ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí (K133)

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích

Experimental analysis of heat transport in concrete and steel-concrete composite structural members

Autor: Bc. Martin Kuča

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

2016

Zadání

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kuča Jméno: Martin Osobní číslo: 395567

Zadávající katedra: katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích

Název diplomové práce anglicky: Experimental analysis of heat transport in concrete and steel-concrete composite structural members

Pokyny pro vypracování:
- Rešerše literatury
- Návrh experimentu
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení a prezentace výsledků
- Závěr

Seznam doporučené literatury:
Procházka J., Vašková, J., Štefan, R.: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2010, ISBN 978-80-01-04613-5.
Wald F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2005, ISBN 80-0103157-8.

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

Datum zadání diplomové práce: 6.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
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)

Prohlášení

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

V Praze, dne 8. ledna 2017

…….

Martin Kuča

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory poskytnuté Grantovou agenturou ČR v rámci řešení projektu GA15-19073S „Modely ocelobetonových sloupů s rozptýlenou výztuží při požáru“.

Mé poděkování patří především panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za umožnění vzájemné spolupráce na tomto grantu, možnost navázat na toto téma diplomovou prací a samozřejmě za velkou pomoc při samotném vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na vytváření a uskutečnění požárních zkoušek. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině za velkou podporu, bez které bych nebyl schopen se ani k této práci dostat.

Abstrakt

Teoretická část práce je zaměřena na problematiku měření teploty, pórového tlaku a vlhkosti v betonových a ocelobetonových prvcích za zvýšených teplot s ohledem na použití jednotlivých postupů a měřidel v praxi. Na tuto teoretickou část dále navazuje praktická část, ve které jsou aplikovány poznatky z teoretické části. Je popsán návrh a postup experimentálního měření teploty v betonových a ocelobetonových prvcích s následným vyhodnocením naměřených výsledků.

Klíčová slova

Teplota; pórový tlak; vlhkost; termočlánek; tlakoměr; vlhkoměr, beton, ocelobeton

Abstract

A theoretical part of the thesis is focused on measurement of temperature, pore pressure and humidity in the concrete and the steel-concrete composite structural members at elevated temperatures with respect to the usage of the respective procedures and gauges in practice. The theoretical part is further followed by an experimental part in which are applied findings from the theoretical part. Design and procedure of the experimental measuring of the temperature in concrete and steel-concrete composite structural members are described; the evaluation of the measured results follows then.

Keywords

Temperature; pore pressure; humidity; thermocouple; pressure gauge; hygrometer; concrete; steel-concrete composite

Obsah

Zadání ..... **ii**
Prohlášení ..... **iii**
Poděkování ..... **iv**
Abstrakt ..... **v**
Abstract ..... **v**
Obsah **1**
Úvod **3**
Teoretická část **4**
1 Procesy v betonu za vysokých teplot **4**
2 Významné fyzikální veličiny **5**
3 Teplota **6**
3.1 Základní teorie vlivu teploty 6
3.1.1 Vliv rychlosti zvyšování teploty 6
3.2 Měření teploty 7
3.2.1 Typy termočlánků a jejich využití 8
3.2.2 Třídy přesnosti 9
3.2.3 Druhy izolací a jejich možnost použití 9
3.2.4 Zakončení termočlánků 11
4 Pórový tlak **12**
4.1 Základní teorie vlivu pórového tlaku 12
4.1.1 Vznik pórového tlaku 12
4.1.2 Faktory ovlivňující velikost pórového tlaku 12
4.1.3 Vliv pórového tlaku v ocelobetonovém prvku 12
4.1.4 Způsoby snížení pórových tlaků 13
4.2 Měření pórového tlaku 13
4.2.1 Princip tlakoměru 13
4.2.2 Tlakoměrná sestava 13
5 Vlhkost **18**
5.1 Základní teorie vlivu vlhkosti 18
5.1.1 Co je to vlhkost betonu a co způsobuje 18
5.1.2 Vliv vlhkosti v betonu za zvýšených teplot 18
5.1.3 Procesy v betonu ovlivněné vlhkostí 18
5.1.4 Vliv vlhkosti v ocelobetonovém prvku za zvýšené teploty 19
5.2 Měření vlhkosti 19
5.2.1 Metody měření vlhkosti 19
5.2.2 Druhy vlhkoměrů 21
Praktická část **24**
6 Návrh experimentu **24**
6.1 Charakteristika zkoušky 24
6.2 Charakteristika vzorků a umístění termočlánků 24

6.3 Termočlánky a jejich specifikace ... 29
6.4 Přichycení prvků v peci a jejich izolace ... 30
7 Příprava vzorků ... 33
8 Experimenty na Fakultě stavební ČVUT v Praze ... 38
8.1 Experiment č. 1 ... 38
8.1.1 Průběh experimentu ... 39
8.1.2 Vyhodnocení experimentu ... 41
8.2 Experiment č. 2 ... 41
8.2.1 Průběh experimentu ... 42
8.2.2 Vyhodnocení experimentu ... 43
9 Experiment v Požární zkušebně PAVUS a.s. ... 44
9.1 Průběh experimentu ... 44
9.2 Vyhodnocení experimentu ... 50
9.2.1 Grafické znázornění výsledků ... 50
9.2.2 Vyhodnocení významných bodů experimentu ... 69
10 Závěr ... 72
Seznam obrázků ... 73
Seznam tabulek ... 75
Seznam zdrojů ... 76

Úvod

Tato práce je rozdělena do dvou základních částí.

První část je teoretická. Je zaměřena na problematiku hlavních fyzikálních veličin (teploty, pórového tlaku a vlhkosti) a jejich vlivu na betonové a ocelobetonové prvky vystavené vysokým teplotám. Tato část je rozdělena do čtyř hlavních kapitol, ve kterých je vysvětlen význam jednotlivých veličin a jsou popsány jednotlivé typy měřidel a možnosti vhodného způsobu měření.

Druhá část je praktická – experimentální a je také rozdělena do čtyř kapitol. Nejdříve je popsán návrh experimentu, jeho cíl a podmínky. Následuje podrobná dokumentace přípravy vzorků, průběhu experimentů a jejich vyhodnocení.

Práce vznikla za podpory poskytnuté Grantovou agenturou ČR v rámci řešení projektu GA15-19073S „Modely ocelobetonových sloupů s rozptýlenou výztuží při požáru“. Tento projekt je zaměřen na komplexní studium chování ocelobetonových prvků s rozptýlenou výztuží za vysokých teplot. Práce se věnuje pouze vybrané částí této problematiky – experimentálnímu zkoumání transportních procesů (zejména transportu tepla) v betonu za požáru. V rámci této práce není řešena problematika chování ocelových částí prvků – ocelový plášť je uvažován pouze jako bariéra zamezující odpařování vody z betonu.

Teoretická část

1 Procesy v betonu za vysokých teplot

Při postupném zvyšování teploty v betonu postupně nastávají různé chemické děje, které mají značný vliv na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti (viz Tab. 1).

Tabulka 1. Přehled změn, k nimž dochází při zahřívání betonu (Sičáková, a další, 2008)

zbarvení		Teplota	Vnitřní změny	Vnější změny
	normální	20 – 80 °C	- pomalá ztráta kapilární vody a snižování soudržnosti v důsledku expanze vlhkosti	beze změn
		100 °C	- zřetelné (až stonásobné) zvýšení propustnosti vody - počátek hydratace CSH gelu - 80 – 150 °C dehydratace ettringitu - 150 – 170 °C rozklad sádry $CaSO_4 . 2H_2O$ - 171 °C tavení polypropylenových vláken	výskyt trhlin
		200 °C	- ztráta fyzikálně vázané vody - zvýšení vnitřního tlaku	
	růžové	300 °C	- praskání křemičitého kameniva – 350 °C - kritická teplota pro vodu – 374 °C, poté už není možná přítomnost vody volné - ztráta pevnosti v tlaku – rozsah 15 – 40 % dle skladby betonu	
		400 °C	- tepelný rozklad portlanditu $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$	explosivní odprýskávání
		500 °C	- změna krystalové fáze z β na α – 573 °C v kamenivu i písku - ztráta pevnosti v tlaku – rozsah 55 – 70 % dle skladby betonu	
		600 °C	- druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta - C_2S$	
	bělavě šedé	700 °C	- tepelný rozklad uhličitanu vápenatého $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ - silná endotermická reakce doprovázena uvolňováním oxidu uhličitého	
		800 °C	- vznik keramických vazeb nahrazujících hydraulické vazby	
	žlutohnědé	1100 – 1200 °C	- tvorba wollastonitu β ($CaO . SiO_2$)	
		1300 °C	- celkový rozpad betonu - tavení některých složek	

Při dosažení teploty 100 °C se začne fyzikálně vázaná voda v pórech postupně vypařovat společně s obsaženou vlhkostí. Volná voda se zcela vypaří při teplotě 120 °C. Jakmile se teplota dostane na 150°C, začne docházet ke ztrátě chemicky vázané vody. Tento děj probíhá až do teploty 270 °C. Do této doby nabývá beton nepatrně na své pevnost. Rychlost odpařování vody a velikost pórového tlaku závisí především na struktuře betonu a na rychlosti zahřívání. Při teplotách nad 300 °C se začnou na povrchu vytvářet trhliny. V důsledku vysoké expanze vodních par může dojít také k explosivnímu odštěpování betonu. V rozmezí teplot 400 °C až 600 °C nastává rozklad hydroxidu vápenatého, což vede ke změně pevnosti a dalších fyzikálních vlastností betonu. Při teplotě 700 °C dochází k tepelnému rozkladu vápence v pojivu a

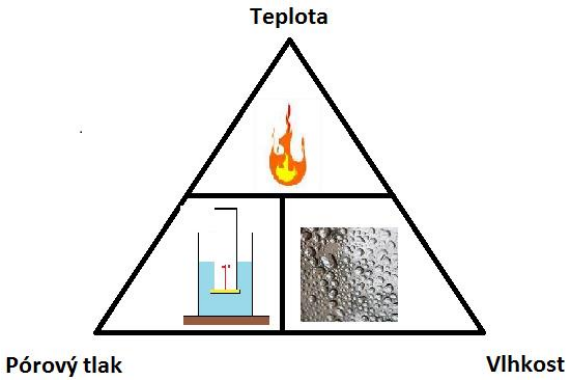
kamenivu. To má za následek vznik trhlin a samotné drolení betonu. Po dosažení teploty 800 °C se zcela vypaří chemicky vázaná voda, nastává rozpad struktury betonu a pokles jeho pevnosti. V pojivu dochází ke vzniku keramické vazby. Při 900 °C jsou hydraulické vazby zcela nahrazeny keramickými vazbami. Když beton dosáhne teploty 1200 °C, nastává takzvané slinutí. Žáruvzdorné betony mají teplotu slinutí až kolem 1500 °C. (Kučera, a další, 2010) (Sičáková, a další, 2008)

2 Významné fyzikální veličiny

Tato část je zaměřena na popsání tří základních fyzikálních veličin – teploty, pórového tlaku a vlhkosti, které ovlivňují chování betonu za vysokých teplot. Pochopení jednotlivých veličiny je základem pro následné nalezení způsobů jejich měření a určení typů přístrojů, pomocí kterých lze změřit reálné hodnoty.

Jak bude ukázáno, největším problémem je vysoká teplota, která jednak ovlivňuje zbylé veličiny, jednak značně omezuje způsob jejich měření.

Mezi výše uvedenými veličinami existuje vzájemná provázanost a závislost (viz Obr. 1), kterou vyjadřují tzv. sorpční izotermy (viz Obr. 2), popsané např. ve dvou základních pracích z 80. let (Bažan, a další, 1978) (Bažant, a další, 1979).



Obrázek 1. Provázanost veličin (Vlastní 2016)

Pro stanovení hodnot všech tří fyzikálních veličin tedy stačí změřit pouze dvě (např. teplotu a vlhkost, nebo teplotu a pórový tlak), třetí lze dopočítat.

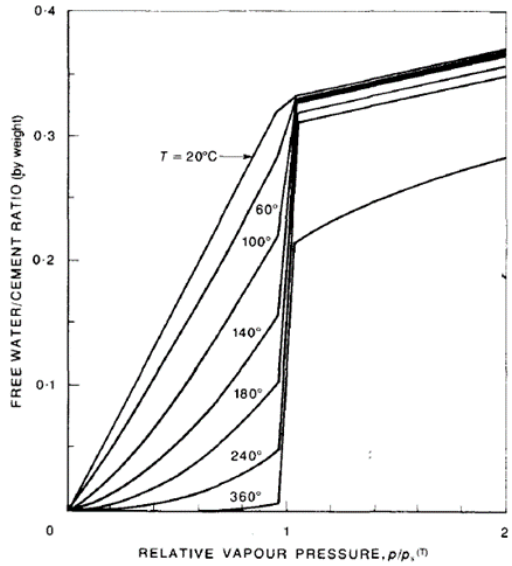


Figure 2: Relation between free water/cement ratio and relative vapour pressure at various temperatures. Concrete density = 2300 kg/m³, cement content = 300 kg/m³, free water content, w = 100 kg/m³.

Obrázek 2. Příklad sorpčních izoterem (Bažan, a další, 1978)

3 Teplota

Teplota je základní fyzikální veličina, která ovlivňuje jednotlivé materiály a která vyvolá působení dalších dvou zmíněných fyzikálních veličin, a to pórového tlaku a vlhkosti.

3.1 Základní teorie vlivu teploty

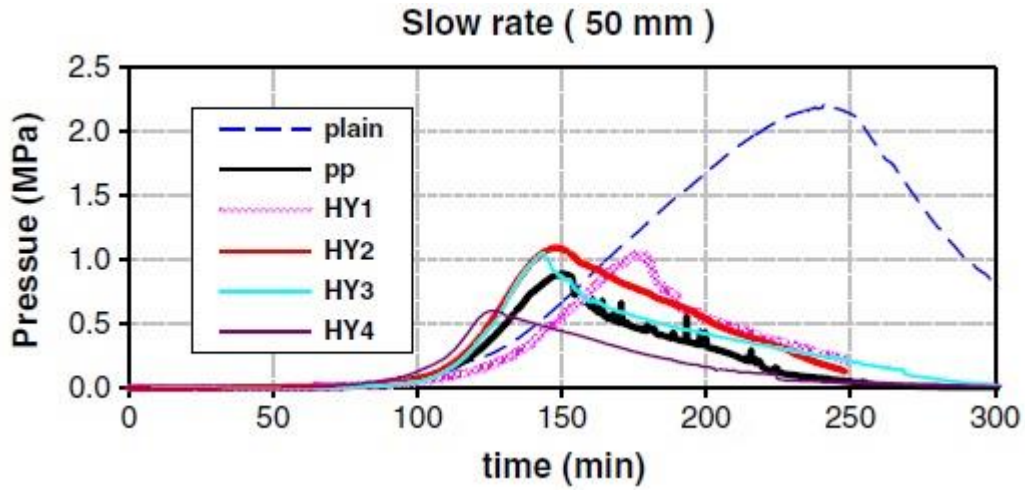
U betonových konstrukcí po požáru můžeme sledovat jevy jako vzniklé trhliny, odprýskané horní části betonu a samotné zabarvení betonu. Zabarvení betonu je velmi důležité a lze z něj odhadnout, jak vysoké teploty bylo dosaženo za požáru. (Sičáková, a další, 2008) (Kučera, a další, 2010)

Jednotlivé děje, které vysoká teplota vyvolává v betonu, jsou popsány v předchozí kapitole této práce.

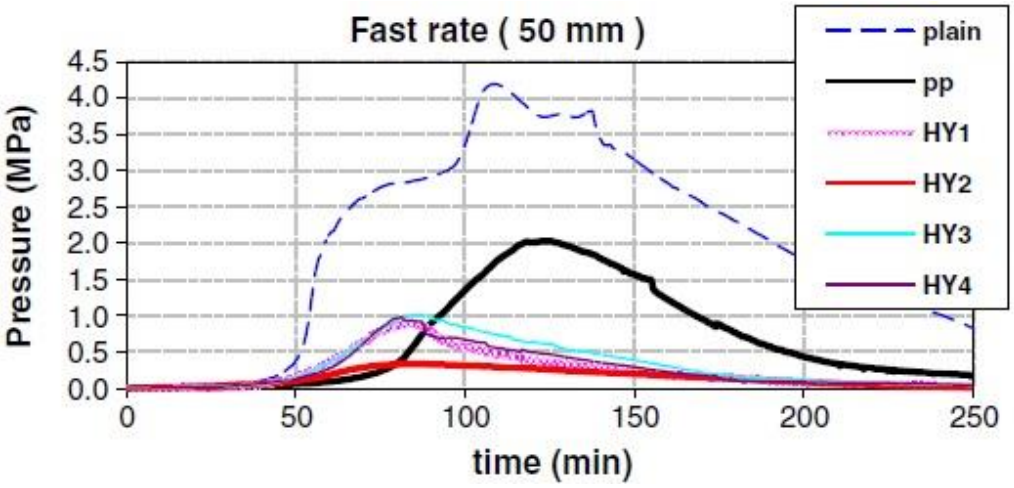
3.1.1 Vliv rychlosti zvyšování teploty

Velký vliv na betonové a ocelobetonové prvky má rychlost jejich zahřívání. Při rychlém zahřívání dochází k rychlejší tvorbě páry vytvořené odpařováním vody z betonu. To má za následek akumulaci vodní páry v betonu z důvodu malé rychlosti jejího uvolňování. Tímto se vytváří značně vysoký pórový tlak, který může způsobit explozivní odštěpování betonu.

Porovnáním vývoje pórového tlaku v důsledku rychlého a pomalého zahřívání betonu se zabývala publikace (Bangi, a další, 2011). V této práci si můžeme všimnout rozdílu v pórovém tlaku, který v hloubce 50 mm byl při rychlém zahřívání více jak dvojnásobný (viz Obr. 3 a 4).



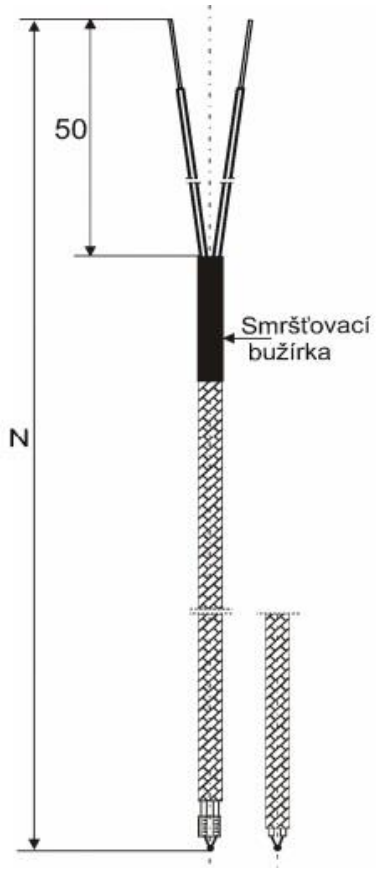
Obrázek 3. Pomalé zahřívání v hloubce 50 mm (Bangi, a další, 2011)



Obrázek 4. Rychlé zahřívání v hloubce 50 mm (Bangi, a další, 2011)

3.2 Měření teploty

Způsobů měření teploty a druhů použitelných měřidel je mnoho. Tato práce je zaměřena pouze na kabelové termočlánky (viz Obr. 5), které jsou použity v experimentální části. Níže jsou popsány typy termočlánků, jejich přesnost a druhy izolací, včetně zařazení kde a jak se dají jednotlivé termočlánky využít. (Omega) (Hyrš, 2012)



Obrázek 5. Schéma kabelového termočlánku (Mavis)

3.2.1 Typy termočlánků a jejich využití

Na trhu je k dispozici mnoho druhů termočlánků, které mohou změřit teplotu v rozsahu od -200 °C do 2500 °C. Pro použití určitých druhů termočlánku je nutné stanovit určitá kritéria:

- rozsah teplot, ve kterých chceme měřit,
- prostředí, ve kterém budeme měřit,
- zda musí termočlánek vykazovat odolnost proti abrazím a vibracím.

Samotný termočlánek tvoří dva kovy, jejichž druh se určí podle požadovaného rozsahu měření. Například termočlánky na bázi wolframu a rhodia lze použít pro měření teploty až do hodnoty 2500 °C. Výstupním signálem není naměřená teplota, ale termoelektrické napětí, které je převedeno na odpovídající teplotu.

V České republice se využívají nejčastěji termočlánky typu J, K, S, B. Termočlánky se původně označovaly chemickým složení dvou kovů, ovšem dnes se podle normy ČSN EN 60584 označují písmeny (viz Tab. 2). Tímto se docílilo toho, že každý termočlánek označený daným písmenem bude vyroben ze stejných materiálů a bude mít stejné vlastnosti od jakéhokoliv výrobce. (Vojáček, 2014) (Omega) (Hyrš, 2012)

Tabulka 2. Označení a rozsah termočlánků (Vojáček, 2014)

Označení termočlánku dle IEC 584	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700

3.2.2 Třídy přesnosti

Existují tři toleranční třídy termočlánků. Tyto třídy určují přesnost měření a jejich spolehlivost. (Mavis) (Omega) (Hyrš, 2012)

Toleranční třídy:

- *1. třída: pro teploty od 0 do 1100 °C +/- 1 °C*
- *pro teploty od 1100 do 1600 °C +/-[1+0.003*(T-100)] °C*
- *2. třída: pro teploty od 0 do 600 °C +/- 1,5 °C*
  pro teploty od 600 do 1600 °C +/- 0,0025T °C
- *3. třída: pro teploty od 600 do 800 °C +/- 4 °C*
  pro teploty od 800 do 1700 °C +/- 0,005T °C
  (T ... teplota)

Obvykle se ovšem v technických listech udávají odchylky pro naměřenou teplotu 1000 °C.

