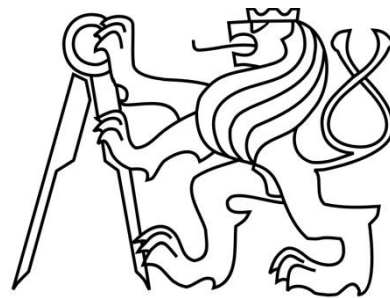


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Katedra mechaniky

Studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



KATEŘINA REVAYOVÁ

**ANALÝZA ÚČINKŮ ZMĚNY TEPLoty NA  
STÁVAJÍCÍ MOSTNÍ KONSTRUKCI**

The Analysis of Temperature Change Effects on an  
Existing Bridge Structure

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Ing. Michal Polák, CSc

Praha, září 2016



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Revayová Jméno: Kateřina Osobní číslo: 370820

Zadávající katedra: K132 - Katedra mechaniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza účinků změny teploty na stávající mostní konstrukci.

Název bakalářské práce anglicky: The Analysis of Temperature Change Effects on an Existing Bridge Structure

Pokyny pro vypracování:

Vyhodnocení experimentu realizovaného na mostní konstrukci in situ, sestavení modelu mostní konstrukce, určení odezvy nosné konstrukce mostu na účinky změny teploty.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-1-5 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou, ČNI, 2005.

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2016 Termín odevzdání bakalářské práce: 20.5.2016

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské 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)



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Čj.: 0365/16/11921/Ja

V Praze dne 16.05.2016

Kateřina Revayová

Přetlucká 2304/3

100 00 Praha 10 - Strašnice

Věc: Žádost o posunutí data odevzdání bakalářské práce

Na základě Vaší žádosti a stanoviska vedoucího práce Vám povolují následující termín odevzdání bakalářské práce: 30.09.2016.

V souladu s nově stanoveným termínem odevzdání práce bude změněno v IS KOS původně uvedené datum. Do nově stanoveného data máte možnost práci do IS KOS nahrát, vedoucí práce může práci v IS KOS následně schválit. Tuto změnu data odevzdání v IS KOS provede studijní oddělení.

**prof. Ing. Jiří M á c a, CSc.**

proděkan pro pedagogickou činnost



Vyřizuje: Lada Jaňourová

Telefon: 224 358 769

Na vědomí: Polák Michal prof. Ing.,CSc., vedoucí BP, K 132

## **Abstrakt:**

Tato práce se zabývá problematikou zatížení teplotou na mostních konstrukcích. V teoretické části je uveden přístup norem a seznámení se sledovaným mostním objektem. Ve výpočetní části jsou pak zpracována a vyhodnocena experimentálně získaná data ze zmíněného mostu. Z naměřených teplot bylo stanoveno napětí v jednotlivých místech průřezu pro vyhodnocené nejméně příznivé situace zatížení teplotou a to bylo následně porovnáno s hodnotami získanými zatížením teplotou, které předepisuje norma ČSN EN 1991-1-5 Eurokód 1: zatížení konstrukcí Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou.

Základním cílem práce bylo zjistit, zda výpočet napětí v konstrukci od teploty podle platné normy odpovídá skutečné odezvě stávajícího mostu.

## **Klíčová slova:**

Zatížení teplotou, napětí od teploty, experiment, analýza dat, zatížení mostů, ocelobetonový most, mosty pozemních komunikací

## **Abstract:**

The thesis deals with the problematics of thermal actions on bridges. The theoretical part consists of a standard approach explanation and also a description of the observed bridge structure. The computational part contains a summary of processed and evaluated experimental data from the aforementioned bridge. The stress from the measured temperature was determined at selected cross-sections of the bridge for the most adverse temperature load situations. Acquired stress values were compared with the ones calculated according to the standard Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-5: General actions – Thermal Actions.

The main aim of the thesis was to evaluate whether calculation of the stress from the temperature according to the applicable standard reflects the real response of the aforementioned bridge to the thermal actions.

## **Keywords:**

Thermal actions, stress from the temperature, experiment, data analysis, load of bridges, slab on beam composite Bridge, road bridges

## **Poděkování:**

Touto cestou bych ráda poděkovala prof. Ing. Michalu Polákovi za odborné vedení bakalářské práce, cenné rady a poskytnutí potřebných materiálů. Jeho trpělivý přístup a ochota mi velice pomohly práci dokončit.

Velké díky patří i mojí rodině, která mě za všech okolností podporuje.

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci zpracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Michala Poláka a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce. Dále prohlašuji, že tato práce nebyla využita k jinému vysokoškolskému studiu či k získání jiného titulu.

V Praze dne 30.9.2016

---

podpis autora

## Obsah:

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>ZATÍŽENÍ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ TEPLOTOU DLE ČSN EN 1991-1-5</b> .....	<b>9</b>
2.1	Rovnoměrná složka teploty .....	9
2.2	Rozdílové složky teploty pro nosné konstrukce mostů .....	11
<b>3</b>	<b>POPIS EXPERIMENTU</b> .....	<b>12</b>
3.1	Sledovaná konstrukce mostu .....	12
3.2	Měřicí linka.....	15
<b>4</b>	<b>VÝPOČET NAPĚTÍ NA SLEDOVANÉM MOSTĚ</b> .....	<b>18</b>
4.1	Vyhodnocení naměřených dat .....	18
4.2	Materiálové a průřezové charakteristiky.....	21
4.3	Výpočet koncových sil.....	22
4.4	Stanovení vnitřních sil .....	27
4.5	Výsledná napětí.....	30
4.6	Maximální hodnoty napětí .....	32
<b>5</b>	<b>HODNOTY NAPĚTÍ DLE NORMY ČSN EN 1991-1-5</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>37</b>
6.1	Porovnání hodnot napětí .....	37
6.2	Pravděpodobnost překročení.....	42
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>44</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>45</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>46</b>

# 1 ÚVOD

Předkládaná práce obsahuje analýzu dlouhodobého experimentu prováděného na ocelobetonovém mostě, který leží na ulici K Barrandovu a který vede přes silniční okruh okolo Prahy (SOKP). Tento most je od roku 2006 součástí experimentu, při němž se monitorují změny teploty a dále se sleduje dynamická odezva konstrukce. Dynamikou mostu se tato práce zabývat nebude. Je zaměřená pouze na teplotu a její vliv na napjatost konstrukce.

Teplota může účinkovat na stavební konstrukci různými způsoby. Jde například o požár či jiné mimořádné situace, vliv hydratačního tepla, klimatické účinky a jiné další [1]. A právě vlivem změn klimatických teplot na konstrukci se budeme zabývat v této práci.

Klimatické vlivy nesmíme při návrhu konstrukce opomenout. Tvoří nedílnou složku a mnohdy celý návrh výrazně ovlivní. A nejsou rozhodující pouze samotné extrémní teploty, ale velkou roli hrají především neustálé změny. O změnách mluvíme v rámci ročních období, ale dokonce i změny během dne a noci se na konstrukci projevují. Pochopitelně nesmíme zapomínat na vliv přímého oslunění částí konstrukce a s tím spojené nerovnoměrné rozložení teplot po konstrukci [2] [3].

Je toho opravdu hodně, co ovlivní chování mostní konstrukce, a tak vyvstává otázka, zda jsou normy schopny všechny tyto vlivy podchytit a zohlednit. A to bude náplní této práce. Zpracovat skutečná naměřená data z experimentu in situ a porovnat je s hodnotami, které nám předepisuje při návrhu nové konstrukce současně platná norma.

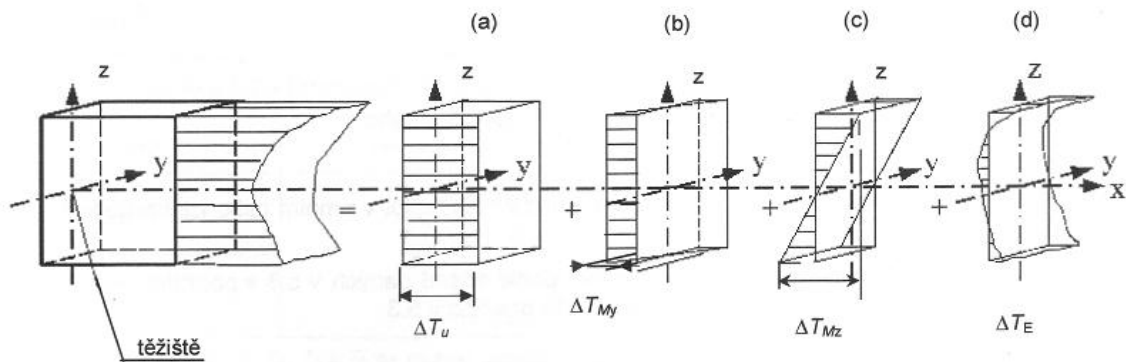
První část práce je zaměřena na přístup ČSN EN 1991-1-5 k problematice zatížení mostních konstrukcí teplotou. V další části je blíže popsána konstrukce sledovaného mostu a průběh samotného experimentu. Poté se přistoupí ke zpracování získaných dat a stanovení odezvy konstrukce na skutečné zatížení. Totéž se provede pro zatížení, jež nám předepisuje norma ČSN EN 1991-1-5, a ke konci práce budou výsledky porovnány.



## 2 ZATÍŽENÍ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ TEPLOTOU DLE ČSN EN 1991-1-5

Dle ČSN EN 1991-1-5 [4] lze teplotní průběh na jednotlivých nosných prvcích rozčlenit do čtyř základních složek znázorněných na obr. 2.1.

- (a) rovnoměrná složka teploty  $\Delta T_u$
- (b) lineárně proměnná rozdílová složka teploty  $\Delta T_{My}$  ve směru osy y
- (c) lineárně proměnná rozdílová složka teploty  $\Delta T_{Mz}$  ve směru osy z
- (d) nelineární rozdílová složka teploty  $\Delta T_E$ ; představuje systém samorovnovážných napětí, která nevyvolávají v prvku žádné zatěžovací účinky



Obr. 2.1 Schematické znázornění základních složek průběhu teplot

U mostních konstrukcí se dle normy ČSN EN 1991-1-5 stanoví reprezentativní hodnoty zatížení teplotou pomocí

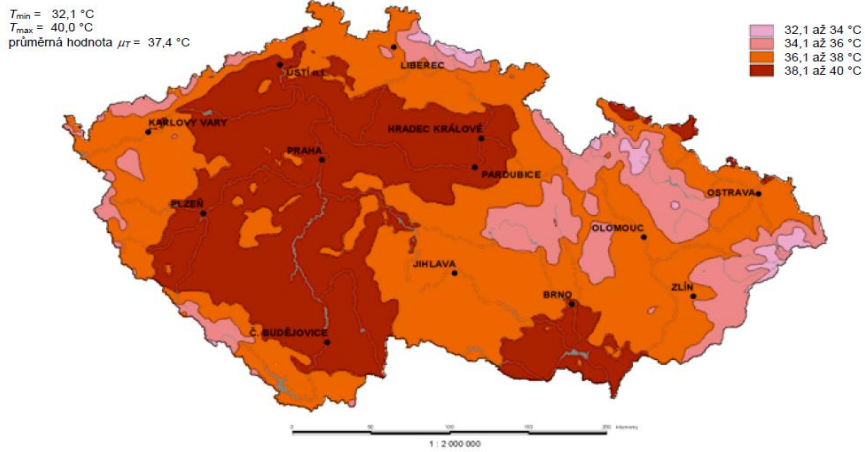
- rovnoměrné složky teploty
- rozdílových složek teploty

### 2.1 Rovnoměrná složka teploty

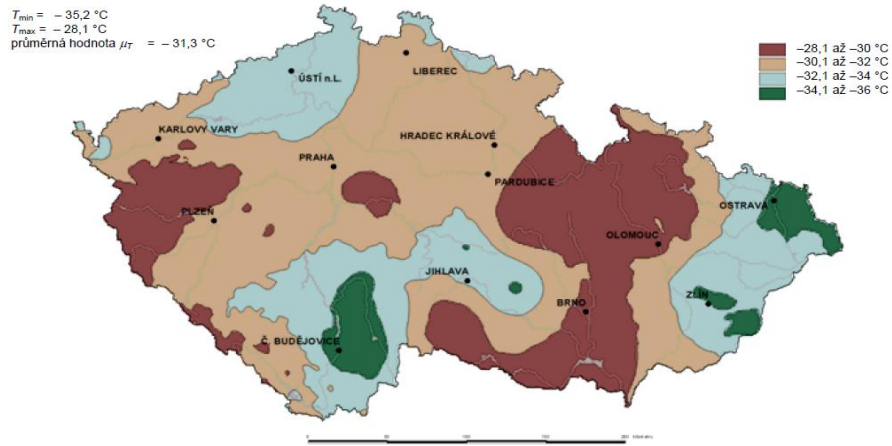
Rovnoměrná složka teploty  $\Delta T_u$  závisí na minimální a maximální teplotě, které může most dosáhnout. Tato složka teploty může způsobit délkové změny u prvků, pokud jejich přetvoření v konstrukci není omezeno. Zvážit by se měly i další vlivy, jako je např. typ konstrukce, tření v ložiscích a další.

Charakteristické minimální ( $T_{\min}$ ) a maximální ( $T_{\max}$ ) teploty vzduchu ve stínu v místě navrhovaného mostu se musí určit z národních map izoterm (Obr. 2.2). Norma stanovuje hodnoty minimální ( $T_{e,\min}$ ) a maximální ( $T_{e,\max}$ ) rovnoměrné složky teploty v závislosti na typu konstrukce a minimálních a maximálních hodnotách teploty vzduchu ve stínu. Tato závislost je vykreslena na obr. 2.3, přičemž 1. typ jsou mosty s ocelovou nosnou konstrukcí, 2. typ s ocelobetonovou konstrukcí a 3. typ mosty s betonovou nosnou konstrukcí.

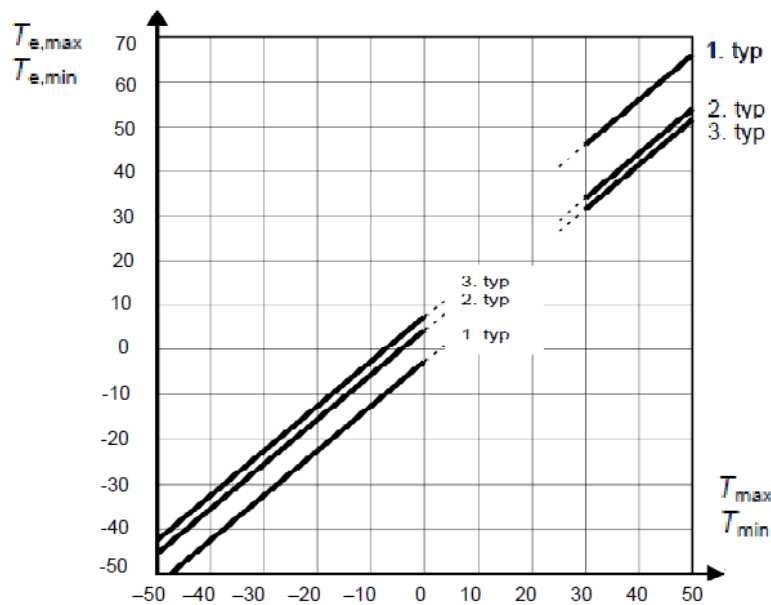
Hodnoty maximální teploty vzduchu ve stínu, která je překročena ročními maximy s pravděpodobností 0,02.



Hodnoty minimální teploty vzduchu ve stínu, která je překročena ročními minimy s pravděpodobností 0,02.



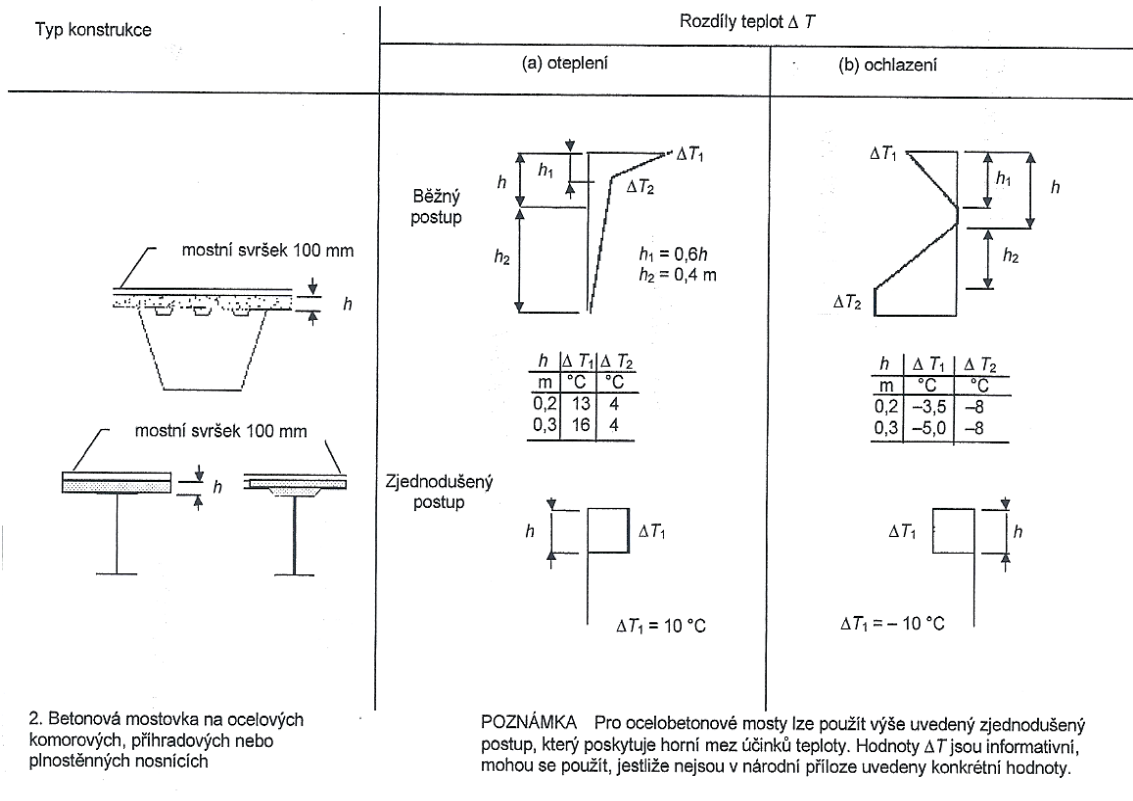
Obr. 2.2 Mapa izoterm maximálních a minimálních teplot vzduchu ve stínu



Obr. 2.3 Vztah mezi  $T_{min}$  (popř.  $T_{max}$ ) a  $T_{e,min}$  (popř.  $T_{e,max}$ ) pro mostní konstrukce

## 2.2 Rozdílové složky teploty pro nosné konstrukce mostů

Hodnoty svislých rozdílů teplot pro nosné konstrukce mostů lze nalézt v národní příloze normy [4], podle které se má počítat s nelineární rozdílovou složkou teploty. Doporučené hodnoty pro ocelobetonové mosty jsou uvedeny na obr. 2.4, kde se pojem „oteplení“ vztahuje k podmínkám, kdy sluneční záření způsobí nárůst tepla na horním povrchu a „ochlazení“ představuje ztrátu tepla z horního povrchu.



