

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE
EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA
PÓROVÉHO TLAKU V BETONU VYSTAVENÉM
VYSOKÝM TEPLOTÁM

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF PORE PRESSURE IN
CONCRETE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES

Bc. Michal Macháč

vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Ing. Roman Chylík

2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Macháč Jméno: Michal Osobní číslo: 469074
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální a numerická analýza pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám
Název diplomové práce anglicky: Experimental and numerical analysis of pore pressure in concrete exposed to high temperatures
Pokyny pro vypracování:
Rešerše literatury
Analýza dostupných metod měření a výpočtu pórového tlaku v betonu vystavenému vysokým teplotám
Experiment
Výpočet
Vyhodnocení
Závěr
Seznam doporučené literatury:
KALIFA, Pierre. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. B.m.: Centre scientifique et T.
MUGUME RODGERS BANGI. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. B.m.: Hokkaido University, Japan.
PHAN, Long. T. Pore Pressure and explosive spalling in concrete. B.m.: Springer Nature B.V. 2008.
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 22.9.2021 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 uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

Obsah

Poděkování	III
Prohlášení	III
Abstrakt	IV
Abstract	IV
Seznam použitých symbolů a zkratk	V
1 Úvod	6
1.1 Motivace.....	6
1.1.1 Motivace.....	6
1.2 Stanovení výzkumné otázky	6
1.3 Cíle práce	6
2 Beton za zvýšených teplot	7
2.1 Procesy v betonu za zvýšených teplot.....	8
2.2 Pórový tlak	8
2.2.1 Termo-hydrální proces	8
2.2.2 Termo-mechanický proces.....	10
2.3 Odštěpování betonu.....	11
2.3.1 Typy odštěpování betonu	11
2.3.2 Faktory ovlivňující odštěpování.....	12
2.3.3 Obsah vody	12
2.3.4 Odštěpování vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů	12
2.3.5 Beton s polypropylenovými vlákami	13
2.4 Určení hodnoty pórového tlaku.....	13
2.4.1 Matematické modelování odštěpování betonu.....	13
2.4.2 Experimentální měření	14
2.4.3 Variace experimentálního měření	15
2.5 Experiment Ye-Li	16
3 Experimentální část	20
3.1 PŘEDCHOZÍ EXPERIMENT	20
3.1.1 Popis předchozího experimentu	20
3.1.2 Vyhodnocení předchozího experimentu	21
3.2 Modifikovaný experiment.....	21
3.2.1 Experimentální set-up	21
3.2.2 První měření	23
3.2.3 Druhé měření.....	24
3.2.4 Třetí měření.....	25
3.3 Experimentální měření 10/21	26
3.3.1 Čtvrté měření.....	26
3.3.2 Páté měření.....	28
3.3.3 Šesté měření	29
3.3.4 Vyhodnocení experimentů	29

3.3.5	Závěrečné měření	30
4	Porovnání matematických modelů s experimentálními hodnotami	35
4.1	Porovnání hodnot pórového tlaku	36
5	Závěr 37	
	Seznam obrázků.....	38
	Seznam tabulek.....	40
	Literatura 41	
6	Příloha - výsledky experimentů	43
6.1	Experimentální měření 10/21	43
6.1.1	Vývoj teplot měřicí soustava.....	43
6.2	Nárůst tlaku	44
6.2.1	Nárůst tlaku experiment 4	44
6.2.2	Nárůst tlaku experiment 5	44
6.2.3	Nárůst tlaku experiment 6	45
6.3	Vývoj teplot a tlaku - matematický model.....	46
6.4	Graf srovnání experimentů 4-6 a matematického modelu	47
6.5	Závěrečný experiment.....	48
6.5.1	Graf vývoje teploty a tlaku závěrečný experiment	51

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, Ing. Radkovi Štefanovi, za rady a doporučení, které mi pomohly při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Romanovi Chylíkovi za pomoc při provádění experimentů a zpracování výsledků. Tato diplomová práce byla vytvořena v rámci projektu Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS21/040/OHK1/1T/11.

Prohlášení

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

V Praze 11.12.2021

Podpis.....

Bc. Michal Macháč

Abstrakt

Práce se zabývá shrnutím poznatků o vzniku pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot. Teoretická část popisuje materiálové vlastnosti ovlivňujících pórový tlak a odštěpování povrchu betonu. V práci jsou popsány experimenty zabývající se experimentálním měřením pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot. V experimentální části je navržen dosud nepublikovaný způsob měření pórového tlaku. Záměrem této práce je navržení experimentu, aby nebyly naměřené výsledky ovlivněné technologickými vlivy, ale jen rozdíly ve fyzikálních vlastnostech testovaných betonových směsí.

Klíčová slova

měření; pórový tlak; beton; vysoké teploty; odštěpování; požár; termo-mechanický proces; termo-hydrální proces; experiment

Abstract

The work deals with the summary of knowledge about the formation of pore pressure in concrete at elevated temperatures. Furthermore, the theoretical part describes the material properties affecting the pore pressure and spalling of the concrete surface. The work describes experiments dealing with experimental measurement of pore pressure in concrete at elevated temperatures. In the experimental part, a hitherto unpublished method of measuring pore pressure is proposed. The aim of this thesis is to design an experiment so that the measured results of pore pressure are not affected by technological influences, but only differences in the physical properties of the tested concrete mixtures.

Keywords

measurement; pore pressure; concrete; high temperatures; spalling; fire; thermo-mechanical process; thermo-hydral process; experiment

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

θ, T	Teplota	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
\varnothing	Průměr	m
l	Délka	m
p	Tlak	Pa
p^{gw}	Tlak vodní páry	Pa
p^{ga}	Tlak suchého vzduchu	Pa
p^{w}	Tlak kapalné vody	Pa
p^{gws}	Tlak nasycených par	Pa
p_0^{ga}	Tlak vzduchu	Pa
χ	Kontaktní úhel	$^{\circ}$
M^{w}	Molární hmotnost	kg/mol
R	Molární plynová konstanta	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Řecké symboly

ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
σ	Napětí	Pa
Φ	Relativní vlhkost	%

1 Úvod

1.1 Motivace

1.1.1 Motivace

Pórový tlak je známý jev vznikající v betonu za zvýšených teplot. Pórový tlak je možné popsat pomocí různých matematických modelů, ale je relativně komplikované experimentálně změřit jeho hodnotu. Jelikož neexistuje standardizovaný postup pro toto měření, výsledky a získaná data mohou být značně ovlivněna měřicí technikou a tím znemožněno nezkreslené porovnání změřených hodnot.

1.2 Stanovení výzkumné otázky

Práce se bude zabývat modifikaci neúspěšného experimentu provedeného v diplomové práci [20].

Záměrem práce je standardizace měření pórového tlaku, aby nebyly naměřené výsledky ovlivněné technologickými vlivy, ale jen rozdíly ve fyzikálních vlastnostech testovaných betonových směsí.

1.3 Cíle práce

Hlavními cíli práce jsou:

- 1) Shrnutí poznatků o pórovém tlaku
- 2) Analýza neúspěšného experimentu z diplomové práce [20]
- 3) Modifikace a provedení experimentu měření pórového tlaku
- 4) Porovnání matematických modelů s experimentálními hodnotami

2 Beton za zvýšených teplot

Beton je stavební materiál používaný převážně pro nosné konstrukce. Skládá se z cementového pojiva, kameniva, vody, přísad a příměsí. Součástí betonu bývá také ocelová výztuž přenášející převážně tahové síly. Beton je nehořlavý materiál, ale působením zvýšených teplot je negativně ovlivněný. Při vystavení betonových konstrukcí zvýšeným teplotám dochází k fyzikálním, chemickým a mechanickým procesům. Tyto procesy v betonu mohou zanechat vratné nebo trvalé změny mechanických, teplotních a fyzikálních vlastností. [2]

Betonové směsi lze rozdělit na dvě skupiny podle vztahu k požární odolnosti. Beton skupiny A – betonová směs z umělého nebo přírodního pórovitého kameniva, popřípadě z jiného pórovitého kameniva s objemovou hmotností $\rho \leq 1800 \text{ kg/m}^3$. Beton skupiny B – betonová směs z hutného kameniva s objemovou hmotností $\rho \geq 1800 \text{ kg/m}^3$. Dále z hlediska požární bezpečnosti rozlišujeme beton žáruvzdorný odolávající teplotám až do $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ a beton tepelně izolační, tj. beton s vysokým tepelným odporem. [1]

Dále ovlivňuje požární odolnost betonových konstrukcí i způsob jejich vyztužení. Rozlišuje beton nevyztužený a vyztužený, specifický případ vyztuženého betonu je beton předpjatý.

2.1 Procesy v betonu za zvýšených teplot

Vlivem zvyšujících teplot dochází k fyzikálním, chemickým a mechanickým procesům, které jsou popsány v tab. 1. Pro řešenou práci jsou nejvýznamnější procesy spojené vypařováním vody a tepelnou roztažností materiálu. [3]

Teplota betonu* θ [°C]	Proces
20–100	Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandit).
100	Začíná dehydratace cementového tmelu – uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
200+	Dochází k uvolňování vázané vody.
300+	Pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandit) za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.
550–600	Dochází k fázové změně křemene (v silikátovém kamenivu) z triklinické soustavy na soustavu hexagonální. To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700–750	Vrcholí druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého (CSH).
800+	Hydraulické vazby v cementovém tmele přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při které vzniká oxid uhličitý (CO_2) – plynná látka rozrušující beton.
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000+	Začíná tavení některých složek betonu.
1200+	Celkové tavení materiálu.
*) Hodnoty teploty jsou pouze orientační. Symbol „+“ znamená „a více“.	

tab. 1: Přehled procesů a změn v betonu při vystavení zvýšeným teplotám [1]

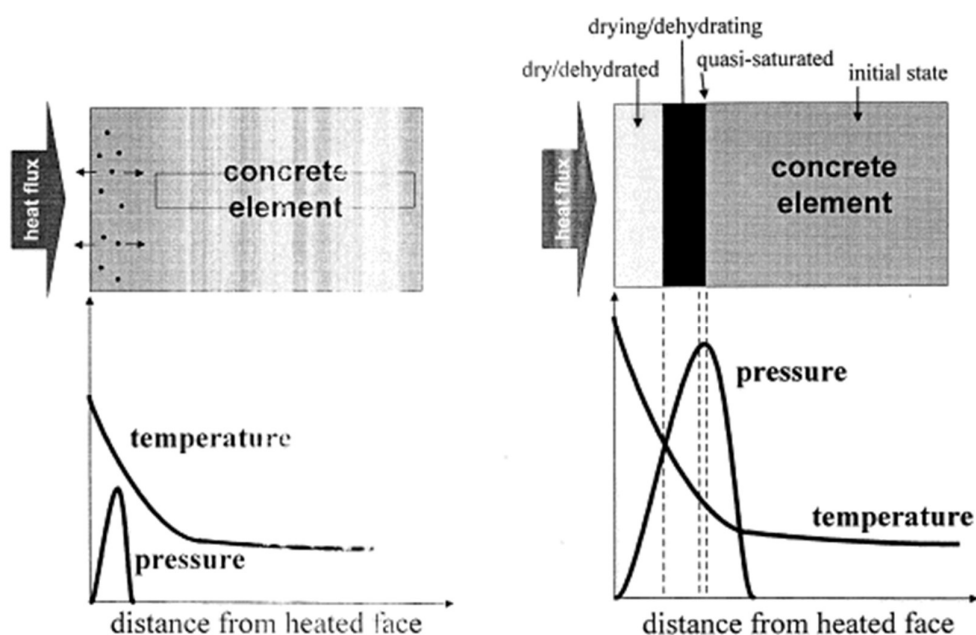
2.2 Pórový tlak

Za zvýšených teplot dochází v betonu k termo-mechanickým a termo-hydrálním procesům. Výsledkem těchto dvou hlavních procesů je odštěpování vrchních vrstev betonu. Tato práce je zaměřena převážně na pórový tlak, který je spojen hlavně s termo-hydrálním procesem v betonu. [4]

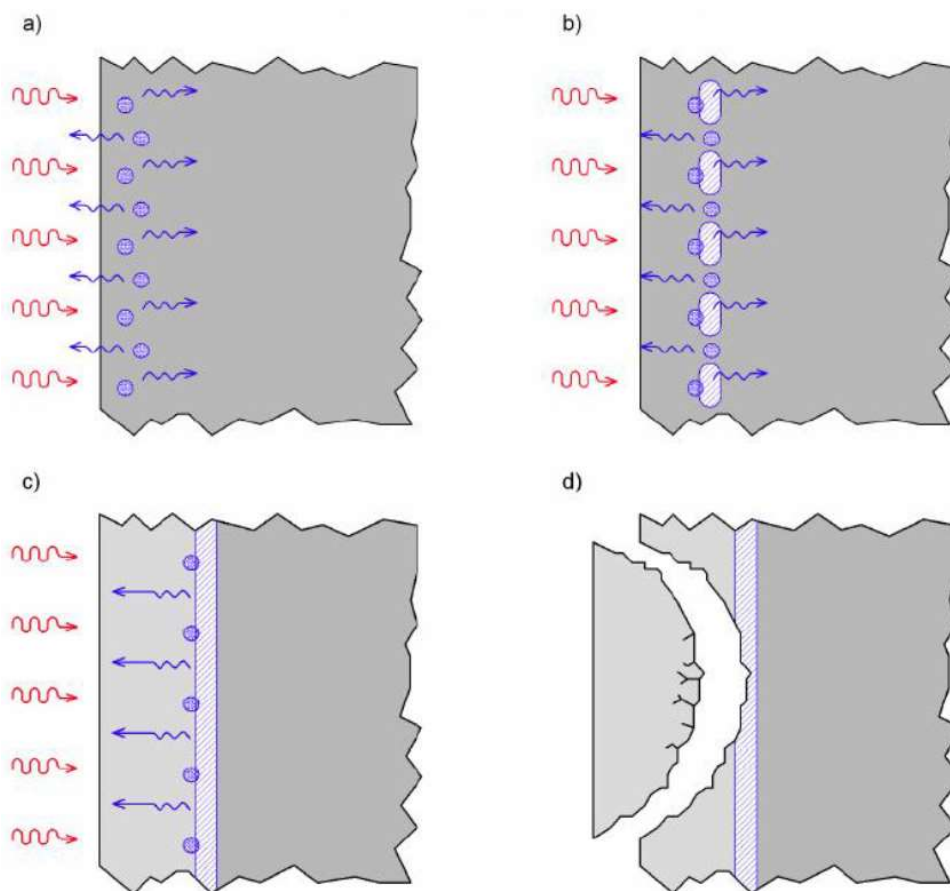
2.2.1 Termo-hydrální proces

Termo-hydrální proces je spojen s přesunem hmoty (vzduch, vodní pára a voda) v pórovém systému betonu viz obr. 1. Zvyšováním teploty dochází k vypařování vody obsažené v betonu a tím i zvětšení její objemu. Prvně dochází k vypařování fyzikálně vázané vody v betonu, která se vypařuje při teplotách nad 100 °C. Další zvyšování teploty způsobuje dehydrataci cementového tmelu a následné vypařování vody uvolněné z cementového tmelu. Vypařování vody způsobuje

nárůst tlaku v pórovém systému betonu. Tlakový gradient je hlavní hnací silou pro přenos hmoty. Pára a vzduch jsou částečně přesouvány na ohřátý povrch, ale také migrují do středu prvku, kde pára opět kondenzuje, jakmile jsou splněny termodynamické podmínky. Dochází k vytvoření kvazi-nasycené vrstvy. Po určité době dochází k vytvoření tří vrstev v betonu od zahřívání strany, zbytek betonového prvku se nemění. Dochází k vytvoření suché/dehydratované vrstvy, sušící/dehydratační vrstvy a kvazi-nasycené vrstvy. Kvazi-nasycená vrstva působí jako nepropustná zeď pro plyny. Nejvyšší tlak se nachází v nasycené vrstvě, která se nachází na rozmezí kvazi-nasycené vrstvy a zbytku nezměněného betonového prvku. Čím nižší je propustnost materiálu, tím dříve (a čím blíže k ohřátému povrchu) se tato vlhkost ucpává a tím je vyšší tlak a tlakový gradient. [4, 5]



