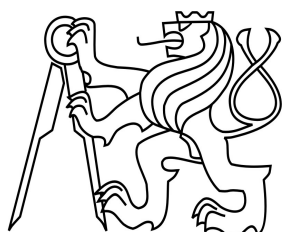


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Magisterský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

**Diplomová práce**

**METODY MĚŘENÍ TEPLoty V BETONU  
VYSTAVENÉM VYSOKÝM TEPLotÁM**

**METHODS OF TEMPERATURE MEASUREMENT IN CONCRETE EXPOSED  
TO HIGH TEMPERATURES**

**Autor:** Bc. Jan Havlůj

**Vedoucí:** Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Praha, leden 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Havlůj

Jméno: Jan

Osobní číslo: 423205

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám

Název diplomové práce anglicky: Methods of Temperature Measurement in Concrete Exposed to High Temperatures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.

Návrh a provedení experimentu.

Vyhodnocení experimentu.

Závěr.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1363-1. Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Praha : ÚNMZ, 2013.

CEN/TC 127 Technical Committee. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 3: Applied protection to concrete members. Brussels: European committee for standardization, 2008.

ŘEŠETEL, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996.

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

Datum zadání diplomové práce: 10.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

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 diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré užité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných pracích.

V Praze dne 6. ledna 2019

.....

Bc. Jan Havlůj

---

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za odborné konzultace a vedení mé práce. Zejména pak za umožnění provádění experimentálního měření, poskytnutí měřicích zařízení a možnost provedení zkoušky. Rovněž bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Benýškovi za cenné rady a odborné konzultace, dále kolegovi Danielovi Rajmanovi za pomoc při experimentálním měření a výrobě vzorků.

Na závěr bych rád poděkoval rodinným příslušníkům za podporu nejen při psaní diplomové práce, ale po celou dobu studia.



---

## Abstrakt

Cílem této práce je popis současného stavu poznání v oblasti měření vnitřní teploty v betonu za vysokých teplot a zároveň rozšíření oblasti znalostí v experimentálním měření. V úvodní části se práce zaměřuje na procesy vznikající v betonu za zvýšených teplot. Je zde vysvětlena právě důležitost měření teplot v souvislosti s vlhkostí a pórovým tlakem. V teoretické části se práce zaměřuje na problematiku měření teploty. Je zde vysvětlen princip měření termočlánky, konstrukce celého vodiče a jeho částí, základní vlastnosti, typy termočlánků, pravidla pro použití a pravidla pro rozmístění termočlánků v betonových deskách a nosnících. Praktická část této diplomové práce se zabývá návrhem betonového vzorku včetně vlastní výroby fixačních výrobků pro uchycení termočlánků. Dále pak je uveden popis experimentu samotného a dochází k zahřívání betonového kvádrů a získávání naměřených dat. V závěru se pak nachází porovnání naměřených dat s hodnotami vypočtenými programem a vyhodnocení měření.

### Klíčová slova

Měření teploty; termočlánek; teplota; beton; vlhkost; pórový tlak; fixační přípravek

## Abstract

The aim of the thesis is to summarize the previous research in the field of measuring the interior temperature in concrete exposed to high temperatures as well as to bring some new findings to experimental measuring. The first part focuses on the process that occurs in concrete during an exposure to high temperatures. Furthermore, the importance of measuring temperature in connection to humidity and pore pressure is explained. The theoretical part focuses on the issue of measuring temperature while explaining the principle of measuring with thermocouples, the construction of the whole conductor and its parts, its basic features, the types of thermocouples, the rules for its use and the rules for distributing the thermocouples in concrete boards and girders. The practical part of the thesis discusses the layout of a sample, as well as the creation of fixative devices for the attachment of the thermocouples. Furthermore, experiment is described on and the concrete block is heated and data are measured. At the end values are compared with mathematical program and data are evaluated.

### Keywords

Temperature measurement; thermocouple; temperature; concrete; humidity; pore pressure, resistance temperature sensor, fixation device

---

## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Latinské symboly

|    |                           |                     |
|----|---------------------------|---------------------|
| A  | Plocha                    | $m^2$               |
| T  | Teplota                   | $^{\circ}C$         |
| Tn | Termoelektrické napětí    | $mV/100\ ^{\circ}C$ |
| t  | Čas                       | sec                 |
| C  | Kapacita                  | J/kgK               |
| U  | Součinitel prostupu tepla | $W/m^2K$            |

### Řecké symboly

|                 |                              |                |
|-----------------|------------------------------|----------------|
| $\lambda$       | Součinitel tepelné vodivosti | $W/(m\cdot K)$ |
| $\rho$          | Objemová hmotnost            | $kg/m^3$       |
| $\alpha, \beta$ | Seebeckovi koeficienty       | $\mu(V/K)$     |
| $\varepsilon$   | Emisivita povrchu            |                |

### Zkratky

|    |   |
|----|---|
| TC | Termočlánek                                 |
| TA | TempAnalysis                                |
| PT | Plate thermometer – deskový teplotní snímač |

---

# Obsah

|  |            |
|--|------------|
| <b>Prohlášení.....</b>   | <b>II</b>  |
| <b>Poděkování.....</b>   | <b>III</b> |
| <b>Abstrakt.....</b>   | <b>IV</b>  |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>IV</b>  |
| <b>Seznam použitých symbolů a zkratek.....</b>   | <b>V</b>   |
| <b>1 Úvod.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2 Fyzikální vlastnosti betonu za zvýšené teploty.....</b>                             | <b>2</b>   |
| 2.1 Chování betonu za vysokých teplot.....   | 2          |
| 2.2 Provázanost teploty s ostatními vlastnostmi.....                                     | 3          |
| <b>3 Metody měření teploty v betonu vystavené vysokým teplotám.....</b>                  | <b>4</b>   |
| 3.1 Princip funkce termočlánků.....  | 4          |
| 3.1.1 Seebeckův jev.....   | 4          |
| 3.1.2 Princip návrhu měřicího obvodu.....  | 6          |
| 3.1.3 Další zapojení termočlánků.....  | 8          |
| 3.1.4 Termoelektrická pravidla pro zapojení.....   | 9          |
| 3.2 Konstrukce termočlánků.....  | 9          |
| 3.2.1 Měřicí spoj.....   | 10         |
| 3.2.1.1 Nechráněný konec měřicího spoje.....   | 10         |
| 3.2.1.2 Chráněný konec měřicího spoje.....   | 11         |
| 3.2.2 Druhy vodičů přenášejících napětí.....   | 12         |
| 3.2.3 Druhy izolací ochrany vodičů a jejich možnosti použití.....                        | 13         |
| 3.2.4 Zakončení termočlánku.....   | 14         |
| 3.3 Základní vlastnosti a typy termočlánků.....  | 15         |
| 3.3.1 Toleranční třídy pro termočlánky dle ČSN EN 60 584-1.....                          | 16         |
| 3.3.2 Spolehlivost a kvalita termočlánků.....  | 17         |
| 3.3.3 Možnosti poruchovosti termočlánků.....   | 17         |
| 3.4 Plášťový termočlánek a jeho provedení.....   | 18         |
| 3.5 Základní údaje o použití vnitřních termoelektrických článků.....                     | 20         |
| 3.5.1 Specifikace.....   | 20         |
| 3.5.2 Způsoby upevnění a ukotvení.....   | 20         |
| 3.6 Pravidla pro fixaci povrchových termočlánků.....                                     | 21         |
| 3.6.1 Požadavky na fixaci povrchových termočlánků v malých deskách.....                  | 22         |
| <b>4. Příprava a výroba betonových vzorků určených k měření za zvýšených teplot.....</b> | <b>23</b>  |
| 4.1 Charakteristika vzorků a umístění termočlánků.....                                   | 23         |
| 4.2 Příprava a výroba fixačních výrobků.....   | 26         |
| 4.2.1 Použité podklady pro výrobu.....   | 26         |
| 4.2.2 Použitý materiál.....  | 27         |
| 4.2.3 Fixační přípravky.....   | 27         |
| 4.2.3.1 Žebříkový ocelový nosič.....   | 27         |
| 4.2.3.2 Tyčový ocelový nosič.....  | 28         |
| 4.2.3.3 Tyčový sololitový nosič.....   | 29         |

---

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.3.4   | Prostorový plošný nosič.....   | 30        |
| 4.3       | Termočlánky a jejich specifikace.....  | 31        |
| 4.4       | Výroba vzorků pro zkoušení.....  | 32        |
| 4.4.1     | Stanovení přesného složení.....  | 32        |
| 4.4.2     | Smíchání všech složek.....   | 33        |
| 4.4.3     | Vybetonování kvádrů do ztraceného bednění.....                               | 33        |
| 4.4.4     | Vkládání hygropinových pouzder.....  | 34        |
| 4.4.5     | Odbedňování vzorku.....  | 35        |
| <b>5.</b> | <b>Experiment na Fakultě stavební ČVUT v Praze.....</b>                      | <b>36</b> |
| 5.1       | Postup přípravy vzorku pro měření.....                                       | 36        |
| 5.2       | Vzorek číslo 1.....  | 39        |
| 5.2.1     | Schéma umístění betonového vzorku při měření.....                            | 40        |
| 5.2.2     | Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 1.....                  | 41        |
| 5.2.3     | Průběh teploty po průřezu pro měřený vzorek 1.....                           | 46        |
| 5.3       | Vzorek číslo 2.....  | 51        |
| 5.3.1     | Schéma umístění betonového vzorku při měření.....                            | 52        |
| 5.3.2     | Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 2.....                  | 53        |
| 5.4       | Vyhodnocení naměřených hodnot.....   | 55        |
| <b>6</b>  | <b>Porovnání naměřených výsledků programem TempAnalysis.....</b>             | <b>56</b> |
| 6.1       | Obecné údaje o programu, vstupní hodnoty.....                                | 56        |
| 6.2       | Porovnání naměřených hodnot s hodnotami spočtenými vzorek 1.....             | 58        |
| 6.2.1     | Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 1.....                  | 58        |
| 6.2.2     | Průběh teploty po průřezu pro měřený vzorek 1.....                           | 61        |
| 6.3       | Porovnání naměřených hodnot s hodnotami spočtenými vzorek 2.....             | 66        |
| 6.3.1     | Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 2.....                  | 66        |
| 6.4       | Vyhodnocení porovnání v programu TempAnalysis s experimentálním měřením..... | 67        |
| <b>7.</b> | <b>Závěr.....</b>  | <b>68</b> |
|           | <b>Seznam obrázků.....</b>   | <b>70</b> |
|           | <b>Seznam tabulek.....</b>   | <b>72</b> |
|           | <b>Seznam grafů.....</b>   | <b>73</b> |
|           | <b>Literatura.....</b>   | <b>74</b> |

# 1 Úvod

Měřicí technika má mnoho oblastí působnosti. Jednou z oblastí, již se tento obor zabývá, je i měření teploty, konkrétně v tomto případě měření teploty v betonu vystaveného vysokým teplotám. Nedílnou součástí určování dalších dílčích fyzikálních vlastností betonových prvků za zvýšené teploty je právě nutnost znát teplotu prvku samotnou. Určuje nám, při jaké teplotě dochází k jakému jevu. Například, vlivem zvýšené teploty dochází ke zvýšení pórového tlaku v prvku a následně dojde k odprýsknutí betonu.

Práci jsem rozdělil do dvou základních částí, které jsou logicky členěny do kapitol a dalších podkapitol. První část je teoretická, v druhé se věnuji experimentu. Cílem této práce je co nejhlubší seznámení s problematikou měření pomocí termočládkových snímačů teploty umístěných v zabetonovaném prvku. Zároveň je popsáno provedení experimentálního měření, kde bude probíhat zjišťování vlivu jednotlivých fixačních přípravků na změřené teploty a jakým způsobem to jednotlivé výrobky dokáží ovlivnit.

První teoretická část je rešerše stávajícího stavu poznání. Je zde popsán princip a funkce termočládků v souvislosti se Seebeckovým jevem. Další podkapitola se věnuje samotné konstrukci termočládku a z čeho je vytvořen, jakou používáme ochranu, a jaké používáme měřící konce. V části, která se zabývá základními vlastnostmi a typy termočládků, se dozvíme, že máme 3 teplotní třídy přesností použití termočládků, které souvisejí s typem použitého vodiče, který nám pak dále určuje teplotní rozsah měření. A dále pak vhodnost použití jednotlivých měřidel pro určitý typ prostředí nebo rozsah teplot. Na závěr jsem popsal možnosti použití a správnosti instalace termočládků v nosíkových a deskových konstrukcích.

Rešerše vychází z předmětu „diplomový seminář“, absolvovaného v předchozím semestru. Zde byly sepsány všechny získané poznatky, které souvisí s měřením teploty v betonových konstrukcích za zvýšené teploty. [18]

Druhá, praktická část se skládá z experimentálního poznání. Nejprve je zde detailně popsán návrh vzorku, který budu využívat k experimentálnímu měření. Rozkreslení jednotlivých pozic termočládků a výroba všech čtyř fixačních zařízení, které vedou TC na své pozice. Poté je zde popsána výroba betonového kvádrů, složení směsi a zmonolitnění do vyrobeného bednění. Experimentální měření probíhalo v prostorách na školním dvoře, kde jsem získal naměřená data, ty jsou pak v závěru zpracovávány, vyhodnocena a porovnána s numerickým modelem programu TempAnalysis, rovněž je zde vyhodnocení.

Na tomto experimentu se současně podílel můj kolega Daniel Rajman. Tématem jeho práce jsou možnosti měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám. Jeho cílem je zaznamenávat jednotlivé vlhkostní výstupy z měření a současně v průběhu experimentu sledoval hmotnostní úbytek na váze, pro porovnání s původním stavem před začátkem experimentu. [19]

## 2 Fyzikální vlastnosti betonu za zvýšené teploty

### 2.1 Chování betonu za vysokých teplot

Nejprve je dobré zmínit, jak s vzrůstající teplotou nastávají chemické děje, které mají za následek změny fyzikálních a mechanických vlastností betonového prvku (viz Tab.1).

Tabulka 1 - Přehled změn, k nimž dochází v průběhu zahřívání betonu [1], [2]

|             |  | Teplota  | Vnitřní změny   | Vnější změny            |
|-------------|--|----------|---|-------------------------|
|             |  | zbarvení | normální  | 20 - 80 °C              |
| 100 °C      | - zřetelné (až stonásobné) zvýšení propustnosti vody<br>- počátek hydratace CSH gelu<br>- 80 - 150 °C dehydratace ettringitu<br>- 150 - 170 °C rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>- 171 °C tavení polypropylenových vláken |          |   | výskyt trhlin           |
| 200 °C      | - ztráta fyzikálně vázané vody<br>- zvýšení vnitřního tlaku  |          |   |                         |
| růžové      | 300 °C   |          | - praskání křemičitého kameniva - 350 °C<br>- kritická teplota pro vodu - 374 °C, poté už není možná přítomnost vody volné<br>- ztráta pevnosti v tlaku - rozsah 15 - 40 % dle skladby betonu | explosivní odprýskávání |
|             | 400 °C   |          | - tepelný rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  |                         |
|             | 500 °C   |          | - změna krystalové fáze z $\beta$ na $\alpha$ - 573 °C v kamenivu i písku<br>- ztráta pevnosti v tlaku - 55 - 70 % dle skladby betonu   |                         |
|             | 600 °C   |          | - druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta - \text{C}_2\text{S}$   |                         |
| bělavě šedé | 700 °C   |          | - tepelný rozklad uhličitanu vápenatého $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$<br>- silná endotermická reakce doprovázena uvolňováním oxidu uhličitého                          |                         |
|             | 800 °C   |          | - vznik keramických vazeb nahrazujících hydraulické vazby   |                         |
| žluto hnědé | 1100-1200 °C   |          | - tvorba wollastonitu $\beta$ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )   |                         |
|             | 1300 °C  |          | - celkový rozpadu betonu<br>- tavení některých složek   |                         |

Dosáhne-li teplota hodnoty 100 °C, začne se odpařovat fyzikálně vázaná voda spolu s vlhkostí obsaženou v pórech betonu, volná voda je zcela odstraněna při 120 °C. Nad teplotou 150 °C dochází ke ztrátě vody chemicky vázané v křemičitanu vápenatém, tato ztráta vody probíhá až do teplot 270 °C. Tento proces prozatím zvyšuje pevnost betonu, přičemž rychlost odpařování vody je různá dle druhu betonu (např. vysokopevnostní, obyčejný či lehký) a také dle technologie výroby betonu samotného. Je-li struktura betonu více pórovitá, pak jsou kladeny menší zábrany unikající vodě, tzn. že vnitřní napětí nebude mít takový rychlý nárůst. Ztráta vlhkosti je vratný děj, kdy během ochlazování se z okolí začne opět vázat voda do struktury betonu.

Teploty nad 300 °C způsobují mikrotrhliny na povrchu betonu, jenž je teplotě vystaven. A jelikož v tomto případě dochází k prudké expanzi páry, může dojít k odprýsknutí horní vrstvy betonu – tzn. explozivní odprýskávání. [1]

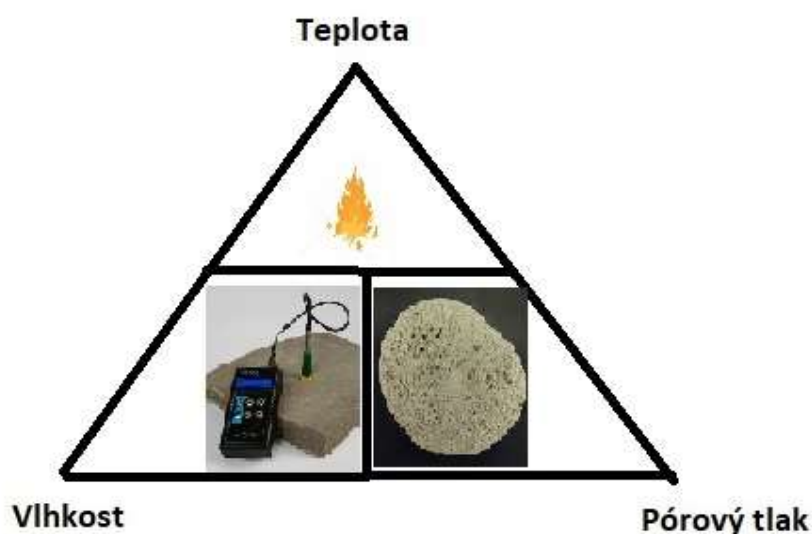
## 2.2 Provázanost teploty s ostatními vlastnostmi

V této části bych rád zmínil určitou provázanost s dalšími fyzikálními vlastnostmi. Patří mezi ně pórový tlak, vlhkost a samotná teplota v betonovém prvku. Pochopení jednotlivých veličin je základem pro to, jakým způsobem je měřit a které typy přístrojů použít pro získání kvalitních hodnot.

Mezi výše uvedenými veličinami existuje provázanost a závislost, kterou vyjadřují tzv. sorpční izotermy, které byly popsány ve dvou základních pracích z 80. let. [21, 22]

Tudíž pro stanovení hodnot všech tří fyzikálních veličin tedy stačí změřit pouze dvě, avšak vždy musí být jedna z měřených veličin teplota (např. teplota a vlhkost nebo teplota a pórový tlak), třetí pak vždy dopočteme (viz obr.1). [12]

Tento text byl převzat a upraven z jiné práce [12].



Obrázek 1 - Provázanost veličin

### 3 Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám

Pro měření teploty za vysokých teplot ( $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) využíváme teplotní termočlánky.

- Norma ČSN EN 1363–1 rozlišuje termoelektrické články, které používáme k měření teploty jsou to:
  - o Termoelektrické články v peci – deskové snímače teploty
  - o Termoelektrické články na neohřívaném povrchu
  - o Mobilní termoelektrické články
  - o Termoelektrické články pro teplotu okolí – plášťové termočlánky
  - o Vnitřní termoelektrické články

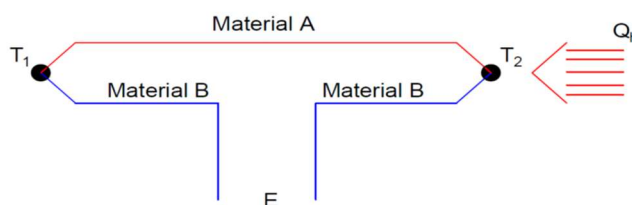
Poslední zmíněný je článek, který budeme používat my a detailně si ho rozebereme, je vhodný k použití a k zabetonování do vzorku.

#### 3.1 Princip funkce termočlánků

Termočlánky využívají termoelektrického jevu, jenž byl popsán již roku 1758 ruským vědcem Epinusem. V jiných zdrojích se uvádí, že termoelektrický jev byl objeven roku 1821 německým fyzikem Seebeckem, podle něhož se nazývá Seebeckův jev. K tomuto jevu dochází, jestliže jsou spojeny dva vodiče (dnes jsou používány i polovodiče) z různorodých kovů v uzavřený obvod a spoje těchto dvou vodičů mají rozdílnou teplotu.

##### 3.1.1 Seebeckův jev

Seebeckův termoelektrický jev popisující vznik napětí v obvodu složeném ze dvou různých vodičů, jejich konce mají rozdílné teploty, byl objeven německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem v roce 1821. Princip termoelektrického obvodu podle Seebecka je znázorněn na obr. 2. Při různé teplotě konců vodiče se na každém konci objeví jiný potenciál (napětí). Míra napětí je určena Seebeckovým (termoelektrickým) součinitelem, který může mít hodnotu kladnou nebo zápornou. Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu, viz tab. 2. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.



Obrázek 2 - Princip termoelektrického obvodu [3]



Seebeckův jev se tedy projevuje u dvou vodičů z různých kovových materiálů A a B, které jsou na koncích spolu vodivě spojeny. Jestliže teplota  $T_1$  jednoho spoje bude různá od teploty  $T_2$  druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. V zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit vztahem [3]

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT \quad (1)$$

kde  $E_{AB}$  je elektromotorické napětí,

$\alpha_A, \alpha_B$  jsou Seebeckovy koeficienty kovů,

$T_1$  a  $T_2$  jsou teploty spojů.

Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisejí na teplotě vodičů, použitím materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně konstantní, může být výše uvedená rovnice (1) linearizovaná dle vztahu [3]:

$$E_{AB} = (\alpha_B - \alpha_A) * (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Tabulka 2 - Seebeckovy koeficienty pro různé kovy [3,4]

| Kov        | $\alpha$ [ $\mu\text{V}/\text{K}$ ] | $\beta$ [ $\mu\text{V}/\text{K}^2$ ] |
|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Antimon    | 35.6                                | 0.145                                |
| Bizmut     | -74.4                               | 0.032                                |
| Konstantan | -38.1                               | -0.0888                              |
| Měď        | 2.71                                | 0.0079                               |
| Nikl       | -19.1                               | -3.02                                |
| Platina    | -3.03                               | -3.25                                |
| Železo     | 16.7                                | -0.0297                              |

Koeficienty  $\alpha, \beta$  jsou mimo jiné závislé na přesném složení materiálu a jeho struktuře. Hodnoty uvedené v tabulce 2 je z tohoto důvodu třeba brát s rezervou [3,4].

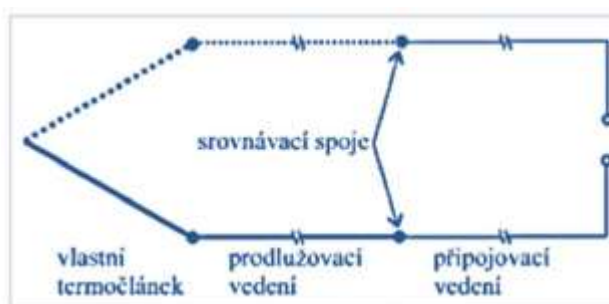
### 3.1.2 Princip návrhu měřicího obvodu

Základní zapojení termočlánku ze dvou vodičů zhotovených z různých materiálů s rozdílnými hodnotami termoelektrického součinitele je znázorněno na obr. 3. Při měření napětí je vhodné použít voltmetr s vysokým vnitřním odporem, jinak je v důsledku procházejícího proudu nutné údaj korigovat na odpor voltmetru. [5,6]



Obrázek 3 - Termoelektrický článek:  $M$  – měřicí spoj,  $S$  – srovnávací spoj,  $T_M$  [K] – teplota měřicího spoje,  $T_S$  [K] – teplota srovnávacího spoje,  $E_{MS}$  [V] – termoelektrické napětí, závislé na rozdílu teplot ( $T_M - T_S$ ) [6]

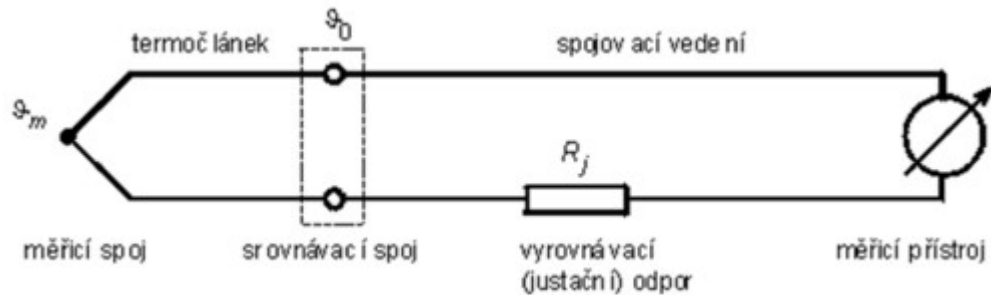
K termočlánku lze z úsporných důvodů nainstalovat prodlužovací vedení z materiálových variant, které jsou levnější a mají horší vlastnosti než materiály, ze kterých je zhotoven vlastní termočlánek. Příkladem může být menší chemická odolnost, případně i mechanická pevnost. Prodlužovací vedení se někdy nevhodně nazývá kompenzační (nedochází v něm k žádné kompenzaci). Použije-li se k termočlánku či k prodlužovacímu vedení přívodní vedení např. z mědi, vzniknou dva srovnávací spoje – na spojích měděného vedení s každým materiálem termočlánku, viz obr. 4. Termoelektrické napětí pro homogenní materiály závisí jen na teplotách konců vodičů, tedy spojů. To znamená, je-li do obvodu vložen další vodič z jiného materiálu, nemá v případě stejných teplot na svých koncích (spojích) žádný vliv na měřený údaj [5,6].



Obrázek 4 - Princip prodloužení termočlánku [6]

Teplota srovnávacího spoje má významný vliv na napětí měřeného termočlánku. Jsou tři způsoby, jak tento vliv nepodcenit. Při prvním způsobu je tato teplota udržována na stálé (známé) výši, např. v termostatu, případně ve směsi ledové tříště a destilované vody, což je velmi přesný, ale nepřilíš praktický způsob. Dalším způsobem je použití kompenzačního zapojení, kdy napětí kompenzuje elektrický obvod, který je navržen tak, aby korigoval odchylku napětí způsobenou změnou teploty srovnávacího spoje. Lze použít kompenzačního můstku nebo zapojení s PN

přechodem. Posledním způsobem, užívaným např. u měřících ústředěn je číslicová korekce. Srovnávací spoje jsou vyvedeny na tzv. izotermickou svorkovnici, jejíž teplota je měřena odporovým nebo PN snímačem a korekci pak stanoví měřící systém výpočtem [6], viz obr. 5.



Obrázek 5 - Zapojení termočlánu [5,6]

Měřicí spoj termočlánu, vyrobeného z kovů A a B má teplotu  $T$ , srovnávací spoj má teplotu  $T_0$ . Propojení s měřícím přístrojem je provedeno vodičem C a D, přičemž svorky měřícího přístroje mají teplotu  $T_1$ . S použitím 2. Kirchoffova zákona může být psán pro napětí termočlánu vztah:

$$E_{ABC}(T, T_0, T_1) = \alpha_{AB}(T) + \alpha_{BC}(T_0) + \alpha_{CD}(T_1) + \alpha_{DC}(T_1) + \alpha_{CA}(T_0) \quad (3)$$

Dále platí:

$$\alpha_{CD}(T_1) = -\alpha_{DC}(T_1) \quad (4)$$

Uvažujeme-li, že  $T = T_0$ , pak  $E=0$  a platí:

$$-\alpha_{AB}(T_0) = \alpha_{BC}(T_0) + \alpha_{CA}(T_0) \quad (5)$$

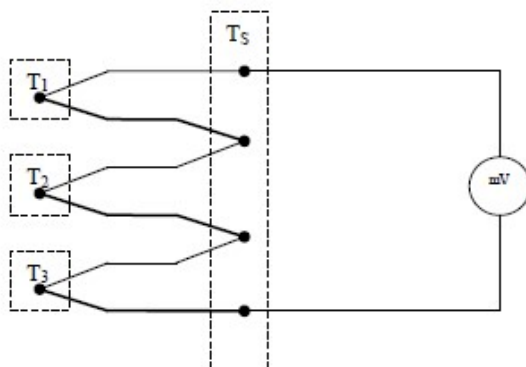
Po dosazení vztahů (4) a (5) do vztahu (3) dostaneme:

$$E_{ABC} = \alpha_{AB}(T) - \alpha_{BC}(T_0) \quad (6)$$

Z rovnice vyplývá již dříve uvedené tvrzení, že teplotu srovnávacího spoje je nutno udržovat konstantní, anebo člen  $-\alpha_{BC}(T_0)$  vhodně kompenzovat. Na počtu dalších přídavných spojů nezáleží [3].

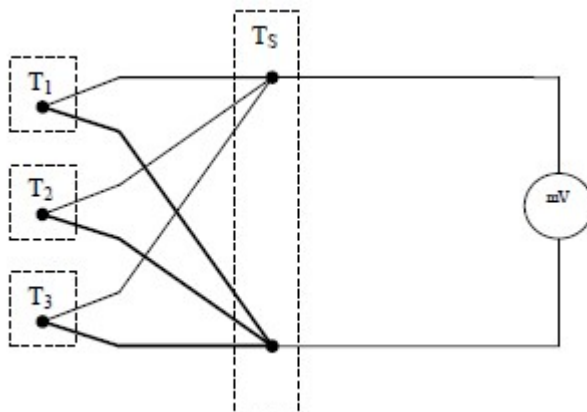
### 3.1.3 Další zapojení termočlánků

Sériové zapojení termočlánků na obrázku 6 umožňuje měření průměrných teplot nebo malých teplotních rozdílů, snižuje nehomogenitu termočlánků, zvyšuje citlivost a přesnost měření.