Obr. 2.4 Rozdílové složky teploty podle normy ČSN EN 1991-1-5

### 3 POPIS EXPERIMENTU

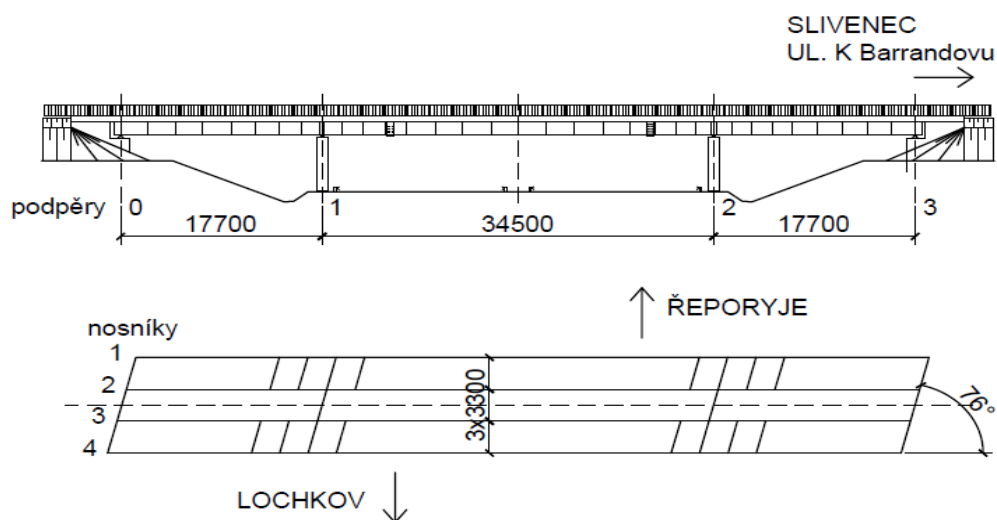
#### 3.1 Sledovaná konstrukce mostu

Tato práce se zabývá dlouhodobě sledovaným mostem, který vede přes silniční okruh kolem Prahy v 15,869 km na nájezdu do ulice K Barrandovu (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Poloha sledovaného mostu (Google Maps)

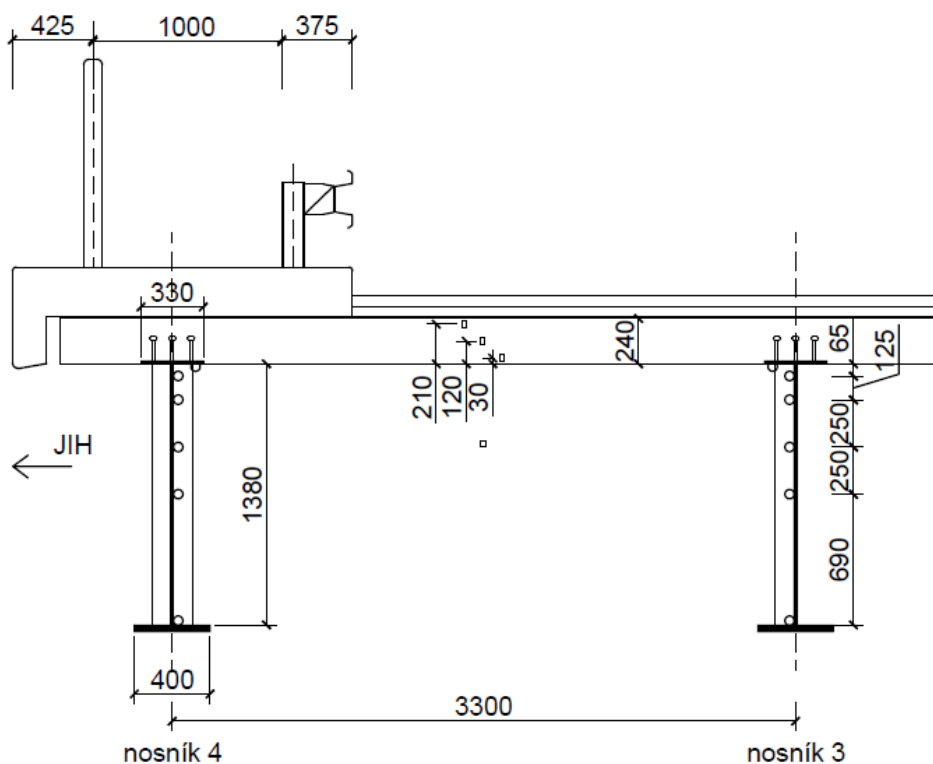
Veškeré podklady ke konstrukci mostu a měřící lince byly čerpány z [5] a z osobní prohlídky mostu, která byla uskutečněna dne 3. 4. 2016. Jedná se o spřažený ocelobetonový trámový most o třech polích o rozpětí 17,7 + 34,5 + 17,7 m. Půdorysně jde o most přímý, mírně šikmý (šikmost je asi 76°) (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Pohled a půdorys mostu na ulici K Barrandovu

Příčný řez tvoří čtyři hlavní nosníky tvaru I s osovou vzdáleností 3 300 mm (Obr. 3.3). Nosníky jsou svařované, horní pásnice má šířku 330 mm a po délce proměnnou tloušťku 14 nebo 18 mm, stojina je konstantní výšky 1380 mm, tloušťky 13 mm a dolní pásnice šířky 400 mm má opět proměnnou tloušťku po délce nosníku, a to mezi 14 až 46 mm. Svislé výztuhy nosníků jsou nepravidelně rozmístěny ve vzdálenostech 1500 až 2500 mm.

Betonová deska mostovky je monolitická s konstantní tloušťkou 240 mm, bez příčných náběhů. V příčném řezu jsou na koncích krátké konzoly s vyložení 420, resp. 820 mm. Šířka vozovky je 9,0 m. Na jižní straně, na které jsou osazeny snímače teploty, se nachází revizní chodník šířky 1,0 m. Z vnější strany je zábradlí a z vnitřní strany mezi chodníkem a silnicí se nachází svodidlo. Na severní straně mostu je zábradelní svodidlo.



Obr. 3.3 Polovina příčného řezu mostu se sledovanými hlavními nosníky č. 3 a 4

Všechna ložiska na mostě jsou hrncová, nachází se na všech podporách pod každým hlavním nosníkem. Na druhém pilíři je ložisko pevné, všechna ostatní jsou pohyblivá.



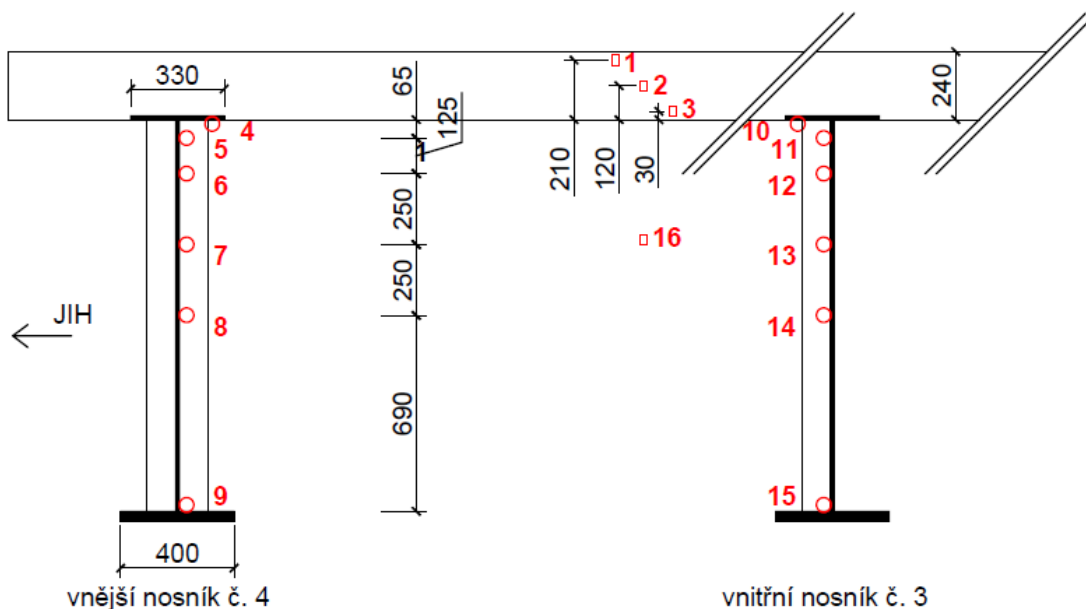
*Obr. 3.4 Pohled na most od jihu*



*Obr. 3.5 Pohled na most od severu*

### 3.2 Měřicí linka

Dne 11. 7. 2006 byla na sledovaném mostě nainstalována měřicí linka, která zaznamenává změny teploty. Skládá se z měřicí a záznamové ústředny MS2+ od výrobce Comet Systém, která je uložena na úložném prahu pilíře č. 2 v ochranné plastové vodotěsné skřínce, a ze šestnácti teplotních sond, jejichž rozmístění je podrobně rozkresleno na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Rozmístění teplotníků ve sledovaném řezu

Sondy 1, 2 a 3 slouží ke sledování průběhů teplot po výšce betonové desky. Jedná se o typ N1ATG8. Tyto sondy jsou uloženy ve vyvrtaných otvorech různé délky, které byly po instalaci sond zaizolovány.

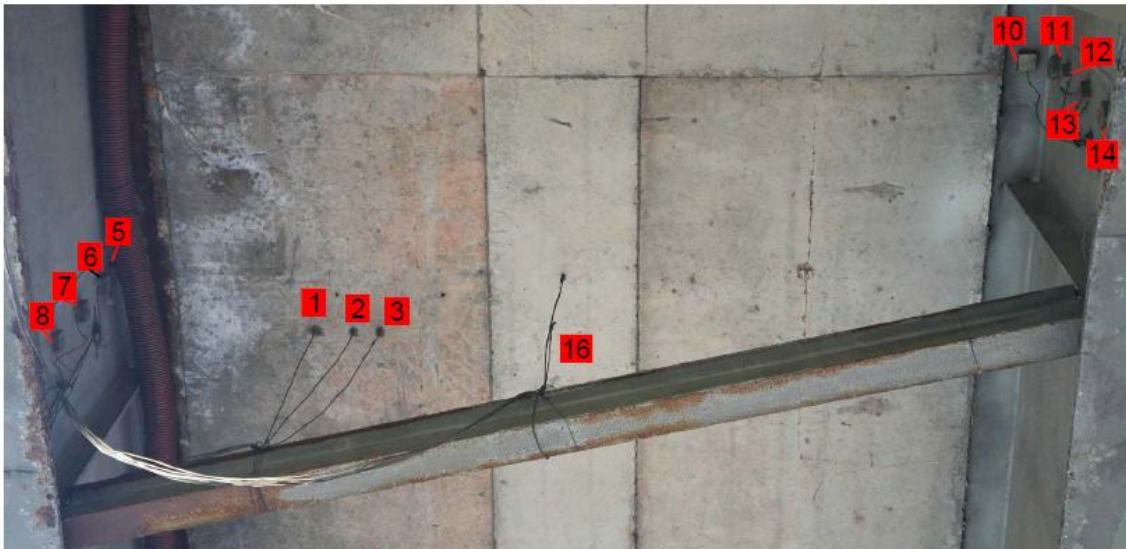
Teploměr č. 16 (typu N1ATG7) snímá teplotu vzduchu a je volně zavěšen ve vzduchu mezi hlavními nosníky 3 a 4.



Obr. 3.7 Pohled na teplotní sondy N1ATG8 (vlevo) a N1ATG7 (vpravo)

Ostatní sondy měří povrchovou teplotu ocelových nosníků. Tyto příložné teplotní sondy typu N1ATG7 jsou na nosnících nalepeny a následně zakryty izolační hmotou. Snímače 4 až 9 nalezneme na vnitřní straně vnějšího nosníku (nosník č. 4), zatímco snímače 10 až 15 se nacházejí na vnější straně vnitřního nosníku (nosník č. 3).

Většina teploměrů je vyfotografována a popsána na obr. 3.8 a sondy 1 až 8, tedy sondy v desce a na krajním nosníku č. 4, jsou blíže vidět na obr. 3.9.



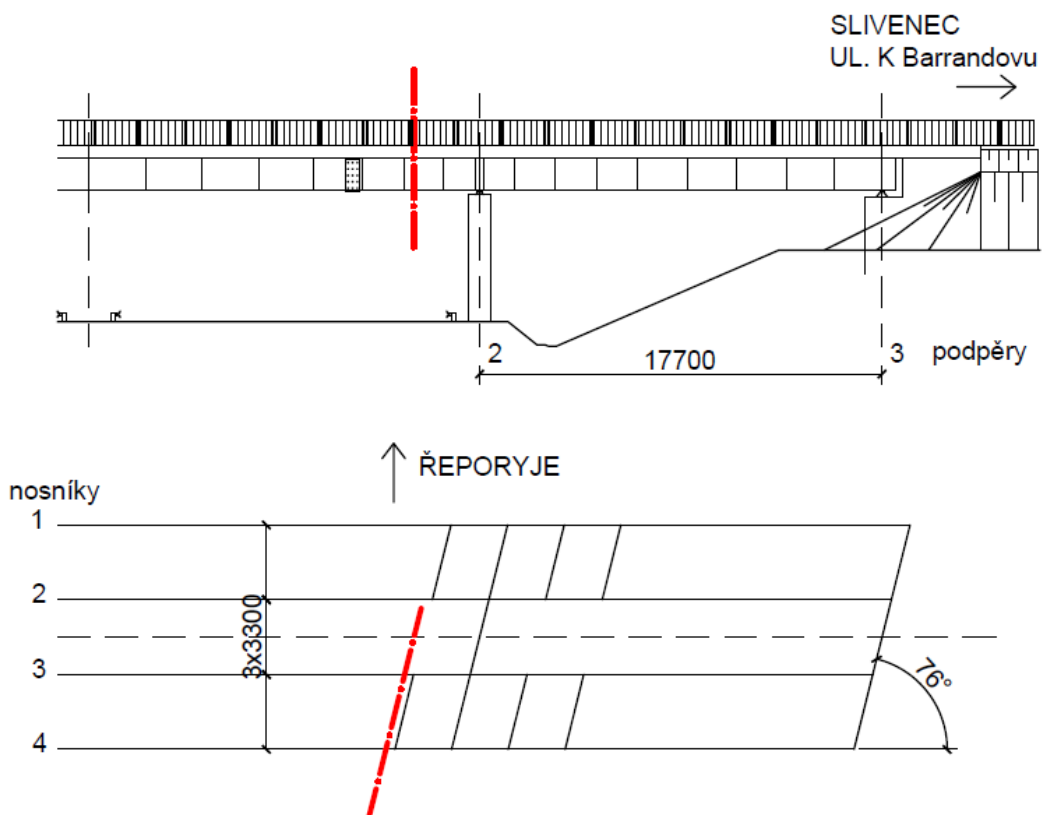
*Obr. 3.8 Pohled na většinu snímačů teploty*



*Obr. 3.9 Sondy 1 až 8*



Všechny teplotní sondy jsou uloženy v jediném průřezu celého mostu, a to na jižní polovině konstrukce, kde je vnější nosník během dopoledne osluňován. Umístění příčného řezu se sondami je vyznačeno na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Poloha průřezu s teplotními sondami

## 4 VÝPOČET NAPĚTÍ NA SLEDOVANÉM MOSTĚ

### 4.1 Vyhodnocení naměřených dat

Měřicí linka snímá pravidelně v intervalu 15 minut teploty pomocí sond a záznamy ukládá do ústředny MS2+, kde je možné shromažďovat data přibližně 2,5 měsíce. Tyto záznamy jsou následně stahovány a archivovány na Fakultě stavební ČVUT.