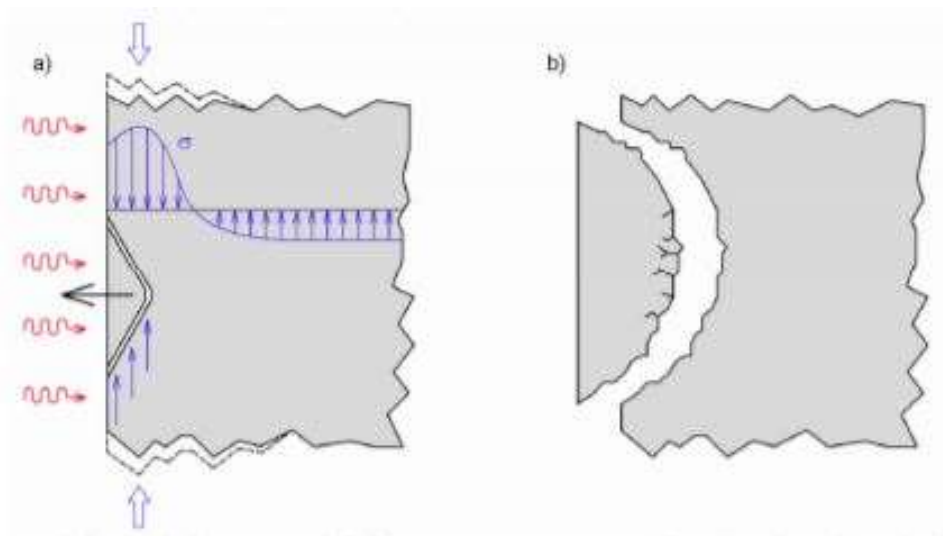
obr. 1: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-hydrálním procesu [5]



obr. 2: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-hydrálním procesu [6]

2.2.2 Termo-mechanický proces

Termomechanický proces je spojen s teplotním polem v betonovém prvku. Teplotní gradienty indukují gradienty tepelné dilatace, které generují tahová napětí kolmá k vyhřívané ploše. V tomto procesu dochází k nekompatibilitě chování cementové pasty a ostatních složek betonu. Zatím co ostatní složky betonu se roztahují, dokud nedojde k jejich chemickému rozložení, cementová pasta se smršťuje dehydratací vody z cementové pasty. Toto rozdílné tepelné chování je důležitým zdrojem degradace matrice betonu. [5]



obr. 3: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-mechanickém procesu [6]

2.3 Odštěpování betonu

Odštěpování vrchních vrstev betonu je výsledkem termo-mechanických a termo-hydrálních procesů v betonu při vystavení zvýšeným teplotám. Hlavní rizika vyplývající z odštěpování betonu jsou: exponování ocelové výztuže v betonu účinkům požáru nebo např. rychlost odštěpovaných kusů betonu pro jednotky HZS. Při exponování výztuže v betonu dochází k vyššímu nárůstu teploty ve výztuži a tím i rychlejšímu poklesu pevnosti výztuže a zhoršení schopnosti výztuže přenášet zatížení.



obr. 4: Prvky po vystavení účinku zvýšených teplot [6]

2.3.1 Typy odštěpování betonu

Odštěpování betonu při vysokých teplotách lze rozdělit do následujících kategorií:

- Výbušné odštěpování
- Povrchové odštěpování
- Odštěpování kameniva

- Odštěpování v rohu
- Odštěpování po ochlazení
- Odpadávání

V případě požáru se obvykle vyskytuje několik z těchto různých druhů odštěpování současně; záleží na době, po kterou je beton vystaven požáru. Je obtížné rozlišit mezi některými typy odštěpování, zejména mezi výbušným a povrchovým odštěpováním. [4]

2.3.2 Faktory ovlivňující odštěpování

Rozhodující faktory vedoucí k nárůstu explozivnímu odlupování betonu při vysokých teplotách lze rozdělit do tří hlavních kategorií [4]:

Parametry související s materiálem

Výzkum odštěpování betonu při vysokých teplotách identifikoval několik parametrů souvisejících s materiálem s velkým vlivem na odštěpování. Mezi tyto parametry patří: obsah křemičitého úletu, typ plniva (křemík, vápenec, čedič), vlastnosti plniva (pórovitost, objemová hmotnost), velikost zrn plniva, vnitřní trhliny, pevnost v tlaku, obsah vody, obsah cementu, stáří betonového prvku. [4]

Konstrukční / mechanické parametry

Hlavní strukturální / mechanické parametry s významným vlivem na odštěpování jsou: pevnost v tahu, způsob zatížení prvku, omezení teplotní roztažnosti prvků (fixace konců prvku), geometrie průřezu. [4]

Zdroj tepla

Z hlediska parametrů, které závisí na charakteristikách ohřevu, má rychlost ohřevu a tím způsobené teplotní přechody silný vliv na odštěpování. Hlavní parametry ovlivňující odštěpování betonu: rychlost ohřevu, teplotní gradient, absolutní teplota, expozice na více površích. [4]

2.3.3 Obsah vody

Jeden z nejvýznamnějších parametrů ovlivňující vznik a velikost pórového tlaku a tím odštěpování betonu je obsah vody v betonu. Obsah vody se váže s poměrem vody/cementu v betonu. Pro úplnou hydrataci cementové pasty je minimální poměr vody / cementu (w / c) 0,4. Vysoký obsah vlhkosti v betonu vede k uvolňování velkého množství páry, což zvyšuje pórový tlak v betonu za zvýšených teplot a zvyšuje riziko odštěpování. Dostatečná vyžrálost snižuje množství vlhkosti uvnitř betonu. Při vlhkosti ≤ 3 % hm. betonu – odštěpování nepravděpodobné. Při vyšší vlhkosti betonu je nutno posoudit. [4]

2.3.4 Odštěpování vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů

Vysokohodnotné betony (HPC) včetně vysokopevnostních betonů (HSC) jsou náchylnější k porušení při požáru (zejména k odštěpování) než betony běžné. Předpokládá se, že

vysokohodnotné a vysokopevnostní betony jsou náchylnější k nárůstu pórového tlaku kvůli své nízké propustnosti ve srovnání s betonem s betony standardními. Extrémně vysoký tlak vodní páry, vznikající při vystavení ohni, nemůže uniknout kvůli vysoké hustotě HPC a HSC a tento tlak často dosahuje hodnot tlaku nasycených par. Tlak nasycené vodní páry může dosáhnout hodnoty kolem 8 MPa. Takové vnitřní tlaky jsou často příliš vysoké na to, aby jim odolávala směs HPC a HSC s pevností v tahu asi 5 MPa. [4]

Skupina	Beton (pevnostní třída)
skupina 1	C55/67, C60/75
skupina 2	C70/85, C80/95
skupina 3	C90/105

tab. 2: Skupiny HSC betonu dle ČSN EN 1992-1-2 [1]

Pro betony ze skupin 1 a 2 (C55/67 až C80/95), které mají obsah křemičitého úletu < 6 % hm. cementu, platí pravidla jako pro běžné betony z hlediska návrhu na odštěpování. Pokud obsah křemičitého úletu ≥ 6 % hm. cementu, nebo je použit beton skupiny 3 je nutno provést minimálně jedno opatření uvedené v ČSN EN 1992-1-2. [4]

- **Metoda A:** Použití sítě sekundární výztuže s betonovým krytem 15 mm. Výztužná síť by měla mít maximální rozteč 50 mm s výztužnými pruty s minimálním průměrem 2,0 mm.
- **Metoda B:** Použití betonové směsi, která nemá tendenci k výbušnému odštěpování při vysokých teplotách, jak dokazují testy nebo místní zkušenosti.
- **Metoda C:** Použití ochranné vrstvy k zajištění, že nedojde k odštěpování.
- **Metoda D:** Do betonové směsi se použijí polypropylenová vlákna v množství $> 2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.3.5 Beton s polypropylenovými vlákny

Polypropylenové vlákna jsou v betonu používány z důvodu zvětšení pórů obsažených v betonu. Vlákna se nejvíce využívají v betonech s nízkou pórovitostí, teda ve vysokohodnotných a vysokopevnostních betonech. Při zvyšujících se teplotách dochází k roztátí polypropylenových vláken při teplotách přibližně 160 – 170 °C. Roztátí polypropylenových vláken způsobuje vznik nových pórů v betonu. Důsledkem tohoto jevu je snížení pórového tlaku v betonu a ulehčení úniku vodní páry mimo konstrukce skrze nové propojené póry. [9]

2.4 Určení hodnoty pórového tlaku

Určení hodnoty pórového tlaku a případný vznik odštěpování betonu se provádí dvěma způsoby. První metoda je matematické modelování pórového tlaku. Druhá metoda je založena na měření pórového tlaku pomocí experimentů a měřících přístrojů.

2.4.1 Matematické modelování odštěpování betonu

Matematické modelování pórového tlaku a odštěpování betonu je založeno na třech hlavních úkolech: (1) Termální analýza, (2) akumulované teplo a problém přesunu hmoty, (3) predikce odštěpování. [10]

Termální analýza betonových prvků ovlivňuje hlavně: obsah vody v betonu, odštěpování betonu a tvar betonového prvku. Modelování termální analýzy vychází z práci [11] Bergheau a Fortnunier a [12] Purkiss. Modelování je prováděno jako jedno, dvoj, anebo troj-rozměrná úloha. Teplotní analýza prvku je v inženýrské praxi prováděná pomocí výpočetních softwarů.

Akumulované teplo a přesun hmoty v betonu je založeno na hydro-termálním a mechanických vlastnostech betonu. Hlavní modely pro akumulované teplo a přesun hmoty patří model "single-fluid-phase" od [13] Bažant a Thonguthai a "multi-fluid-phase" model na základě práci [13]. Single-fluid-phase je založen na jedné fázi volné vody (chemicky nevázané) obsažené v m³ betonu. Multi-fluid-phase obsahuje chemicky vázanou vodu, nasáklou a volnou (kapilární) vodu a směs plynů obsahující suchý vzduch a vodní páry.

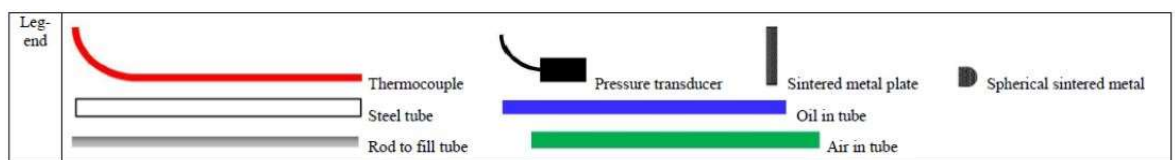
Predikce odštěpování jsou pojaty v třech přístupech modelování odštěpování. První model je založen na simulaci odštěpování na základě růstu pórového tlaku od [17] Dwaikat a Kodur. Druhý model na základě analýzy lomové energie za účelem předpovědi odštěpování kusů betonu ze zahřívání betonové zdi způsobené pórovým tlakem a tepelným namáháním od [18] Zeiml a kol. Třetí model je založen na přístupu pohybujícího se hraničního poškození navrženo v rámci práce [10] Štefan k předpovědi rizika odštěpování betonových stěn v důsledku nárůstu pórových tlaků a vývoji tepelného napětí.

2.4.2 Experimentální měření

Přesné měření nárůstu tlaku pórů v betonovém materiálu za zvýšené teploty je nesmírně důležité pro lepší pochopení mechanismů explozivního odštěpování a validaci matematických modelů. Současný způsob měření tlaku a teploty pórů je však problémem kvůli vysoké teplotě a riziku explozivního odštěpování betonu, které může poškodit měřidla. Výsledkem je, že různé studie vyvinuly různé techniky pro měření tlaku v pórech. tab. 3 shrnuje nastavení pro měření pórového tlaku v betonu za zvýšené teploty. [19]

No.	Design of pressure gage	Type of gage head	Placement of thermocouple	Inner diameter of tube (mm)	Medium in tube	Free cross section (mm ²)	Maximum pressure (MPa)	Agreement with SVP
1		Tube	External	unknow	Rod	unknow	0.76	Lower than SVP
2		Tube	External	1	Air	0.785	3.1	Equal to SVP
3		Tube	External	4	Air	12.56	0.49	Lower than SVP
4		Tube	External	2	Diameter 1.5 mm rod	1.37	3.5	Lower than SVP
5		Tube	External	2	Hydraulic jack oil	0	8.4	Higher than SVP
							4.7	Higher than SVP
							0.7	Lower than SVP
							1.4	Lower than SVP
							1.25	Equal to SVP
6		Sintered metal plate	Internal	1.6	Diameter 1.5 mm thermocouple	0.24	4.0	Higher than SVP
							3.7	Higher than SVP
							2.5	Unknow
							1.2	Higher than SVP
							2.75	Unknow
							6.17	Higher than SVP
							5.0	Higher than SVP
7		Sintered metal plate	External	1.5	Silicon oil	0	5.0	Unknow
7		Sintered metal plate	External	1.5	Silicon oil	0	4.2	Higher than SVP
							5.0	Unknow
8		Sintered metal plate	Internal	2	Diameter 1.5 mm thermocouple	1.37	0.25	Lower than SVP
9		Sintered metal	External	2	Silicon oil	0	1.2	Equal to SVP
				Unknow	Unknow	unknow	2.52	Unknow
10		Sintered metal plate	External	1.6	0	0	2.1	Lower than SVP
								Lower than SVP
11		Spherical sintered metal	Internal	2	0	0	1.32	Higher than SVP
							1.6	Unknow
							1.6	Lower than SVP
							2.5	Higher than SVP

tab. 3: Přehled nastavení pro měření pórového tlaku v betonu za zvýšené teploty. [19]



obr. 5: Legenda navrhovaných tlakových měřičů. [19]

2.4.3 Variace experimentálního měření

Vysoká teplota uvnitř betonových prvků může způsobit poškození tlakových senzorů zabudovaných přímo do betonu. Z tohoto důvodu je měření tlaku vyváděno pomocí měřících trubiček mimo betonových prvků a následně měření tlak na volném konci měřící trubičky.