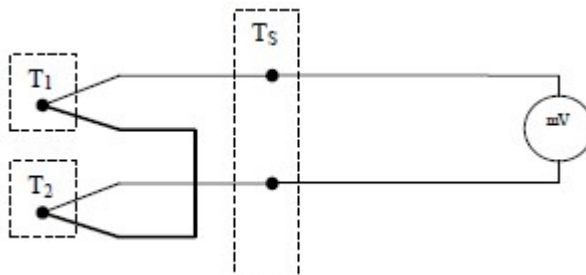
Obrázek 6 - Sériové zapojení termočlánků [5,6]

Paralelní zapojení termočlánků na obrázku 7 se používá jen zřídka a mimo měření průměrné teploty nepřináší žádné zvláštní výhody.



Obrázek 7 - Paralelní zapojení termočlánků [5,6]

Diferenční zapojení termočlánků na obrázku 8 je oblíbené, protože s ním lze měřit malé i velké teplotní rozdíly s velkou citlivostí a přesností. Při zapojování je nutné dát pozor na použití správných větví prodlužovacího vedení. [5,6]



Obrázek 8 - Diferenční zapojení termočlánků [5,6]

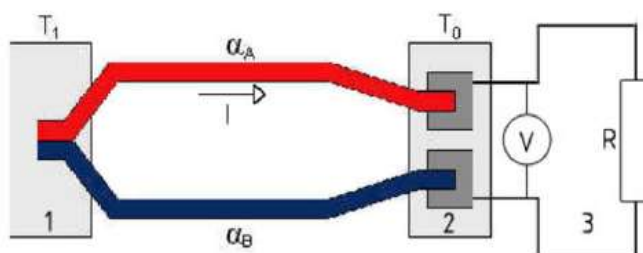
### 3.1.4 Termoelektrická pravidla pro zapojení

1. Pokud je materiál homogenní, závisí termoelektrické napětí na teplotách spojů dvou vodičů, nikoliv na rozložení teploty podél vodičů. [5,6]
2. Termoelektrické napětí nezávisí na dalších vodičích vložených do obvodu termočláнку za předpokladu, že budou mít oba konce každého dalšího vloženého vodiče na spojích stejnou teplotu. To platí, i za předpokladu, že je vodič vložen z jedné strany rozpojeného obvodu termočláнку. [5]
3. Nezáleží na tom, který z daných dvou spojů termočláńkové dvojice je označen jako měřicí a který naopak jako srovnávací neboli referenční. [8]
4. Termoelektrický jev vznikající mezi dvěma různými materiály je závislý výhradně na vnitřní struktuře materiálů, nikoliv na typu spoje mezi těmito materiály. Spoj musí mít pouze dobrou elektrickou vodivost. [8]
5. Pokud není možné udržovat teplotu srovnávacích spojů termočláńku na konstantní teplotě, je možné uspořádání s dalším termočláńkem, jehož vztažné spoje již budou v prostředí s konstantní teplotou. Toto uspořádání je využíváno u prodlužovacího vedení z termoelektrických materiálů. [5]

Tento soupis termoelektrických pravidel byl převzat z [5].

### 3.2 Konstrukce termočláńků

Termočláńek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na koncích vodičů spojeny. Jestliže je teplota jednoho spoje rozdílná od teploty druhého spoje (viz obr. 10), vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Jeden z uzlů je přitom měřicí a druhý srovnávací. Princip konstrukce termočláńku je zobrazen na obr. 9 [10].

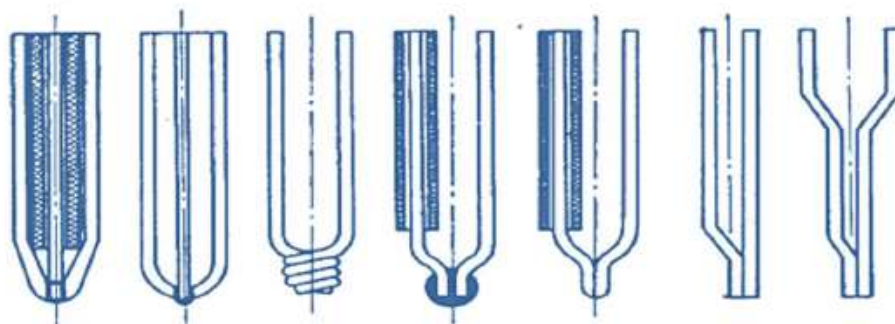


Obrázek 9 - Princip konstrukce termočláńku: 1 – měřicí spoj, 2 – srovnávací spoj, 3 – kompenzační obvod,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  – dva vodiče s nízkým termoelektrickým součinitelem [10]

Termočláńky lze s výhodou použít při měření teplotních rozdílů, protože jsou ve své podstatě diferenčním měřidlem. V takovém případě jsou brány oba spoje jako měřicí a výsledné napětí závisí na rozdílu teplot těchto spojů. Tímto způsobem se eliminuje chyba, která je u jiných metod způsobená odečítáním blízkých hodnot. [10]

### 3.2.1 Měřicí spoj

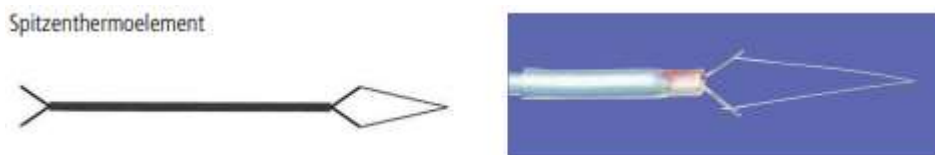
Měřicí spoj bývá tvořen mechanickým spojením, pájením nebo svařením drátů stejného průměru, podobně jako je zobrazeno na obr. 10.



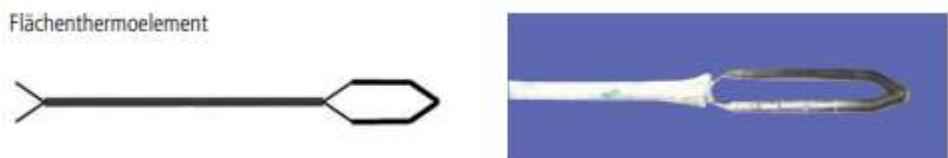
Obrázek 10 - Příklady řešení měřicího spoje termočlánků [10]

#### 3.2.1.1 Nechráněný konec měřicího spoje

Nechráněné termočlánky jsou nejjednodušší formou. Jak již bylo řečeno, měřicí konec je tvořen mechanickým spojením dvou drátů o stejném průměru, buď svařením, nebo pájením. Koncový spoj je velmi důležitou částí termočlánku, proto musí být oba dráty dokonale očištěny a pevně spojeny. [9] Spoj je nechráněný, proto jsou zde jistá omezení použití. Velice nevhodné je použití pro měření teploty kapalin, dráty by mohly korodovat nebo oxidovat. Dále je třeba se vyhnout měření povrchů kovových částí, které jsou použity k uzemnění elektrických systémů. Nejčastěji se tyto termočlánky používají pro měření teploty plynu. Jsou velmi malé a mají rychlou odezvu. Bodový termočlánek (obr. 11) o průměru kontaktního hrotu 25  $\mu\text{m}$  je vhodný pro přesné zjištění teploty prvků o malých rozměrech. Používá se pro měření teploty proudu vzduchu. Termočlánek se vyznačuje velmi krátkou časovou konstantou a vysokou přesností. Pro upevnění čidla je vhodná kaptonová lepicí páska nebo stříbrná pasta. [9] Ideální termočlánek pro měření teploty menších ploch je plošný (obr. 12). Hrot je dlouhý asi 10 mm a jeho průměr je 40  $\mu\text{m}$ . Vyznačují se vynikající časovou konstantou, vyšší odolností a mechanickou stabilitou. Pro upevnění a možnost vícenásobného použití je vhodná kaptonová lepicí fólie. [9]

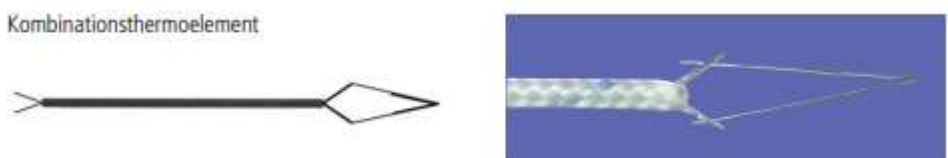


Obrázek 11 – Bodový termočlánek [11]

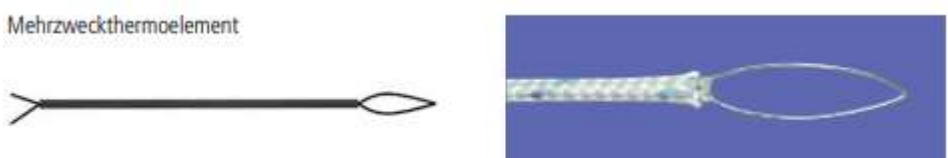


Obrázek 12 – Plošný termočlánek [11]

Kombinací bodového (špičatého) a plošného termočlátku vznikne spoj, který je vysoce citlivý (obr. 13). Průměr měřicího hrotu 25  $\mu\text{m}$  a délkou přibližně 7 mm. Vyznačuje se velmi krátkou časovou konstantou. Víceúčelový termočlánek (obr. 14) se používá zejména v případě extrémně rychlých změn teploty. Určený pro měření teplot menších ploch.



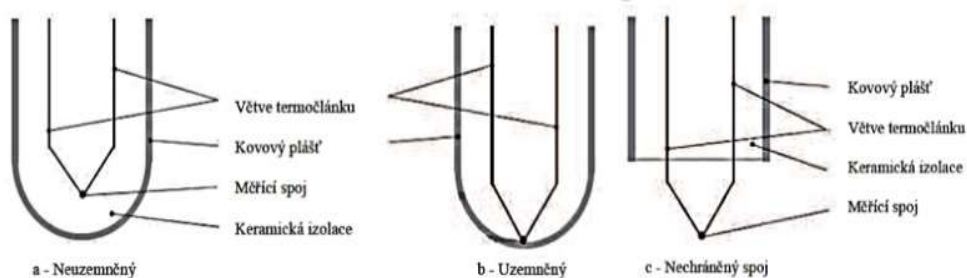
Obrázek 13 – Kombinovaný termočlánek [11]



Obrázek 14 – Víceúčelový termočlánek [11]

### 3.2.1.2 Chráněný konec měřicího spoje

Měřicí konec termočlánekové sondy má tři různá provedení. Uzemněný, neuzemněný (izolovaný) a nechráněný (otevřený), viz obr. 15. U uzemněného typu je měřicí konec termočlátku svařen s pláštěm sondy. Tento uzemněný spoj má rychlou časovou odezvu, ale je velmi citlivý na uzemněné měřicí elektrické smyčky. U neuzemněných spojů je termočlánek oddělen od stěny pláště sondy izolací, tím je lépe chráněn proti vlivům prostředí a vhodným zapojením lze potlačit i vliv elektromagnetického rušení a zemních smyček. Má ale oproti ostatním dvěma provedením delší dobu odezvy, z důvodu prostupu tepla pláštěm a izolací. Nechráněný spoj termočlánekové sondy je vysunut z pláště. Tyto termočlánekové sondy jsou nejlepší při měření teploty vzduchu. Pro agresivní a vlhké prostředí je tento spoj nepoužitelný.



Obrázek 15 – Provedení měřicího konce termočlátku [9]

### 3.2.2 Druhy vodičů přenášejících napětí

Dle předpokládaného rozsahu měřených teplot se stanovuje vhodná dvojice kovů, a to podle závislosti termoelektrického napětí na teplotě. Je třeba vybrat takové dva kovy, aby změna napětí byla co nejvyšší.

Typy termočlánků se původně označovaly použitou dvojicí kovů (chemickým složením), dnes se označují dle ČSN EN 60 584-1 [13] velkými písmeny viz tab. 3. V České republice jsou nejčastěji používány termočlánky J, K, S, B, čímž je pokryt rozsah teplot měření od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Použitím termočlánku na bázi wolframu a rhodia (typ C a A) lze měřit až do  $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V příloze C, Tab. C.1, ČSN EN 60 584-1 [13] je uveden kompletní rozsah maximálních doporučených teplot použití pro jednotlivé typy a průměry termočlánků.

Tabulka 3 - Značení termočlánků dle ČSN EN 60 584-1:2014 [13]

| Označení | Původní značení dle složení            | Doporučený teplotní rozsah použití [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Barevné označení |             |
|----------|--|---|------------------|-------------|
|          |  |   | Kladný pól       | Záporný pól |
| T        | Cu-CuNi                                | +200 až +350  | hnědá            | bílá        |
| J        | Fe-CuNi                                | +400 až +750  | černá            | bílá        |
| E        | NiCr-CuNi                              | +440 až +800  | fialová          | bílá        |
| K        | NiCr-NiAl                              | +750 až +1200   | zelená           | bílá        |
| N        | NiCrSi-NiSi                            | +850 až +1250   | lila             | bílá        |
| S        | Pt <sub>10</sub> Rh-Pt                 | +1400 až +1600  | oranžová         | bílá        |
| R        | Pt <sub>13</sub> Rh-Pt                 | +1400 až +1600  | oranžová         | bílá        |
| B        | Pt <sub>30</sub> Rh-Pt <sub>6</sub> Rh | +1500 až +1700  | bez údaje        | bílá        |



### 3.2.3 Druhy izolací ochrany vodičů a jejich možnosti použití

Samotný termočlánek je většinou chráněn izolací, která se vyrábí z různých materiálů a určuje, do jakého prostředí lze termočlánek použít. [14]

Tabulka 4 - Druhy izolací vodičů. [14]

| <b>Materiály izolací a jejich použitelnost:</b> |  |                                   |  |  |  |
|---|--|-----------------------------------|--|--|--|
| <b>Typ kabelu</b>                               | <b>Materiál opláštění</b>  | <b>Maximální provozní teplota</b> | <b>Vnější rozměry</b>                      | <b>Výhody</b>  | <b>Nevýhody</b>  |
| GLGL wrap                                       | Skelné vlákno/<br>skelné vlákno<br>napuštěné<br>vysokoteplotním<br>lakem | + 400 °C                          | 2x 0.2 mm cca<br>0.6 x 1.0 mm              | Dobrá<br>ohebnost  | Vedení je citlivé<br>na vlhkost a málo<br>odolává otěru<br>(nemá žádný<br>oplet)         |
|   |  |                                   | 2x 0.5 mm cca<br>1.1 x 1.9 mm              |  |  |
| GHGH  | Keramické vlákno/<br>keramické vlákno                                    | + 600 °C                          | 2 x 0.5 mm cca<br>1.5 x 2.4 mm             | Dlouhá<br>životnost  | Omezená<br>ohebnost, vedení<br>je citlivé na<br>vlhkost a velmi<br>málo odolává<br>otěru |
| GHGHV   | Keramické vlákno/<br>keramické vlákno                                    | + 600 °C                          | 2x 1.0 mm <sup>2</sup> cca<br>2.5 x 4.0 mm | Dlouhá<br>životnost  | Citlivé vedení na<br>vlhkost   |
|   |  |                                   | 2 x 0.22 mm <sup>2</sup><br>průměr 3.0 mm  | Odolnost proti<br>otěru, dobrá<br>ohebnost                           |  |
| SLSL  | Silikon/silikon  | + 180 °C                          | 2x 0.22 mm <sup>2</sup><br>průměr 3.8 mm   | Skvělá<br>ohebnost   | Za vyšších teplot<br>možnost<br>snadného<br>proříznutí                                   |
| TT oval   | Teflon FEP/teflon<br>FEP   | + 205 °C                          | 2x0.2 mm cca<br>1.3 x 2.0 mm               | Dobrá odolnost<br>proti slabým<br>chemikáliím                        | Za vyšších teplot<br>možnost<br>snadného<br>proříznutí                                   |
|   |  |                                   | 2x 0.5mm <sup>2</sup> cca<br>2.0 x 3.5 mm  |  |  |
|   |  |                                   | 2x 0.75mm <sup>2</sup> cca<br>2.4 x 4.2 mm |  |  |
| TSL   | Teflon FEP/silikon   | + 180 °C                          | 2x 0.22mm <sup>2</sup><br>průměr 3.7 mm    | Skvělá<br>ohebnost,<br>dobrá odolnost<br>proti slabým<br>chemikáliím | Za vyšších teplot<br>možnost<br>snadného<br>proříznutí                                   |

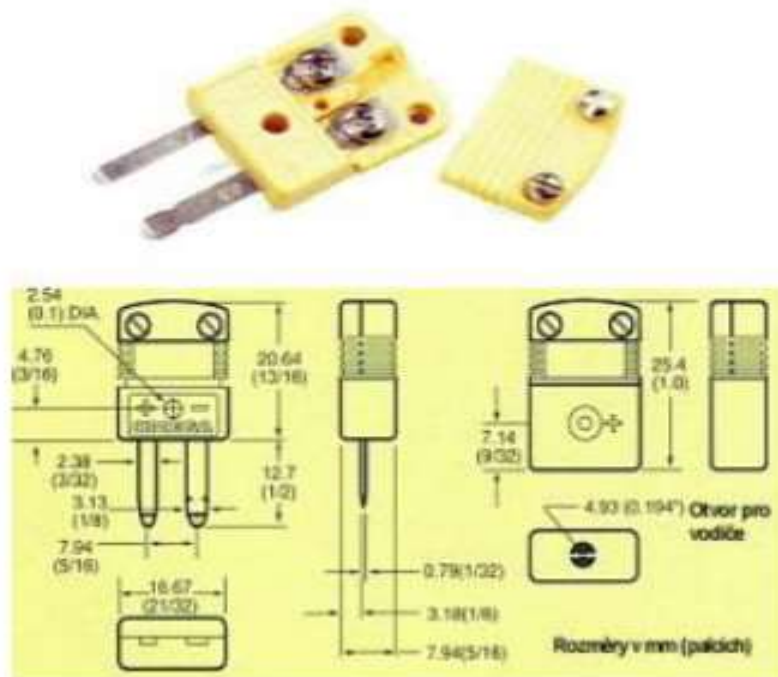
### 3.2.4 Zakončení termočlánku

Koncová část termočlánku, která je mimo měřený prvek se osazuje konektorem, který propojí termočlánek s datalogerem. Nejčastěji se lze setkat se třemi druhy konektorů:

Miniaturní vysokoteplotní konektory (HMP)

Standartní konektory (OST)

Vysokoteplotní konektory (HST) (viz. Obr. 16)



Obrázek. 16 - Miniaturní vysokoteplotní konektor [14]

### 3.3 Základní vlastnosti a typy termočlánků

Mezi obecné požadavky na termočlánky patří: vysoký koeficient teplotního napětí (udává se v mV/100 °C), lineární průběh napětí, stálost termoelektrických vlastností v čase, mechanická a chemická odolnost v redukčním a oxidačním prostředí, odolnost proti korozi, použitelnost v širokém rozsahu teplot, příznivý dynamický výkon termočlánků. Všechny tyto vlastnosti se mění podle toho, z jaké dvojice kovů je termočlánek vyroben. V následující tab. 5 jsou uvedeny základní vlastnosti vybraných termočlánků. [13]

Tabulka 5 - Základní vlastnosti termočlánků [13]

| Ozn.     | Původní značení dle složení | Termoel. Napětí (mV/100 °C) | Použitelnost (°C) |            | Odolnost v prostředí |           |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|------------|----------------------|-----------|
|          |                             |                             | Trvale            | Krátkodobě | Oxidačním            | Redukčním |
| <b>T</b> | <i>Cu-CuNi</i>              | 4,25                        | -200 až +400      | +600       | Malá                 | /         |
| <b>J</b> | <i>Fe-CuNi</i>              | 5,37                        | -200 až + 600     | +900       | Malá                 | Velká     |
| <b>K</b> | <i>NiCr-NiAl</i>            | 4,8                         | -50 až + 1000     | +1300      | Velká                | Malá      |
| <b>S</b> | <i>Pt10Rh-Pt</i>            | 0,64                        | 0 až + 1300       | +1800      | Velká                | Malá      |

Dalšími vlastnostmi termočlánků jsou přesnost a spolehlivost. Třídy přesnosti jsou rozděleny do 3 skupin. Skupina 1 a 2 pro teploty vyšší než -40 °C a skupina 3 pro hodnoty teplot do -200°C.

- 1) Třída přesnosti, s výjimkou typu C a A, je vyjádřena buď jako odchylka ve °C nebo jako funkce absolutní hodnoty  $t$ . Vždy platí vyšší hodnota. [13]
- 2) Termočlánky a termodráty jsou zpravidla dodávány tak, aby byly dodrženy limity tříd přesnosti uvedené v tab. 12; ČSN EN 60 584-1:2014 pro teplotní rozsah nad -40 °C. Odchylky termočlánků vyrobených ze stejných materiálů mohou být při teplotách pod -40 °C vyšší, než je limitní hodnota třídy 3. V případě potřeby termočlánků, které mají odpovídat třídám přesnosti 1, 2 nebo 3, musí kvůli správnému výběru materiálu kupující uvést tento požadavek v objednávce. [13]

### 3.3.1 Toleranční třídy pro termočlánky dle ČSN EN 60 584-1

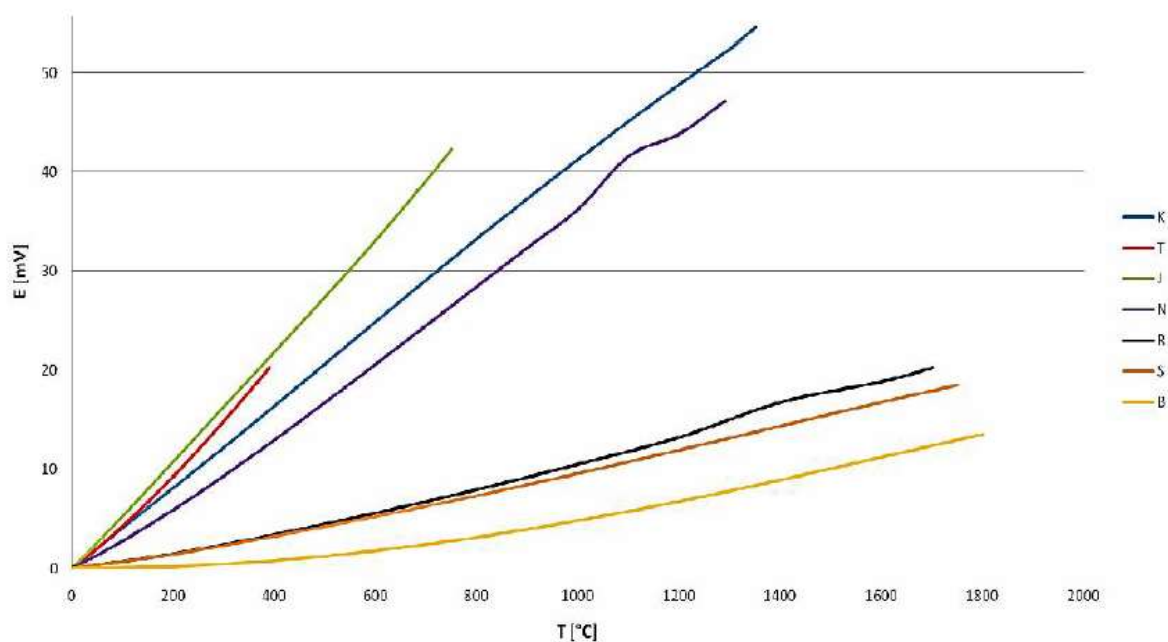
Příklad toleranční třídy pro termočlánky typu K a N: viz ČSN EN 60 584-1 [13]

- 1) Třída – pro teploty od -40 °C do 1000 °C je tolerance  $\pm 1,5$  °C nebo  $0,004 * |t|$
- 2) Třída – pro teploty od -40 °C do 1200 °C je tolerance  $\pm 2,5$  °C nebo  $0,0075 * |t|$
- 3) Třída – pro teploty od -200 °C do 40 °C je tolerance  $\pm 2,5$  °C nebo  $0,015 * |t|$

Tolerance a rozsahy platnosti, které se liší od hodnot uvedených v Tab. 12; ČSN EN 60 584-1:2014 musí být dohodnuty mezi výrobcem a uživatelem [13].

Dle předpokládaného rozsahu měřených teplot se stanovuje vhodná dvojice kovů, a to podle závislosti termoelektrického napětí na teplotě. Je třeba vybrat takové dva kovy, aby změna napětí byla co nejvyšší. Závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky je znázorněna na grafu 1 [10].

Graf 1 - Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky [10]



Z grafu například vyplývá, že nejlineárnějším průběhem se vyznačuje termočlánek typu K, nejvyšší termoelektrické napětí poskytuje termočlánek typu J, ovšem lze ho použít jen při nízkých teplotách. Termočlánek typu S poskytuje sice nízké termoelektrické napětí (k měření je nutno použít citlivější milivoltmetry), je však chemicky stabilní (neoxiduje se) a je použitelný i při vysokých teplotách [10].

### 3.3.2 Spolehlivost a kvalita termočlánků

V několika místech měřicího řetězce vznikají určité nejistoty, tím je ovlivněna spolehlivost měřicího procesu:

- 1) Termočlánek – nepřesnost může vzniknout nečistotou, nehomogenitou materiálu, případně při nedodržení složení materiálu, nebo dekalibrací (odchylka od původní závislosti napětí na teplotě) vzniklou stárnutím termočlánku během provozu.
- 2) Přenos tepla – termočlánek ovlivňuje měřený objekt (odvádí teplo), skutečná teplota se může lišit od teploty naměřené (řádově jednotky až desítky stupňů).
- 3) Přívod – při použití nevhodného kompenzačního vedení, nebo v případě kdy není dodržen teplotní rozsah, ve kterém se může vedení nacházet. Pro přesné měření se připojuje termočlánek přímo do měřicího přístroje.
- 4) Měřicí přístroj – v případě řádné teplotní kompenzace vstupních svorek je v porovnání s vlastním termočlánkem chyba výrazně menší.

### 3.3.3 Možnosti poruchovosti termočlánků

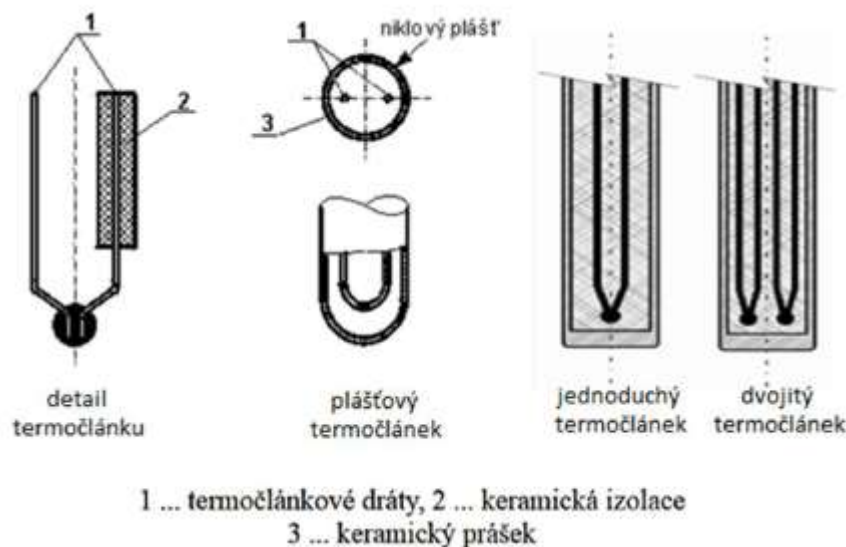
Při měření teploty termočlánkem mohou nastat poruchy:

- 1) Dekalibrace termočlánku – dochází ke změnám v jeho složení vlivem stárnutí, případně je-li vodič použit v nevhodném prostředí.
- 2) Porucha měřicího přístroje.
- 3) Přerušování obvodu.
- 4) Zkrat – vznikne při dotyku vodičů ve vedení, přístroj ukazuje teplotu v bodě zkrat. Tyto poruchy jsou v praxi běžné. Některé lze snadno detekovat (přerušování obvodu, zkrat). Nastane-li zkrat, tak se naměřená hodnota teploty výrazně liší od hodnoty, která je očekávána. Dekalibrace termočlánku se detekuje nejhůře, naměřená hodnota se od skutečné může lišit jen o několik stupňů, ale také až o stovky stupňů. Je nutné provádět pravidelnou kontrolu kalibrací.
- 5) Lze kalibrovat pomocí jiných měřicích přístrojů – simuluje se chování skutečného termočlánku pomocí výstupu přístroje. Výsledkem je kalibrační křivka přístroje.
- 6) Kalibrace vlastních termočlánků – kalibrovaný termočlánek se nachází v suché, nebo kapalně lánzi o nastavitelné teplotě. Napětí termočlánku se měří přesným milivoltmetrem. Výsledkem měření je opět kalibrační křivka měřeného TC.

Tento soupis poruchovosti termočlánků byl převzat z [3].

### 3.4 Plášťový termočlánek a jeho provedení

Základním typem kompaktních snímačů teploty jsou tzv. plášťové termočlánky, u nichž jsou dráty uloženy v niklové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo  $Al_2O_3$ . Vyrábějí se jako jednoduché s jedním nebo jako dvojité se dvěma články, viz obr. 17.



Obrázek 17- Konstrukce plášťového termočláňku [5]

Průměr kovového pláště činí 0,15 až 10 mm. Plášťové termočlánky lze ohýbat, mají malou časovou konstantu a umožňují měření i na těžko přístupných místech. Nejčastěji používaným materiálem pláště jsou nerezová ocel (značně široká chemická odolnost) a Inconel (větší teplotní rozsah) [5].

