliv pórovitosti na transportní procesy v betonu..... | 8 |
| 2.3.5 Vliv chloridů | 9 |
| 2.3.6 Vliv oxidu uhličitého – karbonatace | 10 |
| 2.3.7 Spolupůsobení chloridů a karbonatace | 10 |
| 2.3.8 Vyluhování pojiva..... | 10 |
| 2.3.9 Vliv koroze způsobené kyselinami a louhy | 11 |
| 2.3.10 Vliv alkalicko-křemičité reakce kameniva | 11 |
| 2.4 Síranová koroze betonu..... | 12 |
| 2.4.1 Zdroje síranů v přirozeném prostředí..... | 12 |
| 2.4.2 Průběh síranové koroze | 13 |
| 2.4.3 Faktory ovlivňující průběh síranové koroze | 14 |
| 2.4.4 Experimenty se síranovou korozí betonu..... | 18 |
| 2.4.5 Počítačové modelování síranové koroze betonu | 22 |
| 3 Praktická část | 23 |
| 3.1 Výroba vzorků..... | 24 |
| 3.1.1 Betonová směs | 24 |
| 3.1.2 Ukládání do forem a proces tuhnutí a tvrdnutí | 25 |
| 3.2 Vystavení vzorků degradačním vlivům | 27 |
| 3.2.1 Vystavení vysokým teplotám..... | 27 |
| 3.2.2 Vystavení síranové korozi..... | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3 | Zkoušky ověřující vlastnosti vzorků | 32 |
| 3.3.1 | Zkouška pevnosti betonu v tlaku | 32 |
| 3.3.2 | Zkouška dynamického modulu pružnosti | 33 |
| 3.4 | Rozdělení vzorků do experimentálních skupin | 37 |
| 3.4.1 | Skupina 1 – referenční vzorky | 37 |
| 3.4.2 | Skupina 2 – vzorky vystavené 400 °C | 39 |
| 3.4.3 | Skupina 3 – vzorky vystavené 800 °C | 43 |
| 3.4.4 | Skupina 4 – vzorky vystavené síranům..... | 46 |
| 3.4.5 | Skupina 5 – vzorky vystavené síranům + 400 °C | 48 |
| 3.4.6 | Skupina 6 – vzorky vystavené síranům + 800 °C | 51 |
| 3.4.7 | Skupina 7 – referenční vzorky 2 | 55 |
| 4 | Výsledky měření a jejich porovnání | 57 |
| 4.1 | Vyhodnocení z hlediska objemové hmotnosti | 58 |
| 4.2 | Vyhodnocení z hlediska dynamického modulu pružnosti | 61 |
| 4.3 | Vyhodnocení z hlediska tlakové pevnosti..... | 64 |
| 4.4 | Vyhodnocení průběhu zahřívání | 67 |
| 5 | Závěr | 69 |
| | Seznam obrázků..... | 71 |
| | Seznam tabulek..... | 73 |
| | Literatura | 75 |

Abstrakt

Díky svým vlastnostem je beton využíván i pro stavby ve velmi agresivním prostředí. Jedná se přitom o stavby významného charakteru, jako jsou dopravní a průmyslové stavby. I přes působení negativních vlivů je velice důležité, aby si tyto konstrukce zachovaly svou požární odolnost po celou dobu životnosti konstrukce. Největší pozornost je v práci věnována vlivu síranové koroze na vlastnosti betonu za normálních teplot a následně za zvýšených teplot simulující teploty za požáru. Toto téma je zde rozděleno do dvou částí. V první, teoretické části jsou přiblíženy procesy, které se v betonu odehrávají při působení různých chemických látek a způsoby, jak tyto negativní procesy omezit už při návrhu a výrobě betonové směsi. Hlavním tématem první části je poté působení vnější síranové koroze na beton, kde jsou shrnuty nynější poznatky a vědecké studie v oblasti této problematiky a jejich závěry. V praktické části je popsán experiment, který zkoumá vliv síranové koroze na pevnost betonu po vystavení vysokým teplotám. V něm jsou testovány betonové vzorky, které jsou rozděleny do šesti skupin. Ty jsou vystaveny různým kombinacím vysokých teplot a síranové korozi a následně jsou měřeny z hlediska tlakové pevnosti a dynamického modulu pružnosti. V závěru jsou výsledky z jednotlivých skupin vzorků porovnány mezi sebou. Dopad síranové koroze na vzorky betonu a na jejich schopnost odolávat vysokým teplotám je poté zhodnocen porovnáním výsledků ze všech skupin.

Klíčová slova

Železobetonové konstrukce; síranová koroze; chemická degradace betonu; materiálové vlastnosti betonu; vysoké teploty; požární odolnost

Abstract

Thanks to its properties, concrete is often used for constructions in strongly aggressive conditions. These are structures of a great importance, such as transportation and industrial buildings. It is very important that these structures retain their fire resistance despite the effects of negative conditions, due to the increased risk of exposure to extreme temperatures during fire. The main attention is paid to the sulphate attack on the concrete structures and its properties at normal and elevated temperatures simulating effects of fire. This topic is divided into two parts. The first, theoretical part describes the impacts of chemicals on concrete and ways to reduce them during the design and production of concrete mix. The main topic of the first part is the effect of external sulphate attack on concrete. It summarizes current knowledge and scientific studies in this area and their conclusions. The second, practical part describes an experiment that examines the effect of sulphate attack on the strength of concrete after exposure to high temperatures. Concrete samples are exposed to various combinations of high temperatures and sulphate corrosion. Then their compressive strength and dynamic modulus of elasticity are measured. the effect of sulphate corrosion and high temperatures on concrete samples are evaluated by comparing material properties with intact samples.

Keywords

Reinforced concrete structures; sulphate attack; chemical degradation of concrete; material properties of concrete; high temperature; fire resistance

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

| | | |
|------------------|---|-------------------|
| w | Koncentrace | - |
| m _(s) | Hmotnost rozpuštěné látky | g |
| m | Hmotnost celého roztoku | g |
| f _c | Pevnost v tlaku | MPa |
| F | Maximální zatížení při porušení | N |
| A _c | Průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení | mm ² |
| ρ | Objemová hmotnost betonu | kg/m ³ |
| v _L | Impulzová rychlost podélného ultrazvukového vlnění | m/s |
| k | Součinitel rozměrnosti prostředí | - |
| L | Délka mezi sondami | mm |
| t | Čas průchodu ultrazvukového impulzu | s |
| k ₃ | Koeficient pro trojrozměrné prostředí | - |
| ν _{cu} | Poissonův součinitel | - |

Zkratky

| | |
|-----|-----------------------------------|
| SEM | Skenovací elektronová mikroskopie |
| XRD | Rentgenová difrakční analýza |
| UZ | Ultrazvuk |

1 Úvod

1.1 Motivace

V normálních příznivých podmínkách (stálá vlhkost a teplota, přiměřená zatížení) betonové konstrukce vykazují velmi dobrou životnost. Ovšem díky svým vlastnostem se betonové konstrukce využívají i v prostředích, která pro beton již tak příznivá nejsou. V celé své životnosti trpí vlivem působení okolního prostředí a tím se zhoršují jeho výhodné vlastnosti, což může mít za následek, v případě zanedbání údržby, i kolaps celé konstrukce.

Požární odolnost se v současnosti určuje při návrhu na nepoškozených konstrukcích. Okolní prostředí ale může po celou dobu životnosti konstrukce změnit její vlastnosti a tím i jinak skvělé chování betonu při vysokých teplotách. Základní motivací pro zpracování tohoto tématu je zjistit vliv chemické degradace na vlastnosti betonu za vysokých teplot a tím přiblížit reálné vlastnosti konstrukcí vystavených chemicky agresivnímu prostředí.

1.2 Stanovení výzkumné otázky

Výzkumné otázky se soustředí na vliv síranové koroze v kombinaci s vysokými teplotami při požáru na materiálové vlastnosti betonu.

Jaký vliv má společný účinek chemicko-fyzikální degradace způsobené síranovou korozi a vysokých teplot na materiálové vlastnosti betonu?

Jaký vliv má síranová koroze na vlastnosti betonu za zvýšených teplot?

1.3 Cíle práce

Hlavními cíli práce jsou:

- 1) prozkoumání účinků chemické a fyzikální degradace betonu, způsobené sírany a vysokými teplotami
- 2) zaměření pozornosti na změnu mechanických vlastností betonu vystaveného síranové korozi, vysokým teplotám a jejich kombinaci
- 3) Pomocí experimentu zjistit jednotlivé změny vlastností, porovnat je a vyhodnotit

2 Současný stav poznání

Nejdříve je v této práci věnována pozornost ujasnění pojmů a přiblížení souvislostí mezi procesy, které v betonu probíhají už při jeho výrobě a mají vliv na jeho následné vlastnosti a odolnost proti degradačním vlivům.

Poté jsou v navazujících kapitolách popsány degradační procesy. Největší důraz je kladen na síranovou korozi betonu. Jsou zde proto popsány současné poznatky o tomto složitém chemicko-fyzikálním jevu ovlivňující betonové konstrukce.

2.1 Charakteristika betonu

Beton je stavební materiál, který je složen ze směsi pojiva (cementu), plniva (drobného a hrubého kameniva) a vody. Současně mohou směs doplnit přísady, které zlepšují některé vlastnosti betonu v čerstvém nebo ztvrdlém stavu (urychlovače nebo zpomalovače tuhnutí, plastifikátory atp.) a příměsi, které mohou zlepšit zpracovatelnost betonu nebo zvýšit jeho pevnost a trvanlivost (vysokopeční struska a pucolány). [1]

Beton se může rozdělovat podle mnoha jeho vlastností – dle způsobu uložení do na monolitický a prefabrikovaný, dle způsobu vyztužení na prostý beton, železobeton, předpjatý beton a vláknobeton, nebo dle jeho objemové hmotnosti či hutnosti. [1][2]

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů na celém světě. Jeho rozšíření a obliba jsou zapříčiněny bezpochyby jeho výhodami jako je vysoká pevnost v tlaku, dlouhá trvanlivost, možnost vytvoření libovolných tvarů, odolnost proti negativním vlivům prostředí a vysoká ohnivzdornost [2].

2.2 Složky betonu

Jednotlivé složky, ze kterých je betonová směs složena, mají zásadní vliv na vlastnosti ztvrdlého betonu. Při návrhu složení se rozhoduje o trvanlivosti betonu.

2.2.1 Cement

Cement v betonové směsi funguje jako pojivo. Jedná se o jemně mleté hydraulické pojivo. Po smíchání s vodou díky hydrataci tuhne a tvrdne na vzduchu i ve vodě. Po zatvrdnutí má stálou pevnost. Cementy mohou být silikátové, hlinitanové nebo speciální. [3]

Silikátové cementy se vyrábějí jemným semletím portlandského slínku. Je možné přidat i různé přísady. V první řadě se připraví suroviny pro výrobu portlandského slínku. Jsou to především křemičitany vápenaté (nejméně ze dvou třetin hmotnosti) a dále slínkové fáze obsahující hliník a železo. Je nutné, aby suroviny byly homogenní, to se zajistí jejich namletím a promícháním. [3]

V dalším kroku se suroviny pálí za teplot okolo 1450 °C v rotační peci a dochází k jejich slinování. Následuje proces chlazení, který má významný vliv na výslednou pevnost. Při rychlejším zchlazení vznikají cementy s vyšší pevností, které produkují větší hydratační teplo, méně se smršťují a mají vyšší odolnost proti síranovým vodám. Pomalým chlazením vznikají ve slínku fáze, které nemají hydraulické vlastnosti a tím je cement méně kvalitní. [2]

Výsledný cement se následně vyrobí mletím slínku společně se sádrovcem (působí jako zpomalovač tuhnutí) na jemný prášek [2]. Mezi hlavní složky cementu patří portlandský slínek, granulovaná vysokopeční struska, pucolány, popílky (křemičitý, vápenný), kalcinovaná břidlice, vápenec a křemičitý úlet. Dále se v cementech nachází doplňující složky, síran vápenatý upravující tuhnutí a přísady pro usnadnění výroby nebo úpravu vlastností cementu. [3]

Obsahem portlandského slínku jsou čtyři hlavní slínkové minerály. Jejich chemický vzorec a přibližný obsah v cementu je vyznačen v Tab. 1.

Tab. 1: Hlavní slínkové minerály [2]

| Slovní označení | Zkrácený vzorec | Chemický vzorec a název | Podíl minerálu ve slínku |
|-----------------|-----------------|---|--------------------------|
| Alit | C3S | $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – křemičitan trojvápenatý | 45–60 % |
| Belit | C2S | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – křemičitan dvojvápenatý | 15–30 % |
| Amorfní fáze | C3A | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ – Hlinitan trojvápenatý | 5–12 % |
| Celit | C4AF | $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ – hlinitoželezitan čtyřvápenatý | 10–20 % |

Dále se ve slínku vyskytují i oxidy CaO a MgO. Oba oxidy při reakci s vodou zvětšují svůj objem, což může vést ke vzniku trhlin. Oxidy Na₂O a K₂O způsobují nerovnoměrné tuhnutí. Obsah všech těchto oxidů je proto v cementech nežádoucí a jejich množství je limitováno. [2]

Hydratace cementu je složitá chemicko-fyzikální reakce, která začíná v okamžiku, kdy se smíchá cement s vodou. Slínkové minerály cementu začnou reagovat s vodou, čímž vznikají nové sloučeniny, které obsahují chemicky vázanou (krystalovou) vodu. Při tomto procesu se sloučeniny vzájemně spojují do mikrostruktury a vzniká ztvrdlý cementový kámen, který je stálý a ve vodě nerozpustný [2][4]. Při této reakci vzniká hydratační teplo.

Smícháním cementu s vodou se začnou tvořit jehličkovité krystaly minerálu ettringitu (také označován jako trisulfát nebo fáze AFt) díky sádrovci a koncentraci iontů SO₄²⁻. Současně se tvoří deskovité krystaly minerálu portlanditu (Ca(OH)₂) na povrchu částic C₃A a vytváří tak jejich obal, který se následně zahušťuje. Tento proces trvá přibližně hodinu po smíchání cementu s vodou. Poté za hydratace C₂S a C₃S začnou vznikat vláknité gelovité krystaly C-S-H (obecný vzorec $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O}$ s rozdílným poměrem složek dle průběhu hydratace), které společně s krystaly ettringitu vytvářejí prostorové vazby a základy mikrostruktury cementového kamene. Dochází k zahušťování struktur ve směsi. Způsob vzniku C-S-H je významně ovlivněn vodním součinitelem. Po vypotřebování sádrovce ve

směsi a snížení koncentrace iontů SO_4^{2-} se přestává tvořit ettringit. Společně s C-S-H vznikají i krystaly portlanditu. Vznik portlanditu v této fázi je velmi důležitý. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je hydroxid a za jeho přispění vzniká v betonu alkalické prostředí s pH kolem 12,5, což následně ovlivňuje ochranu ocelové výztuže. Po přibližně 24 hodinách začne fáze tvrdnutí za vzniku dalších hydratačních produktů. Obsah ettringitu se snižuje a začne se měnit na monosulfáty (fáze AFm). Začíná hydratovat belit a snižuje se vývin tepla. Další hydratační reakce vznikají pomocí difuze. Rychlost hydratace klesá přibližně 28 dnů, poté nastává proces dozrávání betonu. [2][4]

Druhy cementů se od sebe odlišují přidáním složek, které nahrazují část slínku a jsou hydraulicky aktivní. Ty následně upravují vlastnosti výsledného cementu. Jejich procentuální zastoupení v cementech je jasně dáno normou ČSN EN 197-1.

Cementy pro obecné použití [3]:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopeční cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

Dále se využívají speciální cementy. Jedním z nich je například síranovzdorný cement (s upraveným mineralogickým složením) s obsahem C_3A ve slínku maximálně 5 %, což má za následek, že při pozdějším působení síranů na beton nevzniká ettringit, který by nebezpečně zvětšoval svůj objem v betonu [3]. Použití těchto cementů je možné v agresivních prostředích, kde je vysoké riziko síranové koroze. [2]

2.2.2 Kamenivo

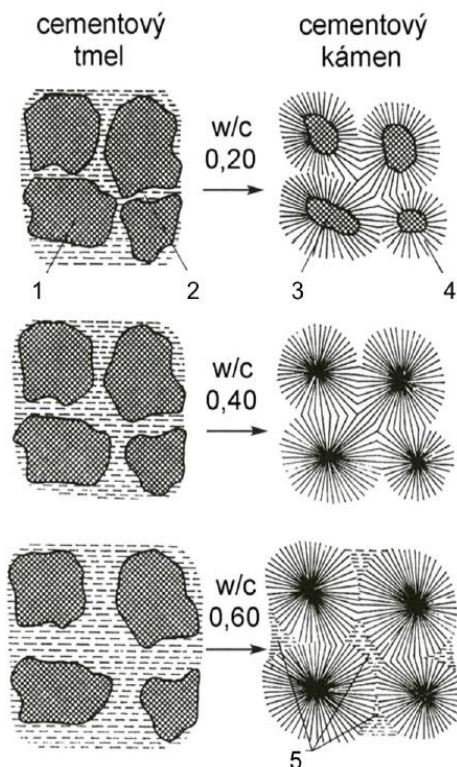
Kamenivo plní funkci plniva a je zastoupeno v betonu 70-80 %. Může být přírodní, umělé a recyklované. Dále se dělí dle objemové hmotnosti a dle velikosti zrn. V betonu by mělo být zastoupeno kamenivo o různých frakcích, aby se snížila mezerovitost kameniva. Tím se zajistí požadovaná pevnost a trvanlivost betonu. Kamenivo nesmí obsahovat látky, které negativně ovlivňují vlastnosti betonu.[2] Pro tuto práci jsou podstatné především sírany, které mohou způsobit objemové změny betonu [5].

2.2.3 Voda

Množství záměsové vody ovlivňuje spoustu vlastností betonové směsi i ztvrdlého betonu. Její dostatek je důležitý pro zpracovatelnost betonu a pro hydratační proces. Množství záměsové vody je určeno vodním součinitelem (v/c). Přidaná voda ovlivňuje pórovitost, nasákavost, pevnost i trvanlivost betonu. Čím více se použije záměsové vody, tím se

vlastnosti betonu zhorší, jak je patrné na Obr. 1. Je proto potřeba vodu vhodně kombinovat s plastifikačními přísadami. [2]

Záměsová voda nesmí obsahovat více než přípustná množství škodlivých látek. Jedná se především o chloridy, sírany, alkálie a další škodlivé znečištění



Obr. 1: Hydratace cementových zrn při různém vodním součiniteli: 1 – cementové zrno, 2 – voda, 3 – nehydratovaný cement, 4 – hydratovaný cement, 5 – kapilární póry. Převzato z [6]

Kvalita vody je důležitá i pro ošetřovací vodu. Například obsah síranových iontů je v ošetřovací vodě závažnější než v záměsové. Pokud jsou sírany obsaženy v záměsové vodě, vznik ettringitu probíhá ještě v nezatvrdlém betonu a objemové změny nezpůsobí příliš velké nežádoucí napětí. Naopak ošetření betonu vodou s obsahem síranu může v zatvrdlém betonu způsobit vznik krystalů ettringitu a tím objemové změny, které mohou vést až k porušení betonu. [2]

2.2.4 Přísady a příměsi

Přísady jsou chemické látky k úpravě vlastností betonu ať už v čerstvém nebo zatvrdlém stavu. Například přidáním plastifikátorů je možné snížit množství záměsové vody při dosažení lepší zpracovatelnosti. Pro vzdušňovací přísady se přidávají do betonu pro lepší odolnost proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům. Dále to mohou být přísady urychlující, retardační, hydrofobizační a další. [2][3]

Příměsi, které se přidávají do betonových směsí se rozlišují na dva typy. Buď se jedná o typ I – inertní příměsi nebo typ II – pucolány nebo latentně hydraulické látky. [2]

2.3 Degradální procesy betonu

Moderní betonové konstrukce svými vlastnostmi dokážou velmi dobře odolávat agresivnímu prostředí, pokud jsou správně navrženy. Ovšem stále dochází k velmi závažným poškozením. Hlavním důvodem, proč se zabývat zvyšováním trvanlivosti a životnosti betonu jsou vysoké, a především stále rostoucí náklady na výstavbu těchto konstrukcí. V případě poškození během jejich životnosti se náklady opět zvyšují, a to nejen o náklady spojené s výměnou či obnovou konstrukcí, ale i o ekonomické náklady spojené s přerušáním provozu. V současné době se musí přihlídnout i na vysokou uhlíkovou stopu spojenou s výrobou a používáním cementu. [5]

Degradální procesy komplikují snahu dosáhnout požadované životnosti konstrukcí z betonu. Tyto procesy se v případě železobetonových konstrukcí dělí na degradaci betonu a degradaci výztuže. Degradace betonu je způsobena buď fyzikálními, chemickými nebo chemicko-fyzikálními vlivy. Degradace výztuže je způsobena korozí. V následujících odstavcích je stručný přehled těchto degradačních vlivů a podrobnější popis vlivu požáru a síranové koroze na beton.

2.3.1 Fyzikální degradace betonu

Fyzikální degradace může být způsobena zejména střídavým působením mrazu a rozmrazování, mechanickým opotřebením, požárem nebo vznikáním krystalů solí v pórech betonu. V případě působení mrazu dochází k zamrznutí vody nasáklé v pórech, kde zvětšuje svůj objem a tím vznikají vnitřní napětí a trhliny. Na stejném principu funguje i narušení pórů vznikajícími krystaly solí. Mechanické opotřebením může nastat po obrušování povrchu betonu (dopravní stavby, povrchy dopravních komunikací), narušení kavitací (rychlý proud vody), či erozí (působení kapalin s pevnými částicemi). Vysoké teploty za požáru, způsobují v betonu závažné změny, které ovlivňují jeho následné vlastnosti. Vzhledem k tématu této práce je v dalších odstavcích věnována pozornost pouze vlivu vysokých teplot na beton a probíhajícím změnám, které se v něm odehrávají.

2.3.2 Vliv zvýšených teplot na betonové konstrukce

Vlivem zvýšených teplot za požáru v betonu probíhá spousta chemických i fyzikálních změn a procesů, které jsou závislé na teplotě, na silovém zatížení, na geometrii prvku (rozměry, excentricita) a na vlastnostech betonu. Chemické změny v betonu vlivem teploty jsou popsány například v [7]. Do 100 °C v betonu dochází k hydrataci, kdy za přispění teploty vznikají krystaly C-S-H a Ca(OH)₂ (portlandit). Od 100 °C začíná dehydratace, uvolňování volné vody a rozklad hydrátů. Od 200 °C nastává uvolňování vázané vody. Od 300 °C vznikají mikrotrhliny a začíná se porušovat křemičité kamenivo. Mezi 550 a 600 °C se kvůli rozdílné tepelné roztažnosti začínají narušovat vazby mezi kamenivem a cementem. Od 800 °C se

z hydraulických vazeb stávají keramické vazby a dekarbonizuje vápencové kamenivo. Při 900 °C nastává úplná dekompozice minerální struktury cementového tmelu.

Na betonové konstrukce při jejich zahřívání působí i řada fyzikálních procesů. Vlivem nerovnoměrné teplotní roztažnosti vznikají v konstrukci napětí a v důsledku transportních procesů v pórové struktuře narůstají tlaky v pórech. Když tyto dva procesy vyvolají v betonu napětí překonávající teplotně závislou pevnost v tahu, mohou mít za následek odštěpování betonu. [8]

Současně se vlivem teploty mění i fyzikální vlastnosti betonu. Nejpodstatnější pro návrh konstrukcí jsou měrná tepelná kapacita, objemová hmotnost a tepelná vodivost betonu, které jsou závislé na teplotě. Zvyšuje se i poměrné přetvoření betonu. I když je beton nehořlavý materiál a při vystavení vysokým teplotám má při srovnání s jinými materiály skvělé vlastnosti, dochází v něm během požáru k zásadním změnám.

Vliv na celkové chování konstrukce za zvýšených teplot může mít i náhlý proces chlazení při hasebním zásahu. Náhlé zchlazení části nosného prvku může do celkové konstrukce vnést nečekané napětí a ovlivnit tak její únosnost. To může mít významný vliv například při vyhodnocení zbytkové únosnosti konstrukce po požáru. [9]

Zkoumání vlivů vysokých teplot na betonové konstrukce je složitý a nákladný proces, který je závislý na velkém počtu vstupních parametrů. Vzhledem k tomu se velmi často přistupuje k matematickému modelování, které simuluje chování betonu za vysokých teplot. Většina modelů je založena na zákonu zachování energie a hmotnosti. Ale odlišují se složitostí popisu chemických reakcí a fyzikálními mechanismy transportních procesů v pórové struktuře. [8] Simulace zahřívání, obsahu vlhkosti, vznikání napětí, transportních a degradačních procesů je ale velmi složitá. Některé parametry pro tyto simulace nelze ani přesně měřit. Každý model se proto snaží vnést do svých výpočtu zjednodušení umožňující zadat snadněji zjistitelné materiálové parametry. [10][11]

Spojení chemických, fyzikálních a transportních procesů v betonu při vysokých teplotách s mechanickou odezvou zahřáté konstrukce a degradací materiálu může mít za následek lokální (odštěpování) i globální (zhroucení celé konstrukce, nebo konstrukčního prvku) selhání funkce konstrukce. Je proto nesmírně důležité posuzovat požární odolnost konstrukcí. Ta se posuzuje dvěma přístupy:

- 1) Zjednodušená průřezová analýza – posouzení nejvíce zatíženého průřezu
- 2) Pokročilá analýza celé konstrukce nebo konstrukčního prvku

Při posouzení konstrukce pomocí těchto metod se ale neuvažuje s předchozím poškozením jinými vlivy než vysokými teplotami. Agresivní prostředí může během celé životnosti změnit vlastnosti betonu. Degradovaný beton se za zvýšených teplot může chovat odlišně od původního stavu. I pro návrh betonových konstrukcí z hlediska požáru by proto měla být důležitá degradace způsobená chemickými procesy.