- *1. třída: +/- 1,5 °C*
- *2. třída: +/- 2,5 °C*
- *3. třída: +/- 5,0 °C*

3.2.3 Druhy izolací a jejich možnost použití

Samotný termočlánek je většinou chráněn izolací, která se vyrábí z různých materiálů a určuje, do jakého prostředí lze termočlánek použít. (Mavis)

Rozeznáváme tyto druhy:

- *GLGL wrap:*
  - *skelné vlákno / skelné vlákno (napuštěno vysokoteplotním lakem)*
  - *maximální pracovní teplota: + 400 °C*

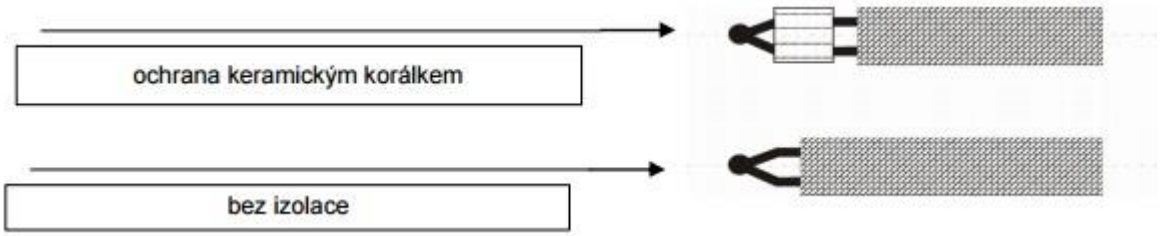
- *vnější rozměry: 2x 0,2mm (cca 0,6 x 1,0 mm ,2x 0,5mm cca 1,1 x 1,9 mm*
- *▲ dobrá ohebnost / ▼ vedení je citlivé na vlhkost a málo odolává otěru (nemá žádný oplet)*

- *GHGH:*
  - *keramické vlákno / keramické vlákno*
  - *maximální pracovní teplota: + 600 °C*
  - *vnější rozměry: 2x 0,5mm cca 1,5 x 2,4 mm ,2x 1,0mm cca 1,8 x 3,1 mm*
  - *▲ dlouhá životnost / ▼ omezená ohebnost, vedení je citlivé na vlhkost a velmi málo odolává otěru*
- *GHGHV:*
  - *keramické vlákno / keramické vlákno / nerezový oplet*
  - *maximální pracovní teplota: + 600 °C*
  - *vnější rozměry: 2x 0,22mm ² průměr cca 3,0 mm ,2x 1,0mm ² cca 2,5 x 4,0 mm*
  - *▲ dlouhá životnost, velmi dobrá ohebnost, odolnost proti otěru / ▼ vedení je citlivé na vlhkost*
- *SLSL:*
  - *silikon / silikon*
  - *maximální trvalá pracovní teplota: + 180 °C*
  - *vnější rozměry: 2x 0,22mm ² průměr cca 3,8 mm*
  - *▲ skvělá ohebnost / ▼ za vyšších teplot možnost snadného prořínutí*
- *TT oval:*
  - *teflon FEP / teflon FEP*
  - *maximální pracovní teplota: + 205 °C*
  - *vnější rozměry: 2x 0,2mm cca 1,3 x 2,0 mm*
  - *▲ dobrá odolnost proti slabým chemikáliím / ▼ za vyšších teplot možnost snadného prořínutí*
- *TSL*
  - *teflon FEP / silikon*
  - *maximální trvalá pracovní teplota: + 180 °C*
  - *vnější rozměry: 2x 0,22mm ² průměr cca 3,7 mm*
  - *▲ skvělá ohebnost, dobrá odolnost proti slabým chemikáliím / ▼ za vyšších teplot možnost prořínut*

3.2.4 Zakončení termočlánků

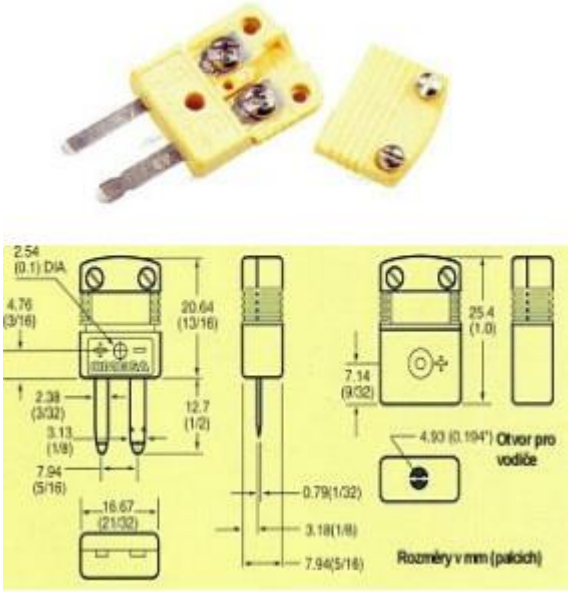
Oba konce termočlánku jsou speciálně upraveny (Mavis)

- Část termočlánku, která je vystavena vysokým nebo nízkým teplotám má dva druhy zakončení (viz Obr. 6)
  - Ochrana keramickým kroužkem
  - Bez ochrany



Obrázek 6. Provedení termoelektrického spoje (Mavis)

- Koncová část termočlánku, která je mimo měřený prvek, je osazena konektorem, který propojí termočlánek s datallogerem. Nejčastěji se lze setkat se třemi druhy konektorů:
  - Miniaturní vysokoteplotní konektory (HMP)
  - Standartní konektory (OST)
  - Vysokoteplotní konektory (HST) (viz Obr. 7)



Obrázek 7. Miniaturní vysokoteplotní konektor (Mavis)

4 Pórový tlak

Vliv této fyzikální veličiny na beton je velký a to především v případě ocelobetonových prvků z důvodu možné exploze samotného prvku při dosažení vysokých hodnot této veličiny.

4.1 Základní teorie vlivu pórového tlaku

4.1.1 Vznik pórového tlaku

Pórový tlak vzniká v důsledku vypařování volné a vázané vody. Vzniklá pára vytváří ve struktuře betonu napětí, které má za následek odštěpování povrchové části betonu – tzv. explozivní odštěpování. To má následně vliv na požární odolnost prvku.

4.1.2 Faktory ovlivňující velikost pórového tlaku

Na velikosti pórového tlaku se podílí hned několik faktorů (Bangi, a další, 2011):

a) Vlhkost
   - Tento faktor je jeden z nejvíce přispívajících k velikosti pórového tlaku. U betonu s vysokým obsahem vlhkosti se při zahřátí tvoří větší množství vodní páry (ve srovnání s betonem s nižší vlhkostí), která způsobuje napětí v povrchové části prvku.

b) Mikrostruktura betonu
   - Čím více je mikrostruktura otevřená (propojený pórový systém), tím vodní pára může unikat rychleji, což má za následek snížení tlaku vodní páry. Jestli má však beton hutnější mikrostrukturu, tlak dosáhne vysokých hodnot (kolem 3 MPa) a může nastat explozivní odprýskání. Tímto jevem trpí především vysokohodnotné betony (HPC), které mají velmi hutnou mikrostrukturu.

c) Rychlost nárůstu teploty
   - Rychlost zvyšování teploty, která působí na beton, výrazně ovlivňuje velikost pórových tlaků. Čím rychleji se teplota zvyšuje, tím výrazněji se zvětšuje pórový tlak v betonu.

4.1.3 Vliv pórového tlaku v ocelobetonovém prvku

Hlavní rozdíl chování ocelobetonového a betonového prvku z hlediska rozvoje pórového tlaku je způsoben odlišným mechanismem uvolňování vodní páry z prvku. V prvku z prostého betonu se může vodní pára uvolňovat všemi směry mimo prvek, což sníží pórový tlak. Případně může dojít k explozivnímu odštěpení, jak je popsáno výše. Oproti tomu v ocelobetonovém prvku je bráněno úniku vodní páře ocelovým pláštěm. To má za následek navýšení pórových tlaků, které mohou způsobit explozi prvku. K zabránění této exploze lze navrhnout opatření pro snížení pórových tlaků a uvolňování vodní páry z prvku, viz níže. (Lie, a další, 1990)

4.1.4 Způsoby snížení pórových tlaků

Pro snížení pórových tlaků v betonových a ocelobetonových prvcích se používají primárně dva druhy opatření (Phan, 2008):

Nejběžnější a vždy používané opatření pro ocelobetonový prvek (sloup tvořený ocelovým pláštěm a betonovou výplní) je vytvoření malých otvorů v ocelovém plášti. To má za následek odvedení naakumulovaných vodních par a tím snížení pórového tlaku uvnitř prvku.

Druhý způsob opatření lze použít jak u betonových tak u ocelobetonových prvků a to přidání rozptýlené výztuže ve formě plastových vláken. Tato vlákna výrazně navyšují požární odolnost betonových konstrukcí a díky vytvoření 3D mikrostruktury betonu umožňují snadnější uvolňování vodní páry z betonu. Tento způsob se ovšem u ocelobetonových prvků doposud příliš nevyužíval, což byl důvod pro navržení experimentu popsaného v praktické části této práce.

Pro ocelobetonové sloupy se jeví jako zajímavé využít kombinaci výše uvedených postupů, kdy otvory v ocelové části by odvedly akumulující se vodní páru pod povrchem a vlákna by vytvořila ideální mikrostrukturu betonu a snadnější uvolňování vodní páry.

4.2 Měření pórového tlaku

K měření pórového tlaku v betonu za zvýšené teploty neexistují průmyslově vyráběné měřiče. Proto v následující části bude znázorněno, jakým způsobem lze pórový tlak v této situaci měřit, a jaká konstrukce tlakoměru je k tomuto účelu vhodná. Tato část vychází z vědeckých prací, ve kterých byl tento postup využit a popsán (Phan, 2008) (Bangi, a další, 2011) (Kalifa, a další, 2000) (Mindeguia, a další, 2010)

Dále popisovaný pórový tlakoměr není použit v experimentální části této práce, a to z důvodu velké náročnosti na jeho výrobu a velkou časovou a finanční náročnost. Toto téma je dobrým námětem pro další výzkum a bude předmětem některé z dalších odborných prací.

4.2.1 Princip tlakoměru

Inspirací pro výrobu tlakoměru měřícího pórový tlak v betonu za zvýšené teploty může být takzvaný piezometr. Piezometr slouží k měření stlačitelnosti kapaliny. Jeho primární využití je v geologii, a to v zjišťování pórového tlaku podzemní vody. Pro použití při vysokoteplotních experimentech by musel být upraven, aby vydržel vysoké teploty a byl schopen měřit tlak v relativně malých betonových vzorcích.

4.2.2 Tlakoměrná sestava

Tlakoměrné sestava pro měření pórového tlaku v betonu za zvýšené teploty se skládá ze tří základních částí. Nástavec (viz Obr. 10 a 11), který dovede tlak par do snímače, který převede tlak na elektrický impuls a ten putuje do dataloggeru, který zaznamená konkrétní hodnoty pórového tlaku v daném místě.

a) Nástavec

Tato část tlakoměrné sestavy se skládá ze čtyř prvků. (Phan, 2008) (Bangi, a další, 2011) (Mindeguia, a další, 2010)

- **Porézní kovový disk**
  - Je vyroben z porézního slinutého kovu (viz Obr. 8)

Obrázek 8. Porézní disk (MoldMaking, 2012)

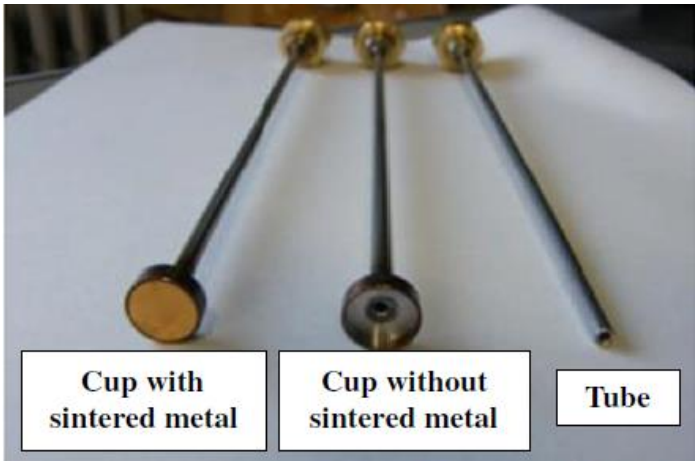
- **Kalíšek z nerez oceli**
  - Kalíšek je přivařen k nerezové trubce a je v něm vložen porézní kovový disk (viz Obr. 9)

Obrázek 9. Kalíšek (MoldMaking, 2012)

- **Trubka z nerezové oceli**
  - Nerezová trubka spojuje kalíšek se snímačem a slouží k přenesení tlaku páry do snímače

- **Silikonový olej**
  - Olej usnadňuje přenos veškerého tlaku z betonu do tlakového snímače

Tato část sestavy je vystavena extrémním teplotním podmínkám a umožňuje přenos tlaku do tlakového snímače, který je umístěn mimo pec.



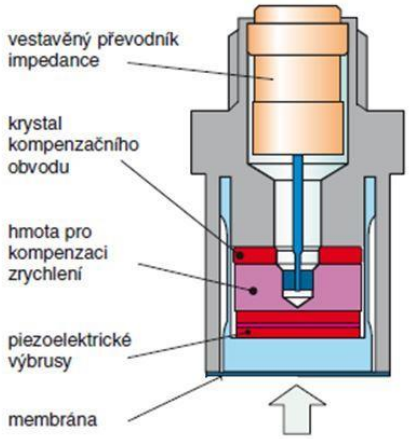
Obrázek 10. Druhy nástavců (Bangi, a další, 2011)

Obrázek 11. Různé velikosti nástavců (Phan, 2008)

b) Tlakový snímač

V tlakoměrné sestavě se mohou použít dva druhy snímačů tlaku. (Štětina, a další) (Kadlec, 2007) (Kadlec, 2007)

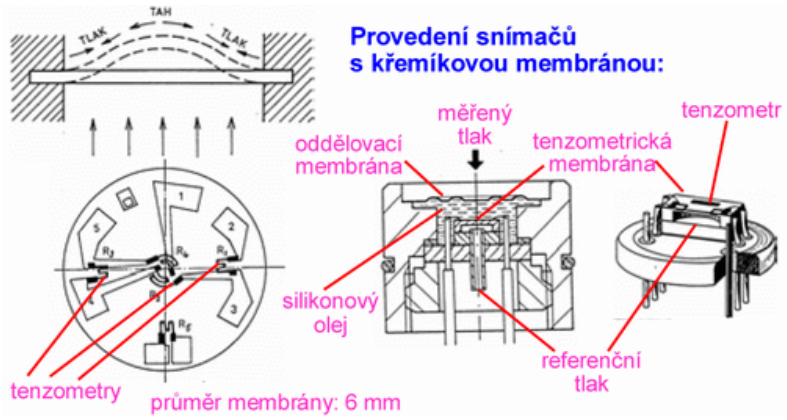
- **Piezoeletrický snímač tlaku**
  - Snímač určuje tlak pomocí piezoelektrického jevu. Namáháním některých krystalů (křemen, barium-titan, …) vzniká elektrický náboj, který je úměrný velikosti mechanického napětí. (Kadlec, 2007) (Štětina, a další) (viz Obr. 12 a 13)



Obrázek 12. Schéma piezoeletrické snímače tlaku (Nevima, a další)

Obrázek 13. Druhy piezoeletrické snímače tlaku (Ahlborn)

- **Tenzometrický snímač tlaku**
  - Převádí tlakové změny na deformaci membrány (kovová, křemíková) stupeň deformace je snímán tenzometrem. Tenzometr mění elektrický odpor v závislosti na deformaci. (Kadlec, 2007) (Štětina, a další) (viz Obr. 14 a 15)



Obrázek 14. Schéma tenzometrického snímače tlaku (Prokopová)

Obrázek 15. Druh tenzometrického snímače tlaku (VŠB)

c) Datalogger

Datalogger je zařízení pro sběr a ukládání analogových a binárních informací. Jde o prostředníka mezi snímacími senzory a počítačem. Používají se zejména ve vědě, průmyslu a při výuce. (National Instruments) (viz Obr. 16)

Obrázek 16. Datalogger (Fieldworks)

5 Vlhkost

Vlhkost je fyzikální veličina, kterou za běžných podmínek obsahuje každý materiál a která může významně ovlivnit vlastnost daného materiálu.

5.1 Základní teorie vlivu vlhkosti

5.1.1 Co je to vlhkost betonu a co způsobuje

Vlhkost je voda obsažená v betonu, která do něj byla vnesena během jeho výroby případně během životnosti prvku z okolního prostředí. Vlhkost ovlivňuje tepelně-technické, fyzikální, statické, estetické vlastnosti stavebních materiálů a může mít často za následek znehodnocení stavebního materiálu či stavební konstrukce.

Vlhkost je možné klasifikovat, jak je uvedeno v Tab. 3.

Tabulka 3. Klasifikace vlhkosti (TVVM)

Hodnocení vlhkosti	***Vlhkost (% hm.)***
Velmi nízká	*< 3*
Nízká	*3 - 5*
Zvýšená	*5 – 7,5*
Vysoká	*7,5 - 10*
Velmi vysoká	*> 10*

5.1.2 Vliv vlhkosti v betonu za zvýšených teplot

Voda obsažená v betonu se začne významně odpařovat při dosažení teploty 100 °C a začne zvyšovat pórový tlak v mikrostruktuře betonu. Při vysoké vlhkosti a vysoké hustotě mikrostruktury může dojít k tak vysokému pórovému tlaku, že dojde k explozi a odštěpení části betonu. To má následně vliv na požární odolnost prvku. V nejhorším případě může dojít až k statickému selhání prvku a zřícení konstrukce.

Proto se snažíme ve vysokohodnotných betonech o co nejmenší procento vlhkosti. Jako maximální hodnota vlhkosti, při které je nepravděpodobné odštěpování, se uvažují 3 % hmotnosti. (van der Heijden, a další, 2011)

5.1.3 Procesy v betonu ovlivněné vlhkostí

Při dosažení teploty 105 °C v povrchové vrstvě betonu nastává odpařování volné vody směrem na povrch betonu, kde ochlazuje povrch a část vody se tlačí směrem dovnitř tzv. difuze. Tento proces probíhá až do teploty okolo 160 °C. Během této doby je také zaznamenáván značný nárůst pórového tlaku.

V rozmezí 160 °C až 180 °C nastává velmi rychlý nárůst pórového tlaku z důvodu uvolňování vázané vody. Tento proces uvolňování vázané vody pokračuje, při teplotě 180 °C je dosaženo nejvyšších hodnot rychlosti nárůstu pórového tlaku.

Při teplotě 180 °C až 220 °C se nadále uvolňuje vázaná voda, která navyšuje pórový tlak a znovu také roste rychlost zvyšování teploty. Při dosažení hranice 220 °C je dosaženo maximálního pórového tlaku a následuje jeho prudký pokles z důvodu uvolnění vodní páry.

Tyto procesy a hraniční teploty se mohou lišit primárně v důsledku rychlostí zahřívání betonu a jeho mikrostruktuře.

Při vysoké vlhkosti může dojít k tak velkému nárůstu pórového tlaku, že dojde k odštěpení betonu. (Bangi, a další, 2011) (Lie, a další, 1990)

5.1.4 Vliv vlhkosti v ocelobetonovém prvku za zvýšené teploty

V ocelobetonovém prvku platí podobné procesy jako v běžném betonovém. V ocelobetonovém prvku z důvodu rozdílné teploty a roztažnosti ocelového pláště a betonové výplně může dojít k jejich oddělení a vytvoření mezery, což může vést ke snížení únosnosti. Ocelový plášť působí jako bariéra, která brání v úniku vodní páry mimo prvek a tím se zvyšuje velikost tlaku působícího na plášť. Tento jev může způsobit až protržení ocelového pláště. Tomuto jevu se dá zabránit speciálními opatřeními, které pomohou s uvolněním vodní páry. Tato opatření jsou popsána v kapitole 4.1.4.

5.2 Měření vlhkosti

Způsobů, jak měřit vlhkost materiálů, je několik. Existuje několik metod, které mohou vycházet z různých principů Každá metoda má svá kritéria a omezení, což musí být při volbě metody a druhu vlhkoměru zohledněno. (van der Heijden, a další, 2011) (Quincot, a další, 2011)

5.2.1 Metody měření vlhkosti

Měření vlhkosti se dělí na dvě základní metody, kterými můžeme zjistit aktuální hladinu vlhkosti v materiálu. Tyto metody jsou absolutní (přímé) a relativní (nepřímé). Ty se dále pak dělí na konkrétní metody. (TVVM)

a) Metody absolutní (přímé)

Stanovení obsahu vody na základě odstranění vlhkosti z testovaného vzorku (vysoušení, extrakce). Tato metoda se dále dělí na:

- ***Gravimetrická metoda***
  - *voda je ze vzorku odstraněna pomocí vysoušení za přesně definovaných podmínek, a její obsah je určen na základě měření hmotnostní ztráty po sušení případně titraci*
  - *voda může být ze vzorku odstraněna také zahříváním horkým suchým vzduchem a jejím zachytáváním v komoře s vysoušecím činidlem*

- *tato metoda je považována za standardní pro stanovení vlhkosti a je velmi často používána pro kalibraci ostatních měřících metod*

- ***Extrakční metoda***
  - *voda je extrahována z materiálu do vhodného rozpouštědla, kde je její obsah stanoven pomocí titrace.*

- ***Azeotropická destilace***
  - *voda je destilována s organickým rozpouštědlem do kalibrovaného receiveru.*

Tyto metody se dají použít primárně jen ve zkušebnách na vzorku betonu, ze kterého nám určí aktuální stav vlhkosti nikoliv její průběh při zahřívání prvku. Z tohoto důvodu je není možno použít při zkoušení prvku za zvýšené teploty.

b) Metody relativní (nepřímé)

Obsah vlhkosti je stanoven na základě měření jiné fyzikální veličiny, jejíž hodnoty je závislá na množství vody ve vzorku obsažené – tato závislost musí být jasně známa a definovaná.