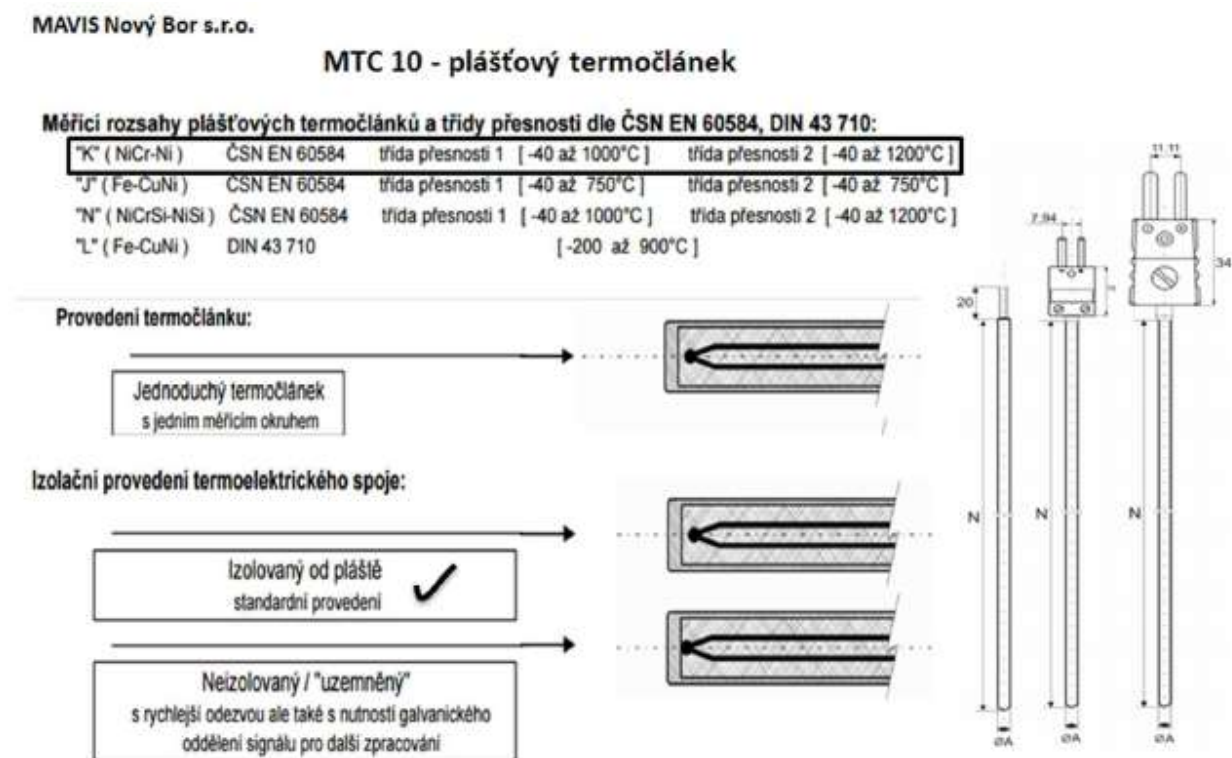
Měřicí konec termočláňkové sondy má tři různá provedení. Uzemněný, neuzemněný (izolovaný) a nechráněný (otevřený), viz obr. 15. U uzemněného typu je měřicí konec termočláňku svařen s pláštěm sondy. Tento uzemněný spoj má rychlou časovou odezvu, ale je velmi citlivý na uzemněné měřicí elektrické smyčky. U neuzemněných spojů je termočláňek oddělen od stěny pláště sondy izolací, tím je lépe chráněn proti vlivům prostředí a vhodným zapojením lze potlačit i vliv elektromagnetického rušení a zemních smyček. Má, ale oproti ostatním dvěma provedením delší dobu odezvy, z důvodu prostupu tepla pláštěm a izolací. Nechráněný spoj termočláňkové sondy je vysunut z pláště. Tyto termočláňkové sondy jsou nejlepší při měření teploty vzduchu. Pro agresivní a vlhké prostředí je tento spoj nepoužitelný. [5]

V kapitole 4.4.1.4 Vnitřní termoelektrické články normy ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti Část 1: Základní požadavky z roku 2013 [15] říká: „Pro zjištění vnitřní teploty měřeného komponentu se získají pomocí termoelektrického článku s charakteristikou odpovídající rozmezí měřených teplot a vhodných pro druh materiálu zkušební vzorku. Pro měření v betonu, oceli, dřevě má být termočláňek zhotoven z holého drátu izolovaného dvojitým skelným vláknem

o průměru drátů 0,5 mm a s pájenými nebo svařovanými spoji. Dráty mají zůstat izolovány co nejbližší ke spoji. Všechny holé dráty mají být co nejdále od sebe, aby se zmenšily elektrolytické účinky“. [15]

V kapitole 4.4.1.5 Termoelektrický článek pro teplotu okolí ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti Část 1: Základní požadavky z roku 2013 [15] říká: „Pro zjištění teploty prostředí v laboratoři v blízkosti zkušební vzorku před zkouškou i během ní se použije termoelektrický článek. Termoelektrický článek musí mít jmenovitý průměr 3 mm; musí to být termoelektrický článek typu K, stanovený v EN 60584-1, s tolerancemi stanovenými v EN 60584-2, izolovaný minerálním materiálem, s pláštěm z korozivzdorné oceli. Měřicí spoje musí být chráněny před sálavým teplem a s průvanem zařízením“. [15]

Provedení pro měření vnitřní teploty prvku odpovídá například MTC 10 – plášťové termočláanky – bez / s konektorem, viz obr. 18, od českého výrobce termočláankových a odporových snímačů teplot MAVIS Nový Bor s.r.o. [12,14]



Obrázek 18 - MTC 10 – plášťový termočlánek – bez / s konektorem, výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o. [14]

#### Shrnutí vlastností termočláanky typu K (NiCr – NiAl):

- 1) Barevné označení kladného pólu – zelená viz tab. 3
- 2) Doporučený teplotní rozsah použití +750 °C až +1200 °C viz tab. 3,5
- 3) Použitelnost: trvale -50 °C až +1000 °C, krátkodobě +1300 °C viz tab. 3,5

- 4) Dostatečná linearita křivky napětí viz graf 1
- 5) Nízký koeficient teplotního napětí =  $4,8 \text{ mV}/100 \text{ }^\circ\text{C}$  viz tab. 5
- 6) Vhodný pro oxidační a inertní atmosféru
- 7) Od  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  zokuzení oxidací
- 8) Necitlivý na neuronový tok
- 9) Nevhodný pro měření ve vakuu, redukční atmosféře nebo prostředích obsahující síru
- 10) Nevýhodou je jistá nestabilita v rozsahu  $200$  až  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , kdy vykazuje hysterezi (průběh fyzikálních změn při cyklickém opakování podmínek)

### 3.5 Základní údaje o použití vnitřních termoelektrických článků

Požadují-li se údaje o teplotách dosažených na jednotlivých součástech nebo dílech vzorku uvnitř jeho konstrukce, mají se volit termoelektrické články vhodného druhu a konstrukce tak, aby odpovídaly druhu prováděného měření. [15]

#### 3.5.1 Specifikace

Vnitřní termoelektrické články pro měření teplot v dutinách zkušební vzorku nebo teplot v materiálech jako je beton, ocel, dřevo apod., mají být zhotoveny z holého drátu izolovaného dvojitým skelným vláknem o průměru drátů  $0,5 \text{ mm}$  a s pájenými nebo svařovanými spoji. Dráty mají zůstat izolovány co nejbližší ke spoji. Všechny holé dráty mají být co nejdále od sebe, aby se zmenšily elektrolytické účinky. Mohou se použít pouze jednou. [15]

Jestliže se nepředpokládá, že vnitřní měřené teploty přestoupí  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , lze použít měřicí spoje měď/konstantan; očekávají-li se vyšší teploty, mají se použít spoje typu K (nikl chrom/nikl hliník). [15]

#### 3.5.2 Způsoby upevnění a ukotvení

Pro bezpečné připevnění měřících spojů k součástem nebo ke konstrukci se zvolí vhodné způsoby tak, aby nebylo příliš narušeno tepelné chování. [15]

Spoj může být např. připevněn ke kovovému dílu vyvrtáním otvoru v dílu o poněkud větším průměru, než je spoj termoelektrického článku, a dostatečně hlubokém, aby dráty zůstaly ve své poloze. Alternativně může být měřicí spoj k dílu přivařen. [15]

U dílů z lehkých kovů může být měřicí spoj vložen pod hlavu malého svorníku nebo nýtu. Podobný spoj může být připojen k malým kovovým součástem, jako jsou šrouby nebo dráty, a to ovinutím konce okolo součásti. Při těchto způsobech upevnění má být první styk mezi větvemi



termoelektrického článku blízko u povrchu, jehož teplota se měří. Tepelný styk lze zlepšit použitím malého množství pájky, která zůstane účinná i při teplotách nad jejím bodem tání. [15]

Tepelný styk může být vytvořen vložením spoje a izolovaných vedení do otvoru s vhodným materiálem stejných vlastností. Spoje a jejich vedení mohou být rovněž zality do materiálů jako je beton. [15]

Vodiče mají být, pokud možno vedeny od spoje podél izotermy na vzdálenost alespoň 50 mm a pak vyvedeny ze vzorku tak, aby nebyly vystaveny teplotám vyšším než měřicí spoj. Ve vodičích nemá být vytvořen spoj ani styk, dokud nevystoupí ze vzorku. [15]

Vodiče termoelektrického článku mají být chráněny proti:

1. Nadměrnému vzrůstu teploty;
2. Kondenzaci;
3. Krátkému spojení vlivem konstrukce vzorku, nebo podmínek ohřívání při zkoušce;
4. Poškození vyplývajícímu z deformace vzorku při zkoušce.

Tento soupis informací byl vytvořen ze zdroje [15].

### **3.6 Pravidla pro fixaci povrchových termočlánků**

Tato část práce se zaměřuje na překlad anglické normy test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 3: Applied protection to concrete member, což v překladu znamená: zkušební metody pro určení přínosu požární odolnosti konstrukční prvků – část 3: aplikovaná ochrana pro betonové části. V této normě je uvedeno pár základních pravidel a požadavků na rozmístění a upevnění povrchových termočlánků.

Termočlánek pro měření teploty na vystaveném povrchu požáru betonu pod požárně ochranným materiálem, na ocelové výztuži a v betonu by měl být holým kabelem izolovaným dvojitým skelným vláknem specifikovaným v EN 1363-1.

Abychom poskytli ochranu proti poškození při lití betonu, mohou být termočlánky obaleny ještě jedním ochranným obalem tak, aby nebyly ovlivněny výsledky teplot měření. Termočlánky, které takto chceme vylepšit, by měli být úplně nové při použití v testu.

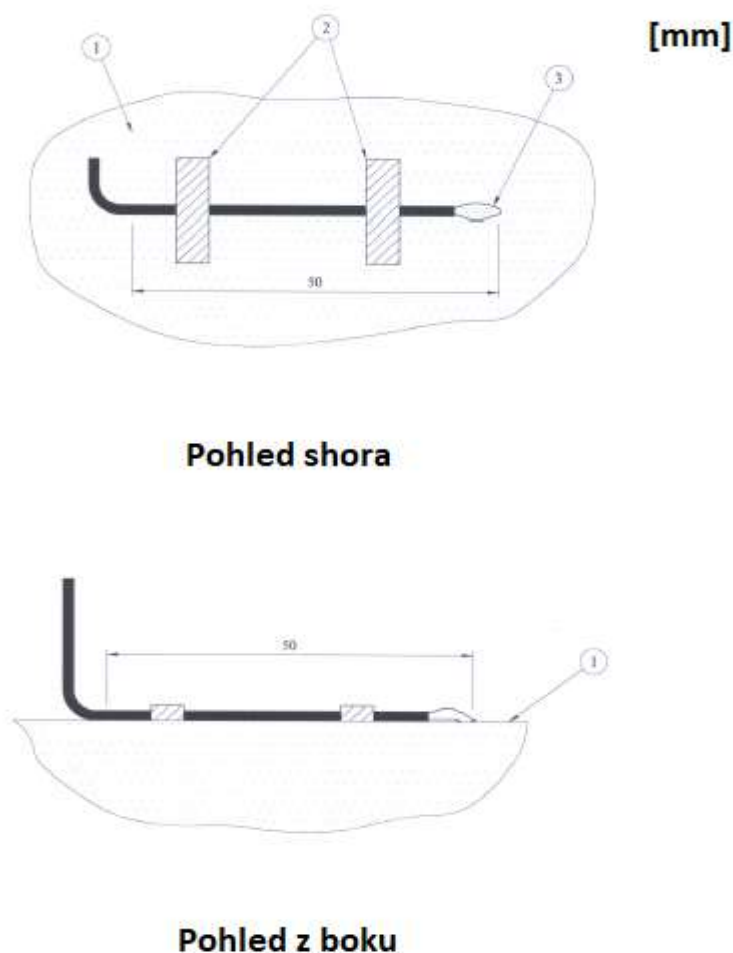
Termočlánky pro měření teplot na neohříváných površích betonu by měli být měděné diskové články blíže specifikované v EN 1363-1. Rovněž mají specifikovanou pozici napsanou v téže normě.

### 3.6.1 Požadavky na fixaci povrchových termočlánků v malých deskách

Zde jsou napsány možnosti fixace a pravidla rozmístění TC pro povrchové měření ve vzorcích malých desek dle [16].

Umístění a fixace TC pro exponovaný povrch:

- a) Upevnění do formy, kde je beton vylit, s nehořlavou páskou s mírnými lepicími vlastnostmi předtím, než je beton lit. (Obrázek 19) Je nutná zvýšená opatrnost při odstraňování bednění, aby nedošlo k poškození pásky nebo termočlánku.  
nebo
- b) Vkládáním termočlánku poté, co byla deska zalita, do maximálně 8 mm v průměru svislých otvorů provrtaných skrz beton. Tyto díry musí být minimálně 50 mm vzdálené od výztuže. Termočlánek by měl být vložen do díry a zároveň umístěn tak, aby byl minimálně 50 mm od vstupu do otvoru. Termočlánek musí být bezpečně ukotven na povrchu betonu s ohnivzdorným lepidlem a otvor se musí vyplnit ohnivzdornou náplní viz obr. 19.



Obrázek. 19 - Umístění termočlánku na betonovém povrchu. 1) Bednění, 2) Nehořlavá páska např. keramická, 3) 0,5 mm termočlánek s bodovým svařovaným spojem, [16]

## 4 Příprava a výroba betonových vzorků určených k měření za zvýšených teplot

V této části se zaměřuji na vytvoření dvou vzorků vhodných k experimentálnímu měření teploty za zvýšených teplot uvnitř betonového vzorku. Účelem experimentálního měření teploty je zjišťování transportu tepla uvnitř betonové konstrukce a možnosti ovlivnění měřené teploty v závislosti na použitém typu fixačního zařízení. Dále pak samotná výroba a návrh fixačních zařízení, které ponесou termočlánky a následně se zabetonují. Cílem diplomové práce je pak provést kvalitativní měření, které bude prokazovat shodu výsledků při měření teploty v závislosti na stejné hloubce u jednoho vzorku v jeho ploše a rozdílné hloubce u vzorku druhého.

Tyto vzorky budou vystaveny tepelnému záření z plynového infrazářiče KASPO K30 STL (KASPO,2006). Tento zářič se standardně využívá k vytápění průmyslových prostorů. Pro naše experimentální měření bude dostačujícím zdrojem tepla k prokazatelnosti měření a důkazu o funkčnosti samotných termočlánků a dataloggeru. Dále pak je uvedeno porovnání teplot uvnitř kvádru v závislosti na druhu fixačního přípravku, který vede termočlánek do dané pozice uvnitř vzorku.

Současně při měření teploty bude můj kolega Daniel Rajman měřit vlhkost ve vzorku. Před začátkem zkoušky budou všechny vzorky důkladně zváženy, aby byla možnost porovnat úbytek vázané vody. Při výrobě vzorku proběhne rozmístění umělohmotných sond, které se zabetonují a rozmístí na neexponované straně prvku. Sondy se umísťují v různých hloubkách a poslouží k měření vlhkosti.

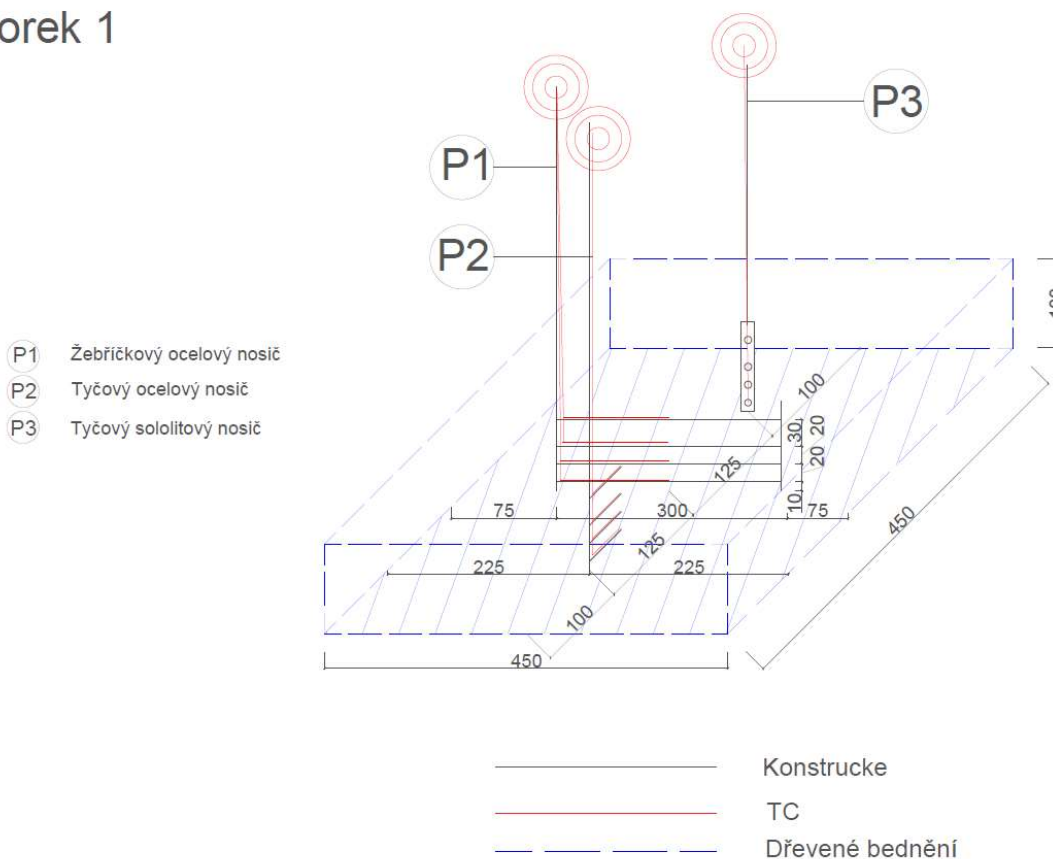
### 4.1 Charakteristika vzorků a umístění termočlánků

Pro zkoušku byly vytvořeny 2 vzorky, které jsou rozměrově stejné. Jedná se o prvek kvádrového tvaru 450 x 450 x 100 mm (třetí je rozměr tloušťky). Tento rozměr je volen právě z důvodu podobného rozměru plochy desky jako plochy zářiče KASPO. Rozměr jeho sálavé plochy je 440 x 440 mm. Na oba vzorky jsme použili stejné příměsi. Jsou to tyto přísady: cement 42,5 R, voda, kamenivo, plastifikátor, vlákna. Pro jeden vzorek bylo použito 8140 g cementu, 3960 g vody, 39 886 g kameniva v poměru rozměrů od 0-16, 66 g plastifikátoru Stachement 2180 a 33 g vláken Kampe Harex.

**První vzorek** byl vytvořen jako betonová deska, která je vybetonována do formy dřevěného bednění. Cílem měření je hloubka v jednotlivých bodech. Specifikace hloubek měření jsou 1 cm, 3 cm, 5 cm, 8 cm od exponovaného povrchu, viz obr. 23, kde jsou hloubky popsány. Rozměry betonového kvádru jsou 450 x 450 x 100 mm, její hmotnost je přibližně 50 kg a je vybavena 14 termočlánky, které jsou v ní zabetonovány. Jako fixační zařízení byly použity 3 fixátory

(typ 1,2,3), jejich rozmístění je na obrázku 20 níže. Bližší specifikace fixačních zařízení je v podkapitole 4.2. Další dva termočlánky pro měření teploty byly osazeny na povrchu na exponované straně. Rozmístění fixačních přípravků je následovné: přípravek číslo 1 je umístěn tak, aby termočlánky byly vycentrovány přímo uprostřed celého vzorku. Přípravky číslo 2 a 3 jsou pak rozmístěny tak, aby jejich termočlánky byly opět na ose vzorku, avšak jsou posunuty do stran a odsazeny o 12,5 cm od středového žebříkového nosiče. Všechny tři vzorky mají vyvedenou dlouhou vodící kulatinu přibližně 50 cm nad neexponovanou část vzorku, aby bylo možné vést jednotlivé kabelové vedení termočlánků. Fixační přípravek číslo 2 - tyčový ocelový nosič, má vyrobené výztuhy mimo svou osu do vzdálenosti 5 cm. Tato délka je volena z důvodu normového požadavku viz [15]. Třetí tyčový sololitový nosič je umístěn 12,5 cm od žebříkového nosiče a 10 cm od kraje bednění.

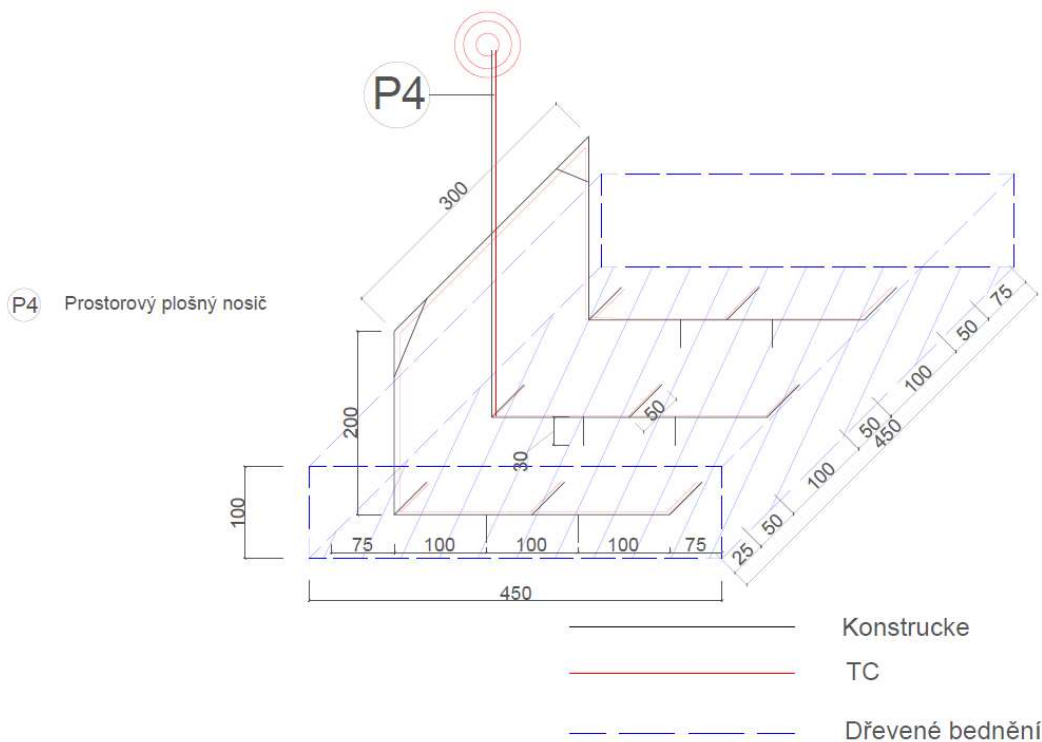
### Vzorek 1



Obrázek 20: Schéma rozmístění termočlánků ve vzorku 1

**Druhý vzorek** byl vytvořen stejně jako první, betonová deska, která je vybetonována do formy dřevěného bednění. V tomto vzorku je cílem změřit teploty ve stejné hloubce, která je pevně nastavena fixačním zařízením, tudíž se jedná o plošné měření teploty ve vzorku. Hloubka měření je nastavena na 3 cm od exponovaného povrchu. Tuto hloubku jsem zvolil z důvodu dalšího možného porovnání s výsledky měření z prvního vzorku. Rozměry betonové desky jsou opět 450 x 450 x 100 mm, její hmotnost je přibližně 50 kg a je vybavena 11 termočlánky, které jsou v ní zabetonovány. Jako fixační zařízení byl použit 1 fixátor, který je sice spojen, ale až mimo betonovou část, ve výšce 10 cm nad ní. Z důvodu, aby v betonové části bylo co nejméně materiálu, který by mohl negativně přispívat k vedení teplot a znehodnocovat zkoušku samotnou. Fixační zařízení je zobrazeno na obrázku 21 včetně rozměrů. Bližší specifikace fixačních zařízení je v podkapitole 4.2. Další dva termočlánky pro měření teploty byly osazeny na povrchu na exponované a neexponované straně. Rozmístění fixačního přípravku je následovné: celá konstrukce je rozmístěna tak, aby prostřední článek směřoval přímo proti ose středu plochy čtverce exponovaného povrchu. Tím, že je konstrukce zpevněna a propojena dohromady, je jednodušší ji umístit právě doprostřed, dle rozměrových hodnot bude prostorový plošný nosič vložen do formy a odsazen 7,5 cm od třech stran, přičemž u čtvrté to bude pouze o 2,5 cm, důvodem jsou jednotlivá žebírka pro vývod termočlánků, jejichž délka je vždy 5 cm, dle požadavku normy [15]. Celá konstrukce má vývod uprostřed, odkud se sbíhají všechny 3 měřící ramena po třech termočláncích a tudíž je pak nahoru vedena kabeláž termočlánků.

## Vzorek 2



Obrázek 21: Schéma rozmístění termočlánků ve vzorku 2

**Povrchové měření** teploty ve vzorku bude rovněž porovnáno. V prvním vzorku umístíme termočlánky, tak, že budou vloženy ještě před betonáží do bednění na exponované straně. V druhém vzorku to bude vypadat stejně, tedy dva termočlánky přilepené a vložené před betonáží do bednění. V každém měření bude umístěn deskový teplotní snímač plate, který umístíme na úroveň exponované strany vzorku.

## 4.2 Příprava a výroba fixačních výrobků

Jedním z hlavních cílů bylo vytvoření fixačních zařízení. Hlavním podkladem pro výrobu vzorků samotných byly skicy vzniklé na obrázku 20 a 21.

### 4.2.1 Použité podklady pro výrobu

Hlavními podklady pro výrobu fixačních výrobků byly nosiče, které již sloužily k experimentům měření v minulých letech. Na obrázcích níže je tedy zobrazen: tyčový nosič, sololitový nosič, žebříkový nosič a hvězdicový plošný nosič. Na výrobu tyčového a žebříkového nosiče byl použit materiál měděných drátů, samotné konce jsou pak obaleny černou gaffa páskou pro lepší přilnavost a připevnění termočlánků, aby se mohla vyloučit chyba v měření kvůli nesprávné pozici termočlánku. Vodící kabel je připevněn pomocí zdrhovacích pásek. Jako podklad pro výrobu sololitového nosiče posloužil obrázek 24, kde pro přesné uložení termočlánku v dané pozici posloužila tavná pistole, kterou se zalily otvory a za pomoci stažení zdrhovacími páskami došlo k uložení vodičů. Posledním vzorkem pro inspiraci byl plošný fixátor, který byl vytvořen jako svařenec z drátů, které vypadají jako hvězdice na jejichž jednotlivých paprscích jsou vyvedeny měřící termočlánky, z tohoto podkladu vznikl podklad pro vytvoření prostorového plošného nosiče. Autoři fotografií níže tento hvězdicový typ použili pro měření teploty ve sloupu a pro přesné zobrazení teploty po obvodě v různých hloubkách viz obrázek 25.



Obrázek 22: Tyčový měděný nosič [17]



Obrázek 23: Žebříkový měděný nosič [17]



Obrázek 24 - Sololitový nosič [17]



Obrázek 25 – Hvězdicový nosič [17]

## 4.2.2 Použitý materiál

Na výrobu byl použit materiál ocelové kari sítě, jejíž průměr byl 4 mm a velikost ok 10 x 10 cm. Dalším použitým materiálem byla sololitová deska tloušťky 4 mm a velikosti plošek 5 x 15 cm. Pro spojení sololitu a vodící tyče byl použit drát. Poslední položkou použitého materiálu byla šedá základová barva, kterou byly ošetřeny povrchy všech částí fixačních přípravků z důvodu omezení vzniku koroze.

## 4.2.3 Fixační přípravky

V této kapitole se řeší problematika výroby a návrhu fixačních zařízení. Je zde popsána výroba jednotlivých částí nosičů, včetně typů použitých materiálů.

### 4.2.3.1 Žebříkový ocelový nosič

Jak již bylo zmíněno výše, na výrobu byla použita kari síť. Nejprve jsem si rozdělil délku, kterou jsem potřeboval, v našem případě je použita šířka žebříkového pole 30 cm, tedy šířka třech ok rozměru 10 x 10 cm. Dále jsem si nastříhal pomocí pákových kleští potřebnou část kari sítě. Jednotlivé příčle jsem přichytil na stojiny a přivařil je v hloubkách měření, které jsme si zvolili, tedy 1 cm, 3 cm, 5 cm a 8 cm. Ty se poté svařili na pozicích. Na závěr ještě byl proveden antikoroziční nátěr pomocí šedé základové barvy.





*Obrázek 26: Žebříkový ocelový nosič*

#### **4.2.3.2 Tyčový ocelový nosič**

Na výrobu tohoto výrobku jsem použil 4 nastříhané 5 cm dlouhé trny a jeden dlouhý drát. Po základním rozměření a vystříhání jednotlivých kousků na výrobu jsem zarovnal jednotlivé výběžky na požadovanou délku, a pak už jen bylo provedeno přivaření dílčích trnů. Na závěr jsem opět všechny části natřel základovou barvou.