2.3.3 Chemická degradace betonu

Chemická degradace betonu a výztuže je pro železobetonové konstrukce velmi nebezpečná. Probíhá vždy za přítomnosti vody v kapalném stavu, nebo v podobě vodní páry. I u těchto konstrukcí je důležité sledovat jejich požární odolnost. Může se jednat o konstrukce tunelů a dopravních, podzemních nebo průmyslových staveb, kde degradační látky mohou působit vlivem podzemní vody, agresivní půdy nebo z agresivity prostředí, které vytváří provoz na konstrukcích.

K degradaci může docházet na povrchu betonu v okolí krycí vrstvy. V případě výskytu trhlin ale mohou degradační látky postupovat do vnitřní části průřezu a způsobovat nebezpečné reakce ovlivňující vlastnosti betonu. Látky, které na betonové konstrukce působí, značně ovlivňují průběh chemické degradace.

Mezi degradaci ovlivňující látky patří chloridy, jejichž pronikání do betonu nemá přímo vliv na jeho degradaci, ale narušuje přirozenou pasivační vrstvu v okolí výztuže, která poté koroduje a tím zvětší svůj objem. Dalším degradačním procesem je vyluhování pojiva, při kterém dochází k vyplavování iontů vápníku „hladovou vodou“ a tím beton ztrácí svou pevnost. V neposlední řadě působí na betonové konstrukce vliv karbonatace a oxidu uhličitého. [1][5]

2.3.4 Vliv pórovitosti na transportní procesy v betonu

Degradací železobetonu se rozumí zhoršení vlastností a kvality nebo znehodnocení materiálu, přičemž degradovat mohou všechny složky železobetonu – pojivo, kamenivo i ocelová výztuž. Hlavním důvodem, proč beton může degradovat je jeho porézní struktura. Póry umožňují transport látek uvnitř konstrukce. Transportními procesy jsou absorpce, difuze a penetrace, kvůli kterým mohou pronikat do betonu kapaliny, plyny nebo ionty. V případě pronikání dostatečného množství škodlivých látek se následně spouští degradační procesy. Pórovou strukturu lze ovlivnit již při výrobě betonu především vodním součinitelem, ošetřováním betonu a přísadami a příměsi. Dále je pórovitost ovlivněna stupněm hydratace. [2]

Beton je porézní materiál a jeho vlastnosti jsou ovlivněny velikostí a způsobem uspořádání pórů. Póry se pak mohou dělit dle velikosti, tvaru nebo dle jejich vzniku. [12]

Při absorpci jsou plyny, páry nebo kapaliny rozpouštěny v uvnitř pórů. Děje se tak kvůli rozdílu parciálních tlaků mezi plynem a povrchem kapaliny nebo povrchem pórů. Plyn je absorbován, pokud je jeho parciální tlak větší než nad povrchem. [13]

Difuze je pohyb molekul nebo iontů způsobený koncentračním gradientem. Roztok se tak snaží vyrovnat koncentrační rozdíly mezi okolním prostředím a pórovou strukturou betonu (stejně tak i mezi jednotlivými póry betonu). Možnost difuze iontů v betonových

konstrukcích je ovlivněna koeficientem difuze, stupeň nasycení materiálu, teplotou okolí nebo strukturou pórů. Přidáním dalších hydratujících složek do betonové směsi lze difuzi iontů kladně ovlivnit. Přidání popílku nebo vysokopevnostní strusky vede ke snížení pórovitosti a difuzního koeficientu a tím se omezují transportní mechanismy. Na druhou stranu rozpouštění hydratovaných fází a tím způsobené otevírání pórů může difuzní koeficient materiálu opět zvýšit. To je často důsledkem kombinované degradace namáhaného betonu ve velmi agresivním prostředí, kde na něj působí více vlivů najednou (fyzikální i chemická degradace současně). [5][14]

Propustností betonové pórové struktury je umožněn pohyb vlhkosti, a to ve všech fázích: kapaliny (vodný roztok) i vodní páry. Voda v pórové struktuře poté umožňuje degradační procesy – fyzikální v podobě objemové roztažnosti zmrzlé vody, nebo chemické, kdy je s vodou do pórů přivedena škodlivá chemická látka. [5][14]

2.3.5 Vliv chloridů

Jednou z degradačních látek ovlivňující trvanlivost železobetonových konstrukcí jsou chloridy. Samotné pronikání chloridů do betonu nemá vliv na jeho expanzi, praskání nebo změnu vlastností. Problém nastává, pokud chloridy proniknou k výztužné oceli díky trhlinám. Prostředí betonu má vysoké pH a díky tomu je povrch oceli přirozeně chráněn před korozi. Ovšem chloridy mohou tuto vrstvu narušit. Koroze výztuže způsobí nárůst objemu a tím i vnitřní napětí v betonu, která vedou ke vzniku trhlin a odpadávání krycí vrstvy výztuže. [1][5]

Bylo dokázáno, že chloridy samotný beton negativně neovlivňují. V betonu reagují s hlinitanovými fázemi za vzniku tzv. Friedelovy soli ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) a vytváří tak stabilní fázi vyplňující pórovou strukturu. Škodlivý účinek chloridů na beton se projevuje až při velmi vysokých koncentracích, kterých se ve většině případů nedosáhne (ani stavby vystavené mořské vodě nebo rozmrazovacím solím). Vysoké koncentrace roztoku v pórové struktuře ale mohou nastat v případě zvyšování obsahu chloridů v důsledku odpařování vody. [5]

Problém při vnikání chloridů nastává při kontaktu s ocelí, u které způsobuje korozi. Díky vysokému pH v prostředí betonu je povrch ocelové výztuže přirozeně pasivován díky vlivu hydroxidu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). V přítomnosti chloridů je ale tato vrstva zničena (nahrazení Cl^- za hydroxidové ionty OH^-) a při dosažení kritické hodnoty obsahu chloridů začíná koroze výztuže (přibližně 0,5g chloridu na 1 kg betonu). Čas k dosažení kritického obsahu chloridů je závislý na krytí výztuže a podmínkách expozice. [5]

2.3.6 Vliv oxidu uhličitého – karbonatace

Pronikáním plynného oxidu uhličitého do částečně nasyceného betonu zahajuje karbonataci. Oxid uhličitý pronikne materiálem a absorbuje se v roztoku pórů za pomoci OH^- na HCO_3^- a CO_3^{2-} , ty poté reagují s vápníkem (Ca^{2+}) a vytváří uhličitán vápenatý (CaCO_3) dle rovnice (1). To má nejdříve za následek vytvoření vrstvy v betonu, kde dochází ke snížení pórovitosti, ale postupem karbonatace dochází k porušování struktury betonu, rozkladu složek cementového kamene (rozpuštění portlanditu) a poklesu pH pod bezpečnou hranici, což ohrožuje beton i výztuž. [1][5]



Hloubka karbonatace se odhaduje pomocí indikátoru fenolftaleinu. Růžový indikátor ukazuje, kde pH klesne pod 9 odbarvením. Tímto se ale odhaduje hloubka karbonatace pouze přibližně. Průběh karbonatace je závislý na pórovitosti betonu (ovlivňuje difuzní koeficient), objemovému obsahu vody, koncentraci plynného oxidu uhličitého a na teplotě. [5]

2.3.7 Spolupůsobení chloridů a karbonatace

Mezi působením chloridů a karbonatací je úzká souvislost. V přítomnosti CO_2 může Friedelova sůl (vytvořena reakcí mezi chloridem a hydratovaným cementovým tmelem) reagovat. Z této reakce jsou uvolňovány ionty chloridů, který se difuzí pomocí koncentračních gradientů dostávají dále do struktury betonu. Snáze tak dosahují výztuže, kde mohou zahájit korozi. [5]

2.3.8 Vyluhování pojiva

Dalším degradačním vlivem způsobeným chemickými procesy je vyluhování pojiva. Při tomto procesu se rozpouští portlandit a C-S-H vlivem pronikající vody, která rozpouští a odnáší hlavně ionty vápníku a hydroxidu z pórů do vnějšího prostředí. V důsledku toho se betonu ztrácí jeho pevnost. Děje se tak především při dlouhodobém kontaktu s měkkými vodami (hladové vody), které obsahují velmi málo vápených iontů, nebo kyselými vodami. Jsou proto ovlivněny především konstrukce vodních nebo podzemních staveb nebo staveb pro ukládání radioaktivního odpadu. Vyluhování měkkou vodou se rozpouští hydroxid vápenatý a C-S-H, kterým se snižuje obsah vápníku. Z něj se poté vytváří další fáze AFm, ettringitu a kalcitu. Odvápnění tak mění rozměry a strukturu pórů, což negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti betonu. [1][5]

Celý proces závisí na množství rozpuštěných solí, na rychlosti pronikání vody a na teplotě. Ovlivnit se proto dá zabezpečením konstrukce před průsakem vody použitím nepropustného betonu (přidáním doplňkových hydratačních materiálů jako vysokopecní strusky nebo křemičitého úletu). [15]

2.3.9 Vliv koroze způsobené kyselinami a louhy

Kyseliny při jejich působení na betonové konstrukce začínají reagovat se složkami hydratovaného cementového tmelu. Složky pojiva obsahující vápenaté sloučeniny se poté začínají rozpouštět. Tím se zvyšuje pórovitost a propustnost betonu, čímž může docházet k další postupné degradaci celého materiálu. Vliv na průběh této koroze má doba působení, množství kyseliny, její koncentrace a tím i hodnota pH. Výrazný vliv agresivních vod s obsahem kyselin na betonové konstrukce mají vody s pH pod 6. Při nižších hodnotách pH je už ochrana konstrukcí z betonu problematická. Za škodlivé kyseliny se například považuje kyselina chlorovodíková, fluorovodíková, sírová nebo dusičná. [15][16]

2.3.10 Vliv alkalicko-křemičité reakce kameniva

Použití kameniva s obsahem oxidu křemičitého vede k jeho reakci s ionty z portlandského cementu (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}). Za přispění vlhkosti zvětšují vzniklé alkalicko-silikátové gely svůj objem, rozpínají se a tím po překonání tahové pevnosti betonu vznikají trhliny. To má za následek ztrátu pevnosti a trvanlivosti v betonu. Na vnějším povrchu je poté patrná síť trhlín. Tou může do betonu pronikat další vlhkost a urychlit tak další alkalickou reakci. Vyhnout se alkalicko-křemičité reakci lze jen použitím vhodného typu kameniva a cementu nebo zabráněním přístupu vlhkosti. [15][16][17]

2.4 Síranová koroze betonu

Síranová koroze betonu je velmi složitý proces fyzikální a chemické degradace. Probíhá při něm reakce mezi síranovými ionty a hydratovanými strukturami betonu, které způsobují vznik expanzích produktů a krystalů solí. Výsledkem síranové koroze je mikrostrukturální poškození, rozklad cementových materiálů, nárůst objemů, ztráta pevnosti, vznik trhlin, odlupování a celková degradace betonu. To vede ke snížené životnosti, spolehlivosti a bezpečnosti betonových konstrukcí. [5][14][18] Výzkum síranové koroze a její vliv na odolnost betonu je proto velmi důležitý.

Betonové konstrukce mohou být vystaveny vnější nebo vnitřní síranové korozi [5][14]. Při vnějším působení je materiál degradován vlivem okolního prostředí, které obsahuje roztoky síranů. Při vnitřní korozi ovlivňují beton sírany, které jsou obsaženy v původní betonové směsi. Tam se mohou dostat použitím nevhodných stavebních materiálů (kamenivo obsahující sírany) nebo použitím nevhodné vody (podzemní nebo mořská voda) během procesu výstavby [5][14]. Vzhledem k rozsahu problematiky, je v této práci popsán a zkoumán pouze vliv vnější síranové koroze.

2.4.1 Zdroje síranů v přirozeném prostředí

Sloučeniny síranů jsou velmi rozšířené ve slaných půdách i v povrchových, podzemních, mořských, průmyslových a odpadních vodách po celém světě [5][14][19][20]. Mohou beton ovlivnit například v základových konstrukcích, tunelech, dopravních stavbách, inženýrských sítích, přímořských stavbách a v dalších konstrukcích vystavených agresivnímu prostředí [19].

Složení slané půdy a podzemních vod je velmi komplikované a obsahuje mnoho zdrojů degradačních látek. Byla proto provedena řada výzkumů, které zohledňovaly spolupůsobení různých chemických látek na beton. Například výzkum [20] se zabýval spolupůsobením síranů a chloridů a jejich vliv na beton. Studie [17] je věnována přehradě v Pyrenejích na severovýchodě Španělska, která se během 25 let zdeformovala místy až o 200 mm. Důvodem bylo společné působení alkalicko-křemičité reakce kameniva s vnitřní síranovou korozí. Podzemní a odpadní vody obsahující sírany jsou často neutrální (pH=7) až kyselé, což je spojováno s vyluhováním vápníku. Ohroženy tak mohou být čistírny odpadních vod, nádrže na jaderný odpad nebo na vodu a kanalizace. [21]

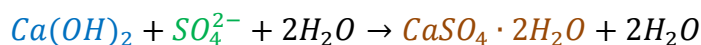
V půdách jsou sírany rozšířená skupina nerostů vznikající oxidačním rozkladem siřníků, hydrotermálně nebo nejčastěji sedimentárními procesy jako evaporit (sediment vzniklý odpařováním mořské vody nebo vod slaných jezer). Vzniká tak sádrovec, anhydrit, mirabilit a další. [22] V přírodě jsou nejčastější sloučeniny síranu vápenatého (sádrovec – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), síranu barnatého (baryt – BaSO_4) a síranu měďnatého (chalkantit – modrá skalice – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). [23]

2.4.2 Průběh síranové koroze

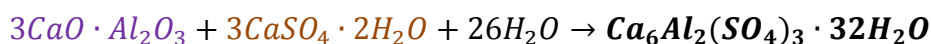
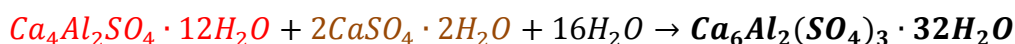
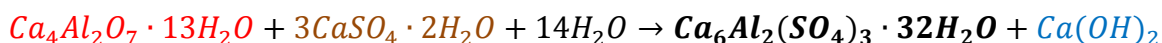
Struktura pórů a mechanické vlastnosti betonu se mění v závislosti na fázových změnách a růstu expanzních produktů síranové koroze. Vznik nových trhlin vede ke zvětšení objemu a ztrátě pevnosti [14][19]. Zároveň vede síranová koroze k dočasnému zvýšení hmotnosti kvůli ukládání síranových produktů v betonu. Po delším působení ale beton svou hmotnost začne ztrácet vyluhováním pojiva a odpadáváním materiálu. Zároveň vlivem expanzivních produktů beton zvětšuje svůj objem. [14][18][20] Zvětšení objemu a snížení hmotnosti je způsobeno nadměrným vznikem trhlin a poškozením betonu.

Během síranové koroze reagují síranové ionty s minerálním složením hydratovaných cementů (portlandit a C-S-H). Vzniká tak sádra ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) a za specifických podmínek thaumasit ($\text{Ca}_3(\text{CO}_3) \cdot (\text{SO}_4)\text{Si}(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) [5]. Tvorba ettringitu je spojována s množstvím složky C3A v cementech. Hliník obsažený v C3A je za přispění síranů spotřebováván k vytváření mnohem objemnějšího ettringitu. Větší obsah C3A v cementech má za následek vytváření vyšších napětí v pórové struktuře a tím i výraznější degradaci. Napětí ohrožující tahovou pevnost betonu se tvoří v pórech menších než 100 nm. [24]

Síranové ionty vstupují do betonové struktury a nejdříve reagují s Ca^{2+} (z **hydroxidu vápenatého**) za vzniku **sádry**. [21]

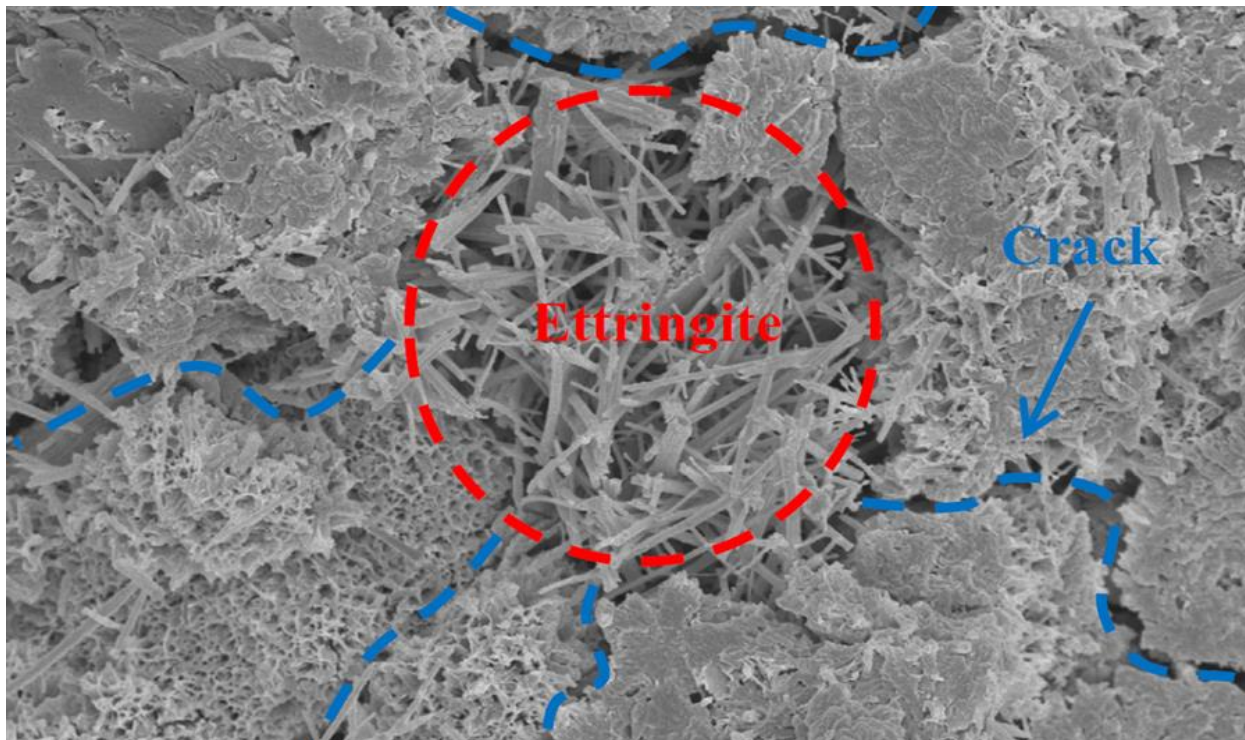


Ettringit poté vzniká za přispění sádry z **hydratovaných** i **nehydratovaných** hlinitanových fází. [21]



Tvorba sádry, a především ettringitu vede k expanzi, objemové nestabilitě a praskání betonu [5] (ettringit je označován za hlavní příčinu expanze [14][19][24]). Ale celková síranová koroze se může dělit do několika fází. V první fázi, kdy dojde mikrotrhlinami k průniku iontů síranů do pórové struktury, začnou s hydratovanými i nehydratovanými materiály reagovat a vytvářet expanzní produkty. Tímto procesem se pórová struktura začíná vyplňovat a mechanické vlastnosti betonu se zlepšují dočasně zvýšenou tlakovou pevností a menší propustností betonu [14][18][19][20][25]. Růst dalších krystalů ettringitu ale může v následující fázi překonat tahovou pevnost betonu (vyvolat napětí až 8MPa v pórech velikosti 10-50 nm) [24] a vytvářet tak mikrotrhliny (Obr. 2), kterými může pokračovat a zrychlovat difuze síranových iontů [14][24]. To je podpořeno i rozpouštěním hydratovaných fází portlanditu a C-S-H. V této fázi se tlaková pevnost betonu výrazně snižuje [14][18][20]. Síranová koroze postupuje skrz strukturu betonu, tvoří expanzní produkty

a vyvolává tahová napětí způsobující trhliny a objemové změny od vnějšího povrchu dovnitř [14][19].



Obr. 2: krystaly ettringitu vyfocené elektronovou skenovací mikroskopií, Převzato z [26]

Současně je se síranovou korozí také spojováno vyluhování vápníku, protože agresivní vody jsou často špatně mineralizované (pH neutrální) nebo až kyselé. Působením těchto roztoků na povrch betonu se z hydroxidu vápenatého uvolňuje vápník a vzniká sádra. Tím se snižuje pH betonu a fáze C-S-H se dále odvápní, což způsobuje zvýšení pórovitosti a usnadnění dalších transportních procesů v betonu. Za přispění agresivních síranových iontů se současně z monosulfátů (fáze AFm) tvoří objemově nestálý ettringit (fáze AFt), čímž je hydroxid vápenatý také redukován. [5][21]

Různé kationty, které se dostávají do pórové struktury společně se sírany, mohou způsobovat rozdílné průběhy koroze. Sírany mohou v přírodě tvořit sloučeniny s kationty sodíku (Na^+), draslíku (K^+), hořčíků (Mg^+) a mnoho dalších viz kapitola 2.4.1. Nejzávažnější degradaci způsobují sírany hořečnaté, kdy hořčík nahrazuje vápník v hydroxidu vápenatém a C-S-H. To vede k ještě větší a rychlejší expanzi a tím k větší degradaci [5][27].

2.4.3 Faktory ovlivňující průběh síranové koroze

Faktorů, které může ovlivnit degradaci betonu působením síranů je mnoho. Například vodní součinitel, mineralogie a složení cementu, přídatné hydratující látky atd. Velké shrnutí ovlivňujících faktorů je v článku [28], kde se vliv typu cementu, vodního součinitele a kameniva zkoumal rentgenovou mikro-tomografií a rentgenovou difrakcí.

Vodní součinitel

Vodním součinitelem je ovlivněna pórovitost výsledného betonu a tím i schopnost propouštět látky jeho strukturou. Při vyšším vodním součiniteli mohou sírany proniknout do betonu rychleji a hlouběji. Tím je proces degradace urychlen. To je jeden z důvodů, proč je maximální poměr mezi vodou a cementem omezen normami pro betony do agresivního prostředí. [1][5][28]

Článek [28] se vodním součinitelem v souvislosti se síranovou korozí zabýval. Vliv nižšího vodního součinitele na objemové změny betonu byl velmi podobný, jako vliv použití síranuvzdorného cementu. Na vzorcích s nižším vodním součinitelem bylo ale patrné větší poškození trhlinami. Méně vody v betonové směsi omezí velikost pórů v zatvrdlém betonu, které jsou pak menší. V menších pórech vytváří expanzní produkty síranové koroze mnohem větší napětí a tím se beton může rychleji poškodit. [28] Betonová směs se proto musí vždy pečlivě navrhnout pro dané prostředí.

Mineralogie cementu a složení betonu

Mechanismy degradace doprovází množství C3A a celkový obsah hlinitanů v použitém cementu. C3A přímo ovlivňuje objem monosulfátu (AFm) a hlinitanu vápenatého v hydratovaném cementu a tím podporuje vznik ettringitu [5][28]. Zároveň se v betonech nachází nehydratované fáze C3A, které se také do reakcí se sírany zapojí [21][28]. Ettringit se tvoří za pomoci síranů a oxidů hliníku. V normách [1] je proto obsah C3A pro síranuvzdorné cementy omezen.

