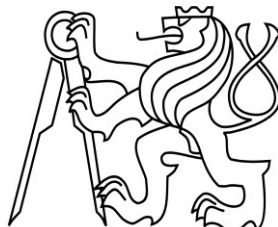


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

**Diplomová práce**

**CHOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH PANELŮ S JÁDREM  
Z MINERÁLNÍ VLNY ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty**

BEHAVIOR OF SANDWICH PANELS WITH MINERAL WOOL CORE AT  
ELEVATED TEMPERATURE

Vypracovala: Bc. Karolína Maršíčková

Vedoucí: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

2019



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Maršíčková</u>	Jméno: <u>Karolína</u>	Osobní číslo: <u>423707</u>
Zadávací katedra: <u>K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Integrovaná bezpečnost staveb</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Chování sendvičových panelů s jádrem z minerální vlny za zvýšené teploty</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Behavior of sandwich panels with mineral wool core at elevated temperature</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) shrnutí současného stavu poznání 2) experimentální studie 3) vypracování numerické studie 4) validace numerického modelu 5) shrnutí	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Kamila Cábová, Ph.D., od 1.12. prof. Ing. František Wald, CSc.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>11.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
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 svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a informace jsem čerpala z uvedených zdrojů.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6. ledna 2019

Bc. Karolína Maršíčková

---

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala své vedoucí diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc, vstřícnost a cenné rady při zpracování této práce. Dále bych ráda poděkovala celé své rodině za nekonečnou trpělivost během psaní této práce a za umožnění celého mého studia. Na závěr děkuji svým kamarádům za velkou podporu při psaní této práce.

---

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>VI</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>7</b>
1.1 Motivace	7
1.2 Struktura práce	7
1.3 Cíle práce	7
<b>2 Současný stav poznání</b>	<b>8</b>
2.1 Sendvičové panely	8
2.1.1 Sendvičové panely s jádrem z minerální vlny	8
2.1.2 Sendvičové panely s jádrem z PIR pěny	9
2.2 Konstrukční řešení	10
2.2.1 Stěnové panely	10
2.2.2 Střešní panely	11
2.3 Stabilizace konstrukce pomocí sendvičových panelů	12
2.3.1 Běžná teplota	12
2.3.2 Zvýšená teplota	14
2.4 Ohybová tuhost sendvičových panelů	16
<b>3 Experimentální studie</b>	<b>18</b>
3.1 Popis zkušební sestavy	19
3.1.1 Sendvičové panely	19
3.1.2 Mechanické zatěžování	20
3.1.3 Měření průhybu	23
3.2 Popis ohřevu	23
3.2.1 Rozmístění zahřívacích deček	26
3.2.2 Průběh teploty – teplotní křivka ohřevu	27
3.3 Experimenty na sendvičových panelech tl. 100 mm	29
3.3.1 Experiment za běžné teploty	31
3.3.2 Experiment při 600 °C	34
3.4 Experimenty na sendvičových panelech tl. 230 mm	40
3.4.1 Experiment za běžné teploty	41
3.4.2 Experiment při 600 °C	44
3.5 Shrnutí a porovnání	50
3.5.1 Ohybová tuhost	53
3.5.2 Membránové chování	54
<b>4 Numerická studie</b>	<b>56</b>
4.1 Vytvoření geometrie modelu	56
4.2 Materiálové vlastnosti	58
4.2.1 Minerální vlna	58
4.2.2 Ocel	59
4.3 Okrajové podmínky	61

---

4.4	Výpočetní síť.....	62
4.5	Teplotní analýza.....	62
4.5.1	Vstupní data .....	62
4.5.2	Výsledky .....	64
4.6	Mechanická analýza.....	66
4.6.1	Vstupní data .....	66
4.6.2	Výsledky .....	68
<b>5</b>	<b>Validace numerického modelu.....</b>	<b>71</b>
5.1	Validace teplotní analýzy.....	71
5.2	Validace mechanická analýzy.....	72
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>76</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>82</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>83</b>

---

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá sendvičovými panely za zvýšené teploty. Popisuje vlastnosti panelů s jádrem z minerální vlny od výrobce RUUKKI. Zabývá se stabilizací konstrukce pomocí sendvičového panelu za běžné i zvýšené teploty a ohybovou tuhostí panelů v závislosti na teplotě. Dále je v práci popsána experimentální studie sendvičových panelů, která proběhla v laboratořích FSV ČVUT v Praze. Je zde popsáno statické schéma experimentu, způsob zatěžování a systém, jakým byly panely zahřívány. Výsledky jednotlivých experimentů jsou porovnány. Cílem experimentální studie je ověření ohybového chování sendvičových panelů za zvýšené teploty. Poslední částí práce je numerický model sendvičových panelů v softwaru ANSYS za běžné i za zvýšené teploty, který zkoumá chování sendvičového panelu v ohybu. Tento numerický model je validován pomocí experimentální studie.

### Klíčová slova

sendvičové panely; ohybová tuhost; požár; stabilizace ocelové konstrukce; požární zkouška; numerický model; ANSYS

## Abstract

The diploma thesis deals with sandwich panels under higher temperatures. It describes characteristics of panels with mineral wool core produced by RUUKKI. The work deals with stability of construction under normal and higher temperature and bending stiffness of panels in relation to increasing temperature. Furthermore there's a description of sandwich panel experiment preparation which will take place in FCE CTU laboratories. Also there's description of a static scheme of the experiment, way of mechanical loading and a system which heated up the panel. Results of all experiments are compared. The goal of the experiments is to verify behaviour of sandwich panels in bending under higher temperatures. A numerical model in software ANSYS is the last part of the thesis. The model studies behaviour of sandwich panels in bending at ambient and at elevated temperature. The model is validated to results from the experiments.

### Keywords

sandwich panel; bending stiffness; fire; stability of steel construction; fire test; numerical model; ANSYS

---

## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Latinské symboly

c	Měrná tepelná kapacita	J/(kgK)
E	Modul pružnosti	MPa
I	Moment setrvačnosti	m <sup>4</sup>
H	Horizontální síla	N
t	Čas	s
T	Teplota	°C
q	Zatížení	kN/m
w	Průhyb	mm
L	Rozpětí panelu	m
F <sub>max</sub>	únosnost sendvičového panelu	kN
w <sub>max</sub>	průhyb při působení síly F <sub>max</sub>	mm
k	tuhost sendvičového panelu	kN/mm

### Zkratky

PIR	polyisokyanurátová pěna
PUR	polyuretanová pěna
MKP	Metoda konečných prvků
FE	Finite element
FEM	Finite element method
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
STABFI	Steel cladding systems for stabilization on buildings in fire



# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Sendvičové panely jsou v současnosti jedním z nejpoužívanějších konstrukčních řešení pro opláštění halových objektů. Jejich výhodou je především nenáročná montáž, velká tepelně izolační schopnost, nízká hmotnost a rychlost výstavby [1]. Studie ukazují, že by se sendvičové panely daly využít i ke stabilizaci celé konstrukce, což by výrazně snížilo její náklady a zvýšilo konkurenceschopnost ocelových konstrukcí oproti jiným materiálům. Tyto studie se ale zabývají pouze řešením za běžné teploty. Většina těchto studií vychází z Evropských doporučení pro stabilizaci ocelových nosníků pomocí sendvičových panelů. Pro možnost použití sendvičových panelů ke stabilizaci ocelové konstrukce v praxi je nutné znát i chování za zvýšené teploty.

Ke zjištění, zda se dá toto konstrukční řešení využít i při zatížení konstrukce požárem je nutné znát chování sendvičových panelů za požáru, především vliv ohybové tuhosti panelu a chování spojů jednotlivých panelů a ocelových prvků.

## 1.2 Struktura práce

Práce je rozdělena do tří hlavních kapitol. V první kapitole je shrnut současný stav poznání v dané problematice. V druhé kapitole je popsána experimentální studie, pomocí které bylo ověřeno chování sendvičových panelů s jádrem z minerální vlny v ohybu. Je zde popsán způsob podepření sendvičového panelu, způsob zatížení i systém zahřívání sendvičového panelu. Vybrané experimenty jsou v této kapitole podrobně popsány a porovnány. Poslední kapitola se zabývá numerickým modelem sendvičového panelu v softwaru ANSYS. V této kapitole je popsána tvorba numerického modelu, vstupní hodnoty i výsledky. Na závěr je v této kapitole numerický model validován na základě experimentů.

## 1.3 Cíle práce

Cílem této práce je popsat zejména ohybové chování sendvičových panelů za zvýšené teploty. Chování v ohybu je sledováno na základě experimentální studie. V rámci této studie bylo provedeno několik experimentů za běžné i zvýšené teploty, během kterých byl měřen průhyb při namáhání ohybem. Cílem práce je tuto experimentální studii popsat a shrnout její výsledky. Dále je cílem práce vytvořit numerický model pomocí softwaru ANSYS, který má být validován na základě popsané experimentální studie.

## 2 Současný stav poznání

### 2.1 Sendvičové panely

Sendvičové panely jsou tvořeny tenkými ocelovými plechy a izolačním jádrem z minerální vlny nebo pěnovým materiálem (PIR, PUR). Použít se mohou jako střešní, fasádní nebo požárně dělící konstrukce.

Nejčastěji se používají u halových objektů. Výhodou je především rychlost výstavby díky prefabrikaci panelů. Výstavba nevyžaduje komplikované technologie a kvůli nízké objemové hmotnosti panelů nejsou vysoké nároky ani na dopravu. Vzhledem k těmto faktorům je použití panelů jedním z nejefektivnějších řešení velkých průmyslových objektů.

#### 2.1.1 Sendvičové panely s jádrem z minerální vlny

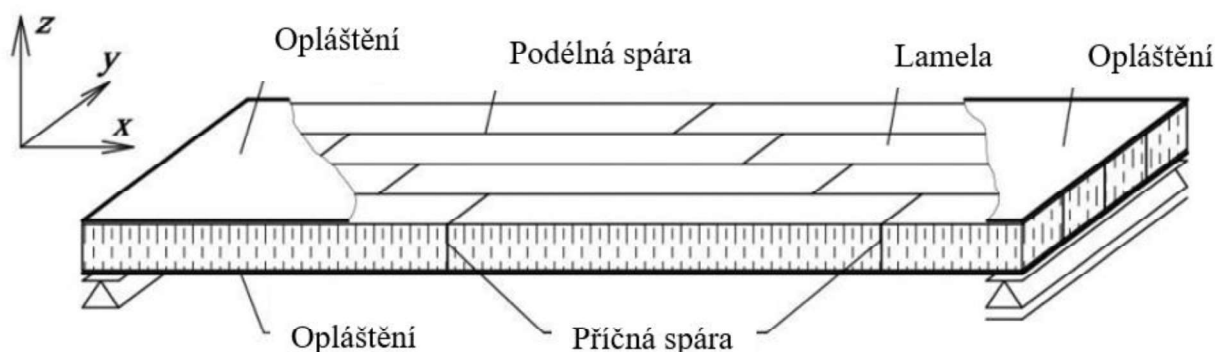
Panely s jádrem z minerální vlny se skládají z plechů z žárově pozinkované oceli a minerální vlny viz obr. 1. Jednotlivé vrstvy jsou spojené pomocí lepidla. Vláknina minerální vlny jsou v panelech orientována podélně po celé délce sendvičového panelu. Tyto panely se vyznačují především vysokou požární odolností až EI60. Používají se jako požárně dělící stěny nebo jako stropní konstrukce. Třída reakce na oheň těchto panelů je nejčastěji A2.



obr. 1: Sendvičový panel s jádrem z minerální vlny [2]

Jádro sendvičového panelu z minerální vlny je tvořeno menšími bloky minerální vlny, které se nazývají lamely. Jednotlivé lamely z minerální vlny nejsou mezi sebou nijak spojeny. Všechny lamely mají stejnou tloušťku. Lamely minerální vlny jsou spojeny pouze s plechem sendvičového panelu pomocí lepidla. Spáry, které vznikají mezi jednotlivými lamelami, tvoří slabší místo sendvičového panelu, ve kterém může dojít k jeho porušení. Problémem modelování sendvičových panelů s jádrem z minerální vlny, které jsou tvořeny jednotlivými lamelami

a způsobem selhání těchto konstrukcí, se zabývá [3]. Na obr. 2 je vidět možný způsob rozložení lamel v sendvičovém panelu.



obr. 2: Schéma sendvičového panelu s lamelami (přeloženo z [3])

Minerální vlna je vyráběna jako deskový materiál s horizontálním směrem vláken. Tyto desky jsou nařezány do jednotlivých lamel, které jsou poté pro použití v sendvičových panelech otočeny o  $90^\circ$  z důvodu větší tuhosti jádra panelu [3].

Pro experiment byly vybrány sendvičové panely SPA E od výrobce RUUKKI. Tyto panely jsou s jádrem z minerální vlny. Jsou nehořlavé, mají dobré akustické a tepelně izolační vlastnosti a vysokou požární odolnost. Tento typ panelu se používá jako fasádní. Vyrábí se v modulové šířce 1200 mm, maximální délka panelu je 13 500 mm. Tloušťka vnitřního plechu je 0,5mm, tloušťka vnějšího plechu je 0,6 mm a izolace se dodává v tloušťkách 100, 125, 150, 175, 200 a 230 mm.

### 2.1.2 Sendvičové panely s jádrem z PIR pěny

Panely s jádrem z pěnových materiálů se skládají nejčastěji z plechů z žárově pozinkované oceli a polyisokyanurátové (PIR) nebo polyuretanové (PUR) pěny, jak je vidět na obr. 3. Tyto panely mají výrazně lepší tepelně izolační vlastnosti než panely s minerální vlnou. Používají se především jako obvodové stěny nebo pro zastřešení budovy. Požární odolnost těchto panelů je nižší než u minerální vlny. Třída reakce na oheň těchto panelů je nejčastěji B. Jedná se totiž o plasty, tedy o organické materiály, které jsou vždy hořlavé. Při zahřátí těchto materiálů dochází k jejich roztavení nebo rozkladu a uvolňuje se velké množství kouře. PIR pěna je vysoce porézní materiál. Za běžných podmínek jsou póry vyplněny vzduchem, a proto je PIR pěna dobrým izolantem. Při vysokých teplotách se však zvýší záření mezi buňkami a díky tomu se i výrazně zvýší tepelná vodivost tohoto materiálu [4].