*Obrázek 27: Tyčový ocelový nosič*



### 4.2.3.3 Tyčový sololitový nosič

Zde byl výrobní postup podobný jako u tyčového ocelového nosiče výše, jen pouze pro nesení termočlánků nebyly použity ocelové trny, ale vyříznutý kousek sololitové desky, do které jsem si vyvrtal pomocí vrtáku otvory v námi předepsaných hloubkách. Tloušťka vrtáku byla 3 mm. Otvor musí být takový, aby měřící konec termočlánku hladce prošel otvorem a zde se pak zataví pomocí tavné pistole a tím bude zajištěna správná poloha pro měření. Spojení vodící tyče se sololitovou deskou bylo provedeno tak, že jsem si vyvrtal dvě místa po 2 otvorech. Mezi ně jsem vložil tyč, která byla pomocí drátu utažena na zadní stranu sololitového přípravku. Celému procesu předcházelo očištění vodící tyče od zbylých částí kari sítě. Po vyhotovení jsem přípravek natřel nátěrem.



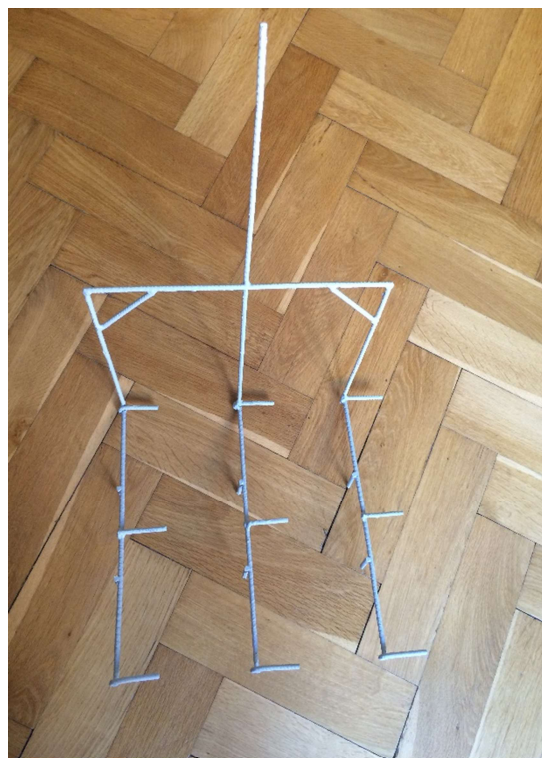
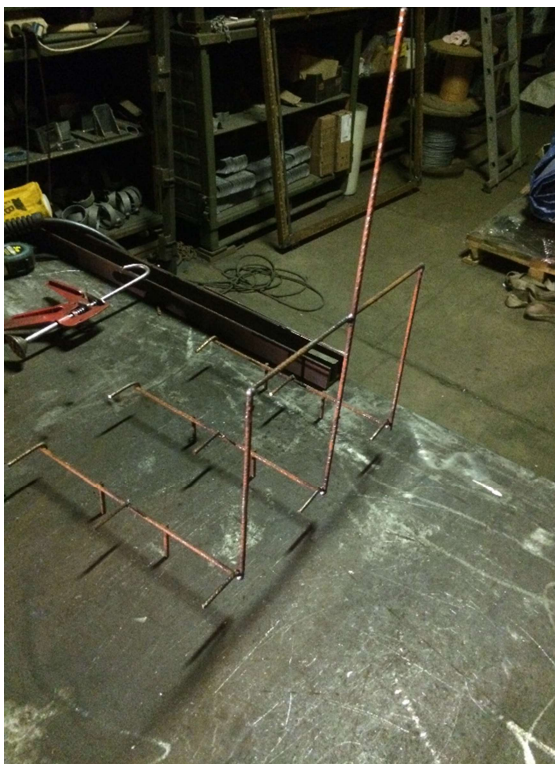
Obrázek 28 - Detail upevnění vodící tyče



Obrázek 29 - Tyčový sololitový nosič

#### 4.2.3.4 Prostorový plošný nosič

Výroba tohoto přípravku vznikala nejprve rozdělením na několik částí, které se na závěr svařily dohromady a tím vznikla prostorová konstrukce. Po rozměření jednotlivých dílců jsem si začal ohýbat jednotlivá ramínka, vždy dvě uprostřed o 90 stupňů dolů (naše kari síť má velikost ok 10 x 10 cm a celková délka ramene je 30 cm), s tím, že dolní výstupky mají pouze 3 cm, což je výška našeho měření a v druhém směru 5 cm, což jsou trny pro pozice rozmístění termočlánků. Dále jsem si rozměřil jednotlivé vodící tyče pro kabelové trasy. Po svaření ramen s vodícími tyčemi už chybělo pouze spojit vše dohromady. Důvodem pro propojení všech třech částí dohromady je lepší manipulace a snazší vedení kabelových vodičů. Ve chvíli, kdy byla vyhotovena tato kostra, chybělo již pouze přivařit trny uprostřed ramen, které jsou ve vzdálenosti 15 cm od těch bočních. Pro větší prostorovou tuhost byly navařeny na bocích vodících tyčí malé ocelové výztuhy, které vše stáhly. Nakonec byla konstrukce ošetřena základovou barvou.



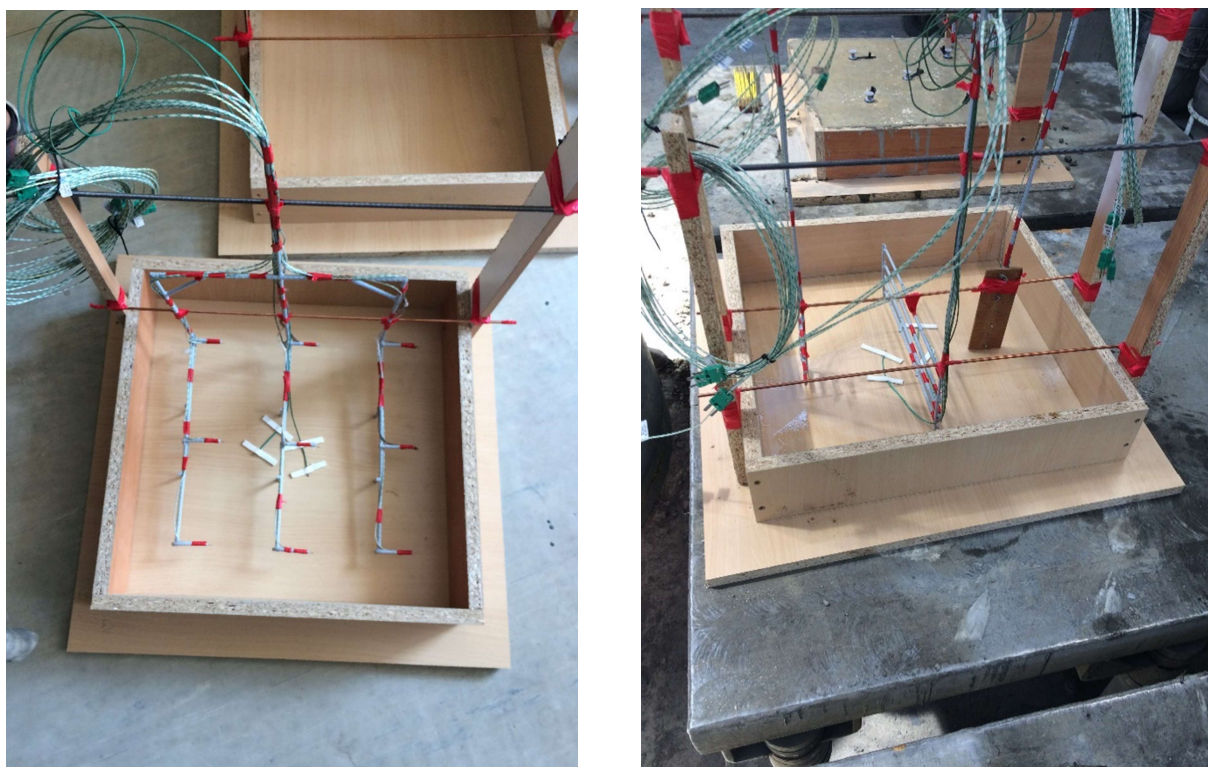
Obrázek 30 - Prostorový plošný nosič



### 4.3 Termočlánky a jejich specifikace

Pro měření teploty jednotlivých prvků byly použity kabelové termočlánky MTC 12 typu K, které mají rozsah teplot od -200 až do 1200 °C. Použitý druh izolace termočlánku byl GHGH oval 2x0,5 mm, viz tab. 4. Zakončení termočlánku bylo bez keramického korálku a s miniaturním vysokoteplotním konektorem MTC-MM-K. Přesné vlastnosti a specifikace kabelových termočlánků jsou vysvětleny výše v kapitole 3.2 a 3.4 v teoretické části této práce.

Tyto termočlánky byly přichyceny na předem připravené nosiče viz obr. 32, které zaručily přesnost umístění jednotlivých termočlánků v prvcích. Nosiče pro naše vzorky jsou umístěny vždy v hloubce 1 cm, 3 cm, 5 cm, 8 cm od exponovaného povrchu desky. Počet termočlánků ve vzorku číslo 1 je 14. Čtyři termočlánky na každém fixačním výrobku, a ještě dva termočlánky pro měření teploty na povrchu vzorku. V druhém vzorku bylo použito 11 termočlánků - 9 pro měření plošné teploty v hloubce 3 cm a 2 termočlánky pro povrch.



Obrázek 31 – Rozmístění termočlánků ve vzorku 1,2

## 4.4 Výroba vzorků pro zkoušení

Výroba betonového kvádrů probíhala ve školních laboratořích. Samotná výroba betonových kvádrů se dá rozdělit na několik etap provádění.

### 4.4.1 Stanovení přesného složení

Jednotlivé složky, které se pak následně smíchají, musejí mít přesné množství v daném poměru. Všechny složky se musí navážít. Pro náš vzorek byly použity tyto složky: voda, cement, frakce kameniva 16/32, frakce kameniva 8/16, křemičitý písek, plastifikátor, propylenová vlákna. Všechny složky byly naváženy v hmotnostech, které jsou uvedeny v článku 4.1 této práce.



Obrázek 32 – Vážení a příprava surovin, pro výrobu vzorku

#### 4.4.2 Smíchání všech složek

Všechny tyto složky se vloží do míchacího přístroje, který jednotlivé látky smíchá a vytvoří betonovou směs, která je rovnoměrně promíchána a je možné ji vkládat do bednění.

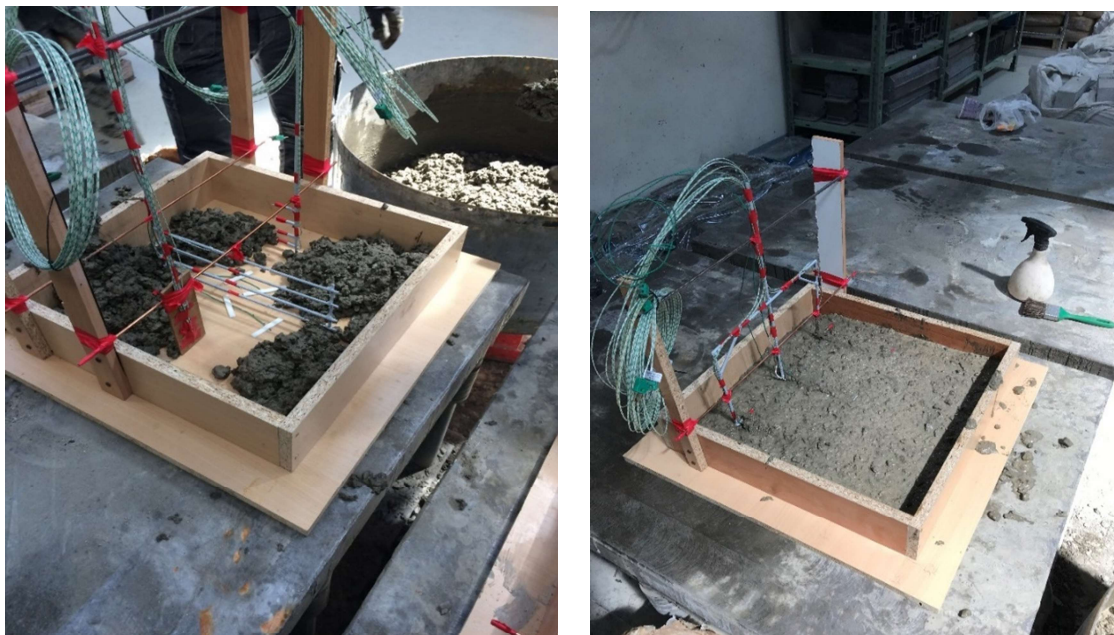


*Obrázek 33 – Míchací zařízení a nádoba s hotovou směsí*

#### 4.4.3 Vybetonování kvádrů do ztraceného bednění

Po namíchání betonové směsi proběhlo vložení fixačních prvků s nainstalovanými termočlánky do bednění. Zde je kladen velký důraz na přesnost umístění (myšleno poziční rozmístění). Dále probíhala samotná betonáž. Plnili jsme betonovou směs do připraveného bednění. Několikrát v průběhu betonáže bylo nutné směs ztuhnout na vibračním stole, aby došlo ke komplexnímu vyplnění bednění v celém objemu a měli jsme jistotu, že je betonová směs v celém svém objemu homogenní včetně krajů a rohových partií. V případě, že bychom tak neučinili, mohly by vzniknout v betonové desce jakési „vzduchové kapsy“, které by znehodnocovaly měření samotné.





Obrázek 34 – Betonáž vzorku, pravý snímek po zhutnění vibrační deskou

#### 4.4.4 Vkládání hygropinových pouzder

Po dokončení betonování si můj kolega Daniel Rajman rozmístil jednotlivé body, kde ho v budoucnu bude zajímat aktuální vlhkost, v určité hloubce a určitém místě v betonovém kvádru. Hygropinová pouzdra mají různé hloubky od čtyř do osmi centimetrů.

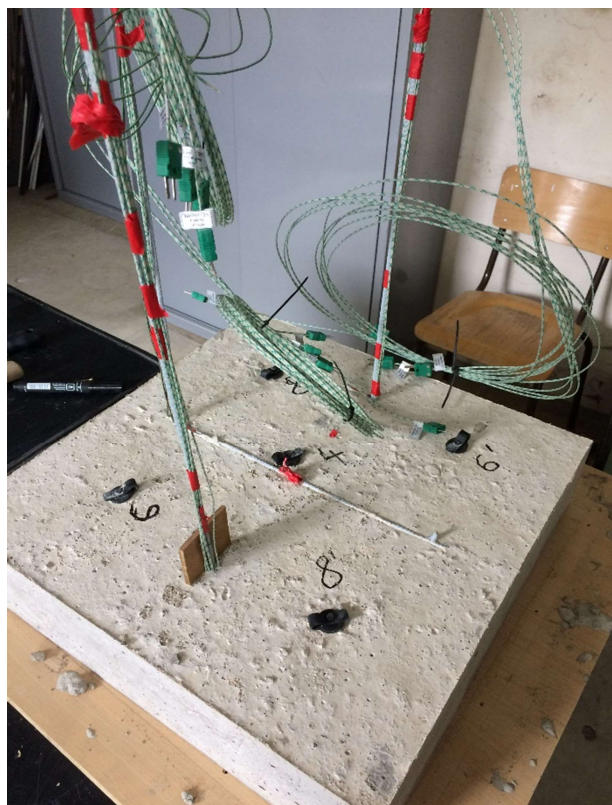
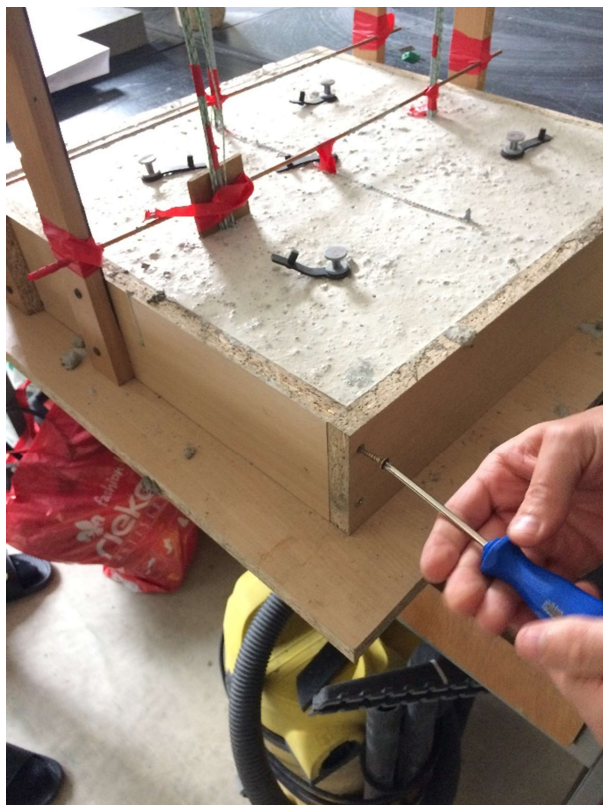


Obrázek 35 – Vkládání hygropinových pouzder do vzorku



#### 4.4.5 Odbedňování vzorku

Poslední fází výroby vzorku je jeho samotné odbednění, poté co beton dosáhne odpovídající. V našem případě probíhala betonáž dne 22. 5. 2018 a přesně o 31 dní později 22. 6. 2018 došlo k odbednění obou vzorků.



Obrázek 36 – Odbednění vzorků



Obrázek 37 – Oba odbedněné vzorky připravené k experimentálnímu měření

## 5 Experiment na Fakultě stavební ČVUT v Praze

Dne 25. 10. 2018 probíhaly oba experimenty. Přípravné práce začaly již v 9 hodin ráno. Teplota okolního prostředí byla změřena na 14 °C, povětrnostní podmínky nebyly ideální a chvílemi vznikal mírný nárazový vítr.

Tuto část práce rozdělují na dvě etapy. V první etapě probíhalo zahřívání vzorku číslo jedna, v etapě druhé zahřívání vzorku číslo dva. Hlavním rozdílem mezi těmito etapami je doba měření, kdy u prvního vzorku byla volena delší doba (90 minut zahřívání a 30 minut chlazení), vzorek číslo dva prošel pouze dobou zahřívání 42 minut a fáze chladnutí byla 35 minut, což pro naše experimentální měření je postačující hodnota, o kterou se můžeme opírat. Dalším rozdílem v měření je, že v první fázi probíhalo měření hmotnosti na váze, na které byl vzorek položen, aby bylo možné zjistit relativní úbytek vázané vlhkosti v betonovém vzorku. V případě druhém již byla váha odstraněna, neboť je počítáno, že právě relativní úbytek vázané vlhkosti je stejný jako u vzorku jedna. Teplotní podmínky byly v průběhu měření stejné a neměnily se.

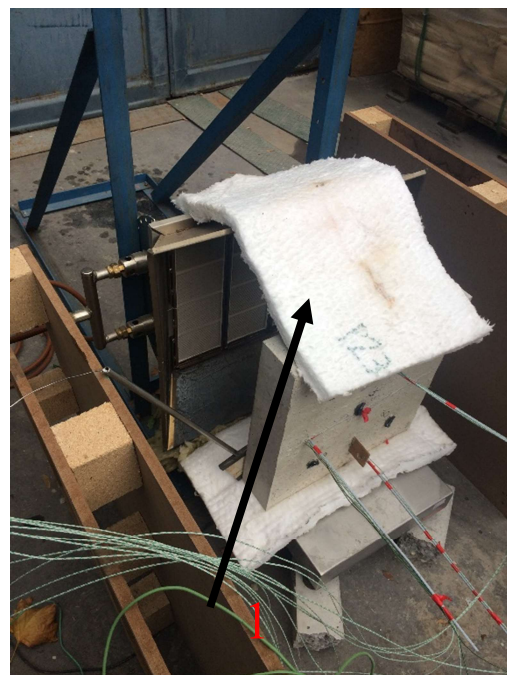
### 5.1 Postup přípravy vzorku pro měření

Nejprve jsme vytvořili vhodné měřicí místo, umístili zářič, instalovali tlakovou láhev, připojili redukční ventil a propojili láhev se zářičem pomocí hadice. Dále následovalo vypodložení vzorku do výšky spodní hrany zářicí plochy, právě z důvodu, že náš vzorek má rozměry 45x45 cm, což je stejné jako plocha zářicí plochy. Po získání přesné výšky jsme provedli zaizolování váhy, aby nedošlo k jejímu poškození, neboť se jednalo o váhu bez požární odolnosti. Na tuto část jsme použili minerální nehořlavé vlákno. Prostor nad vzorkem, v pozici mezi vrchní hranou zářiče a betonovým kvádrem, byl přikryt, aby nedocházelo ke zbytečnému úniku tepla. Vzhledem ke vzniklým povětrnostním podmínkám bylo nutné zaizolovat obě boční strany (mohlo by zde docházet k nadměrnému úniku tepla, které by znehodnocovalo výsledky měření, vlivem proudícího studeného větru skrz), pro tyto účely jsme použili dřevěné palety, jejichž povrch byl tvořen sololitovou deskou, tudíž se jednalo o dvě plnohodnotné plochy, které zamezily proudění studeného větru. V momentě, kdy jsme dostavěli poslední část konstrukce, která chránila vzorek, jsme ještě připevnili měřicí deskový snímač před samotný vzorek pro určení povrchové teploty. Před samotným zahájením zkoušky bylo nutné zjištění, jestli jednotlivé termočlánky fungují a měří, proto jsme je připojili do datalogeru, který zaznamenává měřené změny termoelektrického napětí, které následně přepočítává a udává nám teplotní hodnoty daných termočlánků. V našem případě byly nefunkční dva povrchové termočlánky. Tento problém jsme vyřešili výměnou připojovacích koncovek do datalogeru a následně už vše pracovalo správně. Proběhlo tedy ještě poslední nastavení programu pro zaznamenávání hodnot, kontrola funkčnosti váhy a samotná zkouška mohla začít. Nastavili jsme tlakový ventil na láhvi na 1 bar a zapálili zářič. V průběhu zkoušky bylo už důležité pouze hlídat hodnotu na manometru u lahve, aby byla vždy 1 bar a v případě zvýšení větru, pohlídat boční postavené stěny, aby nedošlo k jejich pádu, a tedy znehodnocení měření.





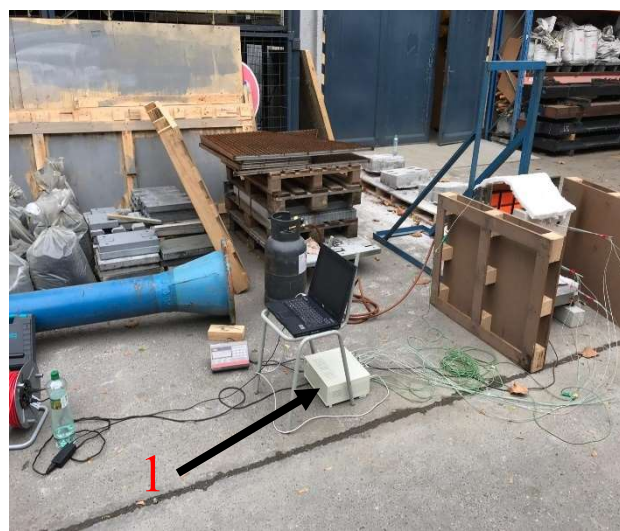
Obrázek 38 – 1) Izolace váhy, 2) Vyrovnávací hranoly



Obrázek 39 – 1) Izolace proti úniku tepla nahoru



Obrázek 40 – 1) Bočnice k omezení proudění větru



Obrázek 41 – 1) Zaznamenávací dataloger

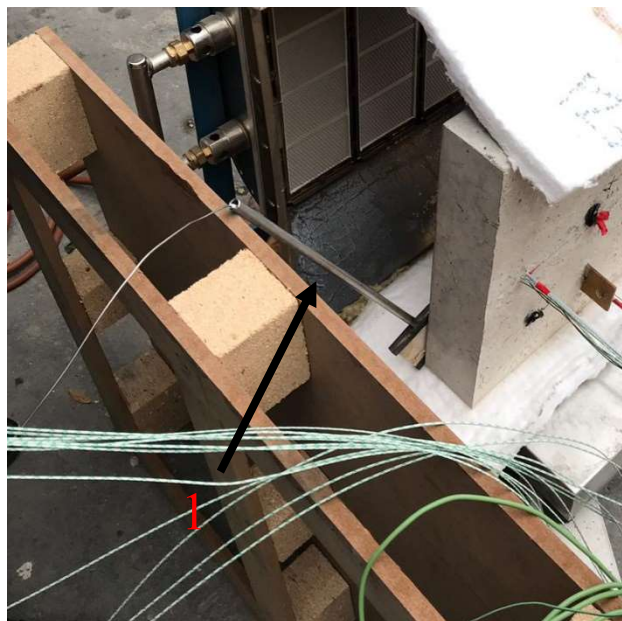




Obrázek 42 – Tlaková láhev, ukázka adekvátního tlaku na manometru pro měření experimentu



Obrázek 43 – 1) Digitální váha zaznamenávající hmotnost úbytku vody po celou dobu testu



Obrázek 44 – 1) Instalace deskového teplotního snímače pro měření povrchové teploty

## 5.2 Vzorek číslo 1

Měření a zaznamenávání dat probíhalo 150 minut. V této kapitole jsou porovnávány grafy závislosti teploty na čase, zvláště pro každou hloubku a jednotlivé druhy nosičů a dále grafy závislosti teploty na hloubce pro časy 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 150 minut. Nejvyšší teplotní hodnota byla zaznamenána na termočláncu umístěném na povrchu vzorku. Teplota dosahovala hodnoty 471,39 °C, což bylo naměřeno v 77,33 minutě experimentu. Vzorek byl zahříván dále, ale z důvodu klimatických podmínek a nedokonalé těsnícího okolí teplota již nerostla. Tudiž mohl přicházet chladný vzduch z okolí, a v následujících 20 minutách teplota již nestoupala a jen lehce poklesla a udržovala se na hodnotě, která nespadla pod 455 °C. Zároveň během tohoto měření probíhalo měření hmotnosti a ze vzorku ubývala vlhkost, viz obrázek 45. Hmotnost před započítím měření měla hodnotu 46,718 kg, na závěr byla hmotnost nižší o 3,465 kg, což je 43,253 kg. K nejvyššímu úbytku začalo docházet ve 37. minutě od počátku zahřívání. Během zahřívání bylo dosaženo teploty přes 400 °C, což by teoreticky mělo způsobovat odprýskávání betonu, viz bod 2.1 této práce. Díky přidaným vláknům k tomuto jevu nedošlo.

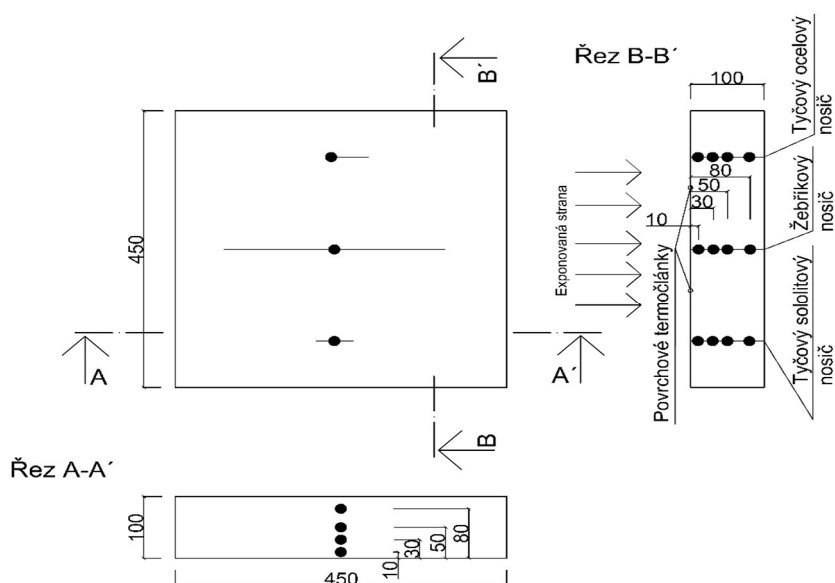


Obrázek 45 – viditelné vypařování vody v betonu zaznamenaná v 37. minutě

V průběhu experimentu se na zadní neexponované straně vzorku tvořily průhledné bílé výpary, které byly tvořeny vypařovanou vodou ve vzorku.

### 5.2.1 Schéma umístění betonového vzorku při měření

Vzorek jsme při měření umístili na váhu a to tak, že termočlánky byly rozmístěny ve třech úrovních. Myšleno od spod. V první úrovni byl umístěn sololitový nosič, viz kapitola 4.2, uprostřed byl umístěn a vycentrován žebříkový nosič, v části horní byl umístěn nosič termočlánků tyčový. Zářič byl umístěn ve stejné výšce, tudíž spodní hrana zářící plochy byla v úrovni spodní hrany betonového vzorku viz obrázek 46.

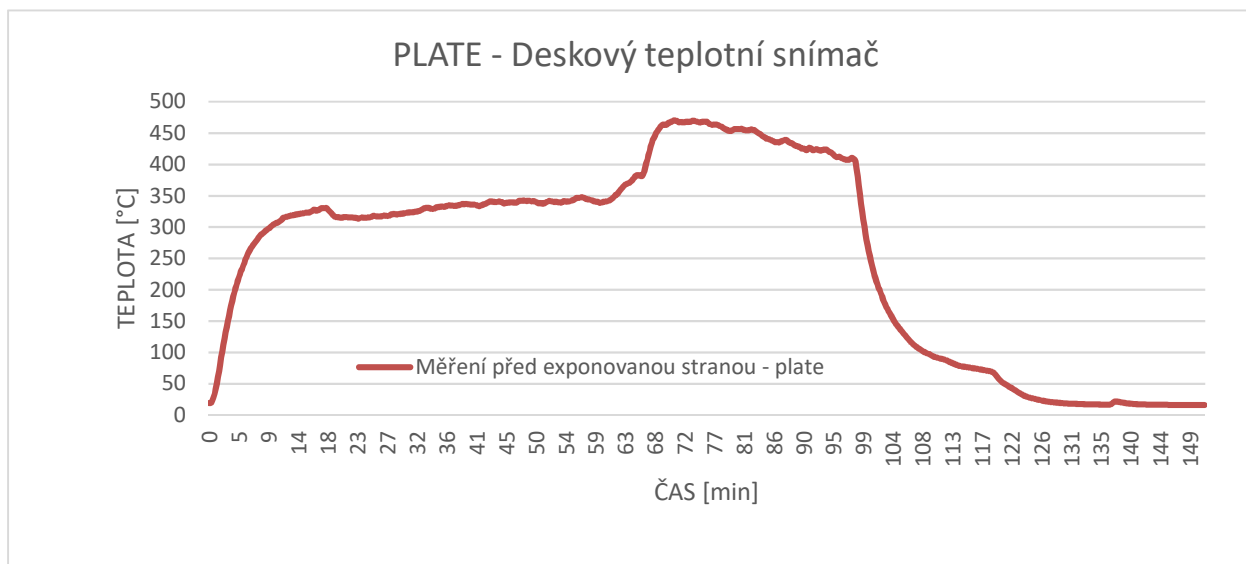


Obrázek 46 – Schéma rozmístění termočlánku

## 5.2.2 Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 1

V této části jsou uváděny jednotlivé zaznamenané hodnoty ze dne měření.