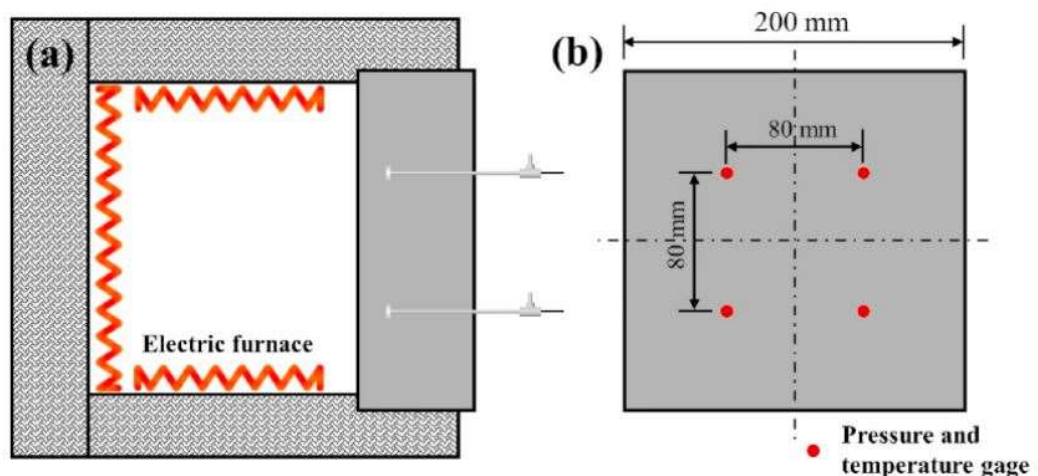
Vodící trubičky se od sebe mohou lišit. Rozdíl je v použití samotné trubičky, nebo trubičky na konci s kalíškem se slinutým porézním diskem. Slinutý porézní disk je používán pro rovnoměrné sbírání vodní páry větší plochy. Další rozdíl je v umístění termočlánku. Termočlánek je umístěn vně, nebo uvnitř měřicí trubičky. Prázdný prostor v trubičkách může dále způsobit zpoždění nárůstu pórového tlaku, proto se v některých případech přistupuje k naplnění trubičky olejem. Trubička může být naplněna vzduchem, silikónovým olejem, hydraulickým olejem, nebo ocelovou tyčí o menším průměru. Expanze oleje při zvýšené teplotě však může způsobit další hydraulický tlak. Poslední rozdíl je v průměru použité trubičky. [19]

2.5 Experiment Ye-Li

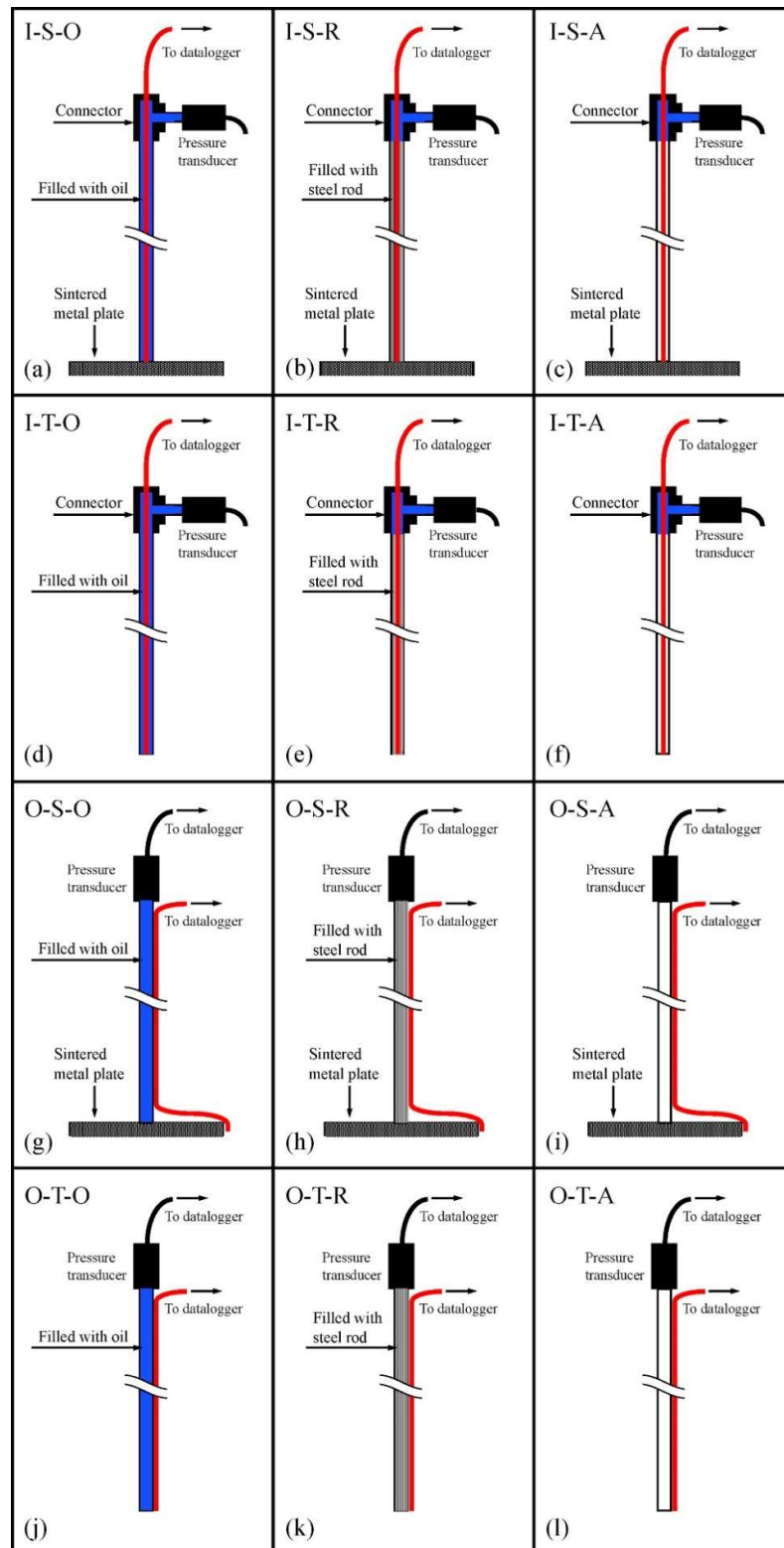
Řešený příklad v této práci bude vycházet na základě experimentů provedeného [3] Ye-Li.

Pro experiment byly použity vzorky z ultra vysokohodnotných betonů (UHPC). Vzorky byly ze směsi portlandského cementu ASIA@ CEM I 52,5 N, přírodní říční písky s maximálním průměrem 600 μm , mikro křemičité písky se střední velikostí částic 130 μm , oxid křemičitý, superplastifikátor na bázi polykarboxylátu, válcová polypropylénová vlákna o délce 12 mm a průměru 30 μm . Poměr vody k pojivu byl udržován na 0,2 a pevnost v tlaku vzorku UHPC je $148,7 \pm 3,3$ MPa.

obr. 6 ukazuje schematické nastavení experimentu. Zahřívání vzorků bylo pomocí elektrické topné pece. K izolaci bočních ploch vzorku byla použita minerální vlna, aby bylo zajištěno jednosměrné zahřívání vzorku. Zahřívání probíhalo otvorem v elektrické topné peci rychlostí 10 $^{\circ}\text{C} / \text{min}$. Po dosažení 600 $^{\circ}\text{C}$ byla teplota pece udržována konstantní, dokud měřený tlak ve vzorku neklesl na nízké hodnoty. Bylo připraveno šest vzorků se dvěma různými vzory měřidel na každém vzorku. Každý návrh měření se jednou opakoval. Čtyři měřidla byla umístěna ve střední oblasti všech vzorků. Měřicí hlavy byly 25 mm od zahřátého povrchu. Během testu byl další termočlánek umístěn 20 mm před vyhřívaným povrchem, aby se sledovala teplota.

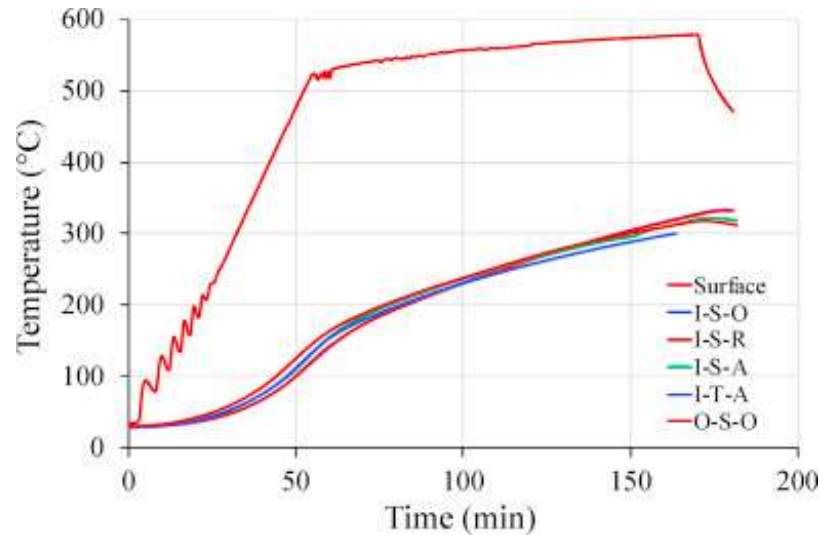


obr. 6: (a) Schéma experimentálního nastavení, (b) umístění měřících hlav. [3]



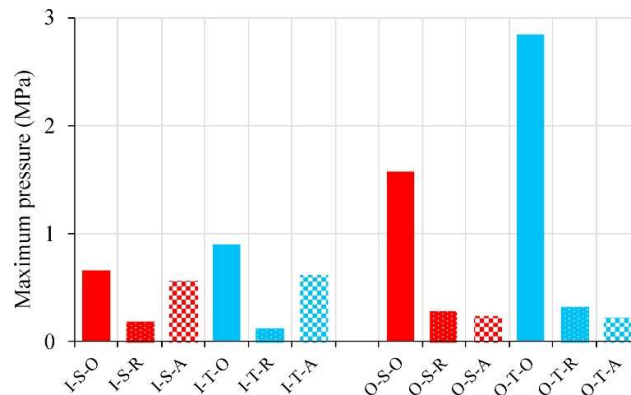
obr. 7: Konfigurace experimentálního uspořádání s rozdíly v typu měřících hlav, umístění termočlánků a použitou náplní trubičky. [3]

obr. 8 představuje vývoj teploty na měřicích hlavách, kde T znamená teplotu. Rychlost ohřevu pece byla nastavena na $10\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$, teplota na povrchu vzorků se zvyšovala o něco pomaleji. V důsledku zahrnutí 3 kg/m^3 polypropylenových vláken nedošlo k žádnému výbušnému odštěpování. Z obr. 8 je teplotní vývoj spojený s pěti technikami měření téměř identický. Proto různé konstrukce tlakoměrů pórů neovlivňují vlastnosti přenosu tepla a měření teploty.



obr. 8: Vývoj teploty na měřicích hlavách [3]

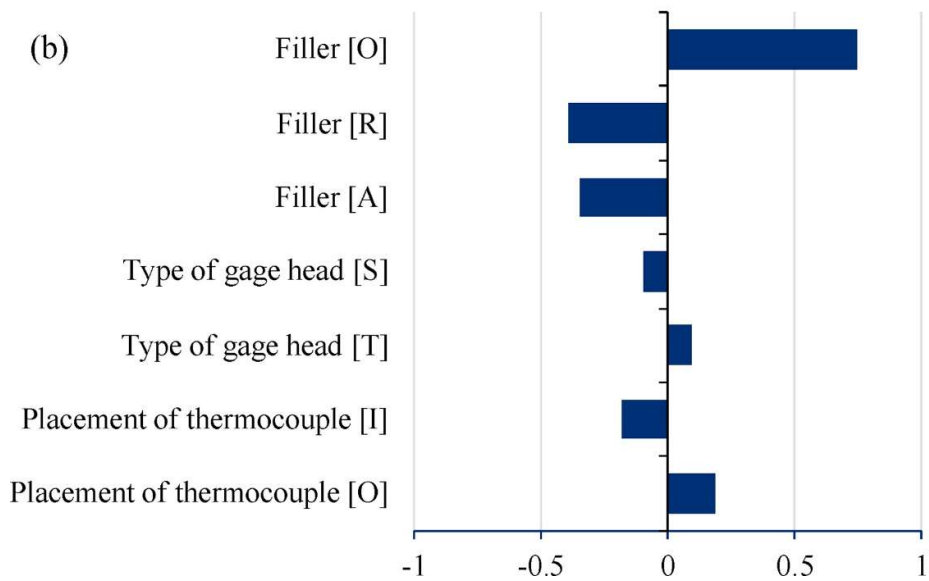
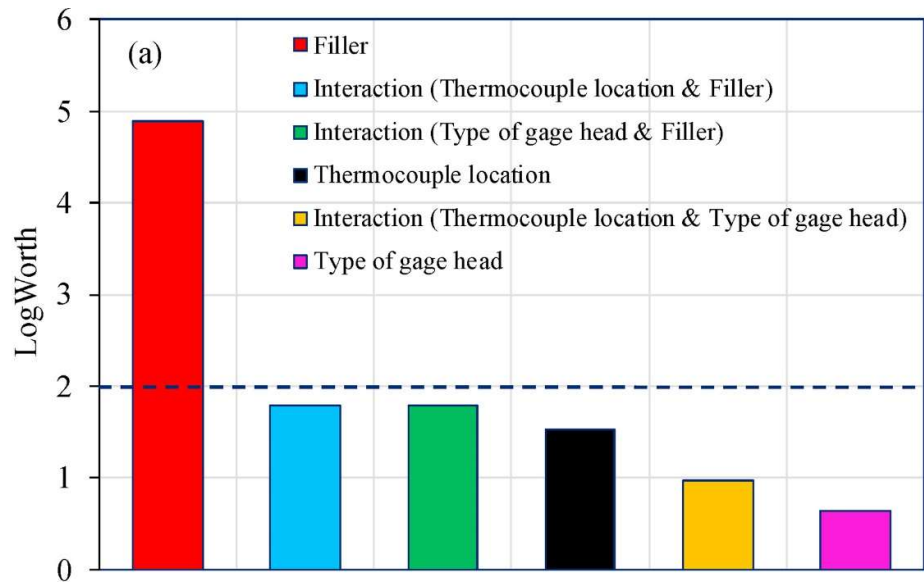
obr. 9 shrnuje maximální pórový tlak zaznamenaný u každé měřicí techniky. Maximální zaznamenaný pórový tlak měřicích technik (tj. I-S-O, I-T-O, O-S-O a O-T-O) s olejovou náplní je vyšší než u jejich protějšků naplněných ocelovou tyčí nebo vzduchem. Je to proto, že buď naplnění ocelovou tyčí, nebo ponechání prázdné trubky ponechá příliš mnoho volného objemu pro akumulaci vlhkosti. V důsledku toho by bylo ovlivněno nahromadění pórového tlaku v betonu.



obr. 9: Maximální pórové tlaky použitých tlakoměrných sestav [3]

Výsledky experimentu byly analyzovány statistickým softwarem JMP s použitím analytické techniky "nejmenších čtverců". Použitím softwaru bylo zjištěno dominantního parametru na účinek měření. Na Obr. 10a je vidět, že typ plnidel má vysoký vliv na měření maximálního

pórového tlaku. Na druhou stranu, účinky umístění termočlánků a hlavy s navařeným slinutým porézním diskem nejsou na měření pórového tlaku významné.



obr. 10: Vliv faktorů na maximální změřený pórový tlak [3]

3 Experimentální část

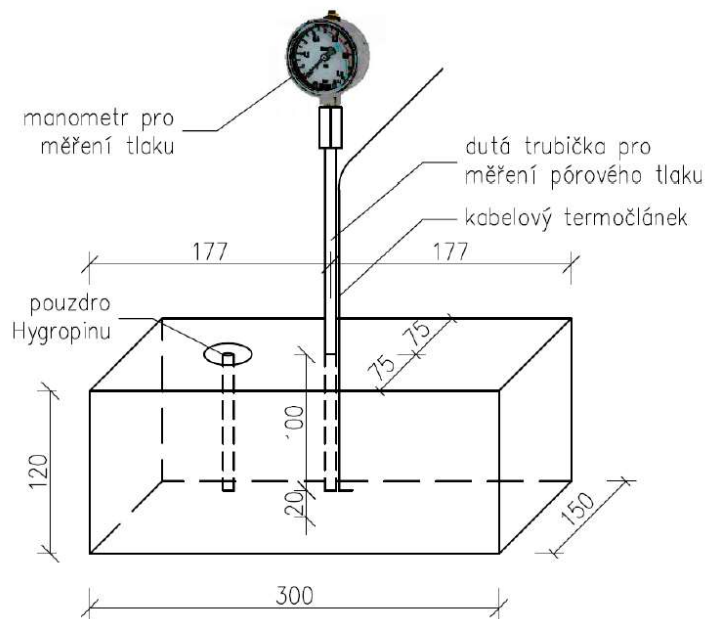
Řešený příklad v této práci bude vycházet z neúspěšného experimentu provedeného v diplomové práci [20] a experimentů popsanych v publikaci [3]. Záměrem práce je modifikace experimentu z diplomové práce [20] a další modifikace provedení experimentu, aby nebyly naměřené výsledky ovlivněné technologickými vlivy, ale jen rozdíly ve fyzikálních vlastnostech testovaných betonových směsí. [21]

3.1 PŘEDCHOZÍ EXPERIMENT

3.1.1 Popis předchozího experimentu

Pórový tlak byl měřen na betonových vzorcích rozměru 150 x 300 x 120 mm (š x d x v). Vzorky byly osazeny přenosovou ocelovou trubičkou průměru 8 mm s tloušťkou stěny 2 mm. Přenosová trubička byla na svém povrchu doplněna plášťovým termočlánkem pro měření teploty v místě sběrné části. Experiment byl variantně proveden s dvěma přenosovými médii v trubičce (silikonový olej, vzduch). Sběrná část se nacházela 20 mm od zahřívávaného povrchu.