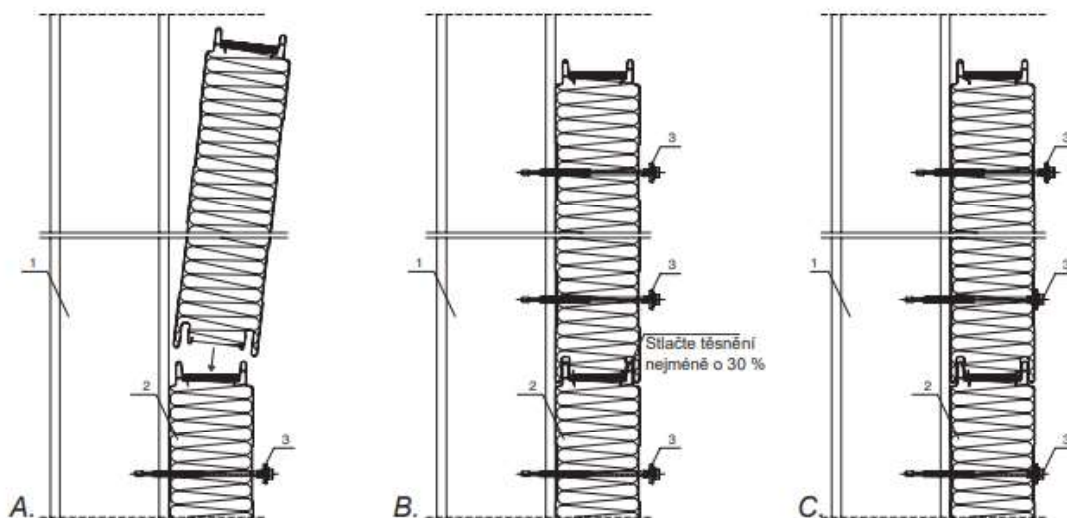


obr. 3: Sendvičový panel s jádrem z PUR pěny [5]

## 2.2 Konstrukční řešení

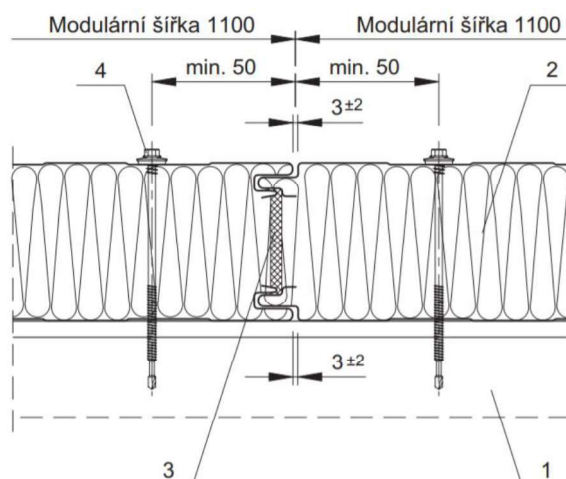
### 2.2.1 Stěnové panely

Stěnové panely lze montovat horizontálně či vertikálně. Některé panely jsou vyráběny se systémem pero-drážka, a proto je montáž panelů velmi rychlá. Jednotlivé panely je nutno k sobě důkladně přitisknout, aby byly spoje těsné. Okraje panelů jsou vybaveny těsněním, které je nutno stlačit min o 30 %. Postup montáže stěnových panelů je zřejmý z obr. 4. Je nutné zmínit, že každý výrobce doporučuje vlastní postupy pro montáž. Tento způsob montáže uvádí výrobce RUUKKI.



obr. 4: Montáž stěnových sendvičových panelů [6]

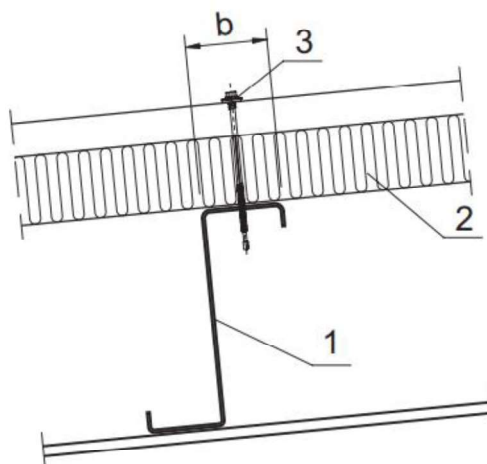
Následně jsou panely přichyceny pomocí spojovacího prvku ke sloupu nebo k pomocné konstrukci. K upevnění se nejčastěji používají samořezné nebo samovrtné šrouby z nerezové oceli s těsnicí podložkou nejčastěji o průměru 16 nebo 19 mm. Průměry podložky a velikost šroubu závisí na výrobci a konkrétním namáhání panelu. Výrobce také stanovuje minimální vzdálenosti upevňovacích prvků od okraje sendvičového panelu jako např. na obr. 5.



obr. 5: Minimální vzdálenosti upevňovacích prvků od okraje panelu [6]

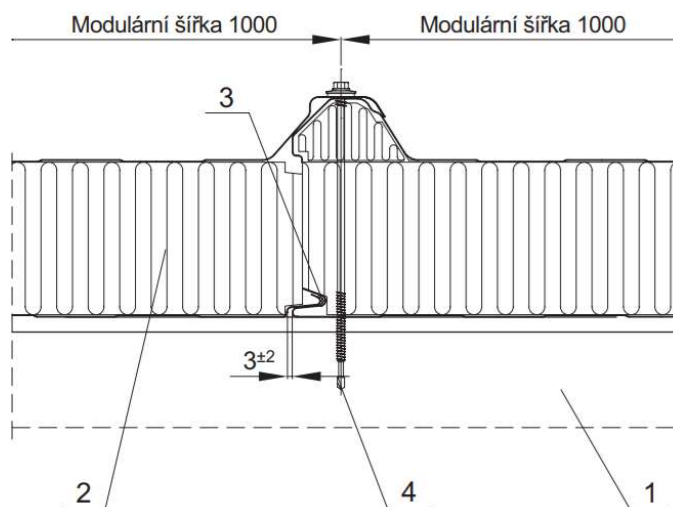
### 2.2.2 Střešní panely

Střešní panely se nejčastěji kotví pomocí spojovacího prvku do vaznice, jak je vidět na obr. 6. Důležitá je šířka podpory (vaznice), do které se panel kotví. Výrobce uvádí v technických listech minimální šířky podpor. V případě střešního panelu RUUKKI je minimální šířka mezilehlé podpěry 60 mm a okrajové podpěry 40 mm.



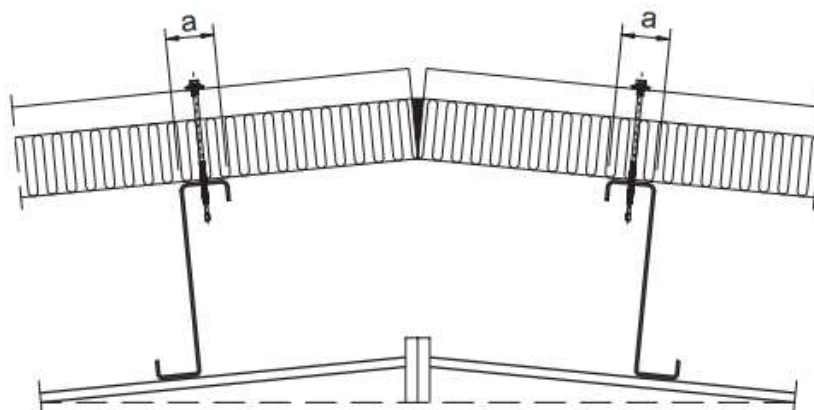
obr. 6: Kotvení střešního panelu k vaznici [6]

Opět platí, že spoj mezi panely musí být těsný, a proto musí být těsnění na okrajích panelů stlačeno min o 30 %. Jedná-li se o profilované střešní panely, spojují se mezi sebou v horní vlně, upevňovací prvek tak prochází maximální tloušťkou panelu, jak je patrné z obr. 7.



obr. 7: Kotvení dvou střešních panelů [6]

V případě panelů u hřebene se mezera vzniklá mezi panely vyplní polyuretanovou pěnou (obr. 8). Pokud je mezera větší, vyplní se nejdříve minerální vlnou a poté PUR pěnou. Nakonec se spára překryje polyetylenovým těsněním.



obr. 8: Kotvení střešního panelu u hřebenu [6]

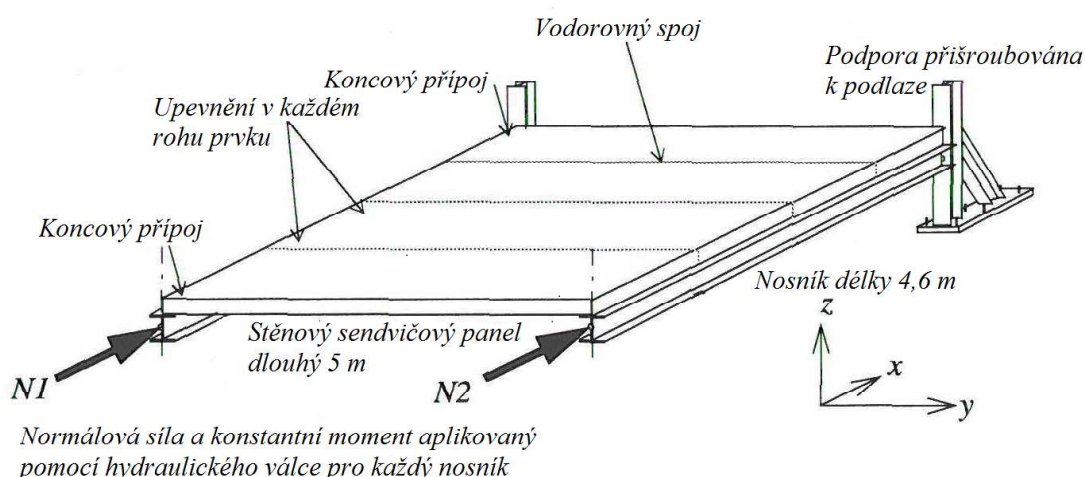
## 2.3 Stabilizace konstrukce pomocí sendvičových panelů

### 2.3.1 Běžná teplota

Pokud mají sendvičové panely dostatečnou tuhost, a i spojení nosné konstrukce a panelů je dostatečně tuhé, brání panely nosným prvkům jejich posunutí a natočení. Díky tomu nedochází ke klopení ani vybočení z roviny [7]. Stabilizace je závislá především na spojovacích prostředcích

a na vlastnostech samotných panelů. Pokud má panel dostatečnou smykovou tuhost, nedojde k bočnímu posunu nosné konstrukce [7].

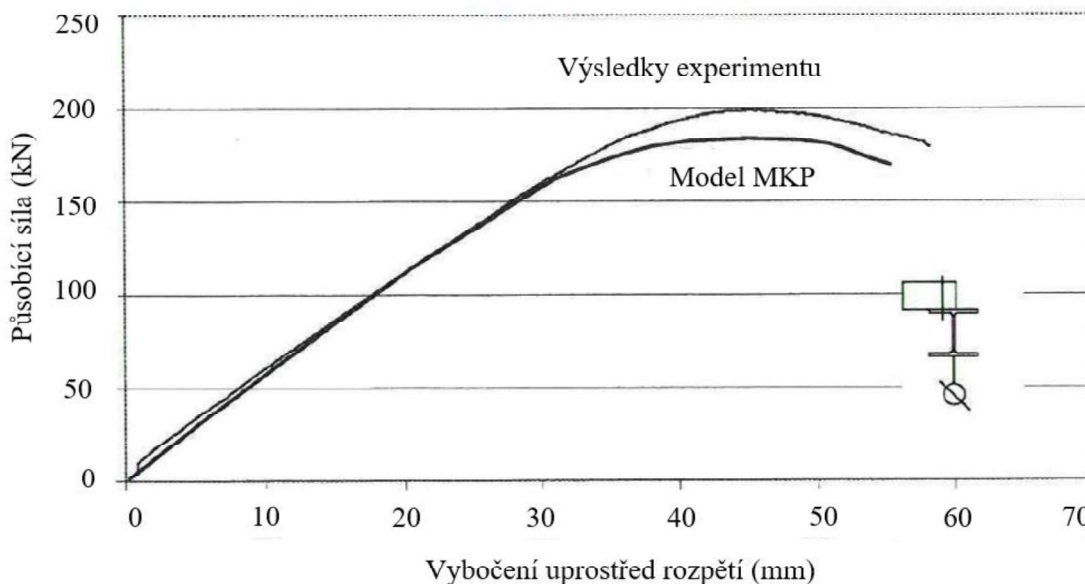
Eva Hedman-Pétursson se ve své disertační práci [8] zabývá stabilizací ocelových sloupů pomocí sendvičových panelů. Celkem bylo provedeno 7 zkoušek skutečného měřítka, které se věnovaly této problematice a několik samostatných testů, které zkoumaly např. schopnost bočního a torzního podepření stěnových prvků nebo vlastnostmi materiálů a zbytkovým napětím v prvcích. Experimenty skutečného měřítka byly provedeny na 2 různých sestavách a na sloupech různých průřezů. První sestava se skládala ze sloupů o délce 4,6 m a stěnových panelech o délce 5 m (obr. 9). Tato sestava byla zatěžována pomocí hydraulických lisů. V druhé sestavě byly použity sloupy o délce 6 m. Experimenty se snažily napodobit ideální situaci, při které sendvičový panel brání sloupu, aby vybočil ven z roviny stěny, a současně brání, aby nedošlo ke stlačení sloupu. Sendvičový panel a jeho připojení musí být tedy dostatečně únosné a tuhé. Následně byly vybrané experimenty modelovány pomocí metody konečných prvků (MKP) v softwaru ABAQUS. Modely měly geometrické a okrajové podmínky odpovídající laboratorním zkouškám a výsledky modelu dosáhly podobných hodnot posunutí jako při experimentech.



obr. 9: Schéma zkoušky (přeloženo z [8])

V [8] je popsán koncept plně podepřené stěny z panelů. K úplnému podepření dochází, pokud je podélné podepření panelu dostatečně tuhé. Standardní kotvení panelu ke sloupu (upevnění šroubem v každém rohu) má pozitivní vliv na únosnost sloupu, ale nedochází k plnému podepření. Přidáním spojovacích prostředků a zpevněním spojů v horní a spodní části vznikne smyková stěna. U malých a středních rozměrů tím dojde k úplnému podepření. Síly, které působí na podpory, byly odhadnuty pružným působením, rovnováhou sloupu bez tuhosti a simulací MKP. Také byl stanoven zjednodušený analytický postup pro určení síly, která zabraňuje posunu a pootočení. Pokud je k dispozici dostatek informací, lze počítat podle pružné teorie. Postup uvažuje současně pevnost i tuhost.

Na obr. 10 je vidět porovnání experimentu a modelu MKP. Graf ukazuje vztah mezi působící silou a průhybem uprostřed rozpětí panelu. Výsledky z experimentu i z modelu vykazují velice podobný průběh průhybu a hodnoty působící síly jsou jen nepatrně nižší u modelu.



obr. 10: Porovnání experimentu a modelu podle [8]

Tyto experimenty byly také modelovány v [9]. Model je zaměřen na experiment, který je vidět na obr. 9. V [9] se opět výsledky MKP modelu jen nepatrně lišily od výsledků experimentu.