V roce 2006 došlo k poruše teplotního snímače č. 9 a až do konce roku 2008 byl snímač mimo provoz. K určení napětí po výšce průřezu je tato hodnota důležitá, proto se při vyhodnocování vnějšího nosníku nebudou roky 2007 a 2008 uvažovat. I přes tento výpadek je z experimentu dostatek dat pro analýzu napětí.

Koncem roku 2009 přestala být funkční sonda č. 12 a dodnes je stále mimo provoz. Hodnoty ze snímače č. 12 nejsou pro výpočet zásadní, proto vnitřní nosník může být vyhodnocován bez ohledu na nefunkčnost tohoto teploměru.

Z naměřených údajů teploty byla v každém čase měření vyhodnocena rovnoměrná složka teploty ( $\Delta T_u$ ), rozdílová složka teploty ve svislém směru ( $\Delta T_{My}$ ) a dále míra nelineární rozdílové složky (míra  $T_E$ ) pomocí regresní analýzy [6]. Skrze naměřené hodnoty teploty  $T(z_i, t)$  v jednotlivých bodech průřezu byla pro každý časový okamžik  $t$  provedeného měření proložena regresní přímka. Přímka byla prokládána vždy zvlášť skrze data naměřená na vnějším nosníku a zvlášť na vnitřním nosníku. Regresní přímku lze popsat rovnicí

$$T(z_i, t) = \Delta T_u(t) + z_i * K(t) \quad (4.1)$$

kde  $z_i$  je svislá souřadnice bodu, ve kterém bylo provedeno měření teploty a  $K(t)$  je směrnice prokládané přímky odpovídající času měření  $t$

Pro odhad parametrů regresní přímky byla použita metoda nejmenších čtverců, která v tomto případě vede k řešení soustavy dvou rovnic o dvou neznámých  $\Delta T_u(t)$  a  $K(t)$

$$\begin{aligned} N * \Delta T_u(t) + \sum_{i=1}^p z_i * K(t) &= \sum_{i=1}^p T_i(t) \\ \sum_{i=1}^p z_i * \Delta T_u(t) + \sum_{i=1}^p z_i^2 * K(t) &= \sum_{i=1}^p (T_i(t) * z_i) \end{aligned} \quad (4.2)$$

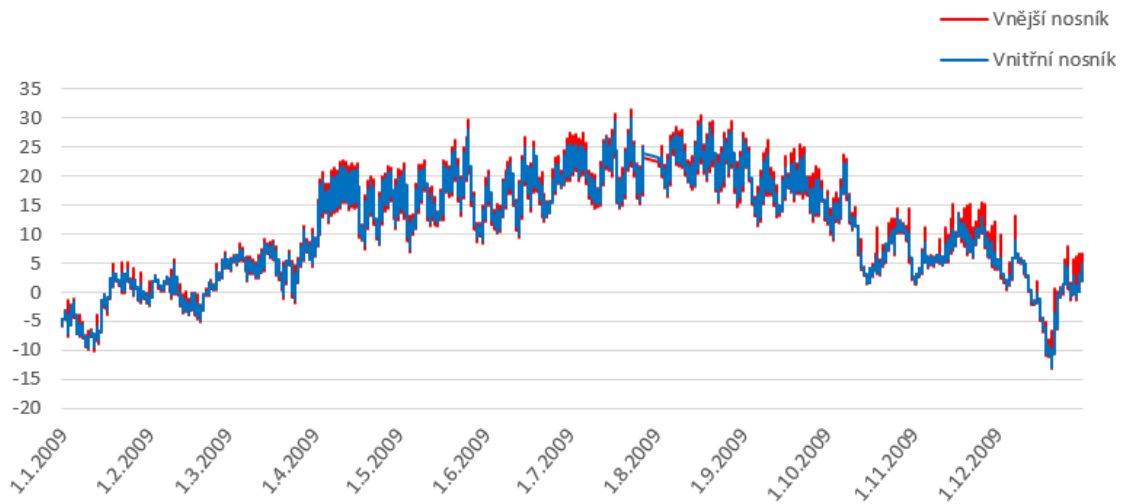
kde  $N$  je počet bodů, ve kterých bylo provedeno měření teploty a skrze které je regresní přímka prokládána, a  $T_i(t)$  jsou teploty naměřené v těchto bodech v čase  $t$

Použití metody nejmenších čtverců znamená, že parametry regresní přímky byly určeny na základě podmínky, že součet druhých mocnin nelineárních rozdílových složek teploty přes sledované body v průřezu je minimální. Nelineární rozdílová složka

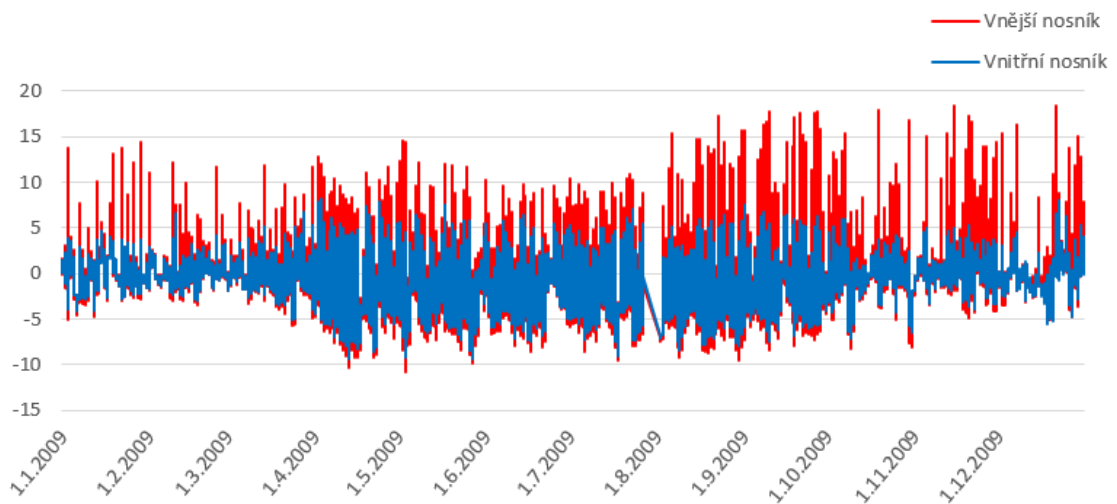
teploty  $\Delta T_E(z_i, t)$  byla v jednotlivých bodech vnějšího, popřípadě vnitřního nosníku vyhodnocena na základě vztahu

$$\Delta T_E(z_i, t) = T(z_i, t) - \Delta T_u(t) - z_i * K(t) \quad (4.3)$$

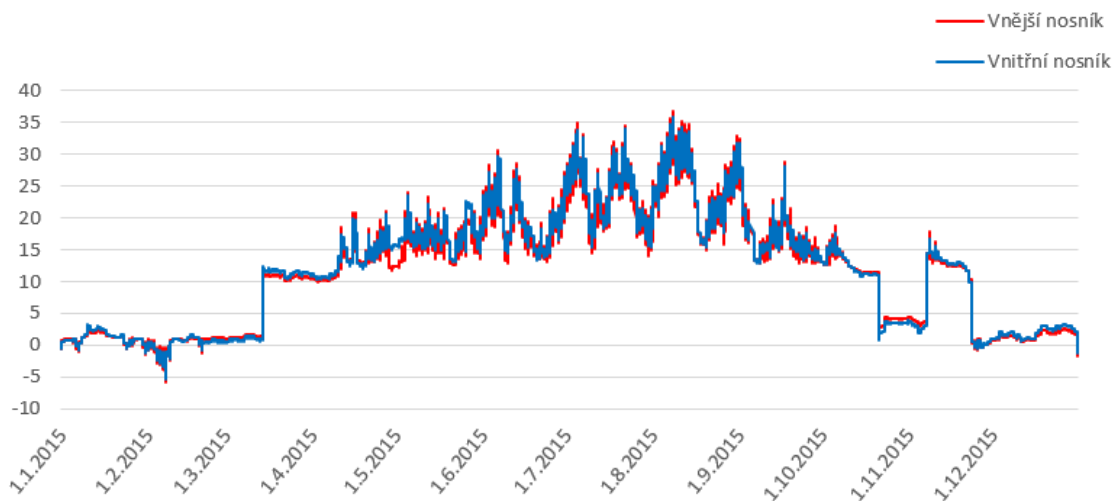
Pro ilustraci vyhodnocených experimentálních výsledků jsou vykresleny na následujících čtyřech obrázcích grafy s časovým průběhem rovnoměrné složky teploty  $\Delta T_u$  a lineárně proměnnou rozdílovou složkou teploty  $\Delta T_{My}$  pro vnější a vnitřní nosník v letech 2009 a 2015.



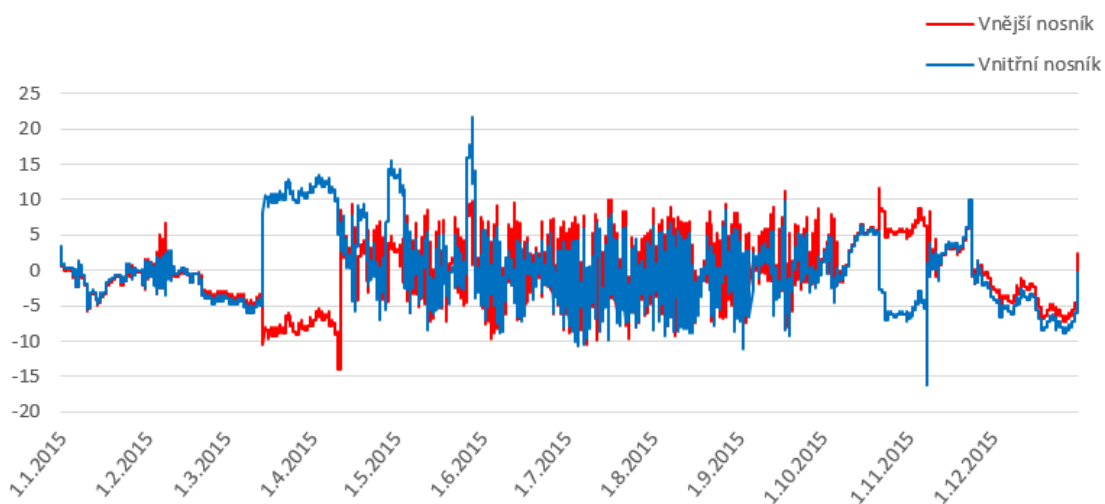
Obr. 4.1 Průběh rovnoměrné složky teploty  $\Delta T_u$  během roku 2009



Obr. 4.2 Průběh lineárně proměnné rozdílové složky teploty  $\Delta T_{My}$  během roku 2009



Obr. 4.3 Průběh rovnoměrné složky teploty  $\Delta T_u$  během roku 2015



Obr. 4.4 Průběh lineárně proměnné rozdílové složky teploty  $\Delta T_{My}$  během roku 2015

V tab. 4.1 jsou uvedeny minimální a maximální hodnoty rovnoměrné složky teploty ( $\Delta T_u$ ), rozdílové složky teploty ve svislém směru ( $\Delta T_{My}$ ) a míry nelineární rozdílové složky (míra  $T_E$ ) pro každý rok sledování mostu. Údaje jsou vypsány zvlášť pro nosník 3 a pro nosník 4, včetně dne a hodiny, při kterých k nim došlo, a také extrémní hodnoty za celé sledované období 2007 až 2015.

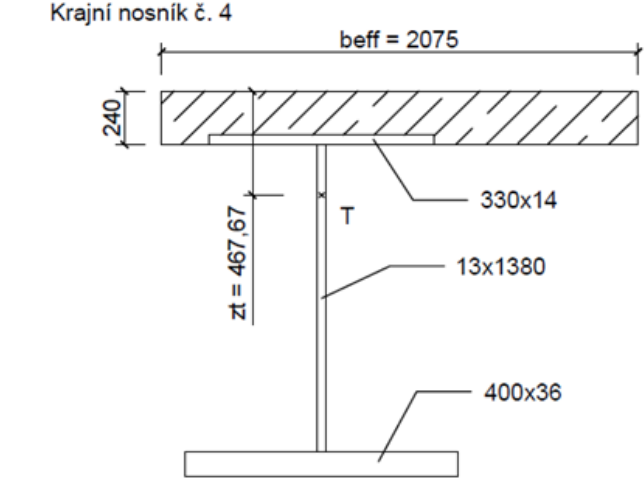
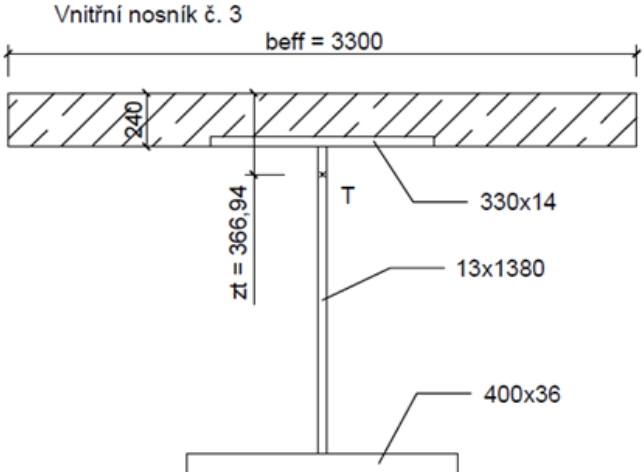
VNĚJŠÍ NOSNÍK č. 4										
ROK	2007		2008		2009		2010		2011	
MAX $\Delta T_u$	X		X		23.7. 14:45	31,559	12.7. 14:30	34,882	24.8. 15:30	30,650
MIN $\Delta T_u$					20.12. 8:00	-13,134	20.12. 8:00	-13,134	24.2. 7:00	-10,144
MAX $\Delta T_M$					21.12. 11:15	18,367	7.3. 10:30	22,574	25.2. 11:15	13,953
MIN $\Delta T_M$					3.5. 4:45	-10,882	13.6. 3:45	-11,109	25.5. 4:00	-10,569
MAX míra $T_E$					19.10. 9:30	143,300	7.3. 10:15	169,130	25.2. 11:15	81,520
MIN míra $T_E$					3.5. 4:45	-41,630	27.1. 9:00	-48,570	25.5. 4:00	-38,030
ROK	2012		2013		2014		2015		Extrémy	
MAX $\Delta T_u$	20.8. 16:00	34,862	28.7. 15:00	35,205	10.6. 15:15	33,193	8.8. 15:30	36,680	8.8.2015 15:30	36,680
MIN $\Delta T_u$	12.2. 7:15	-15,811	26.1. 6:30	-11,294	26.1. 8:45	-8,163	7.2. 7:30	-5,750	12.2.2012 7:15	-15,811
MAX $\Delta T_M$	12.2. 12:00	16,270	31.10. 11:30	12,650	26.3. 12:45	12,054	21.10. 9:45	11,639	7.3.2010 10:30	22,574
MIN $\Delta T_M$	30.7. 4:45	-9,264	21.6. 4:15	-10,657	7.9. 12:00	-11,190	10.4. 23:15	-13,933	2.4.2007 16:45	-14,061
MAX míra $T_E$	12.2. 12:00	84,980	31.10. 11:30	78,550	28.11. 11:00	91,390	28.5. 13:00	117,680	4.2.2008 11:45	187,000
MIN míra $T_E$	30.7. 4:30	-33,350	4.8. 16:45	-43,510	15.3. 0:15	-97,500	10.4. 19:30	-127,060	10.4.2015 19:30	-127,060
VNITŘNÍ NOSNÍK č.3										
ROK	2007		2008		2009		2010		2011	
MAX $\Delta T_u$	16.7. 17:15	34,711	29.7. 17:30	30,877	23.7. 15:00	29,905	12.7. 17:15	33,828	24.8. 16:45	30,025
MIN $\Delta T_u$	23.12. 9:45	-5,451	31.12. 9:30	-6,028	20.12. 9:00	-12,810	20.12. 9:00	-12,810	24.2. 7:45	-9,861
MAX $\Delta T_M$	18.5. 12:15	13,796	9.4. 14:45	8,569	3.4. 14:00	8,210	18.3. 13:00	8,922	18.5. 11:15	16,256
MIN $\Delta T_M$	9.8. 11:00	-14,383	24.6. 5:00	-10,734	27.5. 4:30	-9,370	29.6. 4:30	-11,834	29.6. 4:15	-11,508
MAX míra $T_E$	30.5. 10:45	71,390	11.7. 10:15	28,480	21.12. 2:45	29,400	18.3. 13:00	30,800	18.5. 11:15	99,660
MIN míra $T_E$	1.7. 20:00	-62,780	1.6. 17:30	-45,970	13.4. 5:00	-32,460	29.6. 4:30	-51,020	29.6. 3:00	-48,910
ROK	2012		2013		2014		2015		Extrémy	
MAX $\Delta T_u$	20.8. 17:15	33,871	28.7. 18:30	34,695	20.7. 17:45	32,317	8.8. 17:15	35,753	8.8.2015 17:15	35,753
MIN $\Delta T_u$	12.2. 7:30	-15,440	26.1. 6:30	-10,666	26.1. 8:45	-8,292	7.2. 7:45	-5,469	12.2.2012 7:30	-15,440
MAX $\Delta T_M$	16.3. 14:15	12,588	18.4. 14:45	7,976	9.7. 8:45	9,516	28.5. 13:30	21,639	28.5.2015 13:30	21,639
MIN $\Delta T_M$	30.7. 4:30	-9,826	21.6. 3:30	-11,560	10.6. 11:45	-11,414	7.11. 21:00	-16,208	7.11.2015 21:00	-16,208
MAX míra $T_E$	16.3. 14:15	46,080	18.4. 14:45	28,620	1.12. 16:00	47,670	29.5. 6:30	89,370	18.5.2011 11:15	99,660
MIN míra $T_E$	14.8. 2:15	-42,370	4.8. 16:45	-53,410	7.8. 19:30	-70,940	7.11. 21:30	-93,920	7.11.2015 21:30	-93,920

Tab. 4.1 Vyhodnocené roční extrémní hodnoty složek teploty v období 2007 – 2015

V těchto kritických časech je potřeba zjistit napětí konstrukce v jednotlivých bodech průřezu. V této práci bude ukázán postup v jednom zvoleném čase pro vnější a pro vnitřní nosník. Ostatní napětí byla stanovena stejným způsobem pro každý další kritický čas. Pro ukázkou bylo zvoleno zatížení teplotou ze dne 30. 7. 2012 v 4:30, jelikož průběh napětí z tohoto okamžiku je potřeba určit na nosníku č. 3 i nosníku č. 4 (viz tab. 4.1).