Tato metoda se dále dělí na:

- ***Odporová metoda***
  - *elektrický odpor materiálů je závislý na obsahu vlhkosti. Tato vlastnost může být využita pro stanovení vlhkosti tuto metodu není možné použít pro materiály vykazující zvýšený obsah solí. Neboť by výrazně došlo k nárůstu elektrické vodivosti v důsledku iontové vodivosti solí*

- ***Dielektrická metoda***
  - *metody založené na měření reálné (případně také imaginární) části komplexní relativní permitivity materiálů, která je měřena jako funkce obsahu vody*

- ***Radiometrická metoda***
  - *založené na absorpci β či γ záření nebo vázání či rozptýlení neutronů*

- ***Metoda nukleární magnetické rezonance (NMR method)***
  - *absorpce vysokofrekvenční energie v materiálu vystaveném magnetickému poli je měřena jako funkce obsahu vody. Metoda umožňuje rozlišit volnou a vázanou vodu.*

- ***Absorpce a reflexe infračerveného záření (IR method)***
  - *měřením reflexe infračerveného záření může být provedeno stanovení množství vody v povrchových oblastech materiálu*

- ***Chemická metoda***
  - *metody založené na chemické reakci vody obsažené v materiálu se specifickou chemickou látkou – např. CaC_2*

- ***Ultrazvuková metoda***
  - *Je měřena rychlost ultrazvukových vln v závislosti na obsahu vody*

5.2.2 Druhy vlhkoměrů

Na trhu je k dispozici několik druhů vlhkoměrů. Liší se primárně v metodě měření, přesnosti a vhodnosti pro různé druhy konstrukcí a materiálů. (Pochmanová, a další, 2011) (TESTO, 2015)

Stejně jako v případě tlakového měřiče, ani v případě vlhkoměru se nepodařilo najít takový, který by byl schopen měřit při tak vysokých teplotách, jaké budou dosaženy v plánovaném experimentu. Z tohoto důvodu nebyla vlhkost betonu v průběhu experimentu měřena, pouze byla stanovena její počáteční hodnota z rozdílu hmotností betonových částí vzorků před a po zkoušce.

a) Odporové vlhkoměry hrotové (viz Obr. 17 a 18)

Obrázek 17. Odporový vlhkoměr (I &CS)

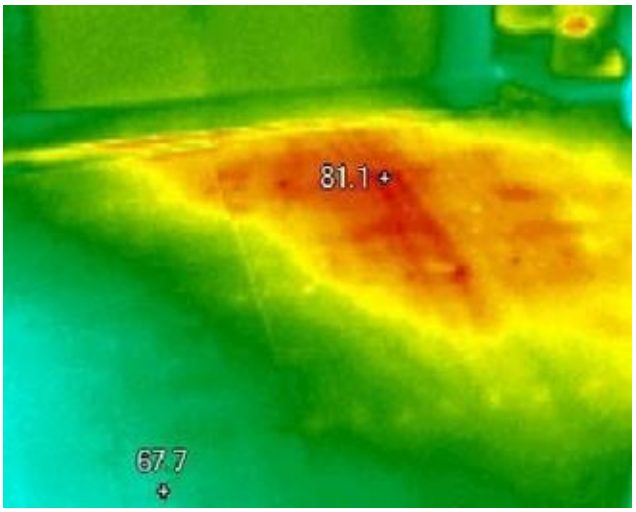
Obrázek 18 Hroty vlhkoměru (I &CS)

b) Mikrovlnné vlhkoměry (viz Obr. 19-22)

Obrázek 19. Mikrovlnný vlhkoměr (TESTO, 2015)

Obrázek 20. způsob měření vlhkoměrem (TESTO, 2015)

Obrázek 21. Termografická kamera (I &CS)



Obrázek 22. termografické pole vlhkosti (Pochmanová, a další, 2011)

c) Impendační vlhkoměry (viz Obr. 23)

Obrázek 23. Impendační vlhkoměr (Pochmanová, a další, 2011)

d) Speciální sondy pro měření vlhkosti (viz Obr. 24)

Obrázek 24. Sonda pro měření vlhkosti a teploty (Datael)

Praktická část

6 Návrh experimentu

Hlavní částí této práce je soubor experimentů zaměřených na měření transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích vyztužených rozptýlenou výztuží. Experimenty byly rozděleny do dvou celků, a to experimenty provedené na Fakultě stavební ČVUT v Praze a experiment provedený v Požární zkušebně PAVUS, a.s. Na Fakultě stavební ČVUT v Praze byly zkoušeny vzorky ocelobetonových sloupků. Tyto vzorky byly vystaveny tepelnému záření z plynového infrazářiče KASPO K30 STL (KASPO, 2006). Cílem tohoto experimentu bylo ověření možnosti použití plynového zářiče k tomuto vědeckému účelu (standardně se tento zářič používá pro vytápění průmyslových objektů), ověření funkčnosti termočlánků a dataloggeru a prvotní ověření chování betonu s rozptýlenou výztuží v ocelovém plášti.

V Požární zkušebně PAVUS, a.s., bylo 16 betonových a ocelobetonových prvků umístěno ve vodorovné peci H2 a zde vystaveno po dobu 180 minut teplotě, která byla řízena normovou teplotní křivkou. Cílem tohoto experimentu bylo studium transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích a jejich porovnávání. (Štefan, 2016)

6.1 Charakteristika zkoušky

- **Zkouška ČVUT v Praze Fakulta stavební**

Experimenty proběhly v několika termínech od května do prosince 2016. Místo konání experimentů bylo na dvoře za budovou D Fakulty stavební ČVUT v Praze. Prvky byly zatěžovány sáláním tepla z plynového infrazářiče KASPO K30 STL. Teploty z různých míst ve vzorku byly přenášeny pomocí kabelových termočlánků do dataloggeru a jím vyexportovány do PC ve formě přesných teplot.

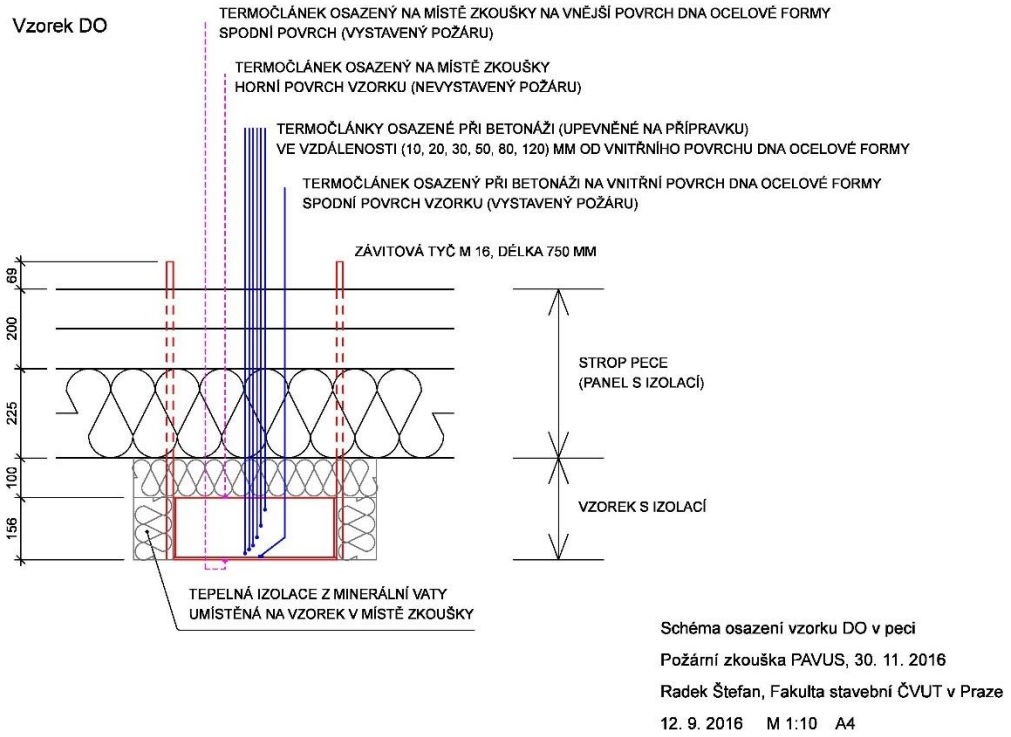
- **Zkouška Požární zkušebna PAVUS, a.s.**

Hlavní experiment proběhl 30. 11. 2016 v Požární zkušebně PAVUS, a.s. Pro experiment byla použita Horizontální pec H2, ve které byla teplota řízená normovou teplotní křivkou po dobu 180 minut. Během této doby byly zaznamenávány teploty jednotlivých termočlánků a teplota plynu v peci v hlavní ústředně zkušebny a následně předána ke zpracování výsledků zkoušky. (Štefan, 2016)

6.2 Charakteristika vzorků a umístění termočlánků

Pro zkoušku byly vytvořeny čtyři základní prvky s rozdílnými specifikacemi pro zjištění transportu tepla v prvcích rozdílných tvarů a parametrů. (Štefan, 2016)

První vzorek byl vytvořen jako ocelobetonová deska (DO). Tato deska o rozměrech 412 x 412 x 156 mm a váze 80 kg je vybavena 7 umístěnými termočlánky, které jsou v ní zabetonovány. Další dva termočlánky (na ohřívaném a neohřívaném povrchu) byly osazeny na místě zkoušky. Samotné rozmístění termočlánků je uvedeno na Obr. 25.

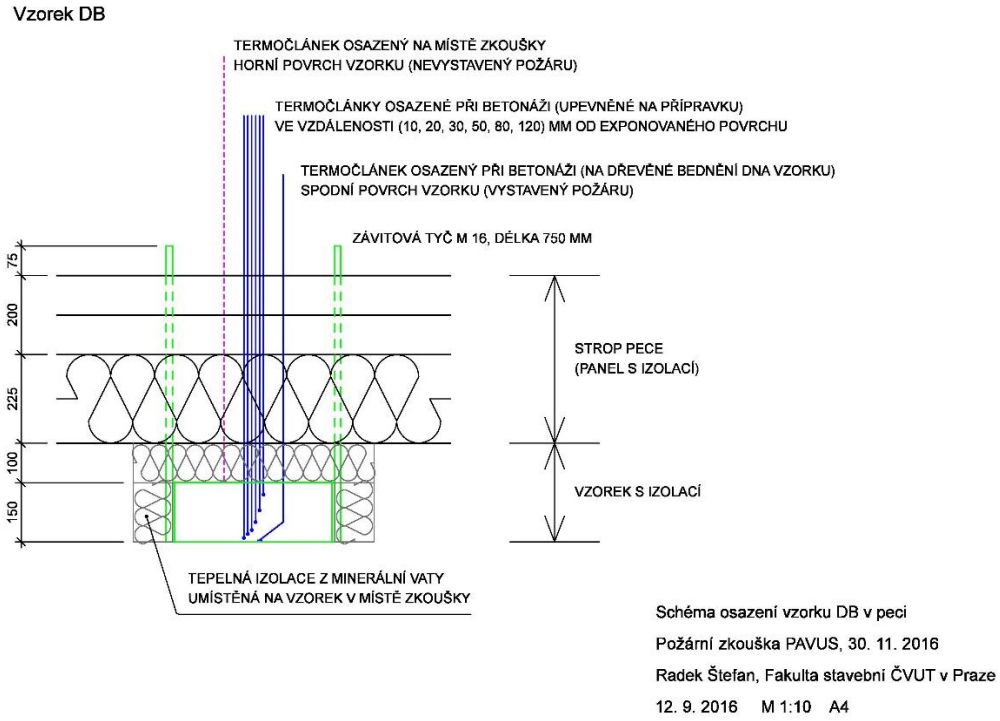


Obrázek 25. Schéma osazení vzorku DO v peci (Štefan, 2016)

Deska má ocelové bednění z pěti stran (dno plus všechny boční strany), viz Obr. 26.

Obrázek 26. Deska ocelová (Štefan, 2016)

Druhý vzorek byl vytvořen jako betonová deska (DB). Tato deska o rozměrech 412 x 412 x 150 mm a váze 72 kg má množství a rozmístění termočlánků stejné jako deska ocelobetonová, viz Obr. 27, jen s tím rozdílem, že zde byl termočlánek na ohřívané straně osazen již při betonáži a žádný další nebyl na ohřívanou stranu dodatečně přidán.

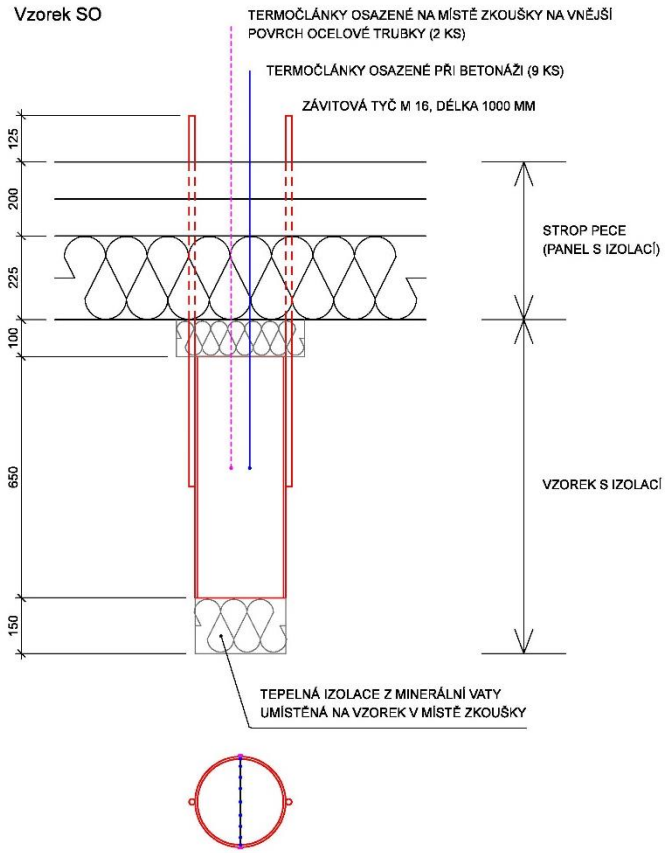


Obrázek 27. Schéma osazení vzorku (Štefan, 2016)

Ocelové bednění je u desky DB pouze z bočních stran, tedy bez dna, viz Obr. 28.

Obrázek 28. Deska betonová (Vlastní 2016)

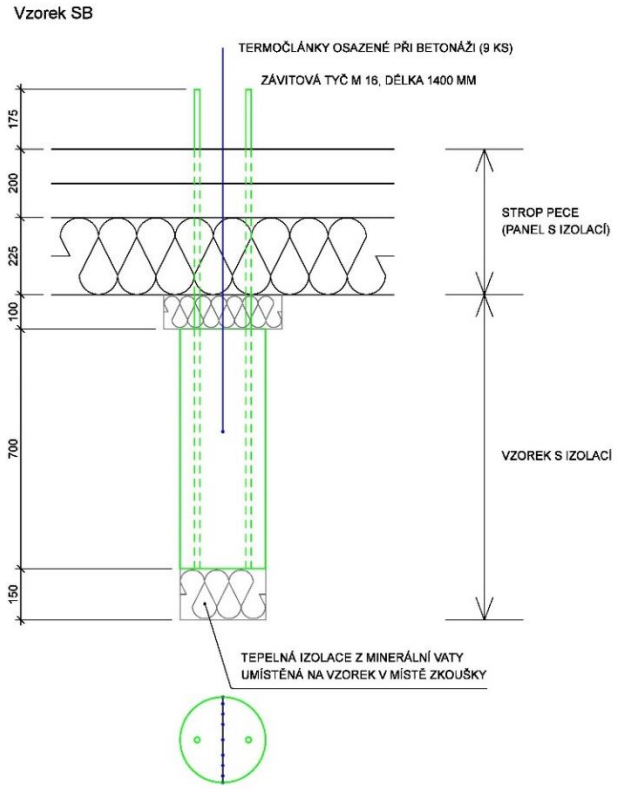
Třetí typ vzorku byl vytvořen jako ocelobetonový sloupek (SO). Sloupek má rozměry Ø 244,5 mm, L 650 mm a váhu 93 kg. Je vybaven 9 termočlánky, které jsou ve sloupku zabetonovány a dva termočlánky budou připojeny až na místě. Schéma vzorku je znázorněno na Obr. 29. Plášť (bednění) tohoto sloupku je tvořen ocelovou trubkou o tloušťce 6,3 mm, viz Obr. 30.



Obrázek 29. Schéma osazení vzorku SO v (Štefan, 2016)

Obrázek 30. Sloup ocelový (Štefan, 2016)

Čtvrtý typ vzorku byl vytvořen jako betonový sloupek (SB). Sloupek má rozměry Ø 250 mm, L 700 mm a váhu 86 kg. Je vybaven 9 termočlánky, které jsou ve sloupku zabetonovány (viz Obr. 31). Bednění tohoto sloupku je tvořeno papírovým tubusem, viz Obr. 32.



Obrázek 31. Schéma osazení vzorku SB v peci (Štefan, 2016)

Obrázek 32. Betonový sloupek (Vlastní 2016)

Přesná specifikace prvků a termočlánků je uvedena v Tab. 4.

Tabulka 4. *Specifikace vzorků (Štefan, 2016)*

Označení	Počet	Rozměry (mm)	Hmotnost (kg)	Počet termočlánků zabetonovaných		Počet termočlánků Osazených na místě	
				V 1 vzorku	Celkem	V 1 vzorku	Celkem
DO	8	412 x 412 x 156	80	7	56	2	16
DB	4	412 x 412 x 150	72	7	28	1	4
SO	2	Ø244,5, L 650	93	9	18	2	4
SB	2	Ø250, L 700	86	9	18	0	0

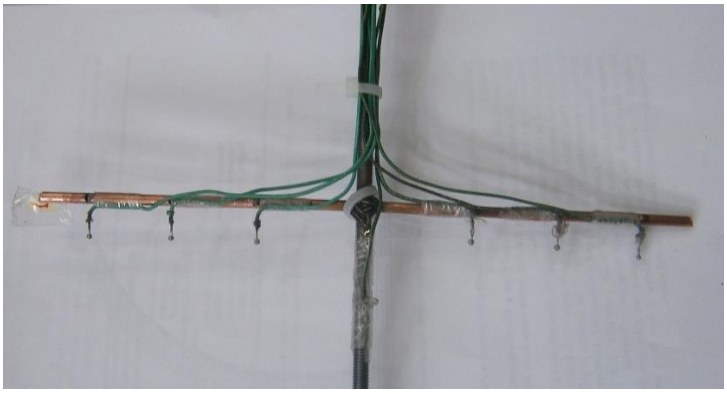
6.3 Termočlánky a jejich specifikace

Pro měření teploty jednotlivých prvků byly použity kabelové termočlánky MTC 12 typu K, které mají rozsah teplot od -200 °C až do 1200 °C. Použitý druh izolace termočlánku byl GHGH oval 2x0,5 mm. Zakončení termočlánků bylo bez keramického korálku a s miniaturním vysokoteplotním konektorem MTCK-MM-K. Přesné vlastnosti a specifikace kabelových termočlánků jsou vysvětleny v teoretické části této práce.

Tyto termočlánky byly přichyceny na předem připravené nosiče (viz Obr. 33), které zaručily přesnost umístění jednotlivých termočlánků v prvcích. Nosiče pro deskové prvky byly „žebříčkové“, umístěné nad sebou ve vzdálenostech (10, 20, 30, 50, 80, 120) mm ode dna formy. Těchto nosičů bylo použito 12, tedy 1 do každého deskového vzorku. Dalších 12 samotných termočlánků bylo umístěno na dno deskových prvků.

Obrázek 33. "žebříčkové" nosiče (Vlastní 2016)

Nosiče pro sloupkové prvky byly „osové“ a jednotlivé termočlánky byly umístěny vedle sebe na dvou ramenech po třech termočláncích (viz Obr. 34), jeden termočlánek byl umístěn v ose sloupu a další dva byly nalepeny na vnitřní straně pláště. Celkový počet termočlánků použitých pro sloupkové prvky byl 36.

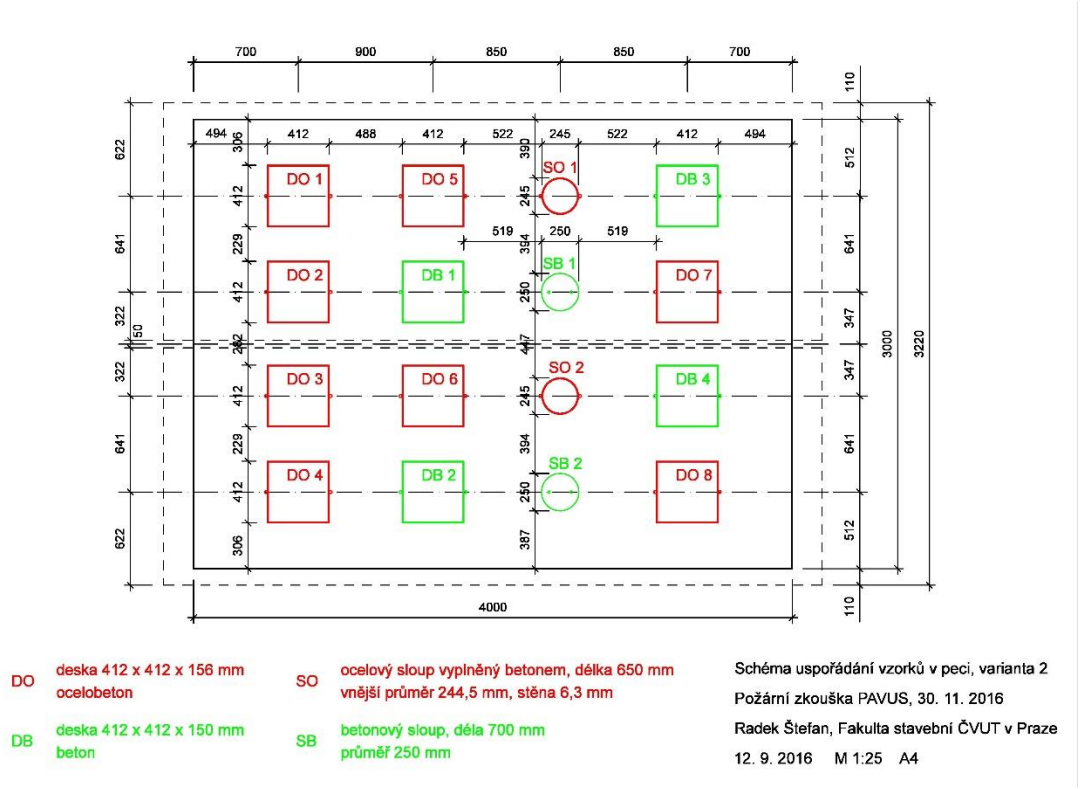


Obrázek 34. "osové" nosiče (Štefan, 2016)

V místě zkoušky byly na vzorky osazeny samotné termočlánky. Prvních 12 termočlánků bylo umístěno na horní izolovaný povrch deskových prvků, tudíž na každý prvek připadl jeden termočlánek. Následných 8 termočlánků bylo umístěno na spodní povrch ocelobetonových deskových vzorků (opět na každý vzorek jeden termočlánek). Poslední 4 termočlánky byly umístěny na ocelový plášť ocelobetonových sloupků (na každý sloupek 2).

6.4 Přichycení prvků v peci a jejich izolace

Aby vzorky mohly být vystaveny požáru podle požadovaných kritérii, musely být umístěny pod stropem horizontální pece H2 (viz Obr. 35). Z tohoto důvodu musely být vzorky opatřeny závitovými tyčemi M16, které mohly být prostrčeny stropem pece a následně k němu připevněny. Tyče ke vzorkům s ocelovou konstrukcí byly přivařeny a ve vzorku betonového sloupu byly přímo zabetonovány. Tím byla zabezpečena stabilní polohu vzorků v peci (viz Obr. 36).



Obrázek 35. Uspořádání prvků v peci (Štefan, 2016)

Obrázek 36. Přivařené závitové tyče (Vlastní 2016)

Pro správné zahřívání vzorků musely být některé jejich části odizolovány. Proto byla použita izolace z minerální vaty tloušťky 100 mm, která vzorky odizolovala od samotného stropu pece. Deskové prvky dále musely být izolovány z bočních stran, aby bylo možné je zahřívat pouze z požadované spodní strany. Toho bylo dosaženo pomocí tepelné izolace z minerální vaty tloušťky 100 mm, která byla nasazena na přivařené trny z bočních stran desek a následně ještě přichycena ocelovým drátem pro zafixování její polohy a správnému přilnutí k povrchu. Sloupkové prvky byly izolovány tepelnou izolací tloušťky 150 mm ze spodní strany, aby je bylo možné zahřívat pouze z bočních stran, viz Obr. 37. (Štefan, 2016)

Betonová deska

Ocelobetonová deska

Betonový sloupek

Ocelobetonový sloupek

Obrázek 37. Osazení všech čtyř druhů vzorků v peci (Vlastní 2016)

7 Příprava vzorků

Samotná příprava a betonáž vzorků probíhala ve dvou dnech v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze. Na přípravě a betonáži se podílelo šest lidí, z toho čtyři studenti doktorského studia, vedoucí této diplomové práce pan Ing. Radek Štefan, PhD., a autor této práce (Bc. Martin Kuča).