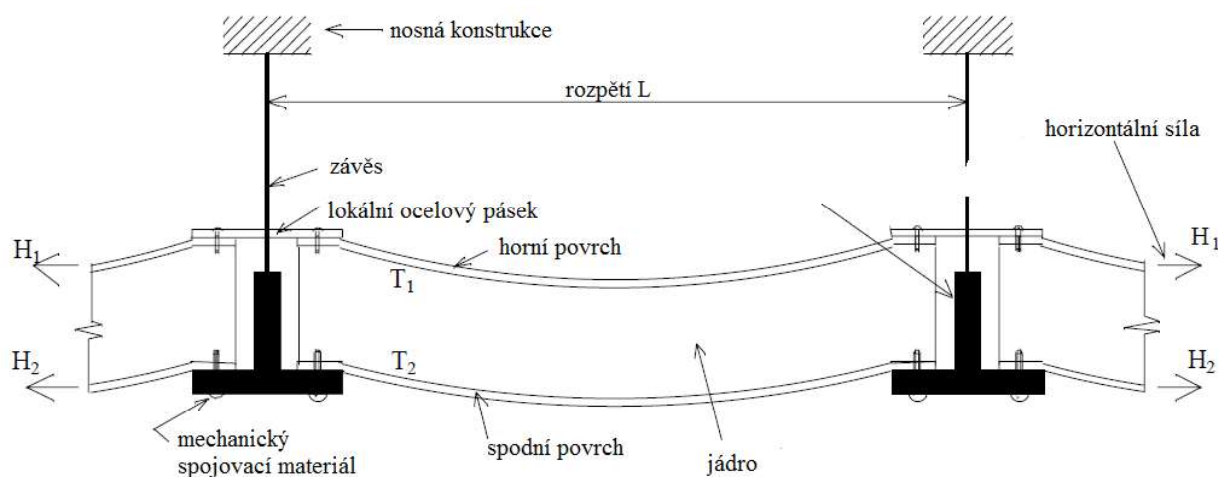
### 2.3.2 Zvýšená teplota

Stabilita sendvičových panelů za požáru je částečně popsána v [1]. Článek uvádí, že i přes vysokou požární odolnost sendvičových panelů může být potenciálním problémem přestup tepla mezi opláštěním panelů. Plechy jsou totiž spojeny kovovými spojovacími prostředky, které vedou teplo skrz konstrukci. Za běžné teploty toto spojení funguje, ale za zvýšené teploty může dojít k rychlému kolapsu konstrukce, pokud nebude oplechování vhodně spojeno s nosnou konstrukcí. Článek také popisuje zkoušky v UK Fire Research Station, které ukázaly, že teploty, při kterých panely zkolabují, se pohybují okolo 150°C. Tato teplota je výrazně nižší než teplota, které bývá dosaženo při celkovém vzplanutí (flashover efektu).

Stability volné stěny ze sendvičových panelů je dosaženo, pokud je panel z obou stran připevněn například do nosníku ve střeše, který má dostatečnou požární odolnost. Při požáru dojde k výraznému poklesu pevnosti při ohybu vlivem delaminace opláštění od jádra. Pokud je panel dostatečně ukotven do střešního nosníku, nedejde při delaminaci k jeho kolapsu, začne se chovat jako zavěšený. Zatížení střešní konstrukce tím ani nemusí být zvýšeno, protože se nepředpokládá současné působení zatížení sněhem a požárem. Zatížení vzniklé od stěny ze sendvičových panelů je nižší než zatížení sněhem, únosnost nosíku je dostatečná i bez započítání zatížení od stěny [1].



Chování střešních panelů je závislé především na soudržnosti opláštění a jádra panelu, která je zajištěna lepidlem. Za běžné teploty je toto spojení dostatečné, za zvýšené teploty ale dochází k delaminaci vrstev při teplotách od 130 °C do 350 °C v závislosti na druhu lepidla. Těchto teplot je při normovém požáru ISO 834 dosaženo za 5 min. Pokud by byl panel jen prostě podepřen bez jakékoli podpory ve vodorovném směru, panel by z podpor sklouzl vlivem jeho prohnutí a delaminace. Zabránění kolapsu panelu může být zajištěno ukotvením panelu do nosné konstrukce a zabráněním jeho vodorovného posunu. Tím dojde v panelu k membránovému působení. Na obr. 11 je vidět doporučené kotvení střešního panelu.



obr. 11: Doporučený způsob kotvení střešního panelu [1]

Membránové chování je způsob přenosu zatížení, při kterém je zatížení přenášeno z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Aby došlo k membránovému působení je potřeba velkých průhybů nosníků. Samotný nosník již žádnou únosnost nemá, ale díky membránovému působení je únosnost celé stropní konstrukce vyšší.

Pro prostě podepřený panel se membránová síla (na obr. 11 označená jako H) spočítá ze vzorce:

$$H = \frac{q * L^2}{8 * w}$$

kde

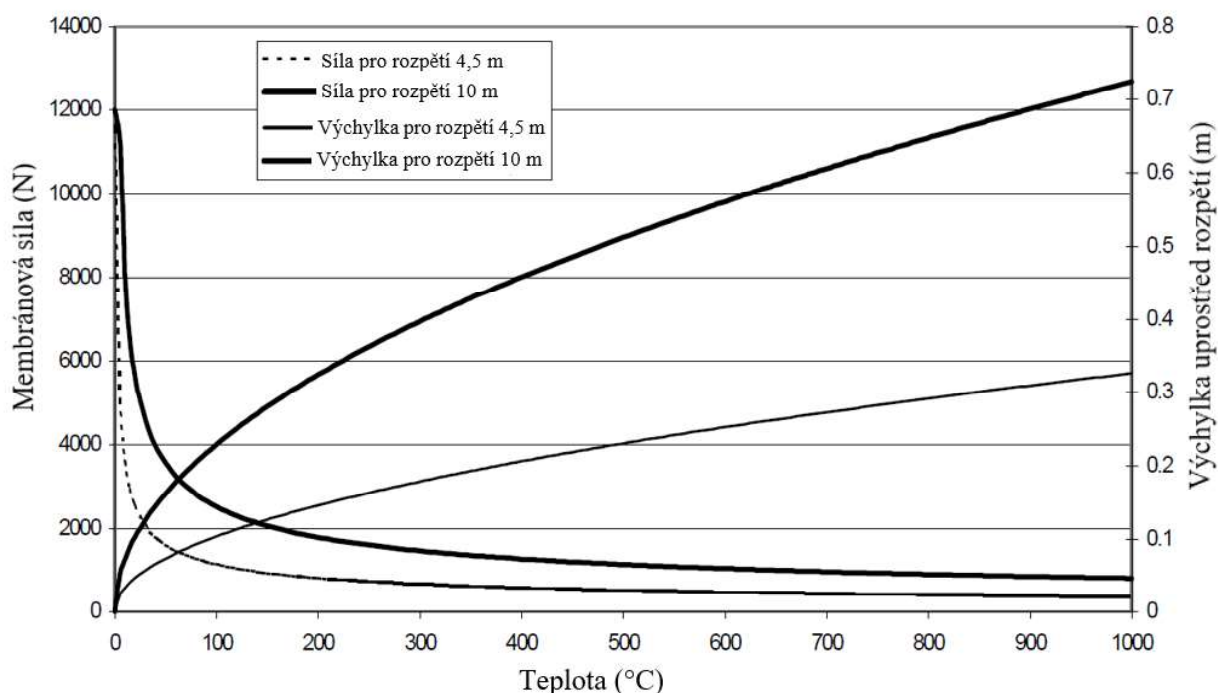
„H“ je membránová síla [kN]

„L“ je rozpětí panelu [m]

„q“ je rovnoměrné zatížení na jednotku délky [kN/m]

„w“ je průhyb panelu [m].

Na obr. 12 je vidět závislost membránové síly a průhybu na teplotě. Membránová síla i průhyb byl měřen pro panely o rozpětí 4,5 m a 10 m. Z grafu lze vyvodit, že čím je vyšší teplota při selhání lepidla, tím větší je průhyb a čím nižší je membránová síla, tím je snazší navrhnout ukotvení panelu [1].



obr. 12: Závislost membránové síly a průhybu na teplotě [1]

Při požáru ze spodní strany panelu dojde ke kolapsu, pokud jedno nebo obě opláštění nejsou na koncích zachyceny proti vodorovnému posunutí. Nedojde tedy k membránovému chování panelu. Pokud je zachyceno pouze dolní opláštění, membránová síla v dolním opláštění je maximální, protože celé zatížení panelu i jeho vlastní tíhu přenáší dolní opláštění. Pokud jsou zachyceny obě opláštění, může být mezi ně membránová síla rozdělena a každé opláštění přenesou část. Při požáru z horní strany panelu je chování podobné, výjimkou je průhyb spodního opláštění, který je výrazně menší, protože požár působí z druhé strany. I v tomto případě musí být zachycen proti vodorovnému posunu alespoň spodní plech. Pokud budou zachyceny oba, každý přenesou část membránové síly [1].

## 2.4 Ohybová tuhost sendvičových panelů

Vlastnosti sendvičových panelů včetně ohybové tuhosti za zvýšené teploty jsou popsány v [10]. Práce se zabývá popisem napětí a tuhosti sendvičových panelů a přestupem tepla přes konstrukci. Ohybová tuhost je popsána stejně jako v normě, jen konstanty jsou závislé na teplotě. Zvýšená teplota vyvolá v opláštění sendvičového panelu napětí, které je závislé na celkové tloušťce panelu. Příspěvek jádra panelu do rovinného napětí a ohybového napětí se zanedbává.

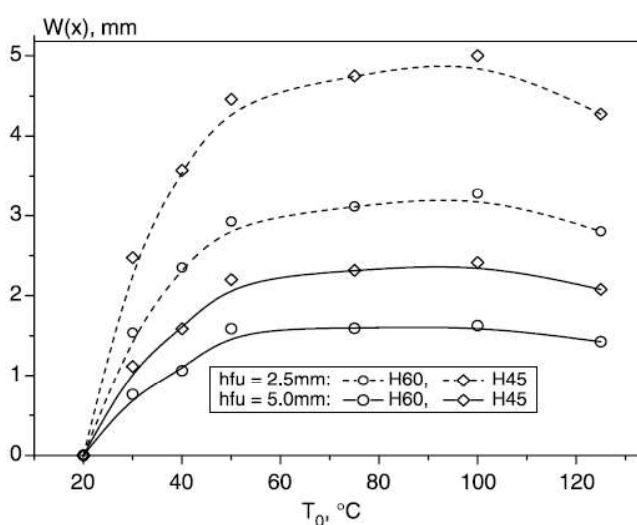
Chování panelu je popsáno třemi různými analýzami. Podle geometricky lineární analýzy se napětí vyvolané zvýšenou teplotou a ohybový moment v příčném směru neliší, teplota je rovnoměrná po výšce panelu. Tuto analýzu lze použít, pokud je průhyb malý. Podle analýzy namáhání lze počítat napětí v každé vrstvě zvlášť. Jádru panelu přenáší pouze smyková napětí. Teplota opláštění je uvažována jako konstantní a její změnu v tloušťce opláštění lze zanedbat. Na rozdíl od teploty jádra, kde je její změna po výšce průřezu významná a nelze ji určit jako průměrnou. Geometricky nelineární analýza je popsána pomocí 6 rovnic o 7 neznámých, která je řešena iterací.

Z tab. 1 je patrný pokles tuhosti v závislosti na rostoucí teplotě pro panely s různým materiálem opláštění sendvičového panelu. Při nárůstu teploty o přibližně 100 °C je tuhost poloviční než při běžné teplotě v obou případech.

tab. 1: Vztah tuhosti opláštění sendvičového panelu a teploty [10]

T (°C)	20	50	75	100	125
E1 (GPa)	120,87	97,2	87,3	76,06	67,73
E2 (GPa)	18,58	14,94	13,42	11,69	10,41

Na obr. 13 je patrný maximální průhyb sendvičových panelů v závislosti na teplotě. Na obrázku je vidět průhyb panelů s různým opláštěním a s různým modulem pružnosti jádra panelu. Největší průhyb vykazuje panel s tloušťkou opláštění 2,5 mm a modulem pružnosti 45 MPa. Při použití stejného modulu pružnosti jádra a zvětšení tloušťky opláštění na 5 mm jsou průhyby přibližně poloviční. Z obrázku je také patrný rychlý nárůst průhybu do 60 °C, poté je průběh téměř neměnný.



obr. 13: Maximální průhyb panelů v závislosti na teplotě [10]

### 3 Experimentální studie

Praktická část diplomové práce se zabývá experimentem stěnových panelů od výrobce RUUKKI. Experiment probíhal jako středněrozměrová zkouška provedená v laboratořích FSV ČVUT v Praze. Cílem experimentu bylo ověřit chování sendvičových panelů za běžné a za zvýšené teploty a pomoci zjistit, zda by se daly sendvičové panely použít ke stabilizaci ocelové konstrukce bez použití klasických ztužidel. Experiment je součástí evropského projektu Steel cladding systems for stabilization of buildings in fire (STABFI).

Při experimentu byly sendvičové panely ze spodní strany zahřívány keramickými dečkami a současně z horní strany rovnoměrně zatěžovány. Pro měření teploty sendvičového panelu byly na ohřívanou stranu panelu, do jádra panelu a na neohřívaných povrch panelu umístěny termočlánky. Po zahřátí panelu na potřebnou teplotu byly panely mechanicky zatěžovány. Toto zatížení bylo postupně zvyšováno, dokud nedošlo k selhání panelu. Měřen byl průhyb sendvičového panelu v polovině a čtvrtině rozpětí a síla, kterou byl panel zatěžován. Výsledkem experimentu je graf vyjadřující závislost zatížení a deformace pro danou teplotu. Následně byly porovnány výsledky z vybraných experimentů jednotlivých panelů o různých tloušťkách.

Během experimentální studie proběhlo celkem 10 zkoušek. Sendvičový panel o rozměrech 1000 mm x 2500 mm byl zkoušen v tloušťce 100 mm a 230 mm. Zkoušky panelu s tloušťkou 100 mm probíhaly při teplotách 20 °C, 300 °C, 450 °C a 600 °C. Panel tloušťky 230 mm byl zkoušen při teplotách 20 °C, 200 °C, 300 °C, 450 °C a 600 °C. Sendvičový panel o velikosti 1200 mm x 4000 mm byl zkoušen v tloušťce 230 mm a teplotě 300 °C. Shrnutí experimentů je vidět v tab. 2.

tab. 2: Seznam zkoušek

Vlastnosti sendvičového panelu			Rozměry panelu	
Typ panelu	Tloušťka panelu (mm)	Teplota (°C)	1000x2500 (mm)	1200x4000 (mm)
SPA E	100	20	1 test	0
		300	1 test	0
		450	1 test	0
		600	1 test	0
	230	20	1 test	0
		200	1 test	0
		300	1 test	1 test
		450	1 test	0
		600	1 test	0

Během každé zkoušky byl měřen průhyb na 5 místech a sledována teplota horního povrchu, spodního povrchu i teplota uvnitř jádra z minerální vlny. Sledován byl také čas, kdy dojde k porušení sendvičového panelu. Celkové chování panelů bylo rovněž vizuálně sledováno.

Schéma experimentu a způsob zatěžování, tedy rovnoměrné zatížení z jedné strany a zahřívání panelu z druhé strany, simuluje reálnou situaci požáru v halovém objektu. V takovém případě působí na stěnu haly z venku zatížení např. větrem, které bylo nahrazeno rovnoměrným zatížením, a z vnitřní strany je stěna zahřívána od probíhajícího požáru.

Tento experiment slouží pro validaci numerického modelu, který je popsán v následujících kapitolách. Experiment i numerický model slouží k lepšímu pochopení chování sendvičových panelů při požáru.