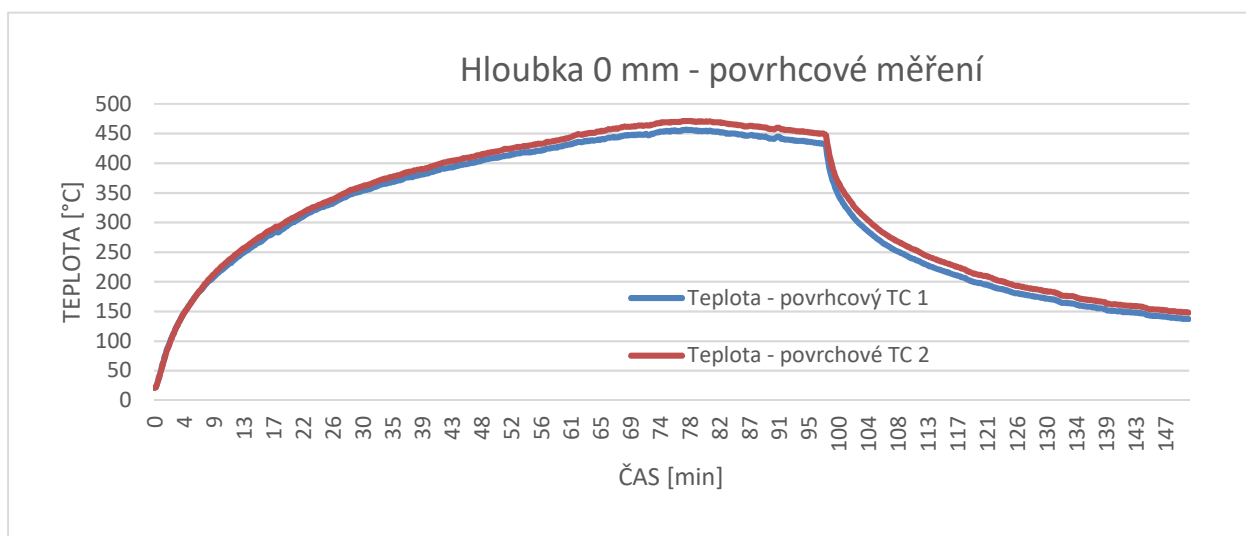
### Deskový teplotní snímač:



Graf 2 – měření pomocí deskového teplotního snímače

Pro měření prostorové teploty před naším vzorkem jsem použil deskový teplotní snímač. Tento snímač bohužel neukazoval přesné hodnoty a v porovnání s hodnotami povrchových teplot vzorku, viz graf níže, byly teploty vždy nižší. Snímač byl vyžralý a hodnota emisivity byla 0,7.

### Hloubka 0 mm - povrchové měření:

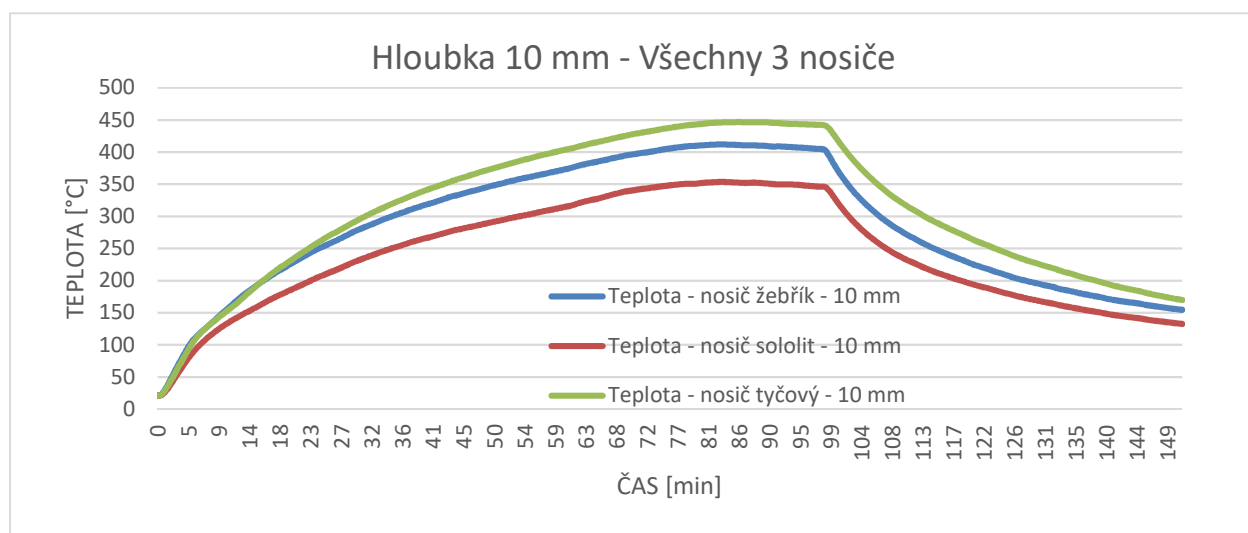


Graf 3 – Hloubka 0 mm – povrchové měření



Oba termočlánky byly již při betonáži přilepeny na dno dřevěné formy. A po odbednění formy zůstaly pevně zabudovány na exponované části. Na červené křivce grafu můžeme sledovat, že se pohybuje vždy výše. Tento jev pravděpodobně nastal z důvodu, že i povrchová čidla byla rozmístěna tak, že jedno bylo výše a druhé níže, viz schéma rozmístění termočlánků při měření na obrázku 46. Teplo stoupalo směrem nahoru, a to je důvodem, že se neukazují úplně stejné hodnoty povrchových teplot. Nejvyšší naměřená teplota dosahovala hodnoty 471 °C u druhého termočlánku byla teplota 456 °C, což je o 15 °C méně a došlo k tomuto stavu v 77. minutě měření. Následně je možné vyčíst z grafu, že probíhalo zahřívání dále, ale teplota se již ustálila a hodnota se udržovala s přibližnou odchylkou 15 °C následujících 18 minut. V 98,5. minutě došlo k odpojení zářiče a nechali jsme vzorek chladnout. Experiment byl ukončen po 150 minutách, kdy teplota povrchu vzorku ukazovala 137 °C pro spodní TC a 148 °C pro vrchní TC. Opět vidíme, že teplotní rozdíl je opravdu minimální.

### **Hloubka 10 mm - průběh vnitřních teplot:**

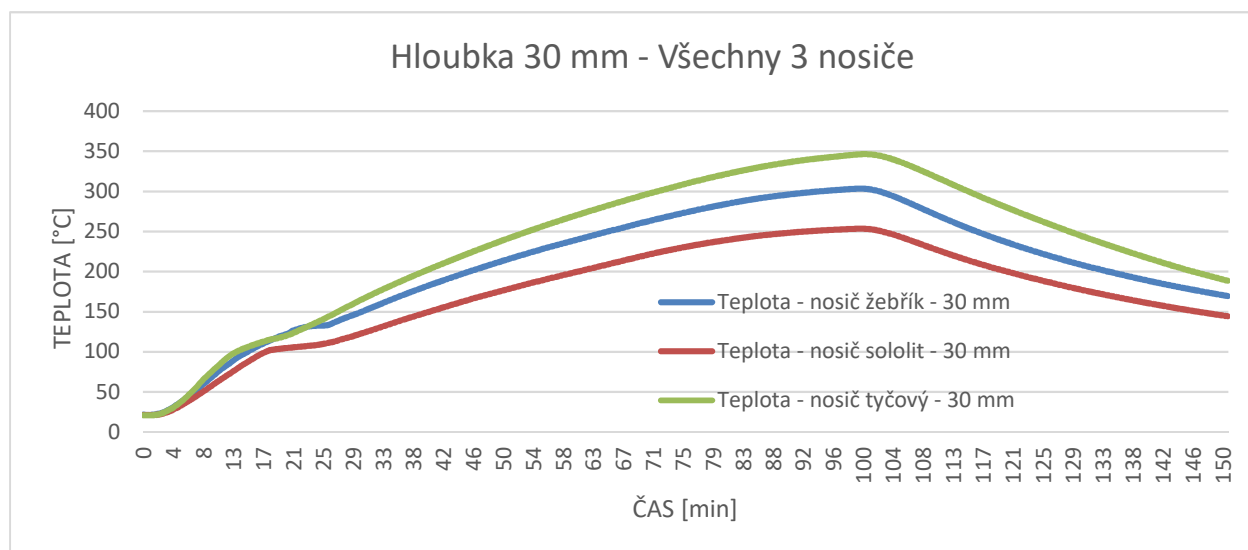


Graf 4 – Hloubka 10 mm – průběh vnitřních teplot

Na grafu 4 jsou zobrazeny naměřené hodnoty pro hloubku 10 mm od exponovaného povrchu. Vidíme zde opět nárůst v první fázi zahřívání. Tato fáze trvala do 86 minuty a v tuto chvíli byla naměřena nejvyšší hodnota, která byla 446 °C, ukazoval ji termočlánek umístěný na nosiči tyčovém ve vrchní části desky. Dále je zde uvedena 13 minut dlouhá ustálená fáze zahřívání, při které již teplota nestoupala, a zároveň byl vzorek dále zahříván a teplota razantně neklesala. Třetí fáze zobrazuje chlazení. Tato část začíná v minutě 98,5. a pokračuje až do závěru zaznamenávání hodnot, tedy do 150. minuty. Nejvyšší rozdíl v teplotě nastal mezi nosičem tyčovým a sololitovým. Důvodem je opět rozmístění, kdy nosič tyčový byl výše než nosič sololitový. Dalším důvodem může být dotyk tyčového sololitu s povrchem exponované strany, kde mohlo být způsobeno vedení tepla ocelovou kulatinou. Rozdíl teplot činil mezi nejvyšší naměřenou hodnotou a nejnižší naměřenou hodnotou v 85. minutě 36 °C, což v porovnání s první testovanou variantou povrchových termočlánků je vyšší rozdíl. Úbytek tepla ze vzorku ve fázi

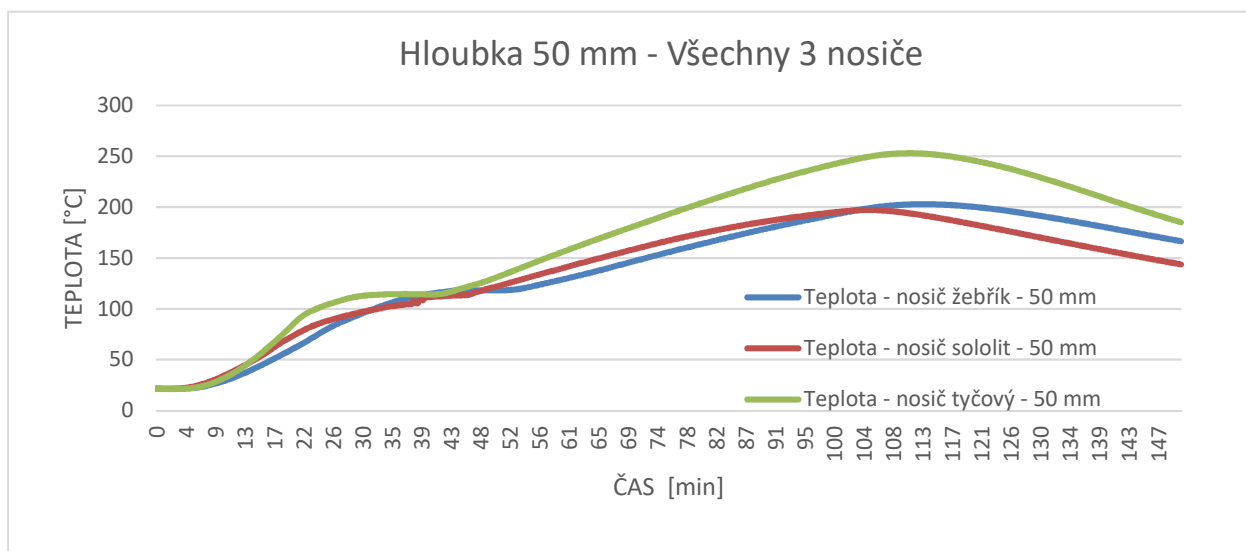
chladnutí byl přibližně stejný, pro všechny 3 měřící čidla. Ve fázi chlazení už docházelo k pozvolnému chlazení.

### **Hloubka 30 mm – průběh vnitřních teplot:**



*Graf 5 – Hloubka 30 mm – průběh vnitřních teplot*

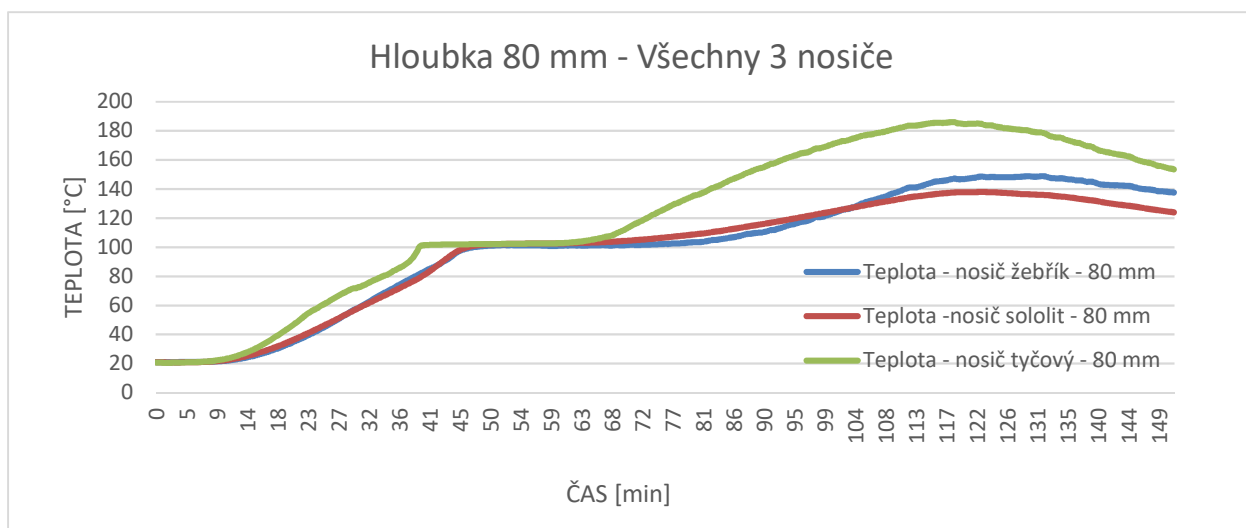
Tento graf znázorňuje naměřené hodnoty pro hloubku 30 mm od zahřívajícího povrchu. Vidíme zde opět nárůst v první fázi zahřívání. Do 30. minuty se jedná o téměř identické zaznamenané hodnoty. Dále již tyčový nosič převyšuje ostatní termočlánky naměřenými hodnotami. Nejvyšší teplota dosahovala hodnoty 347 °C. Tato hodnota byla změřena v době, kdy byl již tepelný zářič odpojen. Na grafu můžeme vidět předávání tepla z vyhřátější přední exponované strany směrem na stranu neexponovanou. První fáze skončila v 101. minutě. Jelikož, už byl zářič odpojen, tak v tomto měření není uvažována druhá ustálená fáze, ale teplota začala rovnou klesat. Zaznamenávání hodnot skončilo ve 150. minutě. Rozdíl teplot činil mezi nejvyšší naměřenou hodnotou a nejnižší naměřenou hodnotou 43 °C, což v porovnání s první testovanou variantou 10 mm, je menší rozdíl a teplotní rozptyl se začal snižovat. Úbytek tepla ze vzorku ve fázi chladnutí byl přibližně stejný pro všechny 3 měřící čidla. Nosič žebříkový je na křivce grafu opět umístěn přibližně ve středu a jeho hodnoty jsou vždy uprostřed mezi rozdíly hodnot zaznamenaných nosičem tyčovým a sololitovým.

**hloubka 50 mm – průběh vnitřních teplot:**

Graf 6 – Hloubka 50 mm – průběh vnitřních teplot

Graf 6 znázorňuje naměřené hodnoty pro hloubku 50 mm od zahřívání povrchu. Vidíme zde opět nárůst v první fázi zahřívání. Teploty se pomalu zvedají a ve chvíli, kdy přibližně v 33. minutě dosáhneme hodnoty 100 °C, tak se teplota drží dalších 23 minut na stejné hodnotě a dochází k maximálnímu úbytku vody ve vzorku. Dále tyčový nosič začal převyšovat ostatní termočlánky měřených hodnot a dalo by se říct, že je zde opravdu vidět razantní nárůst tepla, oproti nosiči sololitovému a nosiči žebříkovému. Ve fázi zahřívání můžeme vidět téměř identické hodnoty pro nosič žebříkový a nosič sololitový. A je zde vidět razantní rozdíl v nejvyšší teplotě oproti tyčovému nosiči, který ukazoval 253 °C a bylo to v době, kdy již byl 12,5 minut (111. minuta) odpojen plynový zářič. V tuto chvíli teplota žebříkového nosiče ukazovala 194 °C a sololitového 203 °C, což je přibližně o 60 nebo 50 °C méně. Tento jev nastal z důvodu předávání tepla z přední části betonu do ocelového drátu. Ta dále transportovala teplo do hloubky 50 mm, a to způsobovalo zvyšování teploty, ačkoliv zářič, který teplo přidával, byl již dávno odpojen. Toto je i důvod proč z grafu a naměřených hodnot lze vyčíst rychlé ukončení předávání tepla sololitovým nosičem, protože tento materiál má nejnižší absorpční schopnost vést teplo. Fáze chlazení nastala nejrychleji u sololitového nosiče, zatímco ostatní ještě zdánlivě udržovaly svou teplotu. Teplota v 50 mm vzorku při ukončení zaznamenávání měřených hodnot ukazovala 185,05 °C pro tyčový nosič, 144 °C pro žebříkový nosič a 125 °C pro sololitový nosič.



**Hloubka 80 mm – průběh vnitřních teplot:**

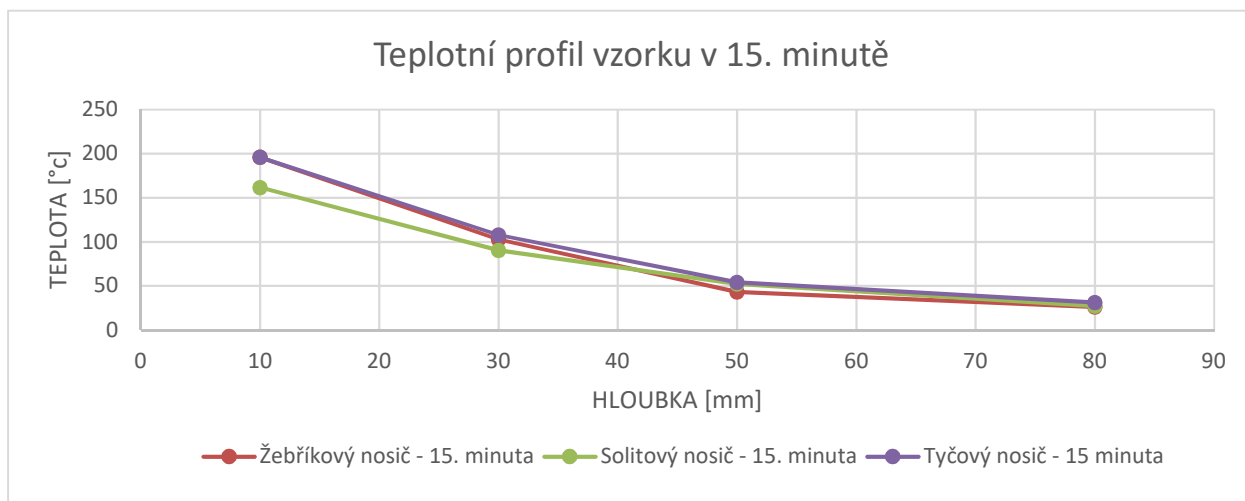
Graf 7 – Hloubka 80 mm – průběh vnitřních teplot

Zde je popsána poslední část zaznamenaných hodnot, a to v hloubce 80 mm od exponovaného povrchu. Zajímavostí tohoto grafu je záznam teploty od 37,5 minuty do 60 minuty. Teplota v této části je ustálena a klesá velmi mírně pouze od 110 °C do 130 °C, tato ustálená fáze je z důvodu vypařování vody v prvku směrem neexponovanou stranou. Vlivem vody teplota nestoupá. Po odpaření největší koncentrace došlo opět k nárůstu. Sololitový a žebříkový nosič opět stoupaly mírně. Tyčový nosič zaznamenal velký teplotní nárůst a spád. Důvodem je opět vedení tepla ocelovými dráty nosiče. Nejvyšší dosažená teplota byla zaznamenána v čase 117 minut (19,5 minuty po odpojení zářiče) a hodnota ukazovala 186 °C, od této chvíle tyčový nosič klesal. Naměřené hodnoty pro sololitový a žebříkový nosič byly přibližně o 40 °C nižší. Fáze chladnutí nastala u žebříkového nosiče déle, a to až v 122 °C s nejvyšší dosaženou hodnotou 149 °C. U sololitového nosiče tato hodnota byla zaznamenána přesně o 10 vteřin déle a termočlánek ukazoval teplotu 138 °C.

### 5.2.3 Průběh teploty po průřezu pro měřený vzorek 1

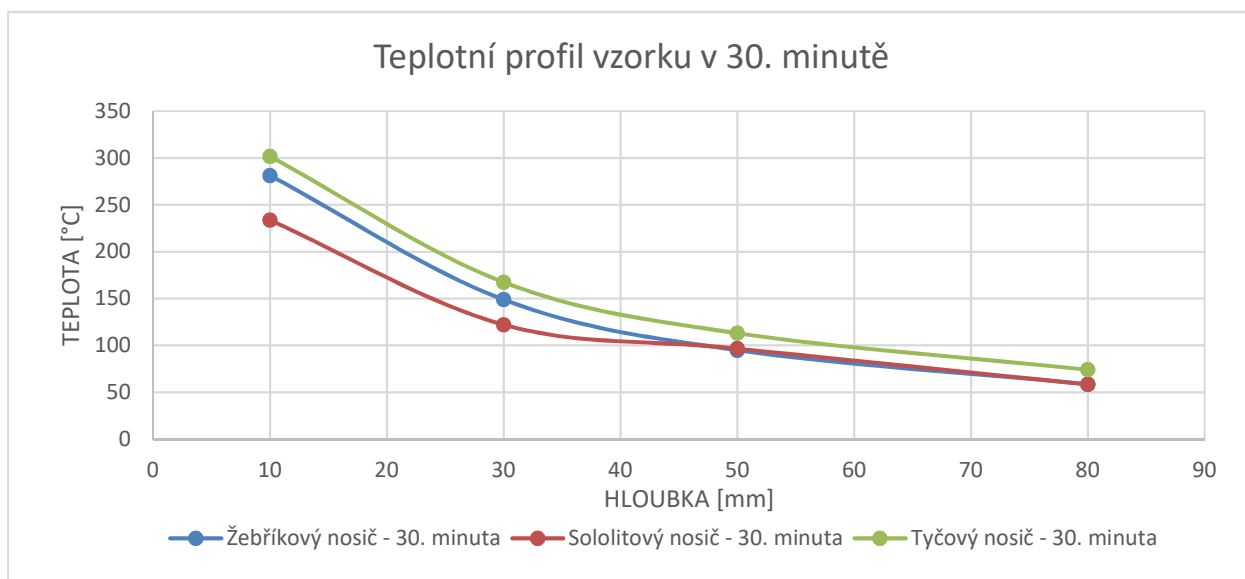
V této části jsou zobrazeny zaznamenané hodnoty teploty v závislosti na průběhu teploty v průřezu vzorku, v jednotlivých časech.

#### Teplotní profil vzorku v 15. minutě:



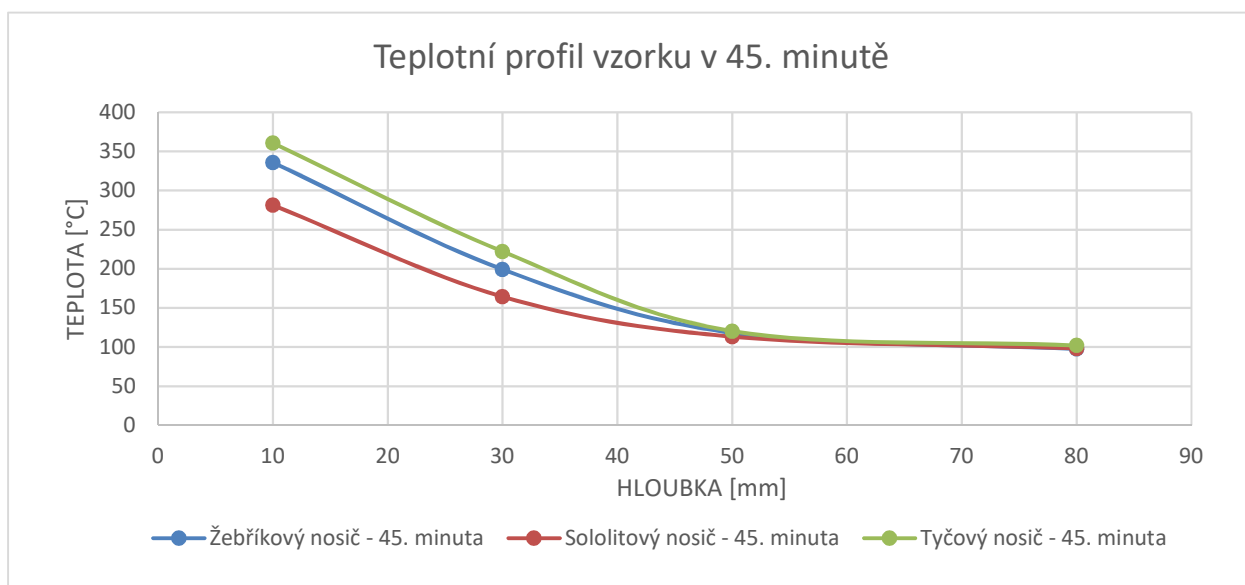
Graf 8 – Teplotní profil vzorku v 15. minutě

Na zobrazeném grafu je vidět průběh teplot pro jednotlivé termočláňkové nosiče v 15. minutě měření. Je zde vidět přestup tepla konstrukcí, kdy nejvyšší naměřené teploty jsou v 10 mm, a dále postupně teploty klesají. Jedná se o fázi zahřívání. Teploty se v jednotlivých částech téměř shodují, jedinou odchylkou je sololitový nosič, který se v hloubce 30 mm přiblíží svou teplotou ostatním a dále se jedná o shodné teploty v směrodatné odchylce  $\pm 10$  °C. Shodnost měřené teploty prokazuje i změřená hodnota, která v hloubce 10 mm ukazuje 196,67 °C pro tyčový nosič a 195,93 °C pro sololitový nosič, tudíž rozdíl 0,74 °C. V hloubce 30 mm je dosažená naměřená hodnota mezi nejvyšší a nejnižší teplotou v rozdílu 18 °C. Pro hloubku v 50 mm je hodnota teplot téměř stejná a rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší je 11 °C. V hloubce 80 mm má teplota nejnižší rozdíl, a to pro tyčový nosič byla změřena teplota 31 °C, pro žebříkový nosič byla změřena teplota 26 °C a 27 °C pro nosič sololitový. Závěrem lze z tohoto grafu vyčíst, že průběh teplot po průřezu ukazuje menší teplotní rozptyl s přibývajícím vzdáleností od ohříváňého povrchu.

**Teplotní profil vzorku v 30. minutě:**

Graf 9 – Teplotní profil vzorku v 30. minutě

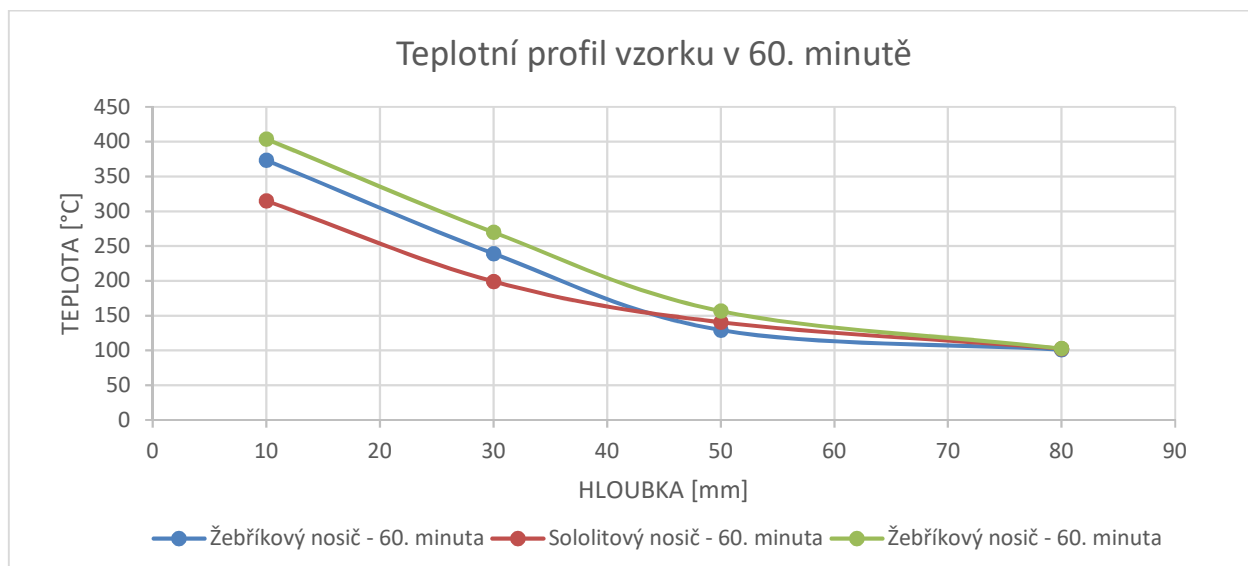
Na zobrazeném grafu je vidět průběh teplot pro jednotlivé termočláňkové nosiče v 30. minutě měření. Můžeme vidět, že 30. minuta není stále dostačující pro prohřátí vzorku, tudíž teplotní spád mezi 10. a 30. mm je relativně dost vysoký. Zatímco tyčový nosič v 10 mm dosahoval teploty 297 °C, v hloubce 30 mm to bylo 164 °C, což je 134 °C rozdíl. Pro žebříkový nosič byla hodnota teploty v hloubce 10 mm 281 °C a teplota v 30 mm byla 149 °C, což je 132 °C rozdíl. Pro sololitový nosič byl pokles teplot o 111 °C. Důvodem tohoto masivního poklesu teplot byl začátek vypařování velkého množství vázané vody. A vzorek ještě nebyl dostatečně zahřátý.