Měření pórového tlaku bylo prováděno pomocí mechanického manometru, který byl umístěn na konci přenosové trubičky mimo vzorek. Vzorky byly vystaveny tepelnému záření z keramických podložek. [20]



obr. 11: Schéma betonového vzorku s rozmístěním měřičů [20]

3.1.2 Vyhodnocení předchozího experimentu

Ačkoliv byl experiment popsáných v diplomové práci [20] proveden na základě úspěšných experimentů uvedených v publikaci [3], pórový tlak se nepodařilo naměřit. Při vyhodnocení byly stanoveny tyto hlavní příčiny neúspěchu měření. [21]

Zakončení přenosové trubičky

Přenosová trubička nebyla ukončena sběrným kalíškem ani porézním kovem. Toto provedení je možné a běžné v publikaci [3], ale dochází k omezení sběrné plochy, ze které je pórový tlak měřen. Dále je bez použití sběrného kalíšku vnesena značná náhodnost měřené oblasti, jelikož beton nelze považovat za materiál homogenní. Rovněž bylo při odbedňování vzorků detekováno zatečení cementového mléka do přenosové trubičky. [21]

Délka přenosové trubičky

Za nevyhovující byla dále vyhodnocena délka přenosové trubičky. Trubička byla mezi vzorkem a manometrem ochlazována. V případě, kdy byla trubička naplněna vzduchem, docházelo ke kondenzaci vodní páry na vnitřním povrchu trubičky, čímž byl eliminován nárůst tlaku. Ve variantě, kdy byla přenosová trubička naplněna olejem, bylo pozorováno snížení hladiny a vznik volného prostoru ke kondenzaci vodní páry. [21]

Chybějící izolace na povrchu vzorku

Jelikož v měřeních v publikaci [3] probíhal ohřev vzorku v elektrických nebo plynových pecích, byly zkušební vzorky zahřívány po celém povrchu nebo z jedné strany s tím, že zbylé strany byly izolovány. Jelikož vodní pára putuje materiálem ve směru největšího teplotního gradientu, chybějící tepelná izolace na povrchu vzorku ovlivnila rozložení teplot, vodní pára unikala povrchem vzorku, nedocházelo k hromadění vodní páry v pórovém systému a vzniku nasycené vrstvy vlivem transportu vodních par. [21]

Nedostatečný teplotní gradient zahřívání

S ohledem na použité zahřívací zařízení nebylo dosaženo běžně využívaných teplotních křivek, avšak rychlost zahřívání má vliv zejména na změřenou hodnotu pórového tlaku, ne však na jeho výskyt. [21]

3.2 Modifikovaný experiment

Na základě experimentu z magisterské práce [20] došlo k úpravě experimentu s ohledem na dostupné technické vybavení.

3.2.1 Experimentální set-up

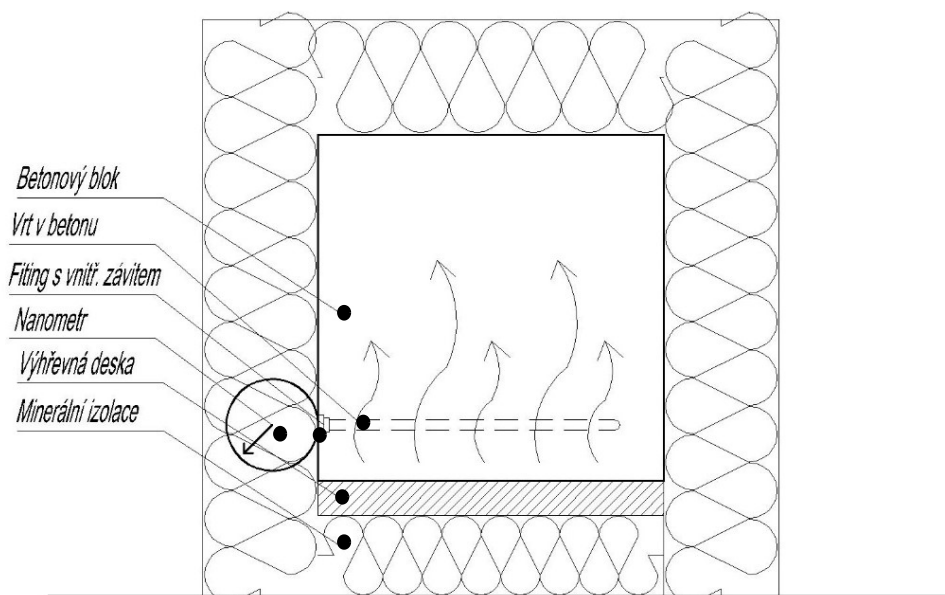
Experiment je prováděn na betonových krychlích o rozměru hrany 150 mm. Složení betonu viz tab. 4. V složení betonu dochází k úpravám v poměru složek s důvodu zdokonalení měření.

Složka	kg/m ³
CEM I 42,5 - Mokrý	400
voda	180
Kamenivo 0 - 4	1080
Kamenivo 4 - 8	650
Plastifikátor	4

tab. 4: Složení betonu ve vzorku

Bylo navrženo inovativní, doposud nepublikované řešení, které spočívalo v umístění kovového přípravku (fitinku) s vnitřním závitem do tělesa při betonáži a následné provedení vrtu, který je vodorovný s rovinou zahřívání vzorku (sběrný vrt se nachází v isothermě a isobaře). Fitink je umístěný ve vzdálenosti 25 mm od zahřívajícího povrchu. Toto řešení umožňuje volit délku a průměr vrtu, čímž je ovlivněna plocha, ze které je pórový tlak měřen. Toto řešení vede k eliminaci vlivu nehomogenity betonu v místě měřeného místa. Měření pórového tlaku bylo prováděno pomocí mechanického manometru, který byl umístěn v kovovém přípravku (fitinku) přímo na hraně betonové krychle. Spojení přípravku a manometru jsou opatřeny hydroizolační páskou. Ve shodné výškové úrovni (25 mm od zahřívajícího povrchu) je umístěný vrt s umístěným kabelovým termočlánkem pro měření teploty v úrovni vrtu pro měření pórového tlaku. Betonová krychle je ze všech stran obalena minerální vlnou. [21]

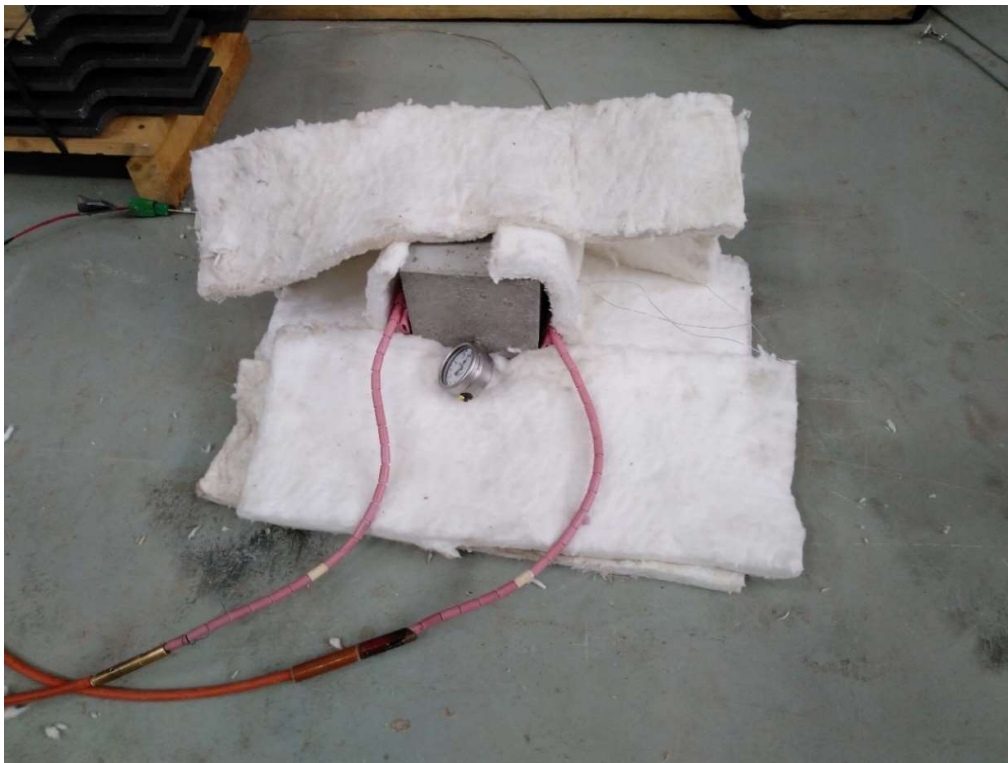
Pro zahřívání vzorku je používána keramická topná dečka shodná s dečkou používanou v experimentu z magisterské práce [20]. Mezi topnou deskou a vzorkem je umístěný plášťový termočlánek pro měření teploty na povrchu vzorku. Vzorek byl zahříván křivkou s teplotním gradientem 700 °C/hod, jedná se o 7 výkonnostní stupeň zahřívací soustavy.



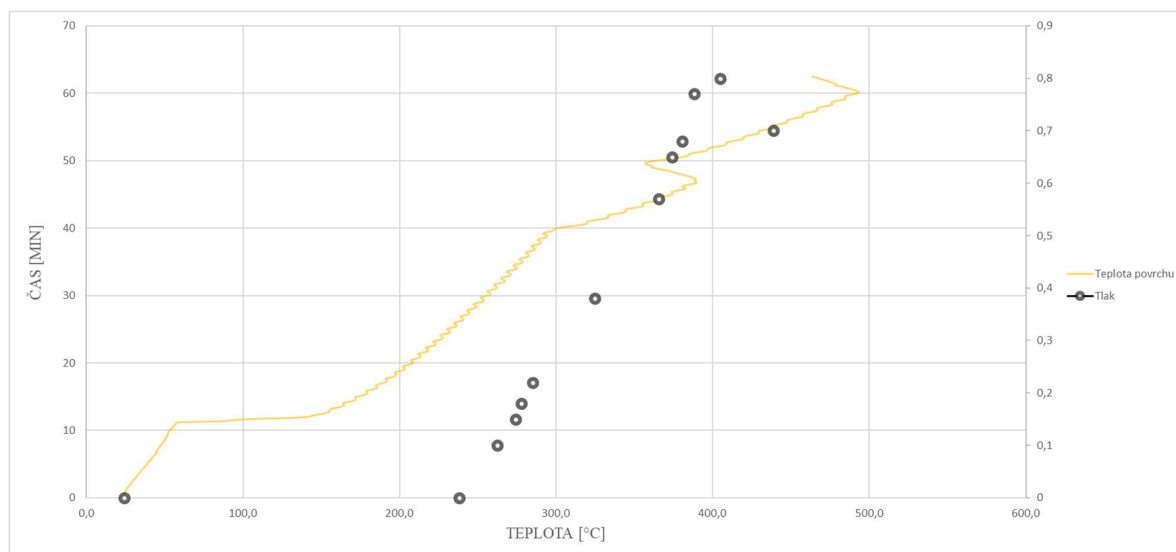
obr. 12: Schéma upraveného experimentu

3.2.2 První měření

Na obr. 14 je prezentován prvotní záznam úspěšného měření za použití modifikovaného experimentálního set-up z 24.03.2021. Prvotní nárůst pórového tlaku byl zaznamenán v 31 minutě od začátku zahřívání vzorku. V 54 minutě dochází k maximálnímu naměřenému pórovému tlaku o výši 0,8 MPa. Následně dochází k poklesu měřených hodnot.



obr. 13: První měření pórového tlaku - fotografie



obr. 14: První měření pórového tlaku – tlak, teplota

Pro grafy porovnávající teplotu, čas a tlak jednotlivých měření byla zvolena teplota jako srovnávací měřítko, která leží na ose X. Na hlavní ose Y (levá) se nachází časový průběh experimentů a na vedlejší ose Y (pravá) se nachází vývoj tlaků.

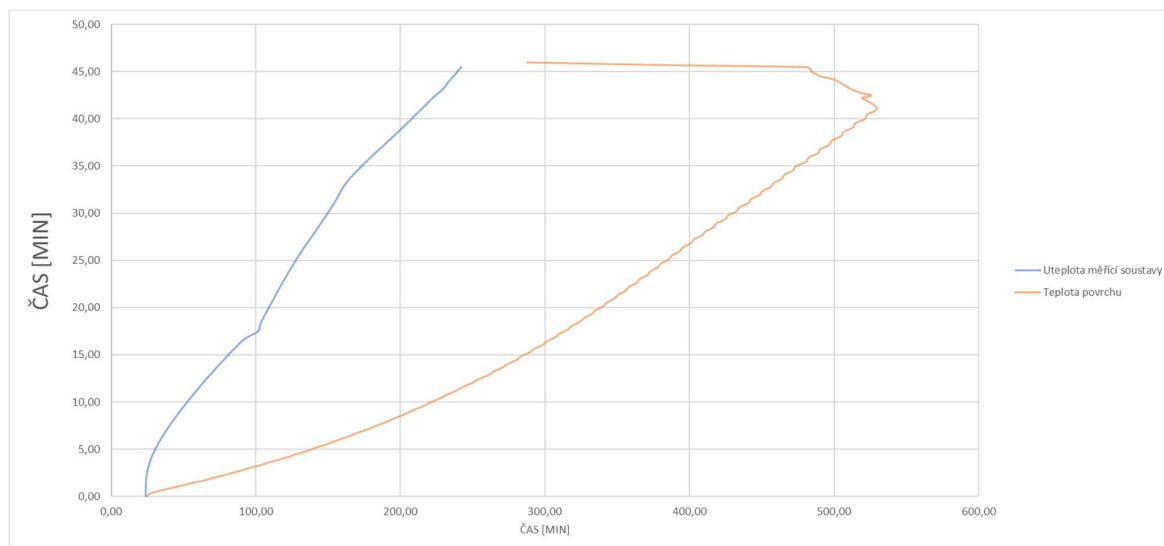
3.2.3 Druhé měření

Druhé měření pórového tlaku bylo provedeno 28.04.2021. Měření bylo prováděno na dvou shodných betonových krychlích.