Samotná příprava započala nanesením ocelových konstrukcí z venkovních prostor do laboratoře, kde následně probíhala samotná kompletace a betonáž.

V první řadě bylo zapotřebí očistit ocelové konstrukce od rzi a nečistot. Poté, co byly ocelové části připraveny, mohly se k nim nainstalovat prvky nesoucí samotné termočlánky.

Obrázek 38. Konstrukce nesoucí termočlánky – sloupek (Štefan, 2016)

Obrázek 39. Konstrukce nesoucí termočlánky - deska (Vlastní 2016)

Po samotném zabudování konstrukcí nesoucí termočlánky (viz Obr. 38 a 39) byly vzorky převáženy (viz Obr. 40), aby bylo možné následně zjistit hmotnost samotného betonu před a po zkoušce a z toho orientačně určit vlhkost vzorku před zkouškou.

Obrázek 40. Vážení vzorku (Vlastní 2016)

Dále mohla následovat už samotná výroba betonu. K té bylo zapotřebí osm složek, viz Obr. 41. Byly to: hrubé kamenivo frakce 8-16, jemné kamenivo frakce 4-8, písek frakce 0-4, cement, voda, ocelová vlákna, polypropylenová vlákna a plastifikátor.

Hrubé Kamenivo

Jemné kamenivo

Písek

Cement

Voda

Ocelová vlákna

Polypropylenová vlákna

Plastifikátor

Obrázek 41. Složky pro výrobu čerstvého betonu (Vlastní 2016)

Po připravení složek následovalo jejich smíchání v míchačce, viz Obr. 42. Nejprve se vsypalo hrubé kamenivo, písek, cement a ocelové vlákna. Následovalo první promíchání, aby se složky promíchaly. Poté se vsypalo jemné kamenivo a polypropylenová vlákna. Při následném míchání se přilívala voda, ve které byl přimíchán plastifikátor. Po důkladném promíchání a následném proházení směsi v míchačce se mohl začít ukládat beton do připravených forem.

Obrázek 42. Promíchání složek v míchačce (Vlastní 2016)

Ukládání betonu do forem bylo komplikované, protože se muselo dávat pozor na předem přichystané a upevněné termočlánky. Připravený beton byl také velmi husté konzistence, tudíž se špatně nabíral a musel být v průběhu několikrát důkladně zhutněn na vibračním stole, viz Obr. 43.

Obrázek 43. Vybetonování forem (Vlastní 2016)

Vybetonované vzorky byly následně uskladněny v areálu Fakulty stavební ČVUT v Praze do doby, než byly převezeny do požární zkušebny (viz Obr. 44).

Obrázek 44. Vzorky připravené k převezení (Štefan, 2016)

8 Experimenty na Fakultě stavební ČVUT v Praze

Samotnému hlavnímu experimentu v Požární zkušebně PAVUS, a.s., předcházely zkušební experimenty na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Tyto experimenty měly za úkol ověřit možnosti použití plynového zářiče k tomuto experimentálnímu účelu (standardně se tento zářič používá pro vytápění průmyslových objektů), ověřit funkčnost termočlánků a dataloggeru a také ověřit chování betonu s rozptýlenou výztuží v ocelovém plášti při vystavení vysokým teplotám. Při těchto experimentech byly zkoušeny vzorky ocelobetonových sloupků podobných těm, které byly využity při následné zkoušce v Požární zkušebně PAVUS, a.s., viz Obr. 45.

Zářič: Plynové zářiče KASPO K30 STL o výkonu 30 kW (KASPO, 2006)

Sloup: Vzorky byly vybetonovány 21. 12. 2015

Obrázek 45. Průběh výroby a betonáže ocelobetonového sloupu (Štefan, 2016)

8.1 Experiment č. 1

Datum a místo konání: 17. 5. 2016, cca 9:00–13:00

Na dvoře za budovou D fakulty stavební ČVUT v Praze

8.1.1 Průběh experimentu

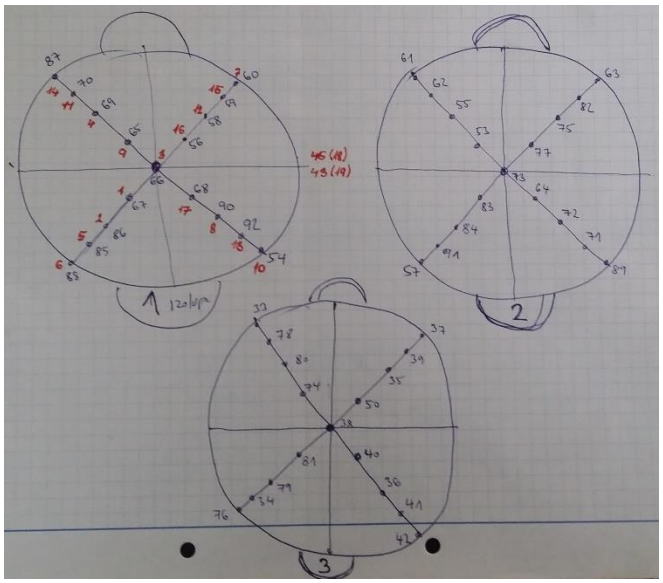
Příprava experimentu začala v 9 hodin. Bylo zapotřebí smontovat nosnou konstrukci, na které byl zavěšen plynový zářič KASPO K30 STL o výkonu 30 kW. K tomuto zářiči byla dále připojena plynová láhev s obsahem 10 kg stlačeného plynu, viz Obr. 46. Toto množství plynu by mělo vystačit na čtyřhodinový provoz zářiče.

Obrázek 46. Zavěšení zářiče a připojení plynové lahve (Vlastní, 2016)

Dále byl připraven zkušební vzorek ocelobetonového sloupu, který byl umístěn cca. 10 cm od zářiče, aby nedocházelo k velkým ztrátám tepla, viz Obr. 47.

Obrázek 47. Umístění vzorku před zářičem (Vlastní, 2016)

Ve vzorku byly umístěny a zabetonovány termočlánky. Termočlánky byly rozmístěny na čtyřech ramenech vždy po čtyřech, viz Obr. 45 a 48. Jeden termočlánek byl ještě umístěn přímo ve středu vzorku a další dva kontrolní na plášti přímo na ozářené straně.



Obrázek 48. Rozmístění termočlánků (Štefan, 2016)

Každý termočlánek měl své číslo, aby bylo zřejmé, na jakém místě se daný termočlánek ve vzorku nachází a aby mohlo správně proběhnout vyhodnocení experimentu. Termočlánky byly zapojeny k dataloggeru k jednotlivým číselným portům, viz Obr. 49.

Obrázek 49. Zapojení termočlánků do dataloggeru (Vlastní, 2016)

Zaznamenávání dat v dataloggeru bylo nastaveno po 20 s po celou dobu experimentu. Data se zaznamenávala ve vyhrazeném notebooku do datového souboru, ze kterého je možné zaznamenané hodnoty vyhodnotit pomocí grafů.

Samotný průběh experimentu začal cca. v 11 hodin. Po zapnutí zářiče nastaly ovšem komplikace. Zářič, který měl jen vyzařovat teplo (keramické desky zářiče se měly rozžhavit a sálat), po jeho zapálení neustále hořel, viz Obr. 50. Jelikož tento jev neustal ani po delší době, byl zhruba po půl hodině provozu experiment ukončen, aby nedošlo k trvalému poškození zářiče.

Obrázek 50. Hoření zářiče (Vlastní, 2016)

8.1.2 Vyhodnocení experimentu

Experiment byl ukončen po půl hodině z důvodu hoření zářiče a byl tedy vyhodnocen jako neúspěšný. Během půl hodiny měření se povrch prvku dokázal zahřát až na teplotu 300 °C a vnitřní část prvku na zhruba 50 °C. To ukázalo, že zářič je dostatečně výkonný pro tento typ experimentu. Správně také fungovalo měření teploty a jeho zaznamenávání. Jen jeden termočlánek na čelní straně prvku se poškodil z důvodu zvolení nevhodného typu (zde měl být zvolen spíše plášťový termočlánek, který je schopen odolat přímému vystavení záření).

Testovaný vzorek zůstal v dobrém stavu bez poškození a tak mohl být použit v další zkoušce. Zářič byl dočasně odstaven a byl vyžádán dotaz na výrobce, v čem byla chyba a proč zářič nefungoval, jak by měl. Revizní technik výrobce konstatoval špatné nastavení trysek, které následně upravil tak, že zářič fungoval bez problémů a mohl být využit pro další zkoušku.

8.2 Experiment č. 2

Datum a místo konání: 31. 5. 2016, cca 10:00–15:00

Na dvoře za budovou D fakulty stavební ČVUT v Praze

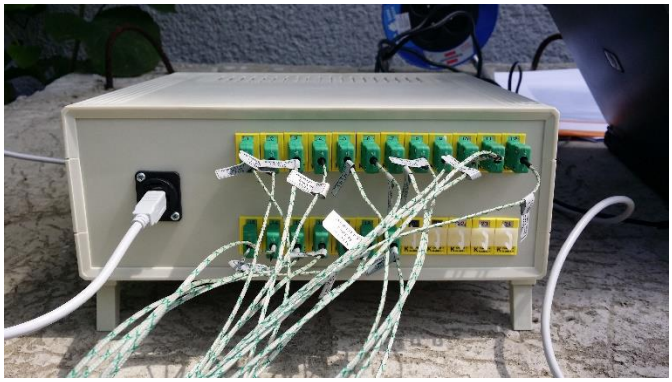
8.2.1 Průběh experimentu

Druhý experiment měl stejné zadání a parametry jako experiment první. Problémy z prvního experimentu se vyřešily, tudíž mohl následovat druhý pokus.

Jako první byl smontován stojan, zavěšen plynový zářič a umístěn vzorek. Vše tentokrát započalo dobře. Zářič nevzplanul, ale jen správně vyzařoval teplo, což bylo zřejmé z rozžhavených keramických destiček v zářiči, viz Obr. 51.

Obrázek 51. Rozžhavené keramické destičky zářiče (Vlastní 2016)

Termočlánky zapojené do dataloggeru právně začaly ukazovat zvyšující teplotu. Nejvyšší dosažená teplota v prvku dosahovala až k hranici 500°C, což poukázalo na dostatečný výkon použitého zářiče, viz Obr. 52.



Obrázek 52. Zapojení termočlánků (Vlastní 2016)

Po chvíli ovšem nastal jiný problém, a to přívod velkého množství plynu do zářiče a následný malý výbuch v zářiči. Naštěstí se nic nestalo a stačilo jen snížit tlak plynu na hodnotu 1 baru, viz Obr. 53.

Obrázek 53. Ukazatel tlaku plynu (Vlastní 2016)

Po zbytek trvání experimentu už nenastaly vážnější komplikace, jen při snižujícím se množství plynu v lahvi začala láhev zamrzat, viz Obr. 54, což je ovšem běžný jev při takto rychlém úbytku plynu v lahvi.

Obrázek 54. Namrzlá plynová láhev (Vlastní 2016)

Po zhruba dvou hodinách byl experiment ukončen s nadějí dobrých výsledků.

8.2.2 Vyhodnocení experimentu

Experiment byl ukončen po zhruba 2 hodinách a to v důsledku vyprázdnění plynové láhve. Hodnoty teplot v prvku dosahovaly k hranici 500 °C, což ukazuje vhodnost použití zářiče pro tento typ experimentů. Jediný problém byl v ovlivnění teplotního pole v prvku větrem, který způsoboval nerovnoměrné zahřívání prvku. Pro eliminaci tohoto jevu bylo navrženo pro další experimenty použití zábrany proti větru nebo ideálně provedení experimentu v interiéru. Podrobné vyhodnocení tohoto experimentu není předmětem této práce.

9 Experiment v Požární zkušebně PAVUS a.s.

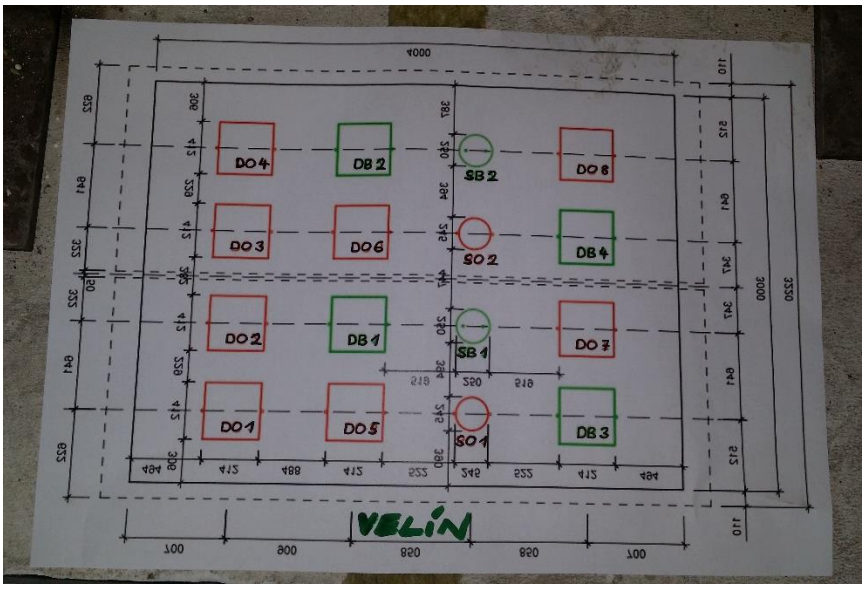
Po experimentech na Fakultě stavební ČVUT v Praze následoval hlavní experiment v Požární zkušebně PAVUS, a.s., ve Veselí nad Lužnicí. Experiment byl proveden na 16 betonových a ocelobetonových prvcích, které byly otestovány v horizontální peci typu H2, ve které se teplota řídila podle normové teplotní křivky po dobu 180 minut. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit transport tepla v jednotlivých prvcích. Výsledky měření budou využity následně pro validaci výpočetních modelů (což ovšem není předmětem této práce).

9.1 Průběh experimentu

Samotný experiment proběhl dne 30. 11. 2016 od 11 do 14 hodin v Požární zkušebně PAVUS, a.s., ve Veselí nad Lužnicí. Před samotnou zkouškou byla provedena podrobná dokumentace osazení vzorků v peci, viz Obr. 55.

Obrázek 55. Osazení vzorků v peci (Vlastní 2016)

Vzorky byly osazeny velmi dobře a precizně. Jediné co se změnilo oproti plánu, bylo zrcadlové prohození prvků v peci, což nemělo na průběh a výsledky zkoušky žádný vliv, viz Obr. 56. Před osazením do pece byly všechny vzorky zváženy.



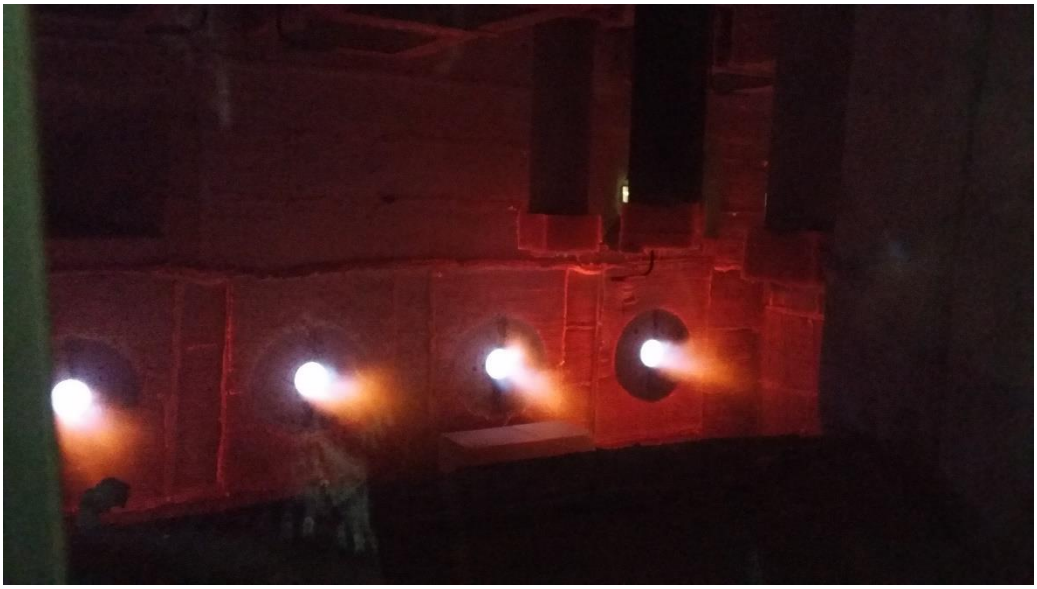
Obrázek 56. Prohození rozmístění vzorků v peci (Vlastní 2016)

Všechny vzorky byly ukotveny ke stropu pece pomocí závitových tyčí. Také zde byly vyvedeny všechny termočlánky z jednotlivých prvků a připojeny k dataloggerům (viz Obr. 57 a 58), které přenášely údaje do PC v operačním středisku.

Obrázek 57. Kotvení prvků a vyvedení termočlánků (Vlastní 2016)

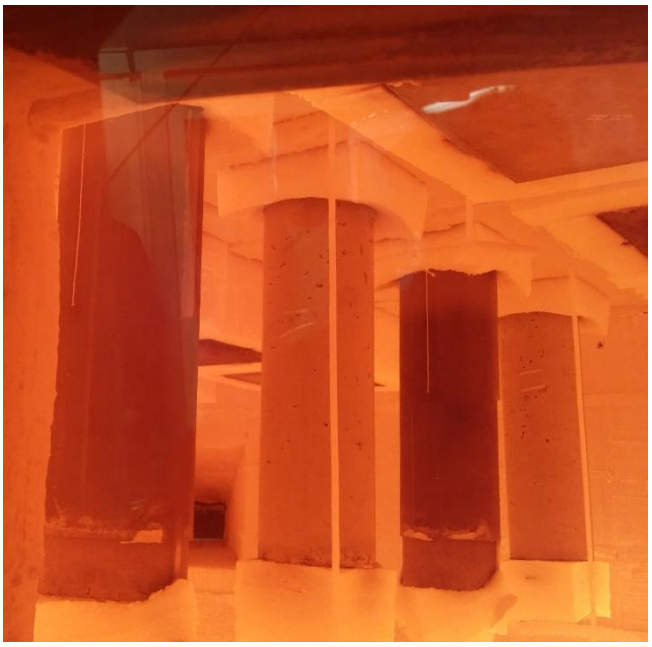
Obrázek 58. Časomíra experimentu a vyvedené termočlánky k datalogeru (Vlastní 2016)

Začátek experimentu proběhl podle plánu. Hořáky v peci byly spuštěny a pec se začala zahřívat podle normové teplotní křivky, viz Obr. 59.



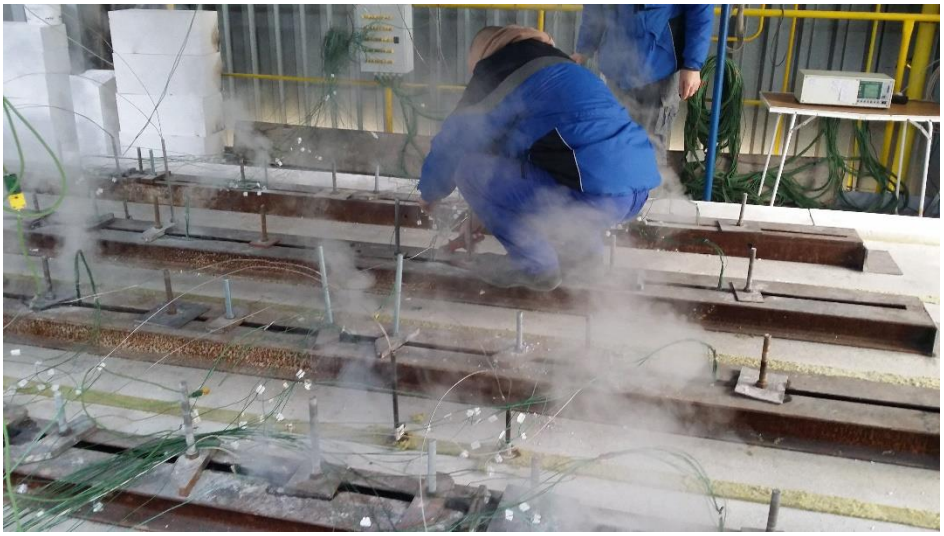
Obrázek 59. Počátek zkoušky – hořáky v peci (Vlastní 2016)

První významný okamžik nastal ve 23. minutě. V ocelobetonových sloupcích došlo k oddělení ocelové a betonové části, což mělo za následek částečné vysunutí betonové části z ocelové trubky, viz Obr. 60.



Obrázek 60. Vysunutí betonové časti z ocelové trubky (Vlastní 2016)

Tomuto jevu bude v dalších experimentech zmezeno spřažením ocelové a betonové části vzorku. S ohledem na to, že hrozilo přetržení termočlánků a případně i poškození dataloggeru, byly po hodině experimentu termočlánky ocelobetonových sloupkových vzorků odstřiženy, viz Obr. 61.



Obrázek 61. Odstřižení termočlánků (Vlastní 2016)

Ve zbylé části zkoušky se očekávalo, zda dojde k odštěpení povrchové části betonových prvků, k čemuž až do konce zkoušky nedošlo, a to především díky použitým polypropylenovým vláknům, které byly obsaženy v betonu.

Obrázek 62. Dosažená zkušební doba 180 minut (Vlastní 2016)

Zkouška byla po 180 minutách zdárně ukončena, viz Obr. 62. Během zkoušky tedy nastal jen jeden nechtěný okamžik, ale jinak zkouška proběhla zdárně podle předpokladů. Naměřená data byla dodána pracovníky PAVUS, a.s., do několika málo dní. Vyhodnocení této zkoušky je popsáno v další kapitole této práce. Následně byla provedena fotodokumentace vzorků a vzorky byly také zváženy. Na prvcích po požáru lze vidět, jak je požár poškodil. Betonová část ocelobetonových sloupků se vysunula přibližně o 9 cm, u některých ocelobetonových desek byly poškozeny svary ocelové formy. U všech ocelobetonových prvků lze také vidět, jak se ocelová část začala loupat. Betonové prvky vypadaly zcela nepoškozené, k odštěpení betonu nedošlo ani v jednom případě, viz Obr. 63.