**Teplotní profil vzorku v 45. minutě:**

Graf 10 – Teplotní profil vzorku v 45. minutě

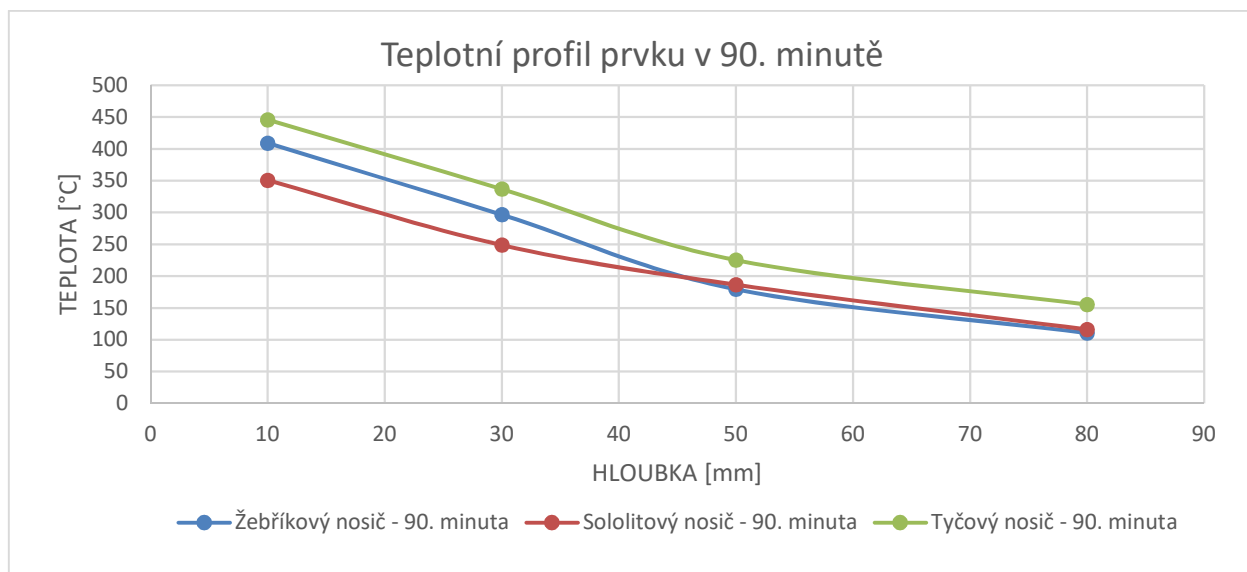
Na zobrazeném grafu je vidět průběh teplot pro jednotlivé termočláňkové nosiče v 45. minutě měření. Vzorek už začíná být téměř celý prohřátý a teplotní spád se ustálí až teprve v hloubce 50 mm. Jak bylo zmíněno výše, je to dáno dobou, kdy docházelo k nejvyššímu úbytku vlhkosti ze vzorku. Voda dokázala ochlazovat teplotu ve vzorku. Tato doba byla od 30. minuty do 65. minuty. Od předchozího grafu je vidět rozdíl v prohřátí, kdy v minutě 30. se jednalo o 30 mm a nyní už 50 mm. Nejvyšší dosaženou teplotu měl opět termočlánek na tyčovém nosiči, který dosahoval teploty 360,68 °C. Nejnižší teplotu měl nosič sololitový 281,34 °C, což je o 73,34 °C méně. V 30 mm už byly teploty s menším rozdílem. Tento rozdíl mezi tyčovým a sololitovým nosičem byl 58 °C. V hloubce 50 mm už byl rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší změřenou teplotou 7 °C.

### **Teplotní profil vzorku v 60. minutě:**



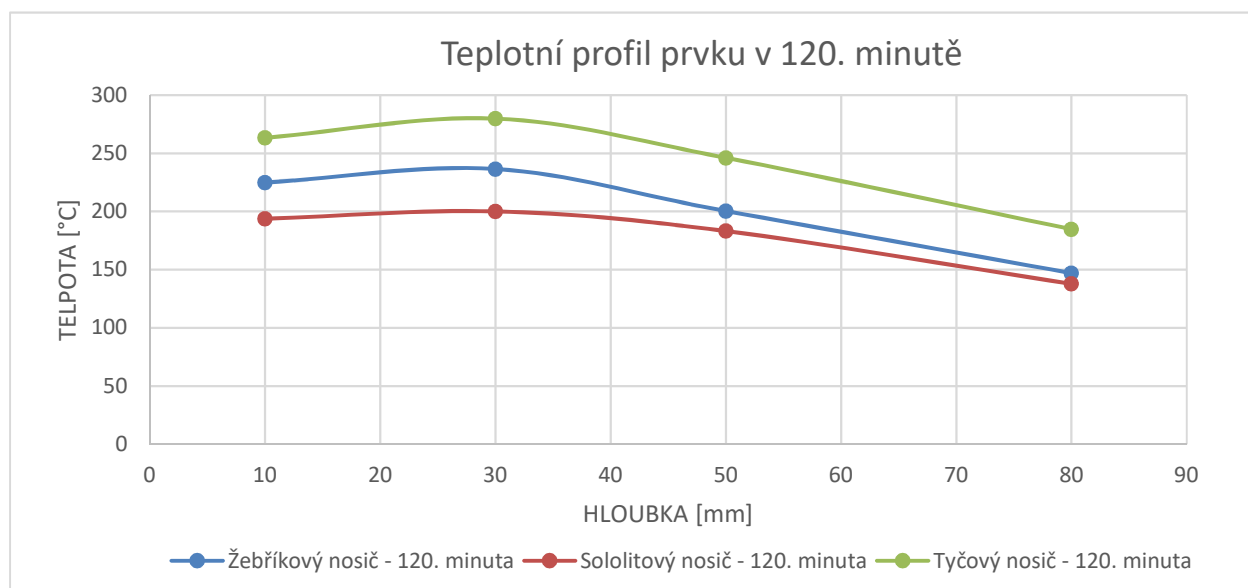
*Graf 11 – Teplotní profil vzorku v 60. minutě*

Graf teplotního profilu vzorku v 60. minutě zobrazuje průběh teplot po tloušťce vzorku. Teplotní spád mezi 10. a 50. mm pro tyčový nosič je 247 °C, pro žebříkový nosič 244 °C, pro sololitový nosič 174 °C. Nejmenší teplotní spád má právě sololitový nosič, žebříkový se od tyčového dělí o pouhé 3 °C. Rozdíl teplot v hloubce 50 mm mezi jednotlivými nosiči je vyšší než v případě předchozím, protože se jedná o delší dobu zahřívání, ale rozdíl je opět nepatrný v předchozím případě to bylo 7 °C a v tomto případě se jedná o 27 °C.

**Teplotní profil vzorku v 90. minutě:**

Graf 12 – Teplotní profil vzorku v 90. minutě

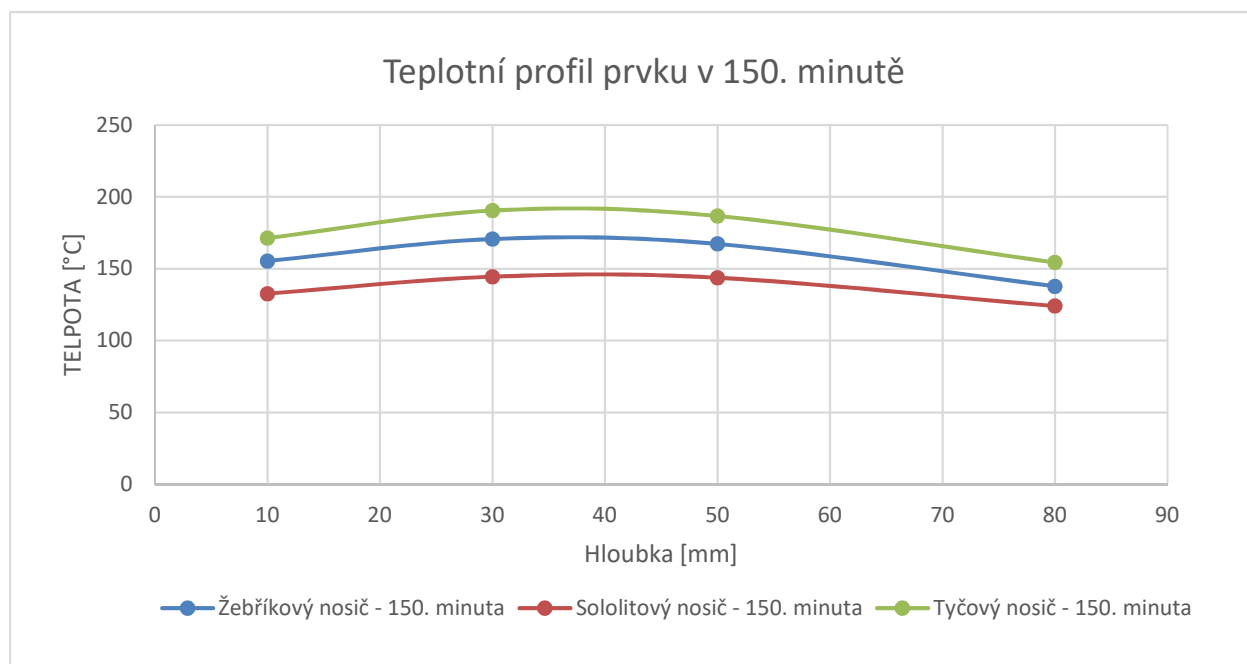
Poslední zaznamenaný profil v době, kdy probíhalo ohřívání betonové desky. Na tomto grafu je nejlépe zobrazen teplotní spád po průřezu betonového vzorku. Teplotní spád je rovnoměrně klesající. Lze tedy považovat betonovou desku jako dostatečně prohřátou. Průběhy teplot na jednotlivých nosičích tvoří téměř rovnoběžné úsečky, které mají přesné vzdálenosti teplot v jednotlivých bodech. Jednotlivé rozdíly teplot mezi nejvyšší naměřenou a nejnižší naměřenou hodnotou pro hloubky 10, 30, 50, 80 mm jsou 95 °C, 88 °C, 46 °C, 45 °C. K nejvyššímu teplotnímu spádu dochází mezi hloubkou 30 a 50 mm, tudíž uprostřed betonové desky.

**Teplotní profil vzorku v 120. minutě:**

Graf 13 – Teplotní profil vzorku v 120. minutě

Jedná se o fázi, kdy byl již 22,5 minuty odpojený plynový zářič a docházelo k pouze pozvolnému chladnutí. Graf velmi pěkně zobrazuje, že nejvyšší měřená teplota je aktuálně uprostřed betonové desky. Teplotní spád je v tuto dobu poměrně malý. Nejvyšší teploty se drží na hodnotě 30 mm od exponované strany.

### Teplotní profil vzorku v 150. minutě:



*Graf 14 – Teplotní profil vzorku v 150. minutě*

Zde je zobrazen poslední zaznamenaný profil v době, kdy probíhala fáze chlazení betonové desky. Rychlost chlazení byla dána okolními vlivy, jako je vítr a samotná teplota v den měření. Na tomto grafu je zobrazen teplotní spád po průřezu betonového vzorku. Rozdíly v měřených teplotách mezi jednotlivými nosiči jsou téměř stejné. Pro 10 mm, 30 mm, 50 mm, 80 mm jsou to hodnoty rozdílů 38 °C, 45 °C, 42 °C, 30 °C. I po 52. minutě chlazení byla teplota betonové desky uprostřed vzorku stále 190 °C pro tyčový nosič. Z grafu lze vyčíst, že první chladly obě strany, jak exponovaná, tak neexponovaná, a ve středu se drželo akumulované teplo.

### 5.3 Vzorek číslo 2

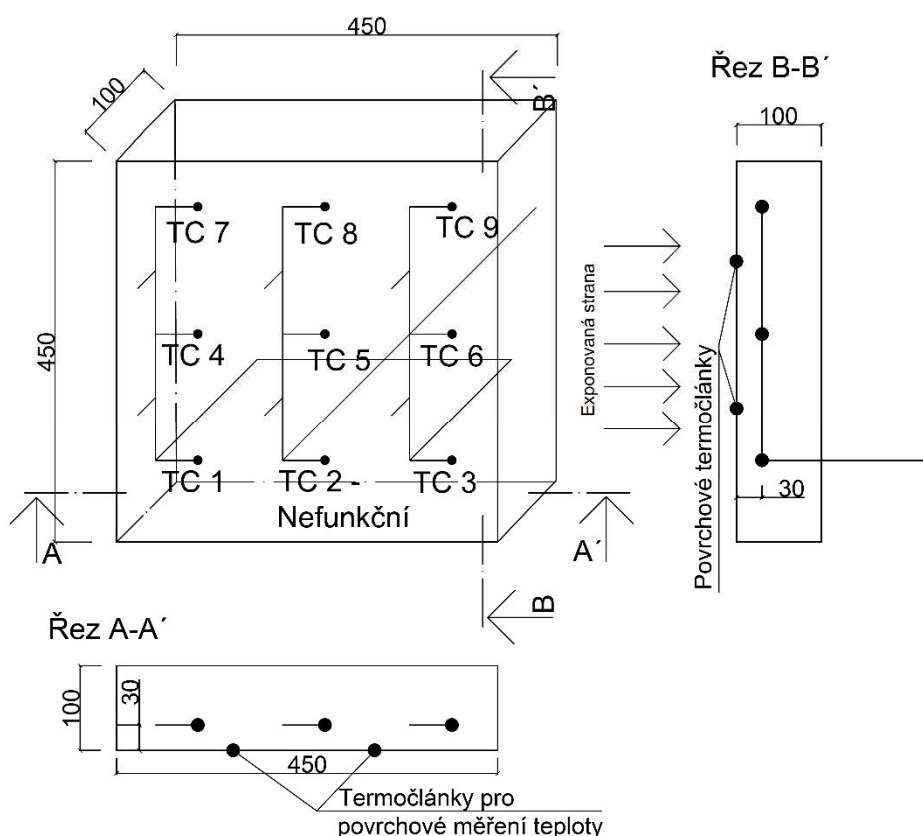
Doba měření a zaznamenávání dat probíhala 78,5 minuty. Měření se rozděluje do dvou fází, v první fázi probíhalo zahřívání plynovým zářičem, a to po dobu 43 minut a ve fázi druhé, kdy byl vzorek pozvolna ochlazován okolní teplotou a jejími vlivy (vítr) po čas 35,5 minuty. Jsou zde umístěny výsledky měření teploty v její ploše a jednotlivé vyhodnocení. V této kapitole jsou porovnávány grafy závislosti teploty na čase, zvláště pro každou hloubku a jednotlivé nosiče. Jsou zde zobrazeny grafy závislosti teploty měřené hloubky v jednotlivých časech. Nejvyšší teplotní hodnota byly zaznamenány na termočlánek umístěném na povrchu vzorku. Hodnota teploty dosahoval termočlánek nazvaný TC 8, dle schématu, tedy prostřední vrchní a bylo to 236,71 °C. Toto bylo naměřeno v 43. minutě experimentu. Po dosažení této teploty skončila první fáze a vzorek byl už pouze volně ochlazován. Při tomto měření neprobíhalo vážení vzorku, ten byl podložen do výšky spodní hrany zářiče na betonových kvádrech. Ačkoliv během zahřívání bylo dosaženo teploty, přes 400 °C, což by teoreticky mělo způsobovat odprýskávání betonu, viz bod 2.1 této práce. Kvůli přidaným vláknům Krampe Harex, k odprýskávání nedošlo.



Obrázek 47 – Vzorek číslo 2 pro určení plošné teploty v prvku

### 5.3.1 Schéma umístění betonového vzorku při měření

Vzorek jsme při měření umístili na cihelnou tvárnici. O rozměrech 247 x 300 x 249 mm, a to tak, že 300 mm strana byla na ležato, tedy výška od země byla 30 cm. Termočlánky ve vzorku byly rozmístěny vždy v hloubce 30 mm od exponovaného povrchu. Každý termočlánek byl vycentrován ke středu tak, že od svého nejbližšího kraje měl 7,5 cm vzdálenost. Dohromady bylo rozmístěno 9 termočláneků. 3 řady po 3 termočláncích. 2 termočlánky jsme umístili do bedněni pro měření povrchových teplot. Před prvek jsme umístili deskový teplotní snímač. Viz obrázek 48 - schéma rozmístění termočláneků.



Obrázek 48 – schéma rozmístění termočláneků ve vzorku 2



### 5.3.2 Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 2

V této části jsou uváděny jednotlivé zaznamenané hodnoty ze dne měření.

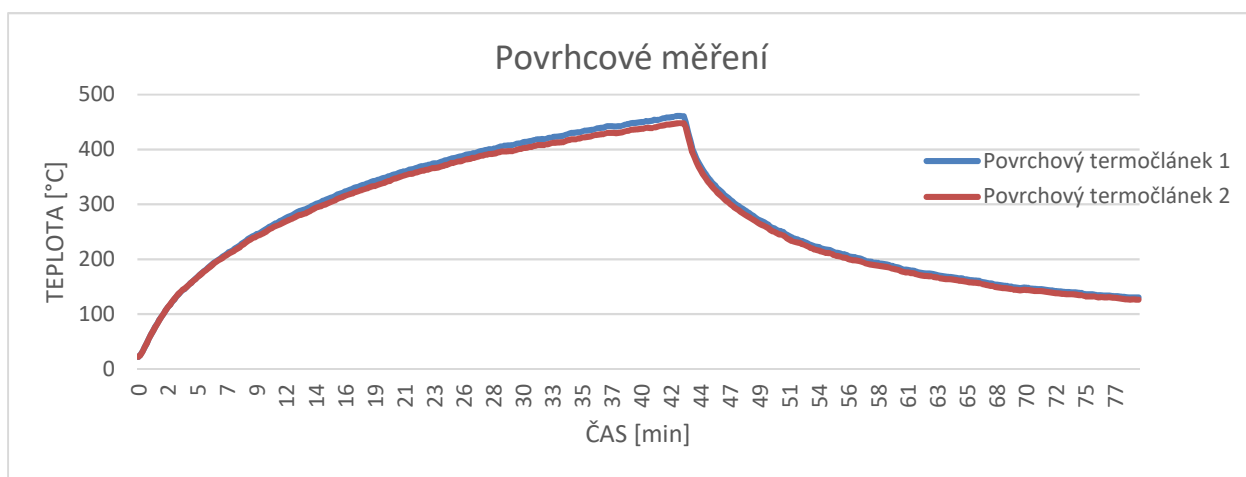
#### Deskový teplotní snímač:



Graf 15 – Měření pomocí deskového teplotního snímače

Pro měření prostorové teploty před naším vzorkem jsem použil deskový teplotní snímač. Tento snímač na rozdíl od předchozího vzorku ukazoval přesné hodnoty a v porovnání s hodnotami povrchových teplot vzorku, viz graf níže, byly teploty vždy vyšší. Snímač byl vyžralý a hodnota emisivity byla 0,7. Za zmínku stojí nejvyšší naměřená teplota na jeho povrchu a to bylo 514 °C.

#### Hloubka 0 mm - povrchové měření:

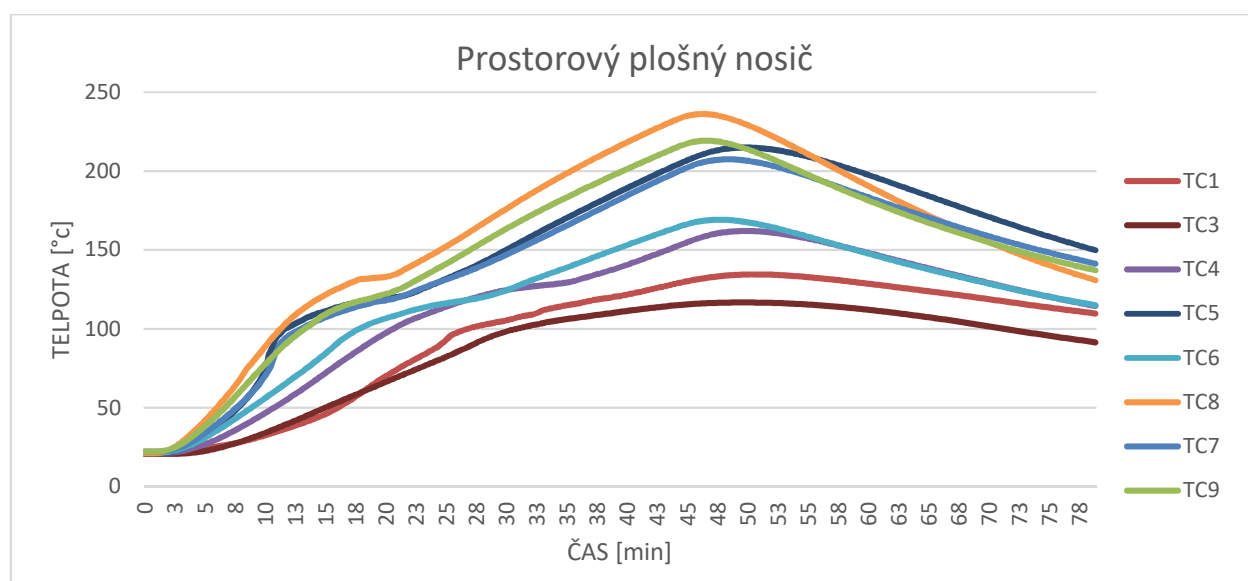


Graf 16 – Povrchové měření

Oba termočlánky byly již při betonáži přilepeny na dno dřevěné formy. A po odbednění formy zůstaly pevně zabudovány na exponované části. Na modré křivce grafu můžeme sledovat, že se pohybuje vždy výše. Je to ovšem naprosto zanedbatelný rozdíl, jedná se o rozdíl v nejvyšším

bodě o 12 °C. Nejvyšší naměřená teplota povrchu exponované strany vzorku měla hodnotu 461 °C u druhého termočlánku to bylo 449 °C a oproti minulému měření jsme se nedostali do fáze, kdy by už teplota nestoupala, ale pouze by se udržovala. Je tedy patrné, že k tomuto jevu došlo v momentě těsně před odpojením plynového zářiče. Samotný experiment pak byl ukončen po 78. minutě a teplota povrchu vzorku ukazovala 126 °C. Teploty byly téměř stejné, rozdíl mezi nimi byl přibližně 4-5 °C. Vidíme tedy, že jednotlivé výsledky měření jsou téměř stejné se zanedbatelným rozdílem.

### **Hloubka 30 mm – průběh vnitřních teplot – plošné měření:**



*Graf 17 – Jednotlivé teploty termočlánků – prostorový plošný nosič*

Na tomto grafu je znázorněn průběh plošného měření teplot při zahřívání 30 kilowattovým zářičem Kaspo. Termočlánky a jejich jednotlivé rozmístění je popsáno v začátku této kapitoly na obrázku schéma 48. Termočlánky jsou řazeny ze spodního levého rohu, a to vždy zleva doprava a ze spodu nahoru. Termočlánky 1-3 jsou umístěny v řadě první, 4-6 v řadě druhé a 7-9 v řadě třetí. Termočlánek 2 uprostřed ve spodní řadě nebyl funkční, ani po výměně připojovacího konektoru se nepodařilo jeho zprovoznění. Při měření tedy zaznamenávalo pouze 8 termočlánků. Nejvyšší naměřená hodnota byla zaznamenána ve vrchní řadě v prostřední pozici – 236 °C. Měření je rozděleno do dvou částí. V první části probíhá zahřívání vzorku, tato část trvala 43 minut a celkový čas měření byl 78 minut. Na grafu je zřetelně vidět rozmístění termočlánků. Tedy TC 1 a 3 jsou umístěny v rozích ve spodní řadě. TC 4 a 6 jsou po bocích druhé řady. TC 5 je umístěn uprostřed druhé řady a zároveň uprostřed celého vzorku, nejsou zde dosaženy nejvyšší teploty, ale ve fázi chlazení můžeme vidět nejvyšší teplotu, z důvodu nejpomalejšího úniku tepla právě z prostředka. TC 7 a 9 jsou umístěny ve vrchní řadě, kde je nejvyšší teplota, neboť teplo uniká nahoru. TC 8 je umístěn uprostřed ve vrchní řadě, kde byla změřena nejvyšší teplota. Rozdíl mezi změřenou nejvyšší a nejnižší teplotou činil 120 °C.

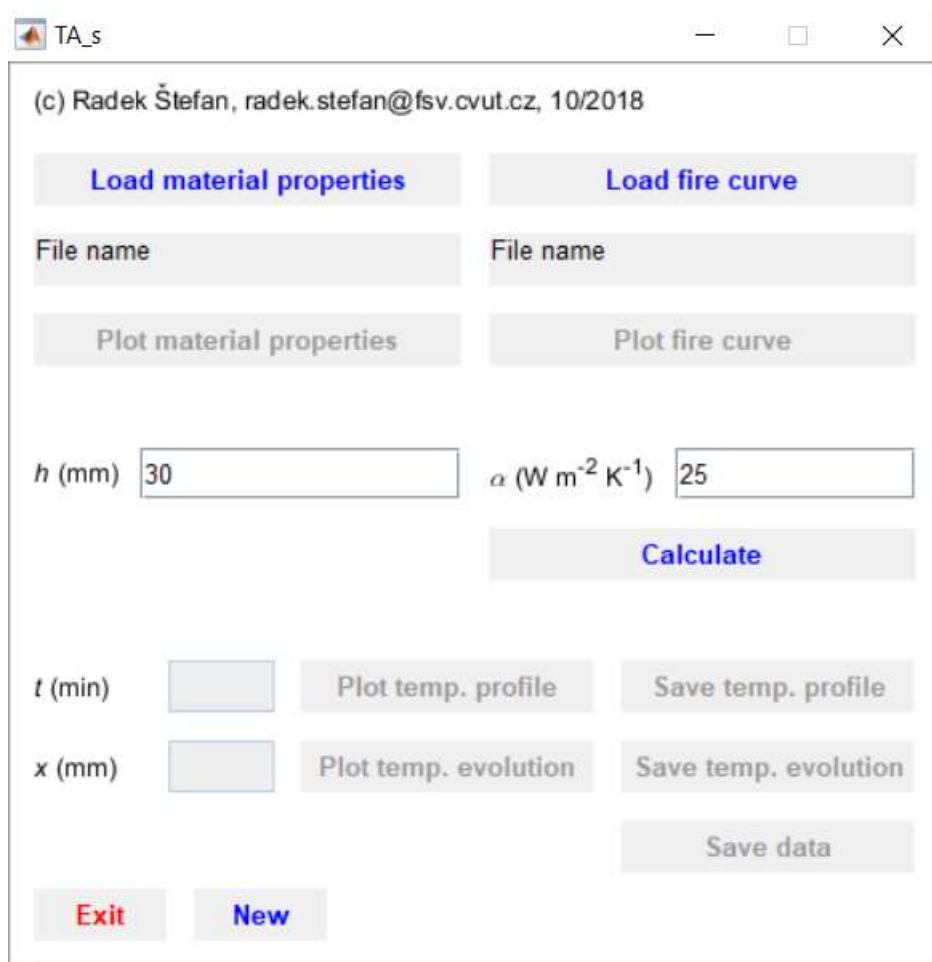
## 5.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

V této kapitole se dostáváme k samotnému vyhodnocení výsledků jako celku, tedy zhodnocení experimentu a jeho provedení. Při přípravě vzorků na měření nám bylo ukázáno hned několik potenciálních problémů, které mohou ovlivňovat měření samotné. Mezi tyto problémy řadím zaizolování vzorku proti úniku tepla. Určitě by bylo vhodné, kdyby mohl vzorek být přikryt ze všech stran. Znamenalo by to zajištění nehořlavého materiálu povrchu bočnic, aby je naakumulované teplo nezapálilo. Na vrchní část by bylo vhodné použít stejný materiál, tedy minerální vlákno, avšak ve větším množství, a vytvořit lehké průduchy nebo spáry. Pro příští účely měření bych zajistil váhu s požární odolností, aby bylo možné odečítat hmotnost a zjišťovat tak další veličinu společně s teplotou, tedy vlhkost. Důležitý faktor pro nosiče termočlánků jako takové je, aby nosiče samotné se nestýkaly v přímé linii s navazujícími termočlánky. Tak jak tomu bylo v případě nosiče tyčového, který pak dále způsoboval a ukazoval vyšší měřené hodnoty, než tomu bylo u ostatních. Nejlépe je to pak vidět na grafu číslo 7. V hloubce 80 mm, kdy všechny nosiče si drží stejnou teplotu kolem 100 °C v 60. minutě, se následně nejrychleji prohřeje část, kde je umístěn termočlánek na tyčovém nosiči. Důvodem je právě předávání tepla vedením pomocí ocelového drátu nosiče, který se dotýká exponovaného povrchu. Zatímco sololitový a žebříkový nosič této teploty dosáhne přibližně ve 100. minutě, tyčový nosič této teploty dosáhl o 35 minut dříve. Toto je tedy jedinou hlavní podmínkou pro výrobu nosičů termočlánků, aby nebyl nosič ve styku s povrchem ohříváné strany v případě řešení 1D úloh. Všechny fáze chladnutí měly podobný tvar sklonu, lze je tedy hodnotit jako podařené a opět můžeme konstatovat jejich neovlivnitelnost nosiči termočlánků. Myslím, že experiment lze hodnotit jako provedený správně, neboť všechny použité termočlánky ukazovaly hodnoty, které lze považovat za reálné. Naopak můžeme říct, že je zde prokazatelná možnost odchylek v měření viz kapitola 3.3.1. nebo 3.3.2., s kterými musíme počítat pro další použití hodnot. V obou případech lze vidět, téměř naprostou schodu použitých povrchových termočlánků, rozptyl těchto měřených hodnot nebyl v žádnou chvíli měření vyšší než 10 °C. Na teplotních profilech vzorku lze snadno vyčíst, v jaké době probíhalo největší odpařování vody, tedy při teplotě 100 °C, která byla od 30. do 60. minuty. U prostorového plošného nosiče, bylo cílem měřit podobné hodnoty s minimální odchylkou na jednotlivých bodech ve stejné hloubce. Toto se podařilo pouze částečně, vzorek lze rozdělit do několika částí, a to na části, které byly na okrajích ve spodní řadě, části na bocích v prostřední řadě, hodnota uprostřed a vrchní řada. Myšleno po průřezu prvku. V tomto sledu byly naměřeny i jednotlivé hodnoty, tedy nejvyšší byly ve vrchní řadě, kde bylo naakumulováno největší množství tepla, dále uprostřed vzorku a následně po bocích a ve spodní řadě. Toto potvrzuje možnost použití tohoto nosiče, avšak nabádá k lepšímu zaizolování vzorku.