## 4.2 Materiálové a průřezové charakteristiky

Vzhledem k různé efektivní šířce betonové desky u krajního a vnitřního nosníku je nutné stanovit průřezové charakteristiky pro každý nosník zvlášť. Na obr. 4.5 jsou přehledně uvedeny materiálové charakteristiky a průřezové charakteristiky za předpokladu ideálního průřezu potřebné pro další výpočet.

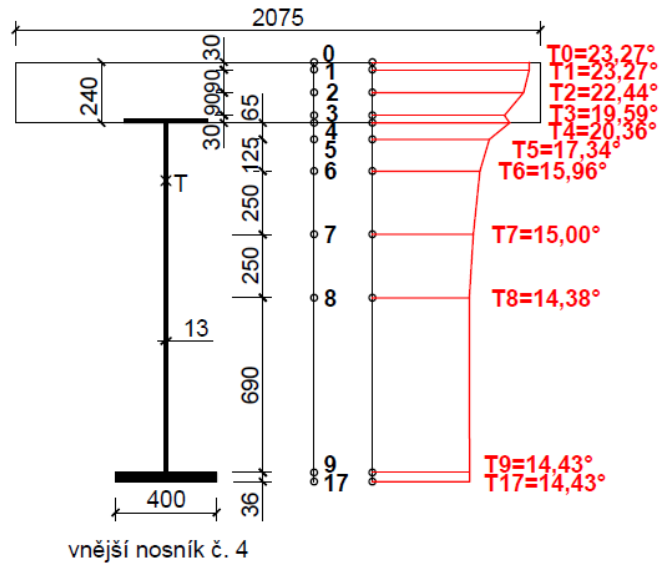
<p>Krajní nosník č. 4</p>  <p>beff = 2075</p> <p>240</p> <p>z<sub>t</sub> = 467,67</p> <p>T</p> <p>330x14</p> <p>13x1380</p> <p>400x36</p>	<p><b>Ocel: S355</b> E = 210 000 MPa</p> <p><b>Beton: C25/30</b> E<sub>cm</sub> = 30 500 MPa</p> <p><b>Plocha</b> A<sub>i</sub> = 0,1047 m<sup>2</sup></p> <p><b>Poloha těžiště</b> z<sub>t</sub> = 0,468 m</p> <p><b>Moment setrvačnosti</b> I<sub>y,i</sub> = 0,0355 m<sup>4</sup></p>
<p>Vnitřní nosník č. 3</p>  <p>beff = 3300</p> <p>240</p> <p>z<sub>t</sub> = 366,94</p> <p>T</p> <p>330x14</p> <p>13x1380</p> <p>400x36</p>	<p><b>Ocel: S355</b> E = 210 000 MPa</p> <p><b>Beton: C25/30</b> E<sub>cm</sub> = 30 500 MPa</p> <p><b>Plocha</b> A<sub>i</sub> = 0,1474 m<sup>2</sup></p> <p><b>Poloha těžiště</b> z<sub>t</sub> = 0,367 m</p> <p><b>Moment setrvačnosti</b> I<sub>y,i</sub> = 0,0394 m<sup>4</sup></p>

Obr. 4.5 Materiálové a průřezové charakteristiky krajního a vnitřního nosníku

### 4.3 Výpočet koncových sil

#### - VNĚJŠÍ NOSNÍK Č. 4

Pro výpočet účinků od zatížení teplotou je potřeba nosník rozdělit po výšce na úseky, jak je patrné z obr. 4.6 [7].



Obr. 4.6 Rozložení teplot ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 4

Nejdříve je potřeba stanovit poměrné deformace v jednotlivých bodech průřezu konstrukce podle vzorce (4.4) a poté deformace na úsecích podle vzorce (4.5).

$$\varepsilon_i = \alpha * T_i \quad (4.4)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i}{2} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_0 = 12 * 10^{-6} * 23,27 = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{2,792 * 10^{-4} + 2,792 * 10^{-4}}{2} = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_1 = 12 * 10^{-6} * 23,27 = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_2 = \frac{2,792 * 10^{-4} + 2,693 * 10^{-4}}{2} = 2,743 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_2 = 12 * 10^{-6} * 22,44 = 2,693 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_3 = \frac{2,693 * 10^{-4} + 2,351 * 10^{-4}}{2} = 2,522 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_3 = 12 * 10^{-6} * 19,59 = 2,351 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_4 = \frac{2,351 * 10^{-4} + 2,443 * 10^{-4}}{2} = 2,397 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_4 = 12 * 10^{-6} * 20,36 = 2,443 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_5 = \frac{2,443 * 10^{-4} + 2,081 * 10^{-4}}{2} = 2,262 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_5 = 12 * 10^{-6} * 17,34 = 2,081 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_6 = \frac{2,081 * 10^{-4} + 1,915 * 10^{-4}}{2} = 1,998 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_6 = 12 * 10^{-6} * 15,96 = 1,915 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_7 = \frac{1,915 * 10^{-4} + 1,800 * 10^{-4}}{2} = 1,857 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_7 = 12 * 10^{-6} * 15,00 = 1,800 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_8 = \frac{1,800 * 10^{-4} + 1,726 * 10^{-4}}{2} = 1,763 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_8 = 12 * 10^{-6} * 14,38 = 1,726 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_9 = \frac{1,726 * 10^{-4} + 1,732 * 10^{-4}}{2} = 1,729 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_9 = 12 * 10^{-6} * 14,43 = 1,732 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_{10} = \frac{1,732 * 10^{-4} + 1,732 * 10^{-4}}{2} = 1,732 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{17} = 12 * 10^{-6} * 14,43 = 1,732 * 10^{-4}$$

Rameno  $\bar{z}_i$  představuje vzdálenost působišť výslednice zatížení úseku  $i$  od horního okraje betonové desky.

$$\bar{z}_i = \frac{\varepsilon_{i-1} * (2 * z_{i-1} + z_i) + \varepsilon_i * (2 * z_i + z_{i-1})}{6 * \bar{\varepsilon}_i} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_1 &= \frac{2,792 * 10^{-4} * (2 * 0,03) + 2,792 * 10^{-4} * (0,03)}{6 * (2,792 * 10^{-4})} = 0,015 \text{ m} \\ \bar{z}_2 &= \frac{2,792 * 10^{-4} * (2 * 0,03 + 0,12) + 2,693 * 10^{-4} * (2 * 0,12 + 0,03)}{6 * (2,743 * 10^{-4})} = 0,075 \text{ m} \\ \bar{z}_3 &= \frac{2,693 * 10^{-4} * (2 * 0,12 + 0,21) + 2,351 * 10^{-4} * (2 * 0,21 + 0,12)}{6 * (2,522 * 10^{-4})} = 0,164 \text{ m} \\ \bar{z}_4 &= \frac{2,351 * 10^{-4} * (2 * 0,21 + 0,24) + 2,443 * 10^{-4} * (2 * 0,24 + 0,21)}{6 * (2,397 * 10^{-4})} = 0,225 \text{ m} \\ \bar{z}_5 &= \frac{2,443 * 10^{-4} * (2 * 0,24 + 0,305) + 2,081 * 10^{-4} * (2 * 0,305 + 0,24)}{6 * (2,262 * 10^{-4})} = 0,272 \text{ m} \\ \bar{z}_6 &= \frac{2,081 * 10^{-4} * (2 * 0,305 + 0,43) + 1,915 * 10^{-4} * (2 * 0,43 + 0,305)}{6 * (1,998 * 10^{-4})} = 0,367 \text{ m} \\ \bar{z}_7 &= \frac{1,915 * 10^{-4} * (2 * 0,43 + 0,68) + 1,800 * 10^{-4} * (2 * 0,68 + 0,43)}{6 * (1,857 * 10^{-4})} = 0,554 \text{ m} \\ \bar{z}_8 &= \frac{1,800 * 10^{-4} * (2 * 0,68 + 0,93) + 1,726 * 10^{-4} * (2 * 0,93 + 0,68)}{6 * (1,763 * 10^{-4})} = 0,804 \text{ m} \\ \bar{z}_9 &= \frac{1,726 * 10^{-4} * (2 * 0,93 + 1,62) + 1,732 * 10^{-4} * (2 * 1,62 + 0,93)}{6 * (1,729 * 10^{-4})} = 1,275 \text{ m} \\ \bar{z}_{10} &= \frac{1,732 * 10^{-4} * (2 * 1,62 + 1,656) + 1,732 * 10^{-4} * (2 * 1,656 + 1,62)}{6 * (1,732 * 10^{-4})} = 1,638 \text{ m} \end{aligned}$$

Pokud je zabráněno volnému roztažení úseku, vznikne v těžišti tohoto úseku síla působící na spřažený průřez.

$$F_i = E_i * \bar{\varepsilon}_i * h_i * b_i \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= 30,5 * 10^6 * 2,792 * 10^{-4} * 0,03 * 2,075 = 530,096 \text{ kN} \\ F_2 &= 30,5 * 10^6 * 2,743 * 10^{-4} * 0,09 * 2,075 = 1562,379 \text{ kN} \\ F_3 &= 30,5 * 10^6 * 2,522 * 10^{-4} * 0,09 * 2,075 = 1436,500 \text{ kN} \\ F_4 &= 30,5 * 10^6 * 2,397 * 10^{-4} * 0,03 * 2,075 = 455,100 \text{ kN} \\ F_5 &= 210 * 10^6 * 2,262 * 10^{-4} * 0,065 * 0,013 = 40,139 \text{ kN} \\ F_6 &= 210 * 10^6 * 1,998 * 10^{-4} * 0,125 * 0,013 = 68,182 \text{ kN} \\ F_7 &= 210 * 10^6 * 1,857 * 10^{-4} * 0,250 * 0,013 = 126,740 \text{ kN} \\ F_8 &= 210 * 10^6 * 1,763 * 10^{-4} * 0,250 * 0,013 = 120,325 \text{ kN} \\ F_9 &= 210 * 10^6 * 1,729 * 10^{-4} * 0,690 * 0,013 = 325,692 \text{ kN} \\ F_{10} &= 210 * 10^6 * 1,732 * 10^{-4} * 0,036 * 0,400 = 523,757 \text{ kN} \end{aligned}$$

---


$$\bar{F} = \sum F_i = 5188,427 \text{ kN}$$



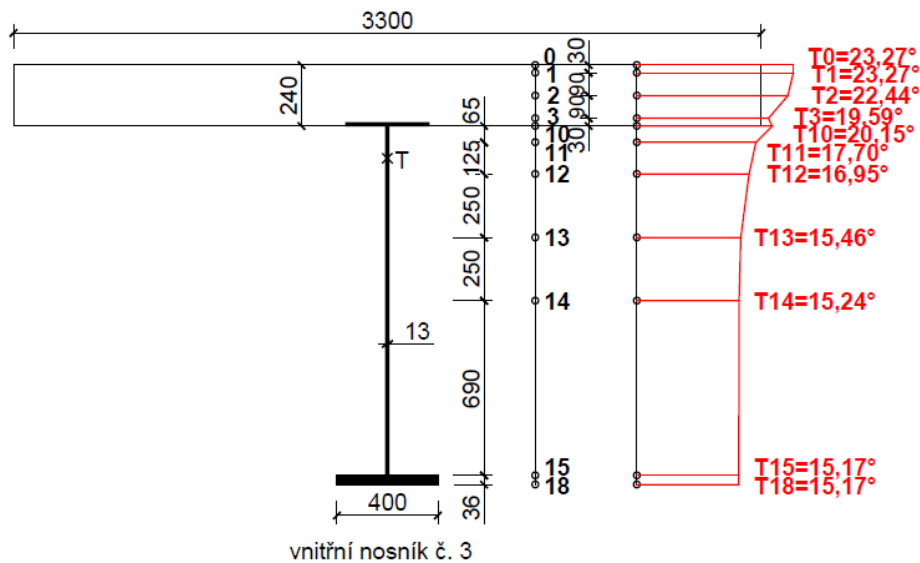
Soustavu sil nahradíme výslednicí  $\bar{F} = \sum F_i$  působící v těžišti spráženého průřezu a momentem  $\bar{M}$ , jehož velikost určíme z podmínky (4.8).

$$\sum(F_i * \bar{z}_i) = \bar{F} * z_t + \bar{M} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \bar{M} &= (530,096 * 0,015 + 1562,379 * 0,075 + 1436,500 * 0,164 + 455,100 * 0,225 + \\ &+ 40,139 * 0,272 + 68,182 * 0,367 + 126,740 * 0,554 + 120,325 * 0,804 + \\ &+ 325,692 * 1,275 + 523,757 * 1,638) - 5188,427 * 0,468 = \mathbf{-488,295 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

### - VNITŘNÍ NOSNÍK Č. 3

Koncové síly na vnitřním nosníku spočítáme obdobně dle rovnic (4.4) – (4.8) pro teplotní zatížení vykreslené na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Rozložení teplot ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 3

$$\varepsilon_0 = 12 * 10^{-6} * 23,27 = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_1 = 12 * 10^{-6} * 23,27 = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_2 = 12 * 10^{-6} * 22,44 = 2,693 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_3 = 12 * 10^{-6} * 19,59 = 2,351 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_4 = 12 * 10^{-6} * 20,15 = 2,418 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_5 = 12 * 10^{-6} * 17,70 = 2,124 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_6 = 12 * 10^{-6} * 16,95 = 2,034 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_7 = 12 * 10^{-6} * 15,46 = 1,855 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_8 = 12 * 10^{-6} * 15,24 = 1,829 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_9 = 12 * 10^{-6} * 15,17 = 1,820 * 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{17} = 12 * 10^{-6} * 15,17 = 1,820 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{2,792 * 10^{-4} + 2,792 * 10^{-4}}{2} = 2,792 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_2 = \frac{2,792 * 10^{-4} + 2,693 * 10^{-4}}{2} = 2,743 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_3 = \frac{2,693 * 10^{-4} + 2,351 * 10^{-4}}{2} = 2,522 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_4 = \frac{2,351 * 10^{-4} + 2,418 * 10^{-4}}{2} = 2,385 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_5 = \frac{2,418 * 10^{-4} + 2,124 * 10^{-4}}{2} = 2,271 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_6 = \frac{2,124 * 10^{-4} + 2,034 * 10^{-4}}{2} = 2,079 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_7 = \frac{2,034 * 10^{-4} + 1,855 * 10^{-4}}{2} = 1,945 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_8 = \frac{1,855 * 10^{-4} + 1,829 * 10^{-4}}{2} = 1,842 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_9 = \frac{1,829 * 10^{-4} + 1,820 * 10^{-4}}{2} = 1,825 * 10^{-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_{10} = \frac{1,820 * 10^{-4} + 1,820 * 10^{-4}}{2} = 1,820 * 10^{-4}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{2,792 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,03) + 2,792 \cdot 10^{-4} \cdot (0,03)}{6 \cdot (2,792 \cdot 10^{-4})} = 0,015 \text{ m} \\ \bar{Z}_2 &= \frac{2,792 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,03 + 0,12) + 2,693 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,12 + 0,03)}{6 \cdot (2,743 \cdot 10^{-4})} = 0,075 \text{ m} \\ \bar{Z}_3 &= \frac{2,693 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,12 + 0,21) + 2,351 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,21 + 0,12)}{6 \cdot (2,522 \cdot 10^{-4})} = 0,164 \text{ m} \\ \bar{Z}_4 &= \frac{2,351 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,21 + 0,24) + 2,418 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,24 + 0,21)}{6 \cdot (2,385 \cdot 10^{-4})} = 0,225 \text{ m} \\ \bar{Z}_5 &= \frac{2,418 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,24 + 0,305) + 2,124 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,305 + 0,24)}{6 \cdot (2,271 \cdot 10^{-4})} = 0,272 \text{ m} \\ \bar{Z}_6 &= \frac{2,124 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,305 + 0,43) + 2,034 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,43 + 0,305)}{6 \cdot (2,079 \cdot 10^{-4})} = 0,367 \text{ m} \\ \bar{Z}_7 &= \frac{2,034 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,43 + 0,68) + 1,855 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,68 + 0,43)}{6 \cdot (1,945 \cdot 10^{-4})} = 0,553 \text{ m} \\ \bar{Z}_8 &= \frac{1,855 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,68 + 0,93) + 1,829 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,93 + 0,68)}{6 \cdot (1,842 \cdot 10^{-4})} = 0,805 \text{ m} \\ \bar{Z}_9 &= \frac{1,829 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,93 + 1,62) + 1,820 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 1,62 + 0,93)}{6 \cdot (1,825 \cdot 10^{-4})} = 1,275 \text{ m} \\ \bar{Z}_{10} &= \frac{1,820 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 1,62 + 1,656) + 1,820 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 1,656 + 1,62)}{6 \cdot (1,820 \cdot 10^{-4})} = 1,638 \text{ m}\end{aligned}$$

$$F_1 = 30,5 \cdot 10^6 \cdot 2,792 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 \cdot 3,3 = 843,044 \text{ kN}$$

$$F_2 = 30,5 \cdot 10^6 \cdot 2,743 \cdot 10^{-4} \cdot 0,09 \cdot 3,3 = 2484,747 \text{ kN}$$

$$F_3 = 30,5 \cdot 10^6 \cdot 2,522 \cdot 10^{-4} \cdot 0,09 \cdot 3,3 = 2284,554 \text{ kN}$$

$$F_4 = 30,5 \cdot 10^6 \cdot 2,385 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 \cdot 3,3 = 720,151 \text{ kN}$$

$$F_5 = 210 \cdot 10^6 \cdot 2,271 \cdot 10^{-4} \cdot 0,065 \cdot 0,013 = 40,299 \text{ kN}$$

$$F_6 = 210 \cdot 10^6 \cdot 2,079 \cdot 10^{-4} \cdot 0,125 \cdot 0,013 = 70,946 \text{ kN}$$

$$F_7 = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,945 \cdot 10^{-4} \cdot 0,250 \cdot 0,013 = 132,746 \text{ kN}$$

$$F_8 = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,842 \cdot 10^{-4} \cdot 0,250 \cdot 0,013 = 125,717 \text{ kN}$$

$$F_9 = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,825 \cdot 10^{-4} \cdot 0,690 \cdot 0,013 = 343,775 \text{ kN}$$

$$F_{10} = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,820 \cdot 10^{-4} \cdot 0,036 \cdot 0,400 = 550,368 \text{ kN}$$