Set-up v druhém měření byl mírně poupraven. Došlo k prodloužení kovového přípravku (fitinku) o dva články z důvodu ochrany měřicí soustavy. Fitinku byl naplněn topným olejem. Pokus byl neúspěšný, nedošlo k naměření pórového tlaku. Neúspěšné měření je způsobeno únikem vodní páry (a tím i tlaku) ve spoji fitinku osazeného ve vzorku a fitinku přidávaného z důvodu chybějící hydroizolační pásy.



obr. 15: Druhé měření pórového tlaku - fotografie



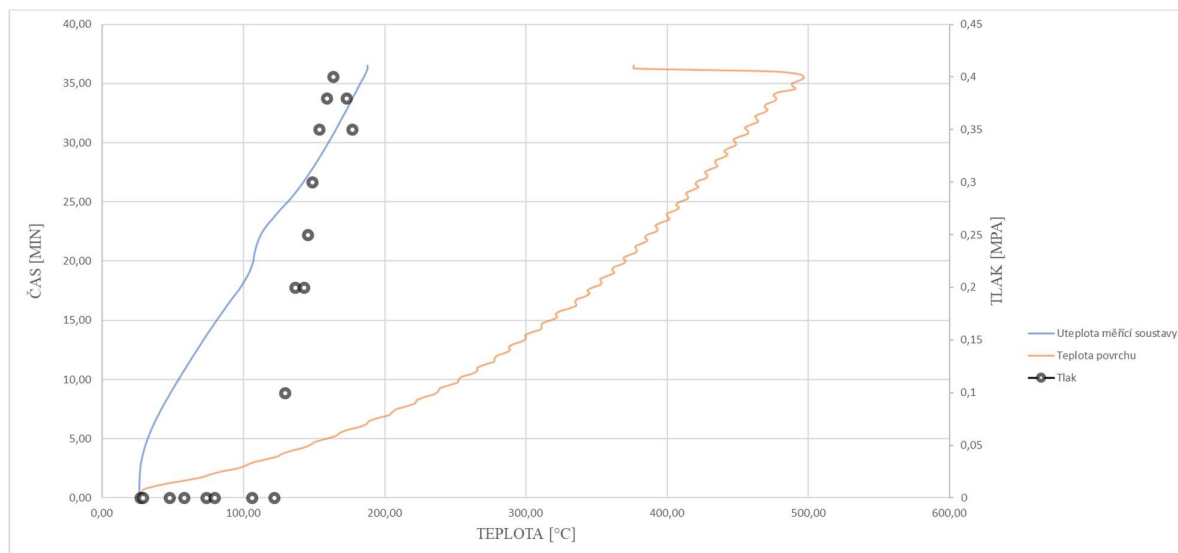
obr. 16: Druhé měření pórového tlaku –teplota

3.2.4 Třetí měření

Set-up třetího měření byl zachován beze změn. Fitink nebyl naplněn topným olejem. Pokus byl úspěšný, ale došlo k přibližně polovičním naměřeným tlakům v porovnání s pokusem z 24.03.2021. V 28 minutě měření byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,4 MPa. Tento rozdíl mezi hodnotami měření z 24.03.2021 je způsoben rozdílným stářím prvku, rozdílnou vlhkostí vzorku a rozdílnou rychlostí zahřívání.



obr. 17: Třetí měření pórového tlaku - fotografie



obr. 18: Třetí měření pórového tlaku –tlak, teplota

3.3 Experimentální měření 10/21

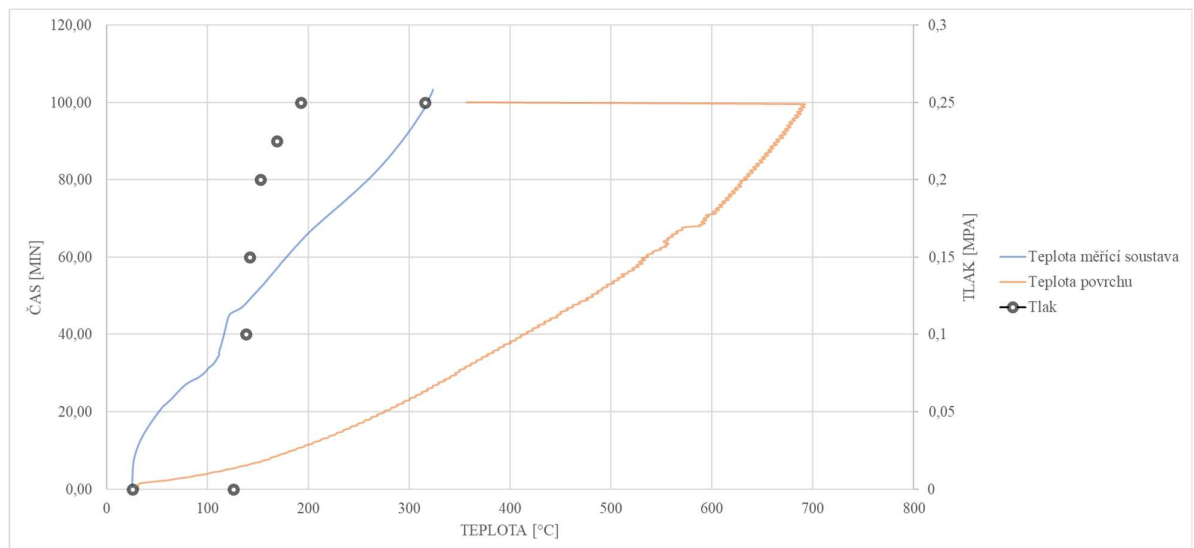
Čtvrté, páté a šesté měření z října 2021 vycházelo z poznatků získaných z předešlých měření. Měření vycházela na základě stejného experimentálního set-upu, jako přenosové médium byl použit vzduch. V čtvrtém, pátém a šestém byly vzorky před testováním uloženy ve vodě z důvodu zajištění 100 % relativní vlhkosti vzorku. Čtvrtý vzorek byl izolován minerální vatou, pátý a šestý vzorek byly ponechány bez izolace.

3.3.1 Čtvrté měření

Ve čtvrtém měření byl zachován set-up z předchozích měření, vzorek byl izolován minerální vatou. Relativní vlhkost vzorku byla 100%. Fitink nebyl naplněn topným olejem. V 64 minutě měření byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,25 MPa při teplotě 192 °C ve vzorku. Maximální tlak ve čtvrtém měření byl přibližně poloviční, jako v pátém a šestém měření.



obr. 19: Čtvrté měření pórového tlaku - fotografie



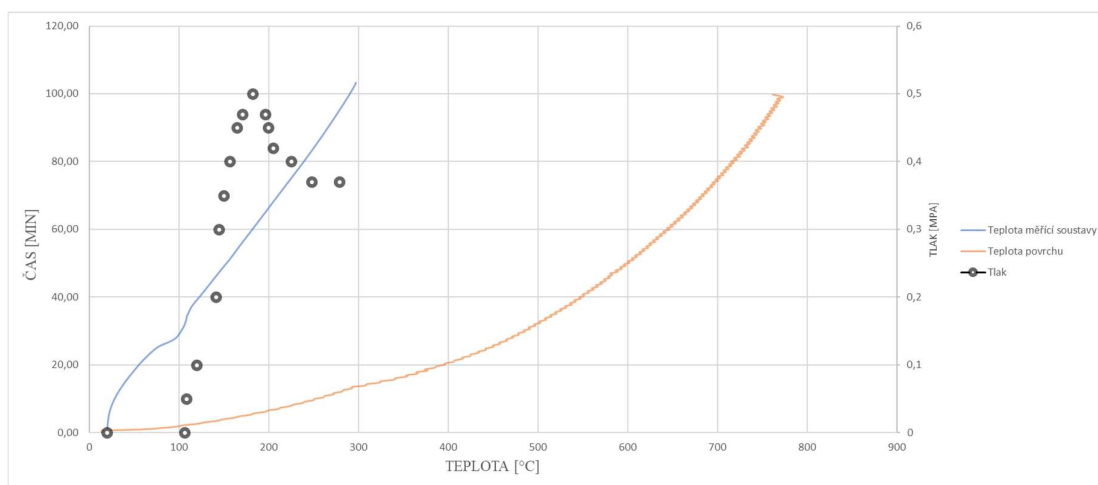
obr. 20: Čtvrté měření pórového tlaku –tlak, teplota

3.3.2 Páté měření

V pátém měření byl upraven set-up z předchozích měření, vzorek nebyl izolován minerální vatou. Relativní vlhkost vzorku byla 100%. Fitink nebyl naplněn topným olejem. V 60 minutě měření byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,50 MPa při teplotě 182 °C ve vzorku.



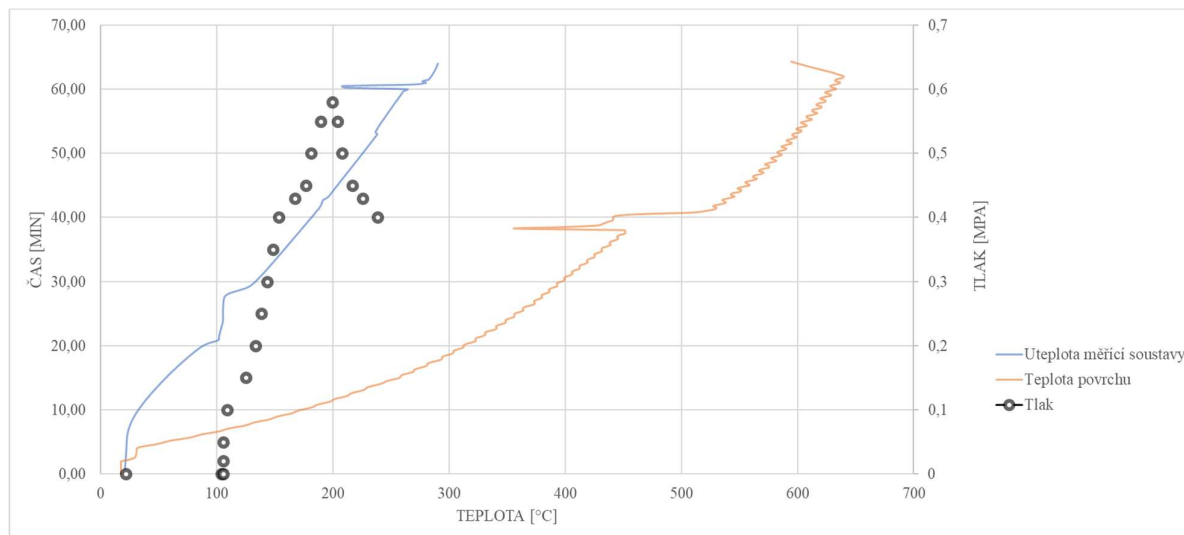
obr. 21: Páté měření pórového tlaku - fotografie



obr. 22: Páté měření pórového tlaku – tlak, teplota

3.3.3 Šesté měření

V šestém měření byl zachován set-up z předchozích měření, vzorek nebyl izolován minerální vatou. Relativní vlhkost vzorku byla 100%. Fitink nebyl naplněn topným olejem. V 44 minutě měření byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,58 MPa při teplotě 199 °C ve vzorku.



obr. 23: Šesté měření pórového tlaku – tlak, teplota

3.3.4 Vyhodnocení experimentů

V prvním měření z 24.03 došlo k úspěšnému měření pórového tlaku ve vzorku, teda můžeme říct, že set-up experimentu je vhodný pro měření.

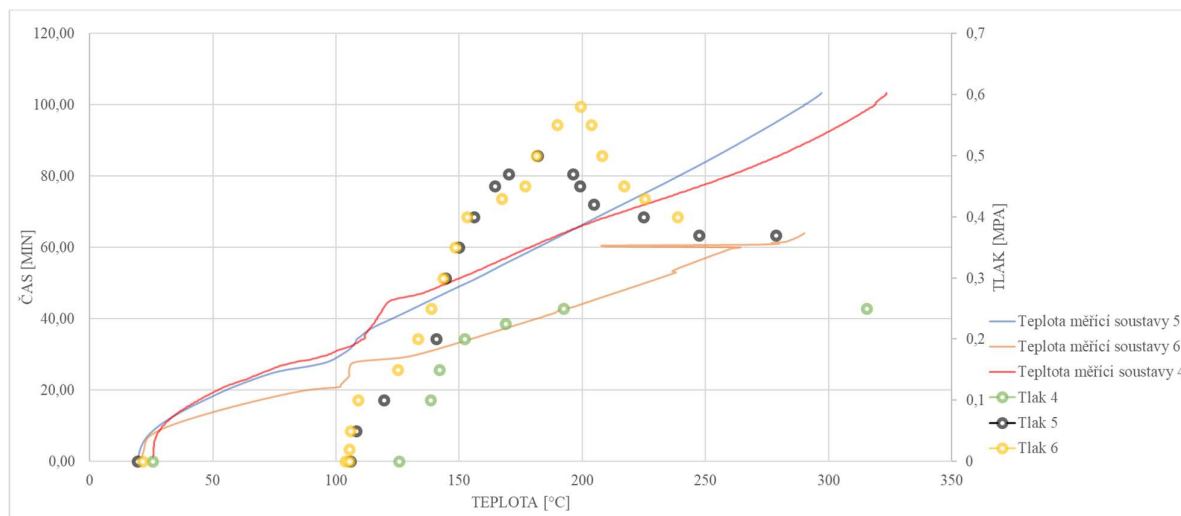
V druhém měření z 28.04 došlo k nedokonalostem v měřicí soustavě. Napříč neúspěšnému druhému měření došlo k vizuálnímu pozorování pórového tlaku v prvku pomocí unikající vodní páry. Pro další pokusy je důležité zlepšení izolace měřicí soustavy.

V třetím měření z 28.04 došlo k úspěšnému měření pórového tlaku ve vzorku. Hodnoty byly přibližně poloviční oproti experimentu z 23.03, tyto rozdíly byly způsobeny technologickými rozdíly ve výrobě vzorků.

Čtvrté, páté a šesté měření vycházelo z poznatků získaných z předešlých měření. Čtvrtý vzorek byl izolován minerální vatou, pátý a šestý vzorek byly ponechány bez izolace, z důvodu nízkého nárůstu pórového tlaku ve čtvrtém vzorku.

Ve čtvrtém měření z 1.10. došlo přibližně k polovičnímu maximálnímu tlaku a zpožděnému nárůstu pórového tlaku oproti pátému a šestému měření. Po odizolování došlo k nárůstu pórového tlaku ve vzorku. Z důvodu pomalého a nízkého nárůstu pórového tlaku došlo k odizolování pátého a šestého měření.

Páté a šesté měření na základě čtvrtého měření bylo bez tepelné izolace na povrchu vzorku. Odstraněním izolace došlo k zrychlení nástupu pórového tlaku a maximálního pórového tlaku. V pátém a šestém měření došlo k naměření podobných hodnot napříč odchylkám v rychlosti zahřívání.