Je třeba vzít v úvahu i účinek fáze C4AF. Předpokládá se, že za přispění železa v této fázi vznik ettringitu nedoprovázejí jinak typické objemové změny. [28]

Poměr mezi fázemi C3S/C2S také přispívá k odolnosti vůči síranům. Tímto poměrem je ovlivněna tvorba hydroxidu vápenatého (portlandit). Nižší poměr C3S/C2S snižuje obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v hydratovaném betonu. Hydroxid vápenatý reaguje s pronikajícími sírany za vzniku sádry a přispívá k tvorbě ettringitu. Omezením hydroxidu vápenatého v betonu je omezena i tvorba degradačních produktů. [25][28]

V článku [28] byl vliv složení cementu na průběh síranové koroze zkoumán u cementu typu I a typu V na jejich objemových změnách a změnách pevnosti. Cement typu I obsahoval více C3A a méně C4AF ve srovnání s cementem typu V (CEM I: C3A 9,9 %, C4AF 8,2 %; CEM V: C3A 3,3 %, C4AF 11,1 %). Vzorky vyrobené z cementu typu V odolaly síranové korozi lépe a předchozí tvrzení tak byly potvrzeny. Nutno podotknout, že cementy byly v článku označeny dle ASTM (American Society for Testing and Materials). Cement typu I je běžný portlandský cement bez omezení složení a cement typu V je síranuvzdorný cement, který má přesné limity obsahovaných složek. [29]

Studie [25] se zabývala odolností různých typů cementů proti síranové korozi. Autoři zkoumaly síranuvzdorný, běžný portlandský a směsný cement s různými podíly pucolánu a popílků. Směsné cementy s příměsemi vykazovaly vyšší odolnost proti kontinuálnímu ponoření do síranového roztoku. To bylo způsobeno vyšším poměrem C3S/C2S v síranuvzdorném cementu. V cyklech sušení – smáčení a ohřívání – chlazení ale odolal lépe síranům síranovzdorný cement s přesně daným složením. Běžný portlandský cement není pro použití v síranovém prostředí vůbec vhodný.

Pevnostní třída cementu hraje také velkou roli v průběhu síranové koroze betonu. V článku [18] bylo prokázáno, že betony s vyšším stupněm pevnosti mají hustší mikrostrukturu a tím i menší pórovitost. Tím se sníží počet pronikajících síranových iontů a omezí se degradační procesy. V betonech s nižším stupněm pevnosti je výrazně více umožněna krystalizace solí na povrchu betonu oproti kvalitnějším betonům. Důvodem je větší pórovitost, vliv kapilárních sil a zvyšování koncentrace roztoku v pórech.

Vliv přídavných hydratujících látek

Přidáním dodatečných hydratujících složek jako jsou křemičitý úlet, vysokopecní struska nebo popílek se betonu zlepšuje odolnost vůči působení síranů snížením jejich propustnosti. [5] Přidáním popílků nebo křemičitého úletu do betonové směsi se vypořádávají přebytečné ionty vápníku vzniklé během hydratace cementu (omezí se nadměrná produkce hydroxidu vápenatého). Při kontaktu betonu s roztokem síranů není možná tvorba sádky a degradace je tak velmi zpomalena. Přísady také vedou k hustší vnitřní struktuře, kde je zabráněno difuzi síranových iontů. Nahrazení cementu přísadami také vede k nižšímu množství C3A v betonu. [25][27][30]

Vliv nízkých teplot

Při nižších teplotách je mnohem pravděpodobnější vznik thaumasitu v betonu vystaveného působení síranů [14]75. Vedle nízkých teplot a síranů je k jeho tvorbě zapotřebí uhličitan (CO_3^{2-}). Dále se thaumasit tvoří dvěma možnými způsoby. Buď z ettringitu, nebo přímo z reakce C-S-H, síranu a uhličitanu. Degradace betonu za přítomnosti thaumasitu je nebezpečná, protože jeho tvorba probíhá i při použití cementů odolných proti síranům. Přidání vysokopecní strusky do betonové směsi zlepšuje jejich pozdější odolnost před vznikem thaumasitu. [5]

Vliv cyklů sušení a smáčení

Reálné konstrukce nemusí být vystaveny vodám obsahující sírany kontinuálně. Například v přímořských konstrukcích, kdy dochází k pravidelnému přílivu a odlivu vody s obsahem síranu dochází opakovaným cyklům namáčení a sušení. Pravidelným vysušováním konstrukce se v pórové struktuře zvyšuje koncentrace síranů akumulací a tím se urychluje degradace oproti konstrukcím, které jsou plně ponořeny. To je způsobeno

současnou fyzikální degradací betonu za přispění nadměrné tvorby krystalů v pórech a zvýšenému vznikajícímu napětí. [19][25][27][30]

Vliv koncentrace síranů v roztoku

Větší koncentrací roztoku se veškeré degradační procesy urychlují. Vlivem vyššího koncentračního gradientu probíhá snadněji difuze síranových iontů a tím se urychluje i proces degradace [18]. Ověřeno je to například v článcích [19][20], kde byly vzorky podrobovány různým koncentracím roztoku síranu sodného (0 %, 3 %, 5 % a 10 %) a čím vyšší koncentraci byly vzorky vystaveny, tím více se po 12 měsících snížila jejich pevnost v tlaku. V přirozeném prostředí není možné, aby na konstrukce působily takto vysoké koncentrace síranů (pokud roztok není koncentrován v pórové struktuře za účinku vypařování vody [19][27]), kde se koncentrace síranů pohybují v rozmezí 0,2 – 6 g/l [1][21]. Takto vysoké koncentrace jsou používány pouze pro urychlení degradace pro účely výzkumu.

Vliv zatížení

Vliv zatížení na průběh síranové koroze byl zkoumán ve studiích [27][30]. Ve studii [27] byla věnována pozornost únavovému zatížení. Bylo prokázáno, že únavové zatížení urychluje síranovou korozi vytvářením většího počtu trhlin. Tím je umožněn snazší transport síranových iontů do struktury betonu, což vede k závažnějšímu průběhu koroze.

Vliv krystalizace solí

Krystalizace solí v betonu je označována jako fyzikální degradace betonu. Krystaly solí tvořené v pórech betonu mohou výrazně narušit mikrostrukturu betonu a zhoršit tak jeho vlastnosti. Dochází k ní při velmi vysoké koncentraci síranů v roztoku a při opakovaném odpařování vody z betonu. Podobný efekt mají přivodit experimenty zkoumající vliv sušení a smáčení vzorků. Krystalizace solí na degradovaném betonovém vzorku je vidět na Obr. 3. [18][25]



Obr. 3: Krystalizace na povrchu betonových vzorků dle pevnostních tříd. Převzato z [18]

Vliv vysokých teplot

Dopad vysokých teplot na průběh síranové koroze betonu nebyl přímo zkoumán. Pozornost na zvýšené teploty byla kladena pouze při zkoumání účinku smáčení a sušení v síranovém roztoku. Během procesu sušení se vzorky dávaly do sušáren, ve kterých se udržovala zvýšená teplota, aby se proces urychlil. Různé experimenty používaly různé teploty. V článku [27] byly předchozí studie shrnuty a ukázalo se, že ettringit vznikající během síranové koroze se stává nestabilním a mechanismus degradace se mění, když teplota vzorku překročí 70 °C.

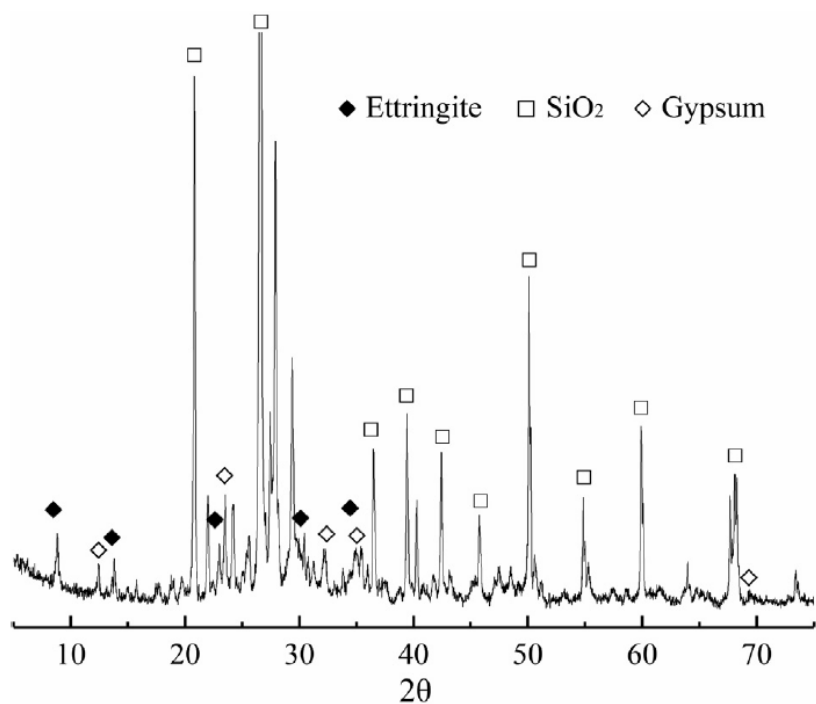
Pokud se ale zaměříme na samotné produkty síranové koroze – ettringit a sádro – dojdeme k zajímavým poznatkům. Oba minerály mají vynikající teplotní vlastnosti způsobené velkým obsahem chemicky vázané vody. Pro připomenutí složení sádry je $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a složení ettringitu $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. V sádře tak ke každému iontu síranu, který se do betonu dostal v průběhu síranové koroze a reagoval s kationtem vápníku, chemicky vážou dvě molekuly vody. U ettringitu je tento poměr ještě větší, na molekulu se 3 ionty síranů je chemicky navázáno 32 molekul vody. Během zahřívání vysokými teplotami je tato voda dehydratována. Tento proces spotřebuje veliké množství tepelné energie a okolní betonová struktura není vystavena tak velké teplotě. [31][32][33]

2.4.4 Experimenty se síranovou korozí betonu

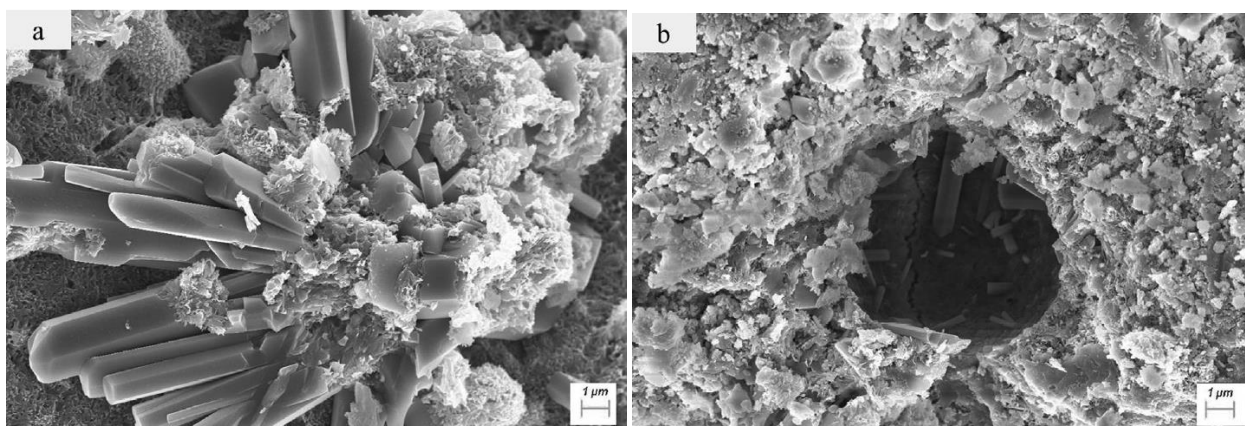
Pro zkoumání průběhu síranové koroze a odolnosti betonů proti ní byly použity různé experimentální přístupy. Pozornost byla věnována experimentálním procesům, kdy byla vždy snaha připodobnit podmínky v laboratoři podmínkám pro skutečné konstrukce. Vliv síranové koroze na betonové konstrukce je v praxi sice závažný, ale stále je to dlouhý proces. Byla proto navržena řada postupů, jak síranovou korozi v laboratoři urychlit.

Během experimentů s vnější síranovou korozí a jejím vlivu na beton [14][18][19][20][25] se vždy přistoupilo k máčení vzorků do roztoků. Pro roztoky, ve kterých budou vzorky vystavovány působení síranů jsou důležité kontrola a stálost pH, stálá koncentrace roztoku (úprava nebo výměna roztoku) a výběr použité soli (Na_2SO_4 , MgSO_4 ...) [5]

Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu vždy závisí na mineralogickém a mikrostrukturálním složení [14]. Mikrostrukturální změny, které se v betonu vyskytují vlivem síranové koroze, lze v laboratorních podmínkách zkoumat pomocí mikroskopické analýzy (např. skenovací elektronová mikroskopie (SEM)) anebo rentgenovou difrakční analýzou (XRD), pomocí které lze přesně identifikovat krystalizované fáze v betonu [5][14]. Pomocí XRD analýzy lze pozorovat produkty síranové koroze (sádro a ettringit), jak je vidět na obrázku Obr. 4. Na obrázku Obr. 5 je vidět výstup ze SEM analýzy, kde jsou vidět krystaly ettringitu.



Obr. 4: Výstup z XRD analýzy s vyznačenými fázemi ettringitu a sádro. Převzato z [19]

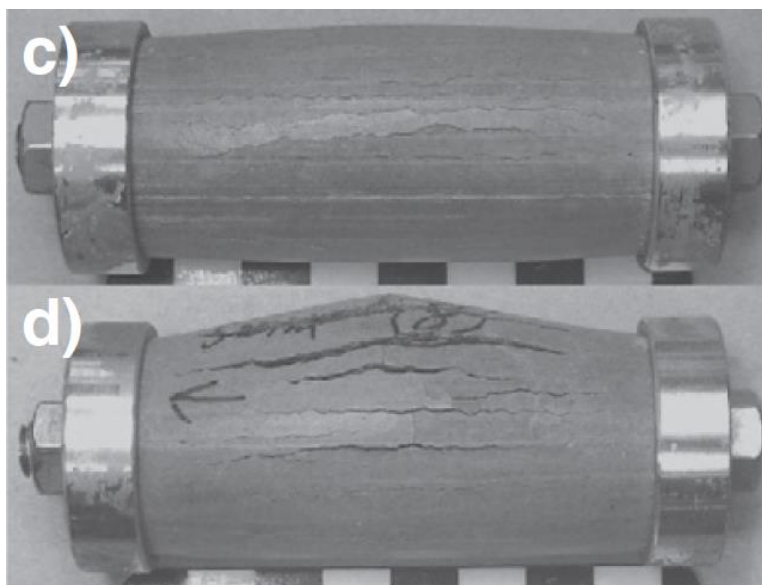


Obr. 5: SEM snímky betonu vystaveného síranové korozi po 12 měsících. Převzato z [19]

Další možností, jak stanovit míru degradace vyvolanou síranu je měření objemových změn, měření tlakové pevnosti a měření modulu pružnosti [5][14][24][30].

Samotná síranová koroze betonu je velmi obsáhle prozkoumaný degradační jev. A přesto vzhledem ke složitosti procesu je řada problémů, které ještě nemají vysvětlení, nebo jsou na ně různé názory. Minulý výzkum se zaměřoval na vliv koncentrace síranových roztoků na mechanismus koroze [18], nebo vliv mineralogického složení na odolnost proti působení síranů [24][28]. Dále byl zkoumán vliv opakovaného sušení a smáčení nebo ohřevu a chlazení [19][25][27], vliv ohybového zatížení [30] nebo únavového zatížení [27], vliv spolupůsobení síranů a chloridů [20], vliv kombinované vnitřní a vnější síranové koroze [14] a mnoho dalšího.

V článku [24] byly zkoumány napětí v tenkostěnných cementových válcích způsobených síranovou korozí. Dále byl zkoumán vliv obsahu C3A v cementu. C3A a hliník v něm obsažený má významný vliv na tvorbu síranových expanzních produktů. Menší obsah C3A vede k pomalejší degradaci. Vzniklý ettringit v pórech o velikosti 10-50 nm vytvořil napětí až 8MPa. To vedlo k porušení vzorků, jak je vidět na Obr. 6.



Obr. 6: Tenkostěnné cementové válce po c) 105 dnech a po d) 112 dnech síranové koroze. Převzato z [24]

Většina studií se zaměřuje při svém výzkumu na prefabrikovaný beton [18][24][30] – vzorky pro experimenty jsou řádně vytvrzeny v laboratorním prostředí bez degradačních vlivů. Ovšem velká část konstrukcí, které jsou vystaveny agresivnímu prostředí obsahující sírany, jsou konstrukce monolitické, lité na stavbě přímo v kontaktu se zemínou. Sírany se tak dostávají do kontaktu s betonem před dokončením hydratace a vytvrzením betonu [14]. Ve studiích, které se zabývaly vlivem síranové koroze na monolitický beton, se vzorky po vyjmutí z forem, kde proběhl proces tuhnutí (maximálně 24 hodin), ihned umísťovaly do roztoků se sírany. [14][19][20]

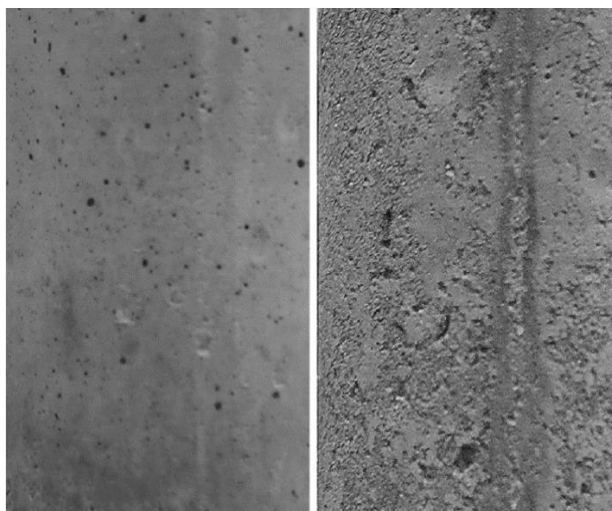
V článku [19] byl zkoumán i vliv různých koncentrací roztoku. Vzorky byly rozděleny do 4 skupin a následně byly vystaveny 0 %, 3 %, 5 % a 10 % roztoku síranu sodného po dobu 12 měsíců. Proces sušení proběhl vždy na konci měsíce během 4 dnů při teplotě 40 °C. Degradace prvku 12 měsíců vystaveného 10 % roztoku je vidět na Obr. 7.



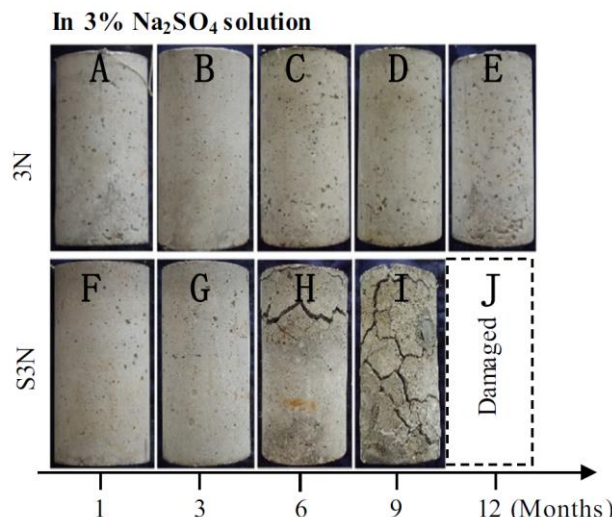
Obr. 7: Betonový vzorek vystavený 10 % roztoku Na_2SO_4 po dobu 1 a 12 měsíců. Převzato z [19]

Monolitický beton byl zkoumán i v článku [20]. Pozornost monolitickému betonu je věnována i z důvodu nižších počátečních pevností a snadnějšímu přístupu iontů do betonové směsi během procesu tuhnutí a tvrdnutí v agresivním prostředí. Proti tomu u prefabrikovaného betonu proběhne vytvrzování ve vhodnějším prostředí a jeho odolnost je tak vyšší. V článku [20] byl zkoumán vliv spolupůsobení síranů a chloridů na beton ve srovnání s vlivem samotných síranů. Během 12 měsíců byly zkoumány rozměry, hmotnosti, tlakové pevnosti, koncentrace síranů a minerální složení u všech vzorků. Výsledkem byla rychlejší degradace vzorků vystavených kombinovanému působení síranů a chloridů. Chloridy urychlovaly difuzi a akumulaci síranových iontů zejména v ranných fázích betonu. V článku je také zdůrazněno, že působení degradačních látek ve fázi tuhnutí a tvrdnutí vyvolává vznik trhlin, kterými je později usnadněna difuze iontů hlouběji do vzorků. Srovnání povrchů nepoškozeného a poškozeného betonu lze vidět na Obr. 8.

V článku [14] je zkoumán vliv kombinovaného účinku vnitřní a vnější síranové koroze na monolitický beton. Vnitřní síranová koroze byla provedena přidáním síranu sodného do betonové směsi ve formě 3 % roztoku. Vnější síranová koroze poté probíhala v 3 %, 5 % a 10 % roztoku. Vnitřní koroze během experimentu výrazně zpomalovala vývoj pevnosti betonu v rané fázi. Kombinovaná koroze vedla k rychlému vývoji trhlin, snadnějšímu pronikání síranů do vnitřní struktury a celkové závažnější degradaci. Je proto nutná kontrola materiálů používaných pro výrobu betonu kvůli obsahu síranů. Porovnání degradovaných vzorků je na Obr. 9.



Obr. 8: Porovnání povrchu vzorků vystavené destilované vodě a 10 % roztoku síranů a 3 % roztoku chloridů. Převzato z [20]



Obr. 9: Rozdíl vlivu pouze vnější (3N) a kombinované (S3N) síranové koroze. Převzato z [14]

2.4.5 Počítačové modelování síranové koroze betonu

Počítačová simulace síranové koroze betonu je velmi komplikovaná. Do modelů je potřeba zahrnout časově proměnlivou pórovou strukturu a tím i transport iontů v cementové struktuře. Dále je nutné modelovat chemické, mineralogické, mechanické a objemové změny a mnoho dalších jevů doprovázejících síranovou korozi (například vyluhování vápníku a změnu pH). [5]

Modely poté musí zahrnout i různorodé použití betonu. Autoři v článku [26] se zabývali numerickým transportním modelem spojeným s cykly smáčení a sušení, kde byl do modelu přidán i vliv ohybového zatížení.

Modelování síranové koroze na základě transportních mechanismů bylo dále rozšířeno. V [34] byl vyvinut model, ve kterém je proměnná difuze iontů v závislosti na míře poškození betonu. Degradaci betonu tak lze charakterizovat jako funkci poškození v závislosti na době ponoření a koncentraci síranů ve vzorku.

V pokročilejších modelech je beton považován za porézní systém, vyplněný částečně kapalnou vodou a částečně plynou fází. V [35] je uveden model popisující mechanické poškození vyvolané síranovou korozi v různě nasyceném betonu. V článku [19] byl navržen numerický transportní model simulující difuzi síranu a degradaci pevnosti monolitického betonu, který byl vystavován opakované síranové korozi za cyklů smáčení a sušení. V modelu byly zahrnuty transport vlhkosti pomocí difuze a pórovitosti, chemické reakce a mechanické poškození.

3 Praktická část

V předešlé části se kladl důraz především na shrnutí a průřez teoretických znalostí týkající se síranové koroze betonu, čím je způsobena a co jí ovlivňuje. V této části je pozornost věnována přípravě a průběhu experimentu, který má za úkol zjistit změnu mechanických vlastností při působení síranové koroze na beton a její vliv na odolnost betonu proti vysokým teplotám. Vliv síranů a vysokých teplot je poté zkoušen a vyhodnocen pomocí měření dynamického modulu pružnosti, tlakové pevnosti a změn objemové hmotnosti. Popsány zde jsou složení betonové směsi, výroba zkušebních vzorků, postup vystavování degradačním vlivům a metody zkoušení mechanických vlastností. Zároveň je v této části popsán postup veškerých provedených experimentů.

Výroba vzorků, vystavování vzorků degradačním vlivům a jejich zkoušení byly provedeny v akreditovaných zkušebních laboratořích katedry betonových a zděných konstrukcí na FSv ČVUT. Vyhodnocení získaných dat z jednotlivých experimentů je poté v následující části této práce.

3.1 Výroba vzorků

V první řadě bylo nutné určit jaké rozměry a tvar budou zkušební vzorky mít. Po konzultaci s vedoucími této práce bylo určeno, že zkušební vzorky budou krychlové o rozměrech 50x50x50 mm, a to hned z několika důvodů.

Za prvé to byly materiálové důvody. Pro provedení experimentu byla potřeba zhotovit větší počet zkušebních vzorků. Pokud by se přistoupilo ke vzorku tvaru krychle s rozměrem hrany 150 mm, bylo by nutné vyrobit mnohem více betonové směsi. Vzhledem k lehce proměnlivé vlhkosti kameniva v laboratoři by betonová směs musela být vyrobena najednou, nebo by se vlastnosti betonové směsi musely ověřovat zkouškami, které by zaručily její stálost. Různá betonová směs ve vzorcích by mohla ovlivnit výsledky a experiment tak znehodnotit.

Dalším důvodem byl samotný průběh síranové koroze. Aby se sírany v dostatečné koncentraci dostaly přes celý průřez většího vzorku, a mohly tak nastat degradační procesy, bylo by zapotřebí mnohem delší doby působení síranů na beton. V případě menších vzorků měly možnost sírany pomocí transportních procesů proniknout skrz celou pórovou strukturu betonu rovnoměrně a vliv síranové koroze tak mohl být více patrný.

Výroba betonové směsi a její ukládání do forem proběhli v laboratoři fakulty stavební ČVUT dne 12.5.2021.