---


$$\bar{F} = \sum F_i = 7595,847 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}\bar{M} &= (843,044 \cdot 0,015 + 2484,747 \cdot 0,075 + 2284,554 \cdot 0,164 + 720,151 \cdot 0,225 + \\ &+ 40,299 \cdot 0,272 + 70,946 \cdot 0,367 + 132,746 \cdot 0,553 + 125,343 \cdot 0,805 + \\ &+ 343,775 \cdot 1,275 + 550,368 \cdot 1,638) - 7595,847 \cdot 0,367 = -500,815 \text{ kNm}\end{aligned}$$

#### 4.4 Stanovení vnitřních sil

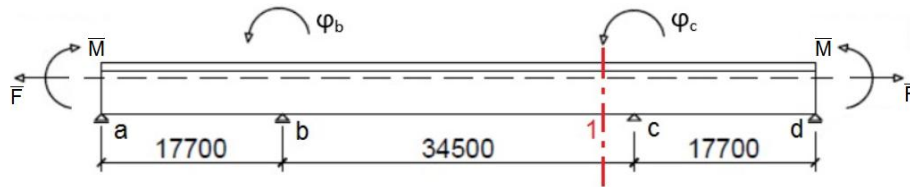
Nosník zatížíme koncovými silami  $\bar{F}$  a  $\bar{M}$  a stanovíme vnitřní síly ve sledovaném průřezu, tedy v průřezu, kde jsou umístěny teploměry.

Kdyby nosná konstrukce mostu byla staticky určitá, zatížení teplotou by v ní nevyvolalo změnu napjatosti, ale způsobilo by pouze změnu jejich deformací.

Hlavní nosná konstrukce sledovaného mostu je staticky neurčitá, proto v ní zatížení teplotou způsobí i změnu napjatosti. Výpočet momentů vyvolaných zatížením teplotou a statickou neurčitostí zkoumaného mostu byl proveden třemi různými způsoby a získané hodnoty byly navzájem porovnány.

##### 1) Zjednodušená deformační metoda aplikovaná na prutový model s konstantním průřezem

Deformační neznámé jsou  $\varphi_b$  a  $\varphi_c$  (viz. Obr. 4.8), přičemž z osové souměrnosti lze říci, že  $\varphi_b = -\varphi_c$



Obr. 4.8 Zavedení deformačních neznámých a poloha sledovaného průřezu

Podmínka rovnováhy pro  $\varphi_b$ :  $M_{ba} + M_{bc} = 0$

$$\begin{aligned} M_{ba} &= \frac{-\bar{M}}{2 * L_{ab}^2} * (L_{ab}^2 - 3a^2) + \frac{3}{4} * \frac{2 * EI}{L_{ab}} * (2\varphi_b) \\ &= \frac{-\bar{M}}{2 * 17,7^2} * 17,7^2 + \frac{3}{4} * \frac{2 * EI}{17,7} * (2\varphi_b) \\ &= \frac{-\bar{M}}{2} + \frac{3 * EI}{17,7} * \varphi_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{bc} &= \frac{2 * EI}{L_{bc}} * (2 * \varphi_b + \varphi_c) \\ &= \frac{2 * EI}{34,5} * (2 * \varphi_b - \varphi_c) = \frac{2 * EI}{34,5} * \varphi_b \end{aligned}$$

$$\text{p.r.} \Rightarrow \frac{-\bar{M}}{2} + \frac{3 * EI}{17,7} * \varphi_b + \frac{2 * EI}{34,5} * \varphi_b = 0$$

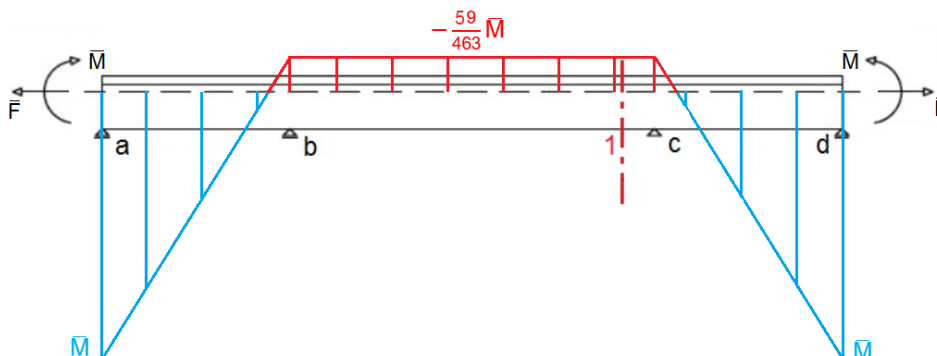
$$\frac{-\bar{M}}{2} + \left( \frac{3 * EI}{17,7} + \frac{2 * EI}{34,5} \right) * \varphi_b = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \varphi_b &= \frac{\bar{M}}{2} * \frac{1}{\frac{3 * EI}{17,7} + \frac{2 * EI}{34,5}} \\ &= \frac{4071 * \bar{M}}{1852 * EI} \end{aligned}$$

$$M_{ba} = \frac{-\bar{M}}{2} + \frac{3 * EI}{17,7} * \frac{4071 * \bar{M}}{1852 * EI} = \frac{-\bar{M}}{2} + \frac{345 * \bar{M}}{926} = \frac{-59}{463} * \bar{M}$$

Na obr. 4.9 je vykreslen průběh vnitřních momentů pro zjednodušenou deformační metodu. Moment v průřezu, v němž jsou umístěny snímače teploty (označen 1) tedy můžeme pomocí ZDM vyjádřit v závislosti na koncovém momentu jako:

$$M_1 = -\frac{59}{463} * \bar{M} \quad (4.9)$$



Obr. 4.9 Průběh vnitřních momentů pro ZDM

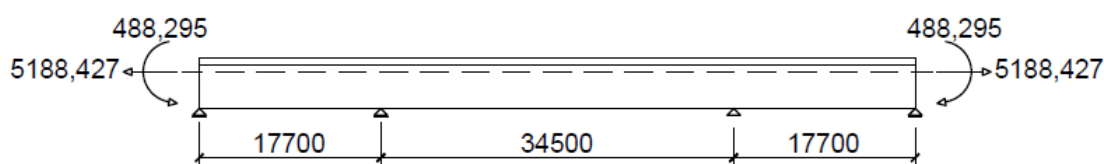
## 2) Prutový model s konstantním průřezem

V programu Dlubal RFEM 5.06 byl sestaven jednoduchý prutový model, který má po celé délce nosníku průřez stejný jako ve sledovaném řezu, ve kterém má spodní pásnice tloušťku 36 mm.

## 3) Prutový model s proměnným průřezem

Druhý model sestavený v programu Dlubal RFEM 5.06 již zohledňuje změnu tloušťky pásnice v rozmezí 14 mm až 46 mm po celé délce mostní konstrukce.

## - VNĚJŠÍ NOSNÍK Č. 4



Obr. 4.10 Koncové síly působící na nosník č. 4

1) Pro zjednodušenou deformační metodu po dosazení do rovnice (4.9):

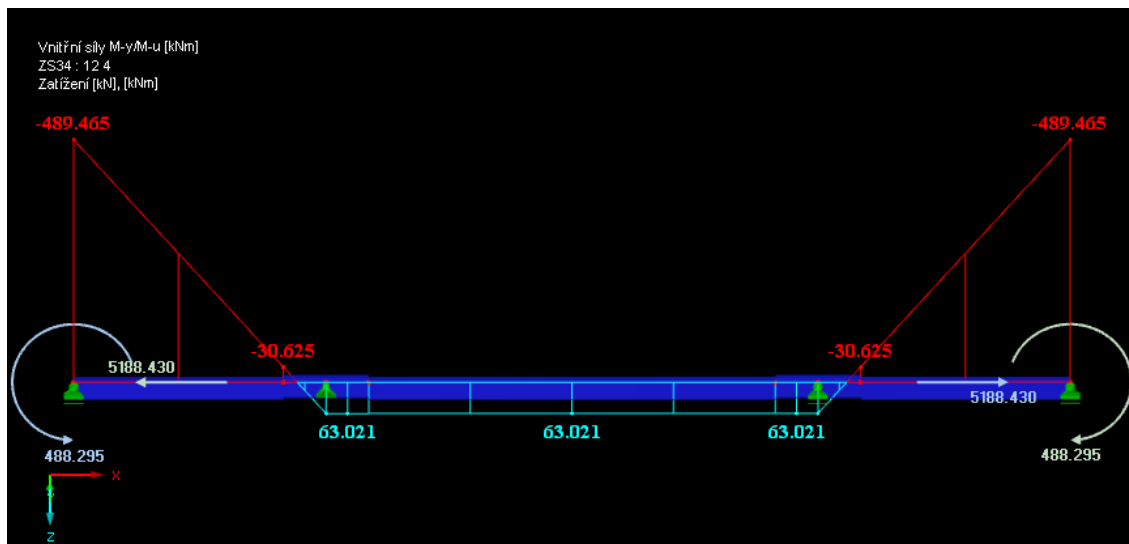
$$M_1 = -\frac{59}{463} * (-488,295) = 62,223 \text{ kNm}$$

2) Pro prutový model s konstantním průřezem:

$$M_1 = 56,107 \text{ kNm}$$

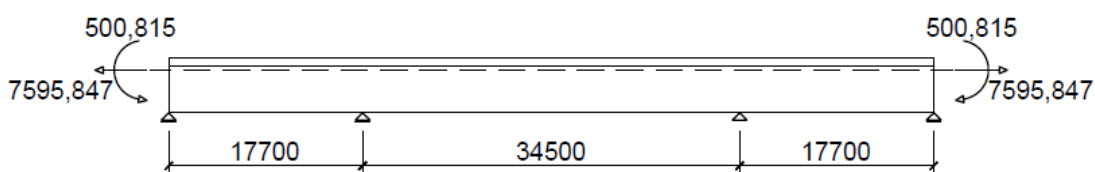
3) Pro prutový model s proměnným průřezem:

$$M_1 = 63,021 \text{ kNm (viz. Obr. 4.11)}$$



Obr. 4.11 Ohybové momenty vypočítané softwarem Dlubal RFEM 5.06

- VNITŘNÍ NOSNÍK Č. 3



Obr. 4.12 Koncové síly působící na nosník č. 3

1) Pro zjednodušenou deformační metodu po dosazení do rovnice (4.9):

$$M_1 = - \frac{59}{463} * (-500,815) = 63,819 \text{ kNm}$$

2) Pro prutový model s konstantním průřezem:

$$M_1 = 56,797 \text{ kNm}$$

3) Pro prutový model s proměnným průřezem:

$$M_1 = 64,357 \text{ kNm}$$

	1) $M_1$ [kNm]	2) $M_1$ [kNm]	3) $M_1$ [kNm]	3) $M_1/1) M_1$	3) $M_1/2) M_1$
Vnější nosník	62,223	56,107	63,021	1,0128248	1,1232288
Vnitřní nosník	63,819	56,797	64,357	1,0084301	1,1331056

Tab. 4.2 Porovnání vnitřních momentů

V tab. 4.2 jsou přehledně zobrazeny hodnoty momentů ve sledovaném průřezu včetně jejich porovnání. Jak je vidět, hodnoty vypočítané zjednodušenou deformační metodou se velice blíží momentům zjištěným z modelu, který zohledňuje změnu průřezu nosníku po jeho délce. Z dalších výpočtů vyplynulo, že poměr 3)  $M_1/1) M_1$  nabývá pro vnější nosník vždy hodnot mezi 1,0126 až 1,0129 a pro vnitřní vždy mezi 1,00838 až 1,00847. Z těchto důvodů je možné v dalším výpočtu stanovovat vnitřní

momenty pomocí ZDM (dosazením do (4.9) ) a vynásobením konstantou 1,0128 (pro vnější nosník) nebo 1,0084 (pro vnitřní).

#### 4.5 Výsledná napětí

V každém bodě průřezu se stanoví hodnota napětí od zatížení rozdílovou složkou teploty, která vznikne sečtením dvou stavů. V prvním je zabráněno volnému přetvoření vláken působením teploty a v druhém stavu figurují účinky vnitřních sil vyvolaných koncovými silami  $\bar{F}$  a  $\bar{M}$  a statickou neurčitostí konstrukce.

$$\begin{aligned}\sigma_{c,i} &= \frac{1}{n} * \left( -E_a * \varepsilon_i + \frac{\bar{F}}{A} + \frac{M_1}{I_y} * (z_i - z_t) \right); \\ \sigma_{a,i} &= \left( -E_a * \varepsilon_i + \frac{\bar{F}}{A} + \frac{M_1}{I_y} * (z_i - z_t) \right)\end{aligned}\quad (4.10)$$

kde  $n$  je poměr modulů pružnosti oceli a betonu ( $n=E_a/E_{cm}$ ),  $\sigma_{c,i}$  je napětí v betonové desce a  $\sigma_{a,i}$  napětí v ocelovém nosníku

#### - VNĚJŠÍ NOSNÍK Č. 4

$$\sigma_{c,1} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,792 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,03 - 0,468) \right) * 10^{-3} = -1,432 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,2} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,693 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,12 - 0,468) \right) * 10^{-3} = -1,103 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,351 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,21 - 0,468) \right) * 10^{-3} = -0,036 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,4} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,443 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,24 - 0,468) \right) * 10^{-3} = -0,313 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,4} = \left( -210 * 10^6 * 2,443 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,24 - 0,468) \right) * 10^{-3} = -2,153 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,5} = \left( -210 * 10^6 * 2,081 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,305 - 0,468) \right) * 10^{-3} = 5,582 \text{ MPa}$$

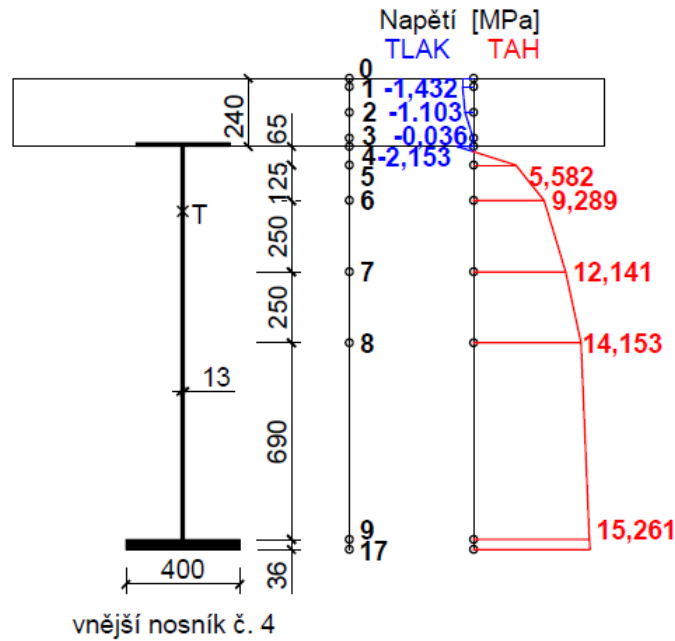
$$\sigma_{a,6} = \left( -210 * 10^6 * 1,915 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,43 - 0,468) \right) * 10^{-3} = 9,289 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,7} = \left( -210 * 10^6 * 1,800 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,68 - 0,468) \right) * 10^{-3} = 12,141 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,8} = \left( -210 * 10^6 * 1,726 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (0,93 - 0,468) \right) * 10^{-3} = 14,153 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,9} = \left( -210 * 10^6 * 1,732 * 10^{-4} + \frac{5188,427}{0,1047} + \frac{63,021}{0,0355} * (1,62 - 0,468) \right) * 10^{-3} = 15,261 \text{ MPa}$$