## 6 Porovnání naměřených výsledků programem TempAnalysis

### 6.1 Obecné údaje o programu, vstupní hodnoty

Pro vyhodnocení, respektive porovnání výsledků experimentálního měření jsme použili program TempAnalysis. Tento program je volně dostupný. Jeho autorem je Radek Štefan (08/2018) – vedoucí této diplomové práce. Program je naprogramován v softwaru Matlab. Nám poslouží pro porovnání výsledků. Je ideální ke zjištění jednotlivých teplot za předpokladu, že známe materiálové vlastnosti a křivku zahřívání. Dále se hodí k řešení 1D úloh. Tento program počítá s teplotním krokem 20 sekund, náš experiment počítal s krokem zaznamenávání teploty 10 sekund. Pro použití tohoto programu je třeba znát pár základních vstupů. Je nutné zadat materiálové vlastnosti, teplotní křivku požáru (zahřívání), tloušťku vzorku a součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . [20]



Obrázek 49 – Rozhraní uživatelského prostředí programu TempAnalysis

#### **Načtení excelového dokumentu s materiálovými vlastnostmi:**

Ve výpočetním programu se načítají 4 základní údaje. V prvním sloupci je teplota v [°C], která ukazuje provázanost s dalšími veličinami, jako je vodivost [W/mK], kapacita [J/kgK], objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>] ve zbylých třech sloupcích. Zbylé tři vstupy můžeme ovlivňovat. Je

možné počítat s vodivostí, nebo bez ní. Vstupy výpočtů pro kapacitu jsou vlhkost, která ovlivňuje dále hodnotu tzv. peak kapacity. Procenta vlhkosti jsou možné volit od 0 % do 10 %. Z důvodu, že současně s psaním této práce probíhá analýza vlhkosti ve vzorku, tak víme, že tato hodnota odpovídá 4,5 %, což reálně po několika úpravách v zadávání materiálových vlastností reálně sedí a dále odpovídá naměřeným hodnotám. Posledním ovlivňujícím parametrem, při výpočtu teploty v jednotlivých částech vzorku je objemová hmotnost, v našem případě je tato hodnota nastavena na 2 500 Kg/m<sup>3</sup>, jedná se o beton běžných vlastností.

#### **Načtení excelového dokumentu s hodnotami požární křivky:**

Použijeme hodnoty, které jsme zaznamenali při prvním měření. V potaz budeme brát hodnoty naměřené povrchovým čidlem umístěním na exponované straně. Vzhledem k tomu, že máme dvě a jedno ukazovalo mírně vyšší hodnoty, použijeme ho tedy. Při výpočtu se teplota pro daný čas v uvedeném rozsahu interpoluje, mimo uvedený rozsah se uvažují krajní hodnoty (neextrapoluje se).

#### **Součinitel přestupu tepla $1/\alpha$ (W/ m<sup>2</sup>K):**

Standardně se tento přepis pro normovou křivku uvažuje jako 25, pro parametrickou křivku 35 nebo pro uhlovodíkovou 50 (EN 1991-1-2). V našem případě použijeme tzv. Dirichletovskou podmínku, která nám říká, že lze simulovat předepsanou teplotu na hranici pomocí velké hodnoty  $\alpha = 10^7$  W/m<sup>2</sup>K.

#### **Tloušťka řešeného vzorku:**

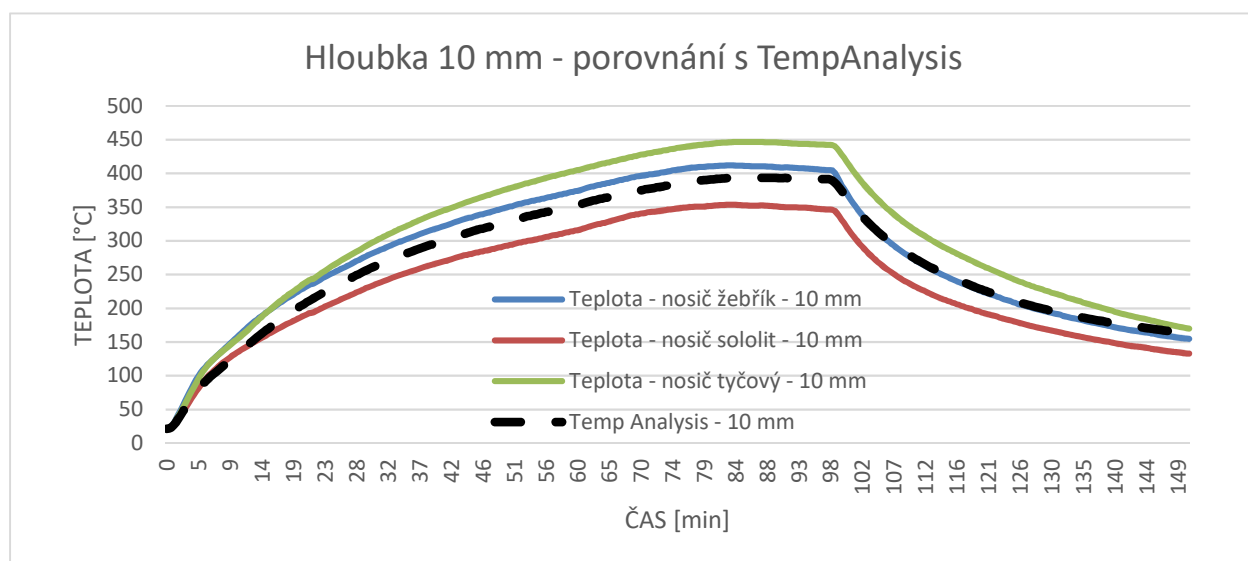
Poslední potřebnou hodnotou pro vypočtení našeho vzorku je tloušťka samotná. Hodnota se zadává v mm. V našem případě bude zadána hodnota  $h = 100$  mm.

## 6.2 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami spočtenými vzorek 1

V této kapitole jsou popsány jednotlivé grafy porovnání naměřených dat s daty s počtením programem Temp Analysis.

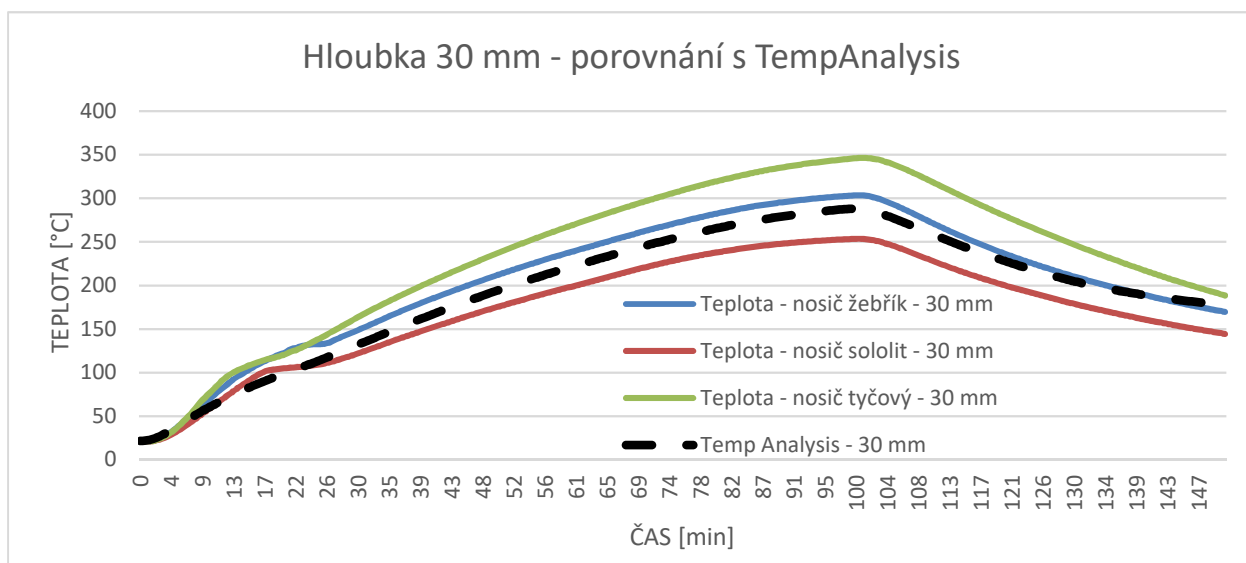
### 6.2.1 Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 1

#### Hloubka 10 mm – porovnání s TempAnalysis:



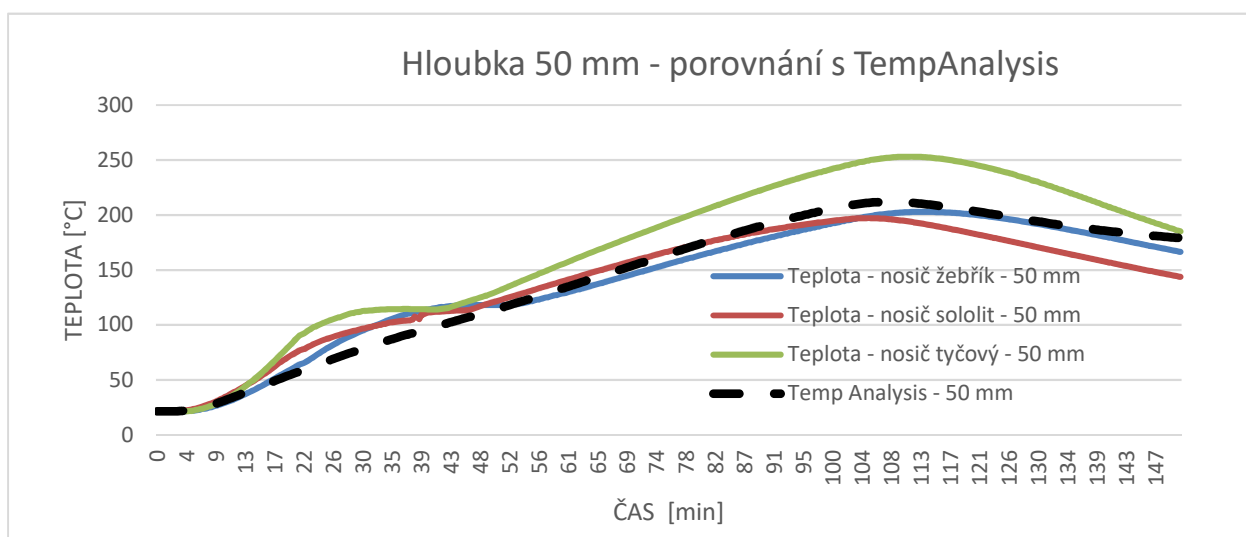
Graf 18 – Hloubka 10 mm – porovnání s TempAnalysis

Tento graf zobrazuje hloubku 10 mm, jsou zde zobrazeny naměřené hodnoty a hodnoty spočtené programem TempAnalysis. Je zde vidět ustálená fáze, tak jako při měření na školním dvoře. Tato fáze trvala stejně jako při experimentu přibližně 15 minut. Nejvyšší dosažená hodnota zůstala těsně pod hranicí 400 °C. Fáze chladnutí je téměř identická, jako v případě změření pomocí žebříkového nosiče, stejně jako hodnotou spočtenou programem TempAnalysis. Zároveň je i vidět stejná strmost křivky, jako u termočláňkových čidel.

**Hloubka 30 mm – porovnání s TempAnalysis:**

Graf 19 – Hloubka 30 mm – porovnání s TempAnalysis

Ověření správného počítání matematického programu lze brát v potaz, že nejvyšší naměřená hodnota byla rovněž po odpojení tepelného zářiče v 98,5 minutě. Tato hodnota byla rovněž vypočtena programem. Tyčový nosič ukazuje nejvyšší naměřené hodnoty a sololitový naopak ukazuje opět méně. Tedy nejvíce kvalitní hodnoty jsou hodnoty měřené termočlánkovým čidlem neseným žebříkovým nosičem. Prostřední ustálená fáze zde už není. Fáze chladnutí odpovídá směru sklonu ostatním křivkám, s výjimkou posledních 20 minut, kdy je chladnutí pozvolnější, ale tento fakt byl nejspíše způsoben foukajícím chladným větrem, který program neuvažuje.

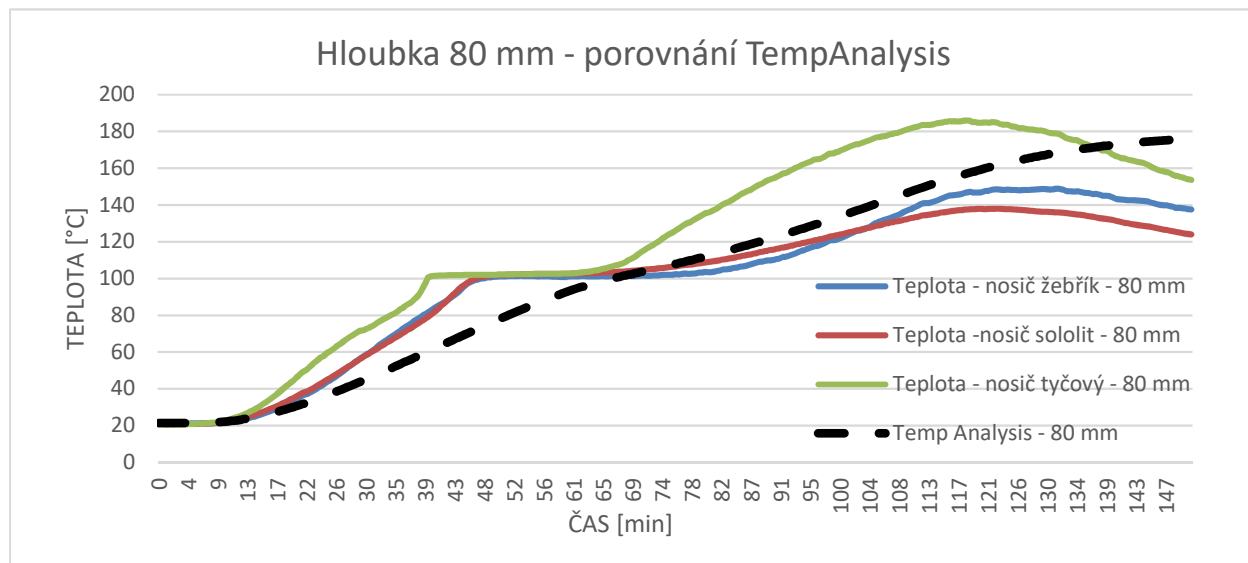
**Hloubka 50 mm – porovnání s TempAnalysis:**

Graf 20 – Hloubka 50 mm – porovnání s TempAnalysis

Na tomto grafu jsou vidět zatím, pravděpodobně největší rozdíly oproti programu. První viditelný problém nastává od 25. minuty do 43. Zde docházelo k masivní odpařování vlhkosti

v betonu. A nejdříve teplota ve vzorku stoupla a následně zůstala po dobu vypařování ustálena, zatímco program tento jev zanedbal. Dále už graf pokračuje ve stejném stoupajícím sklonu, jako tomu bylo změřeno termočlánky na jednotlivých nosičích. Výjimkou opět zůstává tyčový nosič, který zaznamenal o 50 °C vyšší hodnoty. Nejvyšší naměřené hodnoty v TempAnalysis se oproti těm změřeným na sololitovém a žebříkovém nosiči liší o pouhých 15 °C. Fáze chladnutí probíhala opět pozvolněji, stejně tak jako v předchozím případě u hloubky 30 mm.

### **Hloubka 80 mm – porovnání s TempAnalysis:**



Graf 21 – Hloubka 80 mm – porovnání s TempAnalysis

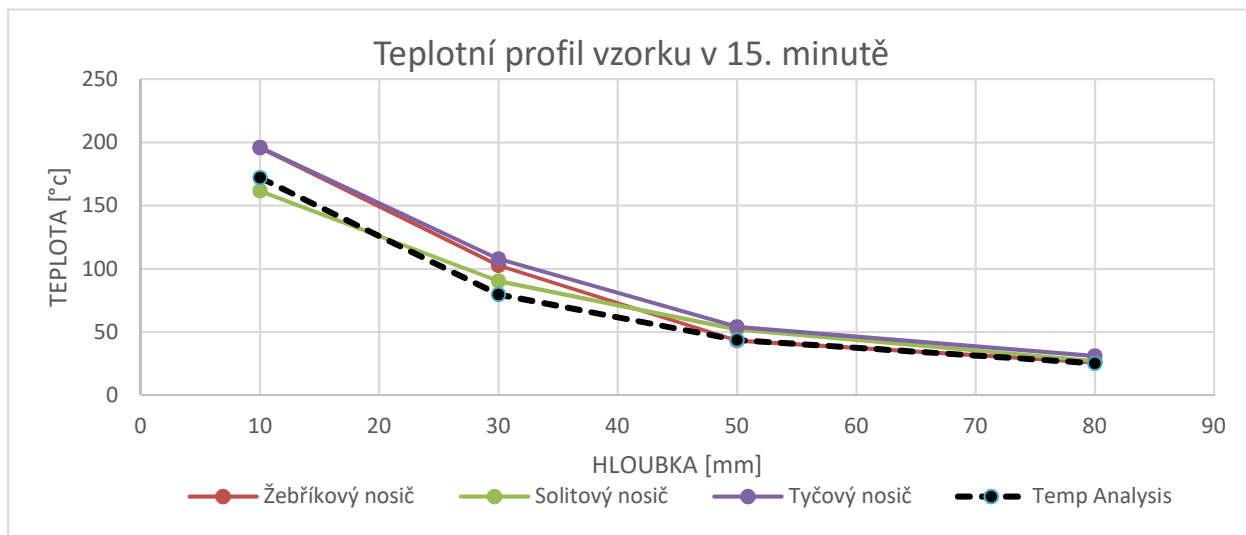
V zobrazení tohoto grafu je vidět několik důležitých bodů, které se opravdu liší od matematického modelu. První věcí, která je nutná zmínit, je část od 13. do 30. minuty. Teplota při zkoušce stoupla podstatně rychleji, než je počítáno v matematickém modelu. Dále ve chvíli, kdy začala dosahovat 100 °C, způsobila masivní vypařování vázané vody, která dokázala udržovat teplotu kolem 100 °C v hloubce 80 mm od exponované strany. Fáze masivního vypařování vody probíhala v době od 35. minuty do 60. minuty. S tímto faktem matematický model nepočítá. Program uvažuje vypařování zjednodušeně skokem v kapacitě. Proto se dá říci, že teplota téměř lineárně stoupá. A po dosažení 100 °C, se mění sklon křivky, který je dále nižší, avšak stoupá, až do konce měření, tedy opět v modelu není uvažováno s ochlazováním desky. Teplo je sice stále přejímáno z vnitřku betonové desky, ale tím, že se blíží neexponované straně více než vnitřku, tak by teplota měla klesat a být nižší, jako tomu je u nosiče sololitového a žebříkového. Křivka TempAnalysisu se odlišuje kvůli tomu, že je programováno s okrajovými podmínkami, jako s ideálně z izolovanými, proto je zde dále přejímáno teplo a teplota stoupá.



## 6.2.2 Průběh teploty po průřezu pro měřený vzorek 1

V této části jsou zobrazeny zaznamenané hodnoty teploty v závislosti na průběhu teploty v průřezu vzorku, v jednotlivých časech.

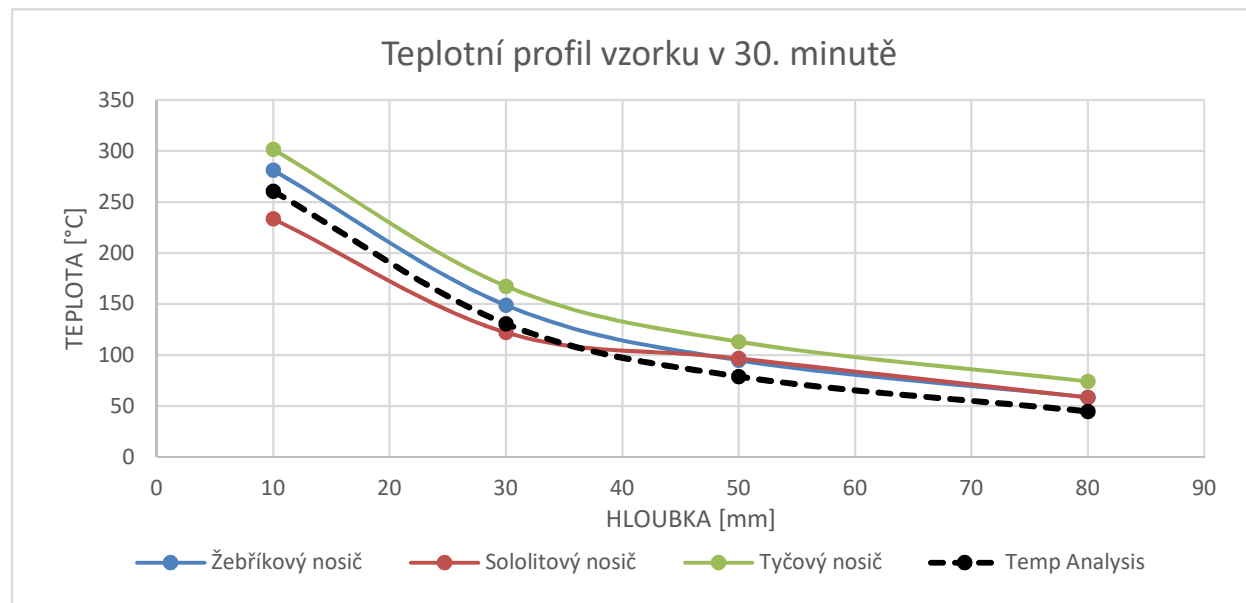
### Teplotní profil vzorku v 15. minutě:



Graf 22 – Teplotní profil vzorku v 15. minutě

Průběh teplot po průřezu ukazuje velikou podobnost měřených hodnot, na přestupu z 10 mm na 30 mm můžeme pozorovat razantnější pokles teploty než u ostatních měřených nosičů. Hodnoty jsou jinak téměř stejné a směrodatná odchylka je malá.

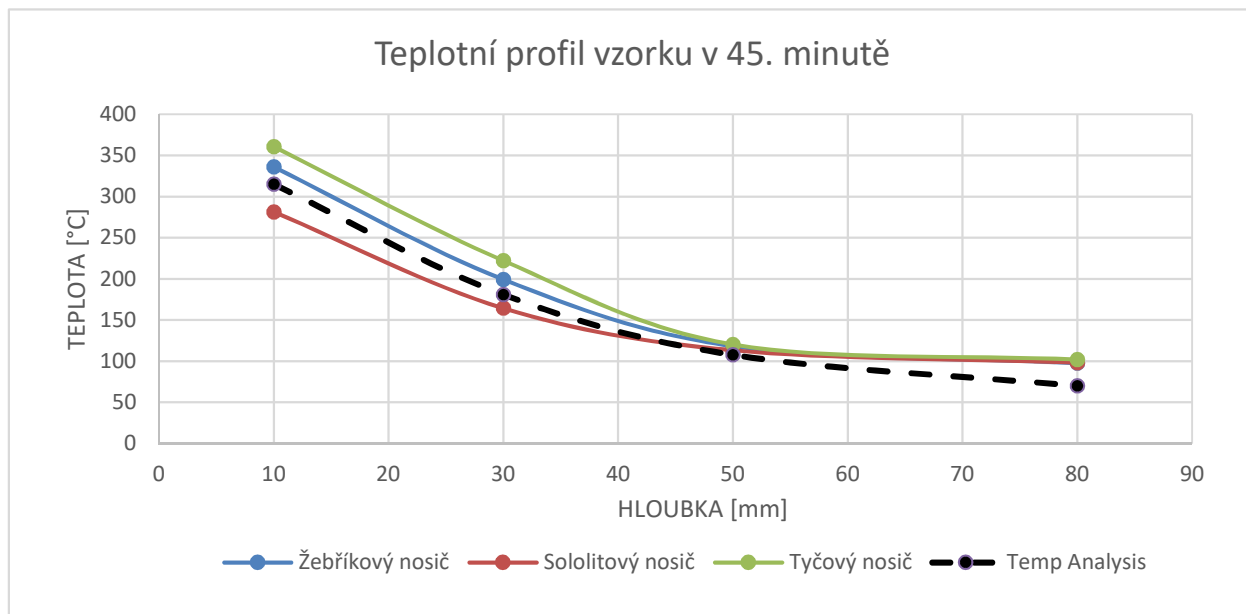
### Teplotní profil vzorku v 30. minutě:



Graf 23 – Teplotní profil vzorku v 30. minutě

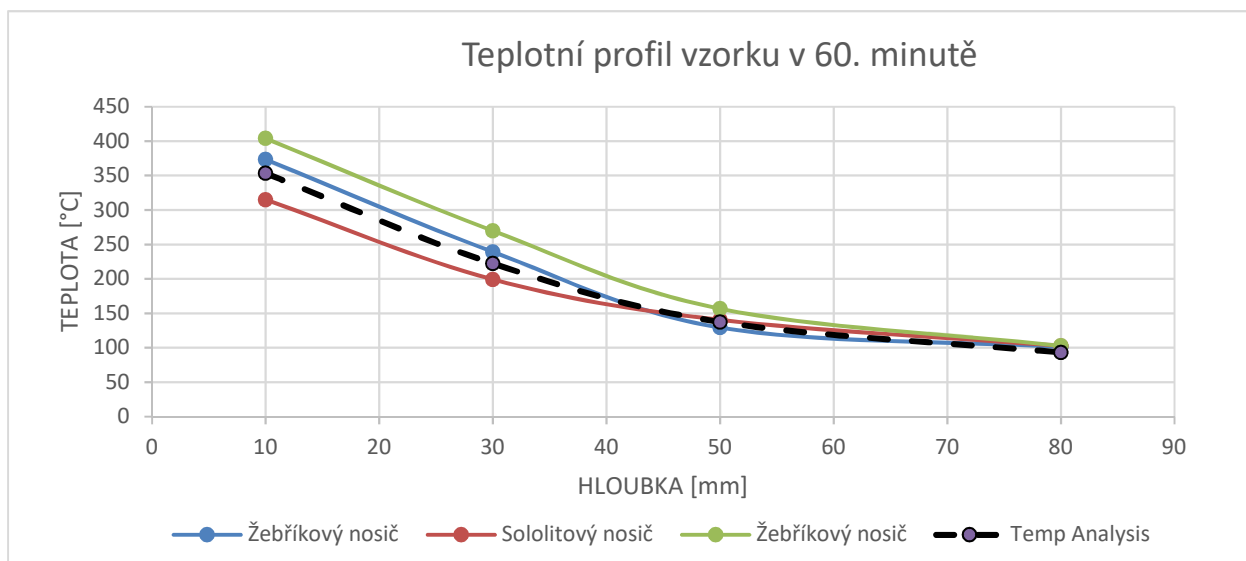
Jednotlivé křivky průběhu teplot po průřezu se dají označit, jako naprosto identické. Pouze s odskokem teplotního profilu, kdy rozdíl mezi tyčovým a žebříkovým nosičem je 25 °C a rozdíl mezi tyčovým a početním programem TempAnalysis je 50 °C. Tento rozdíl se postupně na jednotlivých hloubkách mění a mírně se hodnoty s přibývající hloubkou přibližují.