3.1.1 Betonová směs

Pro tento experiment byla zvolena již navržená betonová směs pracovníky katedry betonových a zděných konstrukcí. Díky tomu má tato betonová směs již prověřené vlastnosti. Pro výrobu vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5. Bylo použito přírodní čedičové drobné kamenivo s frakcí 0–4 mm a přírodní čedičové hrubé kamenivo s frakcí 4–8 mm. Vodní součinitel byl zvolen 0,33. Přesné složení betonu pro výrobu vzorků je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2: Poměr složek ve směsi betonu

| Složka | Označení | Hmotnostní podíl |
|-----------------|------------|-------------------|
| | | kg/m ³ |
| Cement | CEM I 42,5 | 550 |
| Voda | | 183,33 |
| $w = v/c$ | | 0,33 |
| Hrubé kamenivo | 4-8 | 1050 |
| Drobné kamenivo | 0-4 | 600 |
| Plastifikátor | 787 | 8 |
| Celkem | | 2391,7 |

Veškeré složky se při přípravě betonové směsi pečlivě zváží na digitální váze a poté se postupně přidávaly do míchačky (Obr. 10). Nejprve proběhlo zhomogenizování suchých složek. Následně se přidala voda a plastifikátor.



Obr. 10: Vážení složek betonové směsi a proces míchání směsi

3.1.2 Ukládání do forem a proces tuhnutí a tvrdnutí

Po důkladném smíchání se mohla betonová směs ukládat do forem. Pro ukládání betonové směsi se použily rozebíratelné ocelové formy, které umožňovaly vyrobit vzorky o požadovaných rozměrech. Formy se připravily na vibrační stůl a ošetřily odbedňovacím přípravkem (Obr. 11). Vibrační stůl posloužil pro zhutnění betonové směsi do forem, pro omezení pórů ve směsi tak, aby všechny vzorky dosáhly co nejpodobnějších vlastností.



Obr. 11: Ocelové formy připravené na vibračním stole

Betonová směs se do vymazaných forem ukládala po vrstvách a každá z vrstev se důkladně zhutnila, jak je vidět na Obr. 12. Po naplnění forem se horní povrch vzorků zarovnal hladítkem. Ukázka naplněné formy je na Obr. 13.



Obr. 12: Vibrování betonové směsi do forem

Tímto způsobem se naplnilo sedm forem. Vzniklo tak 21 zkušebních vzorků, které se nechaly v prostředí laboratoře projít procesem tuhnutí a tvrdnutí. Ve formách byly umístěny 24 hodin, poté proběhlo odbednění a následně se vzorky přesunuly do vody, kde proběhlo důkladné vytvrdnutí.



Obr. 13: Zhutněná betonová směs ve formě

3.2 Vystavení vzorků degradačním vlivům

Po důkladném vytvrzení byly vzorky rozděleny do experimentálních skupin, které se vystavily různým degradačním vlivům a jejich kombinacím. Zatěžovací procesy se musely řádně naplánovat. V následujících kapitolách je popsán průběh samostatných degradačních procesů – vystavení vzorků vysokým teplotám a síranové korozi.

3.2.1 Vystavení vysokým teplotám

Zatížení vysokými teplotami proběhlo pomocí keramických deček, které jsou vidět na Obr. 14. Ty byly zapojeny pomocí kabelů do zdroje s řídicí jednotkou, viz. Obr. 15. Zdroj do keramických deček přiváděl elektrický proud, kde za principu odporu vznikalo požadované teplo. Vodivé dráty v dečkách předávaly teplo do keramických článků, které poté sloužily k sálání vyprodukovaného tepla do okolí. Byl tak zajištěn rovnoměrný ohřev a díky zkušenostem pracovníků z katedry betonových a zděných konstrukcí bylo pomocí řídicí jednotky možno teplotu i regulovat.



Obr. 14: Keramické dečky pro ohřev vzorků



Obr. 15: Zdroj a řídicí jednotka pro ohřev keramických deček

Teplota se po celou dobu zahřívání vzorků měřila termočlánky (Obr. 16). Jeden bylo nutné zapojit do zdroje s řídicí jednotkou, s jehož pomocí se teplota v dečkách regulovala. Druhý termočlánek byl zapojen do dataloggeru (Obr. 17). Ten teplotu z termočláneku zpracovával na data, která v reálném čase promítal počítač. Tímto způsobem se data také uložila a bylo z nich možné získat průběh teploty v čase. Jeden termočlánek pro záznam teploty plně postačil, vzhledem k malému rozměru zkušebních těles – ty se díky svým rozměrům prohřály rovnoměrně a všechny stejně.

Vzorky byly pro vystavení vysokým teplotám uloženy do ukládacích beden a zahřívány pomocí deček ze čtyř stran.



Obr. 16: Termočlánek pro měření teploty vzorků



Obr. 17: Datalogger pro příjem a zpracování dat z termočláneků

Zdroj s řídicí jednotkou byl ovládán manuálně, aby se vzorky ohřály na požadovanou teplotu. Poté se teplota stabilizovala. Po uplynutí určité doby se keramické dečky odpojily a zahřívání těles se ukončilo.

3.2.2 Vystavení síranové korozi

Proces vystavování betonových vzorků síranové korozi vycházel z již provedených experimentů popsanych v teoretické části.

Nejdříve bylo nutné zvolit použitou látku obsahující sírany. Zvolená látka má na průběh celkového degradačního procesu významný vliv. V již zmíněných experimentech se síranovou korozi se nejčastěji používal síran sodný (Na_2SO_4). I pro tento experiment bylo rozhodnuto o použití síranu sodného. Hlavními důvody tohoto výběru byly, že tato látka není toxická a díky jejímu velkému rozšíření je i snadno dostupná.

I když tato látka není pro člověka toxická, je potřeba s ní zacházet opatrně. Je nutné se vyvarovat zbytečnému kontaktu s kůží a oděvy. Dále může způsobit podráždění očí při jejich zasažení, podráždění dýchacích cest při vdechnutí a žaludeční nevolnosti při požití této látky. Je proto doporučeno používat při manipulaci ochranné pomůcky jako ochranné brýle a respirátor. První pomoc se liší od způsobu zasažení:

- 1) Při nadýchání – přesun na čerstvý vzduch
- 2) Styk s kůží – opláchnutí vodou
- 3) Zasažení očí – vypláchnutí očí proudem vody několik minut
- 4) Požití – vypláchnout ústa, dostatečný přísun pitné vody

Při pochybnostech nebo přetrvávajícím podráždění je nutné vyhledat lékařskou pomoc.

Pro ochranu životního prostředí je nutné zabránit průniku této látky do kanalizace, povrchových a podzemních vod. Síran sodný se musí skladovat na suchém místě v uzavřeném obalu při teplotě od 15 do 25 °C. Po ukončení experimentu se roztok síranu sodného nesmí vylévat do kanalizace a je potřeba ho likvidovat jako nebezpečný odpad. Obaly se musí odevzdávat na sběrná místa a zbylý materiál likvidovat prostřednictvím specializovaných firem. [36]

Po obeznámení s bezpečnostními pokyny se mohlo přistoupit k vytvoření roztoku. Koncentrace síranu sodného byla zvolena dle [14][19][20] 10 % hmotnostních. Výpočet potřebných látek se poté provedl přes hmotnostní zlomek:

$$w = \frac{m_{(s)}}{m} \quad (2)$$

kde: w je koncentrace [-]

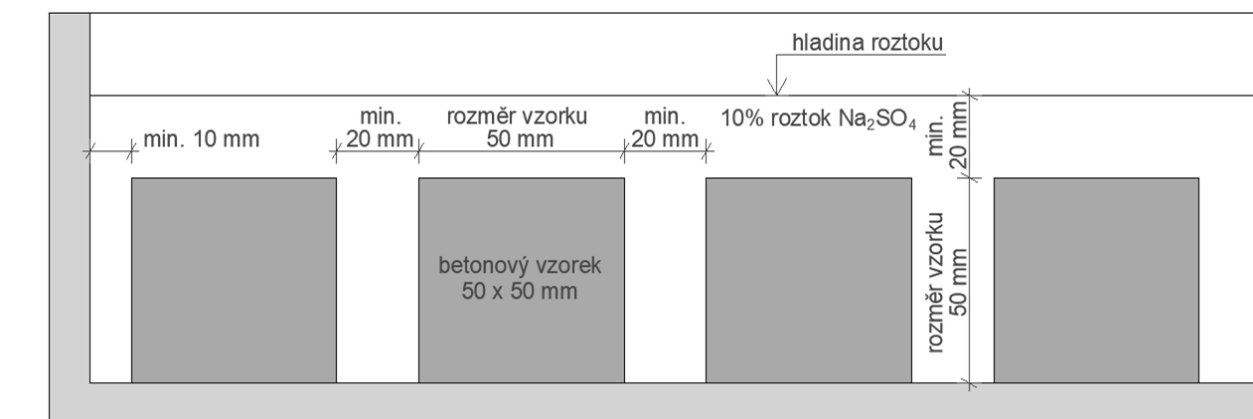
$m_{(s)}$ je hmotnost rozpuštěné látky [g]

m je hmotnost celého roztoku [g]

Pro 10 % roztok je $w = 0,1$. Pomocí tohoto vzorce je potom možné vyrobit jakékoliv potřebné množství roztoku.

Pro výrobu roztoku bylo nutné dodržet určitá pravidla dle [37]. Bylo možné využít pouze přečištěné demineralizované vody – destilované vody. Příprava roztoku probíhala nejdříve rozpuštěním Na_2SO_4 v 80 % finálního objemu a po rozpuštění se voda doplnila do požadovaného objemu.

Pro umístění vzorků do roztoku bylo nutné dodržovat také určitá pravidla [18]. Bylo nutné, aby vzdálenost vzorků mezi sebou a od hladiny byla minimálně 20 mm dle Obr. 18.



Obr. 18: Schéma rozmístění vzorků do nádoby s roztokem

Vzorky byly v roztoku umístěny přesně 11 týdnů. Během této doby bylo nutné alespoň jednou měsíčně kontrolovat stav hladiny a měřit úroveň pH. Nádoba se vzorky byla zakrytá, kvůli zabránění odpařování roztoku. Mohlo tak dojít k poklesu hladiny pod minimální úroveň a nechtěnému zvýšení koncentrace roztoku v důsledku odpaření vody. [14][18] Vzorek po vystavení roztoku síranu sodného je vidět na Obr. 19.



Obr. 19: Povrch vzorku po vystavení roztoku síranu sodného

3.3 Zkoušky ověřující vlastnosti vzorků

Pro vyhodnocení experimentu se využily nedestruktivní i destruktivní metody zkoušení. Jako nedestruktivní zkouška byla zvolena zkouška dynamického modulu pružnosti impulzní metodou pomocí ultrazvukového zařízení. Materiál se touto zkouškou nijak nepoškodil, a tak bylo možné provádět jí opakovaně. Destruktivní metodou zkoušení byla zkouška pevnosti betonu v tlaku. Tato zkouška byla prováděna na tělesech až jako poslední.

3.3.1 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku probíhala dle ČSN 12390-3 [38]. Během této zkoušky byla betonová tělesa zatěžována až do porušení. Zkoušení probíhalo na hydraulickém lisu (viz. Obr. 21) v laboratoři FSv ČVUT, který vyhovuje požadavkům ČSN EN 12390-4 [39]. Pomocí tohoto lisu a řídicího zařízení se u každé zkoušky zaznamenával průběh zatížení a posun zatěžovací plochy. Největší zaznamenané zatížení při rozdrčení tělesa bylo použito k výpočtu pevnosti betonu v tlaku.

Vzhledem k tomu, že tělesa měla tvar krychle o délce hrany 50 mm, byla zkouška prováděna dle postupu popsaného v příloze B ČSN 12390-3 [38]. Zkušební tělesa se před tlakovou zkouškou očistila a zbavila uvolněného materiálu stejně jako dotykové plochy tlačných desek lisu. Do lisu, jak je vidět na Obr. 21, se při zkoušce vždy umístily přídatné desky. Betonové vzorky se poté musely přesně zcentrovat na střed spodní tlačné desky.

Po takovéto přípravě se mohlo přejít k zatěžování tělesa. Na řídicím přístroji se nastavila stálá rychlost zatěžování $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Zatěžování proběhlo plynule a bez nárazu až do porušení těles. Porušení zkušebních vzorků muselo odpovídat vhodnému způsobu porušení, který je znázorněn na Obr. 20. Pokud by se těleso porušilo jiným způsobem, bylo by nutné tento vzorek z měření vyloučit.

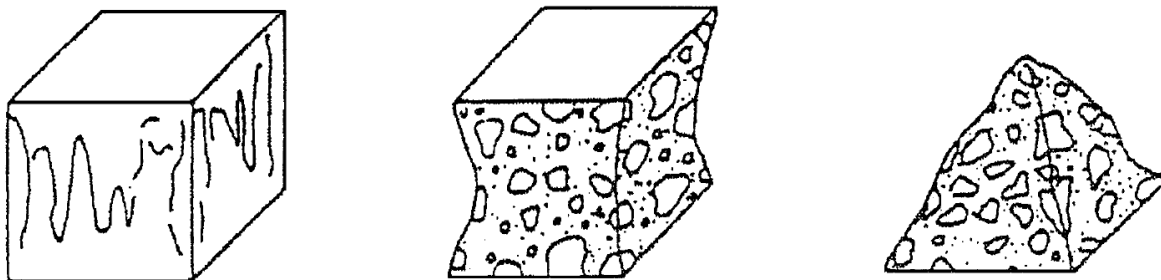
Výsledná pevnost se poté vypočetla z největšího zaznamenaného zatížení dle rovnice 2.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

kde: f_c je pevnost v tlaku [MPa]

F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení [mm²]



Obr. 20: Vhodné způsoby porušení zkušebních krychlí. Převzato z [38]



Obr. 21: Zkušební lis v laboratoři FSv ČVUT

3.3.2 Zkouška dynamického modulu pružnosti

Pro zjištění dynamického modulu pružnosti byla zvolena ultrazvuková (UZ) impulzní metoda dle ČSN 73 1371 [40]. Výhodou je, že je tato metoda nedestruktivní a je tedy možnost opakovaného měření bez poškození vzorků. Touto metodou se měří rychlost prostupu UZ impulzu, který je vysílán skrz zkoušený materiál. Mohou se tak zjistit vlastnosti materiálu (např. degradace, pevnost a dynamický modul pružnosti).

Pro tuto zkoušku byl použit přístroj z laboratoře FSv ČVUT Ultrasonic Pulse Velocity – Pundit Lab který je možné vidět na Obr. 22. Ten se skládá z řídicího přístroje s obrazovkou,

se kterým jsou propojeny sondy (budič a snímač). Ty mají za úkol vysílat a přijímat impulzy procházející materiálem. Za předpokladu známé vzdálenosti mezi sondami, dokáže přístroj vypočítat rychlost šíření UZ vln.

Měření UZ impulzů může být ovlivněno mnoha faktory. Tyto faktory popisuje ČSN EN 12504-4 [41]:

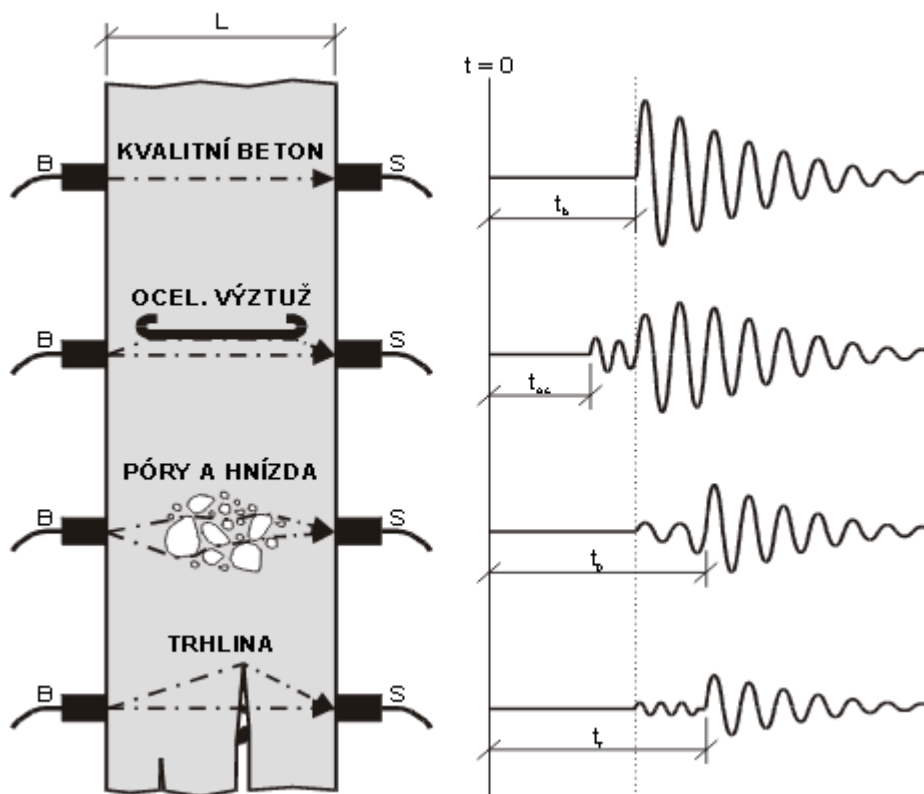
- 1) Vlhkost betonu
- 2) Teplota betonu
- 3) Měřící základna = vzdálenost a materiál mezi sondami.
- 4) Tvar a velikost těles
- 5) Vliv vyztužení
- 6) Trhliny a dutiny

Ukázka typů ovlivnění měření rychlosti prostupu UZ impulzu je na Obr. 23. Během měření bylo potřeba na tyto ovlivňující faktory brát zřetel.

Před samotným měřením byl přístroj nejdříve zkalibrován se zkušebním válcem. Poté se přešlo k měření na betonových vzorcích. Plochy pro měření se očistily a na povrch sondy se natřel vrstvou vodivého gelu pro zlepšení kontaktu sond a plochy materiálu. Sondy byly poté přitlačeny na vzorek. Řídící přístroj změřil rychlost impulzu, která byla zaznamenána. Postup je vidět na Obr. 22.



Obr. 22: Měření rychlosti prostupu ultrazvukových vln



Obr. 23: Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar ultrazvukového vlnění. Převzato z [42]

Dynamický modul pružnosti E_{cu} se poté vypočítal dle normy [40] podle rovnice 3:

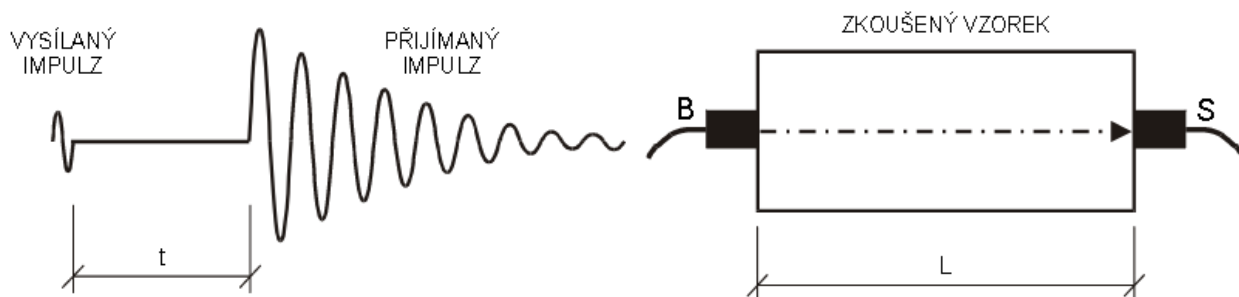
$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

- kde: ρ je objemová hmotnost betonu v kg/m^3
 v_L je impulzová rychlost podélného ultrazvukového vlnění v m/s
 k je součinitel rozměrnosti prostředí

Rychlost měřeného ultrazvukového impulsu se určí za předpokladu známé tloušťky materiálu L , jak je znázorněno na Obr. 24. Přístroj poté změří dobu trvání t mezi vysílaným impulzem a přijímaným impulzem. Rychlost UV impulsu v_L poté přístroj vypočítá podle rovnice 5:

$$v_L = \frac{L}{t} \quad (5)$$

- kde: L je délka mezi sondami v mm
 t je čas průchodu ultrazvukového impulsu v s



Obr. 24: Měření doby průchodu UZ impulzu materiálem. Převzato z [42]

Hodnoty součinitele k_3 lze vypočítat různými způsoby dle rozměrnosti prostředí, ve kterém se stanovují rychlosti impulzu. V našem případě je zvolen součinitel k_3 pro trojrozměrné prostředí. Součinitel je odvislý od dynamického Poissonova koeficientu. Ten je různý pro jednotlivé materiály. Pro beton je stanoven Poissonův koeficient na 0,2 [43]. Součinitel k_3 se poté vypočítá dle normy [40] pomocí rovnice 5:

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) \cdot (1 - 2\nu_{cu})}} \quad (6)$$

kde: k_3 je koeficient pro trojrozměrné prostředí

ν_{cu} je Poissonův součinitel

Po dosazení vyjde součinitel $k_3 = 1,0541$.

3.4 Rozdělení vzorků do experimentálních skupin

Pro ověření materiálových vlastností betonu po zatížení jednotlivými degradačními vlivy byly vyrobené vzorky rozděleny do sedmi skupin (Tab. 3). Tyto skupiny vzorků byly podrobeny různým degradačním vlivům a jejich kombinacím. Vzorky byly důkladně vytvrzené (20 týdnů), aby jejich materiálové vlastnosti byly co nejpodobnější. Avšak i přes to byly použity dvě referenční skupiny, z důvodu velkého časového rozestupu mezi zkouškami jednotlivých skupin. Zabrání se tak zkreslení výsledků případným dodatečným vytvrzením vzorků, které se budou zkoušet později.

Tab. 3: Přehled zařazení vzorků do zkušebních skupin

| Číslo skupiny | Čísla vzorků | Název skupiny | Datum zkoušení |
|---------------|--------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 | 1, 2, 3 | Referenční vzorky -1 | 6.10.2021 |
| 2 | 4, 5, 6 | Vzorky vystavené 400 °C | 3. a 5.11.2021 |
| 3 | 7, 8, 9 | Vzorky vystavené 800 °C | 3. a 5.11.2021 |
| 4 | 10, 11, 12 | Vzorky vystavené síranům | 16.12.2021 |
| 5 | 13, 14, 15 | Vzorky vystavené síranům + 400 °C | 16.12.2021 |
| 6 | 16, 17, 18 | Vzorky vystavené síranům + 800 °C | 16.12.2021 |
| 7 | 19, 20, 21 | Referenční vzorky - 2 | 16.12.2021 |

3.4.1 Skupina 1 – referenční vzorky

Jako referenční vzorky byly určeny vzorky s číselným označením 1, 2 a 3. Ty budou sloužit pro zjištění materiálových vlastností nijak degradovaného betonu a zároveň se s těmito vzorky budou porovnávat vzorky z ostatních skupin. Výroba vzorků – tedy výroba betonové směsi, ukládání do forem a proces tuhnutí a tvrdnutí – byla provedena dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 1 byly provedeny dne 6.10.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

Po důkladném vytvrzení vzorků byly zjištěny jejich základní rozměry. Hodnoty jsou vypsány v Tab. 4.

Nejdříve proběhla zkouška dynamického modulu pružnosti dle kapitoly 3.3.2. Pomocí laboratorního ultrazvukového přístroje byla naměřena rychlost prostupu UZ vlnění. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 5, kde je zároveň doložen dynamický modul pružnosti.

Nakonec byla na betonových vzorcích provedena tlaková zkouška dle kapitoly 3.3.1. Zkouška byla provedena na hydraulickém lisu, ze kterého byly získány působící síly na vzorky. Z těchto dat byla poté určena největší zatěžovací síla, která na vzorek působila a z ní vypočtena pevnost vzorku. Pevnosti vzorků jsou v

Tab. 6. Zde je vidět nečekaná odchylka u referenčního vzorku č. 1. Fotografie porušení je na Obr. 25. Tento vzorek odolal menšímu zatížení než zbývající dva. Beton není homogenní

materiál, a proto tato odchylka mohla být způsobena vadou v betonu. Stejně tak mohl být důvod v nesprávné centraci vzorku na hydraulickém lisu, kdy při zatěžování došlo k usmýknutí a rychlejší ztrátě pevnosti. Tento vzorek byl i přes nižší pevnost do měření započítán. Odchylka nebyla značná a podobné rozdíly byly zjištěny i u dalších skupin.