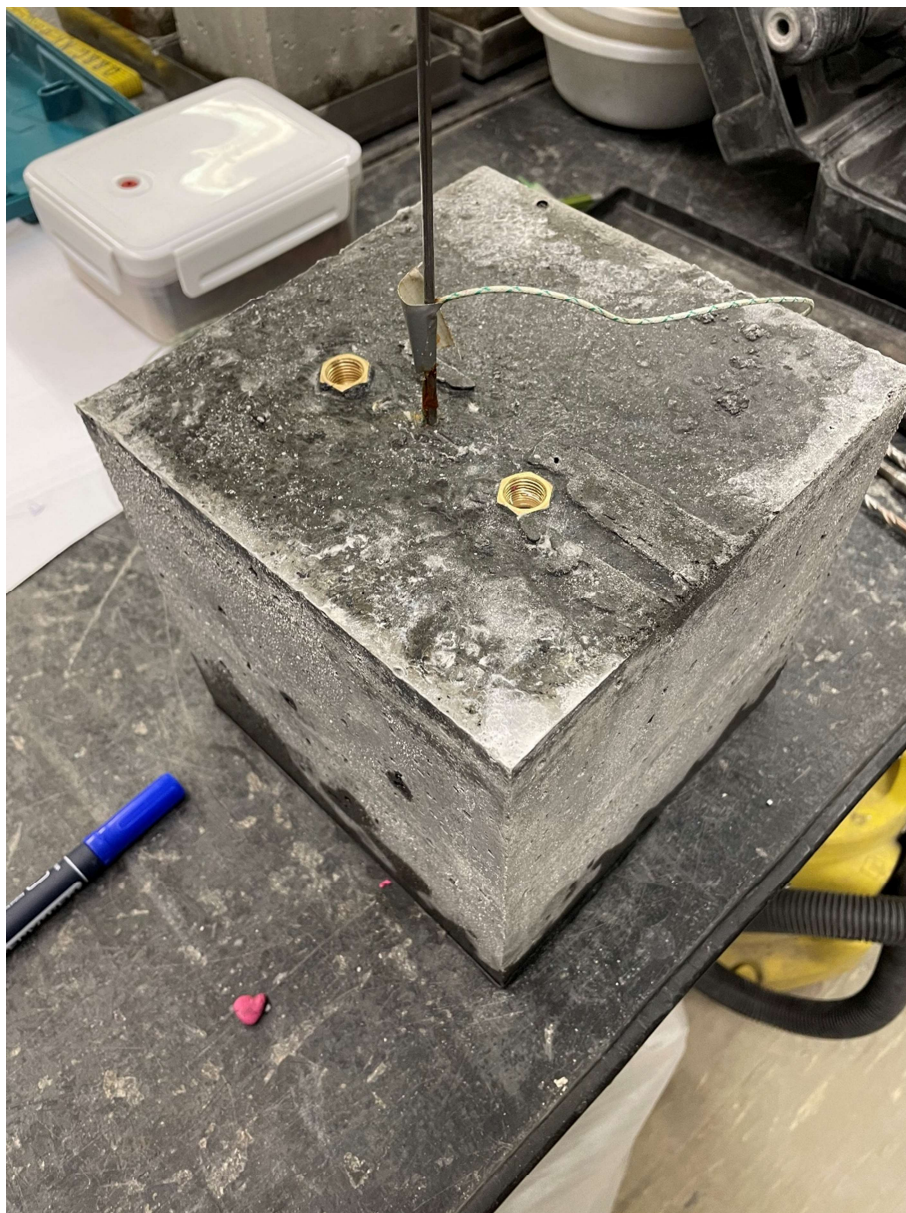
obr. 24: Porovnání čtvrtého, pátého a šestého měření– tlak, teplota

Pro další měření je důležité sjednocení postupu měření a dosažení konstantních hodnot pro shodné betonové vzorky. Jako nejkostnatější se jeví způsob měření z pátého a šestého pokusu. Tedy měření bez povrchové izolace, 100% relativní vlhkost vzorku a s použitím vzduchu, jako přenosového média, tedy bez olejové náplně fitinku. Pro dosažení konstantního měření pro jednotlivá měření je důležitá shodná rychlost zahřívání vzorků.

3.3.5 Závěrečné měření

Závěrečné měření bylo zaměřeno na ověření hypotézy vlivu průměru odběrného vrtu na velikost tlaku.

Vzhledem k tomuto požadavku byl upraven set-up měření. Měření bylo prováděno na betonové krychli o rozměru hrany 200 mm s použitím shodné betonové směsi z předchozích pokusů. Do betonové krychle byly vyvrtány dna sběrné vrty o průměru 6 mm a 8mm, na kterých konci byly osazeny nanometry. Vrty byly od hrany zahříváného povrchu vzdáleny na 75 mm. Vzorek byl před testováním uložen ve vodě z důvodu zajištění 100 % relativní vlhkosti vzorku. Fitink nebyl naplněn topným olejem.



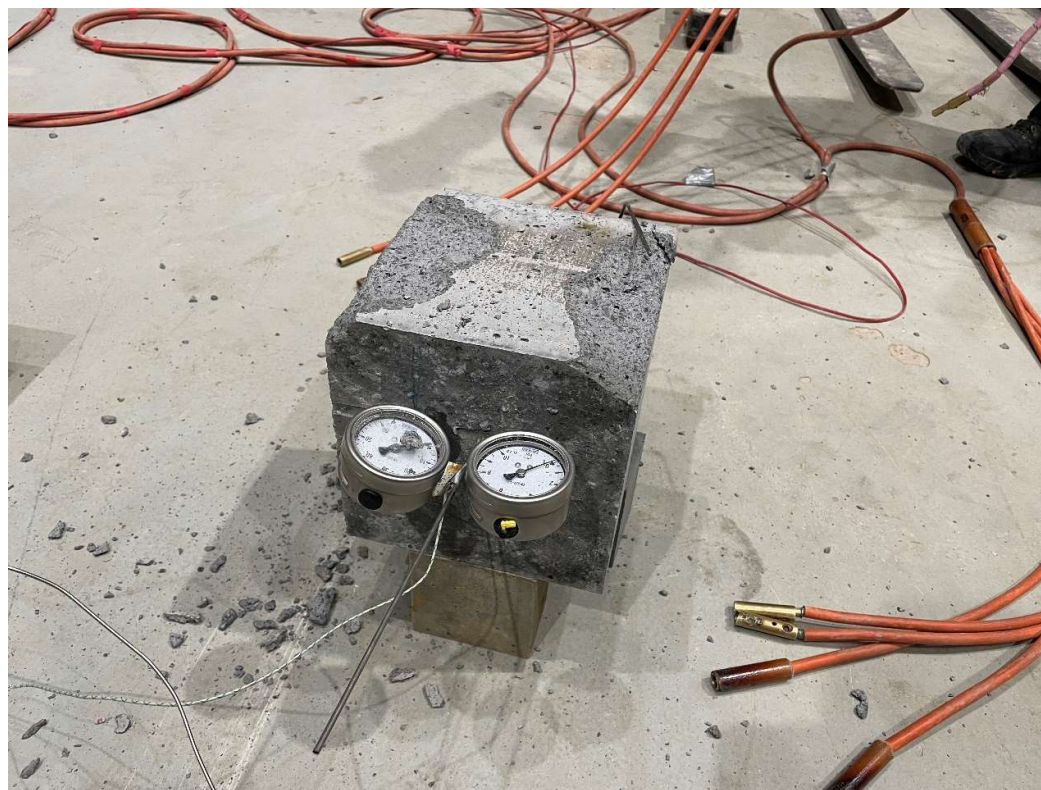
obr. 25: Pozměněný experimentální set-up závěrečné měření

Zahřívání bylo prováděno bez tepelné izolace kolem vzorku a zahřívání bylo pomoci topní dečky z vrchní strany vzorku. Změnou způsobu zahřívání a odstraněním izolace došlo k pomalejšímu zahřívání vzorku.



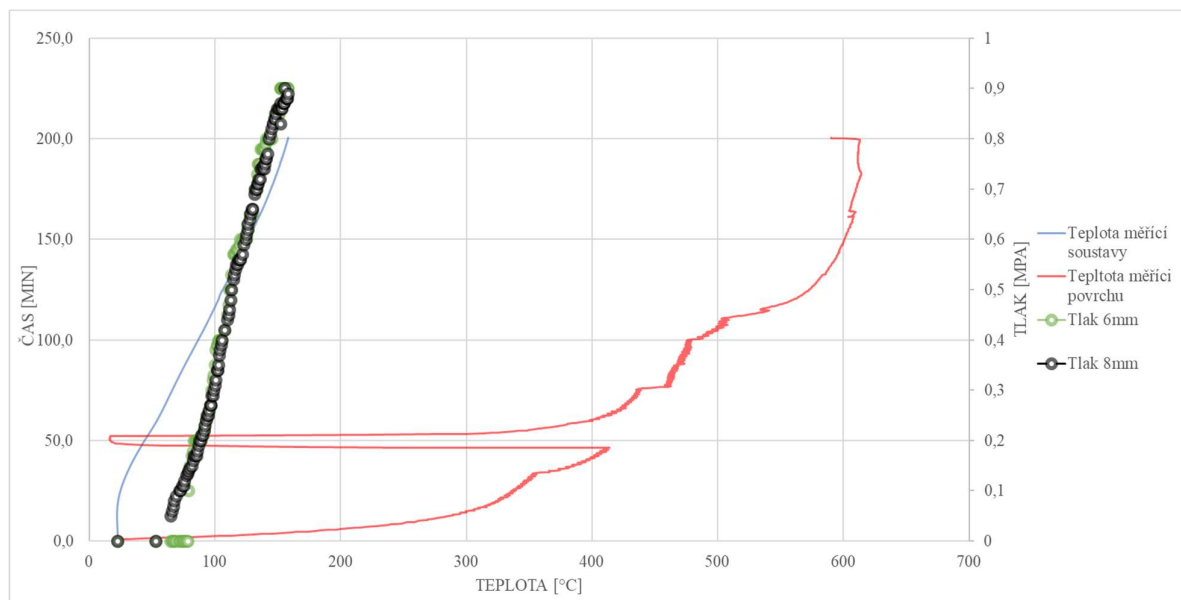
obr. 26: Zahřívání vzorku

Zahříváním vzorku přibližně v 45 minutě došlo k explozivnímu odštěpování povrchu vzorku.



obr. 27: Zahřívání vzorku

V 194 minutě měření byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,9 MPa pro vrt 8 mm. V 187-199 byl zaznamenán maximální tlak ve vzorku 0,9 MPa pro vrt 6 mm. Od 187 minuty došlo k kolísání maximálního tlaku mezi hodnotami 0,83-0,9 MPa ve vzorku s vrtem 8 mm. Ve vzorku s vrtem průměru 6 mm byl osazen manometr s vyšší maximální hodnotou tlaku a nižší citlivostí, tedy nebylo zaznamenáno kolísání tlaku.



obr. 28: Závěrečné měření pórového tlaku – tlak, teplota

Při pokusu nedošlo k ověření hypotézy vlivu průměru vrtu na pórový tlak. Nedošlo k naměření výrazného rozdílů mezi naměřenými pórovými tlaky pro 6 a 8 mm vrt. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben malým rozdílem v průměrech vrtů. U vrtu průměru 6 mm došlo k úniku kapaliny kolem fitinky pro manometr a tím mohlo dojít i k ovlivnění naměřených hodnot pórového tlaku.

Při závěrečném experimentu došlo k naměření pórového tlaku před dosáhnutím teploty 100 °C. Tento jev je spojen s umístěním termočlánku a zahříváním vzorku. Termočlánek byl umístěn mezi vrty a zároveň došlo k jeho vyosení při betonáži, tedy byl ve větší vzdálenosti od zahřívajícího povrchu oproti odběrným vrtům. Zároveň byly odběrné vrty částečně zahřívány i ze strany vzorku a tedy naměřená teplota byla nižší než skutečná teplota v odběrných vrtech.



obr. 29: Únik kapaliny vrt 6 mm – fitink



obr. 30: Únik kapaliny vrt 6 mm

4 Porovnání matematických modelů s experimentálními hodnotami

Matematický model této práce bude založen na poznatcích popsanych v článku [3] a bude zjednodušen vzhledem na použití plně saturovaných experimentálních vzorků.

Jako už bylo popsáno odštěpování betonu je spojeno s dvěma procesy spojenými s ohříváním betonu a to termo-hydrální a termo-mechanický proces. Diferenciální tepelná dilatace a tah vznikají v betonu zahříváním. Tento jev je v betonu zesílen v důsledku různých tepelných dilatací cementové pasty a kameniva. Dehydratace smršťuje cementovou pastu zatímco kamenivo expanduje. Dehydratace cementové pasty je spojena s uvolněním chemicky vázané vody v betonu, která je následně proměněna na vodní páru. Kapalná voda a plyn (složený ze suchého vzduchu a vodní páry) jsou v rovnováze uvnitř porézní matrice betonu. Rovnováha je dána na základě Laplaceovy rovnice.

$$p^{gw} + p^{ga} - p^w = 2\sigma(T)\chi \quad (1)$$

kde χ (kontaktní úhel) představuje zakřivení rozhraní mezi kapilární vodou a plynnou fází uvnitř pórů média, p^{gw} , p^{ga} , p^w jsou v tomto pořadí tlaky vodní páry, suchého vzduchu a kapalné vody a $\sigma(T)$ je povrchové napětí vody. Díky zakřivení se rovnovážný tlak vodní páry liší od tlaku kapalné vody a vztah lze získat pomocí zobecněné Clausius-Clapeyronovy rovnice. Vzhledem k hypotézám nestlačitelné kapalné vody a páry jako dokonalého plynu, rovnice lze vyjádřit jako funkci saturačního tlaku čisté vody.

$$p^w = p^{gws}(T) + \frac{\rho^w RT}{M^w} \ln\left(\frac{p^{gw}}{p^{gws}(T)}\right) \quad (2)$$

kde $p^{gws}(T)$ je tlak nasycených par. Tento tlak je definován jako maximální tlak, kterého může pára dosáhnout při dané teplotě a je funkcí teploty. Obvykle se získává pomocí znamená vztah Clausius-Clapeyron nebo více často pomocí experimentální křivky Hyland-Wexler (T ve Kelvinech)

$$p^{gws}(T) = \exp[C_1/T + C_2 + C_3/T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6\ln(T)] \quad (3)$$

$$\text{kde } C_1 = 5800,2206, C_2 = 1,3914993, C_3 = -4,8640293 \times 10^{-2}, C_4 = 4,1764768 \times 10^{-5}, \\ C_5 = -1,4452093 \times 10^{-8}, C_6 = 6,5459673$$