### Teplotní profil vzorku v 45. minutě:



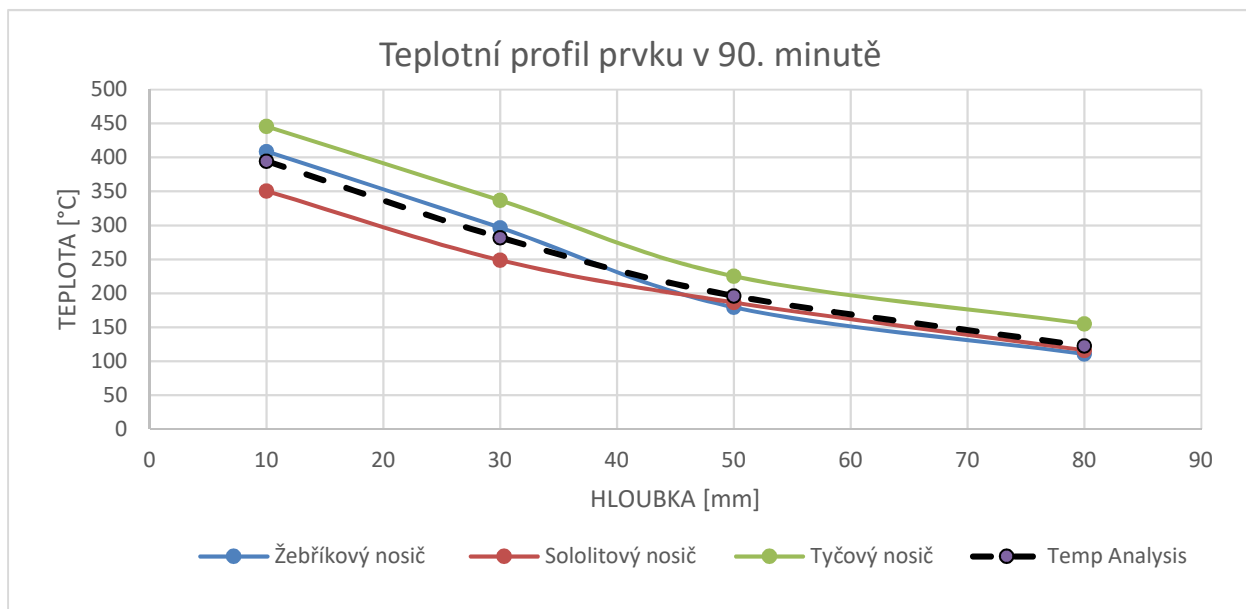
Graf 24 – Teplotní profil vzorku v 45. minutě

Zde můžeme vidět největší úbytek vázané vody v prvku. Početní model ukazuje téměř identické hodnoty jako jsou hodnoty změřené. Tedy průběh křivky grafu má shodný sklon a hodnoty se shodují v hloubce 50 mm, dále však matematický model počítá s vyšším ochlazením. Tedy v modelu je vidět klesající teplota, zatímco u hodnot měřených jednotlivé křivky kopírují limitní hodnotu 100 °C, při které právě dochází k vypařování vody. Teplotní rozdíl je přibližně 30 °C v hloubce 80 mm, zatímco termočlánky ukazují shodně teplotu okolo 100 °C ± 3 °C, tak matematický model říká, že teplota v této hloubce je 75 °C.

**Teplotní profil vzorku v 60. minutě:**

Graf 25 – Teplotní profil vzorku v 60. minutě

Teploty jsou opět ustálené a mají stejný průběh jako v předchozím případě. Křivky mají stejnou tendenci klesání a prolínají se v hloubce 50 mm, kdy se hodnoty přiblíží jako v předchozím případě. Dále je už klesání velmi pomalé, to opět znamená, že se ještě uvolňovalo velké množství vody. Až tato voda vymizí, bude profil strmější a rychleji klesat. Na rozdíl od předchozího případu je teplota v hloubce 80 mm téměř stejná.

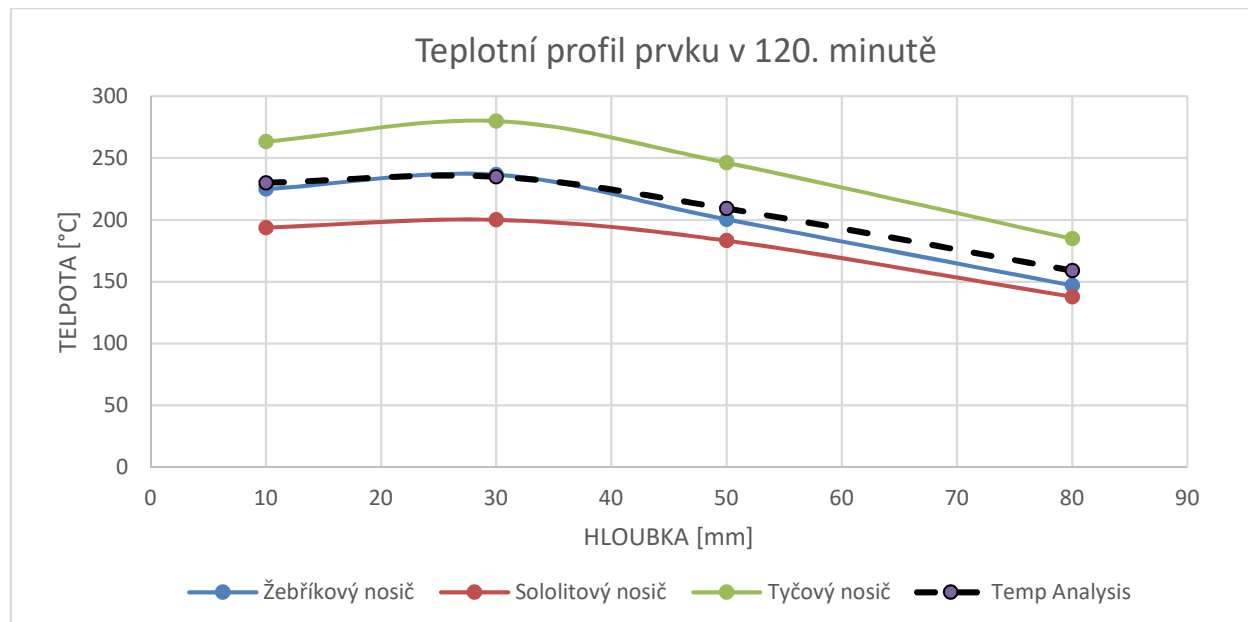
**Teplotní profil vzorku v 90. minutě:**

Graf 26 – Teplotní profil vzorku v 90. minutě

Na tomto grafu lze vidět, že průběh teplot je podobný. Dochází k většímu prohřívání betonové desky. Teploty v 10 mm jsou velmi podobné. Vzorek se prohřívá více, proto z hloubky

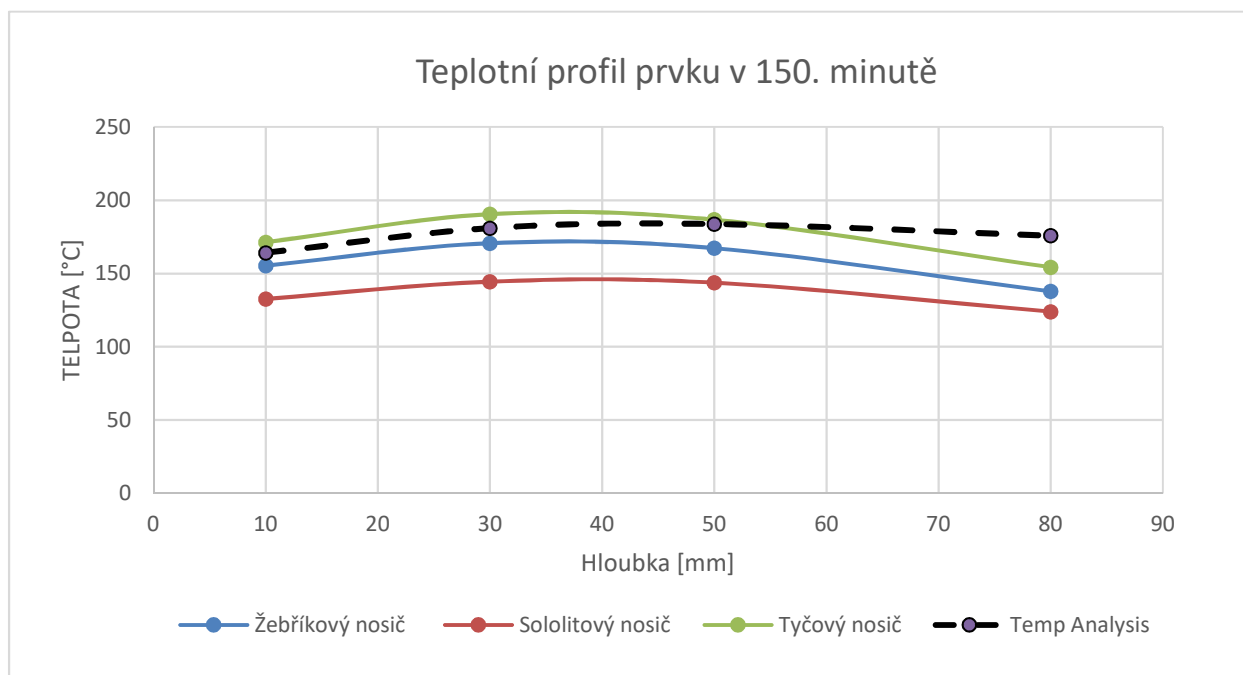
50 mm do hloubky 80 mm vidíme větší rozdíl než v předchozích případech. Vypařená voda nyní už neochlazuje průběh teplot po průřezu.

### Teplotní profil vzorku v 120. minutě:



Graf 27 – Teplotní profil vzorku v 120. minutě

Fáze chladnutí ve 120. minutě ukazuje jednotlivé zaznamenané hodnoty po průřezu. Vypočtená hodnota ukazuje téměř identické hodnoty, jako tomu je u žebříkového nosiče. Nejvyšší hodnoty jsou v hloubce 30 mm od exponovaného povrchu, s tím souvisí, že ve chvíli chladnutí naakumulovaný prostředek betonového vzorku dokáže předávat teplotu do okolních prostředí, a to nejvíce do 10 mm a dále do hloubky 50 mm. Křivka chladnutí z hloubky 30 mm má téměř identický sklon jako ostatní. V hloubce 80 mm, můžeme vidět už přibližování, kdy se hodnoty blíží ke stejnému bodu.

**Teplotní profil vzorku v 150. minutě:**

Graf 28 – Teplotní profil vzorku v 150. minutě

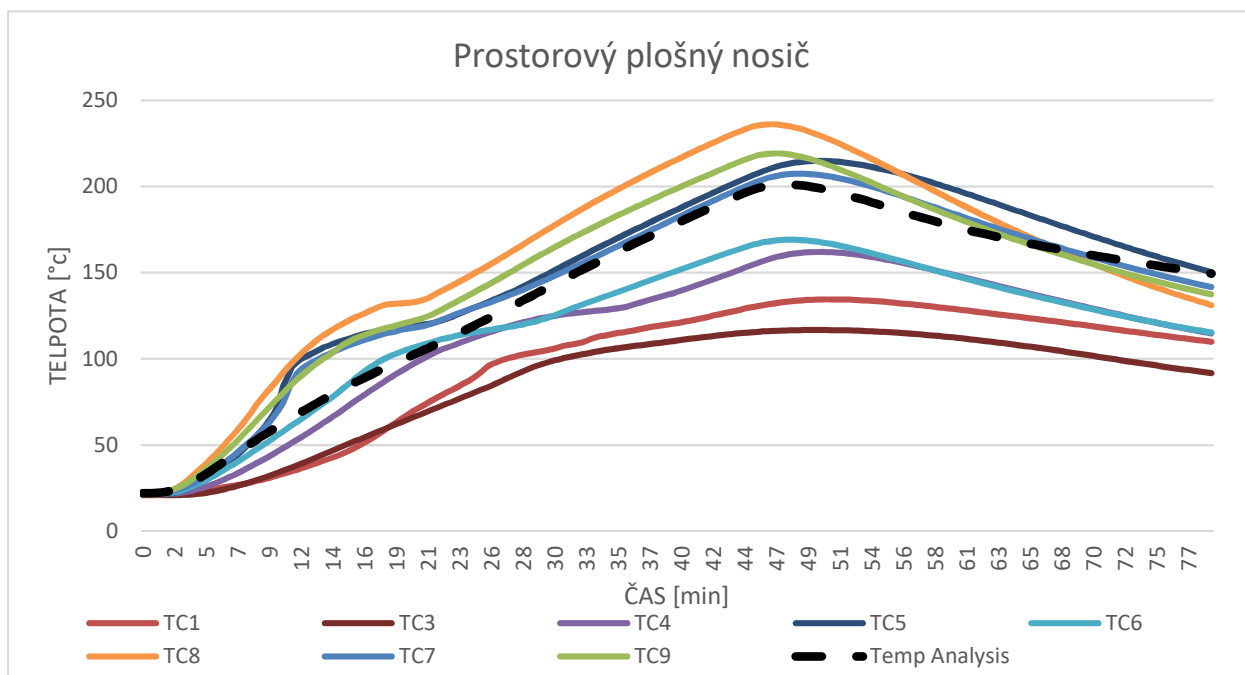
Posledním zaznamenávaným profilem bylo měření ve 150. minutě. Zde opět můžeme vidět přibližně podobnou rychlost chladnutí v jednotlivých průřezech, krom posledního v 80 mm, zde má matematický model tendenci zvedat teplotu, ačkoliv teplo už nemá odkud brát. Teplotní rozptyl v jednotlivých hloubkách, mimo hloubky 80 mm je téměř stejný. Opět vidíme u matematického modelu podstatně pomalejší fázi chladnutí, jak bylo zmíněno výše jedná se o nastavení programu, jehož okrajové podmínky počítají s tím, že na neexponované straně je nastavena dokonalá izolace a teplo nikam neuniká.

## 6.3 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami spočtenými vzorek 2

V této kapitole jsou popsány jednotlivé grafy porovnání naměřených dat s hodnotami získanými programem Temp Analysis. Je zde porovnán vývoj teploty v závislosti na čase.

### 6.3.1 Vývoj teploty v závislosti na čase pro měřený vzorek 2

#### Hloubka 30 mm – průběh vnitřních teplot – plošné měření:



Graf 29 – Prostorový plošný nosič

Jak již bylo zmíněno v článku výše, zobrazované křivky na grafu ukazují jednotlivé teploty v průběhu betonové desky. Všechny termočlánky zaznamenávají hloubku měření 30 mm. Můžeme vidět, že termočlánky umístěné ve spodní části vzorku tedy TC1 a TC3 ukazují nejnižší hodnoty. Krajní termočlánky v druhé řadě TC4 a TC6 ukazují rovněž nižší hodnoty. Dále se dostáváme ke křivce matematického modelu, která se téměř shoduje s křivkou, která byla zaznamenána, jako úplný střed betonové desky. Zde je pouze rozdíl ve fázi chladnutí, kdy prostřední termočlánek má razantnější fázi chladnutí než matematický model, ale ten v závěru vychládá pomaleji, zatímco termočlánek rychleji. Nejvýraznější teplotní rozdíl je zaznamenán ve chvíli odpojení zářiče od provozu. Termočlánek umístěný ve vrchní vrstvě ukazoval teplotu kolem 230 °C a matematický model dosáhl hodnoty lehce přes 200 °C ± 5 °C.

## 6.4 Vyhodnocení porovnání v programu TempAnalysis s experimentálním měřením

Cílem této kapitoly bylo porovnat a validovat naměřené hodnoty a zjistit, jak daleko se náš experiment liší od validovaného programu. Na všech grafech můžeme vidět, že vypočtená hodnota je přibližně stejná jako ta naměřená, resp. křivka strmosti zahřívání a následného chladnutí je většinou stejná. Jediný problém nastává v chladnutí, a to až v poslední fázi. Důvodem je, že program je naprogramován tak, že uvažuje okrajovou podmínku ideálně zaizolovaného konce prvku. To je důvod, proč teplota na grafu teplotního profilu ve 150. minutě neklesá, ale zůstává stejná. Největší odchylka vznikala na grafu pro hloubku 80 mm, tady v porovnání s ostatními křivkami vidíme značnou odchylku. Jinak zde opět můžeme konstatovat, že hodnoty jsou správné a měření probíhalo v pořádku a hodnoty jsou v souladu s naměřenými. Můžeme konstatovat, že čím blíže exponovanému povrchu se blížíme, tím lepší výsledky, resp. podobné hodnoty získáváme z matematického modelu. Matematický model neukazuje nejpřesněji fázi, kdy dochází k vypařování vázané vody neexponovanou stranou, ale zobrazuje dobře dobu, kdy toto období vypařování vody skončí a pokračuje standartní zahřívání vzorku a zvyšování teploty samotné.

## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo sepsání problematiky měření teploty betonu vystaveném vysokým teplotám. Popsání stavu poznání, tedy jaké jsou v dnešní době možnosti měření teploty za vysokých teplot uvnitř prvku. Vytvoření experimentálního vzorku včetně vlastního návrhu fixačních zařízení. Provedení experimentu. Vyhodnocení naměřených výsledků. A v závěru ověření naměřených hodnot s programem, který je validován na tento typ úloh.

V teoretické části se tato práce zaměřuje na to, jaké jsou možnosti měření teploty za zvýšených teplot. Je zde detailně rozebrán elektrický termočlánek, který se pro toto měření používá, zároveň je zde i detailně rozebrán princip jeho fungování. Dle dalších kapitol se dozvídáme možnosti použití a volba termočlátku právě pro typ prostředí nebo případné rozmezí teplot k použití měření. Jsou zde popsány i principy použitelnosti a rozmístění termočládků v deskách malých a velkých rozměrů a dále pak u nosíkových konstrukcí.

Jak již bylo zmíněno výše, práce se ze začátku zabývala vlastním návrhem dvou vzorků, které mohou posloužit k experimentálnímu měření. Jedná se o betonové vzorky, jejich rozměry jsou 450 x 450 x 100 mm, které se podařilo vyrobit. Nutno připomenout, že nejenom návrhem betonového vzorku, ale primárně návrhem fixačních nosičů termoelektrických článků, které byly nejprve vyrobeny, následně na ně byly instalovány termočládky a posléze probíhala betonáž. Současně během vzniku této práce a návrhu experimentu, vznikala diplomová práce na téma „Metodika měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám“, tedy do betonového vzorku byly ještě přidány hygropinová pouzdra, která pak dále používal můj kolega k měření vlhkosti v jednotlivých hloubkách.

V další části je pak řešen samotný experiment a zpracovávání dat. Jsou zde popsány jednotlivé použité části k sestavení měřicího stanoviště. Jakým způsobem jsme zabránili proudění chladného vzduchu a jak jsme zaizolovali plochu nad zářičem proti úniku tepla. Popsána je zde i doba měření a teplota okolí. Zpracování dat probíhalo ve dvou způsobech, ve dvou formách. Prvním způsobem bylo porovnání hodnot teploty za čas v jednotlivých hloubkách měření pro první vzorek. Druhým způsobem bylo porovnání tzv. teplotních profilů, tedy závislosti teploty na hloubce průřezu v časech pro 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 minut. Jelikož celková doba zahřívání byla stanovena na 98,5 minuty. Zbýlý čas je uvažována fáze chladnutí. Všechny grafy jsou doplněny o komentáře, které říkají, co se v jaký čas stalo, jaký byl rozdíl měřené teploty, a zároveň je zde i vyhodnocení naměřených hodnot, tedy v jakých částech docházelo k nejvyšším teplotním rozdílům a z jakých důvodů, případně co tyto hodnoty mohlo ovlivnit.

V poslední části této práce se dostáváme k samotnému porovnání jednotlivých naměřených hodnot. Je k tomu použit program TempAnalysis. Tento program je validován. Po porovnání jednotlivých měření zjišťujeme, že měření probíhalo správně a naměřené hodnoty jsou správně. Pochopitelně nejsou totožné, ale rozdíl je zanedbatelný a pro naše měření jsou tyto hodnoty postačující.



Závěrem k experimentu lze říct, že proběhl správně a naměřené výsledky odpovídají skutečností, které počítal validovaný program. Naměřené hodnoty jsou věrohodné a dají se dále použít k dalšímu vědeckému zpracování, případně je zde možnost použití našeho měřicího postupu nebo použití samotných termočlánekových nosičů. Tímto lze prohlásit, že tři ze čtyř nosičů jsou vhodné pro použití k zjišťování vnitřní teploty v betonových vzorcích. Problém vznikl pouze u nosiče tyčového, a to z důvodu, že byl přímo liniově napojen na exponovaný povrch, tedy teplota měřená na jednotlivých trnech ocelového nosiče byla vyšší díky přestupu tepla konstrukcí nosiče. To v ostatních případech u nosiče žebříkového, sololitového nebo prostorového plošného nebylo zaznamenáno a zaznamenané rozdíly teplot mezi nosiči jsou zanedbatelné a odpovídají matematickému modelu.

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Provázanost veličin.....   | 3  |
| Obrázek 2: Princip termoelektrického obvodu (Hyrš, 2012).....                 | 4  |
| Obrázek 3: Termoelektrický článek (Ďaďo a další, 1996).....                   | 6  |
| Obrázek 4: Princip prodloužení termočlánku (Ďaďo a další, 1996).....          | 6  |
| Obrázek 5: Zapojení termočlánku (Přidal, 2008).....                           | 7  |
| Obrázek 6: Sériové zapojení termočlánků (Přidal, 2008).....                   | 8  |
| Obrázek 7: Paralelní zapojení termočlánků (Přidal, 2008).....                 | 8  |
| Obrázek 8: Diferenční zapojení termočlánků (Přidal, 2008).....                | 8  |
| Obrázek 9: Princip konstrukce termočlánku (Lišková, 2017).....                | 9  |
| Obrázek 10: Příklady řešení měřícího spoje termočlánku (Čičmanec, 1980).....  | 10 |
| Obrázek 11: Bodový termočlánek (Telemeter, 2004).....                         | 10 |
| Obrázek 12: Plošný termočlánek (Telemeter, 2004).....                         | 11 |
| Obrázek 13: Kombinovaný termočlánek (Telemeter, 2004).....                    | 11 |
| Obrázek 14: Víceúčelový termočlánek (Telemeter, 2004).....                    | 11 |
| Obrázek 15: Provedení měřícího konce termočlánku (jzp, 2011).....             | 11 |
| Obrázek 16: Miniaturní vysokoteplotní konektor (Mavis, 2016).....             | 14 |
| Obrázek 17: Konstrukce plášťového termočlánku (Přidal 2008).....              | 18 |
| Obrázek 18: MTC 10 - plášťový termočlánek (Mavis, 2016).....                  | 19 |
| Obrázek 19: Umístění termočlánku na betonovém povrchu (CEN/TC 127, 2008)..... | 22 |
| Obrázek 20: Schéma rozmístění termočlánků ve vzorku 1.....                    | 24 |
| Obrázek 21: Schéma rozmístění termočlánků ve vzorku 2.....                    | 25 |
| Obrázek 22: Tyčový měděný nosič (Štefan, 2018).....                           | 26 |
| Obrázek 23: Žebříkový měděný nosič (Štefan, 2018).....                        | 26 |
| Obrázek 24: Sololitový nosič (Štefan, 2018).....                              | 27 |
| Obrázek 25: Betonáž žebříkového nosiče (Štefan,2018).....                     | 27 |
| Obrázek 26: Žebříkový ocelový nosič.....                                      | 28 |
| Obrázek 27: Tyčový ocelový nosič.....   | 28 |
| Obrázek 28: Detail upevnění vodící tyče.....                                  | 29 |
| Obrázek 29: Tyčový sololitový nosič.....                                      | 29 |

---

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 30: Prostorový plošný nosič.....   | 30 |
| Obrázek 31: Rozmístění termočlánků ve vzorku 1,2.....                                      | 31 |
| Obrázek 32: Vážení a příprava surovin pro výrobu vzorku.....                               | 32 |
| Obrázek 33: Míchací zařízení a nádoba s hotovou směsí.....                                 | 33 |
| Obrázek 34: Betonáž vzorku, pravý snímek po zhutnění vibrační deskou.....                  | 34 |
| Obrázek 35: Vkládání hygropinových pouzder do vzorku.....                                  | 34 |
| Obrázek 36: Odbednění vzorků.....  | 35 |
| Obrázek 37: Oba odbedněné vzorky připravené k experimentálnímu měření.....                 | 35 |
| Obrázek 38: 1) Izolace váhy, 2) Vyrovnávací hranoly.....                                   | 37 |
| Obrázek 39: 1) Izolace proti úniku tepla nahoru.....                                       | 37 |
| Obrázek 40: 1) Bočnice k omezení proudění větru.....                                       | 37 |
| Obrázek 41: 1) Zaznamenávací dataloger.....  | 37 |
| Obrázek 42: Tlaková láhev, ukázka adekvátního tlaku pro měření experimentu.....            | 38 |
| Obrázek 43: 1) Digitální váha zaznamenávající hmotnost úbytku vody po celou dobu testu.... | 38 |
| Obrázek 44: 1) Instalace deskového teplotního snímače pro měření povrchové teploty.....    | 39 |
| Obrázek 45: Viditelné vypařování vázané vody v betonu zaznamenané v 37. minutě.....        | 40 |
| Obrázek 46: Schéma rozmístění termočlánku.....   | 45 |
| Obrázek 47: Vzorek číslo 2 pro určení plošné teploty v prvku.....                          | 51 |
| Obrázek 48: Schéma rozmístění termočlánků ve vzorku 2.....                                 | 52 |
| Obrázek 49: Rozhraní uživatelského prostředí programu TempAnalysis.....                    | 56 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 - Přehled změn, k nimž dochází v průběhu zahřívání betonu [1], [2]..... | 2  |
| Tabulka 2 – Seebeckovy koeficienty pro různé kovy [3], [4].....                   | 5  |
| Tabulka 3 - Značení termočlánků dle ČSN EN 60 584 -1:2014 [1], [2].....           | 12 |
| Tabulka 4 – Druhy izolací vodičů [14].....  | 13 |
| Tabulka 5 – Základní vlastnosti termočlánků [13].....                             | 15 |

## Seznam grafů

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 - Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termočlánky [10]..... | 20 |
| Graf 2 – Měření pomocí deskového teplotního snímače.....                                 | 46 |
| Graf 3 – Hloubka 0 mm – povrchové měření.....  | 46 |
| Graf 4 – Hloubka 10 mm – průběh vnitřních teplot.....                                    | 47 |
| Graf 5 – Hloubka 30 mm – průběh vnitřních teplot.....                                    | 48 |
| Graf 6 – Hloubka 50 mm – průběh vnitřních teplot.....                                    | 49 |
| Graf 7 – Hloubka 80 mm – průběh vnitřních teplot.....                                    | 50 |
| Graf 8 – Teplotní profil vzorku v 15. minutě.....  | 51 |
| Graf 9 – Teplotní profil vzorku v 30. minutě.....  | 52 |
| Graf 10 – Teplotní profil vzorku v 45. minutě.....                                       | 52 |
| Graf 11 – Teplotní profil vzorku v 60. minutě.....                                       | 53 |
| Graf 12 – Teplotní profil vzorku v 90. minutě.....                                       | 54 |
| Graf 13 – Teplotní profil vzorku v 120. minutě.....                                      | 54 |
| Graf 14 – Teplotní profil vzorku v 150. minutě.....                                      | 55 |
| Graf 15 – Měření pomocí deskového teplotního snímače.....                                | 58 |
| Graf 16 – Povrchové měření.....  | 58 |
| Graf 17 – Jednotlivé teploty termočlánků – prostorový nosič.....                         | 59 |
| Graf 18 – Hloubka 10 mm – porovnání s TempAnalysis.....                                  | 63 |
| Graf 19 – Hloubka 30 mm – porovnání s TempAnalysis.....                                  | 64 |
| Graf 20 – Hloubka 50 mm – porovnání s TempAnalysis.....                                  | 64 |
| Graf 21 – Hloubka 80 mm – porovnání s TempAnalysis.....                                  | 65 |
| Graf 22 – Teplotní profil vzorku v 15. minutě.....                                       | 66 |
| Graf 23 – Teplotní profil vzorku v 30. minutě.....                                       | 66 |
| Graf 24 – Teplotní profil vzorku v 45. minutě.....                                       | 67 |
| Graf 25 – Teplotní profil vzorku v 60. minutě.....                                       | 68 |
| Graf 26 – Teplotní profil vzorku v 90. minutě.....                                       | 68 |
| Graf 27 – Teplotní profil vzorku v 120. minutě.....                                      | 69 |
| Graf 28 – Teplotní profil vzorku v 150. minutě.....                                      | 70 |
| Graf 29 – Prostorový plošný nosič.....   | 71 |

## Literatura

- [1] SIČÁKOVÁ, Alena. *New generation cement concretes: ideas, design, technology and applications*. Košice: Technical University, 2008. ISBN 978-80-553-0040-5.
- [2] KUČERA, Petr, Tereza ČESELKÁ a Pavlína MATEČKOVÁ. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-094-4
- [3] HYRŠ, Jan. *Měření teploty termočlánky*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně.
- [4] ČIČMANEC, Pavol. *Všeobecná fyzika*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1980.
- [5] PŘIDAL, Oldřich. *Termočlánkový snímač teploty (TST)*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně.
- [6] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.
- [7] ČERNÝ, M. *Termoelektrické články pro měření teploty*. Ústav pro výzkum a využití paliv. Praha, 1989.
- [8] OMEGA. *Omega Engineering Česká republika* [online]. 1995, 22. května 2012 [Citace: 5. dubna 2018]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/>
- [9] CHUDÝ, V., R. PALENČÁR, E. KUREKOVÁ a M. HALAJ. *Meranie technických veličín*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2.
- [10] LIŠKOVÁ, N. *Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT.
- [11] TELEMETER. *Teplotní čidla* [online]. Praha, 2004 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://telemeter.info/cz/tepelný-management/teplotni-cidla/termoclaneky/miniaturni-termoclaneky>,
- [12] KUČA, Martin. *Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT.
- [13] ČSN EN 60 584-1. *Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance*. Praha : ÚNMZ, Květen 2013.
- [14] MAVIS. *Termočlánkové snímače kabelové*. Mavis. [online] [Citace: 2. 5. 2016] <http://www.mavis.cz/termoclanek-kabelovy-mtc12>
- [15] ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky*. Praha : ÚNMZ, Leden 2013.

- 
- [16] CEN/TC 127 Technical Committee. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 3: Applied protection to concrete members*. Brussels: European committee for standardization, 2008.
- [17] ŠTEFAN, Radek. Malorozměrové požární zkoušky. Praha : ČVUT v Praze, 2018
- [18] HAVLŮJ, Jan. Diplomový seminář – Metodika měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám. Praha : ČVUT v Praze, 2018
- [19] RAJMAN, Daniel. Diplomový seminář – Metodika měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám. Praha : ČVUT v Praze, 2018
- [20] ŠTEFAN, Radek, PROCHÁZKA, Jaroslav, *TempAnalysis – Computer Program for Temperature analysis of Cross Sections Exposed to Fire[software online]*. Prague: CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Dep. of Concrete and Masonry Structures, 2009.
- [21] BAŽANT, Z. P. a TONGUTHAIL, W. Pore pressure and drying of concrete at high temperature. Eng. Mech. Div. 1978. Stránky 1059-1079.
- [22] BAŽANT, Z. P. a TONGUTHAIL, W. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical. Mag. Concr. Res. 1979. Stránky 67-76.