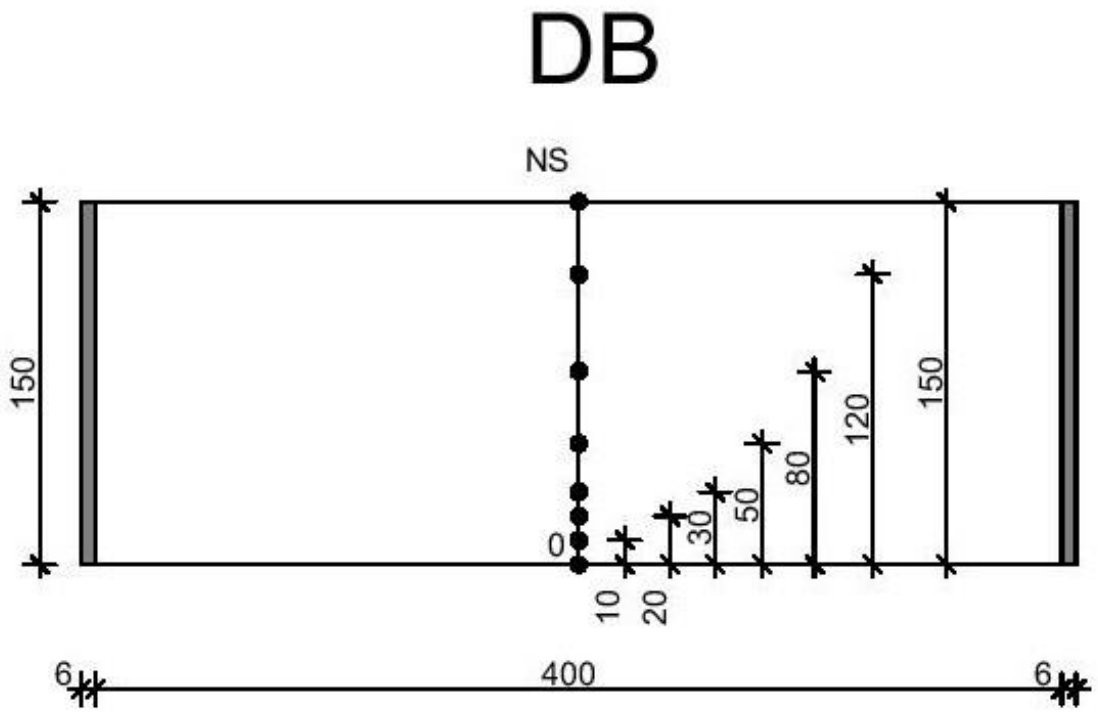
Obrázek 63. Zkušební vzorky po zkoušce (Wald, 2016) (Vaněk, 2016)

9.2 Vyhodnocení experimentu

9.2.1 Grafické znázornění výsledků

- **Betonová deska (DB)**

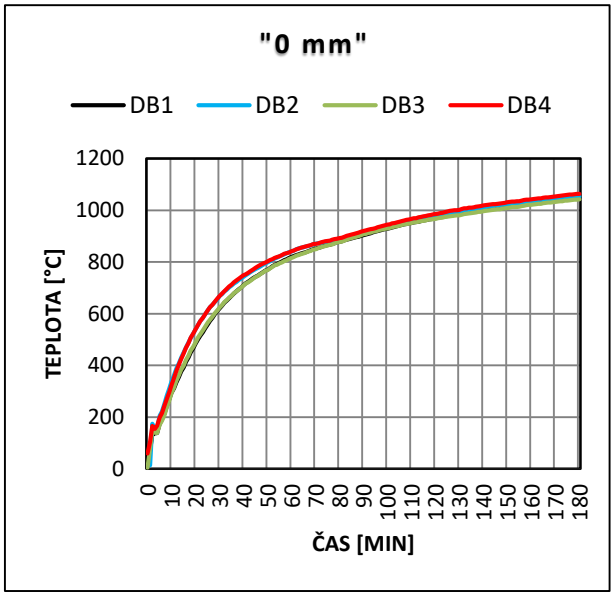
Na schématu betonové desky, znázorněné na Obr. 64, je vyznačena přesná poloha jednotlivých kabelových termočlánků a samotné rozměry desky.

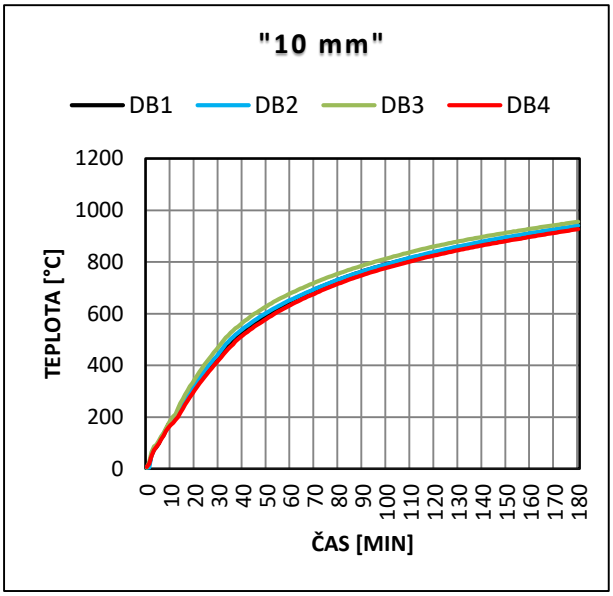


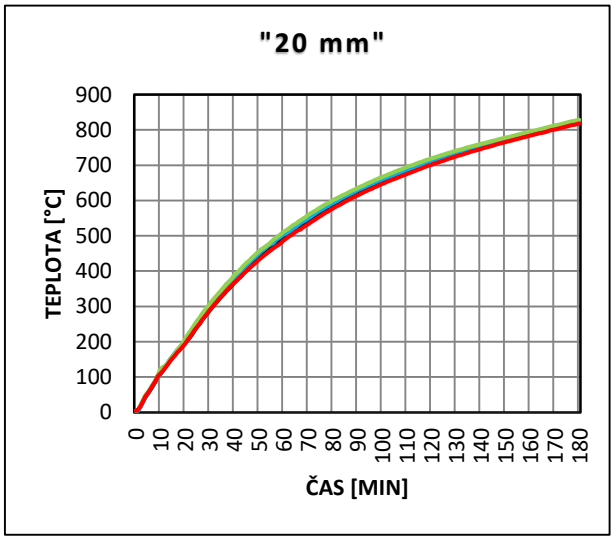
Obrázek 64. Deska betonová (Vlastní 2016)

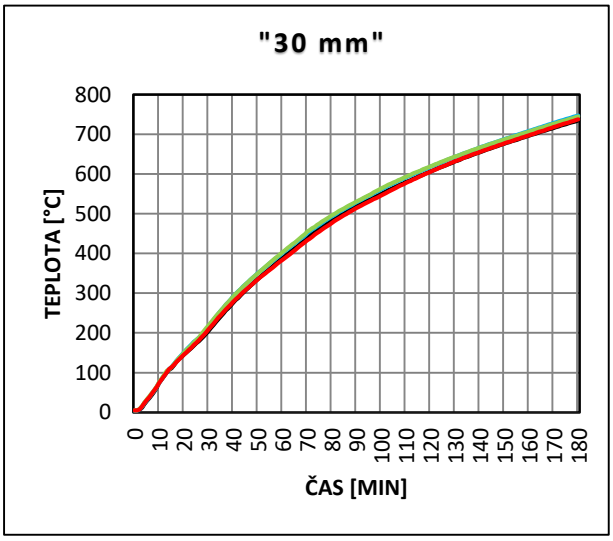
Vývoj teploty v závislosti na čase

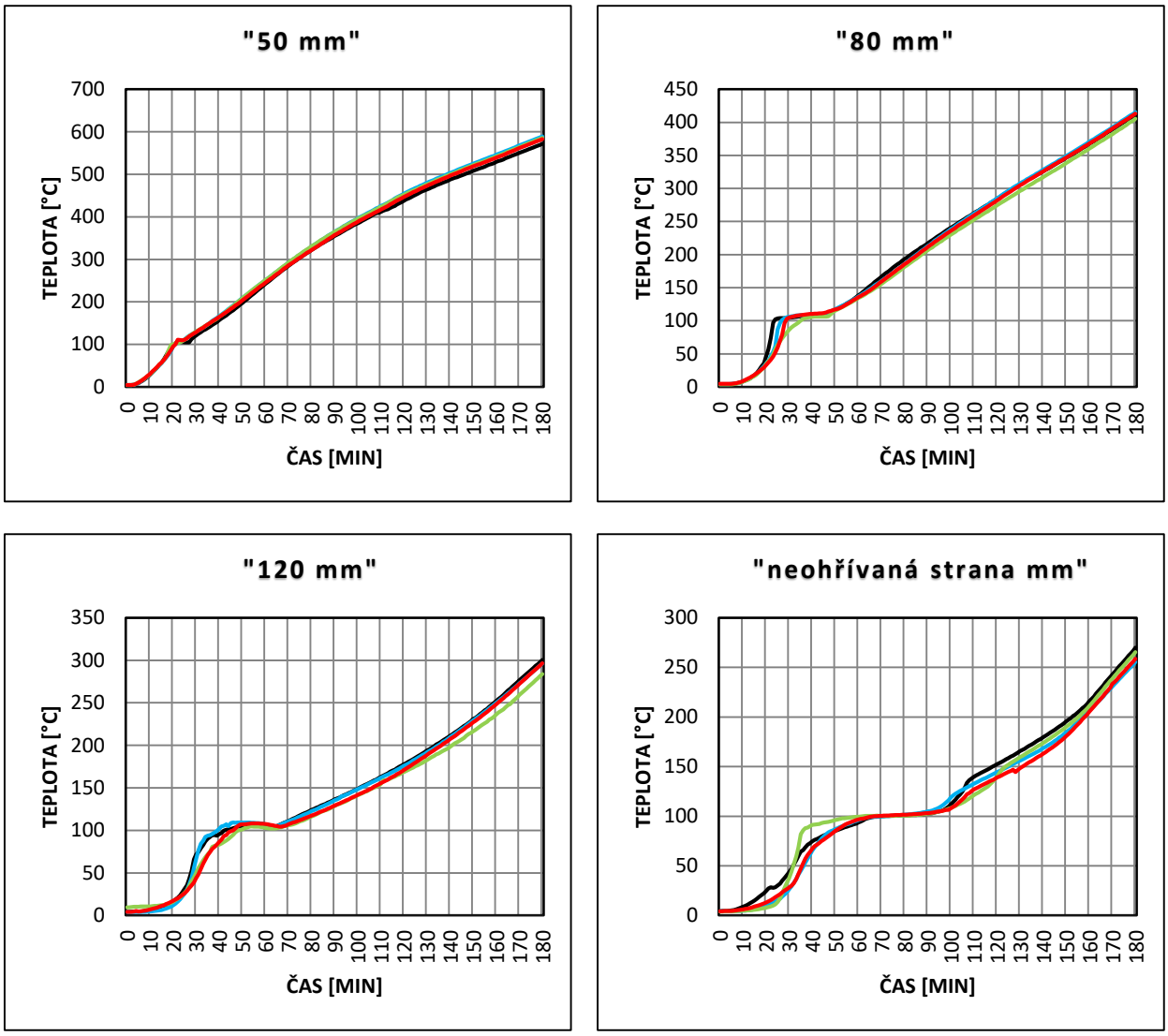
Na Obr. 65 je znázorněn vývoj teploty v různých hloubkách betonové desky v závislosti na čase.







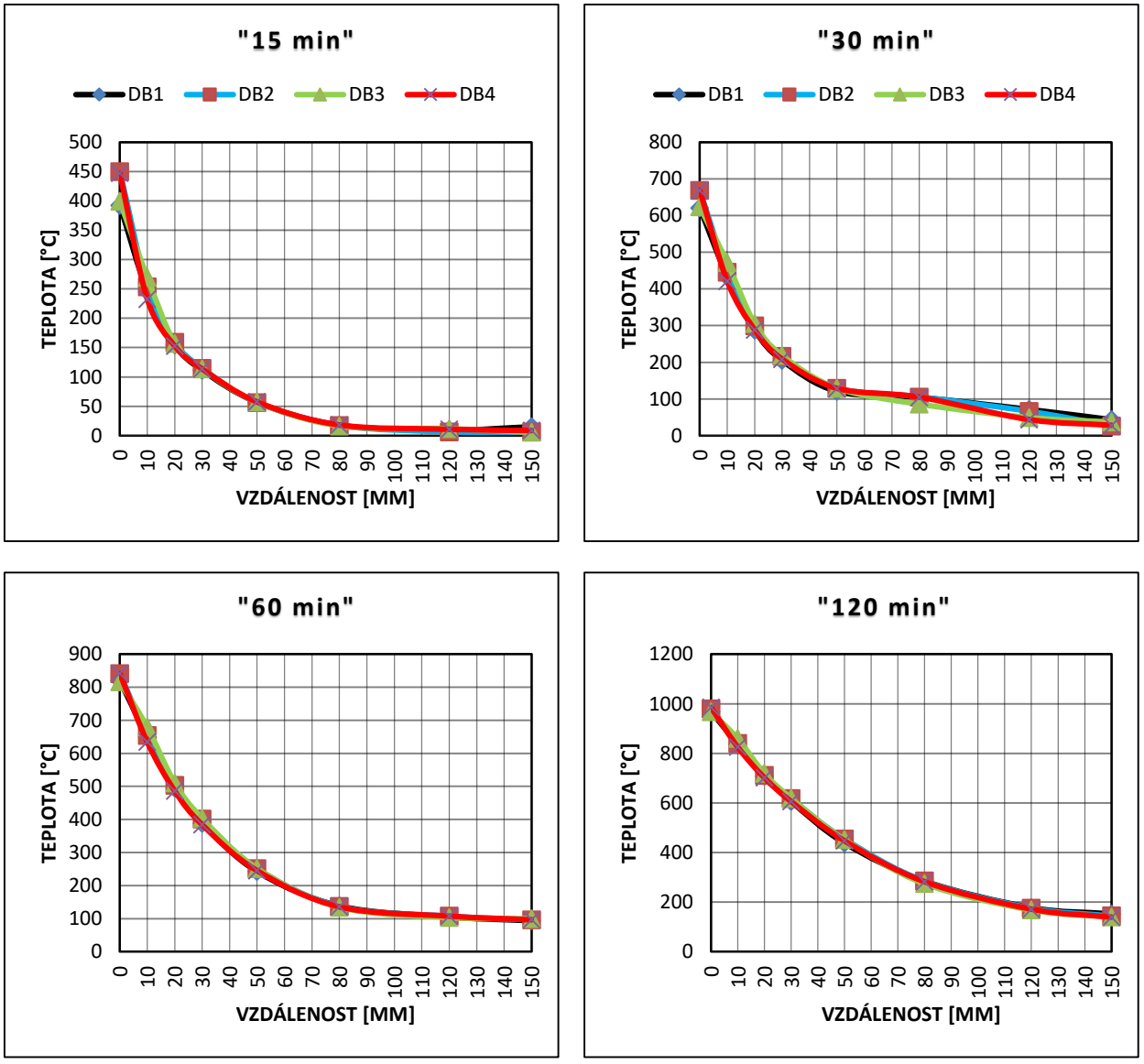


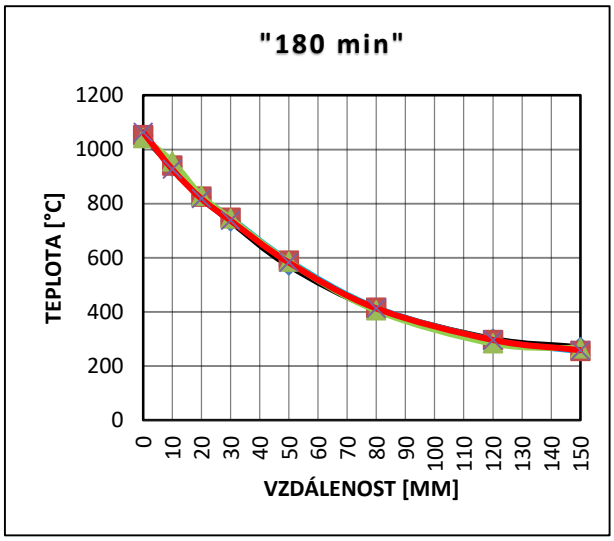


Obrázek 65. Vývoj teploty v DB v závislosti na čase (Vlastní 2016)

Vývoj teploty v závislosti na hloubce

Na Obr. 66 jsou znázorněny teplotní profily (závislost teploty na vzdálenosti od ohřívaného povrchu) pro různé časy.

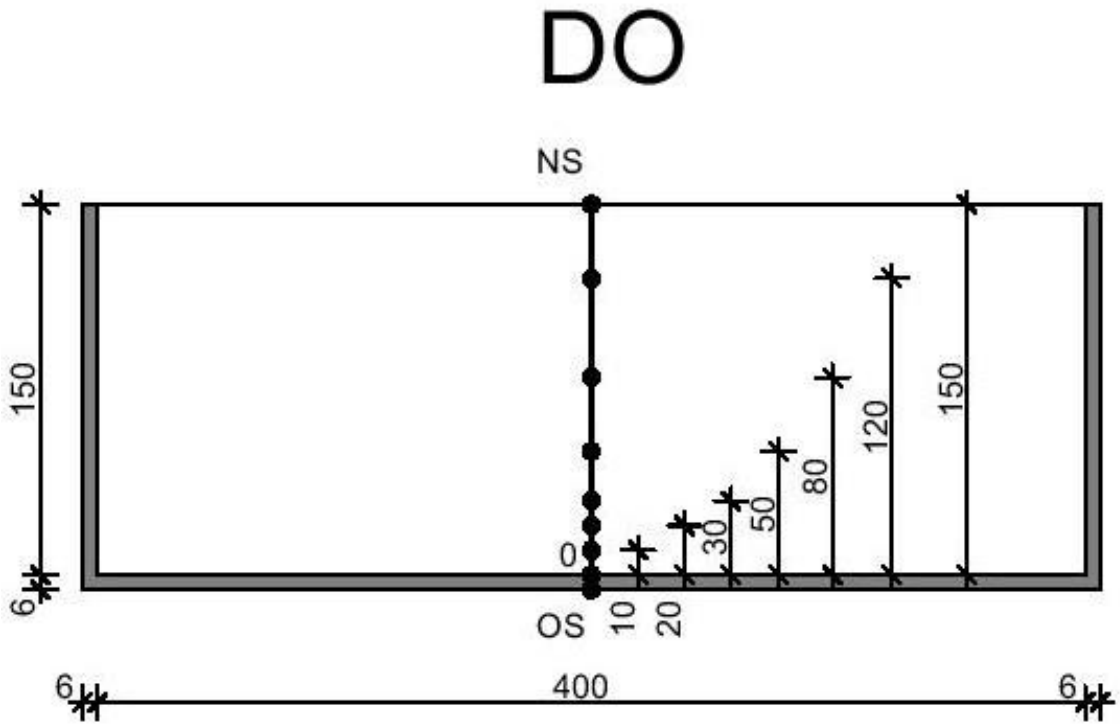




Obrázek 66. Teplotní profily DB (Vlastní 2016)

- **Ocelobetonová deska (DO)**

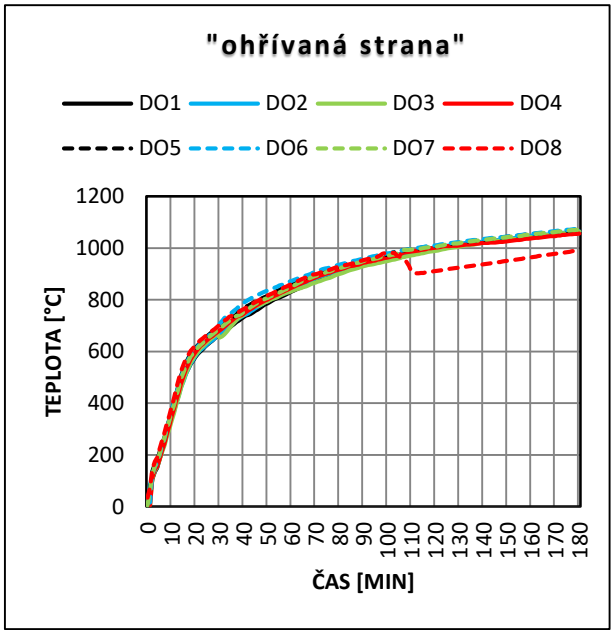
Na schématu ocelobetonové desky, znázorněné na Obr. 67, je vyznačena přesná poloha jednotlivých kabelových termočlánků a samotné rozměry desky.