Vykreslení normálového napětí po výšce průřezu č. 4 je zobrazeno na obr. 4.13



Obr. 4.13 Napětí od zatížení teplotou ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 4

- VNITŘNÍ NOSNÍK Č. 3

$$\sigma_{c,1} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,792 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,03 - 0,367) \right) * 10^{-3} = -1,119 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,2} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,693 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,12 - 0,367) \right) * 10^{-3} = -0,785 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,351 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,21 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 0,280 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,10} = \frac{1}{6,885} * \left( -210 * 10^6 * 2,418 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,24 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 0,082 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,10} = \left( -210 * 10^6 * 2,418 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,24 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 0,567 \text{ MPa}$$

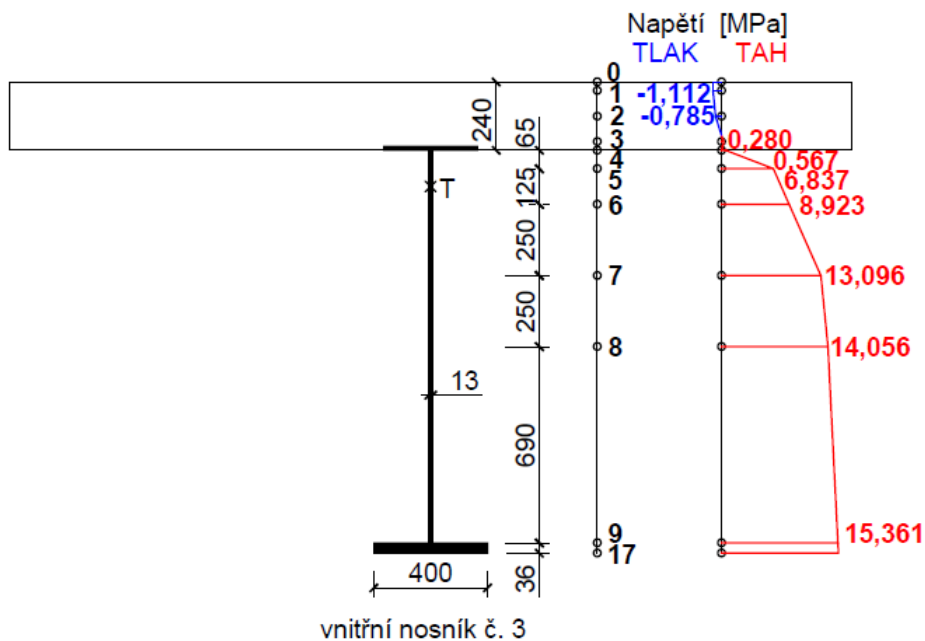
$$\sigma_{a,11} = \left( -210 * 10^6 * 2,124 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,305 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 6,837 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,12} = \left( -210 * 10^6 * 2,034 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,43 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 8,923 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,13} = \left( -210 * 10^6 * 1,855 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,68 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 13,096 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,14} = \left( -210 * 10^6 * 1,829 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (0,93 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 14,056 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{a,15} = \left( -210 * 10^6 * 1,820 * 10^{-4} + \frac{7595,847}{0,1474} + \frac{64,357}{0,0394} * (1,62 - 0,367) \right) * 10^{-3} = 15,361 \text{ MPa}$$



Obr. 4.14 Napětí od zatížení teplotou ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 3

#### 4.6 Maximální hodnoty napětí

Pro každý čas extrémního zatížení teplotou uvedený v tab. 4.1 byly vypočteny z rovnic (4.4) až (4.10) průběhy napětí po výšce průřezu. Tyto hodnoty jsou vypsány v tab. 4.3 (vnější nosník) a tab. 4.4 (vnitřní nosník). V tabulce jsou zvýrazněny pro každý sledovaný bod průřezu maximální tlak a maximální tah. Extrémy v jednotlivých bodech jsou pro větší přehlednost vypsány v tab. 4.5.



VNĚJŠÍ NOSNÍK č. 4										
Den \ Napětí [MPa]	$\sigma_{c,1}$	$\sigma_{c,2}$	$\sigma_{c,3}$	$\sigma_{c,4}$	$\sigma_{a,4}$	$\sigma_{a,5}$	$\sigma_{a,6}$	$\sigma_{a,7}$	$\sigma_{a,8}$	$\sigma_{a,9}$
23.7.2009 14:45	1,384	1,131	0,397	0,366	2,520	-6,283	-10,586	-14,831	-16,299	-16,254
20.12.2009 8:00	-0,853	-0,564	0,058	-0,269	-1,851	2,974	5,106	6,950	8,420	7,924
21.12.2009 11:15	2,181	1,871	0,982	0,814	5,606	-6,736	-16,305	-39,755	-43,532	-20,930
3.5.2009 4:45	-1,518	-1,189	-0,236	-0,585	-4,027	4,718	9,520	13,991	16,768	17,490
19.10.2009 9:30	1,729	1,648	1,196	1,149	7,910	-1,678	-10,526	-39,029	-49,896	-16,155
12.7.2010 14:30	0,759	0,643	0,342	0,151	1,041	-5,594	-8,047	-9,823	-9,562	-8,943
20.12.2010 8:00	0,999	0,643	-0,148	-0,143	-0,987	-4,869	-6,313	-7,568	-7,295	-8,547
7.3.2010 10:30	2,184	2,100	1,698	1,233	8,492	-4,243	-12,373	-29,414	-57,267	-26,692
13.6.2010 3:45	-1,665	-1,213	-0,162	-0,477	-3,287	5,200	9,935	14,101	16,841	18,133
7.3.2010 10:15	2,094	2,036	1,607	1,229	8,465	-3,959	-12,286	-31,354	-57,903	-24,206
27.1.2010 9:00	-0,654	-0,221	0,689	0,153	1,051	-2,243	-10,875	-14,513	-13,022	11,010
24.8.2011 15:30	0,760	0,586	0,211	0,268	1,846	-3,342	-5,703	-8,229	-8,809	-8,702
24.2.2011 7:00	-0,538	-0,385	-0,029	-0,191	-1,313	1,784	3,093	4,118	5,118	5,890
25.2.2011 11:15	1,496	1,334	0,751	0,915	6,303	0,880	-2,276	-6,427	-10,219	-27,453
25.5.2011 4:00	-1,746	-1,310	0,129	-0,271	-1,868	6,457	10,603	13,745	15,980	17,642
20.8.2012 16:00	1,519	1,110	0,146	0,314	2,162	-6,721	-10,653	-14,437	-15,485	-15,702
12.2.2012 7:15	-0,935	-0,610	0,025	-0,441	-3,036	2,302	4,912	7,119	8,758	9,508
12.2.2012 12:00	1,695	1,618	0,994	0,941	6,480	-0,967	-5,402	-11,147	-16,022	-30,327
30.7.2012 4:45	-1,438	-1,107	-0,032	-0,313	-2,154	5,531	9,354	12,232	14,143	15,307
30.7.2012 4:30	-1,432	-1,103	-0,036	-0,313	-2,153	5,582	9,289	12,141	14,153	15,261
28.7.2013 15:00	0,917	0,715	0,295	0,372	2,564	-4,171	-7,224	-10,325	-11,102	-10,664
26.1.2013 6:30	-0,161	0,200	1,078	0,629	4,331	10,773	13,756	15,907	17,243	17,026
31.10.2013 11:30	1,260	1,178	0,757	0,911	6,275	2,137	-0,584	-4,378	-7,421	-25,561
21.6.2013 4:15	-1,822	-1,351	0,064	-0,072	-0,498	8,555	12,542	15,020	16,663	17,921
4.8.2013 16:45	-1,306	-1,171	0,555	-0,355	-2,442	13,041	17,006	17,857	19,169	6,989
10.6.2014 15:15	0,717	0,618	0,303	0,326	2,244	-4,167	-7,145	-10,119	-10,703	-8,202
26.1.2014 8:45	-0,533	-0,332	0,076	-0,268	-1,847	1,239	2,736	3,813	4,397	5,137
26.3.2014 12:45	1,023	0,841	0,226	0,317	2,182	-3,697	-6,858	-10,094	-11,317	-12,279
7.9.2014 12:00	0,566	0,459	0,133	0,357	2,460	-1,409	-3,404	-5,820	-6,847	-6,966
28.11.2014 11:00	-0,047	0,005	0,004	0,024	0,163	0,180	0,032	-0,403	0,113	0,286
15.3.2014 0:15	-0,655	-0,525	0,056	-0,158	-1,085	3,007	4,724	5,927	7,139	6,368
8.8.2015 15:30	0,913	0,731	0,307	0,196	1,350	-4,869	-7,687	-10,686	-11,383	-10,289
7.2.2015 7:30	-0,545	-0,366	0,045	-0,194	-1,333	1,748	3,152	4,039	4,854	5,368
21.10.2015 9:45	0,161	0,145	0,006	0,012	0,086	-0,733	-1,287	-2,059	-1,834	-1,661
10.4.2015 23:15	-0,311	-0,216	-0,011	-0,086	-0,594	1,316	2,194	2,720	3,644	2,904
28.5.2015 13:00	0,980	0,800	0,197	0,233	1,608	-4,852	-7,642	-10,627	-11,635	-10,801
10.4.2015 19:30	0,236	0,194	0,133	0,006	0,038	-0,362	-0,758	-1,397	-1,020	-4,057

Tab. 4.3 Hodnoty napětí ve všech bodech po výšce průřezu v časech z tab. 4.1 pro vnější nosník

VNITŘNÍ NOSNÍK č. 3										
Den \ Napětí [MPa]	$\sigma_{c,1}$	$\sigma_{c,2}$	$\sigma_{c,3}$	$\sigma_{c,10}$	$\sigma_{a,10}$	$\sigma_{a,11}$	$\sigma_{a,12}$	$\sigma_{a,13}$	$\sigma_{a,14}$	$\sigma_{a,15}$
16.7.2007 17:15	0,542	0,454	0,037	-0,348	-2,399	-4,731	-6,367	-7,541	-8,416	-8,507
23.12.2007 9:45	-0,132	-0,037	0,087	-0,102	-0,704	0,051	0,717	1,022	0,909	1,119
18.5.2007 12:15	0,691	0,477	-0,159	-0,151	-1,040	-4,623	-6,492	-8,051	-9,137	-8,990
9.8.2007 11:00	0,337	0,218	-0,132	0,067	0,462	-1,587	-3,169	-4,176	-4,943	-3,816
30.5.2007 10:45	-0,352	-0,171	0,147	0,154	1,061	1,926	2,354	2,630	2,536	3,631
1.7.2007 20:00	-0,097	-0,030	0,261	-0,425	-2,929	-0,237	1,012	1,903	1,908	-0,879
29.7.2008 17:30	0,290	0,273	0,120	-0,246	-1,695	-2,870	-3,822	-4,542	-5,233	-5,501
31.12.2008 9:30	-0,170	-0,088	0,051	-0,048	-0,329	0,434	1,142	1,672	1,729	2,188
9.4.2008 14:45	1,272	0,878	-0,242	-0,520	-3,579	-9,203	-12,229	-14,541	-15,864	-16,669
24.6.2008 5:00	-1,478	-1,000	0,490	0,108	0,746	9,482	13,581	16,813	17,943	18,596
11.7.2008 10:15	0,965	0,696	-0,279	-0,340	-2,339	-7,179	-9,918	-11,716	-12,741	-11,841
1.6.2008 17:30	-0,344	-0,248	0,446	-0,211	-1,454	3,193	4,978	5,780	5,444	0,705
23.7.2009 15:00	0,897	0,644	-0,116	-0,270	-1,859	-6,050	-8,790	-10,901	-11,991	-12,623
20.12.2009 9:00	-0,678	-0,378	0,243	0,182	1,256	4,119	5,030	6,854	7,051	7,389
3.4.2009 14:00	1,133	0,762	-0,207	-0,298	-2,053	-7,287	-10,432	-12,821	-14,210	-15,213
27.5.2009 4:30	-1,537	-0,959	0,626	0,327	2,254	10,175	13,529	15,693	16,429	17,330
21.12.2009 2:45	0,543	0,494	-0,261	-0,096	-0,663	-4,987	-5,896	-7,714	-8,089	-6,843
13.4.2009 5:00	-1,054	-0,831	-0,099	0,216	1,490	8,904	12,657	15,628	16,741	16,996
12.7.2010 17:15	0,253	0,246	0,123	-0,260	-1,792	-2,804	-3,315	-4,337	-5,026	-4,762
20.12.2010 9:00	0,810	0,484	-0,215	-0,558	-3,840	-6,236	-6,724	-7,700	-8,301	-9,128
18.3.2010 13:00	1,199	0,829	-0,356	-0,305	-2,101	-7,672	-9,488	-13,119	-14,495	-15,493
29.6.2010 4:30	-1,212	-0,835	0,477	-0,200	-1,377	6,078	8,592	13,619	15,021	15,850
24.8.2011 16:45	0,433	0,305	0,026	-0,271	-1,867	-3,444	-4,059	-5,291	-5,872	-6,423
24.2.2011 7:45	-0,389	-0,236	0,095	0,012	0,086	2,016	2,796	4,356	4,502	5,087
18.5.2011 11:15	1,100	0,826	-1,092	-0,179	-1,233	-6,654	-7,923	-10,462	-10,719	-8,734
29.6.2011 4:15	-1,198	-0,842	0,361	-0,093	-0,638	6,657	9,074	13,907	15,160	16,522
29.6.2011 3:00	-1,170	-0,835	0,459	-0,178	-1,226	6,279	8,703	13,552	14,828	15,480
20.8.2012 17:15	0,997	0,651	-0,111	-0,518	-3,567	-7,095	-8,349	-10,856	-11,792	-13,482
12.2.2012 7:30	-0,749	-0,427	0,236	0,081	0,555	3,824	5,122	7,718	8,139	8,957
16.3.2012 14:15	1,595	1,082	-0,447	-0,326	-2,246	-10,395	-12,925	-17,984	-19,709	-20,513
30.7.2012 4:30	-1,112	-0,785	0,280	0,082	0,567	6,837	8,924	13,096	14,056	15,361
14.8.2012 2:15	-0,750	-0,567	0,309	-0,245	-1,686	3,823	5,694	9,436	10,315	10,229
28.7.2013 18:30	0,343	0,258	0,094	-0,396	-2,729	-3,057	-3,349	-3,932	-4,338	-5,731
26.1.2013 6:30	-1,002	-0,617	0,286	0,156	1,077	5,644	7,351	10,765	11,469	12,516
18.4.2013 14:45	1,017	0,701	-0,201	-0,378	-2,601	-7,447	-9,066	-12,305	-13,336	-13,101
21.6.2013 3:30	-1,432	-1,015	0,517	0,153	1,053	9,493	11,715	16,158	17,260	18,380
4.8.2013 16:45	-0,994	-0,862	0,862	-0,101	-0,699	11,510	13,047	16,122	16,632	7,230
20.7.2014 17:45	0,342	0,273	0,069	-0,319	-2,195	-3,041	-3,506	-4,436	-4,882	-5,630
26.1.2014 8:45	-0,497	-0,295	0,114	0,246	1,697	3,578	4,223	5,514	5,595	5,741
9.7.2014 8:45	-0,682	-0,425	0,180	0,234	1,609	4,225	5,060	6,731	6,962	8,748
10.6.2014 11:45	0,286	0,188	-0,097	0,051	0,351	-1,589	-2,428	-4,105	-4,752	-3,160
1.12.2014 16:00	-0,175	-0,082	0,088	-0,032	-0,221	0,677	1,023	1,715	1,685	1,740
7.8.2014 19:30	-0,069	-0,039	0,073	-0,233	-1,607	-0,237	0,133	0,873	0,993	0,918
8.8.2015 17:15	0,468	0,357	0,044	-0,319	-2,197	-3,883	-4,608	-6,058	-6,733	-7,255
7.2.2015 7:45	-0,432	-0,248	0,175	-0,035	-0,240	2,166	3,005	4,683	4,892	4,897
28.5.2015 13:30	0,653	0,476	-0,103	-0,195	-1,342	-5,005	-6,152	-8,447	-9,604	-8,749
7.11.2015 21:00	0,074	0,072	0,018	-0,232	-1,601	-1,169	-0,981	-0,605	-0,851	-1,066
29.5.2015 6:30	-0,313	-0,192	0,027	-0,061	-0,422	1,277	1,887	3,107	3,350	5,061
7.11.2015 21:30	0,099	0,092	0,004	-0,243	-1,674	-1,374	-1,263	-1,041	-1,251	-1,270

Tab. 4.4 Hodnoty napětí ve všech bodech po výšce průřezu v časech z tab. 4.1 pro vnitřní nosník