## 3.1 Popis zkušební sestavy

### 3.1.1 Sendvičové panely

Pro zkoušku byly zvoleny stěnové panely s jádrem z minerální vlny o rozměrech 1200 mm x 2500 mm a 1200 mm x 4000 mm. Experiment probíhal na sendvičových panelech SPA E od výrobce RUUKKI. Panely se vyrábějí v modulové šířce 1200 mm. Jsou nehořlavé, mají dobré akustické a tepelně izolační vlastnosti a vysokou požární odolnost. Tento typ panelu se používá jako fasádní. Tloušťka vnitřního plechu je 0,5 mm, tloušťka vnějšího plechu je 0,6 mm. Izolace se dodává v tloušťkách 100, 125, 150, 175, 200 a 230 mm. Pro experiment byly zvoleny krajní hodnoty tloušťky panelu, panel s nejmenší vyráběnou tloušťkou, tedy 100 mm (obr. 14) a panel s největší vyráběnou tloušťkou, tedy 230 mm (obr. 15). Vlastnosti použitých panelů jsou shrnuty v tab. 3.

tab. 3: Vlastnosti použitých sendvičových panelů

Vlastnosti	Panel SPA 100E	Panel SPA 230E
Tloušťka vnějšího plechu	0,6 mm	0,6 mm
Tloušťka vnitřního plechu	0,5 mm	0,5 mm
Tloušťka jádra z minerální vlny	100 mm	230 mm
Objemová hmotnost panelu	21,4 kg/m <sup>2</sup>	32,2 kg/m <sup>2</sup>
Standardní šířka panelu	1200 mm	1200 mm
Vzduchová neprůzvučnost	29 dB	31 dB
Součinitel prostupu tepla	0,41 W/m <sup>2</sup> K	0,17 W/m <sup>2</sup> K
Třída reakce na oheň	A2-s <sub>1</sub> d <sub>0</sub>	A2-s <sub>1</sub> d <sub>0</sub>



obr. 14: Sendvičový panel tl. 100 mm



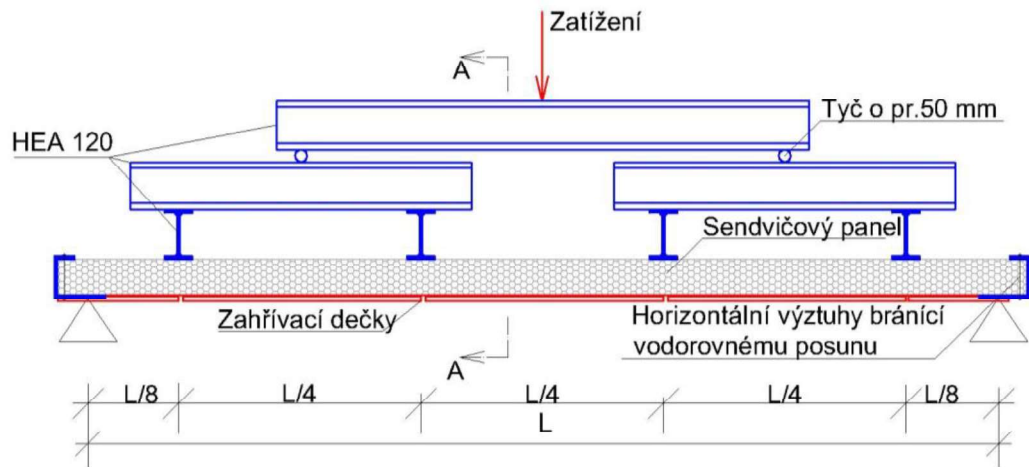
obr. 15: Sendvičový panel tl. 230 mm

### 3.1.2 Mechanické zatěžování

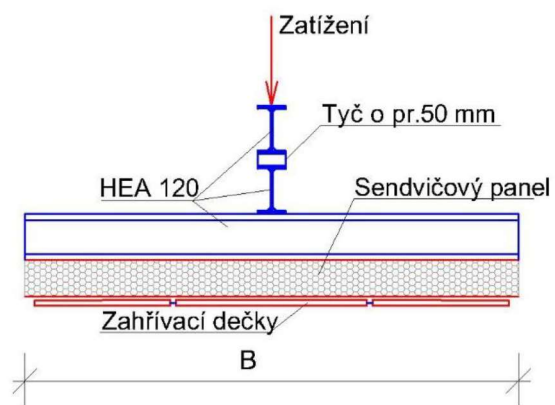
Sendvičové panely byly z horní části liniově zatěžovány přes 4 nosníky o délce 1200 mm, které nahrazují rovnoměrné zatížení panelu. Aby přenos zatížení co nejvíce odpovídal spojitému zatížení, bylo zvoleno zatěžovací schéma, které je vidět na obr. 16 (schéma - pohled), obr. 17 (schéma – řez) a na obr. 18 (skutečné provedení). Zatížení bylo vnášeno pomocí hydraulického lisu do nosníku, který je nejvýše a postupně bylo roznášeno přes 2 kruhové profily o průměru 50 mm do ostatních nosníků a následně do sendvičového panelu. Nahrazení spojitého zatížení pomocí více nosníků bylo převzato z normy [11]. Zatěžování bylo plynule zvyšováno až do selhání panelu. Pro experiment byly navrženy nosníky HEA 120 (ocel třídy S355). Nosníky byly dimenzovány na ohyb a klopení dle maximální únosnosti panelu 2 - 5 kN/m<sup>2</sup>. Použité nosníky a jejich hmotnost jsou shrnuty v tab. 4.

tab. 4: Shrnutí použitých nosníků

Rozpětí panelu	Délka	Hmotnost
2500	1200	23,88
	1400	27,86
	710	14,13
4000	1200	23,88
	2100	41,79
	1100	21,89



obr. 16: Schéma experimentu – pohled



obr. 17: Schéma experimentu - Řez AA'



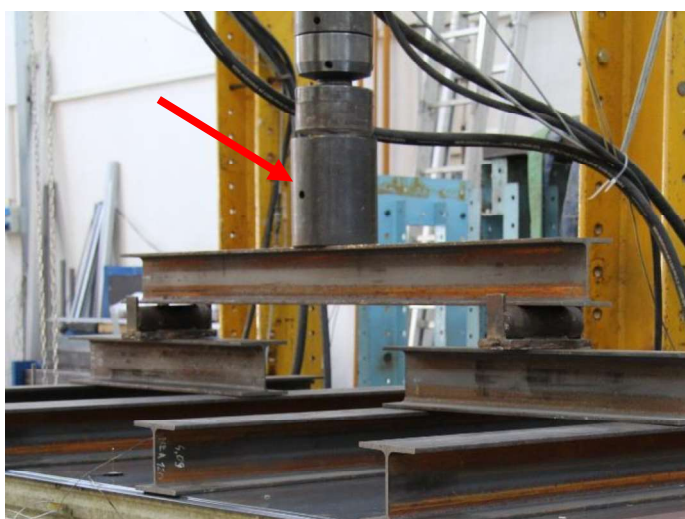
obr. 18: Zatěžovací sestava

Po zahřátí a roztažení plechu sendvičového panelu byly na okrajích panelu zajištěny proti vodorovnému posunu pomocí šroubů. Pokud by v panelu vznikaly velké tahové síly, podpora by umožnila vznik membránového působení sendvičového panelu. Podpora byla tvořena 2 ocelovými deskami o tloušťce 10 mm, které byly umístěny na konce sendvičového panelu při obou površích. Rozměry desky byly 150 mm x 1200 mm. Ocelové desky byly k sendvičovému panelu připevněny pomocí 3 závitových tyčí o průměru 12 mm. Ke spodní desce byla přivařena kruhová tyč o průměru 50 mm. Tyč ležela na ocelové desce o rozměrech 300 mm x 1200 mm. K ní byla přivařena ocelová zarážka, která bránila posunutí směrem dovnitř panelu a tím umožňovala vznik membránového působení (obr. 19). Plech s L zarážkou byl zajištěn proti posunu pomocí šroubů a dalších plechů, které těsně obepínaly konstrukci ukotvenou do podlahy.



obr. 19: Schéma podpory panelu

Před zatěžováním panelů o tloušťce 100 mm byla mezi lis a nejvyšší nosník HEA vložena ocelová podložka, která je vidět na obr. 20. Tato podložka má hmotnost 29,5 kg. Panely o tloušťce 230 mm byly zkoušeny bez podložky.



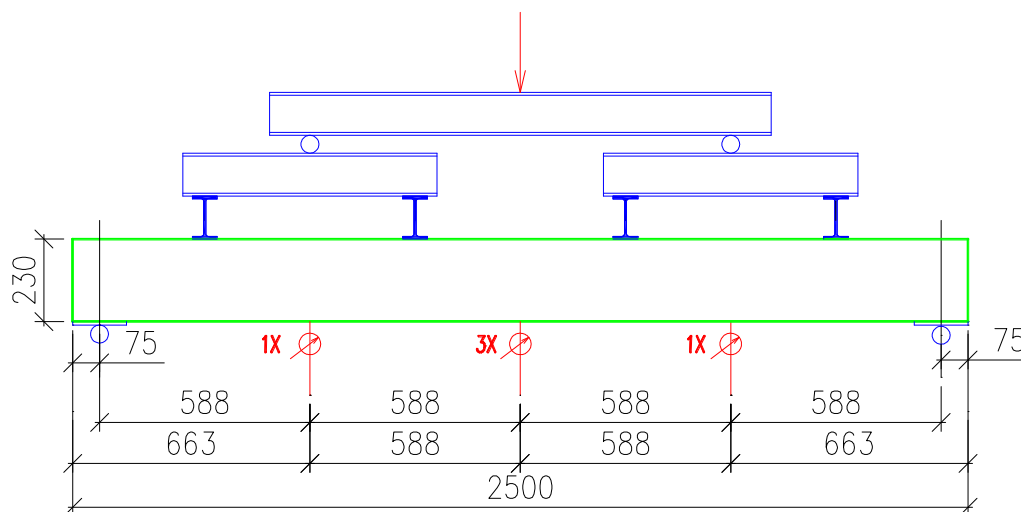
obr. 20: Ocelová podložka mezi zdvihákem a nosníkem



Zatěžování hydraulickým lisem bylo řízeno pomocí deformace. Rychlost zatěžování byla stanovena konstantní na 0,05 mm/s (v některých případech 0,075 mm/s). Při nárůstu průhybu panelu o 5 mm bylo zatěžování pozastaveno na 3 min. Poté bylo zatěžování opět spuštěno se stejnými podmínkami až do selhání panelu.

### 3.1.3 Měření průhybu

Průhyb byl měřen pomocí 5 potenciometrů, které byly umístěny na spodním (ohřívaném) plechu. Jejich rozmístění je znázorněno na obr. 21. V polovině rozpětí panelu se nacházely 3 průhyboměry, zbylé 2 se nacházely vždy 588 mm od každé podpory (1/4 rozpětí). Měření průhybu začalo vždy ještě před položením HEA profilů na sendvičový panel, což způsobilo počáteční průhyb. Poté začalo zahřívání panelu na požadovanou teplotu. Na průběhu průhybu je vidět výchylka, která vznikla položením HEA profilů na sendvičový panel a poté průhyb, který způsobilo pouze zahřátí panelu. Následně byl zaznamenáván průhyb panelu způsobený jeho zatěžováním. Průhyb byl zaznamenáván v intervalu 6 s (s frekvencí 10 Hz).



obr. 21: Rozmístění snímačů průhybu

## 3.2 Popis ohřevu

Pro zahřívání vzorku byl použit systém skládající se z řídicího stroje Mannings HTC 70 kW (obr. 22), keramických zahřívacích deček (obr. 24) a termočlánků typu K o průměru 2 mm. Keramické dečky byly umístěny na dolní stranu sendvičového panelu v těsném kontaktu s panelem. Díky tomu bylo teplo do vzorku přenášeno především vedením. Dečky byly do řídicího stroje připojeny pomocí prodlužovacích kabelů, které jsou vidět na obr. 23. Teplota deček byla kontrolována pomocí 3 termočlánků, které byly umístěny na spodním povrchu panelu. 1 termočlánek vždy řídil provoz 4 keramických deček. Řídicí stroj zahříval sendvičový panel do požadované teploty, poté udržoval na povrchu panelu konstantní teplotu.

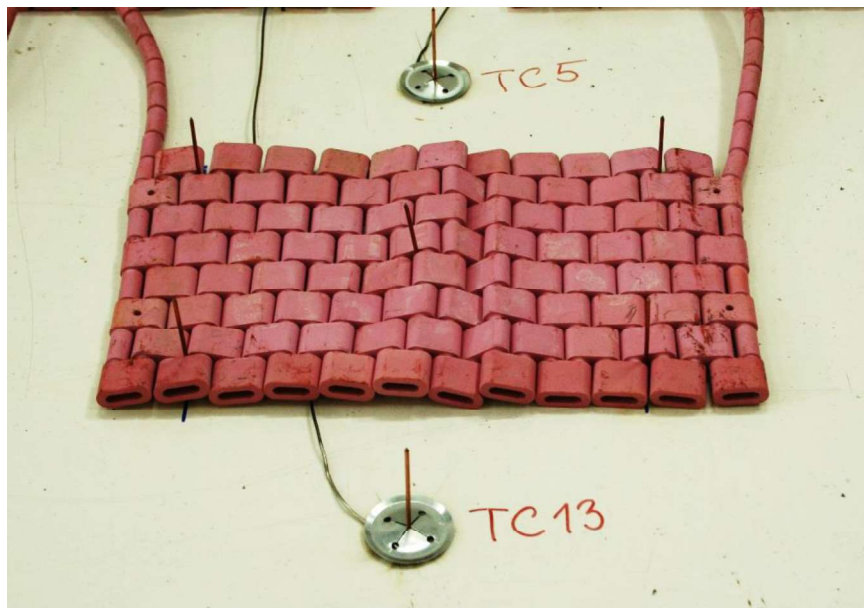


obr. 22: Řídicí stroj Mannings HTC 70 kW



obr. 23: Prodlužovací kabely keramických deček

Keramické topné dečky mají rozměry 307 mm x 167 mm. K jejich přichycení musely být k panelu přivařeny odporovým svařováním trny, na které byly dečky připevněny pomocí plechových terčů (obr. 24). Každá ohřívací dečka byla přichycena pomocí 5 trnů (v každém rohu a uprostřed dečky), aby byla v co největším kontaktu se sendvičovým panelem. Terčíky rovněž sloužily k upevnění termočlánků k měřenému povrchu (obr. 22).



obr. 24: Přichycení keramického ohříváče a termočlánků k panelu

Na spodní stranu panelu bylo dále umístěno 9 termočlánků. 3 termočlánky byly připojeny do řídicího stroje a pomocí nich byla udržována v sendvičovém panelu požadovaná teplota. Zbylé termočlánky byly připojeny do datalogeru a pomocí nich byl zaznamenáván průběh teploty během celého experimentu.