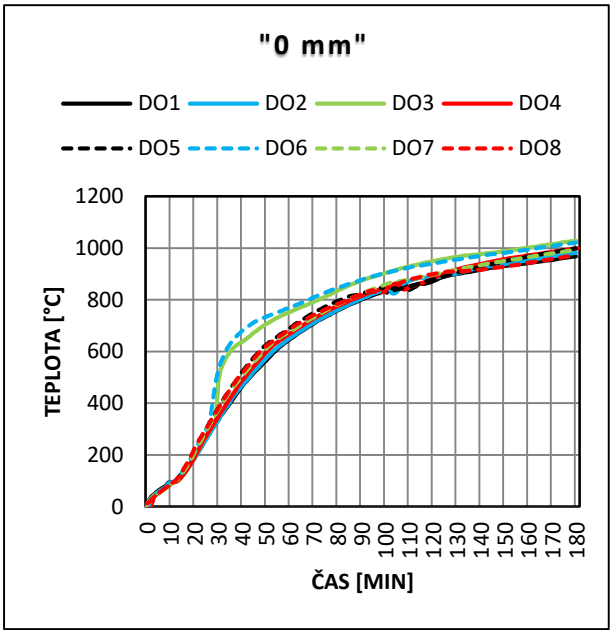


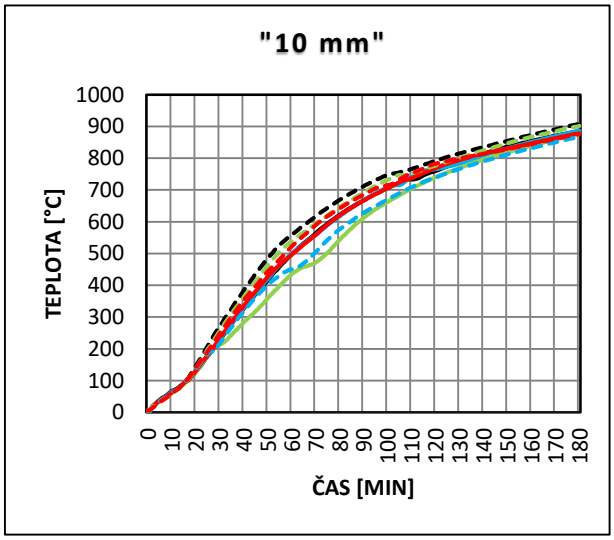
Obrázek 67. Deska ocelobetonová (Vlastní 2016)

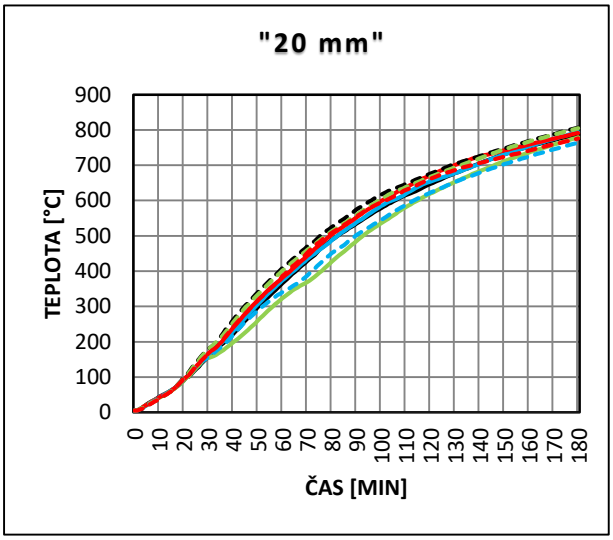
Vývoj teploty v závislosti na čase

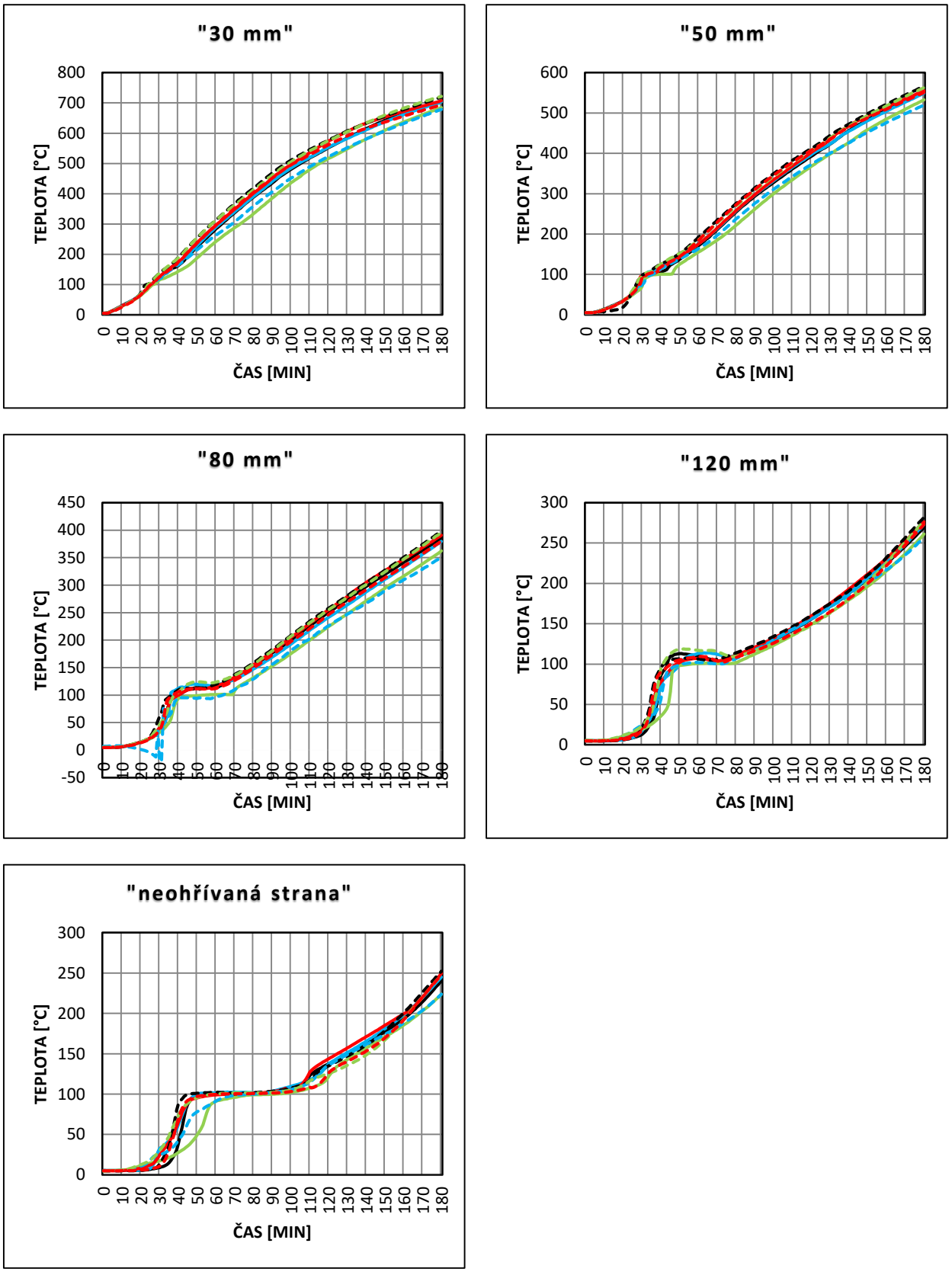
Na Obr. 68 je znázorněn vývoj teploty v různých hloubkách ocelobetonové desky v závislosti na čase.







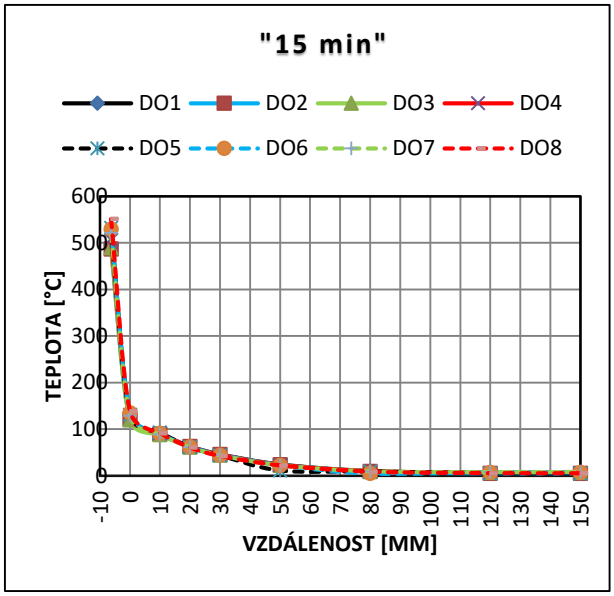


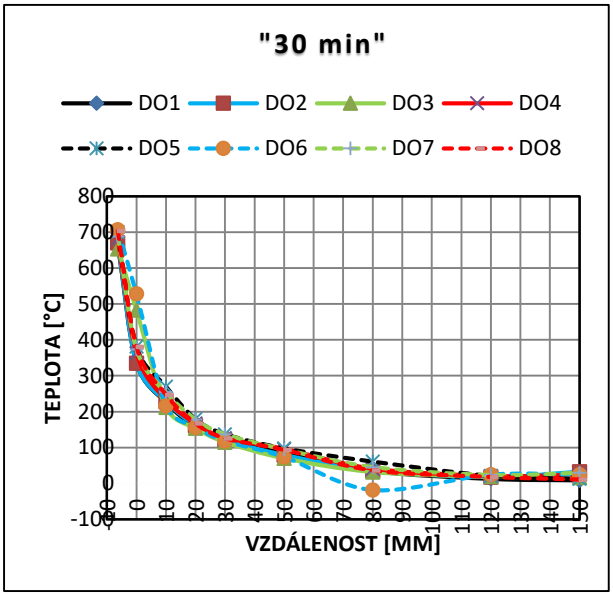


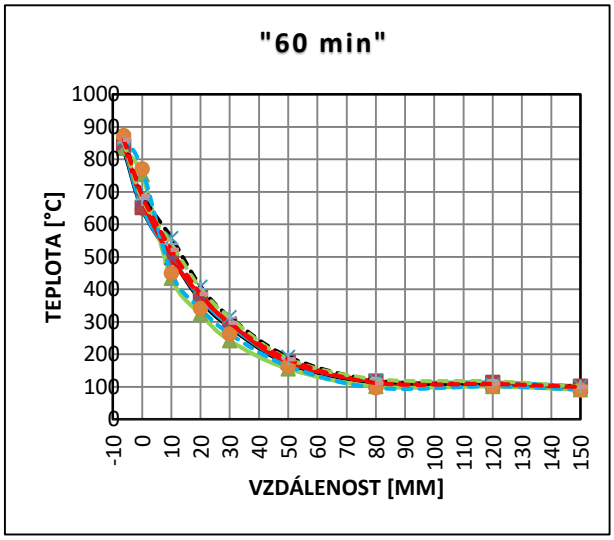
Obrázek 68. Vývoj teploty v DO v závislosti na čase (Vlastní 2016)

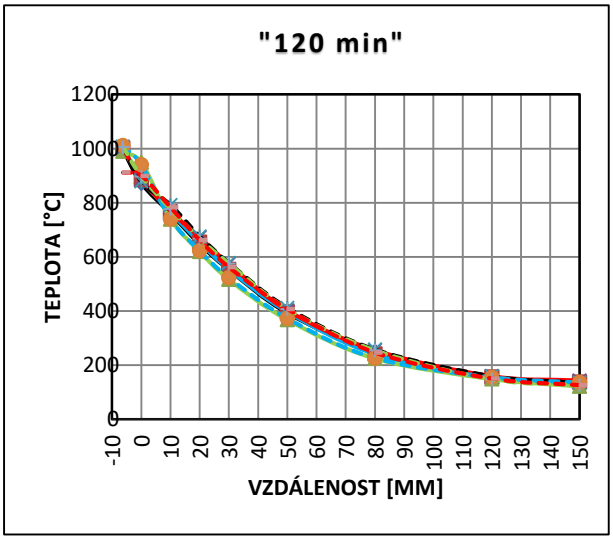
Vývoj teploty v závislosti na hloubce

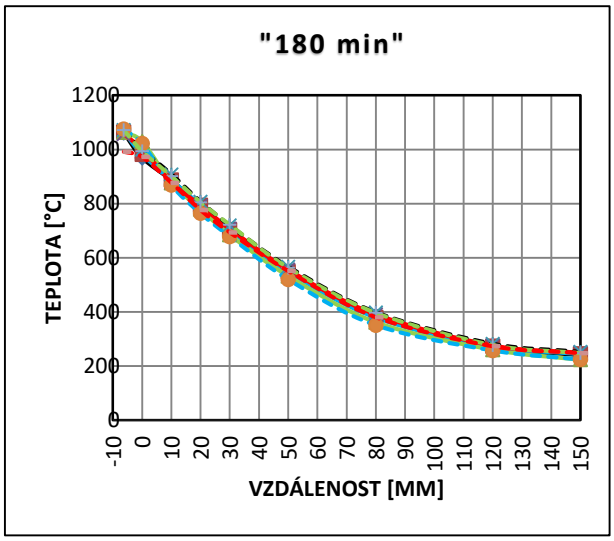
Na Obr. 69 jsou znázorněny teplotní profily (závislost teploty na vzdálenosti od ohřívaného povrchu) pro různé časy.







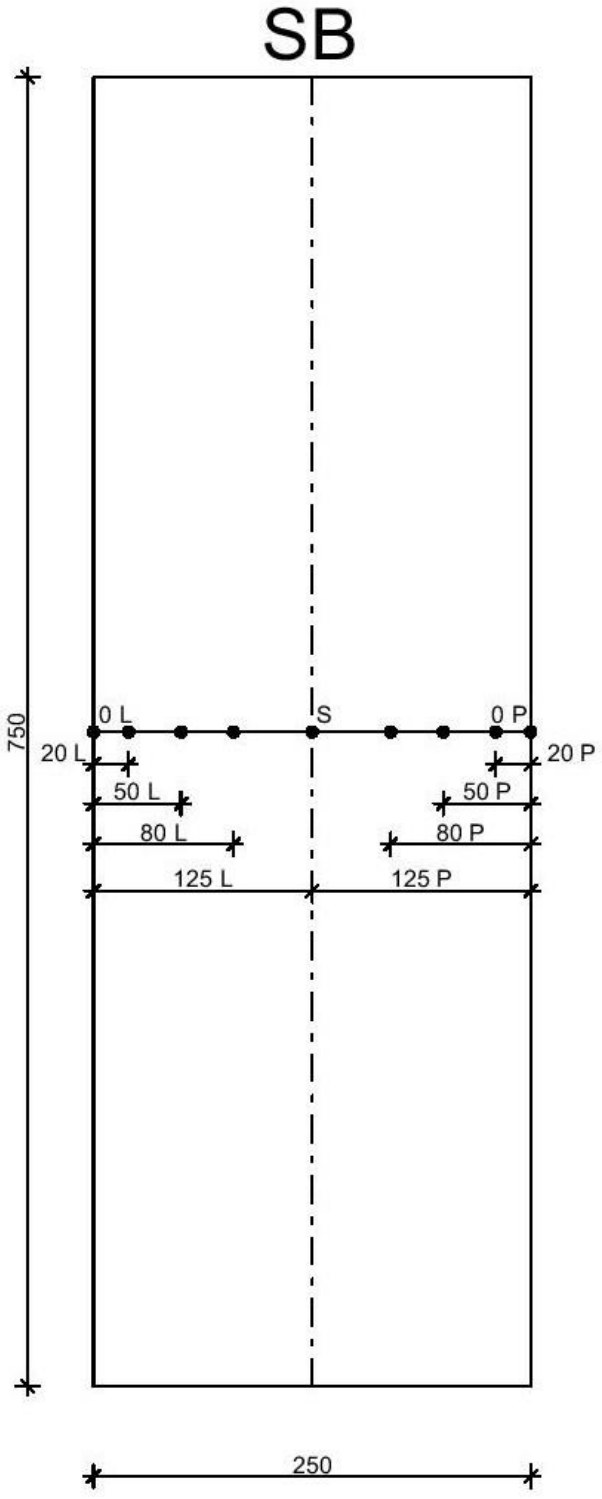




Obrázek 69. Teplotní profily DO (Vlastní 2016)

- **Sloup betonový (SB)**

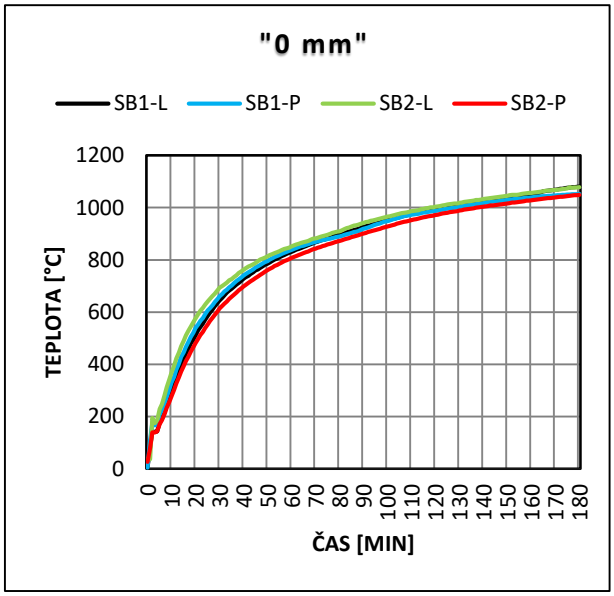
Na schématu betonového sloupu, znázorněného na Obr. 70, je vyznačena přesná poloha jednotlivých kabelových termočlánků a samotné rozměry sloupu.

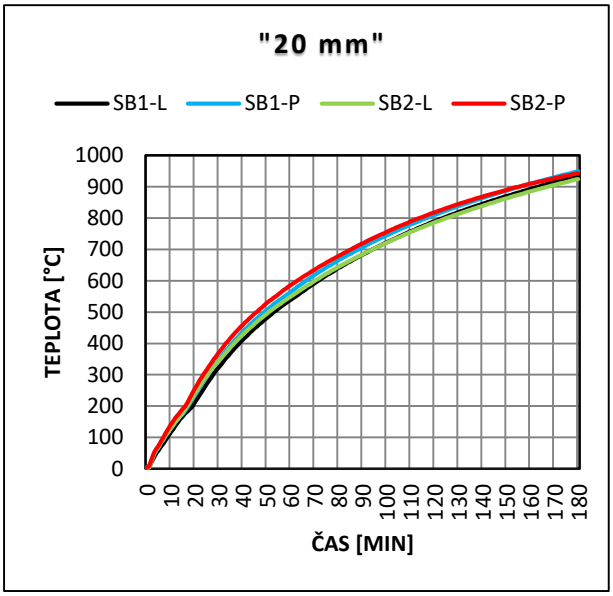


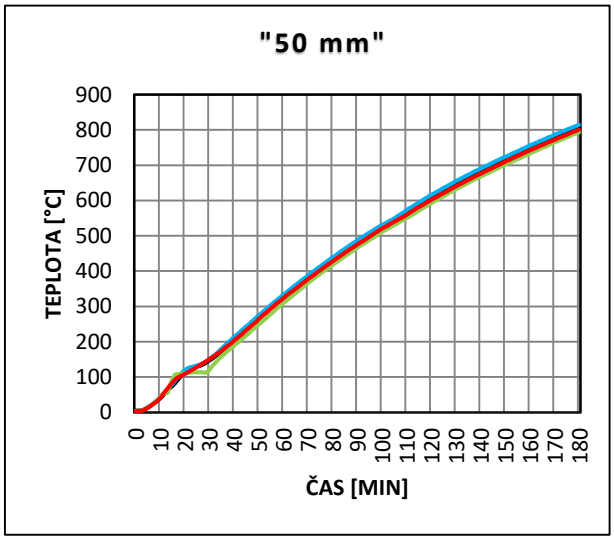
Obrázek 70. Sloup betonový (Vlastní 2016)

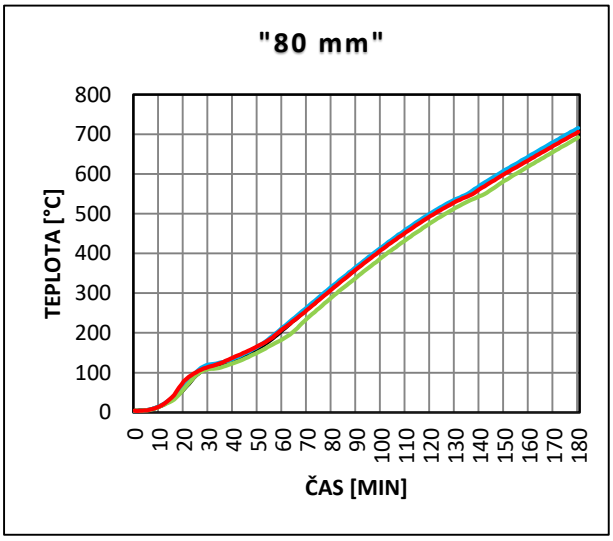
Vývoj teploty v závislosti na čase

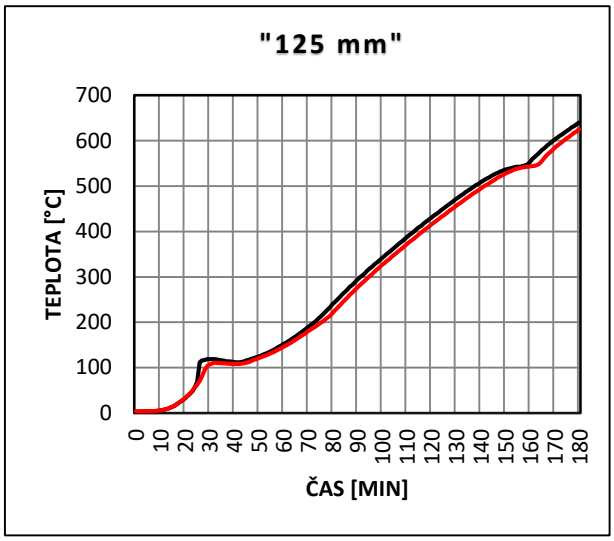
Na Obr. 71 je znázorněn vývoj teploty v různých hloubkách betonového sloupu v závislosti na čase.







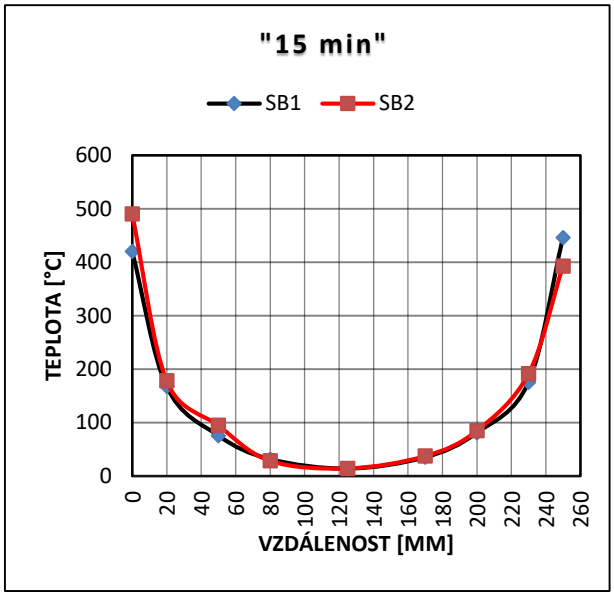


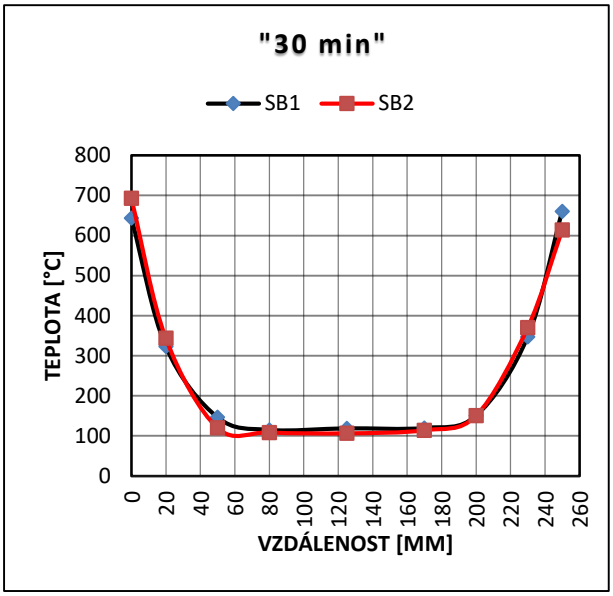


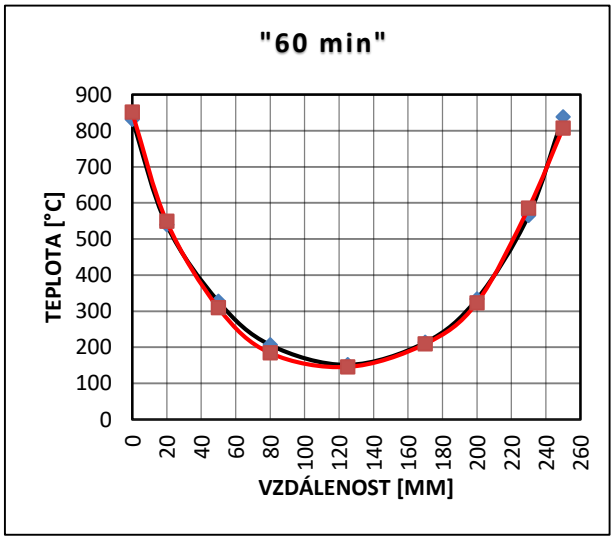
Obrázek 71. Vývoj teploty v SB v závislosti na čase (Vlastní 2016)

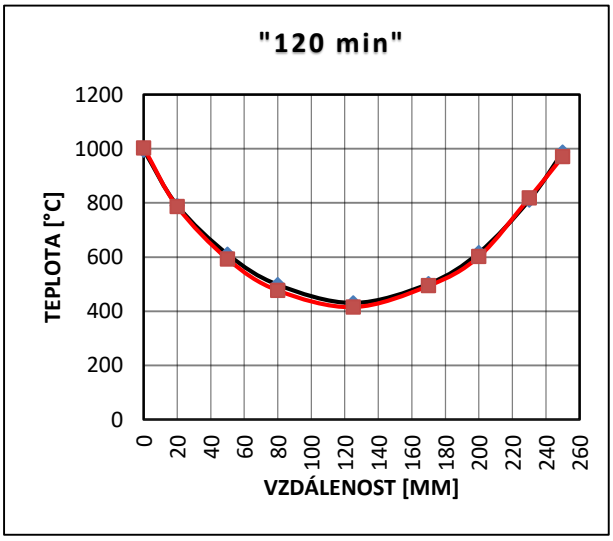
Vývoj teploty v závislosti na poloze v celém průřezu

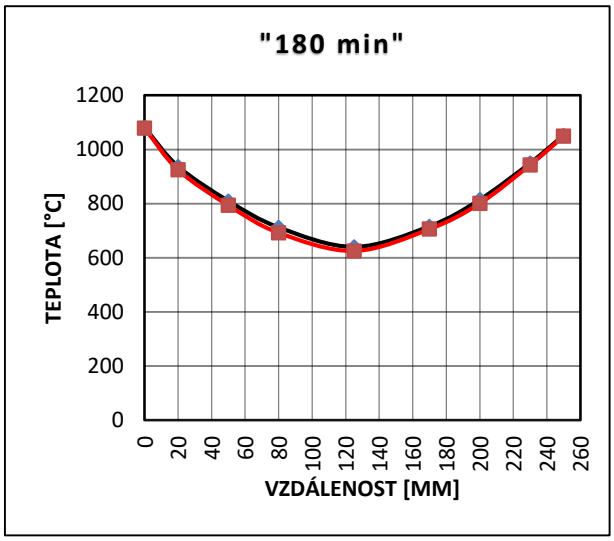
Na Obr. 72 jsou znázorněny teplotní profily (závislost teploty na vzdálenosti od ohřívaného povrchu) pro různé časy.