Obr. 25: Porušení vzorku č. 1

Tab. 4: Skupina 1 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | | |
| | | mm | mm | mm | g | kg/m ³ |
| 1 | referenční 1 | 50,0 | 48,5 | 50,0 | 278,4 | 2301 |
| 2 | referenční 2 | 50,0 | 49,8 | 50,3 | 285,9 | 2284 |
| 3 | referenční 3 | 50,0 | 51,6 | 50,1 | 294,9 | 2281 |

Tab. 5: Skupina 1 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | Dynamický modul pružnosti |
|--------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
| | | m/s | GPa |
| 1 | referenční 1 | 5051 | 52,8 |
| 2 | referenční 2 | 4854 | 48,4 |
| 3 | referenční 3 | 4902 | 49,3 |

Tab. 6: Skupina 1 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | Síla kN | Pevnost MPa |
| 1 | referenční 1 | 150,14 | 62,0 |
| 2 | referenční 2 | 184,75 | 74,2 |
| 3 | referenční 3 | 192,02 | 74,5 |

3.4.2 Skupina 2 – vzorky vystavené 400 °C

Do skupiny 2 byly zařazeny vzorky číslo 4, 5 a 6. Ty byly určeny k zjištění materiálových vlastností betonu, který byl vystaven teplotám 400 °C. Zároveň budou tyto vzorky sloužit k porovnání vlastností se skupinami, na které působily současně vysoké teploty a síranová koroze. Teplota 400 °C a průběh zahřívání mají simulovat teploty, které na betonové konstrukce během požáru běžně působí. Výroba těchto vzorků proběhla dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 2 byly provedeny ve dnech 3. a 5.11.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

Nejdříve byly změřeny základní rozměry a dynamický modul pružnosti ještě před vystavením vysokým teplotám. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 7 a Tab. 8

Následně se mohly vzorky zahřát na požadovanou teplotu. Zatěžování vysokými teplotami proběhlo pomocí keramických deček dle kapitoly 3.2.1. Nejdříve se připravila ochranná nehořlavá ukládací bedna, díky které by v případě potřeby bylo možné během experimentu bednu i se vzorky přenést do venkovního nebo bezpečnějšího prostředí. Bedna se následně vyložila žáruvzdornou tepelnou izolací, která zabraňovala nežádoucím tepelným ztrátám, jak je vidět na Obr. 26.



Obr. 26: Nehořlavé ukládací bedny s žáruvzdornou tepelnou izolací

Dalším krokem bylo ověření funkčnosti keramických deček. Ty se napojily na řídicí přístroj a po jeho nastavení ihned začaly produkovat teplo. Fungující dečky se vložily do ukládací bedny a experimentální vzorky se do nich poté obalily. To je vidět na Obr. 27. Následovala instalace plášt'ových termočlánků. Z důvodu malého rozměru vzorků a jejich důkladnému rovnoměrnému prohřátí postačil pro účely experimentu jeden termočlánek měřící teplotu na povrchu prostředního vzorku. Termočlánek se zapojil do dataloggeru, který poté zaznamenával naměřené teploty. Vzorky a keramické dečky se v závěru přípravy na zatěžování vysokými teplotami zakryly žáruvzdornou tepelnou izolací (Obr. 28)

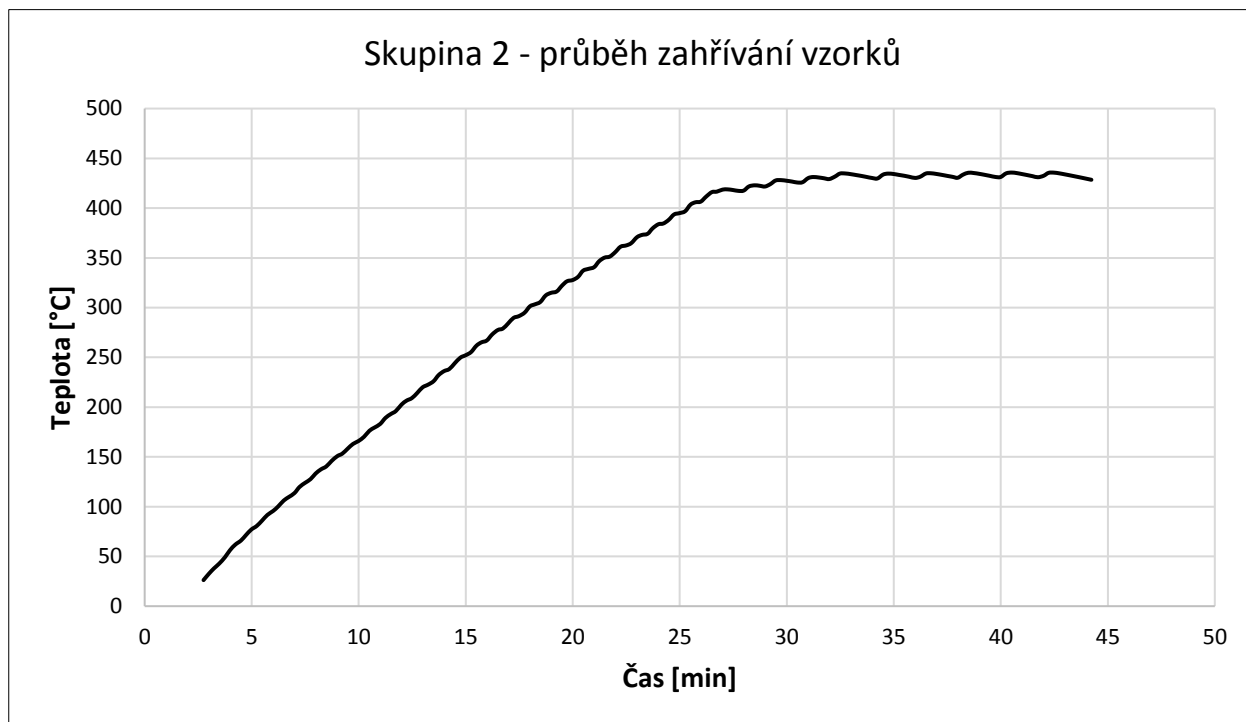


Obr. 27: Vzorky obalené v keramických dečkách



Obr. 28: Vzorky připravené na vystavení vysokým teplotám

Po pečlivé přípravě se mohlo přejít k samotné zatěžovací zkoušce a vystavení vzorků vysokým teplotám. Zahřívání nedoprovázely žádné neočekávané události a probíhalo až do dosažení požadované teploty cca. 420 °C, kdy se přenastavil řídicí přístroj a teplota se udržovala přibližně dvacet minut. Přesný průběh teploty je možný pozorovat na Obr. 29. Po uplynulé době dvaceti minut se vzorky z ukládací bedny vyjmuly a nechaly samovolně vychladnout pro snazší manipulaci.



Obr. 29: Skupina 2 – Průběh zahřívání vzorků

Ihned po odkrytí vzorků zpod keramických deček bylo patrné mírné poškození povrchu betonu. To je vidět na Obr. 30.



Obr. 30: Vzorek ze skupiny 2 ihned po vystavení vysokými teplotami

Po vychladnutí vzorků proběhla znovu zkouška dynamického modulu pružnosti dle kapitoly 3.3.2. Naměřené hodnoty rychlosti prostupu ultrazvukového vlnění po vystavení vysokým teplotám jsou zaznamenány v Tab. 8, kde je zároveň dopočítán i dynamický modul pružnosti. Zároveň se znovu po vystavení vysokým teplotám změřily i rozměrové vlastnosti, které jsou zapsány v Tab. 7.

Tab. 7: Skupina 2 – základní rozměrové hodnoty vzorků před a po vystavení vysokým teplotám

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | | Objemová hmotnost | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | Před 400 °C | Po 400 °C | Před 400 °C | Po 400 °C |
| | | mm | mm | mm | g | g | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 4 | 4-400 °C | 50,1 | 49,5 | 50,0 | 284,2 | 275,3 | 2292 | 2220 |
| 5 | 5-400 °C | 50,0 | 50,1 | 50,0 | 283,6 | 275,2 | 2266 | 2199 |
| 6 | 6-400 °C | 50,0 | 50,1 | 49,9 | 285,3 | 277,0 | 2279 | 2213 |

Tab. 8: Skupina 2 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | | Dynamický modul pružnosti | |
|--------------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | | Před 400 °C | Po 400 °C | Před 400 °C | Po 400 °C |
| | | m/s | m/s | GPa | GPa |
| 4 | 4-400 °C | 4950 | 3817 | 51,2 | 29,1 |
| 5 | 5-400 °C | 4957 | 3676 | 50,8 | 26,7 |
| 6 | 6-400 °C | 4808 | 3817 | 48,0 | 29,0 |

Na závěr zkoušení vzorků ze skupiny 2 byla na betonových tělesech provedena tlaková zkouška dle kapitoly 3.3.1. Zkouška byla, stejně jako u předchozí skupiny, provedena na hydraulickém lisu. Výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou v Tab. 9. Výsledné pevnosti betonových vzorků jsou velmi podobné těm z referenční skupiny 1. Podrobnější porovnání vzorků je v kapitole 4. Pevnost vzorků dosáhla na 66-75 MPa.

Tab. 9: Skupina 2 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|---------|
| | | Síla | Pevnost |
| | | kN | MPa |
| 4 | 4-400 °C | 177,45 | 71,6 |
| 5 | 5-400 °C | 166,68 | 66,5 |
| 6 | 6-400 °C | 189,33 | 75,5 |

3.4.3 Skupina 3 – vzorky vystavené 800 °C

Experimentální skupina vzorků s označením 3 měla stejně jako skupina 2 za úkol zjištění materiálových vlastností betonu vystavených vysokým teplotám a porovnání vlastností se skupinami, na které působily současně vysoké teploty a síranová koroze. Rozdílná však u této skupiny byla zatěžovací teplota, která byla stanovena na 800 °C. I takto vysoká teplota může ohrožovat při požáru betonové konstrukce. Je proto snaha tohoto experimentu teplotou a průběhem zahřívání betonových vzorků nasimulovat co nejpodobnější podmínky konstrukcí za požáru. Výroba vzorků proběhla stejně jako u předchozích skupin dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 3 byly provedeny ve dnech 3. a 5.11.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

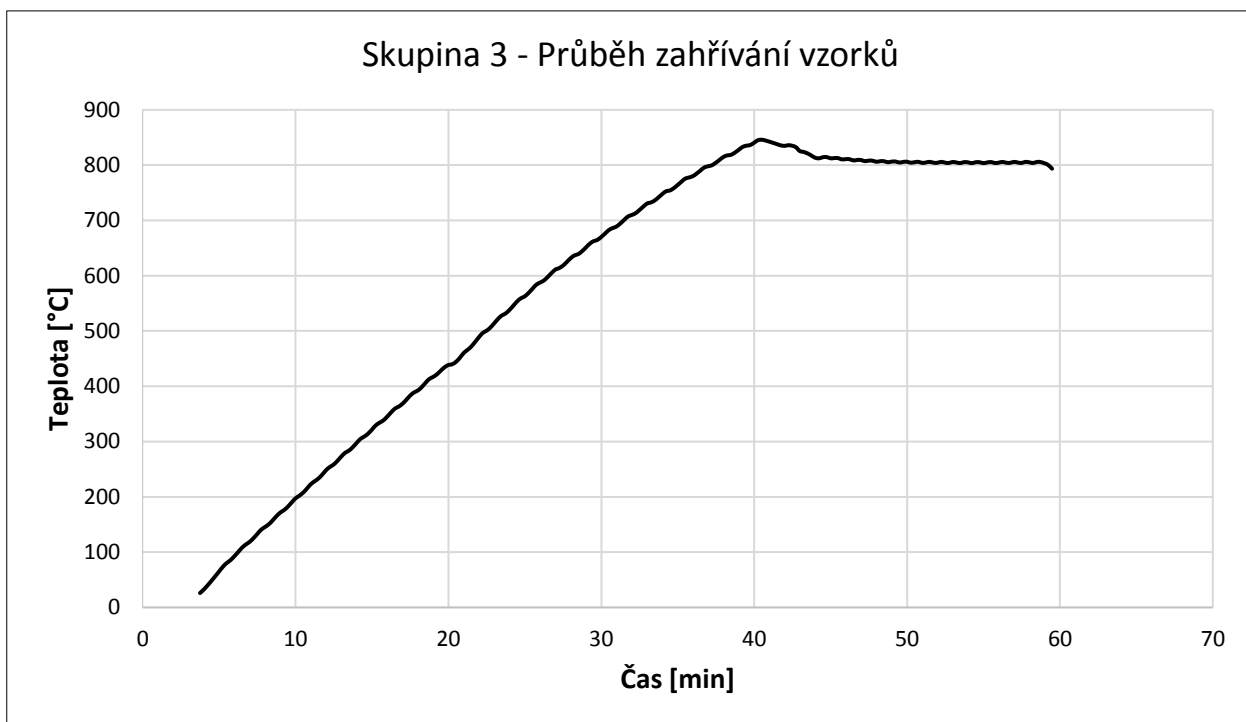
Základní rozměry a dynamický modul pružnosti byly, stejně jako u skupiny 2, změřeny ještě před vystavením vysokým teplotám. Hodnoty jsou v Tab. 10 a Tab. 11.

Totožným postupem jako u skupiny 2 se zahřály i vzorky ze skupiny 3 dle kapitoly 3.2.1. Zahřátí probíhalo pomocí keramických deček v ukládací bedně s žáruvzdornou tepelnou izolací. Celou sestavu i s experimentálními vzorky je možné vidět na Obr. 31. Teplotu po celou dobu zahřívání měřil jeden termočlánek umístěný na povrchu prostředního vzorku a zaznamenával jí datalogger. Výsledný průběh zahřívání je možné vidět na Obr. 32. Během zahřívání nedošlo k žádným neočekávaným okolnostem.

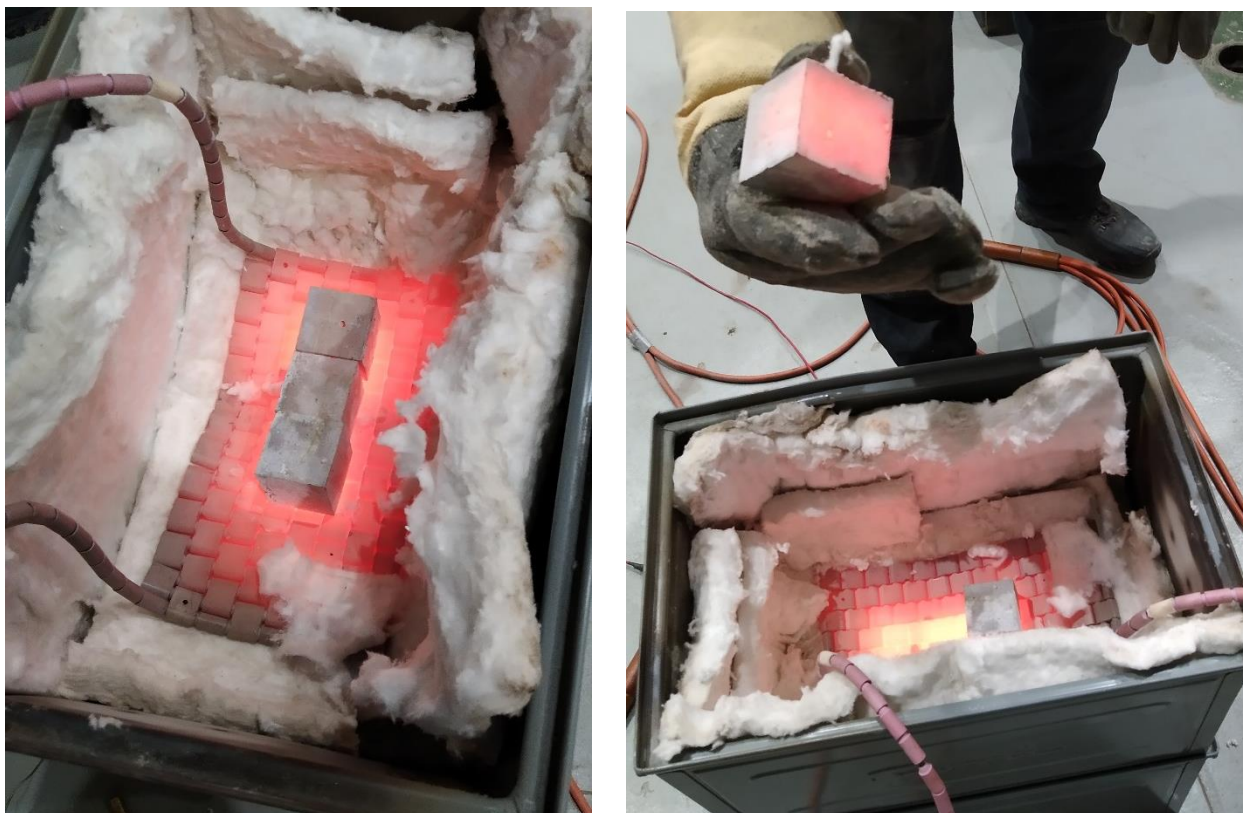


Obr. 31: Uložení vzorků do zahřívacích keramických deček

Po uplynulé době zahřívání cca. 20 minut na stálé teplotě 800 °C se vzorky vyjmuly z ukládací bedny (Obr. 33). Ihned po vyjmutí bylo vidět jednoznačné porušení vzorků trhlinami způsobené vysokými teplotami (Obr. 34).



Obr. 32: Skupina 3 – Průběh zahřívání vzorků



Obr. 33: Vyjmutí vzorků skupiny 3 z úložné bedny



Obr. 34: Porušení povrchu vzorku ze skupiny 2 vysokými teplotami

Po vychladnutí vzorků mohla opět proběhnout zkouška dynamického modulu pružnosti dle kapitoly 3.3.2. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 11, kde je dopočítán i dynamický modul pružnosti. A stejně tak se znovu změřily i rozměrové vlastnosti zapsané v Tab. 10.

Tab. 10: Skupina 3 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | | Objemová hmotnost | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | Před 800 °C | Po 800 °C | Před 800 °C | Po 800 °C |
| | | mm | mm | mm | g | g | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 7 | 7-800 °C | 50,4 | 50,2 | 50,1 | 291,5 | 267,8 | 2300,7 | 2113 |
| 8 | 8-800 °C | 48,6 | 50,2 | 50,2 | 280,0 | 259,3 | 2284,5 | 2115 |
| 9 | 9-800 °C | 50,2 | 50,1 | 50,2 | 287,8 | 268,1 | 2281,4 | 2126 |

Tab. 11: Skupina 3 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | | Dynamický modul pružnosti | |
|--------------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | | Před 800 °C | Po 800 °C | Před 800 °C | Po 800 °C |
| | | m/s | m/s | GPa | GPa |
| 7 | 7-800 °C | 4950 | 1724 | 50,7 | 5,7 |
| 8 | 8-800 °C | 4957 | 1718 | 50,5 | 5,6 |
| 9 | 9-800 °C | 4808 | 1754 | 47,5 | 5,9 |

Jako poslední zkouška provedena na vzorcích skupiny 3 byla provedena tlaková zkouška dle kapitoly 3.3.1. Výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou v Tab. 12. Je možné vidět velký pokles výsledné tlakové pevnosti u všech zkoušených vzorků, oproti vzorků z předešlých skupin. Podrobnější porovnání vzorků je v kapitole 4. Porušení vzorků nastalo při síle 20–22 MPa.

Tab. 12: Skupina 3 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | Síla kN | Pevnost MPa |
| 4 | 4-800 °C | 55,19 | 21,8 |
| 5 | 5-800 °C | 52,69 | 21,6 |
| 6 | 6-800 °C | 51,26 | 20,4 |

3.4.4 Skupina 4 – vzorky vystavené síranům

Vzorky s číselným označením 10, 11, 12 byly zařazeny do skupiny 4. Na těchto vzorcích se zjišťovaly materiálové vlastnosti betonu vystaveného síranové korozi. Ty se poté budou porovnávat mezi referenčními vzorky a vzorky vystavené současně vysokým teplotám i síranové korozi. Skupina 4 má za úkol zjistit míru degradace způsobené pouze působením síranů. Výroba vzorků se provedla dle kapitoly 3.1. Poté se po důkladném vytvrzení vzorky umístily do nádoby s 10 % roztokem síranu sodného, jak je popsáno v kapitole 3.2.2. Síran na betonové vzorky působily po dobu jedenácti týdnů –nádoby s nimi je možné vidět na Obr. 35. Během této doby se kontrolovalo pH roztoku a jestli hladina nepoklesla v důsledku odpařování. Po uplynutí této doby se vzorky vysušily a mohlo se přejít ke zkoušení vzorků.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 4 byly provedeny dne 16.12.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

Byly změřeny rozměry a dynamický modul pružnosti, stejně jako v případě předešlých skupin. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 13 a Tab. 14.

Tlaková zkouška vzorků skupiny 4 byla provedena dle kapitoly 3.3.1. Výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou v Tab. 15. Z výsledků je patrný vliv síranové koroze na pevnost betonu, která se mírně snížila. Podrobnější porovnání vzorků je v kapitole 4. Porušení vzorků nastalo při síle 59–60 MPa.



Obr. 35: Zkušební vzorky v nádobě se síranovým roztokem

Tab. 13: Skupina 4 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | | |
| | | mm | mm | mm | g | kg/m ³ |
| 10 | 10-sírany | 49,6 | 50,0 | 50,1 | 289,5 | 2330 |
| 11 | 11-sírany | 49,8 | 50,0 | 50,0 | 289,5 | 2327 |
| 12 | 12-sírany | 49,9 | 50,5 | 50,7 | 295,3 | 2315 |

Tab. 14: Skupina 4 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | Dynamický modul pružnosti |
|--------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
| | | m/s | GPa |
| 10 | 10-sírany | 4854 | 49,4 |
| 11 | 11-sírany | 4950 | 51,3 |
| 12 | 12-sírany | 5000 | 52,1 |

Tab. 15: Skupina 4 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | Síla kN | Pevnost MPa |
| 10 | 10–sířany | 150,1 | 60,5 |
| 11 | 11–sířany | 148,91 | 59,8 |
| 12 | 12–sířany | 149,0 | 59,2 |

3.4.5 Skupina 5 – vzorky vystavené síranům + 400 °C

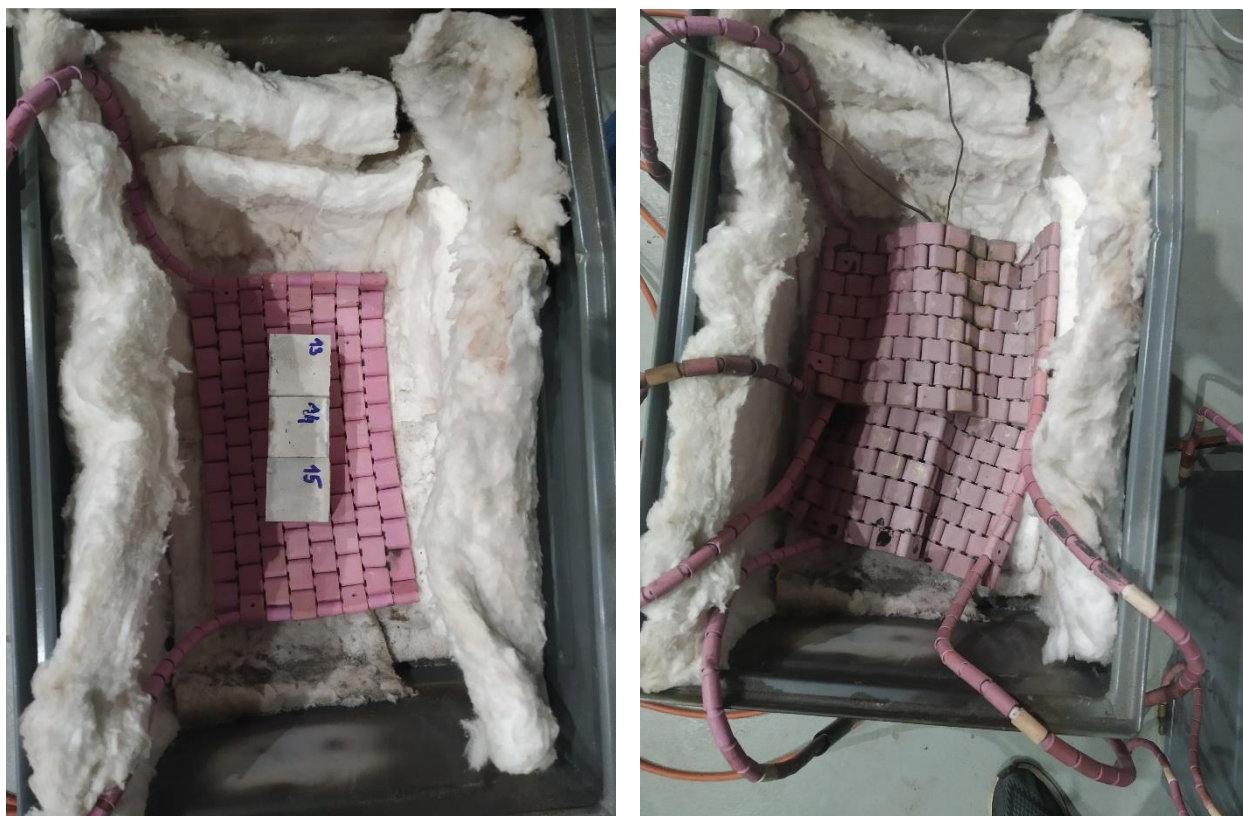
Do skupiny 5 byly zařazeny vzorky číslo 13, 14 a 15. Tyto vzorky byly určeny k zjištění materiálových vlastností betonu, který byl nejdříve vystaven síranové korozi a poté teplotám 400 °C. Na těchto vzorcích se bude pomocí porovnání s ostatními skupinami zjišťovat vliv síranové koroze na vlastnosti betonu při zvýšených teplotách. Zatěžování degradačními vlivy proběhlo stejně jako u předchozích skupin. Po dobu jedenácti týdnů se vzorky ponechaly v 10 % roztoku síranu sodného, aby na ně mohla působit síranová koroze. Poté se vysušily a mohly se vystavit zvýšeným teplotám. Výroba těchto vzorků proběhla dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 5 byly provedeny dne 16.12.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