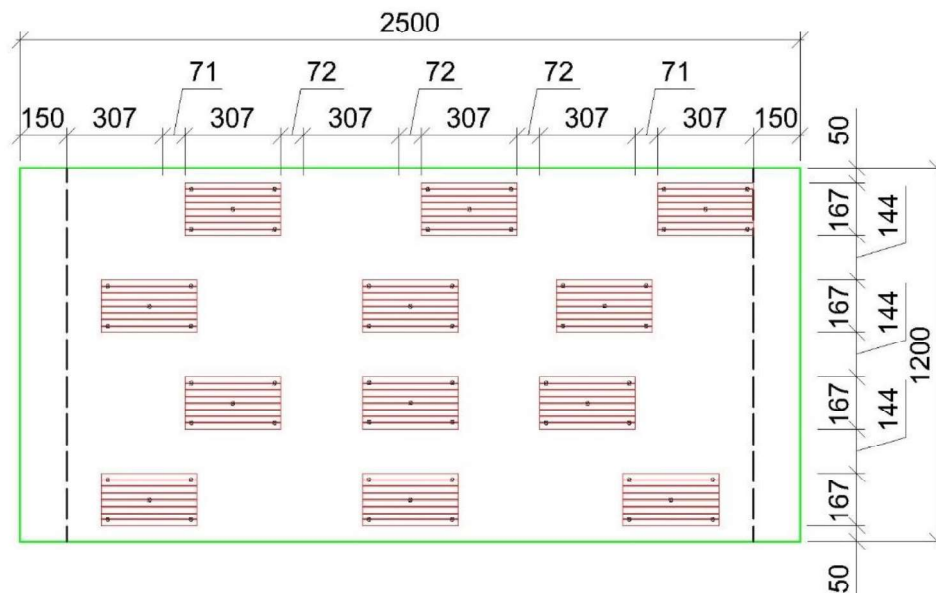
Keramické ohříváče včetně termočlánků byly následně překryty žáruvzdornou rohoží Fiberfrax, aby nedocházelo k úniku tepla do prostoru (obr. 25).



obr. 25: Sendvičový panel překrytý žáruvzdornou rohoží Fiberfrax

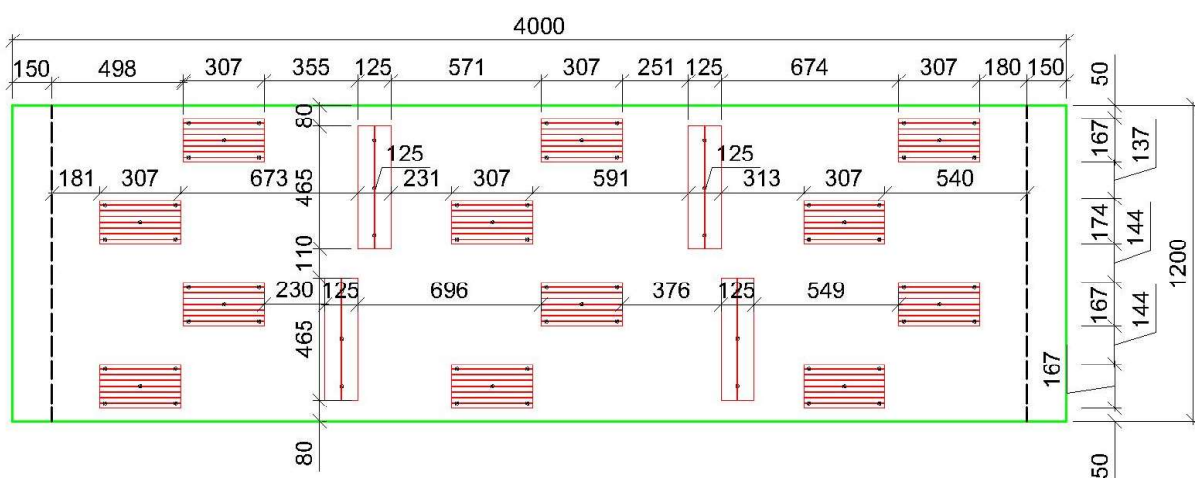
### 3.2.1 Rozmístění zahřívacích deček

Při zkouškách panelů o rozměrech 1200 mm x 2500 mm bylo použito 12 keramických ohřivačů, které byly na sendvičovém panelu rozmístěny rovnoměrně, aby bylo dosaženo stejné teploty na celém spodním povrchu sendvičového panelu. Rozmístění keramických deček na panelech je patrné z obr. 26.



obr. 26: Rozmístění keramických deček na panelech o rozměrech 1200 mm x 2500 mm

Při zkoušce panelu o rozměru 1200 mm x 4000 mm byly kromě 12 keramických deček připojených do řídicího stroje Mannings, použity 4 keramické ohřivače o rozměrech 125 mm x 465 mm s vlastním řídicím strojem. Tyto přídatné dečky byly použity, aby byl spodní povrch panelu zahříván rovnoměrně a nevznikaly velké mezery mezi jednotlivými dečkami. Rozmístění je patrné z obr. 27.

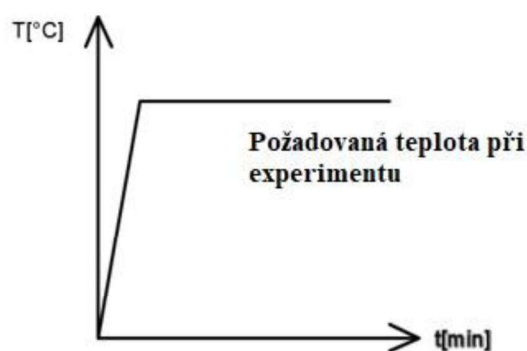


obr. 27: Rozmístění keramických deček na panelu o rozměrech 1200 mm x 4000 mm

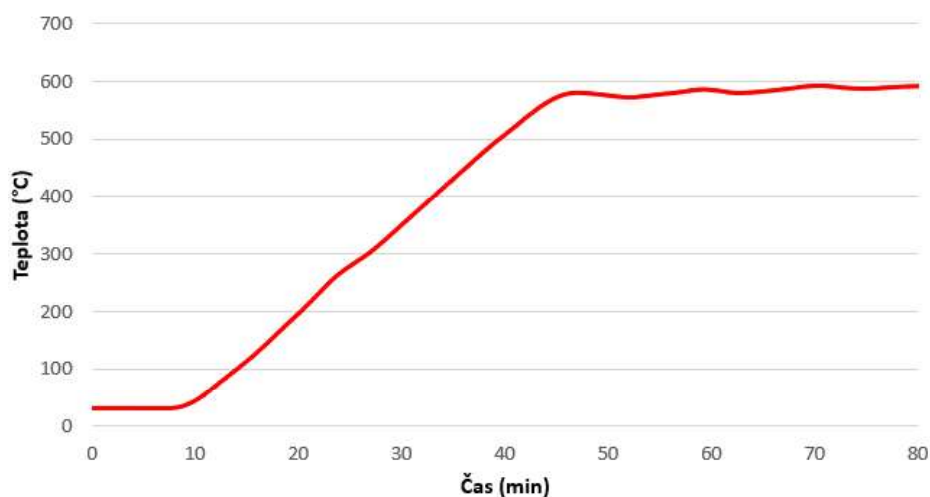
### 3.2.2 Průběh teploty – teplotní křivka ohřevu

Zkouška sendvičových panelů byla prováděna při teplotách 20 °C, 200 °C, 300 °C, 450 °C a 600 °C. Tato teplota byla měřena pomocí 3 termočlánků na vnějším povrchu spodního plechu sendvičového panelu. Termočlánky TC1, TC3 a TC4 byly připojeny do řídicího stroje, který udržoval na povrchu sendvičového panelu požadovanou teplotu.

Keramickými dečkami byl vzorek co nejrychleji zahříván na požadovanou teplotu. Tato teplota byla ve vzorku udržována a panel byl následně mechanicky zatěžován. Předpokládaný průběh teploty keramických deček je vidět na obr. 28. Na obr. 29 je vidět skutečný průběh teploty naměřený během jednoho z experimentů.



obr. 28: Předpokládaný průběh teploty

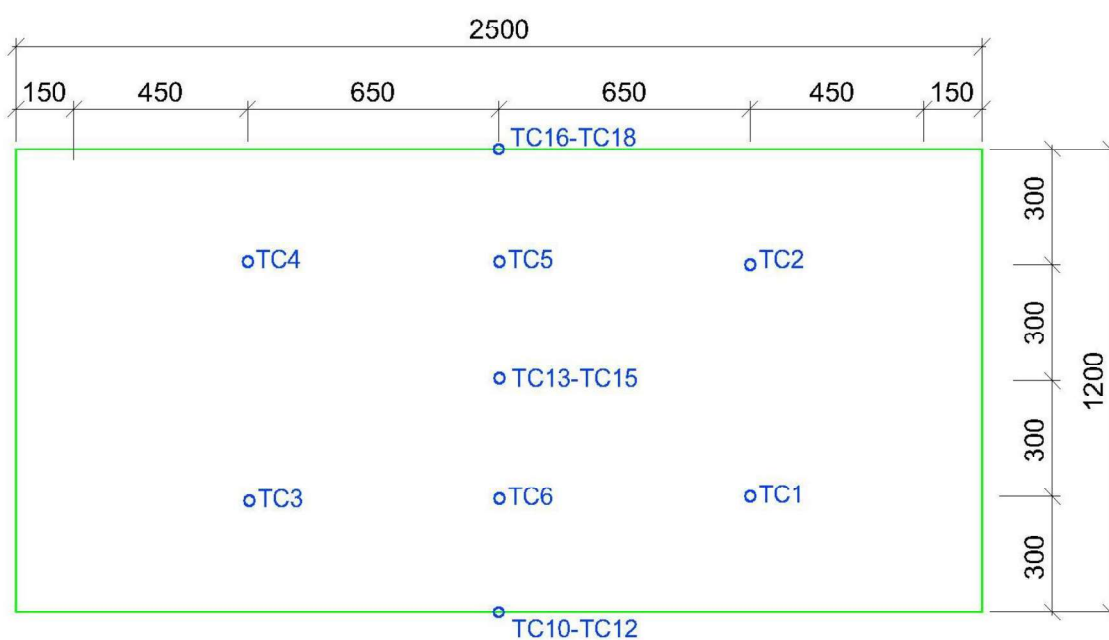


obr. 29: Průběh teploty na spodním povrchu panelu při zkoušce 600 °C

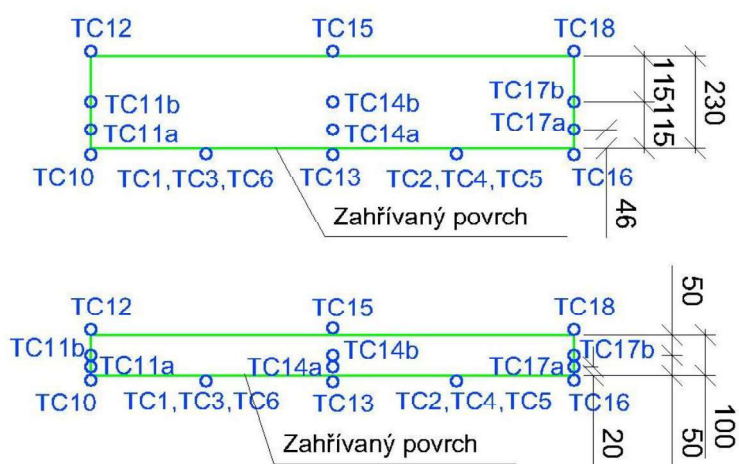
Dalších 15 termočlánků bylo rozmístěno v panelu, aby bylo možné sledovat teplotní profil sendvičového panelu. 6 termočlánků bylo umístěno na spodní (ohříváný) plech panelu, 3 termočlánky byly v 1/5 výšky panelu, 3 termočlánky byly v polovině výšky panelu a 3 termočlánky byly umístěny na neohříváném povrchu. Na povrch panelu byly termočlánky přichyceny pomocí plechového terčíku, aby byla zajištěna jejich stejná poloha po dobu experimentu (obr. 30). Rozmístění termočlánků je vidět na obr. 32 a obr. 33.



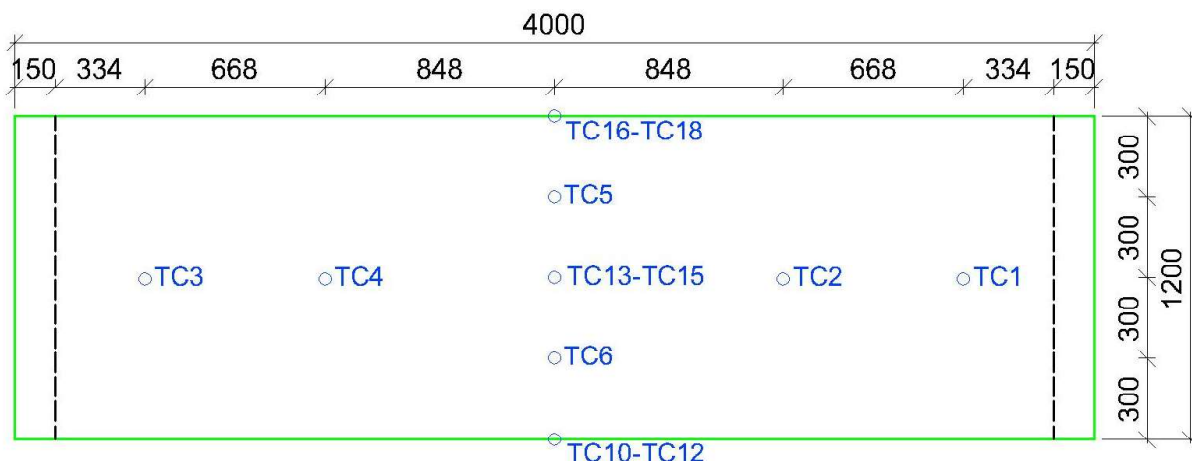
obr. 30: Uchycení termočlánku na povrchu panelu



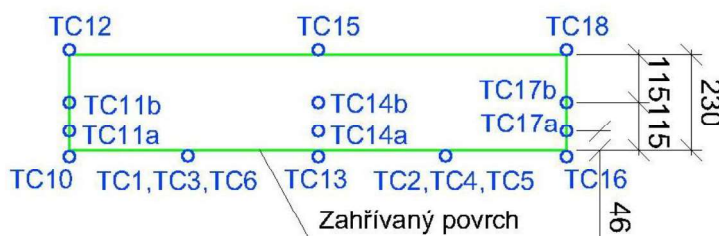
obr. 31: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 2500 mm – půdorys



obr. 32: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 2500 mm – řezy



obr. 33: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 4000 mm – půdorys

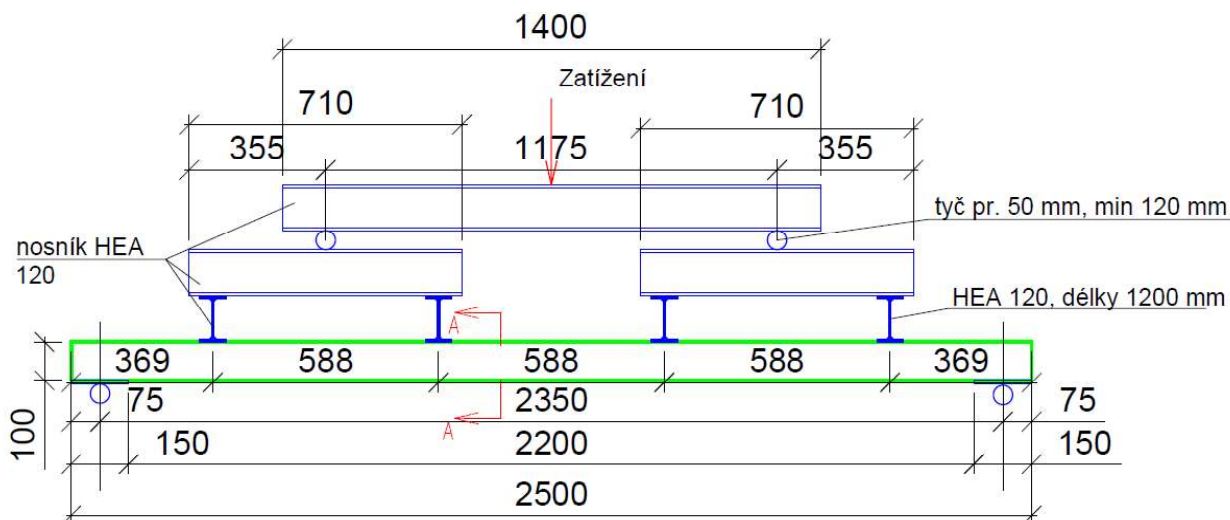


obr. 34: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměru 1200 mm x 4000 mm - řez

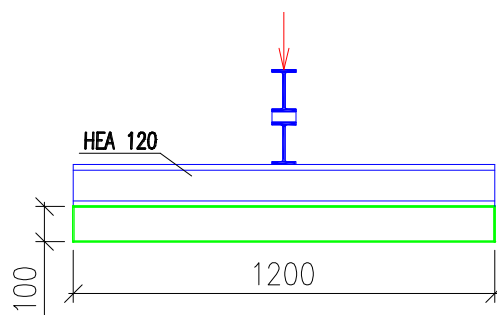
### 3.3 Experimenty na sendvičových panelech tl. 100 mm

Zkoušky sendvičového panelu RUUKKI SPA 100E proběhly v laboratoři fakulty stavební na ČVUT v Praze od 16. 8. 2018 do 21. 8. 2018. Panel byl zatěžován liniově přes 4 nosníky rychlostí 0,075 mm/s (0,05 mm/s). Vlastnosti sendvičového panelu jsou shrnuty v tab. 3.