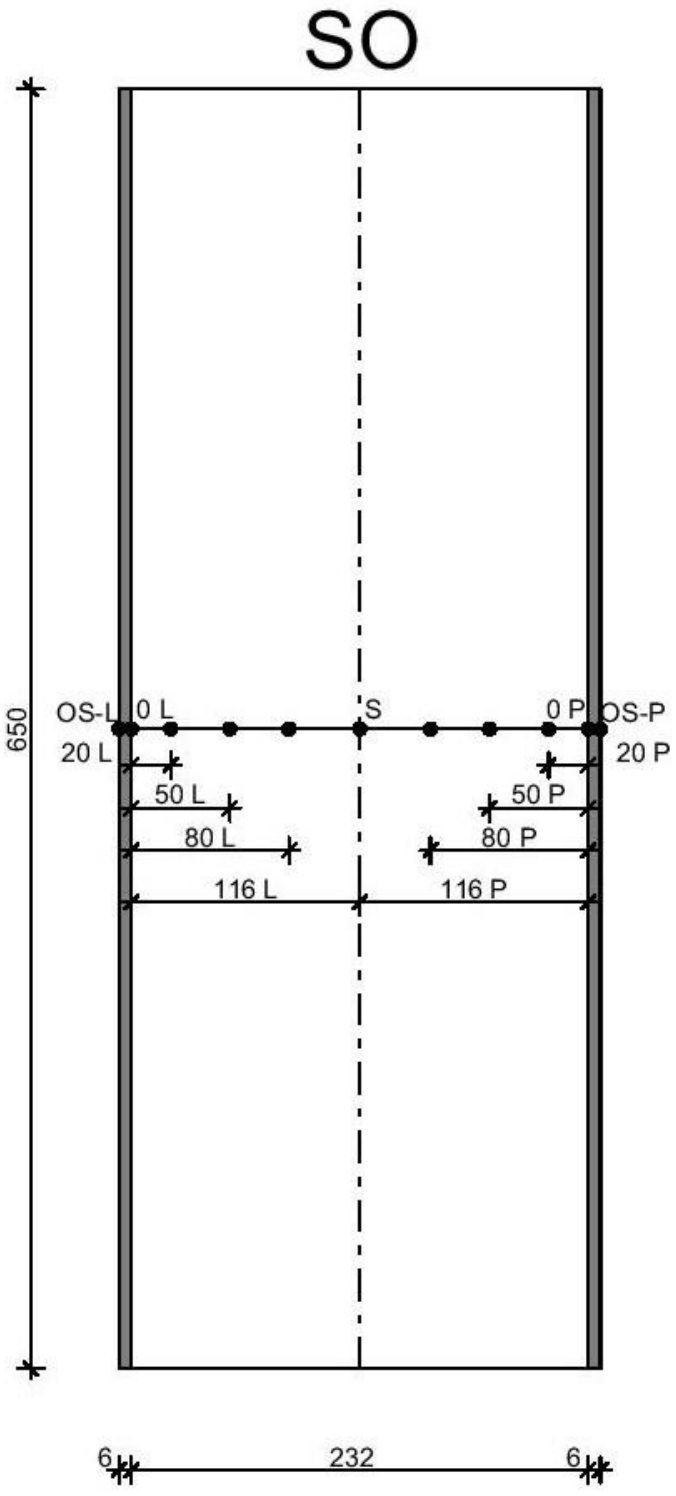




Obrázek 72. Teplotní profily SB (Vlastní 2016)

- **Sloup ocelobetonový (SO)**

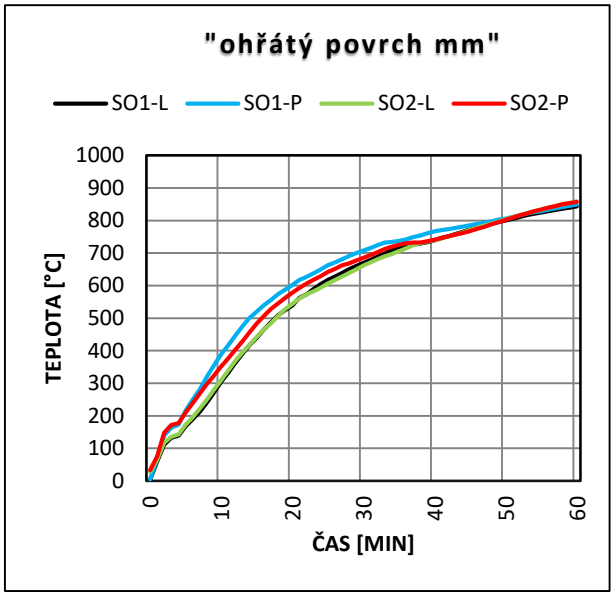
Na schématu ocelobetonového sloupu znázorněného na Obr. 73, je vyznačena přesná poloha jednotlivých kabelových termočlánků a samotné rozměry sloupu.

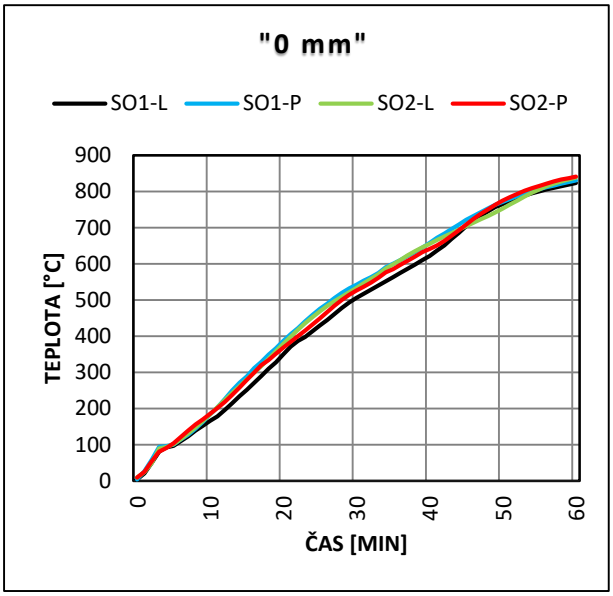


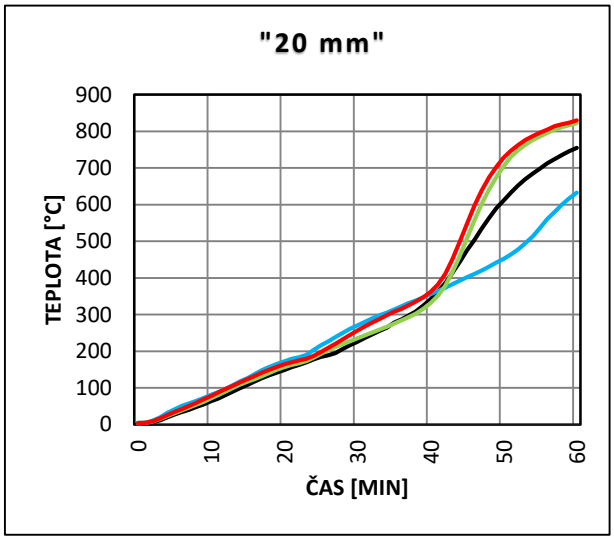
Obrázek 73. Sloup ocelobetonový (Vlastní 2016)

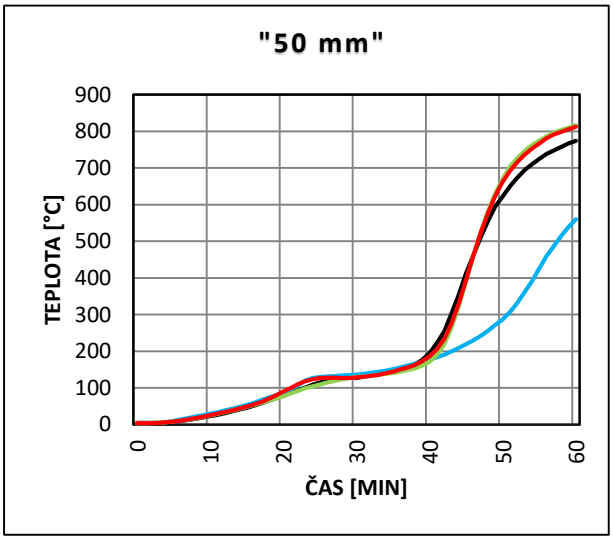
Vývoj teploty v závislosti na čase

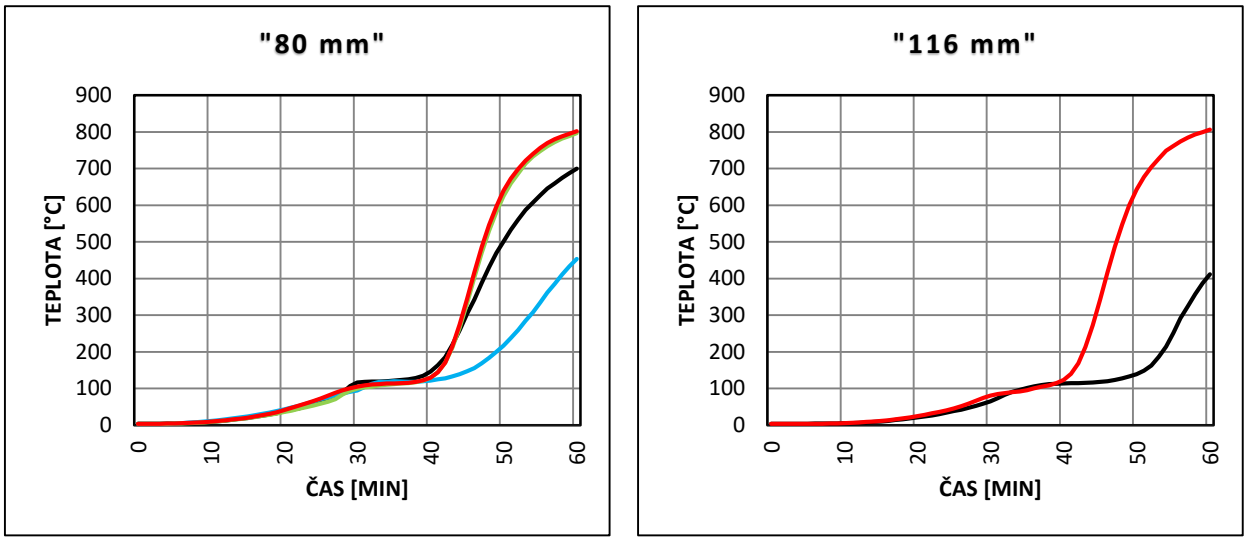
Na Obr. 73 je znázorněn vývoj teploty v různých hloubkách ocelobetonového sloupu v závislosti na čase.







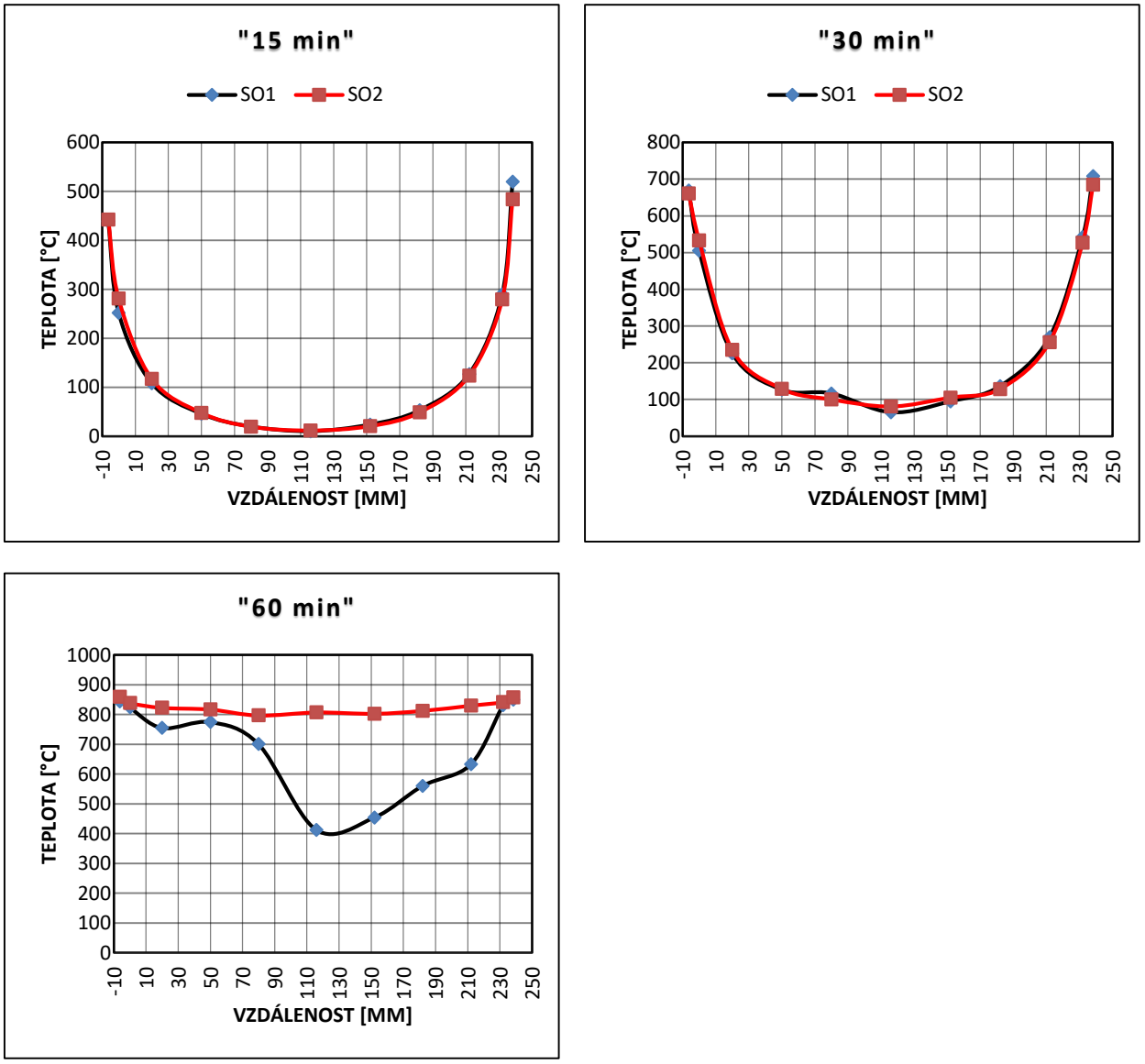




Obrázek 74. Vývoj teploty v SO v závislosti na čase (Vlastní 2016

Vývoj teploty v závislosti na poloze v celém průřezu

Na Obr. 75 jsou znázorněny teplotní profily (závislost teploty na vzdálenosti od ohřívaného povrchu) pro různé časy.

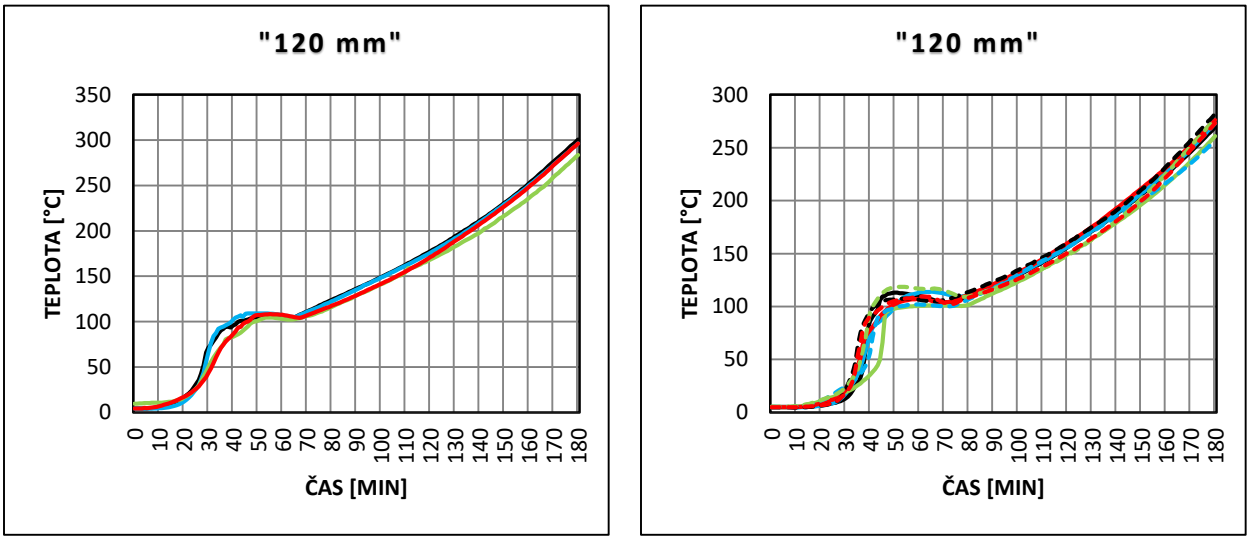


Obrázek 75. Teplotní profily SO (Vlastní 2016)

9.2.2 Vyhodnocení významných bodů experimentu

Z výsledků naměřených během zkoušky lze potvrdit několik jevů, které jsou popsány v první části této práce.

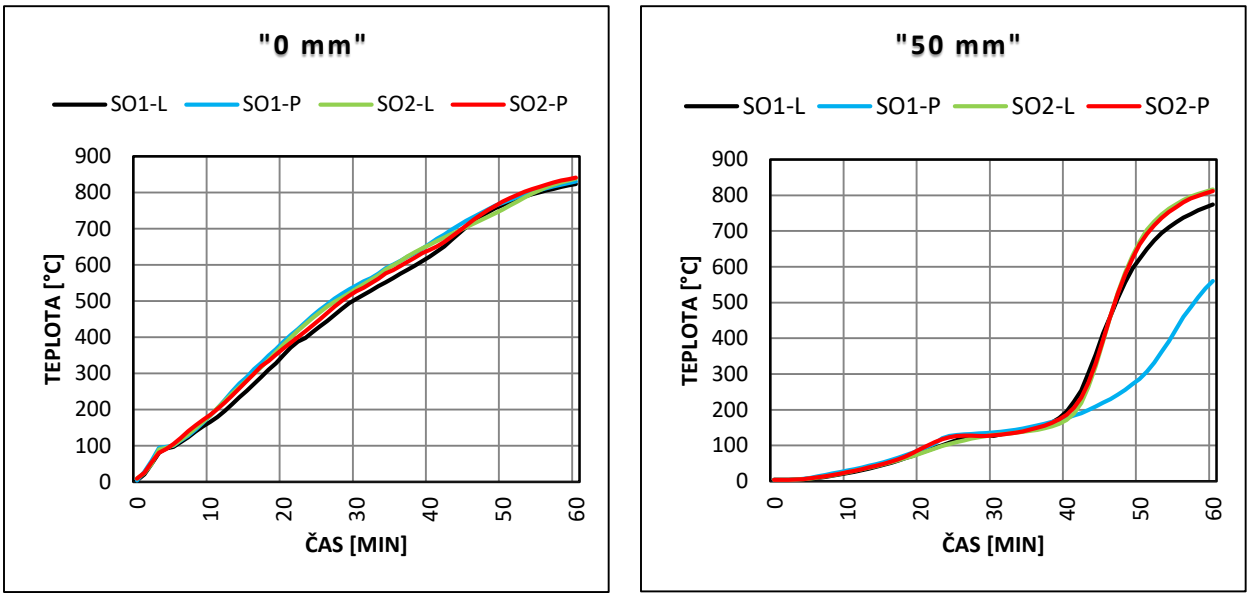
Jako první jev, který nastal ve všech vzorcích, ať už u sloupů nebo desek, bylo zpomalení zahřívání (někdy až ochlazování) prvků při dosažení teploty 100 °C v jejich jednotlivých místech. Tento jev zapříčinilo vypařování volné a vázané vody v prvcích. Názorné zpomalení ohřívání lze vidět na betonové a ocelobetonové desce v hloubce 120 mm na Obr. 76. Z tohoto obrázku lze také vyčíst, že v betonové desce započalo zpomalení oteplení zhruba o 10 minut dříve než v ocelobetonové desce, ale bylo také o zmíněných 10 minut dřív ukončeno. To poukazuje na to, že betonová deska se rychleji prohřívala a také dosáhla vyšších teplot, a to zhruba o 75 °C.



a) Deska betonová b) Deska ocelobetonová

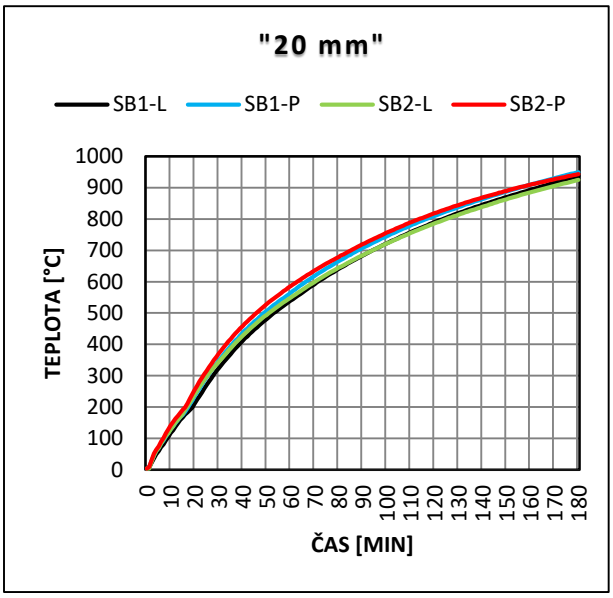
Obrázek 76. Zpomalení oteplování při teplotě 100°C (Vlastní 2016)

Jak již bylo uvedeno, u ocelobetonových sloupků došlo ve 23. minutě zkoušky k oddělení betonové a ocelové části, což mělo za následek povysunutí betonové části a vytvoření mezery mezi betonovou a ocelovou částí. Tím se výsledky změřené na těchto dvou vzorcích značně zkreslily a tyto vzorky musely být z důvodu bezpečnosti po 60 minutách odstřiženy. Na Obr. 77 jsou znázorněny průběhy teplot v místě kontaktu ocelového pláště s betonovou částí a v hloubce 50 mm v závislosti na čase. Tyto výsledky lze použít pro následné numerické modelování pouze do okamžiku vysunutí betonové části, tedy cca do 23. minuty. Další části grafů jsou zde uvedeny pouze pro ilustraci toho, jak byly výsledky ovlivněny oddělením obou částí.