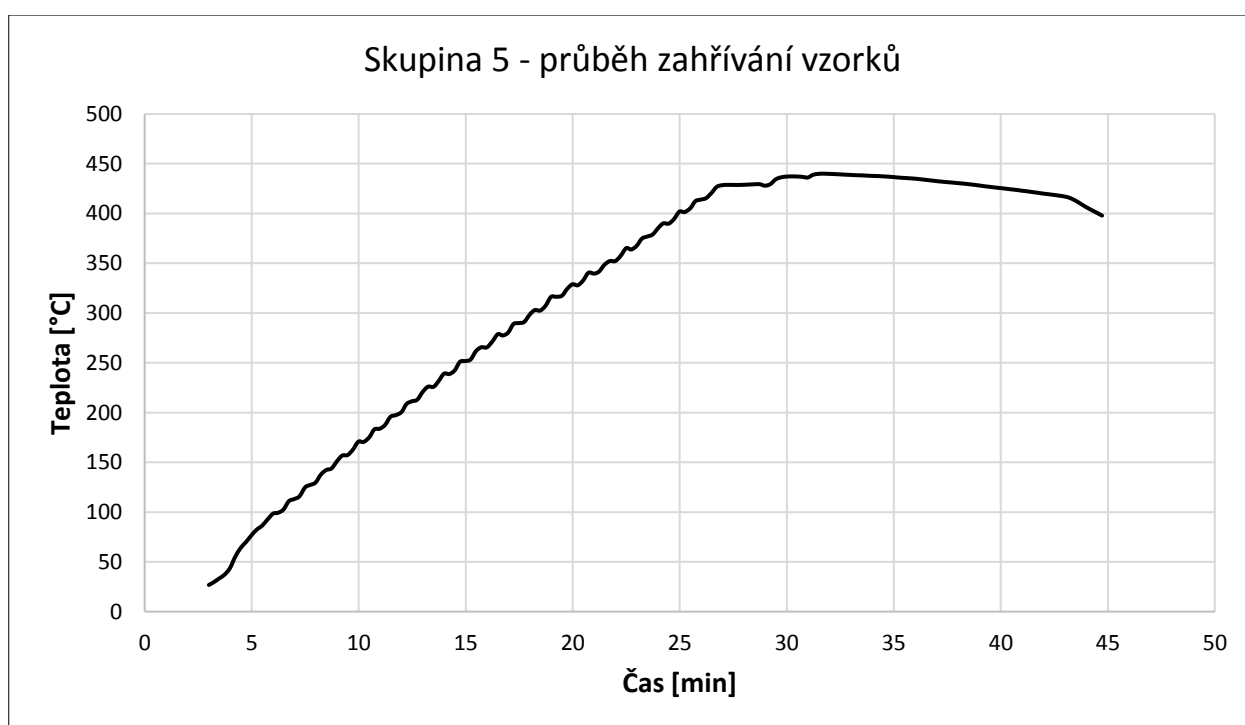
Jako první po vysušení vzorků byly změřeny základní rozměry a dynamický modul pružnosti ještě před vystavením vysokým teplotám. Tyto hodnoty jsou v Tab. 16 a Tab. 17. Poté se přešlo k zahřívání na požadovanou teplotu. Zatěžování vysokými teplotami proběhlo pomocí keramických deček dle kapitoly 3.2.1 stejným způsobem, jako u skupiny 2. Vzorky se uložily do ochranné nehořlavé ukládací bedny s žáruvzdornou tepelnou izolací.

Experimentální vzorky se následně obalily keramickými dečkami. Znovu jako v předchozích experimentech při zahřívání zkušebních těles se použily pouze dva termočlánky, jeden pro řídicí jednotku a druhý zapojený do dataloggeru, s jehož pomocí se mohly později zaznamenávat naměřené teploty. Na závěr se vzorky a keramické dečky zakryly žáruvzdornou tepelnou izolací. Tento postup je znázorněn na Obr. 36.

Následně se mohlo přejít k vystavování vysokým teplotám. Zahřívání proběhlo co nejpodobnějším způsobem zahřívání vzorků skupiny 2. Ani zde nenastaly žádné problémy a zahřívání probíhalo až do teploty cca. 420 °C. Poté se teplota udržovala přibližně dvacet minut. Přesný průběh teploty je na Obr. 37. Po uplynulé době dvaceti minut se vzorky z ukládací bedny vyjmuly a nechaly samovolně vychladnout pro snazší manipulaci.



Obr. 36: Vzorky skupiny 5 připravené k zahřívání



Obr. 37: Skupina 5 - Průběh zahřívání vzorků

Ihned po odkrytí vzorků zpod keramických deček bylo patrné mírné poškození povrchu betonu. To je vidět na Obr. 38.



Obr. 38: Vzorek ze skupiny 5 ihned po vystavení vysokými teplotami

Když vzorky vychladly proběhla zkouška dynamického modulu pružnosti dle kapitoly 3.3.2. Naměřené hodnoty rychlosti prostupu ultrazvukového vlnění po vystavení vysokým teplotám jsou zaznamenány v Tab. 17, kde je zároveň dopočítán i dynamický modul pružnosti. Zároveň se znovu po vystavení vysokým teplotám změřily i rozměrové vlastnosti, které jsou zapsány v Tab. 16.

Jako poslední zkouška byla provedena tlaková zkouška pevnosti dle kapitoly 3.3.1. Zkouška proběhla na hydraulickém lisu. Výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou v Tab. 18. Je patrné, že výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou vyšší než u vzorků ze skupiny 2 a dokonce i ze skupiny referenčních vzorků. Výsledné pevnosti vyšly 76-79 MPa. Zhodnocení vlastností je v kapitole 4.

Tab. 16: Skupina 5 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | | Objemová hmotnost | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | Před 400 °C | Po 400 °C | Před 400 °C | Po 400 °C |
| | | mm | mm | mm | g | g | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 13 | 13-s400°C | 50,8 | 50,2 | 49,9 | 290,3 | 274,8 | 2281,9 | 2160 |
| 14 | 14-s400°C | 49,5 | 50,1 | 50,3 | 289,4 | 275,2 | 2319,7 | 2206 |
| 15 | 15-s400°C | 50,1 | 50,7 | 50,2 | 299,0 | 282,2 | 2349,9 | 2217 |

Tab. 17: Skupina 5 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | | Dynamický modul pružnosti | |
|--------------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | | Před 400 °C | Po 400 °C | Před 400 °C | Po 400 °C |
| | | m/s | m/s | GPa | GPa |
| 13 | 13-s+400 °C | 4808 | 4237 | 47,5 | 34,9 |
| 14 | 14-s+400 °C | 4808 | 4237 | 48,3 | 35,6 |
| 15 | 15-s+400 °C | 4808 | 4065 | 48,9 | 33,0 |

Tab. 18: Skupina 5 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|---------|
| | | Síla | Pevnost |
| | | kN | MPa |
| 13 | 13-s+400 °C | 201,91 | 79,2 |
| 14 | 14-s+400 °C | 191,68 | 77,3 |
| 15 | 15-s+400 °C | 193,14 | 76,1 |

3.4.6 Skupina 6 – vzorky vystavené síranům + 800 °C

Skupina 6 obsahovala vzorky číslo 16, 17, 18. Vzorky posloužily k určení materiálových vlastností betonu, vystaveného nejdříve síranové korozi a poté teplotám 800 °C. Stejně jako u předchozí skupiny se pomocí těchto vzorků bude porovnáváním zjišťovat vliv síranové koroze na vlastnosti betonu při zvýšených teplotách. Degradální vlivy na tuto skupinu vzorků proběhlo totožně jako u předchozích skupin. Na jedenáct týdnů byly vzorky umístěny do 10 % roztoku síranu sodného. Po vysušení se vystavily zvýšeným teplotám. Výroba těchto vzorků proběhla dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 6 byly provedeny dne 16.12.2021 v laboratoři FSv ČVUT.

Po vyndání z roztoku a vysušení proběhlo měření základních rozměrů a dynamického modulu pružnosti – hodnoty jsou zapsány v Tab. 19 a Tab. 20. Poté se vzorky zahřívaly. Zatěžování vysokými teplotami proběhlo pomocí keramických deček dle kapitoly 3.2.1 stejným způsobem, jako u skupiny 3. Vzorky se uložily do ochranné nehořlavé ukládací bedny s žáruvzdornou tepelnou izolací a obalily se keramickými dečkami (Obr. 39). Přidaly se i dva termočlánky pro záznam a řízení teploty. Sestava se následně zakryla žáruvzdornou tepelnou izolací.

Zahřívání probíhalo stejným způsobem jako zahřívání skupiny 3 ovšem s jedním rozdílem. Při dosažení teploty 370 °C se vzorek číslo 16 náhle roztříštil. Znázorněno je to na Obr. 40. To mohlo být způsobeno několika důvody.

Vzhledem k působení síranů začaly v betonovém vzorku chemické procesy, které vedly ke vzniku ettringitu a sádrovce. Ty chemicky vážou mnohem více vody než původní fáze

C-S-H a Ca(OH)_2 [31][32]. Vyplyvá to z jejich chemického složení – ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ a sádrovec $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Při zahřátí betonu na dostatečnou teplotu se tato chemicky vázaná voda v betonu odštěpuje tvoří páru a nežádoucí tlak, který může překonat pevnost betonu. Vliv síranů a vznik ettringitu a sádrovce z něj dělá bezpochyby křehčí materiál, což vyplývá z mnoha předchozích studií.

Důvodů, proč se vzorek číslo 16 roztrhl během procesu zahřívání, může být nespočet. Je možné, že je tato událost vedlejší účinek vlivu síranové koroze na beton, ale na prokázání tohoto tvrzení je nutný podrobnější výzkum, než je rámec této práce.

I přes tuto událost zahřívání zbývajících vzorků proběhlo bez problémů do teploty cca. $820\text{ }^\circ\text{C}$, kdy se teplota ustálila na přibližně dvacet minut. Poté se vzorky nechaly samovolně vychladnout pro snazší manipulaci. Povrch vzorků byl značně degradovaný – viditelné trhliny na Obr. 41.



Obr. 39: Vzorky skupiny 6 připravené k zahřívání

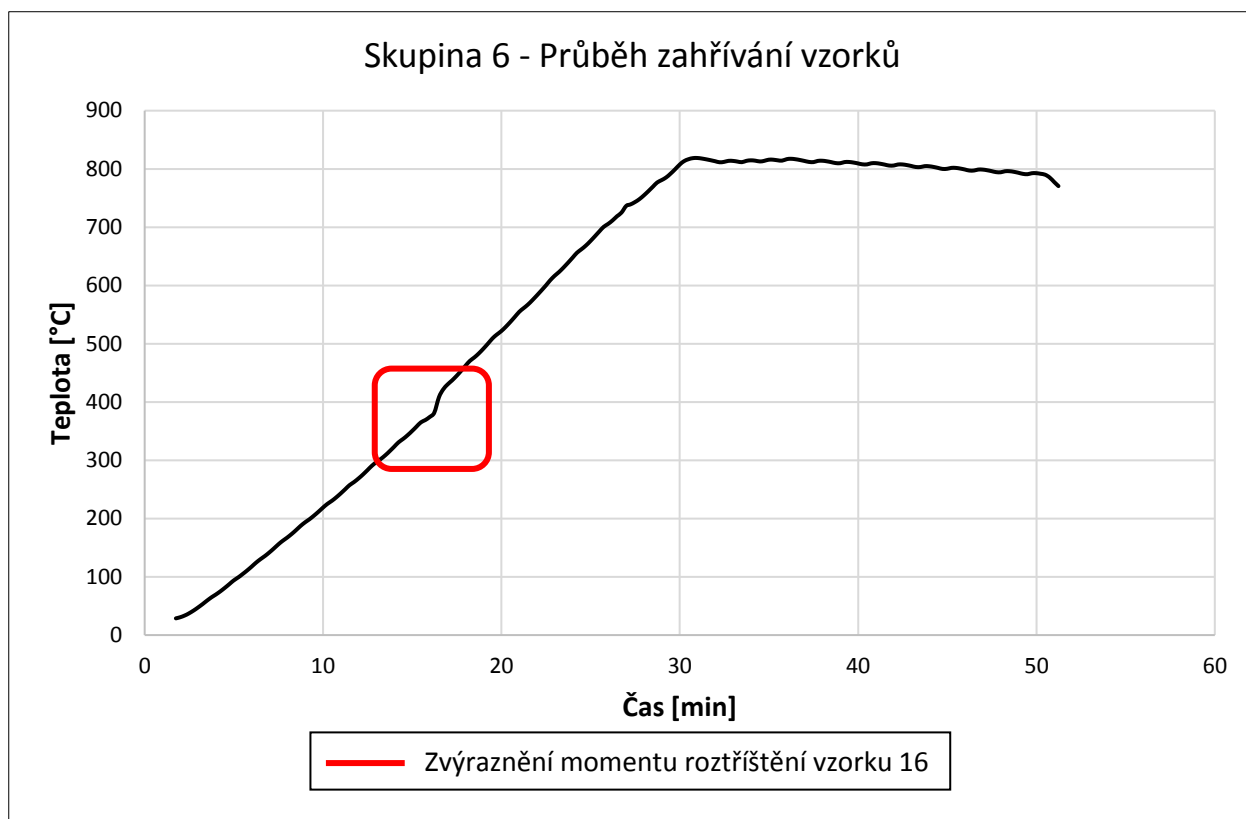


Obr. 40: Vzorky skupiny 6 ihned po procesu zahřívání – vzorek č. 16 roztržštěn



Obr. 41: Tři vzorky ze skupiny 6 ihned po vystavení vysokými teplotami – poškozený povrch vzorků

Přesný průběh zahřívání je na Obr. 42. V čase přibližně 16 minut a teplotě okolo 370 °C je vidět náhlý skok teploty – označeno červeným zvýrazněním. Tento nárůst je způsoben roztrháním vzorku 16 a uvolněním jeho tepla do okolí. Teplo z keramických deček bylo následně přenášeno do menšího objemu materiálu a zahřívání tak pokračovalo rychleji. Zhodnocení a porovnání tohoto průběhu zahřívání je v kapitole 4.4.



Obr. 42: Skupina 6 – Průběh zahřívání vzorků

Po vychladnutí se změřil dynamický modul pružnosti. Hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 20. Stejně tak se po vystavení vysokým teplotám změřily i rozměrové vlastnosti, zapsané do Tab. 19.

Tlaková zkouška proběhla dle kapitoly 3.3.1 na hydraulickém lisu. Výsledné hodnoty tlakové pevnosti jsou v Tab. 21. Výsledné hodnoty (27-31 MPa) jsou vyšší než u skupiny 3, se kterou se tato skupina porovnává. Podrobnější zhodnocení je v kapitole 4.

Tab. 19: Skupina 6 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | | Objemová hmotnost | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | Před 800 °C | Po 800 °C | Před 800 °C | Po 800 °C |
| | | mm | mm | mm | g | g | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 16 | 16-s+800 °C | 50,1 | 50,2 | 50,6 | 293,7 | x | 2305,7 | x |
| 17 | 17-s+800 °C | 51,1 | 50,5 | 50,1 | 303,9 | 280,2 | 2349,0 | 2166 |
| 18 | 18-s+800 °C | 49,6 | 50,0 | 51,1 | 287,3 | 265,6 | 2265,7 | 2094 |

Tab. 20: Skupina 6 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | | Dynamický modul pružnosti | |
|--------------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | | Před 800 °C | Po 800 °C | Před 800 °C | Po 800 °C |
| | | m/s | m/s | GPa | GPa |
| 16 | 16-s+800 °C | 5051 | x | 52,9 | x |
| 17 | 17-s+800 °C | 4808 | 2119 | 48,9 | 8,8 |
| 18 | 18-s+800 °C | 4854 | 1923 | 48,0 | 7,0 |

Tab. 21: Skupina 6 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|---------|
| | | Síla | Pevnost |
| | | kN | MPa |
| 16 | 16-s+800 °C | x | x |
| 17 | 17-s+800 °C | 80,67 | 31,2 |
| 18 | 18-s+800 °C | 68,84 | 27,7 |

3.4.7 Skupina 7 – referenční vzorky 2

Skupina sedm obsahovala vzorky s číselným označením 19, 20 a 21. Stejně jako skupina 1 i tato skupina bude sloužit jako referenční. Budou se na ní zjišťovat materiálové vlastnosti nijak degradovaného betonu, které se poté budou porovnávat s ostatními skupinami. Volba použití i druhé referenční skupiny je kvůli časovým rozestupům mezi jednotlivými experimenty a materiálovými zkouškami. Zrání vzorků od vyjmutí z forem bylo dostatečné (od odbednění do první zkoušky uplynulo 20 týdnů). Mezi prvním zkoušením referenčních vzorků dne 6.10.2021 a posledním zkoušením dne 16.12.2021 uběhlo dalších 10 týdnů. Během této doby se samotnému nedegradovanému betonu mohly zlepšit materiálové vlastnosti dozráním a tím by se výsledky experimentu mohly ovlivnit. Proto tato skupina také slouží ke zjištění materiálových vlastností vyvrálejšího betonu. Výroba těchto vzorků proběhla stejně jako u všech ostatních dle kapitoly 3.1.

Veškeré zkoušky vzorků ze skupiny 7 byly provedeny dne 16.12.2021 v laboratoři FSV ČVUT.

Nejdříve byly zjištěny základní rozměry vzorků (Tab. 22) a poté proběhla zkouška dynamického modulu pružnosti dle kapitoly 3.3.2 (Tab. 23).

Jako poslední byla na vzorcích provedena zkouška tlakové pevnosti dle kapitoly 3.3.1. Jeden ze vzorků po zkoušce je vidět na Obr. 43. Z tlakové zkoušky byla určena největší zatěžovací síla působící na těleso při porušení a tím i pevnost vzorku. Výsledné pevnosti jsou v Tab. 24.

Tab. 22: Skupina 7 – základní rozměrové hodnoty vzorků

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost |
|--------------|-----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-------------------|
| | | Délka | Šířka | Výška | | |
| | | mm | mm | mm | g | kg/m ³ |
| 19 | referenční 19 | 50,5 | 49,9 | 50,3 | 288,8 | 2301 |
| 20 | referenční 20 | 51,0 | 51,5 | 50,0 | 289,4 | 2284 |
| 21 | referenční 21 | 49,3 | 50,2 | 50,0 | 280,9 | 2281 |

Tab. 23: Skupina 7 – dynamický modul pružnosti

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Prostup UZ vlnění | Dynamický modul pružnosti |
|--------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
| | | m/s | GPa |
| 19 | referenční 19 | 4902 | 49,8 |
| 20 | referenční 20 | 5051 | 52,4 |
| 21 | referenční 21 | 4808 | 47,5 |

Tab. 24: Skupina 7 – tlaková pevnost

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Tlaková pevnost | |
|--------------|-----------------|-----------------|---------|
| | | Síla | Pevnost |
| | | kN | MPa |
| 19 | referenční 19 | 188,1 | 74,7 |
| 20 | referenční 20 | 154,3 | 58,8 |
| 21 | referenční 21 | 174,7 | 70,6 |



Obr. 43: Porušení vzorku po zkoušce tlakové pevnosti na hydraulickém lisu

4 Výsledky měření a jejich porovnání

Získané hodnoty ze všech měření byly rozděleny dle sledovaných veličin. Vzorky byly porovnány dle objemové hmotnosti, dynamického modulu pružnosti a tlakové pevnosti. Úplný výpis jednotlivých hodnot je vždy uveden v tabulkách, kde je dopočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka pro lepší orientaci v datech a ověření kvality změřených dat. Průměrné hodnoty skupin jsou dále porovnávány mezi sebou.

Objemová hmotnost byla zjišťována na vzorcích před a po zahřátí. Zjištěna byla výpočtem ze změřených základních rozměrů a hmotnosti vzorku. Podrobné zhodnocení dat je k vidění v kapitole 4.1.

Dynamický modul pružnosti byl vypočítán z měřené rychlosti průniku ultrazvukových impulzů dle kapitoly 3.3.2. U vzorků, které prošly procesem zahřívání, se dynamický modul pružnosti měřil před a po zahřátí. U ostatních vzorků pouze jednou. Zhodnocení je v kapitole 4.2.

Tlaková pevnost se měřila na vzorcích pouze jednou vzhledem k použité destruktivní metodě zjišťování. Tato materiálová vlastnost se je zhodnocena v kapitole 4.3.

Posledním sledovaným parametrem, který byl porovnáván, byl průběh zahřívání skupin vystavených vysokým teplotám. Tento proces je zhodnocen v kapitole 4.4.

4.1 Vyhodnocení z hlediska objemové hmotnosti

Objemová hmotnost se u vzorků během celé doby experimentů měnila v řádech jednotek procent v závislosti na tom, jakým degradačním vlivům byly vzorky vystaveny. Komplexní výpis hodnot této sledované veličiny rozdělený dle skupin a degradačních vlivů je v Tab. 27.

Pokud se na hodnoty zaměříme podrobněji, vidíme, že skupiny vzorků vystavené roztoku síranu sodného mají vyšší objemovou hmotnost než ostatní skupiny. Toto porovnání je přibliženo v Tab. 25. Zde jsou k vidění hodnoty objemových hmotností všech skupin před vystavením vysokým teplotám. Skupiny jsou poté rozděleny dle toho, zda na ně působil roztok síranu sodného nebo ne. Z tabulky je patrné, že vzorky ze skupin, které podléhaly síranové korozi v roztoku mají v průměru o 2 % vyšší hodnotu objemové hmotnosti než vzorky bez degradace.

Mírné zvýšení hmotnosti bylo očekávané vzhledem k výsledkům výzkumů [14][27]. Tam je nárůst hmotnosti vysvětlen absorpcí vody v usazovaných expanzních produktech síranové koroze a další hydratací během máčení vzorků. Přírůstek hmotnosti je ale dočasný. Vlivem dlouhodobé síranové koroze se začne hmotnost snižovat tvorbou trhlin, odpadáváním materiálu a vyluhováním pojiva. [14]

Tab. 25: Porovnání objemových hmotností mezi skupinami

| Skupiny vzorků před vystavením vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrných objemových hmotností | Průměr | Rozdíl |
|---|------------------|---|-------------------|--------|
| | | kg/m ³ | kg/m ³ | % |
| Vzorky bez degradace | Skupina 1 | 2288,9 | 2268,8 | +2 % |
| | Skupina 2 | 2279,2 | | |
| | Skupina 3 | 2256,7 | | |
| | Skupina 7 | 2250,4 | | |
| Vzorky vystavené roztoku síranu sodného | Skupina 4 | 2322,1 | 2315,4 | |
| | Skupina 5 | 2317,2 | | |
| | Skupina 6 | 2306,8 | | |

V Tab. 26 je porovnání mezi skupinami před a po vystavení vysokým teplotám. U všech skupin došlo během procesu zahřívání k úbytku hmotnosti, a to z důvodu vypaření volné vlhkosti nebo chemicky vázané vody ve vzorcích. Tento jev je poté výraznější u skupin, které byly před tím po dobu 11 týdnů umístěny v roztoku síranu sodného. Vzorky z těchto skupin obsahovaly více chemicky vázané vody v ettringitu a sádre. Tyto vzorky poté ztratily více hmotnosti v důsledku dehydratace této vody. Objemové hmotnosti vzorků po zahřátí jsou přibližně stejné – rozdíly jsou v řádech jednotek gramů. Procentním rozdílem je zde vyjádřen úbytek hmotnosti vzorků při zahřívání.