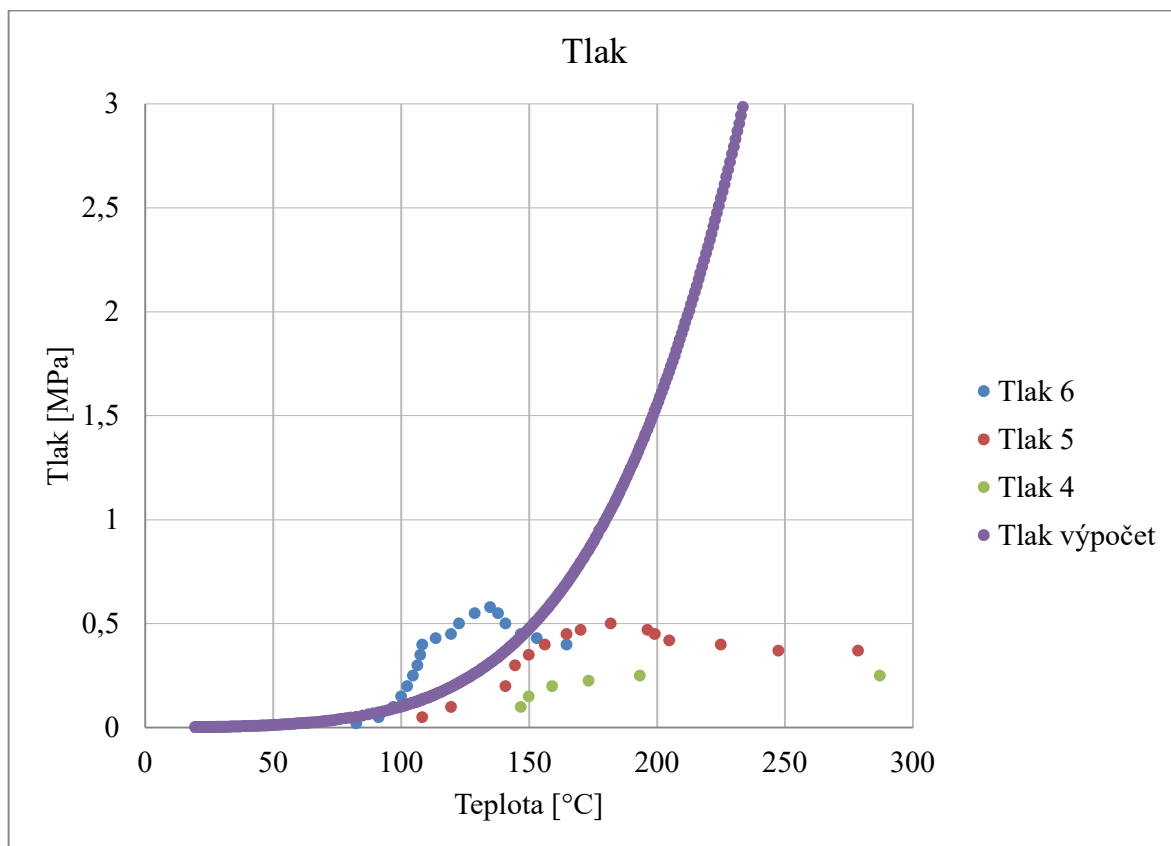
V důsledku dehydratace se rovnováha mezi kapalnou vodou a plynem neustále vyvíjí. Zejména, pokud $p^{gw} \rightarrow p^{gws}$, rovnice (2) dává $p^w \approx p^{gws}$; jmenovitě, zakřivení $\chi \rightarrow 0$ (z rovnice (1)) a nasycení vodou $S_w \approx 1$.

V takovém případě se porézní matrice naplní vlhkostí a vytvoří se tzv. kvazi-nasycená vrstva. Propustnost betonu pro vodní páru je velmi nízká a ještě nižší pro kapalnou vodu, vlhkost nemůže unikát tak rychle jak se uvolňuje a pórový tlak se podstatně zvyšuje. Tlaky v této vrstvě jsou obecně větší než pórový tlak před vznikem kvazi-nasycené vrstvy. Vznik kvazi-nasycené vrstvy může být příčinou explozivního odštěpování betonu, kvůli vysokým hodnotám tlaku vodní páry dosažené během procesu ohřevu. [3]

4.1 Porovnání hodnot pórového tlaku

Tato část práce se bude zabývat porovnání hodnot pórového tlaku získaných z experimentální křivky Hyland-Wexler s hodnotami ze zkušebních vzorků provedených 10/2021. Hodnoty z experimentální křivky udává $p^{gws}(T)$ tedy tlak nasycených par, tlak vzduchu p_0^{g3} je v tomto případě zanedbán.

Experimentální hodnoty pórového tlaku byly naměřeny ze tří plně nasycených vzorků betonu, které byly měřeny 1.10.2021. Přesný popis experimentů viz kap. 3.3.



obr. 31: Porovnání tlaků experimentů a tlaku dle výpočtu

Dle obr.11 můžeme pozorovat, že po překročení teploty 150 °C dochází k výraznému nárůstu pórového tlaku dle výpočetní křivky oproti experimentálně naměřeným hodnotám. Zatím co pórový tlak do teploty 150 °C má podobný vývoj hodnot, jako hodnoty pórového tlaku z experimentálního měření č.5.

Tento rozdíl v hodnotách je způsoben nedokonalostí měřených vzorku a unikáním pórového tlaku povrchem vzorku a jeho kapilárami, zatím co křivka uvažuje výskyt pórového tlaku v dokonale izolovaném prostředí a tedy dochází k značně odlišným hodnotám hlavně po dosáhnutí 150°C.

5 Závěr

Pórový tlak je známý jev v betonu vystavenému zvýšeným teplotám. Následky jsou jednoduše pozorovatelné ve formě odštěpování vrchních vrstev betonu, ale je relativně komplikované experimentální změření hodnot pórového tlaku betonu.

Z provedených experimentů můžeme usoudit, že zvolený set-up experimentu je vhodný pro měření pórového tlaku, ale je velmi citlivý na nedokonalosti ve vzorcích a měřící soustavě. Jako nejspolehlivější se ukázal experimentální set-up z pokusů 5 a 6.

V betonových vzorcích docházelo často k nedokonalostem ve vzorcích a teda ovlivnění naměřených pórových tlaků. Možnost zpřesnění odečtu naměřených hodnot by bylo nahrazení analogových nanometrů a ručního odečtení hodnot, za elektronické nanometry s softwarovým zaznamenáváním pórového tlaku.

Seznam obrázků

obr. 1: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-hydrálním procesu [5]	9
obr. 2: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-hydrálním procesu [6]	10
obr. 3: Proces tvorby pórového tlaku v betonu založen na termo-mechanickém procesu [6]	11
obr. 4: Prvky po vystavení účinku zvýšených teplot [6].....	11
obr. 5: Legenda navrhovaných tlakových měřičů. [19].....	15
obr. 6: (a) Schéma experimentálního nastavení, (b) umístění měřících hlav. [3].....	16
obr. 7: Konfigurace experimentálního uspořádání s rozdíly v typu měřících hlav, umístění termočlánků a použitou náplní trubičky. [3]	17
obr. 8: Vývoj teploty na měřících hlavách [3].....	18
obr. 9: Maximální pórové tlaky použitých tlakoměrných sestav [3].....	18
obr. 10: Vliv faktorů na maximální změřený pórový tlak [3]	19
obr. 11: Schéma betonového vzorku s rozmístěním měřičů [20].....	20
obr. 12: Schéma upraveného experimentu	22
obr. 13: První měření pórového tlaku - fotografie	23
obr. 14: První měření pórového tlaku – tlak, teplota.....	23
obr. 15: Druhé měření pórového tlaku - fotografie.....	24
obr. 16: Druhé měření pórového tlaku –teplota.....	25
obr. 17: Třetí měření pórového tlaku - fotografie.....	25
obr. 18: Třetí měření pórového tlaku –tlak, teplota	26
obr. 19: Čtvrté měření pórového tlaku - fotografie.....	27
obr. 20: Čtvrté měření pórového tlaku –tlak, teplota	27
obr. 21: Páté měření pórového tlaku - fotografie.....	28
obr. 22: Páté měření pórového tlaku – tlak, teplota.....	28
obr. 23: Šesté měření pórového tlaku – tlak, teplota	29
obr. 24: Porovnání čtvrtého, pátého a šestého měření– tlak, teplota.....	30
obr. 25: Pozměněný experimentální set-up závěrečné měření.....	31
obr. 26: Zahřívání vzorku	32
obr. 27: Zahřívání vzorku	32
obr. 28: Závěrečné měření pórového tlaku – tlak, teplota	33
obr. 29: Únik kapaliny vrt 6 mm – fitink	34
obr. 30: Únik kapaliny vrt 6 mm	34
obr. 31: Porovnání tlaků experimentů a tlaku dle výpočtu.....	36

obr. 32: Graf srovnání teplot a tlaků experimentů 4-6 a matematického modelu.....	47
obr. 33: Graf teplot a tlaků závěrečný experiment.....	51

Seznam tabulek

tab. 1: Přehled procesů a změn v betonu při vystavení zvýšeným teplotám [1].....	8
tab. 2: Skupiny HSC betonu dle ČSN EN 1992-1-2 [1].....	13
tab. 3: Přehled nastavení pro měření pórového tlaku v betonu za zvýšené teploty. [19].....	15
tab. 4: Složení betonu ve vzorku.....	22
tab. 5: Vývoj teplot měřicí soustava experiment č. 4, 5, 6	43
tab. 6: Vývoj tlaku experiment č. 4.....	44
tab. 7: Vývoj tlaku experiment č. 5.....	44
tab. 8: Vývoj tlaku experiment č. 6.....	45
tab. 9: Vývoj teploty a tlaku matematický model	46
tab. 10: Vývoj teploty a tlaku závěrečný experiment.....	50

Literatura

- [1] KUPILÍK, Václav. Stavební konstrukce z požárního hlediska. 1. elektronické vydání. Praha: Grada, 2006. ISBN 9788024713298;8024713292;9788024762180;8024762188;.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Praha: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [3] LI, Ye, Dong ZHANG a Kang Hai TAN. On measuring techniques of pore pressure in concrete at elevated temperature. *Cement & Concrete Composites*. 2020, vol. 114, s. 103737. ISSN 0958-9465.
- [4] KLINGSCH, Eike W. Explosive spalling of concrete in fire. *IBK Bericht*, 2014, 356.
- [5] KALIFA, Pierre, Grégoire CHÉNÉ a Christophe GALLÉ. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*. 2001, vol. 31, no. 10, s. 1487-1499. ISSN 0008-8846.
- [6] ŠTEFAN, Radek. Specifika návrhu prvků z vysokohodnotného betonu. Betonové konstrukce po požáru. Prezentace pro ČVUT v Praze, 133PSBZ, 2021.
- [7] KODUR, V. K. R. a L. PHAN. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. *Fire Safety Journal*. 2007, vol. 42, no. 6, s. 482-488. ISSN 0379-7112.
- [8] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [9] BOŠNJAK, Josipa, Joško OŽBOLT a Rolf HAHN. Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup. *Cement and Concrete Research*. 2013, vol. 53, s. 104-111. ISSN 0008-8846.
- [10] Štefan, R. Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling. PhD thesis, CTU in Prague, 2015.
- [11] Bergheu, J. M. and Fortunier, R. Finite element simulation of heat transfer [online]. , 2008.
- [12] Purkiss, J. A. Fire safety engineering, Design of structures, 2nd edn, Elsevier. Butterworth-Heinemann
- [13] Z. Bažant, W. Thonguthai, Pore pressure and drying of concrete at high temperature, *Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div.* 104 (5) (1978) 1059–1079.
- [14] Gawin, D., Majorana, C. E., Schrefler, B. A. Numerical analysis of hydro-thermal behaviour and damage of concrete at high temperature. 199, *Mech. Cohes.-Driect. Mat.* 4(1): 37-74.
- [15] Tenchev, R. T., Li, L. Y., Purkiss, J. A. FInite element analysis of coupled heat and moisture transfer in concrete subjected to fire. 2001, *Numer. Heat Tr. A-Appl.* 39(7): 685-710.
- [16] Beneš, M., Štefan, R. Hydro-thermo-mechanical analysis of spalling in concrete walls at high temperatures as a moving boundary problem. 2015 *Int. J. Heat Mass Tran.* 85: 110-134.
- [17] Dwaikat, M. B., Kodur, V. K. R. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems, *Fire Safety J.* 2009, 44(3): 425-435.
- [18] Zeiml, M., Lackner, R., Mang, H. A. Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading. *Acta Geotechnica*. 2008, 3(4): 295-308.

-
- [19] LI, Ye et al. Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review. *Construction & Building Materials*. 2021, vol. 284, s. 122818. ISSN 0950-0618.
- [20] TOMÁŠ, Jan. Měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám. Praha, 2020. Diplomová práce (Ing.). České vysoké učení technické, Fakulta stavební, 02/2020
- [21] [CHYLÍK, Roman. Měření pórového tlaku v betonu za vysokých teplot: poučení z prvotního neúspěchu. Ph.D. workshop. Praha: České vysoké učení technické, 2021.
- [22] Horová, K.; Wald, F. Tepelná a mechanická zatížení konstrukcí při požáru, 2012. www.tzb-info.cz. <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8853-tepelna-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru> (accessed Sept 10, 2021).
- [23] Dal Pont, Stefano, Dupas A., Ehrlacher, Alain, Colina H. (2005). An experimental relationship between complete liquid saturation and brutal damage in concrete submitted to high temperature. *Magazine of Concrete Research - MAG CONCR RES*. 57. 455-461. 10.1680/macr.2005.57.8.455.

6 Příloha – výsledky experimentů

Tato část diplomové práce zahrnuje zjednodušené výsledky z experimentů 4, 5, 6 provedené 10/2021, matematického modelu a závěrečného experimentu provedeného 11/2021.

6.1 Experimentální měření 10/21

6.1.1 Vývoj teplot měřící soustava

čas 4 [min]	uhpc_4 [°C]	čas 5 [min]	uhpc_5 [°C]	čas 6 [min]	uhpc_6 [°C]
	vrt		vrt		vrt
0,0	25,7	0,0	19,5	0,0	21,6
10,3	30,2	2,5	20,1	9,5	30,6
15,5	40,1	11,0	30,1	12,0	41,0
19,5	50,7	15,0	40,0	14,0	50,8
22,3	60,3	18,5	50,5	15,8	60,2
25,0	70,6	21,5	60,5	17,5	70,6
27,5	81,4	24,0	70,5	19,0	80,3
28,8	90,7	25,8	80,2	20,3	90,8
31,0	100,3	27,0	91,1	21,0	101,8
34,3	111,1	29,3	100,6	28,3	111,7
43,8	120,1	35,3	110,3	28,8	120,7
46,5	131,5	39,3	120,2	29,8	131,6
48,5	140,1	42,5	130,2	31,5	141,1
51,5	150,6	46,0	140,7	33,5	150,8
54,5	160,8	49,3	150,6	35,5	160,2
57,5	170,4	52,5	160,5	37,8	170,8
60,5	180,3	56,0	170,2	39,8	180,2
63,5	190,5	59,5	180,3	42,3	190,3
66,3	200,5	63,0	190,5	44,3	200,5
68,8	211,0	66,5	200,4	46,5	210,2
71,0	220,8	70,0	210,4	49,0	221,1
73,3	230,8	73,5	220,6	51,3	230,8
75,5	240,7	77,0	230,6	54,5	240,3
77,8	250,1	80,5	240,5	57,0	250,0
80,3	260,2	84,0	250,2	59,8	261,1
83,0	270,5	87,8	260,0	60,8	269,8
86,0	280,7	91,8	270,3	61,0	279,8
89,3	290,7	95,8	280,3	61,5	282,1
92,5	300,1	100,0	290,1		
96,5	310,5	103,3	297,1		
101,3	320,2				

tab. 5: Vývoj teplot měřící soustava experiment č. 4, 5, 6

6.2 Nárůst tlaku

6.2.1 Nárůst tlaku experiment 4

čas 4 [min]	teplota 4 [°C]	tlak 4 [MPa]
0	25,7	0
45,8	125,6	0
48	138,4	0,1
49	141,8	0,15
52	152,3	0,2
57	168,9	0,225
64	192,2	0,25
98,5	315,3	0,25

tab. 6: Vývoj tlaku experiment č. 4

6.2.2 Nárůst tlaku experiment 5

čas 5 [min]	teplota 5 [°C]	tlak 5 [MPa]
0	19,5	0
31,8	105,9	0
34	108,2	0,05
39	119,4	0,1
46	140,7	0,2
47,3	144,5	0,3
49	149,8	0,35
51	156,1	0,4
54	164,6	0,45
56	170,2	0,47
60	181,8	0,5
65	196,2	0,47
66	199,1	0,45
68	204,7	0,42
75	224,9	0,4
83	247,4	0,37
95	278,5	0,37

tab. 7: Vývoj tlaku experiment č. 5

6.2.3 Nárůst tlaku experiment 6

čas 6 [min]	teplota 6 [°C]	tlak6 [MPa]
0	21,6	0
22,8	103,8	0
24,5	105,4	0
26	105,4	0,02
27	105,8	0,05
28	108,8	0,1
29	125,0	0,15
30	133,2	0,2
31	138,5	0,25
32	143,6	0,3
33	148,4	0,35
34	153,2	0,4
37	167,3	0,43
39	176,7	0,45
40	181,4	0,5
42	189,8	0,55
44	199,3	0,58
45	203,7	0,55
46	208,0	0,5
48	216,8	0,45
50	225,4	0,43
54	238,6	0,4