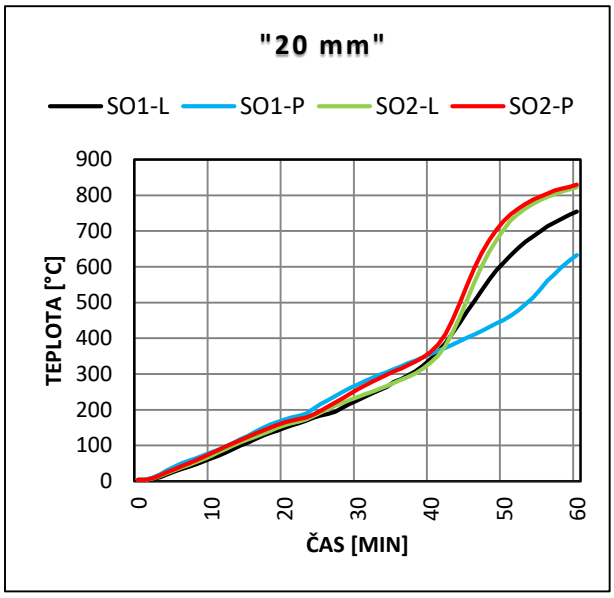


Obrázek 77. Oddělení betonové a ocelové části v ocelobetonových sloupcích (Vlastní 2016)

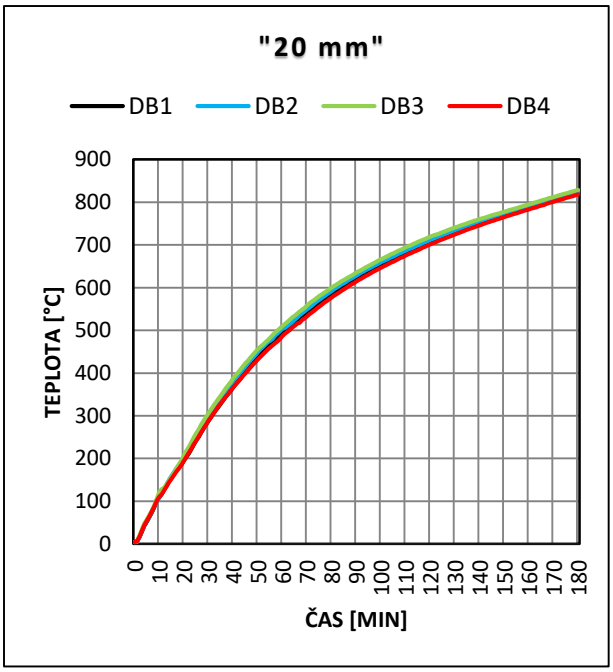
V důsledku znehodnocení ocelobetonových sloupků je porovnání betonových a ocelobetonových sloupků velmi omezeno. Ovšem z Obr. 78 lze vyčíst, že ve 20. minutě, kdy ocelobetonový prvek vykazoval ještě správné údaje, vykazoval betonový sloupek v hloubce 20 mm zhruba o 100 °C vyšší teplotu než ocelobetonový sloupek. To dobře ilustruje, že i tenký ocelový plášť dokáže výrazně snížit teplotu v prvku. To potvrzuje také porovnání se zkoušenými betonovými a ocelobetonovými deskami, kde bylo tohoto teplotního rozdílu dosaženo také. Navíc desky vykazovaly ještě o dalších zhruba 100 °C nižší teploty než sloupy.



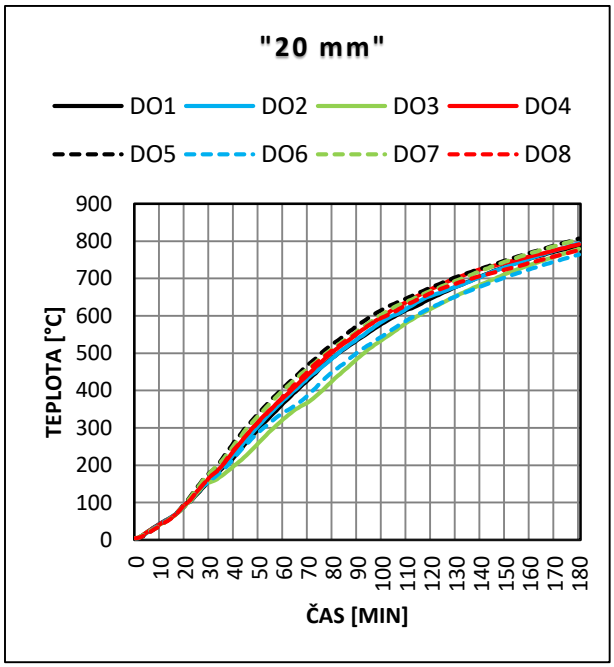
a) Betonový sloupek



b) Ocelobetonový sloupek



c) Betonová deska



d) Ocelobetonová deska

Obrázek 78. Vývoj teploty v betonovém a ocelobetonovém sloupku (Vlastní 2016)

U betonových prvků také nedošlo k odštěpování betonu a to primárně z důvodu použití polypropylénových vláken, které zajistili dostatečně pórovitou strukturu betonu a tudíž mohla vodní pára rychle opouštět prvek a nevytvářely vysoký tlak v povrchových částech betonu.

10 Závěr

V práci byla provedena analýza tří veličin, které ovlivňují chování a vlastnosti betonových a ocelobetonových prvků při vystavení vysokým teplotám. Těmito veličinami jsou teplota, pórový tlak a vlhkost. Poté následovala analýza způsobu jejich měření a nelezení měřidel, které by byly nejefektivnější a dokázaly změřit a zaznamenat jejich průběh. Bylo také poukázáno na to, že tyto tři veličiny jsou navzájem provázány, což lze ilustrovat tzv. sorpčními izotermami, což znamená, že stačí změřit jen dvě veličiny a třetí lze dopočítat.

Po prozkoumání způsobu měření všech tří veličin bylo rozhodnuto, že experimentální část bude zahrnovat pouze jednu veličinu, a to teplotu. K tomuto rozhodnutí vedla především značná nejasnost ohledně způsobů měření zbylých veličin. Měřicí přístroje použitelné pro daný experiment by musely být speciálně vytvořeny.

Z experimentů, které byly provedeny na Fakultě stavební ČVUT v Praze, vyplynulo, že i ve skromnějších podmínkách lze takovýto experiment provést a dosáhnout zajímavých výsledků. Jako nejvhodnější místo pro takový experiment je velká uzavřená místnost, kde je zamezeno působení větru, které může značně ovlivnit výsledky. Dále bylo dokázáno, že použitý plynový zářič má dostatečný výkon a je schopen prvky zahřát na požadovanou teplotu. Také použité termočlánky připojené do dataloggeru speciálně vytvořenému k tomuto účelu se ukázaly jako vhodné.

Hlavní experiment proběhl v Požární zkušebně PAVUS, a.s., ve Veselí nad Lužnicí. Zde bylo možno vyzkoušet hned několik betonových a ocelobetonových prvků najednou v horizontální peci typu H2, kde byly vystaveny normovému požáru po dobu 180 minut. V průběhu tohoto experimentu došlo jen k jednomu nechtěnému okamžiku, a to vysunutí betonové části v ocelobetonových sloupech. Proto průběh teplot pro tento druh prvků byl zaznamenán jen do 60. minuty. Zbytek zkoušky proběhl v pořádku, a tudíž bylo možné z dosažených výsledků udělat několik závěrů a potvrdit si některá tvrzení. Jako jeden z hlavních bodů se nám potvrdilo to, že při dosažení teploty 100 °C vypařování vody značně zpomalí další nárůst teploty v prvku. Na závěr po porovnání průběhu teploty v jednotlivých vzorcích bylo možné usoudit, že došlo k rozdílu teplot u betonových a ocelobetonových prvků, kde ocelobetonové prvky vykazovaly nižší teploty ve stejných bodech zhruba o 100 °C.

Naměřená data budou dále využita pro validaci numerických modelů transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích vystavených vysokým teplotám. Hlavní přínos této práce spočívá v podrobném popisu návrhu, přípravy a průběhu požárního experimentu a v podrobném zobrazení naměřených výsledků v přehledných grafech.

Seznam obrázků

Obrázek 1. Provázanost veličin (Vlastní 2016) 5
Obrázek 2. Příklad sorpčních izoterem (Bažan, a další, 1978) 6
Obrázek 3. Pomalé zahřívání v hloubce 50 mm (Bangi, a další, 2011) 7
Obrázek 4. Rychlé zahřívání v hloubce 50 mm (Bangi, a další, 2011) 7
Obrázek 5. Schéma kabelového termočlánku (Mavis) 8
Obrázek 6. Provedení termoelektrického spoje (Mavis) 11
Obrázek 7. Miniaturní vysokoteplotní konektor (Mavis) 11
Obrázek 8. Porézní disk (MoldMaking, 2012) 14
Obrázek 9. Kalíšek (MoldMaking, 2012) 14
Obrázek 10. Druhy nástavců (Bangi, a další, 2011) 15
Obrázek 11. Různé velikosti nástavců (Phan, 2008) 15
Obrázek 12. Schéma piezoeletrické snímače tlaku (Nevima, a další) 16
Obrázek 13. Druhy piezoeletrické snímače tlaku (Ahlborn) 16
Obrázek 14. Schéma tenzometrického snímače tlaku (Prokopová) 17
Obrázek 15. Druh tenzometrického snímače tlaku (VŠB) 17
Obrázek 16. Datalogger (Fieldworks) 17
Obrázek 17. Odporový vlhkoměr (I &CS) 21
Obrázek 18 Hroty vlhkoměru (I &CS) 21
Obrázek 19. Mikrovlnný vlhkoměr (TESTO, 2015) 22
Obrázek 20. způsob měření vlhkoměrem (TESTO, 2015) 22
Obrázek 21. Termografická kamera (I &CS) 22
Obrázek 22. termografické pole vlhkosti (Pochmanová, a další, 2011) 23
Obrázek 23. Impendační vlhkoměr (Pochmanová, a další, 2011) 23
Obrázek 24. Sonda pro měření vlhkosti a teploty (Datael) 23
Obrázek 25. Schéma osazení vzorku DO v peci (Štefan, 2016) 25
Obrázek 26. Deska ocelová (Štefan, 2016) 25
Obrázek 27. Schéma osazení vzorku (Štefan, 2016) 26
Obrázek 28. Deska betonová (Vlastní 2016) 26
Obrázek 29. Schéma osazení vzorku SO v (Štefan, 2016) 27
Obrázek 30. Sloup ocelový (Štefan, 2016) 27
Obrázek 31. Schéma osazení vzorku SB v peci (Štefan, 2016) 28

Obrázek 32. Betonový sloupek (Vlastní 2016) 28
Obrázek 33. "žebříčkové" nosiče (Vlastní 2016) 29
Obrázek 34. "osové" nosiče (Štefan, 2016) 30
Obrázek 35. Uspořádání prvků v peci (Štefan, 2016) 31
Obrázek 36. Přivařené závitové tyče (Vlastní 2016) 31
Obrázek 37. Osazení všech čtyř druhů vzorků v peci (Vlastní 2016) 32
Obrázek 38. Konstrukce nesoucí termočlánky – sloupek (Štefan, 2016) 33
Obrázek 39. Konstrukce nesoucí termočlánky - deska (Vlastní 2016) 33
Obrázek 40. Vážení vzorku (Vlastní 2016) 34
Obrázek 41. Složky pro výrobu čerstvého betonu (Vlastní 2016) 35
Obrázek 42. Promíchání složek v míchačce (Vlastní 2016) 36
Obrázek 43. Vybetonování forem (Vlastní 2016) 36
Obrázek 44. Vzorky připravené k převezení (Štefan, 2016) 37
Obrázek 45. Průběh výroby a betonáže ocelobetonového sloupu (Štefan, 2016) 38
Obrázek 46. Zavěšení zářiče a připojení plynové lahve (Vlastní, 2016) 39
Obrázek 47. Umístění vzorku před zářičem (Vlastní, 2016) 39
Obrázek 48. Rozmístění termočlánků (Štefan, 2016) 40
Obrázek 49. Zapojení termočlánků do dataloggeru (Vlastní, 2016) 40
Obrázek 50. Hoření zářiče (Vlastní, 2016) 41
Obrázek 51. Rozžhavené keramické destičky zářiče (Vlastní 2016) 42
Obrázek 52. Zapojení termočlánků (Vlastní 2016) 42
Obrázek 53. Ukazatel tlaku plynu (Vlastní 2016) 43
Obrázek 54. Namrzlá plynová láhev (Vlastní 2016) 43
Obrázek 55. Osazení vzorků v peci (Vlastní 2016) 44
Obrázek 56. Prohození rozmístění vzorků v peci (Vlastní 2016) 45
Obrázek 57. Kotvení prvků a vyvedení termočlánků (Vlastní 2016) 45
Obrázek 58. Časomíra experimentu a vyvedené termočlánky k datalogeru (Vlastní 2016) 46
Obrázek 59. Počátek zkoušky – hořáky v peci (Vlastní 2016) 46
Obrázek 60. Vysunutí betonové časti z ocelové trubky (Vlastní 2016) 47
Obrázek 61. Odstřižení termočlánků (Vlastní 2016) 47
Obrázek 62. Dosažená zkušební doba 180 minut (Vlastní 2016) 48
Obrázek 63. Zkušební vzorky po zkoušce (Wald, 2016) (Vaněk, 2016) 49
Obrázek 64. Deska betonová (Vlastní 2016) 50

Obrázek 65. Vývoj teploty v DB v závislosti na čase (Vlastní 2016) 52
Obrázek 66. Teplotní profily DB (Vlastní 2016) 54
Obrázek 67. Deska ocelobetonová (Vlastní 2016) 55
Obrázek 68. Vývoj teploty v DO v závislosti na čase (Vlastní 2016) 57
Obrázek 69. Teplotní profily DO (Vlastní 2016) 59
Obrázek 70. Sloup betonový (Vlastní 2016) 60
Obrázek 71. Vývoj teploty v SB v závislosti na čase (Vlastní 2016) 62
Obrázek 72. Teplotní profily SB (Vlastní 2016) 64
Obrázek 73. Sloup ocelobetonový (Vlastní 2016) 65
Obrázek 74. Vývoj teploty v SO v závislosti na čase (Vlastní 2016 67
Obrázek 75. Teplotní profily SO (Vlastní 2016) 68
Obrázek 76. Zpomalení oteplování při teplotě 100°C (Vlastní 2016) 69
Obrázek 77. Oddělení betonové a ocelové části v ocelobetonových sloupcích (Vlastní 2016) 70
Obrázek 78. Vývoj teploty v betonovém a ocelobetonovém sloupku (Vlastní 2016) 71

Seznam tabulek

Tabulka 1. Přehled změn, k nimž dochází při zahřívání betonu (Sičáková, a další, 2008) 4
Tabulka 2. Označení a rozsah termočlánků (Vojáček, 2014) 9
Tabulka 3. Klasifikace vlhkosti (TVVM) 18
Tabulka 4. Specifikace vzorků (Štefan, 2016) 29

Seznam zdrojů

Ahlborn. Snímač tlaku FD8214 pro kapalná a plynná media. *Ahlborn - přesná měřící technika.* [Online] Ahlborn. [Citace: 2. 5 2016.] http://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/snimac-tlaku-fd8214-pro-kapalna-a-plynna-media.html?cur=0.

Bangi, M. R. a Horiguchi, Takashi. 2011. Pore pressure development in hybrid fiber-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Reserch.* 2011. stránky 1150-1156.

Bažan, Z. P. a Tonguthai, W. 1978. Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *Eng. Mech. Div.* 1978. stránky 1059-1079.

Bažant, Z. P. a Tonguthai, W. 1979. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical. *Mag. Concr. Res.* 1979. stránky 67-76.

Datael. Monitoring teploty, vlhkosti a tlaku. *Data elektronik.* [Online] Data elektronik s.r.o. [Citace: 2. 5 2016.] http://www.datel.cz/mereni-vlhkosti-a-teploty/monitoring-teploty-a-vlhkosti/.

Fieldworks. DATAQ DATA LOGGER DI-710-UHS. *Fieldworks.* [Online] [Citace: 2. 5 2016.] http://www.fieldworks.nl/di-710-uhs.html.

Hyrš, J. 2012. Měření teploty termočlánky. *Bakalářská práce.* Brno : VUT, 2012.

I &CS. VLHKOMĚRY NA DŘEVO, BETON ... *e-pristroje.* [Online] I & CS spol. s r.o. [Citace: 2. 5 2016.] http://www.e-pristroje.cz/vlhkomery-drevo.html.

Kadlec, K. 2007. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití. *Automa.* 2007. 2.

—. 2007. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití. *Automa.* 2007. 3.

Kalifa, P., Menneteau, F. a Quenard, D. 2000. Spalling and pore pressure in hpc at high. *Cement nad Concrete Research.* 2000. stránky 1915-1927.

KASPO. 2006. *světlé inrazářiče kaspo K7-K50.* [Online] 2006. http://www.kaspo.cz/download/svetly/podrobne-informace-svetle-iz.pdf.

Kučera, P., Česelkská, T. a Matečková, P. 2010. Požární odolnost stavebních konstrukcí. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. 1, str. 176. ISBN 978-80-7385-094-4.

Lie, T. T. a Chabot, M. 1990. A Mathod to Predict the Fire Resistance of Circular Concrete Filled Hollow Steel Columns. *National Research Council Canada.* 1990. stránky 111-126.

Mavis. Termočlánkové snímače kabelové. *mavis.* [Online] [Citace: 2. 5 2016.] http://www.mavis.cz/termoclanek-kabelovy-mtc12.

Mindeguia, J. C., a další. 2010. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Reserch.* 2010. stránky 477-487.

MoldMaking. 2012. Vortex Core Pins/Plugs. *MoldMaking technology.* [Online] 4. 6 2012. http://www.moldmakingtechnology.com/products/vortex-core-pinsplugs.

National Instruments. What is Data Logging. [Online] National Instriments. https://www.ni.com/data_logger/whatis.htm.

Nevima, J. a Šmárik, B. Snímače mechanického namáhaní – piezoelektrický jev. *ELUC.* [Online] Střední průmyslová škola strojnická. [Citace: 2. 5 2016.] https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590.

Omega. Termočlánky - snímače pro měření teploty. [Online] Omega Engineering. [Citace: 2. 5 2016.] http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html.

Outinen, J., Kaitila, O. a Mäkeläinen, P. 2001. High-temperature testing of structural steel and modeling of structures at fire temperatures. Espoo : Helsinki University of Technology, 2001. 23.

Phan, L. T. 2008. Pore pressure and explosive spalling in concrete. *Materials and structure.* 2008. stránky 1623-1632.

Pochmanová, P. a Misar, I. 2011. Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah. *tzbinfo.* [Online] 21. 11 2011. http://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah.

Prokopová, Z. Automatizační technika. *Slideplayer*. [Online] SPŠ OA. [Citace: 2. 5 2016.] http://slideplayer.cz/slide/3175882/.

Quincot, G., a další. 2011. Methods to measure moisture in concrete. *FCT.* Guimarães :, 2011.

Rada, V. 2012. Ocelové konstrukce po požáru. *Seminární práce.* Praha : ČVUT, 2012.

Sičáková, A. a kolektiv. 2008. New generation cement concretes – Ideas, Design,Technology and Applications. Košice :, 2008. Sv. 156, 1. ISBN 978-80-553-0040-5.

Štefan, Radek. 2016. Informace o požární zkoušce malých vzorků v horizontální peci H2. Praha :, 2016.

Štětina, J., Jaroš, M. a Ramík, P. METODY MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VELIČIN. *Experimentální metody - Virtuální laboratoř.* [Online] Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství. http://vlab.fme.vutbr.cz/.

TESTO. 2015. Mikrovlnné vlhkoměry MOIST – nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů. *tzbinfo.* [Online] 5. 2 2015. http://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlnne-vlhkomery-moist-nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu.

TVVM. Měření vlhkosti porézních stavebních materiálů. [Online] TVVM - ČVUT Praha. http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/TVVM4.pdf.

van der Heijden, G. H., Pel, L. a Adan, O. C. 2011. Fire spalling of concrete, as studied by NMR. *2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure.* Netherlands : RILEM Publications SARL, 2011. stránky 353-360. 978-2-35158-118-6.

Vaněk. 2016. Fotodokumentace. Veselí nad Lužnicí :, 2016.

Vojáček, A. 2014. Přehled principů el. měření teploty - 1. díl. *automatizace.* [Online] 24. 6 2014. http://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil.

VŠB. Elektrické tlakoměry. *e-automatizace.* [Online] VŠB. [Citace: 2. 5 2016.] http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm.

Wald, F a kolektiv. 2005. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha : ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03157-8.

Wald, František. 2016. Fotodokumentace. Veselí nad Lužnicí :, 2016.