Tab. 26: Porovnání objemových hmotností vzorků před a po vystavení vysokým teplotám

| Skupiny vzorků vystavované vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrných objemových hmotností | | Rozdíl |
|---|------------------|---|--------------------|--------|
| | | Před 400 °C / 800 °C | Po 400 °C / 800 °C | |
| | | kg/m ³ | kg/m ³ | % |
| Vzorky vystavené 400 °C | Skupina 2 | 2279,2 | 2210,4 | -3 % |
| | Skupina 5 | 2317,2 | 2194,7 | -5 % |
| Vzorky vystavené 800 °C | Skupina 3 | 2256,7 | 2117,9 | -6 % |
| | Skupina 6 | 2306,8 | 2130,3 | -8 % |

Tab. 27: Srovnání změn objemových hmotností

| Číslo vzorku | Označení vzorku | Objemová hmotnost | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|-----------|----------|---------|---------|
| | | Vzorky nevystavené degradaci | | | Vzorky po vystavení roztoku síranu sodného | | | Vzorky po vystavením zvýšeným teplotám | | | | | | | |
| | | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | 400 °C | | | 800 °C | | | | |
| | | | | | | | | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | | |
| kg/m ³ | kg/m ³ | - | kg/m ³ | kg/m ³ | - | kg/m ³ | kg/m ³ | - | kg/m ³ | kg/m ³ | - | | | | |
| 1 | referenční 1 | 2300,68 | 2288,9 | 8,4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 2 | referenční 2 | 2284,51 | | | - | | | - | | | - | | | - | - |
| 3 | referenční 3 | 2281,43 | | | - | | | - | | | - | | | - | - |
| 4 | 7-400 °C | 2292,2 | 2279,2 | 10,6 | - | - | - | 2219,82 | 2210,4 | 8,6 | - | - | - | | |
| 5 | 8-400 °C | 2266,2 | | | - | | | - | | | - | | | - | |
| 6 | 9-400 °C | 2279,3 | | | - | | | - | | | - | | | - | |
| 7 | 4-800 °C | 2221,19 | 2256,7 | 25,2 | - | - | - | - | - | - | 2113,15 | 2117,9 | 5,5 | | |
| 8 | 5-800 °C | 2277,50 | | | - | | | - | | | - | | | - | 2115,06 |
| 9 | 6-800 °C | 2271,42 | | | - | | | - | | | - | | | - | 2125,61 |
| 10 | 10-sírany | - | - | - | 2330,02 | 2322,1 | 8,0 | - | - | - | - | - | - | | |
| 11 | 11-sírany | - | | | 2325,30 | | | - | | | - | | | - | |
| 12 | 12-sírany | - | | | 2311,10 | | | - | | | - | | | - | |
| 13 | 13-s+400 °C | - | - | - | 2281,94 | 2317,2 | 27,8 | 2160,19 | 2194,7 | 24,8 | - | - | - | | |
| 14 | 14-s+400 °C | - | | | 2319,68 | | | - | | | - | | | - | |
| 15 | 15-s+400 °C | - | | | 2349,87 | | | - | | | - | | | - | |
| 16 | 16-s+800 °C | - | - | - | 2305,65 | 2306,8 | 34,0 | - | - | - | x | 2130,3 | 36,0 | | |
| 17 | 17-s+800 °C | - | | | 2349,00 | | | - | | | - | | | 2166,26 | |
| 18 | 18-s+800 °C | - | | | 2265,66 | | | - | | | - | | | 2094,29 | |
| 19 | referenční 19 | 2278,44 | 2250,4 | 33,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| 20 | referenční 20 | 2203,69 | | | - | | | - | | | - | | | - | |
| 21 | referenční 21 | 2269,12 | | | - | | | - | | | - | | | - | |

4.2 Vyhodnocení z hlediska dynamického modulu pružnosti

V Tab. 30 jsou zaznamenány hodnoty dynamického modulu pružnosti jednotlivých vzorků. Ty jsou rozděleny do skupin. Pro každou skupinu je poté vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka hodnot k lepší orientaci mezi daty. Měření dynamického modulu pružnosti proběhlo dvakrát u skupin, které byly vystaveny vysokým teplotám.

Podrobnější rozbor průměrných hodnot dynamického modulu pružnosti ze všech skupin je v Tab. 28 a Tab. 29. V Tab. 28 jsou porovnány hodnoty před vystavením vysokým teplotám. Skupiny jsou zde rozděleny podle toho, jestli byly vystaveny působení roztoku síranu sodného nebo ne. Z tabulky je patrné, že před zahřátím vzorků neměla síranová koroze žádný vliv na hodnoty dynamického modulu pružnosti. Průměrný rozdíl mezi vzorky z roztoku a vzorky, které v roztoku nebyly je pouhých 0,4 % – což je způsobeno odchylkou při měření a drobnými rozdíly mezi vzorky. Tento jev souhlasil s výsledky výzkumu v [27], kde bylo prokázáno, že vliv síranové koroze na dynamický modul pružnosti je velmi pomalý i v případě vysoké koncentrace, jaké bylo použito v tomto experimentu. Při dlouhodobějším působení síranů se dá ale očekávat pokles dynamického modulu pružnosti.

Tab. 28: Porovnání dynamického modulu pružnosti mezi skupinami

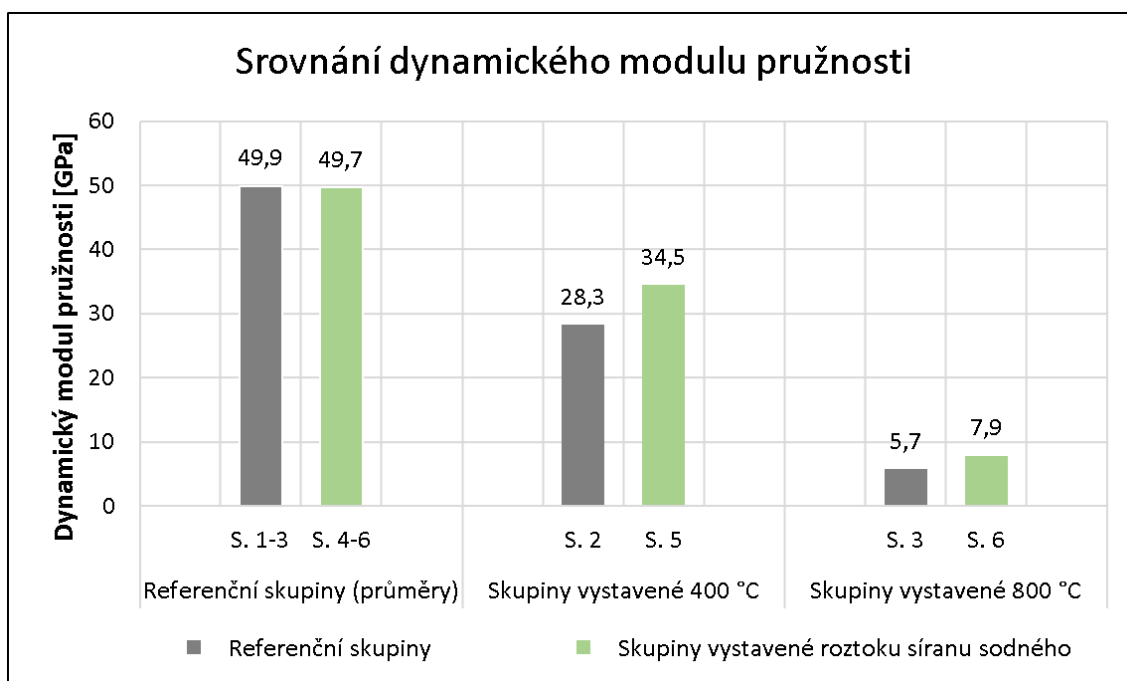
| Skupiny vzorků před vystavením vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrného dynamického modulu pružnosti | Průměr | Rozdíl |
|---|------------------|---|--------|--------|
| | | GPa | GPa | % |
| Vzorky bez degradace | Skupina 1 | 50,2 | 49,9 | -0,4 % |
| | Skupina 2 | 50,0 | | |
| | Skupina 3 | 49,6 | | |
| | Skupina 7 | 49,9 | | |
| Vzorky vystavené roztoku síranu sodného | Skupina 4 | 50,9 | 49,7 | |
| | Skupina 5 | 48,2 | | |
| | Skupina 6 | 50,0 | | |

V Tab. 29 je porovnání mezi skupinami před a po vystavení vysokým teplotám. Zde už můžeme pozorovat rozdíly mezi skupinami, které byly ovlivněny síranem. Skupina 5 a skupina 6 byly vystaveny roztoku síranu sodného. Před zahřátím vykazovaly stejnou hodnotu dynamického modulu pružnosti, jako skupiny referenční. I když je u všech skupin pozorován pokles měřené veličiny po zahřátí, u obou skupin vystavených síranům je tento pokles o poznání menší. V Tab. 29 je procentním rozdílem znázorněno o kolik procent je dynamický modul vyšší vlivem síranové koroze po zahřátí. Přesněji měla skupina 5 hodnoty dynamického modulu pružnosti o 21,9 % lepší než skupina 2 a skupina 6 měla hodnoty dokonce o 38,6 % lepší než skupina 3. Dynamický modul pružnosti skupin vzorků rozdělených dle degradačních vlivů, které na ně působily je graficky znázorněn na Obr. 44.

Referenční skupiny udávají průměrné hodnoty před vystavením vysokým teplotám. Poté jsou skupiny hodnoceny mezi sebou dle teploty, která na ně působila. Po tomto srovnání se zdá, že vzorky vystavené síranové korozi odolaly vysokým teplotám lépe.

Tab. 29: Porovnání dynamického modulu pružnosti vzorků před a po vystavení vysokým teplotám

| Skupiny vzorků vystavované vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrného dynamického modulu pružnosti | | Rozdíl |
|---|------------------|---|--------------------|---------|
| | | Před 400 °C / 800 °C | Po 400 °C / 800 °C | |
| | | GPa | GPa | % |
| Vzorky vystavené 400 °C | Skupina 2 | 50,0 | 28,3 | +21,9 % |
| | Skupina 5 | 48,2 | 34,5 | |
| Vzorky vystavené 800 °C | Skupina 3 | 49,6 | 5,7 | +38,6 % |
| | Skupina 6 | 50,0 | 7,9 | |



Obr. 44: Srovnání dynamického modulu pružnosti dle skupin

Už v dřívějších výzkumech [18] bylo prokázáno, že krátkodobé vystavení betonu síranové korozi může zlepšit některé materiálové vlastnosti. Zkušební vzorky byly vyrobeny z kvalitního betonu, který byl důkladně zhutněn a poté pečlivě ošetřován během doby tuhnutí i tvrdnutí. To vedlo bezpochyby k vytvoření husté mikrostruktury betonu a tím i velmi nízké pórovitosti. I přesto je nyní prokazatelné, že síranové ionty skrz pórovou strukturu pronikly. Vlivem síranů poté fázové změny vedly uvnitř struktury betonu ke vzniku ettringitu a sádry, které mají vynikající tepelné vlastnosti. Ty poté během zahřívání způsobily lepší vlastnosti betonu. Beton si tak lépe zachoval dynamický modul pružnosti, který se při zahřátí nesnížil tak razantně, jako u vzorků bez vlivu síranů. Podobný efekt lze sledovat v následující kapitole 4.3, kde je vyhodnocení změn tlakových pevností.

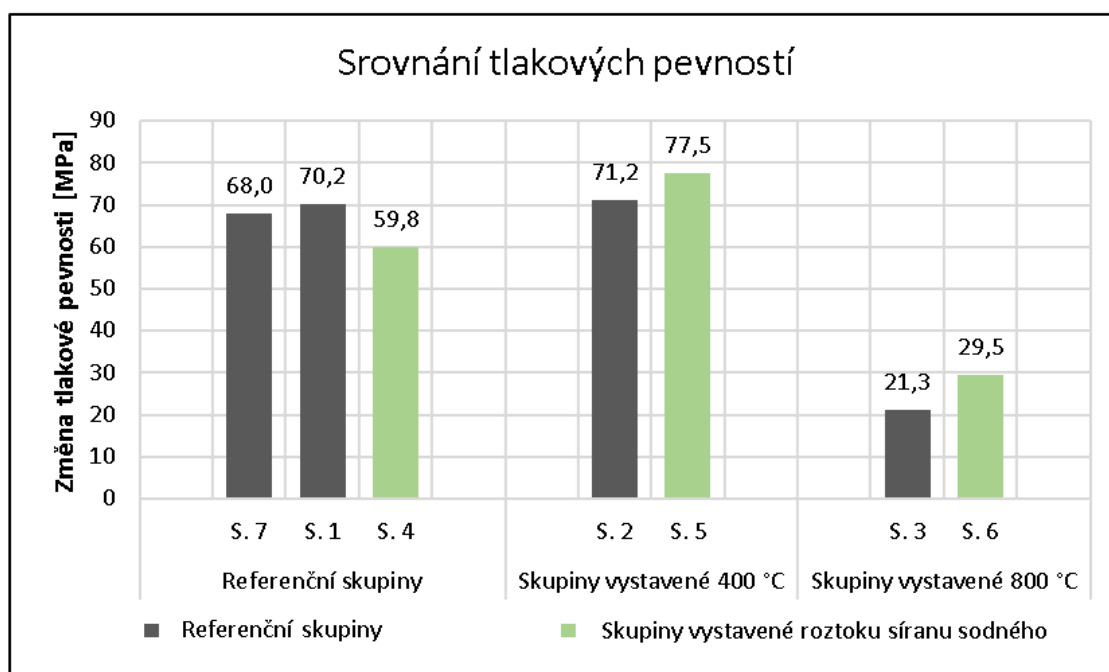
Tab. 30: Srovnání změn dynamického modulu pružnosti

| Skupina | Označení vzorku | Dynamický modul pružnosti | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|------------------------------|-----------|----------|--|-----------|----------|--|------|-----|--------|-----|-----|-----|
| | | Vzorky nevystavené degradaci | | | Vzorky po vystavení roztoku síranu sodného | | | Vzorky po vystavením zvýšeným teplotám | | | | | | |
| | | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | 400 °C | | | 800 °C | | | |
| | | | | | | | | GPa | GPa | - | GPa | GPa | - | GPa |
| 1 | referenční 1 | 52,83 | 50,2 | 1,9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | referenční 2 | 48,44 | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | referenční 3 | 49,34 | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 2 | 7-400 °C | 51,21 | 50,0 | 1,4 | - | - | - | 29,11 | 28,3 | 1,1 | - | - | - | |
| | 8-400 °C | 50,78 | | | - | | | 26,74 | | | - | | | |
| | 9-400 °C | 48,05 | | | - | | | 29,01 | | | - | | | |
| 3 | 4-800 °C | 50,74 | 49,6 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | 5,65 | 5,7 | 0,1 | |
| | 5-800 °C | 50,52 | | | - | | | - | | | 5,62 | | | |
| | 6-800 °C | 47,47 | | | - | | | - | | | 5,89 | | | |
| 4 | 10-sírany | - | - | - | 49,41 | 50,9 | 1,1 | - | - | - | - | - | - | |
| | 11-sírany | - | | | 51,31 | | | - | | | - | | | |
| | 12-sírany | - | | | 52,08 | | | - | | | - | | | |
| 5 | 13-s+400 °C | - | - | - | 47,48 | 48,2 | 0,6 | 34,90 | 34,5 | 1,1 | - | - | - | |
| | 14-s+400 °C | - | | | 48,26 | | | 35,65 | | | - | | | |
| | 15-s+400 °C | - | | | 48,89 | | | 32,98 | | | - | | | |
| 6 | 16-s+800 °C | - | - | - | 52,94 | 50,0 | 2,1 | - | - | - | x | 7,9 | 0,9 | |
| | 17-s+800 °C | - | | | 48,87 | | | - | | | 8,75 | | | |
| | 18-s+800 °C | - | | | 48,04 | | | - | | | 6,97 | | | |
| 7 | referenční 19 | 49,76 | 49,9 | 2,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | referenční 20 | 52,44 | | | - | | | - | | | - | | | |
| | referenční 21 | 47,46 | | | - | | | - | | | - | | | |

4.3 Vyhodnocení z hlediska tlakové pevnosti

V Tab. 33 jsou komplexně zaznamenány hodnoty tlakové pevnosti jednotlivých vzorků. Tyto hodnoty jsou dále porovnávány mezi dalšími skupinami.

Grafické znázornění průměrných tlakových pevností jednotlivých skupin je na Obr. 45. Zde jsou skupiny vzorků rozděleny dle degradačních vlivů, které na ně působily. Skupina 4, která byla vystavena pouze roztoku síranu sodného se zde porovnává se skupinami 1 a 7, které byly referenční. Již z grafu je patrné, že vlivem síranové koroze klesla tlaková pevnost vzorků přibližně o 10 MPa. V Tab. 31 je vidět, že za normálních teplot se vlivem síranové koroze vzorkům průměrně snížila tlaková pevnost o 13 % oproti nepoškozeným vzorkům. Vlivem síranové koroze se chemickými i fyzikálními procesy naruší struktura betonu uvnitř vzorků a tím ztrácí svou pevnost.



Obr. 45: Srovnání tlakových pevností dle skupin

Překvapivě opačným způsobem se ale chovaly skupiny vystavené zvýšeným teplotám. Vzorky, které byly nejdříve vystaveny síranové korozi a poté zvýšeným teplotám vykazovaly vyšší tlakovou pevnost než vzorky, které síranové korozi vystaveny nebyly. Číselné porovnání skupin vystavených zvýšeným teplotám je v Tab. 32. Skupině 2, která byla vystavena před zkouškou tlakové pevnosti pouze teplotě 400 °C, se tlaková pevnost oproti referenčním (nezahřátým) skupinám téměř nezměnila. Ale skupině 5, která byla vystavena síranové korozi a teplotě 400 °C, se zvýšila pevnost v průměru o 9 %. U skupin, které byly vystaveny 800 °C, je vliv síranů ještě znatelnější. Skupina 6, která byla vystavená síranové korozi, vykazovala v průměru o 38,6 % lepší pevnost, než skupina 3. Vzorky vystavené síranům odolaly vysokým teplotám lépe než vzorky bez předchozí degradace.

Z měřených dat je tedy patrné, že se vlivem síranové koroze snížila pevnost betonu za normálních teplot. Ovšem během zahřátí vzorků na 400 °C došlo v betonu ke změnám, které vedly ke zlepšení tlakové pevnosti nejen oproti stejně zahřátým vzorkům, ale i referenčním, nijak nepoškozeným vzorkům. V případě zahřátí vzorků vystavených síranové korozi na 800 °C nebyl pokles tlakové pevnosti tak razantní a vzorky odolaly vysokým teplotám lépe. Tyto výsledky byly neočekávané vzhledem k tomu, že dlouhodobé působení síranů – obzvláště v takto vysokých koncentracích – způsobuje prokazatelné poškození struktury betonu. Tento jev je potvrzen skupinou 4, která po působení síranových iontů prokazatelně začala ztrácet pevnost.

Tab. 31: Srovnání tlakových pevností skupin nevystavených vysokým teplotám

| Skupiny vzorků nevystavené vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrných tlakových pevností | Průměr | Rozdíl |
|---|---------------------|--|--------|---------|
| | | MPa | MPa | % |
| Referenční skupiny | Skupina 1 | 70,2 | 69,1 | -13,4 % |
| | Skupina 7 | 68,0 | | |
| Skupiny vystavené roztoku síranu sodného | Skupina 4 | 59,8 | 59,8 | |

Tab. 32: Srovnání tlakových pevností skupin vystavených vysokým teplotám

| Skupiny vzorků vystavované vysokým teplotám | Označení skupiny | Hodnoty průměrných tlakových pevností | Rozdíl |
|---|---------------------|--|---------|
| | | MPa | % |
| Vzorky vystavené 400 °C | Skupina 2 | 71,2 | +8,9 % |
| | Skupina 5 | 77,5 | |
| Vzorky vystavené 800 °C | Skupina 3 | 21,3 | +38,6 % |
| | Skupina 6 | 29,5 | |

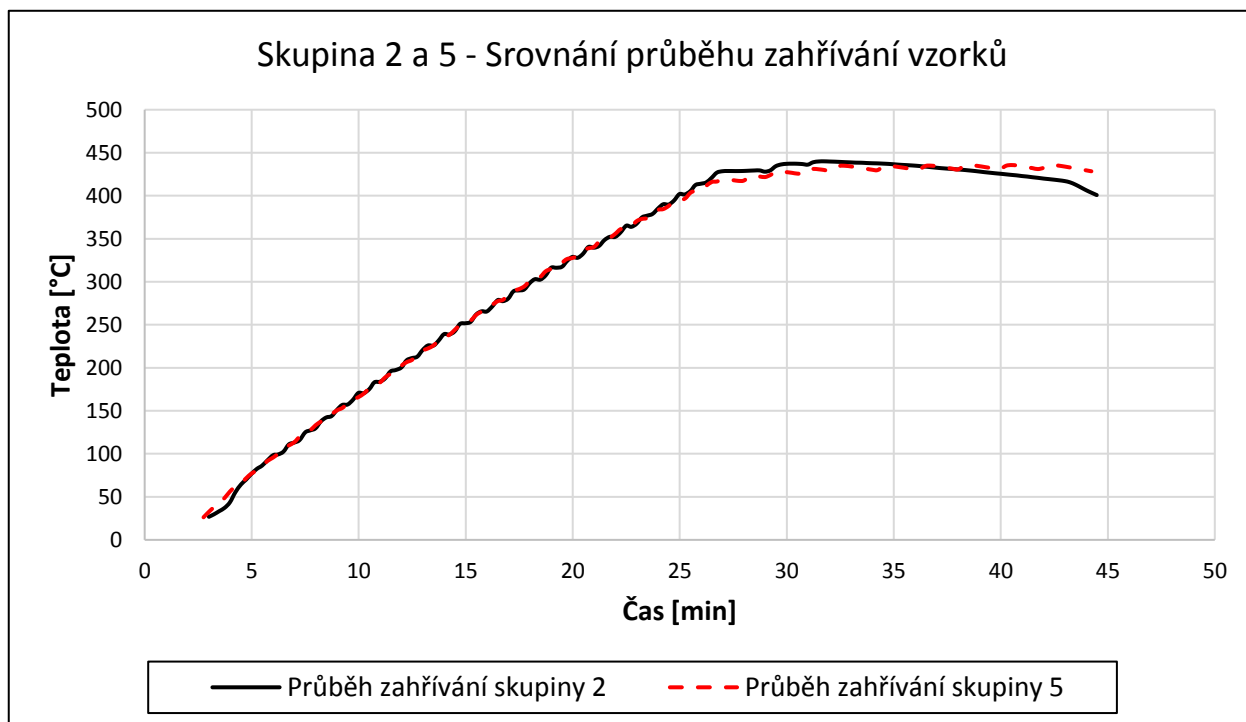
Vysvětlení vyšší tlakové pevnosti je možné najít v samotných degradačních produktech vznikajících v betonu po působení síranových iontů. Tím v betonu vzniká ettringit a sádrovec. Tyto produkty síranové koroze chemicky vážou velké množství vody. Během procesu zahřívání je spotřebována spousta energie, při dehydrataci této krystalově vázané vody. Tím nedochází uvnitř betonu k tak velkému ohřátí, jako v případě vzorků bez těchto minerálních struktur. Beton a jeho mechanické vlastnosti tím byly ochráněny před účinky vysokých teplot. Ettringit i sádrovec mají výbornou tepelnou akumulaci. Spotřeba energie, která je potřeba k dehydrataci sádrovce je popsána v [31]. Dehydratace ettringitu a jeho stabilita při vysokých teplotách je popsána v [32][33]. Dalším důvodem vyšší pevnosti betonových vzorků jsou následné dehydratované produkty, které po sádrovci a ettringitu v betonu zůstanou. Dehydratací sádrovce vzniká anhydrit (bezvodný síran vápenatý), který má jako samostatný materiál značnou pevnost podobnou betonu. Přeměna sádrovce v pórové struktuře na anhydrit je jedna z možností, jak lze vysvětlit zlepšení pevnosti vzorků vystavených kombinaci síranové koroze a zahřívání.