Zkoušený vzorek měl rozměry 2500 mm x 1200 mm. Zkoušen byl vnějším plechem nahoru a vnitřním plechem dolů. Panel byl na obou koncích podepřen, rozpětí mezi podporami bylo 2350 mm a šířka podpory byla 150 mm. Schéma je vidět na obr. 35 a na obr. 36. Zatížení bylo vnášeno přes 4 nosníky HEA 120 o délce 1,2 m. Nosníky byly od kraje sendvičového panelu vzdáleny 369 mm, rozteč mezi jednotlivými nosníky byla 588 mm. Zatížení bylo vnášeno do nosníku, který byl nejvýše a postupně roznášeno přes kruhové tyče do dalších nosíků. Mezi nejvyšší HEA profil a hydraulický lis byla vložena ocelová podložka o hmotnosti 29,5 kg. Před zatěžováním byl panel zajištěn proti horizontálnímu posunu pomocí 2 ocelových desek o tloušťce 10 mm, které byly na obou koncích panelu. Ocelové desky měly rozměry 150 mm x 1200 mm a k panelu byly přichyceny pomocí 3 závitových tyčí o průměru 12 mm. Dolní deska ležela na kruhové tyči o průměru 50 mm. Tyč ležela na ocelové desce, ke které byla přivařena ocelová zarážka směrem dovnitř panelu. Tato podpora umožnila roztažení panelu vlivem zahřátí a bránila horizontálnímu posunu směrem dovnitř panelu. Tím umožnila vzniknout membránovému působení celého panelu.

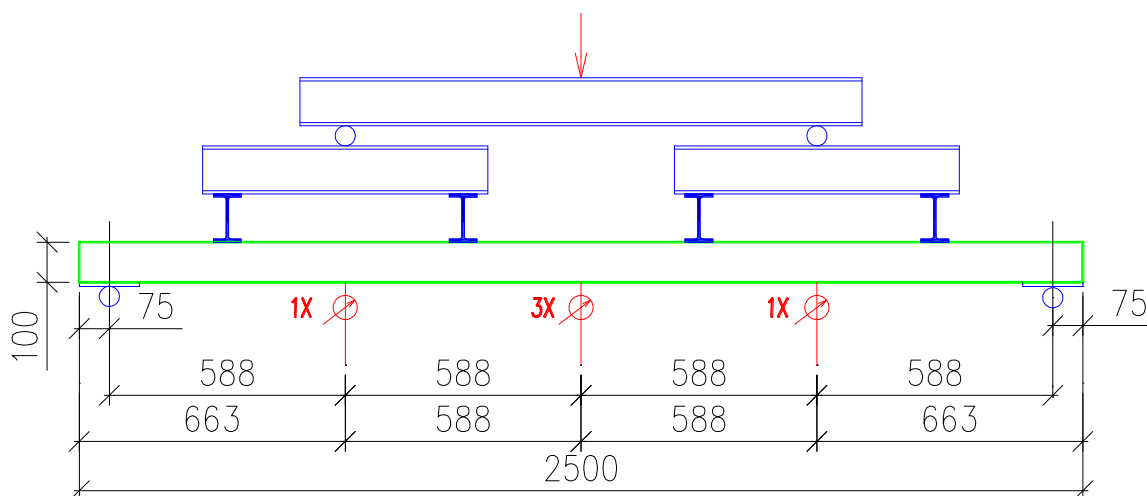


obr. 35: Schéma experimentu na panelech SPA 100E – pohled



obr. 36: Schéma experimentu na panelech SPA 100E – řez A-A

Průhyb panelu byl měřen pomocí 5 potenciometrů, které byly umístěny na dolní (zahříváný) povrch panelu. Snímače průhybu se nacházely ve vzdálenosti 588 od středu podpory i od sebe. V polovině rozpětí sendvičového panelu se nacházely 3 průhyboměry, zbylé 2 průhyboměry byly v  $\frac{1}{4}$  rozpětí panelu (obr. 37).



obr. 37: Schéma rozmístění potenciometrů při experimentu na panelech SPA 100E



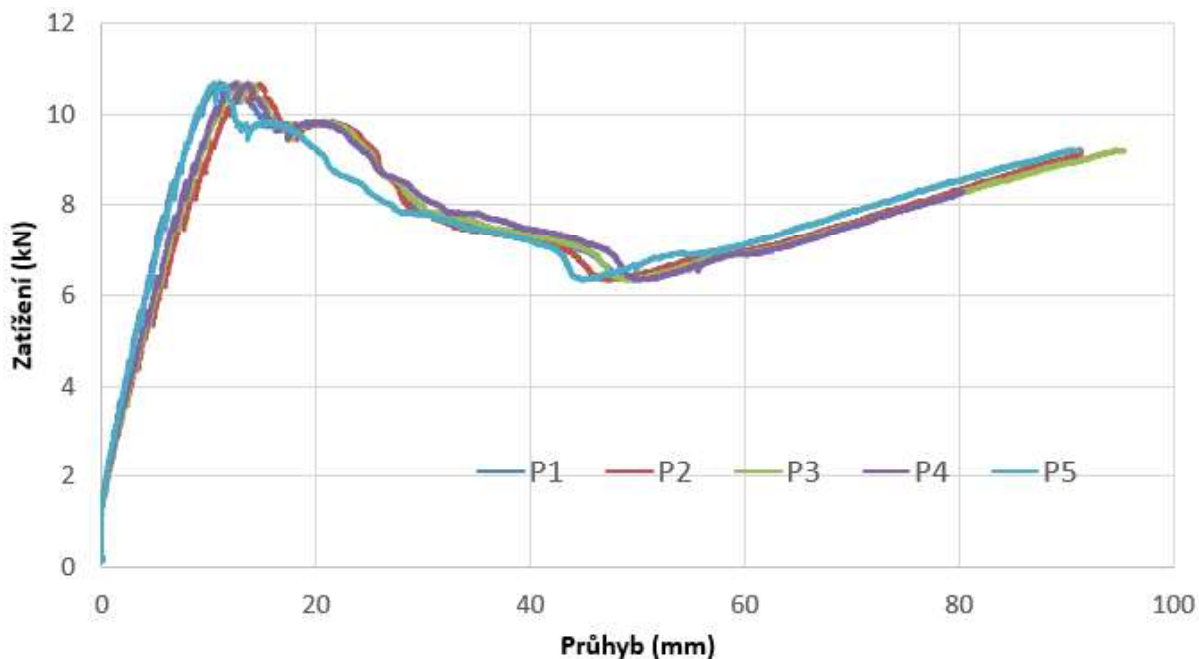
### 3.3.1 Experiment za běžné teploty

Sendvičový panel RUUKKI SPA 100E byl za běžné teploty zkoušen 16. 8. 2018. Běžná teplota bývá zpravidla 20 °C, během experimentu byla ale v laboratoři teplota 28 °C. Tento panel byl zatěžován s rychlostí nárůstu průhybu 0,075 mm/s. Zkoušený vzorek včetně zatěžovací sestavy před začátkem zatěžování je na obr. 38

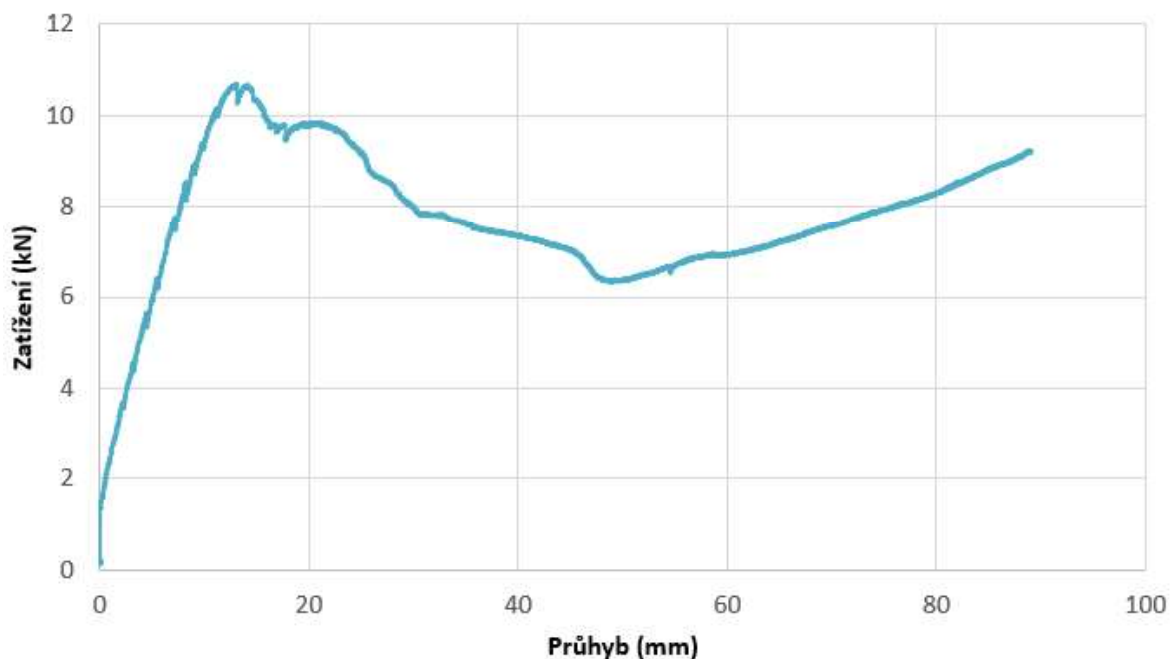


*obr. 38: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 100E při běžné teplotě*

Průhyb jednotlivých potenciometrů je vidět na obr. 39. Průměrný průhyb je na obr. 40. Graf ukazuje průhyb po položení celé zatěžovací soustavy (HEA profily, kruhové tyče, ocelová podložka) na sendvičový panel. To způsobilo průhyb 2,9 mm. Z grafů je patrné, že průhyb byl téměř lineární, až do hodnoty 10,6 kN, tedy do únosnosti panelu. Při této maximální hodnotě zatížení byl průhyb 13 mm. Poté došlo k rychlému nárůstu průhybu až do hodnoty 50 mm, při zatížení 6,3 kN. Od této hodnoty můžeme pozorovat opět nárůst únosnosti panelu, což bylo způsobeno membránovým chováním panelu. Test byl ukončen při dosažení maximálního průhybu potenciometrů (100 mm).



obr. 39: Průhyb jednotlivých průhyboměrů na panelu SPA 100E při běžné teplotě



obr. 40: Průměrný průhyb panelu SPA 100E při běžné teplotě uprostřed rozpětí

Průběh experimentu je shrnut v tab. 5. Během experimentu došlo k největším deformacím v blízkosti podpor. V těchto místech došlo k ohnutí panelu. Na konci experimentu byla v těchto místech minerální vlna zcela oddělena. Plech byl nejvýrazněji deformován v místě, kde se nacházely krajní HEA profily. Fotodokumentace ze zkoušky je na obr. 41 - obr. 43.

tab. 5: Průběh experimentu na panelu SPA 100 E při běžné teplotě

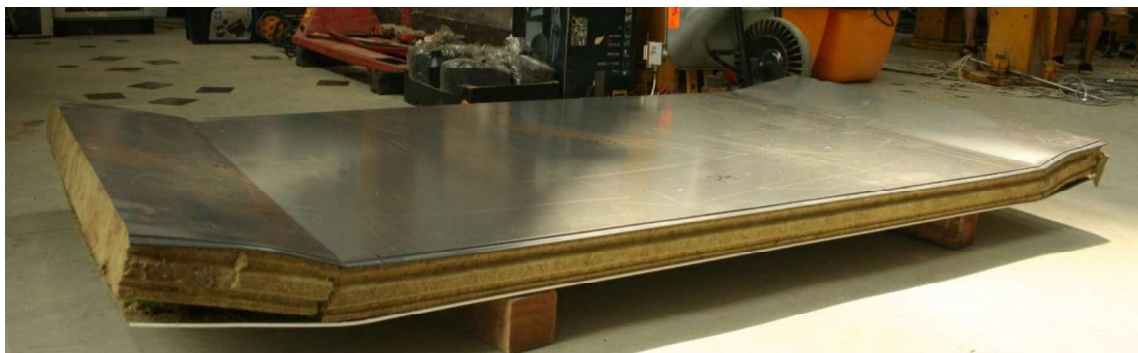
Čas (h:min)	Průběh
	Instalace sendvičového panelu
	Položení nosníků a podložky
0:00	Počátek testu v 10:10
00:18	První pozorovatelné deformace panelu v blízkosti podpor panelu
00:28	Výrazně zvětšení deformací u podpor
00:36	Konec testu v 10:46



obr. 41: Vzorek během experimentu SPA 100E při běžné teplotě - viditelná deformace



obr. 42: Vzorek během experimentu SPA 100E při běžné teplotě - zvětšení deformací



*obr. 43: Vzorek po experimentu SPA 100E při běžné teplotě*

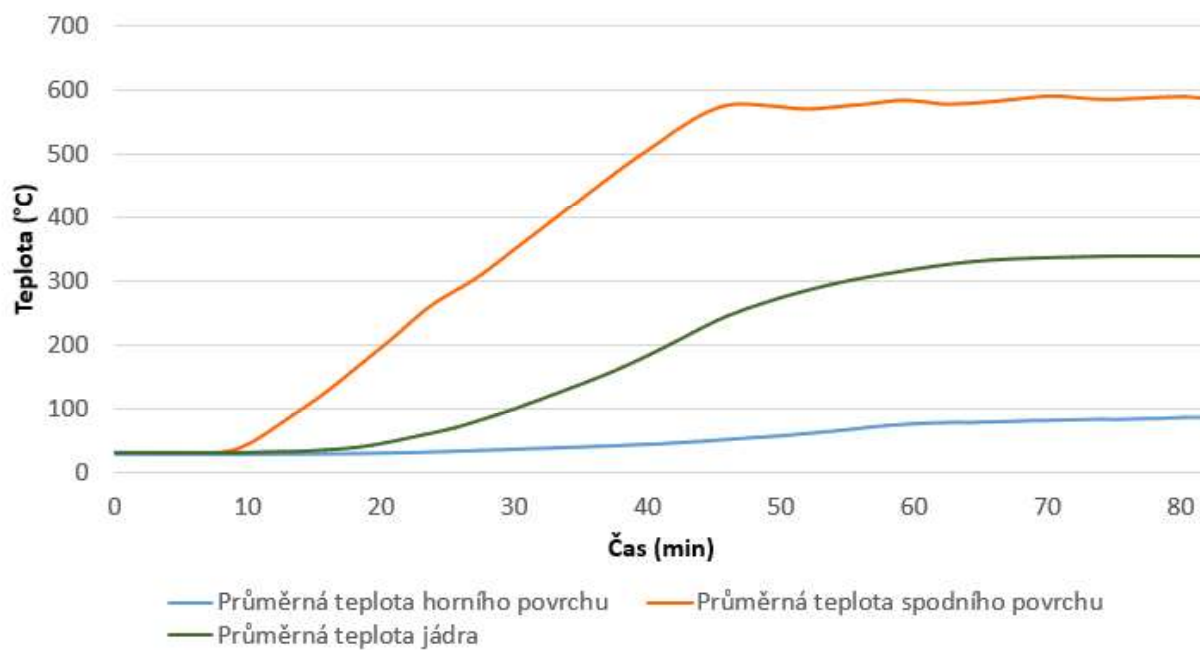
### 3.3.2 Experiment při 600 °C

Sendvičový panel RUUKKI SPA 100E byl při teplotě 600 °C zkoušen 21. 8. 2018. Tento panel byl zatěžován s rychlostí 0,05 mm/s. Po dosažení průhybu 5 mm bylo zatěžování na 3 min pozastaveno a poté spuštěno se stejnými podmínkami, dokud nedošlo k selhání panelu. Zkoušený vzorek včetně zatěžovací sestavy před začátkem zatěžování je na obr. 44.