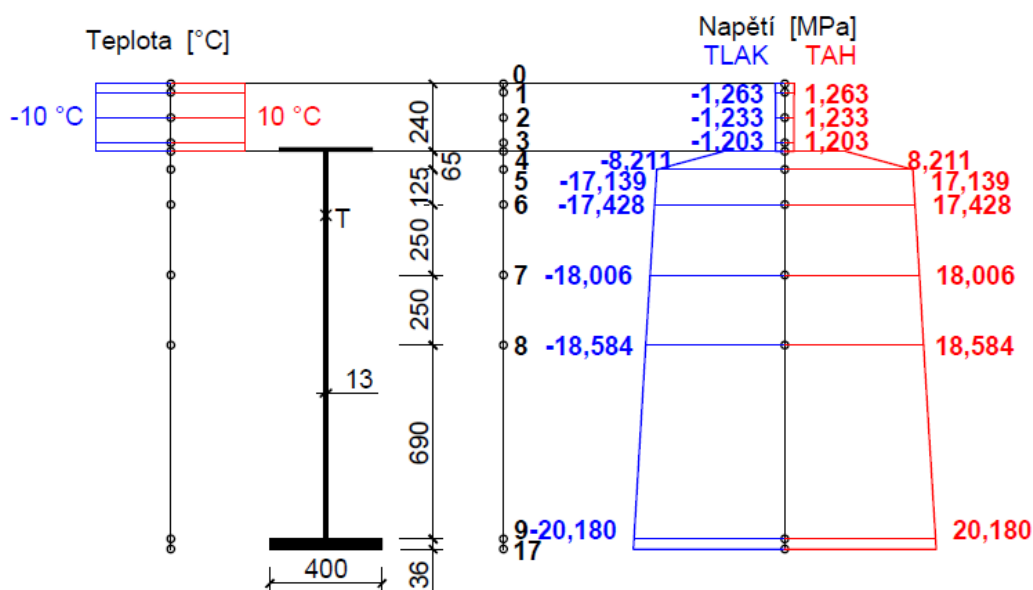
VNĚJŠÍ NOSNÍK č. 4										
SONDA	1	2	3	4 <sub>c</sub>	4 <sub>a</sub>	5	6	7	8	9
<b>MAX TLAK</b>	-1,822	-1,351	-0,236	-0,585	-4,027	-6,736	-16,305	-39,755	-57,903	-30,327
<b>MAX TAH</b>	2,184	2,100	1,698	1,233	8,492	13,041	17,006	17,857	19,169	18,133
VNITŘNÍ NOSNÍK č.3										
SONDA	1	2	3	10 <sub>c</sub>	10 <sub>a</sub>	11	12	13	14	15
<b>MAX TLAK</b>	-1,537	-1,015	-1,092	-0,558	-3,840	-10,395	-12,925	-17,984	-19,709	-20,513
<b>MAX TAH</b>	1,595	1,082	0,862	0,327	2,254	11,510	13,581	16,813	17,943	18,596

*Tab. 4.5 Maximální napětí v jednotlivých bodech*

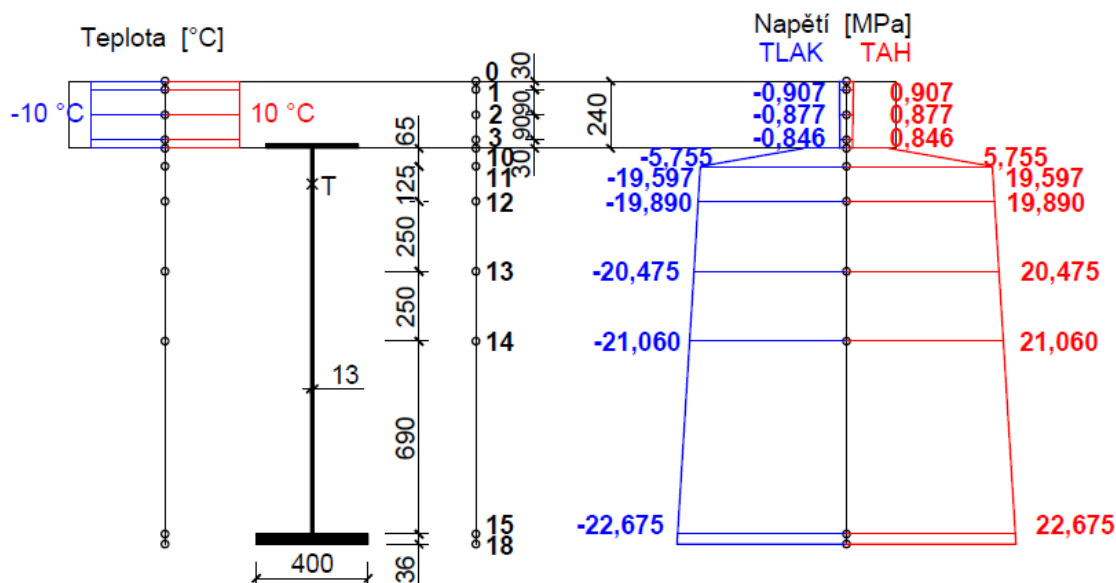
## 5 HODNOTY NAPĚTÍ DLE NORMY ČSN EN 1991-1-5

Norma [4] uvádí pro ocelobetonové konstrukce dva postupy (viz obr. 2.3). Hodnoty napětí se stanoví ze zjednodušeného postupu, který podle normy dává horní mez účinků teploty. Tyto hodnoty poté můžeme porovnat s maximálními hodnotami získanými za celou dobu experimentu.

Napětí se vypočítá podle vzorců (4.4) až (4.10) zvláště pro vnější a vnitřní nosník. Na obr. 5.1 a 5.2 jsou vykreslena rozložení teplot a příslušné průběhy napětí po výšce průřezu.



Obr. 5.1 Hodnoty napětí odpovídající rozdílové složce teploty dle normy pro nosník č. 4



Obr. 5.2 Hodnoty napětí odpovídající rozdílové složce teploty dle normy pro nosník č. 3

## 6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

### 6.1 Porovnání hodnot napětí

V tab. 6.1 jsou zaznamenány extrémní hodnoty napětí spočítané ve všech bodech průřezu, dále napětí vypočítané podle normy ČSN EN 1991-1-5 a jejich poměr.

VNĚJŠÍ NOSNÍK č. 4						
	TLAK			TAH		
	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$
1	-1,822	-1,263	<b>1,443</b>	2,184	1,263	<b>1,729</b>
2	-1,351	-1,233	<b>1,096</b>	2,100	1,233	<b>1,703</b>
3	-0,236	-1,203	<b>0,196</b>	1,698	1,203	<b>1,412</b>
4 <sub>c</sub>	-0,585	-1,193	<b>0,490</b>	1,233	1,193	<b>1,034</b>
4 <sub>a</sub>	-4,027	-8,211	<b>0,490</b>	8,492	8,211	<b>1,034</b>
5	-6,736	-17,139	<b>0,393</b>	13,041	17,139	<b>0,761</b>
6	-16,305	-17,428	<b>0,936</b>	17,006	17,428	<b>0,976</b>
7	-39,755	-18,006	<b>2,208</b>	17,857	18,006	<b>0,992</b>
8	-57,903	-18,584	<b>3,116</b>	19,169	18,584	<b>1,031</b>
9	-30,327	-20,180	<b>1,503</b>	18,133	20,180	<b>0,899</b>
VNITŘNÍ NOSNÍK č.3						
	TLAK			TAH		
	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$
1	-1,537	-0,90721	<b>1,695</b>	1,595	0,907212	<b>1,758</b>
2	-1,01468	-0,87662	<b>1,157</b>	1,082141	0,876623	<b>1,234</b>
3	-1,09214	-0,84603	<b>1,291</b>	0,862263	0,846033	<b>1,019</b>
10 <sub>c</sub>	-0,55777	-0,83584	<b>0,667</b>	0,327376	0,835837	<b>0,392</b>
10 <sub>a</sub>	-3,84036	-5,75494	<b>0,667</b>	2,254062	5,75494	<b>0,392</b>
11	-10,3949	-19,5972	<b>0,530</b>	11,50978	19,59717	<b>0,587</b>
12	-12,9246	-19,8897	<b>0,650</b>	13,58143	19,88969	<b>0,683</b>
13	-17,984	-20,4747	<b>0,878</b>	16,81293	20,47474	<b>0,821</b>
14	-19,7086	-21,0598	<b>0,936</b>	17,94338	21,05979	<b>0,852</b>
15	-20,5135	-22,6745	<b>0,905</b>	18,59563	22,67451	<b>0,820</b>

DO 1,00
1,00 - 1,50
1,50 - 2,00
NAD 2,00

Tab. 6.1 Přehled maximálních napětí

Zde je vidět, že v zhruba polovině sledovaných bodů napětí vyhodnocené z výsledků experimentu nepřesáhlo hodnoty napětí určené na základě zatížení teplotou z normy [4]. Na vnějším nosníku se vyskytují větší rozdíly výsledků než na vnitřním a větší napětí z experimentu oproti normě vznikají v tlaku. Je to především z důvodu častého oslunění nosníku č. 4 během dopoledních hodin. Nejvíce vystavena slunci je spodní polovina stojiny a dolní pásnice, zbytek nosníku je zastíněn samotným mostem nebo je alespoň částečně zastíněn billboardy, které jsou na něm momentálně zavěšeny (viz obr. 3.4). Podíváme-li se blíže na teploty, při nichž vzniklo extrémní napětí vyhodnocené z experimentu, které převyšuje napětí stanovené podle normy [4] více, než dvojnásobně, pak jde o dvě hodnoty.

Tlakové napětí 57,903 MPa v místě teplotního snímače číslo 8 vzniklo dne 7. 3. 2010 v 10:15. Taktěž tlakové napětí 39,755 MPa v místě sondy číslo 7 bylo zjištěno dne 21. 12. 2009 v 11:15. Tedy v obou případech se jedná o chladné měsíce a dobu okolo poledne.

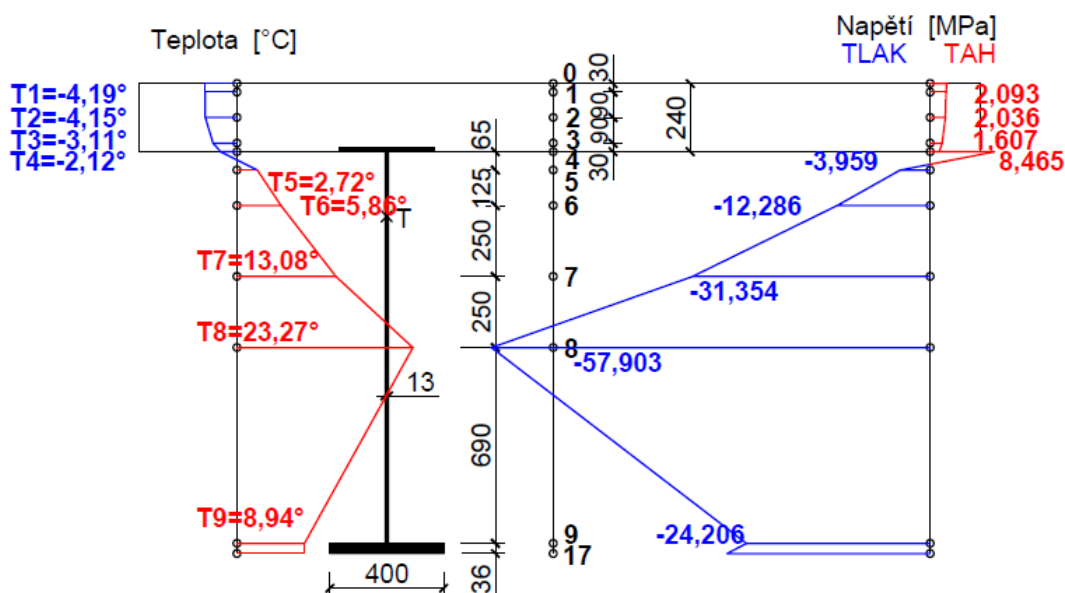
Tab. 6.2 zobrazuje naměřené teploty jednotlivých teplotních sond v těchto dvou z hlediska zatížení sledovaného mostu teplotou významných časech.

7.3.2010 10:15						21.12.2009 11:15					
deska	1	-4,19				deska	1	-8,22			
	2	-4,15					2	-7,48			
	3	-3,11					3	-5,16			
VNE	4	-2,12	VNI	10	-4,34	VNE	4	-4,74	VNI	10	-5,02
	5	2,72		11	-3,05		5	0,08		11	-3,04
	6	5,86		12	X		6	3,73		12	X
	7	13,08		13	-2,05		7	12,74		13	-1,69
	8	<b>23,27</b>		14	-1,78		8	<b>13,94</b>		14	-1,32
	9	8,94		15	-2,74		9	4,14		15	-1,79
vzduch	16	-2,11				vzduch	16	-1,94			

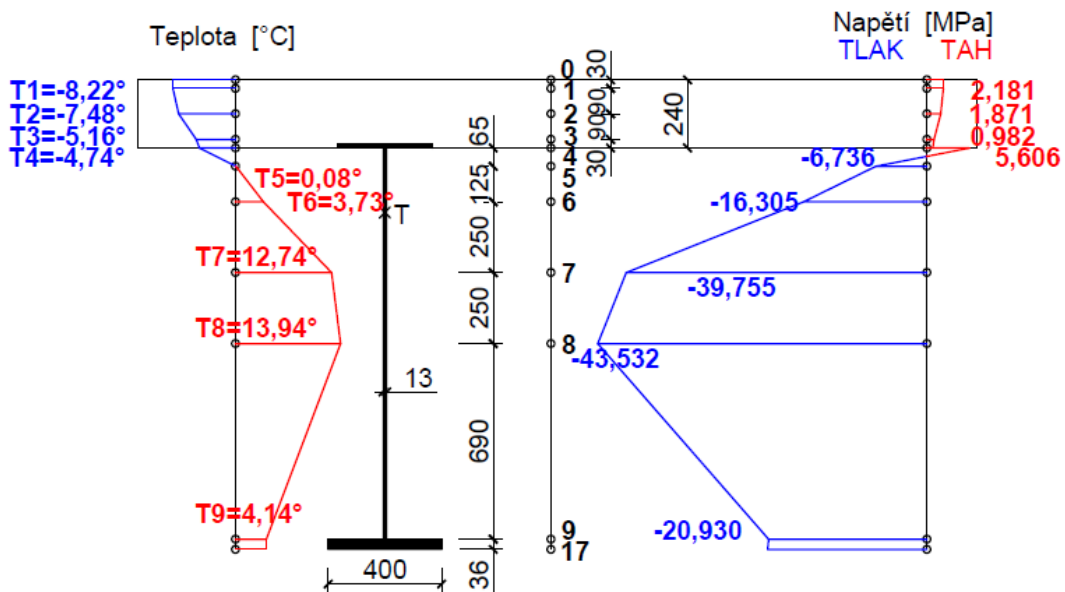
Tab. 6.2 Přehled teplot naměřených 7. 3. 2010 10:15 a 21. 12. 2009 11:15

Zvýrazněná čísla v tabulce představují nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotu v jeden okamžik po výšce průřezu. V prvním případě činí v jednom okamžiku a v jednom průřezu rozdíl těchto teplot 27,46 °C a v druhém případě je teplotní rozdíl 22,16 °C.

Následující obrázky (obr. 6.1 a 6.2) ukazují, jak vypadal průběh teplot a napětí v těchto dnech na vnějším nosníku.



Obr. 6.1 Průběh teploty a napětí na vnějším nosníku dne 7. 3. 2010 v 10:15



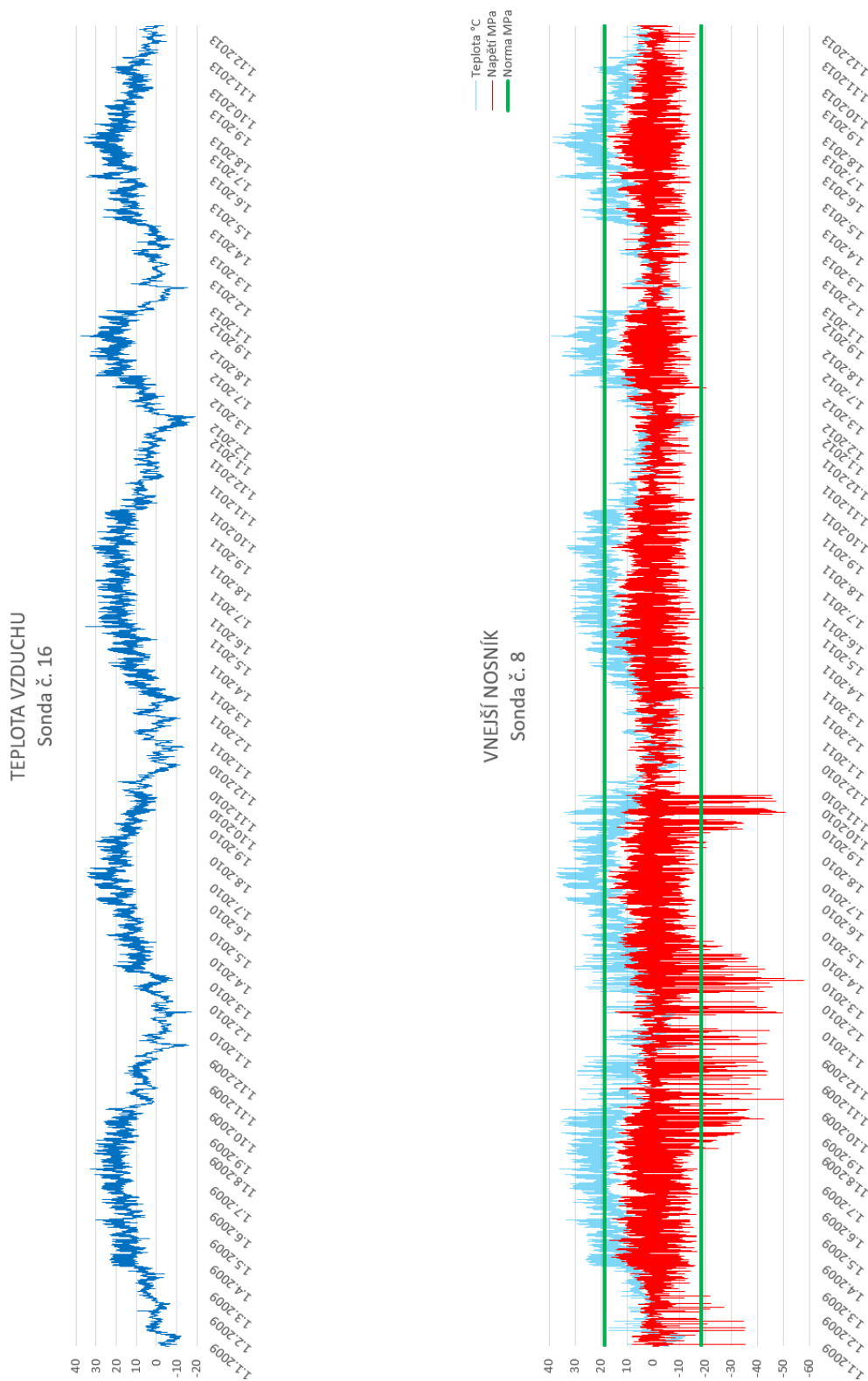
Obr. 6.2 Průběh teploty a napětí na vnějším nosníku dne 21. 12. 2009 11:15

V tab. 6.3 je přehled napětí těchto dvou případů po celé výšce průřezu porovnané s hodnotami vypočtenými podle normy [4].