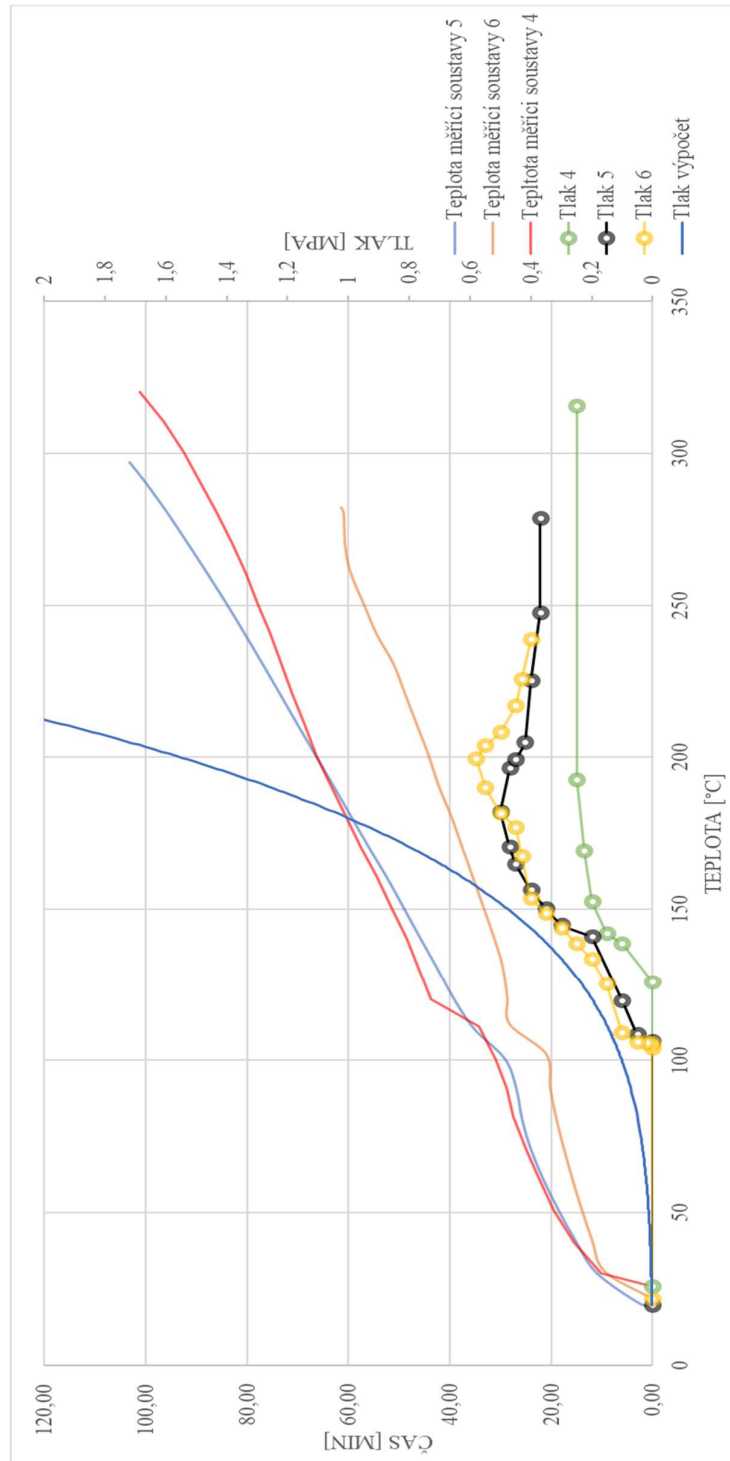
tab. 8: Vývoj tlaku experiment č. 6

6.3 Vývoj teplot a tlaku - matematický model

čas [min]	teplota [°C]	teplota [K]	p^{gsw} [MPa]
0,0	20	293	0,00
10,8	30	303	0,00
15,0	40	313	0,01
18,3	50	323	0,01
21,3	60	333	0,02
24,0	70	344	0,03
27,0	91	364	0,07
29,0	100	373	0,10
35,0	110	383	0,14
39,3	120	393	0,20
42,5	130	403	0,27
45,8	140	413	0,36
49,0	150	423	0,47
52,3	160	433	0,61
56,0	170	443	0,80
59,3	180	453	0,99
62,8	190	463	1,25
66,3	200	473	1,55
69,8	210	483	1,90
73,3	220	493	2,31
76,8	230	503	2,79
80,3	240	513	3,34
84,0	250	523	3,99
87,8	260	533	4,70
91,5	270	543	5,48
95,5	280	553	6,39
99,8	290	563	7,45
103,3	297	570	8,25

tab. 9: Vývoj teploty a tlaku matematický model

6.4 Graf srovnání experimentů 4-6 a matematického modelu



obr. 32: Graf srovnání teplot a tlaků experimentů 4-6 a matematického modelu

6.5 Závěrečný experiment

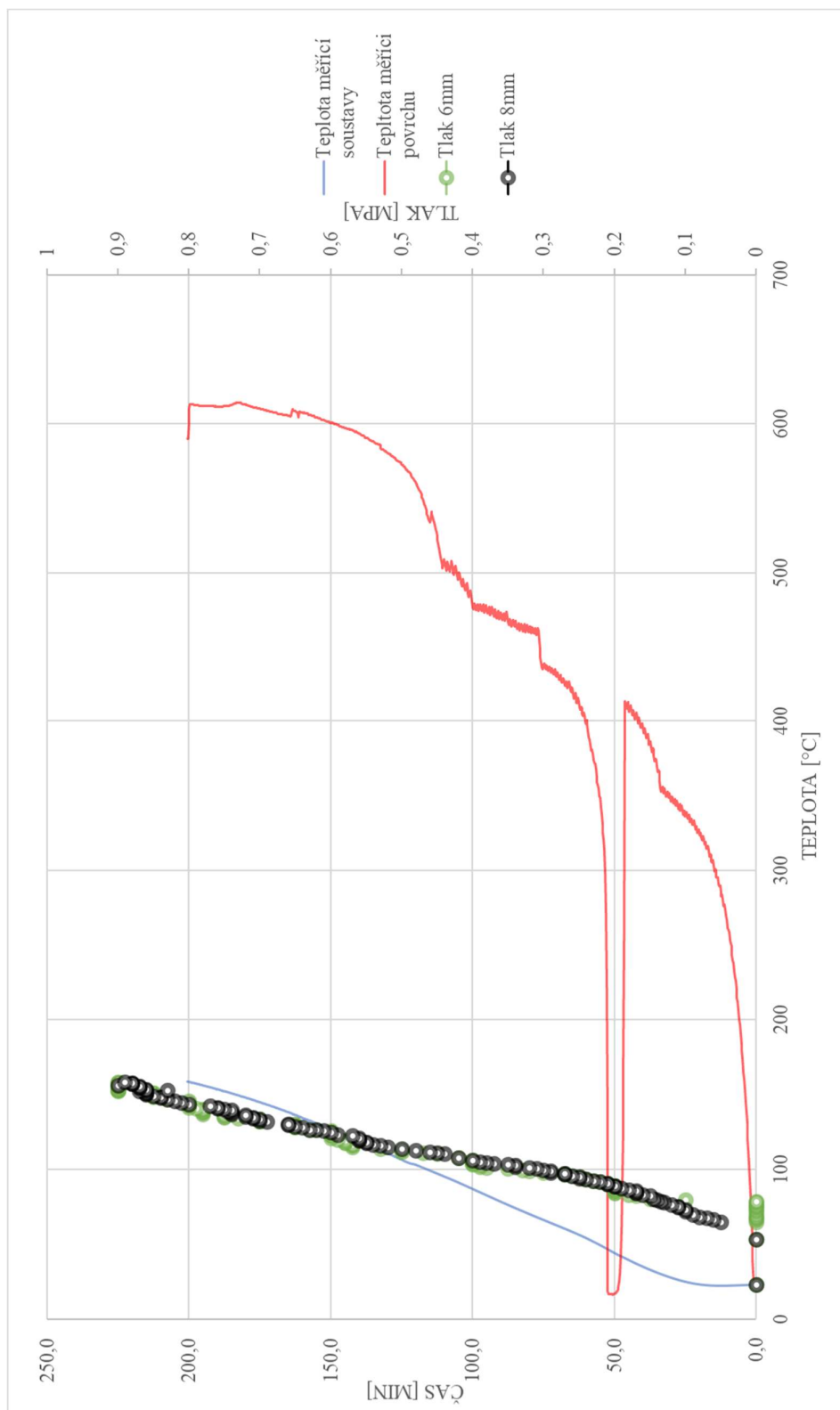
T [min]	T,int	T,ext	Pórový tlak 6mm [MPa]	Pórový tlak 8mm [MPa]
0,0	22,5	21,6	0	0
59,0	52,8	388,8	0	0
73,3	64,5	433,9	0	0,05
75,3	66,0	435,3	0	0,06
76,3	66,8	448,5	0	0,07
77,3	67,6	458,1	0	0,08
79,3	69,2	459,4	0	0,09
82,3	71,6	460,5	0	0,1
83,3	72,4	461,1	0	0,1
85,3	74,0	463,6	0	0,11
86,3	74,9	463,8	0	0,11
87,3	75,7	464,9	0	0,12
89,3	77,4	471,8	0	0,13
90,3	78,2	472,5	0	0,135
91,3	79,1	472,3	0,1	0,14
92,3	79,9	474,4	0,15	0,145
94,3	81,6	477,2	0,17	0,15
95,3	82,5	478,3	0,18	0,16
96,3	83,3	478,9	0,2	0,17
97,3	84,2	478,6	0,2	0,17
98,3	85,1	478,8	0,2	0,17
99,3	85,9	479,2	0,2	0,18
100,3	86,8	480,4	0,2	0,19
101,3	87,7	483,7	0,2	0,2
102,3	88,5	492,0	0,2	0,2
103,3	89,4	495,8	0,21	0,21
104,3	90,2	495,6	0,21	0,21
105,3	91,1	495,6	0,22	0,22
106,3	91,9	503,2	0,23	0,23
107,3	92,7	505,0	0,24	0,24
108,3	93,5	502,8	0,245	0,25
109,3	94,3	501,5	0,25	0,25
110,3	95,1	505,1	0,26	0,26
111,3	95,9	509,9	0,27	0,27
112,3	96,7	521,8	0,27	0,27
113,3	97,5	531,3	0,3	0,29
114,3	98,3	539,1	0,32	0,29
115,3	99,0	534,6	0,33	0,3
116,3	99,8	541,5	0,35	0,31

117,3	100,6	547,9	0,38	0,32
118,3	101,4	553,4	0,39	0,34
119,3	102,1	557,5	0,39	0,34
120,3	102,9	561,2	0,4	0,35
121,3	103,3	564,3	0,4	0,37
122,3	103,8	567,1	0,4	0,38
123,3	104,6	569,0	0,4	0,39
124,3	105,4	571,4	0,4	0,4
126,3	107,4	574,9	0,42	0,42
129,3	109,8	579,3	0,45	0,44
130,3	110,6	580,9	0,47	0,45
131,3	111,3	581,9	0,5	0,46
132,3	112,2	583,1	0,5	0,48
133,3	113,0	585,9	0,53	0,5
135,3	114,6	588,2	0,57	0,52
136,3	115,4	589,0	0,57	0,53
137,3	116,2	590,2	0,57	0,54
138,3	117,0	591,5	0,58	0,55
139,3	117,8	592,5	0,58	0,55
140,3	118,6	593,5	0,58	0,56
141,3	119,5	594,4	0,59	0,56
142,3	120,3	595,2	0,6	0,56
144,3	121,9	596,6	0,6	0,57
145,3	122,7	597,3	0,6	0,59
147,3	124,3	599,3	0,6	0,6
148,3	125,1	599,9	0,6	0,61
149,3	125,9	600,3	0,62	0,62
150,3	126,1	600,9	0,63	0,63
151,3	127,5	601,5	0,65	0,64
152,3	128,2	602,3	0,65	0,65
153,3	129,1	602,7	0,65	0,66
154,3	129,9	603,8	0,65	0,66
156,3	131,4	605,2	0,7	0,69
157,3	132,2	605,6	0,7	0,7
158,3	132,9	607,0	0,7	0,7
159,3	133,7	607,3	0,73	0,71
160,3	134,4	607,5	0,75	0,71
161,3	134,5	604,1	0,75	0,72
162,3	136,0	608,1	0,75	0,72
163,3	136,3	608,8	0,78	0,74
164,3	137,5	604,6	0,78	0,74
165,3	138,2	605,6	0,78	0,745
166,3	138,9	605,9	0,78	0,74

167,3	139,5	606,4	0,78	0,75
168,3	140,2	606,6	0,79	0,76
169,3	140,9	607,3	0,8	0,76
170,3	141,6	607,7	0,8	0,77
172,3	142,9	608,8	0,8	0,8
174,3	144,2	609,8	0,8	0,81
176,3	145,2	610,8	0,8	0,82
177,3	146,1	611,0	0,83	0,83
179,3	147,3	612,3	0,83	0,84
180,3	147,9	613,0	0,85	0,84
181,3	148,5	613,6	0,85	0,85
183,3	149,6	614,0	0,85	0,86
184,3	150,2	613,1	0,85	0,86
185,3	150,8	612,4	0,85	0,86
187,3	151,9	611,9	0,9	0,87
187,8	152,1	611,7	0,9	0,83
188,3	152,4	611,6	0,9	0,86
190,3	153,1	611,4	0,9	0,86
191,3	154,0	611,7	0,9	0,87
192,3	154,5	611,7	0,9	0,87
193,3	155,0	611,7	0,9	0,87
194,3	155,5	611,9	0,9	0,9
196,3	156,5	612,0	0,9	0,88
197,3	157,0	612,4	0,9	0,88
198,3	157,5	612,7	0,9	0,88
199,3	158,0	612,8	0,9	0,89

tab. 10: Vývoj teploty a tlaku závěrečný experiment

6.5.1 Graf vývoje teploty a tlaku závěrečný experiment



obr. 33: Graf teplot a tlaků závěrečný experiment