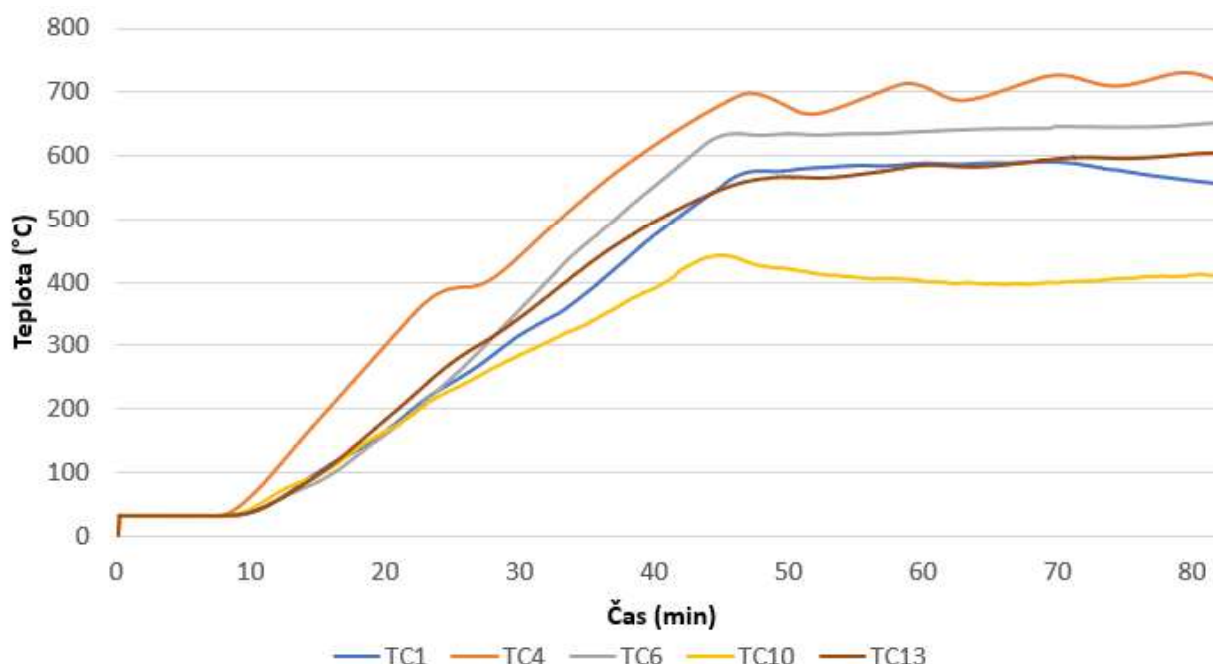


*obr. 44: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 100E při 600 °C*

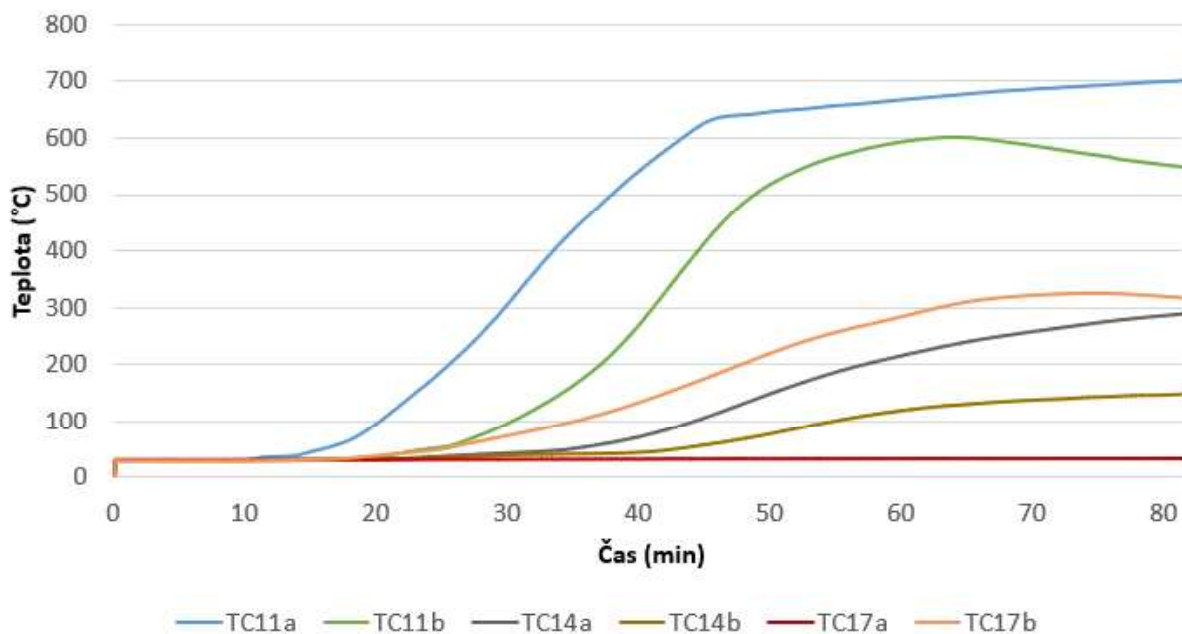
Počáteční teplota prostředí byla 29 °C. Na obr. 45 je vidět průměrná teplota spodního povrchu, průměrná teplota jádra a průměrná teplota horního povrchu. Průměrná teplota spodního povrchu byla vypočtena z teplot termočlánků TC 1, TC 4, TC 6, TC 10 a TC 13 (obr. 46). Teplota jádra byla vypočtena z teplot termočlánků TC 11a, TC 11b, TC 14a, TC 14b, TC 17a a TC 17b (obr. 47). Teplota horního povrchu byla vypočtena z termočlánků TC 12, TC 15 a TC 18.



obr. 45: Průměrné teploty panelu SPA 100E při 600 °C

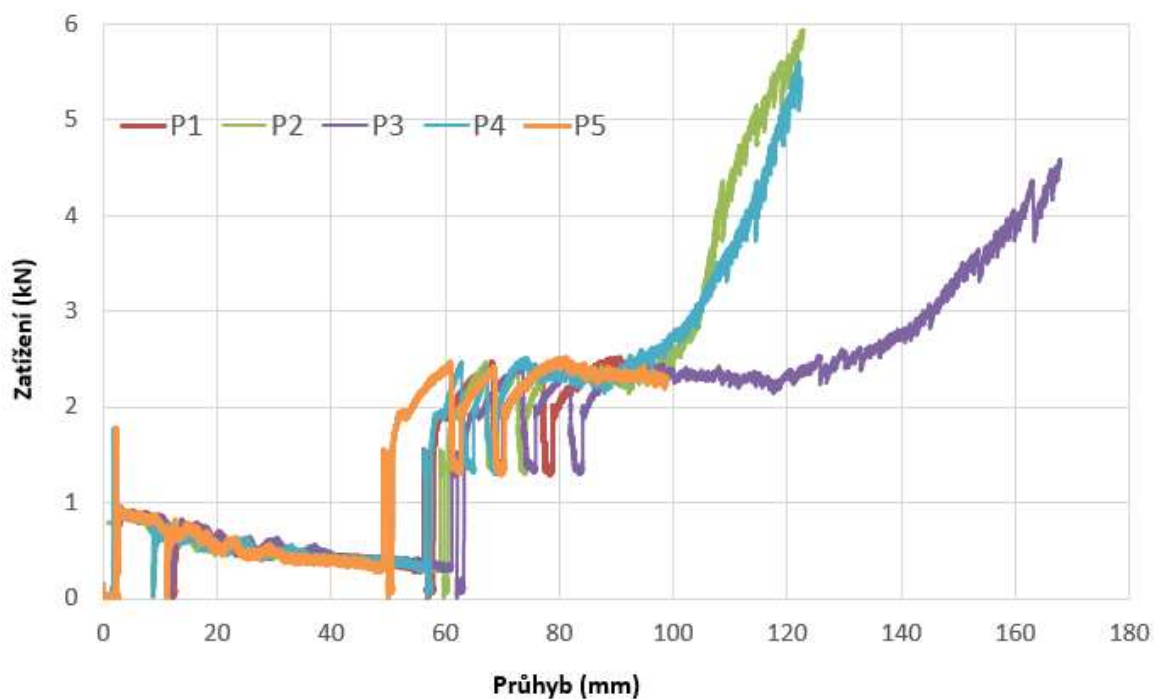


obr. 46: Teploty naměřené na spodním povrchu panelu SPA 100E při 600 °C

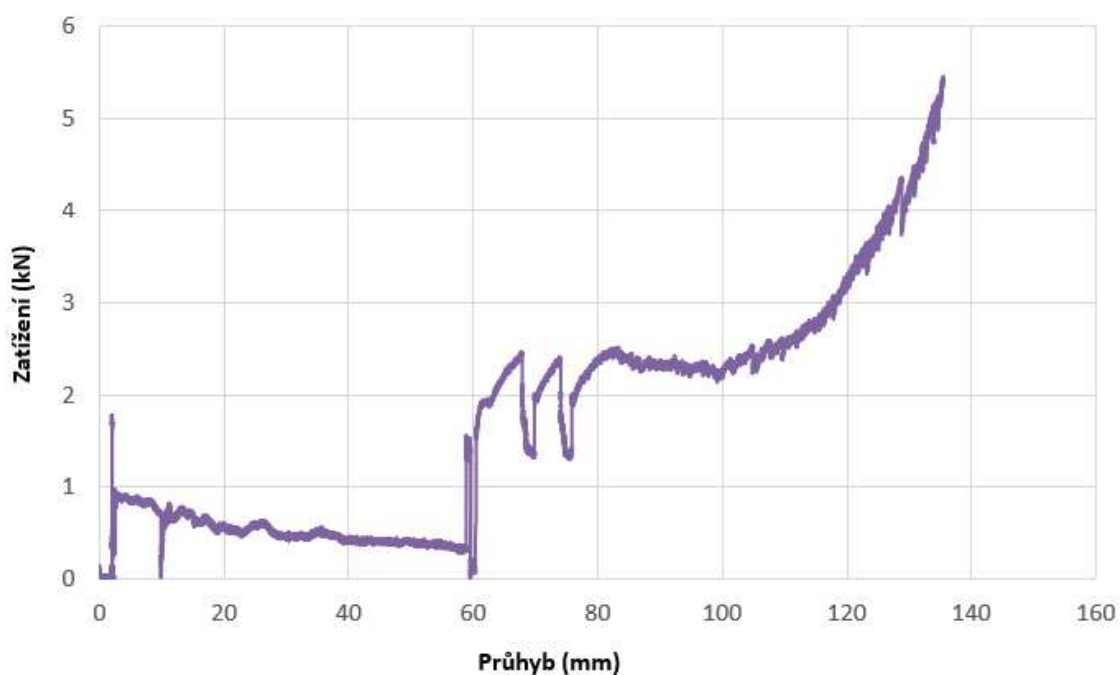


obr. 47: Teploty naměřené v jádru panelu SPA 100E při 600 °C

Průhyb změřený pomocí jednotlivých potenciometrů je vidět na obr. 48. Průměrný průhyb je na obr. 49. Grafy ukazují průhyb po položení celé zatěžovací soustavy (HEA profily, kruhové tyče, ocelová podložka) na sendvičový panel. V tomto případě to způsobilo průhyb 2,8 mm. Poté bylo spuštěno zahřívání sendvičového panelu na požadovanou teplotu 600 °C (obr. 50). Zahřátí způsobilo průhyb 50 – 60 mm. Poté začalo mechanické zatěžování panelu. Nárůst je vidět na obr. 48 až do prvního vrcholu, při kterém byla síla 2,5 kN. Při této síle byl průhyb mezi 60 – 80 mm. Poté se začala odolnost panelu zase zvyšovat. Tento nárůst je způsoben membránovým chováním sendvičového panelu. Měření bylo ukončeno při dosažení maximální hodnoty průhyboměrů. U průhyboměrů P1 a P5 byl maximální měřitelný průhyb 100 mm, u ostatních průhyboměrů byla maximální možná měřitelná hodnota 160 mm.



obr. 48: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 100E při 600 °C



obr. 49: Průměrný průhyb na panelu SPA 100E při 600 °C



obr. 50: Sendvičový panel SPA 100E během zahřívání na 600 °C

Průběh experimentu je shrnut v tab. 6. Během experimentu došlo k největším deformacím uprostřed rozpětí panelu. K větším deformacím docházelo v prostoru mezi krajními nosníky, kterými bylo vnášeno zatížení. Během tohoto experimentu nedošlo k prasknutí minerální vlny. Sendvičový panel po experimentu je vidět na obr. 51, obr. 52 a obr. 53.

tab. 6: Průběh experimentu na panelu SPA 100 E při 600 °C

Čas (h:min)	Průběh experimentu
	Instalace sendvičového panelu
0:00	Začátek měření teploty a deformace ve 12:04
0:01	Položení nosníků a podložky – průhyb 2,7 mm
0:08	Počátek zahřívání
0:47	Dosažení 600 °C – průhyb 24 mm, počátek zatěžování
1:22	Konec experimentu ve 13:26