	7.3.2010 10:15			21.12.2009 11:15		
	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}$	$\sigma_{norm}$	$\sigma_{skut}/\sigma_{norm}$
1	2,093937	1,263	<b>1,658</b>	2,181	1,263	<b>1,727</b>
2	2,036488	1,233	<b>1,652</b>	1,871	1,233	<b>1,518</b>
3	1,606908	1,203	<b>1,336</b>	0,982	1,203	<b>0,817</b>
4 <sub>c</sub>	1,229	1,193	<b>1,031</b>	0,814	1,193	<b>0,683</b>
4 <sub>a</sub>	8,465	8,211	<b>1,031</b>	5,606	8,211	<b>0,683</b>
5	-3,959	-17,139	<b>0,231</b>	-6,736	-17,139	<b>0,393</b>
6	-12,286	-17,428	<b>0,705</b>	-16,305	-17,428	<b>0,936</b>
7	-31,354	-18,006	<b>1,741</b>	-39,755	-18,006	<b>2,208</b>
8	-57,903	-18,584	<b>3,116</b>	-43,532	-18,584	<b>2,342</b>
9	-24,206	-20,180	<b>1,200</b>	-20,930	-20,180	<b>1,037</b>
1	0,228	0,907	<b>0,252</b>	0,931	0,907	<b>1,026</b>
2	0,212	0,877	<b>0,242</b>	0,644	0,877	<b>0,734</b>
3	-0,176	-0,846	<b>0,209</b>	-0,223	-0,846	<b>0,264</b>
10 <sub>c</sub>	0,275	0,836	<b>0,329</b>	-0,281	-0,836	<b>0,337</b>
10 <sub>a</sub>	1,893759	5,755	<b>0,329</b>	-1,93786	-5,755	<b>0,337</b>
11	-1,38871	-19,597	<b>0,071</b>	-7,00794	-19,597	<b>0,358</b>
12	-2,26972	-19,890	<b>0,114</b>	-8,30285	-19,890	<b>0,417</b>
13	-4,03175	-20,475	<b>0,197</b>	-10,8927	-20,475	<b>0,532</b>
14	-4,79455	-21,060	<b>0,228</b>	-12,1506	-21,060	<b>0,577</b>
15	-2,60856	-22,675	<b>0,115</b>	-11,8633	-22,675	<b>0,523</b>

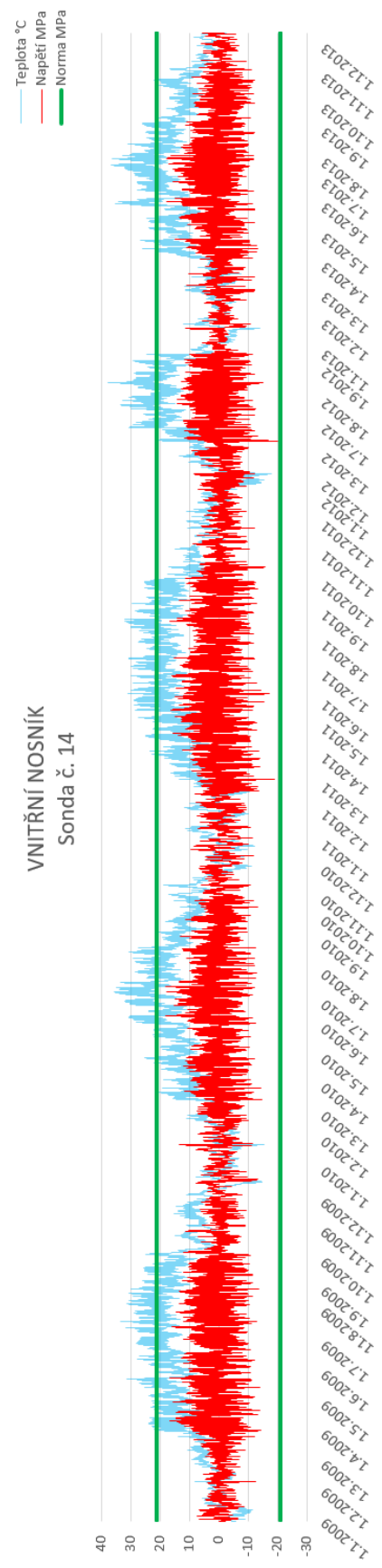
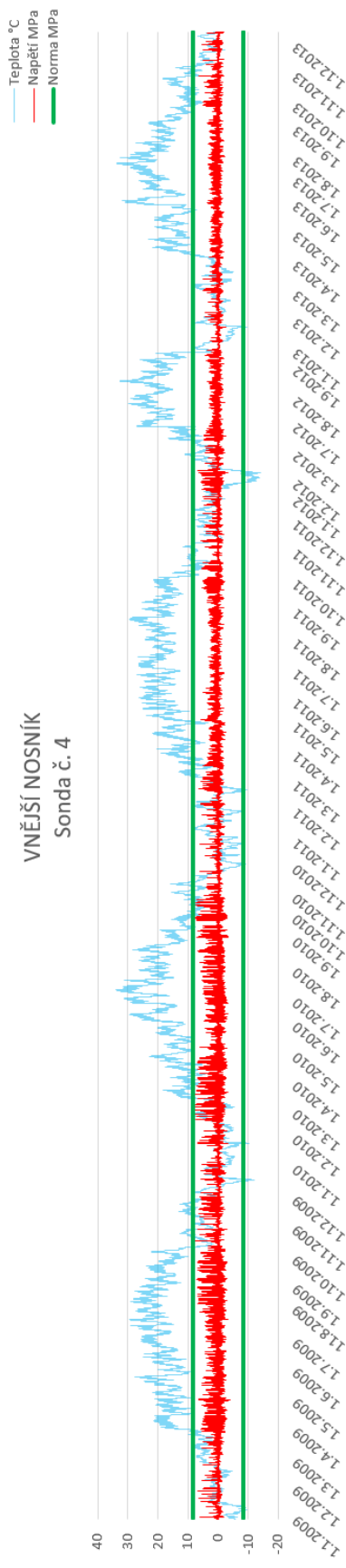
Tab. 6.3 Napětí po výšce průřezu v porovnání s normovým napětím

Na následujících obrázcích (obr. 6.3 a 6.4) jsou vykresleny čtyři grafy z vybraného období 2009 až 2013, které zobrazují průběh teplot vzduchu měřených snímačem č. 16, průběh zjištěných hodnot napětí na vnějším nosníku v místě sondy č. 8 a č. 4 a dále na vnitřním nosníku v místě sondy č. 14.



Obr. 6.3 Roční průběh teplot vzduchu a průběh napětí a teploty v místě sondy č. 8





Obr. 6.4 Roční průběh napětí a teplot v místě sondy č. 4 a č. 14

## 6.2 Praviděpodobnost překročení

Z grafů na obr. 6.3 a 6.4 je vidět, že vývoj napětí od teploty je velmi nepředvídatelný, což souvisí s různorodostí teplotního zatížení. Největší výkyvy v průběhu napětí mezi lety 2009 a 2013 jsou patrné v bodě č. 8, který leží na vnějším nosníku, kde bylo v roce 2010 napětí stanovené podle platné normy [4] poměrně často několikanásobně překračováno, zatímco v pozdějších letech se vyskytlo jakékoli překročení jen výjimečně.

Na základě těchto poznatků byla stanovena pravděpodobnost, s jakou v jednotlivých bodech průřezu hodnoty napětí z experimentu převyšovala napětí vypočítaná podle normy. Tento výpočet byl proveden zvlášť pro tlaková a zvlášť pro tahová napětí.

$$P(\sigma_i) = \frac{n_i}{n} * 100 [\%] \quad (6.1)$$

kde  $n_i$  je počet hodnot, které byly vyšší než hodnoty stanovené podle normy [4] (absolutní četnost), a  $n$  je celkový počet vyhodnocovaných časů (rozsah souboru)

Například pro vnější nosník bylo v bodě č. 8 dosaženo tlaku vyššího než 18,584 MPa celkem 1 564x z celkových 213 406 vyhodnocovaných časů. Dosadíme-li do rovnice (6.1), získáme pravděpodobnost překročení

$$P(\sigma_8) = \frac{1564}{213406} * 100 = \underline{0,733 \%}$$

Stejným způsobem byly určeny pravděpodobnosti ve všech ostatních bodech a celkový přehled je vypsán v tab. 6.4.

VNĚJŠÍ NOSNÍK č. 4										
SONDA	1	2	3	4 <sub>c</sub>	4 <sub>a</sub>	5	6	7	8	9
TLAK [%]	1,119	0,057	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,304	0,733	0,839
TAH [%]	1,679	0,664	0,041	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
VNITŘNÍ NOSNÍK č.3										
SONDA	1	2	3	10 <sub>c</sub>	10 <sub>a</sub>	11	12	13	14	15
TLAK [%]	2,065	0,087	0,000	0,022	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TAH [%]	0,763	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 6.4 Přehled pravděpodobností, s jakými hodnoty napětí sledovaného mostu přesahovaly hodnoty vypočítané podle normy ve všech bodech průřezu

## 7 ZÁVĚR

Cílem předkládané práce bylo vyhodnotit experimentálně získaná data o zatížení ocelobetonového mostu teplotou a ta porovnat s hodnotami stanovenými podle platné normy [4]. Toto je popsáno v kapitole 4, kde jsou shrnuty vyhodnocené extrémní případy zatížení teplotou, pro které bylo stanoveno napětí. V kapitole 5 následuje výpočet napětí od zatížení teplotou podle platné normy a konečně v kapitole 6 je provedeno porovnávání získaných výsledků.

Z výsledků je patrné, že experimentálně stanovené zatížení teplotou sledovaného mostního objektu z velké části neodpovídá hodnotám předepsaným v ČSN EN 1991-1-5. V některých situacích dochází k opravdu velkým lokálním nárůstům napětí, které zatížení teplotou předepsané v normě [4] není schopno podchytit. Tyto vysoké hodnoty napětí vznikají zejména při osluňování části vnějšího nosníku, které způsobuje vysoké rozdíly teplot naměřených po výšce tohoto nosníku.

Vysoké hodnoty napětí vyvolaného teplotním zatížením se na konstrukci vyskytují nepravidelně. V závěru práce jsou vykresleny grafy s průběhy vypočítaných napětí ve vybraných letech a nakonec jsou zjištěny pravděpodobnosti, s jakými hodnoty napětí na sledovaném mostním objektu přesáhly v průběhu experimentu hodnoty stanovené podle normy [4].

## LITERATURA

- [1] O. TOMASCHKO, *Účinky teplot na betonové mosty*, Praha: České vysoké učení technické - Fakulta stavební, únor 2009.
- [2] P. VIHAN, *Teplotní analýza n-vrstvých konstrukcí*, Praha: České vysoké učení technické - Fakulta stavební, 1984.
- [3] J. HEJNIC, *Účinky teploty na betonových mostních konstrukcích*, Praha: České vysoké učení technické - Fakulta stavební, 1975.
- [4] ČSN EN 1991-1-5, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou*, Praha: Český normalizační institut, květen 2005.
- [5] *Experimentální sledování odezvy mostů na zatížení těžkou nákladní dopravou a teplotou, Příloha 4.3.2*, Praha: České vysoké učení technické - Fakulta stavební, leden 2009.
- [6] M. POLÁK, T. PLACHÝ a J. HEREL, *Vyhodnocení složek zatížení teplotou komorového mostu z předpjatého betonu*, Bratislava, říjen 2007.
- [7] T. ROTTER, *Ocelové konstrukce: ocelové mosty*, Praha: České vysoké učení technické, 2001.
- [8] J. HEREL, *Vliv změny teploty na statickou a dynamickou odezvu segmentového komorového mostu*, Praha: České vysoké učení technické - Fakulta stavební, červenec 2007.
- [9] M. TURKOVÁ, *Statická a modální analýza mostní konstrukce*, Brno: Vysoké učení technické - Fakulta stavební, 2014.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Schematické znázornění základních složek průběhu teplot .....	9
Obr. 2.2 Mapa izoterm maximálních a minimálních teplot vzduchu ve stínu.....	10
Obr. 2.3 Vztah mezi $T_{\min}$ (popř. $T_{\max}$ ) a $T_{e,\min}$ (popř. $T_{e,\max}$ ) pro mostní konstrukce.....	10
Obr. 2.4 Rozdílové složky teploty podle normy ČSN EN 1991-1-5 .....	11
Obr. 3.1 Poloha sledovaného mostu (Google Maps) .....	12
Obr. 3.2 Pohled a půdorys mostu na ulici K Barrandovu .....	12
Obr. 3.3 Polovina příčného řezu mostu se sledovanými hlavními nosníky č. 3 a 4 .....	13
Obr. 3.4 Pohled na most od jihu .....	14
Obr. 3.5 Pohled na most od severu .....	14
Obr. 3.6 Rozmístění teploměrů ve sledovaném řezu .....	15
Obr. 3.7 Pohled na teplotní sondy N1ATG8 (vlevo) a N1ATG7 (vpravo) .....	15
Obr. 3.8 Pohled na většinu snímačů teploty .....	16
Obr. 3.9 Sondy 1 až 8 .....	16
Obr. 3.10 Poloha průřezu s teplotními sondami .....	17
Obr. 4.1 Průběh rovnoměrné složky teploty $\Delta T_u$ během roku 2009.....	19
Obr. 4.2 Průběh lineárně proměnné rozdílové složky teploty $\Delta T_{My}$ během roku 2009..	19
Obr. 4.3 Průběh rovnoměrné složky teploty $\Delta T_u$ během roku 2015.....	20
Obr. 4.4 Průběh lineárně proměnné rozdílové složky teploty $\Delta T_{My}$ během roku 2015..	20
Obr. 4.5 Materiálové a průřezové charakteristiky krajního a vnitřního nosníku.....	22
Obr. 4.6 Rozložení teplot ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 4 .....	23
Obr. 4.7 Rozložení teplot ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 3 .....	25
Obr. 4.8 Zavedení deformačních neznámých a poloha sledovaného průřezu .....	27
Obr. 4.9 Průběh vnitřních momentů pro ZDM .....	28
Obr. 4.10 Koncové síly působící na nosník č. 4 .....	28
Obr. 4.11 Ohybové momenty vypočítané softwarem Dlubal RFEM 5.06 .....	29
Obr. 4.12 Koncové síly působící na nosník č. 3 .....	29
Obr. 4.13 Napětí od zatížení teplotou ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 4 .....	31
Obr. 4.14 Napětí od zatížení teplotou ze dne 30. 7. 2012 4:30 na nosníku č. 3 .....	32
Obr. 5.1 Hodnoty napětí odpovídající rozdílové složce teploty dle normy pro nosník č. 4	36
Obr. 5.2 Hodnoty napětí odpovídající rozdílové složce teploty dle normy pro nosník č. 3	36
Obr. 6.1 Průběh teploty a napětí na vnějším nosníku dne 7. 3. 2010 v 10:15 .....	38
Obr. 6.2 Průběh teploty a napětí na vnějším nosníku dne 21. 12. 2009 11:15 .....	39
Obr. 6.3 Roční průběh teplot vzduchu a průběh napětí a teploty v místě sondy č. 8..	40
Obr. 6.4 Roční průběh napětí a teplot v místě sondy č. 4 a č. 14 .....	41

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Vyhodnocené roční extrémní hodnoty složek teploty v období 2007 – 2015 ..	21
Tab. 4.2 Porovnání vnitřních momentů.....	29
Tab. 4.3 Hodnoty napětí ve všech bodech po výšce průřezu v časech z tab. 4.1 pro vnější nosník.....	33
Tab. 4.4 Hodnoty napětí ve všech bodech po výšce průřezu v časech z tab. 4.1 pro vnitřní nosník.....	34
Tab. 4.5 Maximální napětí v jednotlivých bodech.....	35
Tab. 6.1 Přehled maximálních napětí.....	37
Tab. 6.2 Přehled naměřených teplot 7. 3. 2010 10:15 a 21. 12. 2009 11:15.....	38
Tab. 6.3 Napětí po výšce průřezu v porovnání s normovým napětím .....	39
Tab. 6.4 Přehled pravděpodobností, s jakými hodnoty napětí sledovaného mostu přesahovaly hodnoty vypočítané podle normy ve všech bodech průřezu .....	42