Tab. 33: Srovnání změn tlakové pevnosti

| Skupina | Označení vzorku | Tlaková pevnost | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|------------------------------|-----------|----------|--|-----------|----------|--|-----------|----------|------------------|-----------|----------|---|
| | | Vzorky nevystavené degradaci | | | Vzorky po vystavení roztoku síranu sodného | | | Vzorky po vystavením zvýšeným teplotám | | | | | | |
| | | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | 400 °C | | | Po 800 °C | | | |
| | | | | | | | | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | Naměřené hodnoty | \bar{x} | σ | |
| MPa | MPa | - | MPa | MPa | - | MPa | MPa | - | MPa | MPa | - | | | |
| 1 | referenční 1 | 61,98 | 70,2 | 5,8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | referenční 2 | 74,23 | | | - | | | - | | | - | | | - |
| | referenční 3 | 74,48 | | | - | | | - | | | - | | | - |
| 2 | 7-400 °C | - | - | - | - | - | - | 71,57 | 71,2 | 3,7 | - | - | - | |
| | 8-400 °C | - | | | - | | | 66,54 | | | - | | | |
| | 9-400 °C | - | | | - | | | 75,48 | | | - | | | |
| 3 | 4-800 °C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 21,83 | 21,3 | 0,6 | |
| | 5-800 °C | - | | | - | | | - | | | 21,59 | | | |
| | 6-800 °C | - | | | - | | | - | | | 20,38 | | | |
| 4 | 10-sírany | - | - | - | 60,52 | 59,8 | 0,6 | - | - | - | - | - | - | |
| | 11-sírany | - | | | 59,80 | | | - | | | - | | | |
| | 12-sírany | - | | | 59,12 | | | - | | | - | | | |
| 5 | 13-s+400 °C | - | - | - | - | - | - | 79,22 | 77,5 | 1,3 | - | - | - | |
| | 14-s+400 °C | - | | | - | | | 77,29 | | | - | | | |
| | 15-s+400 °C | - | | | - | | | 76,11 | | | - | | | |
| 6 | 16-s+800 °C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | x | 29,5 | 1,8 | |
| | 17-s+800 °C | - | | | - | | | - | | | 31,24 | | | |
| | 18-s+800 °C | - | | | - | | | - | | | 27,72 | | | |
| 7 | referenční 19 | 74,66 | 68,0 | 6,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | referenční 20 | 58,76 | | | - | | | - | | | - | | | |
| | referenční 21 | 70,57 | | | - | | | - | | | - | | | |

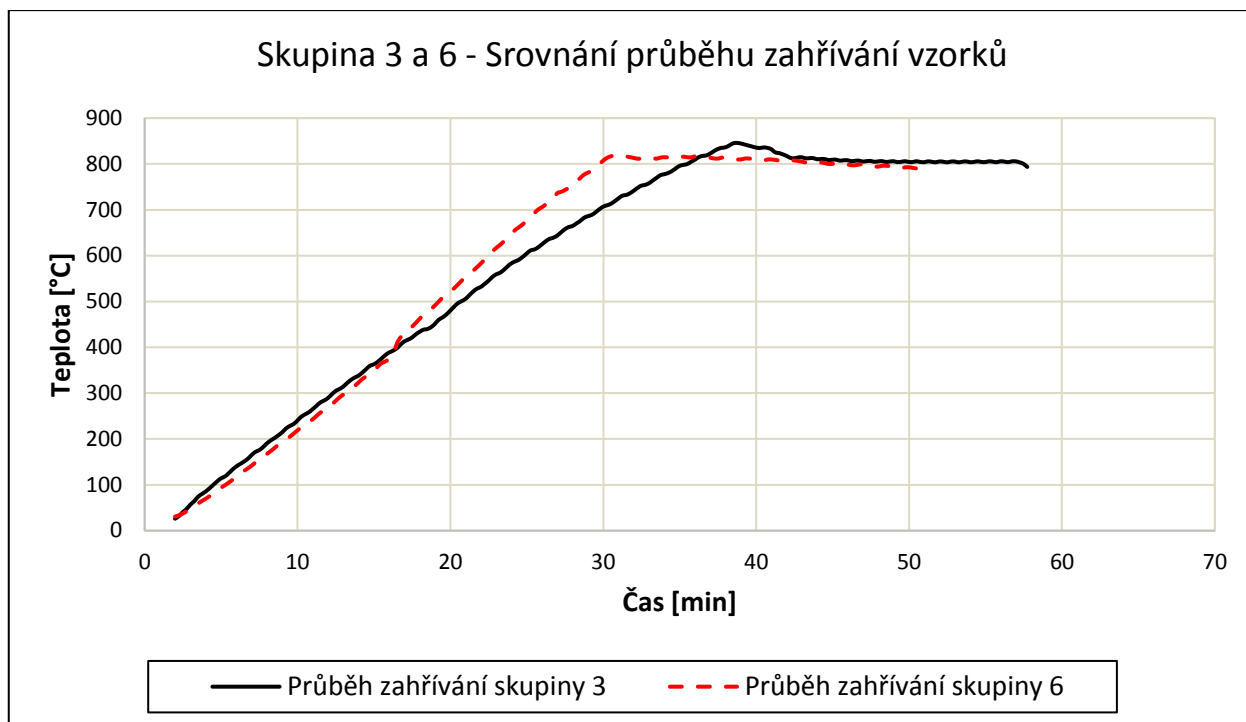
4.4 Vyhodnocení průběhu zahřívání

Když se vzorky vystavovaly vysokým teplotám, byla snaha, aby průběh zahřívání pro skupiny zatížené stejnou teplotou byl co nejpodobnější. Pro experiment je to velmi důležité. Skupiny vzorků musí projít stejnými podmínkami, aby se poté daly výsledky mezi sebou porovnávat. Na Obr. 46 je vidět průběh zahřívání skupiny 2 a 5, kde jsou zahřívací křivky téměř totožné a překrývají se.



Obr. 46: Srovnání průběhu zahřívání vzorků skupin 2 a 5

U zahřívacích křivek skupin 3 a 6 je vidět (Obr. 47), že v průběhu zahřívání skupiny 6 se objevil v 16 minutě a přibližně 370 °C náhlý teplotní skok. To bylo způsobeno roztříštěním vzorku 16 a uvolněním jeho naakumulovaného tepla do okolí termočlánků. Následoval rychlejší nárůst teploty, než je tomu u skupiny 3. Keramické dečky přenášely teplo do menšího počtu vzorků a tím se ohřívaly rychleji. Při dosažení teploty 800 °C se řídicí přístroj nastavil tak, aby se teplota dále pouze udržovala a po uplynutí 20 minut se zahřívání ukončilo. Ze srovnání zahřívacích křivek je patrné, že zbývající vzorky ze skupiny 6 byly vystaveny teplotě 800 °C po stejnou dobu, jako vzorky skupiny 3. Jednotlivé skupiny se tak mohly mezi sebou porovnat.



Obr. 47: Srovnání průběhu zahřívání vzorků skupin 3 a 6

Vzhledem k tomu, že byla teplota měřena pouze na povrchu betonových vzorků v kontaktu se zahřívajícími keramickými dečkami, nebyla možnost pozorovat vývoj teploty uvnitř vzorků (tento postup byl zvolen na základě malých rozměrů vzorků). Vzorky vystavené kombinaci síranové koroze a zahřívání vykazovaly vyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti a větší tlakovou pevnost. To naznačuje, že struktura betonu těchto vzorků nebyla zahříváním ovlivněna tolik, jako u vzorků bez působení síranů. Jednou z možností, jak tento jev vysvětlit, je spotřeba tepla na dehydrataci produktů síranové koroze. Dehydratace uvnitř struktury spotřebovala velké množství tepla a okolní beton nebyl tolik zahříván a jeho vlastnosti tak nebyly tolik poškozeny. Dokázat toto tvrzení by v budoucích experimentech mohlo umístění termočlánku do středu betonu už při výrobě vzorků. Ten by poté měřil teplotu při zahřívání, která by měla být nižší než u vzorků bez korozivních produktů obsahujících sírany.

5 Závěr

V této práci jsou shrnuty účinky chemické degradace na beton způsobené nebezpečnými látkami, které ohrožují vlastnosti betonu v agresivním prostředí. Podrobněji je popsán vliv síranové koroze z hlediska výskytu, průběhu a současného výzkumu. Síranová koroze na beton působí chemicko-fyzikální degradací, při které reagují ionty síranů s hydratovanými cementovými materiály za vzniku expanzivního ettringitu a sádry. Objemovou roztažností ettringitu, společně se spotřebou hydratovaných fází při chemických reakcích dochází ke vzniku mikrotrhlin a degradaci betonu. Také je věnována pozornost degradaci betonu v důsledku zahřívání vysokými teplotami vyvolanými například požárem. Teploty za způsobují spoustu chemických i fyzikálních změn a procesů, které ovlivňují materiálové vlastnosti betonu.

Hlavním cílem práce bylo zjistit společný účinek síranové koroze a zvýšených teplot na beton a jeho materiálové vlastnosti. Za tímto účelem byl zpracován experiment, během kterého se nejdříve betonové vzorky po dobu 11 týdnů vystavily 10% roztoku síranu sodného a poté se pomocí keramických deček zahřály na 400 °C, resp. 800 °C. Porovnáváním s referenčními vzorky se poté určovala míra degradace na změnách v objemové hmotnosti, dynamickém modulu pružnosti a tlakové pevnosti. Vzorky vystavené kombinovanému účinku síranové koroze a vysokým teplotám vykazovaly:

- Úbytek objemové hmotnosti, který byl oproti referenčním vzorkům vystavených vysokým teplotám razantnější. Důvodem byl větší obsah chemicky vázané vody v korozivních produktech obsahujících sírany před procesem zahřívání. Během zahřívání se z nich voda dehydratovala a tím vzorky ztrácely více hmotnosti.
- Vyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti než vzorky bez vystavení síranové korozi. Krátkodobé působení síranů na beton může některé materiálové vlastnosti zlepšit vyplněním pórové struktury expanzními materiály. Sádra a ettringit mají vynikající tepelné vlastnosti a vliv vysokých teplot na dynamický modul pružnosti nebyl tak velký.
- Vyšší hodnoty tlakové pevnosti při zahřátí na 400 °C než nepoškozené referenční vzorky. Je možné, že dehydratací sádry a ettringitu při nižších teplotách dochází ke zlepšení tlakové pevnosti betonu vyplněním pórové struktury pevnějšími fázemi těchto látek.
- Vyšší tlakovou pevnost při zahřátí na 800 °C než vzorky zahřáté na stejnou teplotu bez vlivu síranů. Sádra a ettringit jako hlavní produkty síranové koroze betonu obsahují velké množství chemicky vázané vody. Spotřeba energie na dehydrataci této vody je značná. Beton tak byl po určitou dobu před účinky vysokých teplot chráněn a mohl si tak lépe zachovat svou pevnost.

Lepší mechanické vlastnosti betonu vystaveného síranové korozi a vysokým teplotám mohou být ale dočasné. V případě dlouhodobého působení síranů na beton dochází k velmi závažným poškozením, které výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu a tím i reakci na vysoké teploty.

Během zahřívání se roztránil vzorek číslo 16, který byl vystaven síranové korozi a zahříván na 800 °C. Destrukce vzorku nastala při 370 °C. Nejpravděpodobněji za to mohla chemicky vázaná voda a její dehydratace ze sádry a ettringitu. Následné pórové napětí překonalo pevnost betonu a došlo ke zničení vzorku.

Dopad síranů a teploty na pevnost, dynamický modul pružnosti a objemovou hmotnost byl zajímavý, na první pohled nečekávaný (vzhledem k charakteru poškození betonu síranovou korozí), ale logický. Je nutný další výzkum pro lepší pochopení spolupůsobení mezi těmito dvěma degradačními vlivy. Skutečné mineralogické složení betonu po působení síranů a vysokých teplot nebylo zjištěno. Výskyt ettringitu a sádry byl předpovídán na základě literatury uvedené v kapitole 2. Sledování mineralogického složení a mikrostruktury poškozeného betonu by tak mohlo být navazující částí tohoto experimentu. Přineslo by to hlubší poznání společných chemicko-fyzikálních jevů způsobené síranovou korozí a vysokými teplotami. Dle předchozích výzkumů by k tomu byla vhodná skenovací elektronová mikroskopie a rentgenová difrakční analýza.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1: Hydratace cementových zrn při různém vodním součiniteli: 1 – cementové zrno, 2 – voda, 3 – nehydratovaný cement, 4 – hydratovaný cement, 5 – kapilární póry. Převzato z [6] | 5 |
| Obr. 2: krystaly ettringitu vyfocené elektronovou skenovací mikroskopií, Převzato z [26]..... | 14 |
| Obr. 3: Krystalizace na povrchu betonových vzorků dle pevnostních tříd. Převzato z [18] | 17 |
| Obr. 4: Výstup z XRD analýzy s vyznačenými fázemi ettringitu a sádrou. Převzato z [19]..... | 19 |
| Obr. 5: SEM snímky betonu vystaveného síranové korozi po 12 měsících. Převzato z [19] | 19 |
| Obr. 6: Tenkostěnné cementové válce po c) 105 dnech a po d) 112 dnech síranové koroze. Převzato z [24] | 20 |
| Obr. 7: Betonový vzorek vystavený 10 % roztoku Na_2SO_4 po dobu 1 a 12 měsíců. Převzato z [19] .. | 21 |
| Obr. 8: Porovnání povrchu vzorků vystavené destilované vodě a 10 % roztoku síranů a 3 % roztoku chloridů. Převzato z [20] | 22 |
| Obr. 9: Rozdíl vlivu vnější (3N) a kombinované (S3N) síranové koroze. Převzato z [14]..... | 22 |
| Obr. 10: Vážení složek betonové směsi a proces míchání směsi..... | 25 |
| Obr. 11: Ocelové formy připravené na vibračním stole..... | 25 |
| Obr. 12: Vibrování betonové směsi do forem | 26 |
| Obr. 13: Zhutněná betonová směs ve formě..... | 26 |
| Obr. 14: Keramické dečky pro ohřev vzorků | 27 |
| Obr. 15: Zdroj a řídicí jednotka pro ohřev keramických deček..... | 28 |
| Obr. 16: Termočlánek pro měření teploty vzorků | 29 |
| Obr. 17: Datalogger pro příjem a zpracování dat z termočlánků | 29 |
| Obr. 18: Schéma rozmístění vzorků do nádoby s roztokem | 31 |
| Obr. 19: Povrch vzorku po vystavení roztoku síranu sodného | 31 |
| Obr. 20: Vhodné způsoby porušení zkušebních krychlí. Převzato z [38]..... | 33 |
| Obr. 21: Zkušební lis v laboratoři FSV ČVUT | 33 |
| Obr. 22: Měření rychlosti prostupu ultrazvukových vln | 34 |
| Obr. 23: Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar ultrazvukového vlnění. Převzato z [42]..... | 35 |
| Obr. 24: Měření doby průchodu UZ impulsu materiálem. Převzato z [42]..... | 36 |
| Obr. 25: Porušení vzorku č. 1..... | 38 |
| Obr. 26: Nehořlavé ukládací bedny s žáruvzdornou tepelnou izolací..... | 39 |
| Obr. 27: Vzorky obalené v keramických dečkách..... | 40 |
| Obr. 28: Vzorky připravené na vystavení vysokým teplotám..... | 40 |
| Obr. 29: Skupina 2 – Průběh zahřívání vzorků..... | 41 |
| Obr. 30: Vzorek ze skupiny 2 ihned po vystavení vysokými teplotami | 41 |

| | |
|--|----|
| Obr. 31: Uložení vzorků do zahřívacích keramických deček..... | 43 |
| Obr. 32: Skupina 3 – Průběh zahřívání vzorků..... | 44 |
| Obr. 33: Vyjmutí vzorků skupiny 3 z úložné bedny..... | 44 |
| Obr. 34: Porušení povrchu vzorku ze skupiny 2 vysokými teplotami..... | 45 |
| Obr. 35: Zkušební vzorky v nádobě se síranovým roztokem | 47 |
| Obr. 36: Vzorky skupiny 5 připravené k zahřívání..... | 49 |
| Obr. 37: Skupina 5 – Průběh zahřívání vzorků..... | 49 |
| Obr. 38: Vzorek ze skupiny 5 ihned po vystavení vysokými teplotami | 50 |
| Obr. 39: Vzorky skupiny 6 připravené k zahřívání..... | 52 |
| Obr. 40: Vzorky skupiny 6 ihned po procesu zahřívání – vzorek č. 16 roztříštěn | 53 |
| Obr. 41: Tři vzorky ze skupiny 6 ihned po vystavení vysokými teplotami – poškozený povrch vzorků | 53 |
| Obr. 42: Skupina 6 – Průběh zahřívání vzorků..... | 54 |
| Obr. 43: Porušení vzorku po zkoušce tlakové pevnosti na hydraulickém lisu..... | 56 |
| Obr. 44: Srovnání dynamického modulu pružnosti dle skupin..... | 62 |
| Obr. 45: Srovnání tlakových pevností dle skupin..... | 64 |
| Obr. 46: Srovnání průběhu zahřívání vzorků skupin 2 a 5 | 67 |
| Obr. 47: Srovnání průběhu zahřívání vzorků skupin 3 a 6 | 68 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Hlavní slínkové minerály [2]..... | 3 |
| Tab. 2: Poměr složek ve směsi betonu | 24 |
| Tab. 3: Přehled zařazení vzorků do zkušebních skupin | 37 |
| Tab. 4: Skupina 1 – základní rozměrové hodnoty vzorků | 38 |
| Tab. 5: Skupina 1 – dynamický modul pružnosti | 38 |
| Tab. 6: Skupina 1 – tlaková pevnost | 39 |
| Tab. 7: Skupina 2 – základní rozměrové hodnoty vzorků před a po vystavení vysokým teplotám | 42 |
| Tab. 8: Skupina 2 – dynamický modul pružnosti | 42 |
| Tab. 9: Skupina 2 – tlaková pevnost | 42 |
| Tab. 10: Skupina 3 – základní rozměrové hodnoty vzorků..... | 45 |
| Tab. 11: Skupina 3 – dynamický modul pružnosti..... | 45 |
| Tab. 12: Skupina 3 – tlaková pevnost..... | 46 |
| Tab. 13: Skupina 4 – základní rozměrové hodnoty vzorků..... | 47 |
| Tab. 14: Skupina 4 – dynamický modul pružnosti..... | 47 |
| Tab. 15: Skupina 4 – tlaková pevnost..... | 48 |
| Tab. 16: Skupina 5 – základní rozměrové hodnoty vzorků..... | 50 |
| Tab. 17: Skupina 5 – dynamický modul pružnosti..... | 51 |
| Tab. 18: Skupina 5 – tlaková pevnost..... | 51 |
| Tab. 19: Skupina 6 – základní rozměrové hodnoty vzorků..... | 54 |
| Tab. 20: Skupina 6 – dynamický modul pružnosti..... | 55 |
| Tab. 21: Skupina 6 – tlaková pevnost..... | 55 |
| Tab. 22: Skupina 7 – základní rozměrové hodnoty vzorků..... | 56 |
| Tab. 23: Skupina 7 – dynamický modul pružnosti..... | 56 |
| Tab. 24: Skupina 7 – tlaková pevnost..... | 56 |
| Tab. 25: Porovnání objemových hmotností mezi skupinami..... | 58 |
| Tab. 26: Porovnání objemových hmotností vzorků před a po vystavení vysokým teplotám..... | 59 |
| Tab. 27: Srovnání změn objemových hmotností | 60 |
| Tab. 28: Porovnání dynamického modulu pružnosti mezi skupinami..... | 61 |
| Tab. 29: Porovnání dynamického modulu pružnosti vzorků před a po vystavení vysokým teplotám | 62 |
| Tab. 30: Srovnání změn dynamického modulu pružnosti..... | 63 |
| Tab. 31: Srovnání tlakových pevností skupin nevystavených vysokým teplotám | 65 |

| | |
|--|----|
| Tab. 32: Srovnání tlakových pevností skupin vystavených vysokým teplotám | 65 |
| Tab. 33: Srovnání změn tlakové pevnosti..... | 66 |

Literatura

- [1] ČSN EN 206-1. *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ČNI, 1998. 72 s.
- [2] ŠČUČKA, J., P. MARTINEC. *Stavební hmoty 1 – Beton*. Ostrava: VŠB, 2013. [online] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni_hmoty_II/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf
- [3] ČSN EN 197-1. *Cement – část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: ČNI, 2012. 36 s.
- [4] KHESTL, F., *Přednáška č. 6 – beton*. [přednáška] [online]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_c.6.pdf
- [5] GLASSER, F. P., J. MARCHAND a E. SAMSON. *Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions*. *Cem. Concr. Res.*, 38(2):226–246, 2008. ISSN 0008-8846.
- [6] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga Group, 2004. 471 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [7] PROCHÁZKA, J. a kol. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [8] BENEŠ M. a R. ŠTEFAN. *Hygro-thermo-mechanical analysis of spalling in concrete walls at high temperatures as a moving boundary problem*. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 85:110–134, 2015. ISSN 0017-9310
- [9] GERNAY, T. *Effect of transient creep strain model on the behaviour of concrete columns subjected to heating and cooling*. *Fire Technol.* 48(2):313–329, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0222-0>
- [10] GAWIN, D., F. PESAVENTO a B. SCHREFLER. *What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 1: physical phenomena and mathematical model*. *Int. J. Solids Struct.*, 48(13):1927–1944, 2011. ISSN 0020-7683
- [11] GAWIN, D., F. PESAVENTO a B. SCHREFLER. *What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 2: comparison between models*. *Int. J. Solids Struct.*, 48(13):1945–1961, 2011. ISSN 0020-7683
- [12] PROCHÁZKA, J. *Trvanlivost betonových konstrukcí*. [přednáška]. Praha: ČVUT, 2016.
- [13] *Dělení složek plynné směsi*. [online]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/17%20DeleniSlozekPlynnéSmesi.pdf
- [14] ZHAO, G., J. LI, M. SHI, H. FAN, J. CUI a F. XIE. *Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack*. *Constr. Build. Mater.*, 248:118683, 2020. ISSN 0950-0618
- [15] TP 175. *Stanovení životnosti betonových konstrukcí objektů pozemních komunikací*. Praha. Ministerstvo dopravy, 2006. 45 s

- [16] FIDRANSKÝ, P. *Mechanismy degradace betonu a železobetonu* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2016
- [17] CAMPOS A., C.M. L'ÓPEZ, A. BLANCO a A. AGUADO. *Effects of an internal sulfate attack and an alkaliaggregate reaction in a concrete dam*. *Constr. Build. Mater.*, 166:668–683, 2018. ISSN 0950-0618.
- [18] LIU, P., Y. CHEN, W. WANG a Z. YU. *Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions*. *Chem. Phys. Lett.*, 745:137254, 2020. ISSN 0009-2614
- [19] LI, J, F. XIE, G. ZHAO a L. LI. *Experimental and numerical investigation of cast-in-situ concrete under external sulfate attack and drying-wetting cycles*. *Constr. Build. Mater.*, 249:118789, 2020. ISSN 0950-0618.
- [20] ZHAO, G., J. LI, M. SHI, J. CUI a F. XIE. *Degradation of cast-in-situ concrete subjected to sulphatechloride combined attack*. *Constr. Build. Mater.*, 241:117995, 2020. ISSN 0950-0618
- [21] ROZIERE, E., A. LOUKILI, R. EI HACHEM a F. GRONDIN. *Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks*. *Cem. Concr. Res.*, 39(12):1188–1198, 2009. ISSN 0008-8846
- [22] PETRÁNEK, J., *Sírany* [online]. Geologická encyklopedie On-line. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?evaporit>
- [23] *Mineralogický systém – sírany* [online]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral/system.html#sirany>
- [24] MULLAUER, W., R. E. BEDDO a D. HEINZ. *Sulfate attack expansion mechanism*. *Cem. Concr. Res.*, 52:208–215, 2013. ISSN 0008-8846
- [25] SAHMARAN, M., T. K. ERDEM a I. O. YAMAN. *Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting–drying and heating–cooling environments*. *Constr. Build. Mater.*, 21(8):1771–1778, 2007. ISSN 0950-0618
- [26] ZHANG, J., M. SUN, D. HOU a Z. LI. *External sulfate attack to reinforced concrete under dryingwetting cycles and loading condition: Numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method*. *Constr. Build. Mater.*, 139:365–373, 2017. ISSN 0950-0618
- [27] LIU, F., Z. YOU, A. DIAH, Z. LIU, C. ZHAN, a S. GOU. *External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles*. *Constr. Build. Mater.*, 249:6118224, 2020. ISSN 0950-0618
- [28] NAIK N. N., A. C. JUPE, S. R. STOCK, A. P. WILKINSON, P. L. LEE a K. E. Kurtis. *Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate*. *Cem. Concr. Res.*, 36(1):144–159, 2006. ISSN 0008-8846

- [29] *Standard specifications for cements* [online]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/tools/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=672>
- [30] GAO, J., Z. YU, L. SONG, T. WANG a S. WEI. *Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles*. *Constr. Build. Mater.*, 39:33–38, 2013. ISSN 0950-0618.
- [31] HEJHÁLEK, J. *Sádrové materiály a jejich fyzikální vlastnosti*. Stavebnictví3000.cz. 2021. [online]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sadrove-materialy-a-jejich-fyzikalni-vlastnosti>
- [32] ZHOU, Q., F.P. GLASSER. *Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 °C*. *Cem. Concr. Res.*, 1333–1339, 2001. ISSN 0008-8846
- [33] CHEN, B., F.KUZNIK, M. HORGNIÉS, K. JOHANNES, V. MORIN, E. GENGEMBRE. *Physicochemical properties of ettringite/meta-ettringite for thermal energy storage: Review*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 320–334, 2019. ISSN 0927-0248
- [34] SUN, C., J. CHEN, J. ZHU, M. ZHANG a J. YE. *A new diffusion model of sulfate ions in concrete*. *Constr. Build. Mater.*, 39:39–45, 2013. ISSN 0950-0618
- [35] CEFIS, N. a C. COMI. *Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete*. *Cem. Concr. Res.*, 93:57–70, 2017. ISSN 0008-8846
- [36] Bezpečnostní list pro síran sodný podle Nařízení č 1907/2006 [online]. Dostupné z: https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/Siran_sodny.pdf
- [37] Příprava roztoků, Labguide [online]. Dostupné z: <https://labguide.cz/metody/priprava-roztoku/>
- [38] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ČNI, 2020
- [39] ČSN EN 12390-4: Pevnost v tlaku – požadavky na zkušební lisy. Praha ČNI, 2020
- [40] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2011
- [41] ČSN EN 12504-4: *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: ČNI, 2005
- [42] ANTON, O. a KOLEKTIV AUTORŮ. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení* [online]. Brno: CERM, nedatováno. Dostupné z: <https://katalog.vsb.cz/documents/118371?locale=cs>
- [43] *D_navod.pdf* [online]. Dostupné z: http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/BI002/D_navod.pdf