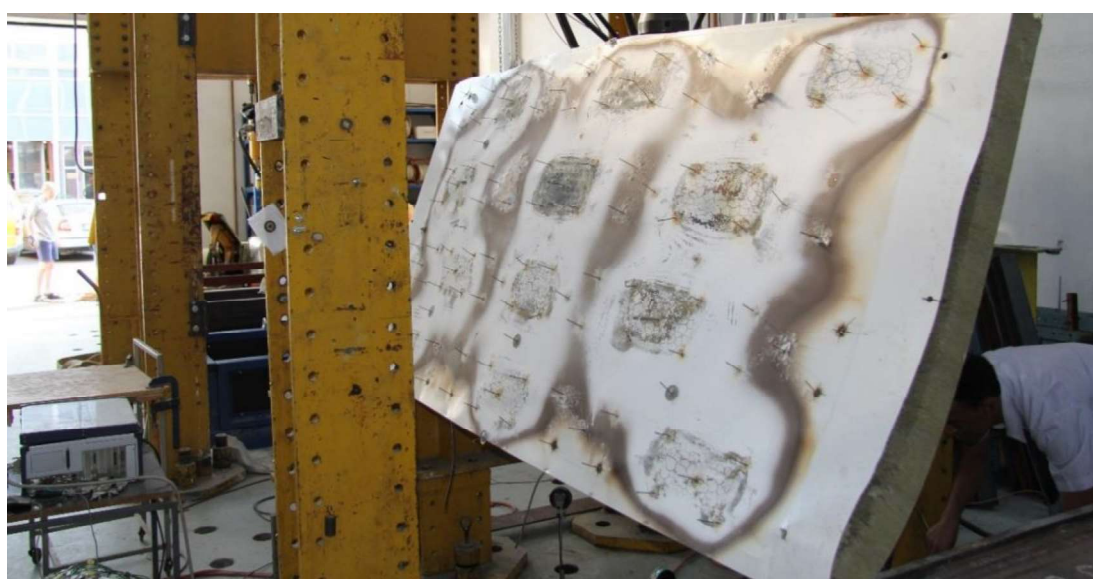




*obr. 51: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C*



*obr. 52: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C*

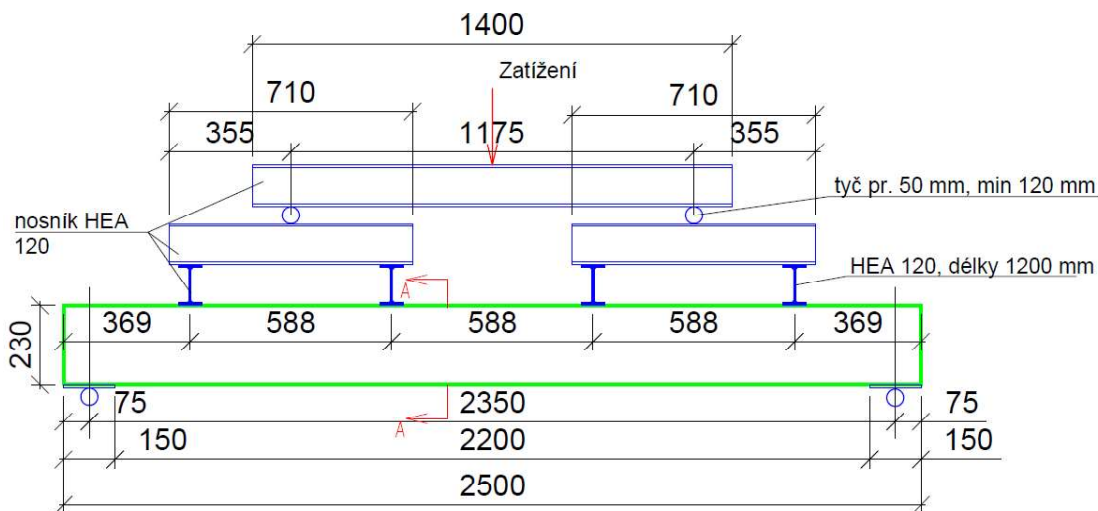


*obr. 53: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C*

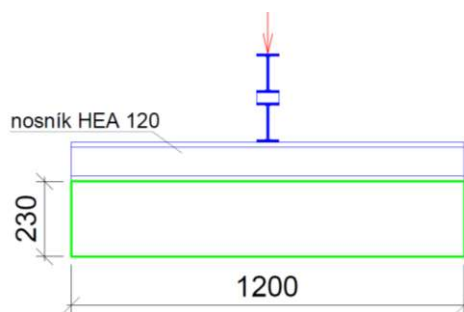
### 3.4 Experimenty na sendvičových panelech tl. 230 mm

Zkoušky sendvičového panelu RUUKKI SPA 230E proběhly v laboratoři fakulty stavební na ČVUT v Praze od 8. 8. 2018 do 16. 8. 2018. Panely byly zatěžovány liniově přes 4 nosníky rychlostí 0,075 mm/s (0,05 mm/s). V tab. 3 jsou shrnuty vlastnosti zkoušeného typu panelu.

Zkoušený vzorek měl rozměry 2500 mm x 1200 mm. Zkoušen byl vnějším plechem nahoru a vnitřním plechem dolů. Panel byl na obou koncích podepřen, rozpětí mezi podporami bylo 2350 mm a šířka podpory byla 150 mm. Schéma je vidět na obr. 54 a na obr. 55. Zatížení bylo vnášeno přes 4 nosníky HEA 120 o délce 1,2 m. Nosníky byly od kraje sendvičového panelu vzdáleny 369 mm, rozteč mezi jednotlivými nosníky byla 588 mm. Zatížení bylo vnášeno do nosníku, který byl nejvýše a postupně roznášeno přes kruhové tyče do dalších nosíků. Před zatěžováním byl panel zajištěn proti horizontálnímu posunu pomocí 2 ocelových desek o tloušťce 10 mm, které byly na obou koncích panelu. Ocelové desky měly rozměry 150 mm x 1200 mm a k panelu byly přichyceny pomocí 3 závitových tyčí o průměru 12 mm. Pod dolní deskou ležela kruhová tyč o průměru 50 mm. Tyč ležela na ocelové desce, ke které byla přivařena ocelová zarážka, která bránila posunutí panelu směrem dovnitř panelu. Podpora umožnila roztažení panelu vlivem zahřátí a bránila horizontálnímu posunu směrem dovnitř panelu. Tím umožnila vzniknout membránovému působení celého panelu.

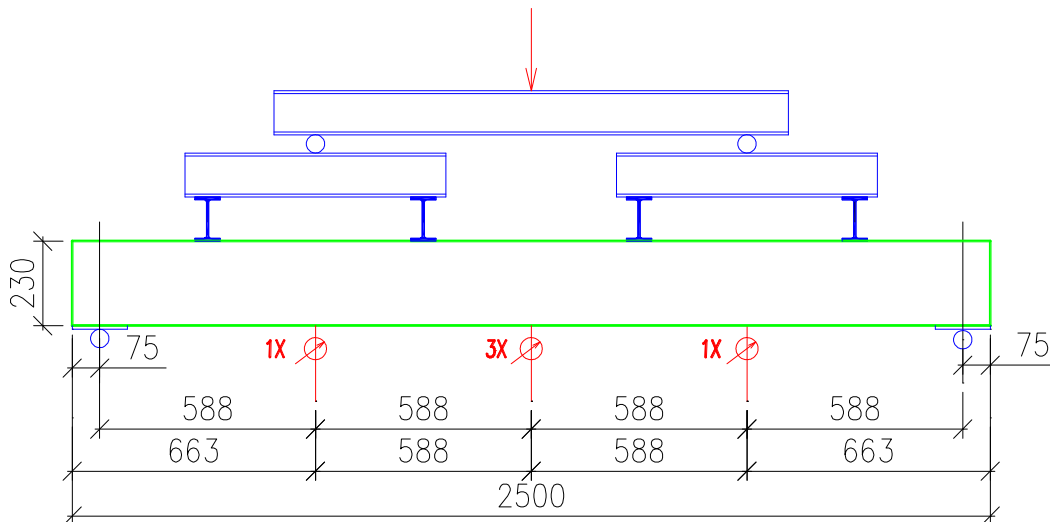


obr. 54: Schéma experimentu na panelech SPA 230E – pohled



obr. 55: Schéma experimentu na panelech SPA 230E – řez A-A

Shodně jako u panelu tl. 100 mm byl průhyb panelu měřen pomocí 5 průhyboměrů, které byly umístěny na dolní (zahříváný) povrch panelu. Průhyboměry se nacházely ve vzdálenosti 588 mm od středu podpory i od sebe. V polovině rozpětí sendvičového panelu se nacházely 3 snímače průhybu, zbylé 2 snímače průhybu byly v  $\frac{1}{4}$  rozpětí panelu (obr. 37).



obr. 56: Schéma rozmístění potenciometrů při experimentu na panelech SPA 230E

### 3.4.1 Experiment za běžné teploty

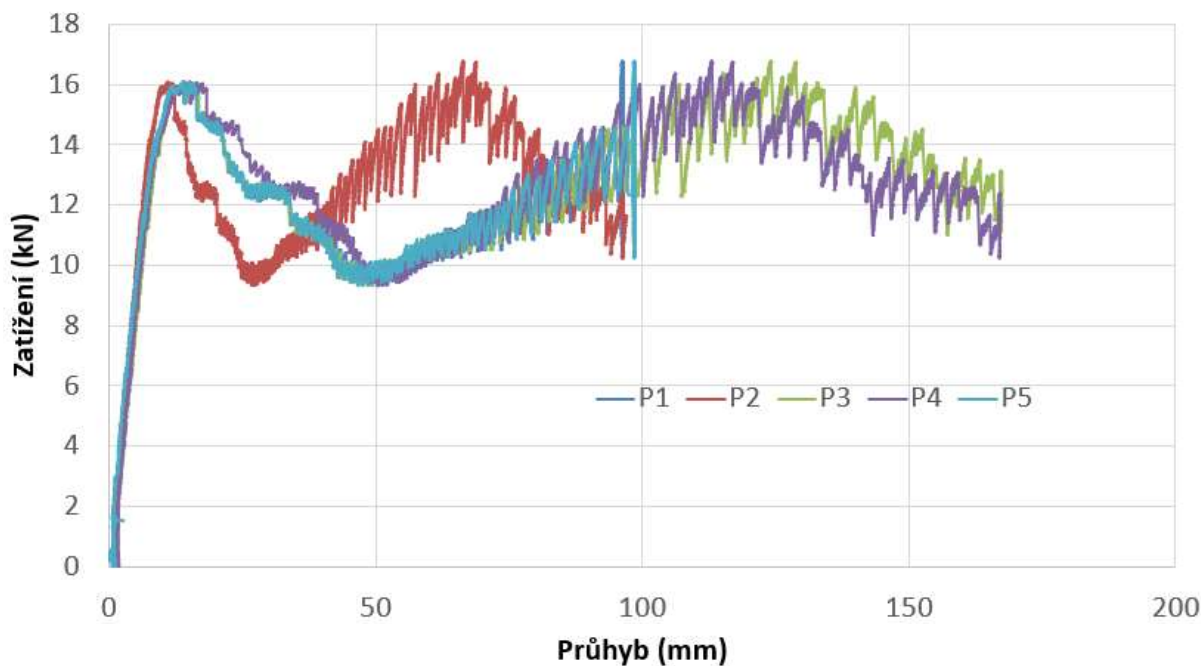
Sendvičový panel RUUKKI SPA 230E byl za běžné teploty zkoušen 8. 8. 2018. Teplota prostředí byla 29 °C. Běžná teplota bývá zpravidla 20 °C. Tento panel byl zatěžován s rychlostí 0,075 mm/s. Zatěžovací sestava i se vzorkem je na obr. 57.



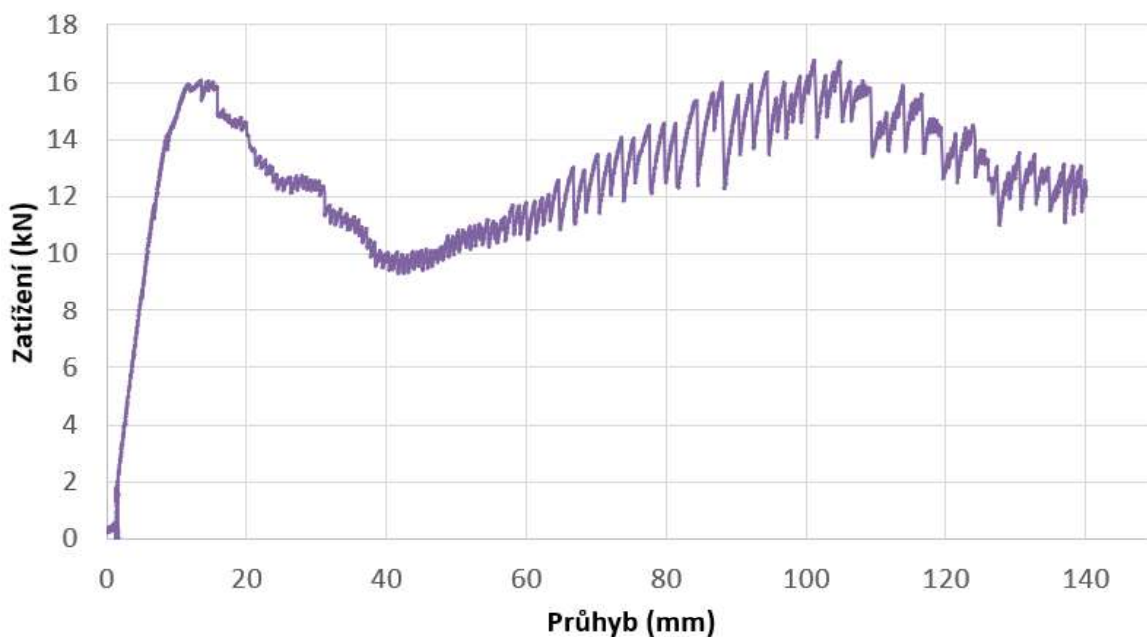
obr. 57: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 230E při běžné teplotě

Průhyb zaznamenaný pomocí jednotlivých potenciometrů je na obr. 58. Průměrný průhyb ze všech snímačů je na obr. 59. Měření průhybu začalo ještě před položením celé zatěžovací

sestavy (HEA profily, kruhové tyče), které způsobilo průhyb 1,2 mm. Tento počáteční průhyb je vidět na obou grafech. Z grafů je patrné, že průhyb byl téměř lineární, až do hodnoty 16 kN, tedy do únosnosti panelu. Při této maximální hodnotě zatížení byl průhyb 13 mm. Poté došlo k rychlému nárůstu průhybu až do hodnoty 50 mm, při zatížení 6,3 kN. Od této hodnoty můžeme pozorovat opět nárůst únosnosti panelu, což bylo způsobeno membránovým chováním panelu. Test byl ukončen při dosažení maximálního průhybu potenciometrů (100 mm pro P1, P2 a P5 a 160 mm pro P3 a P4).



obr. 58: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 230E při běžné teplotě



obr. 59: Průměrný průhyb panelu SPA 230E při běžné teplotě uprostřed rozpětí panelu

Průběh experimentu je shrnut v tab. 5. Během experimentu došlo k největším deformacím pod druhým HEA nosníkem zprava. V těchto místech došlo k ohnutí panelu a prasknutí minerální vlny v celé tloušťce. V tomto případě došlo k selhání vlivem ohybu. Fotografie pořízené během zkoušky jsou na obr. obr. 60 - obr. 63.

tab. 7: Průběh experimentu na panelu SPA 230 E při běžné teplotě

Čas (h:min)	Průběh
	Instalace sendvičového panelu
	Položení nosníků
00:00	Počátek testu - počátek zatěžování v 14:09
00:09	První pozorovatelné deformace panelu pod 2. nosníkem zprava
00:21	Výrazně zvětšení deformací trhliny a deformace pod 2. nosníkem
00:33	Konec testu v 14:42



obr. 60: Vzorek během experimentu SPA 230E při běžné teplotě - viditelná deformace



obr. 61: Vzorek během experimentu SPA 230E při běžné teplotě - zvětšení deformací



*obr. 62: Vzorek po experimentu SPA 230E při běžné teplotě*



*obr. 63: Detail trhliny po testu panelu SPA 230E při běžné teplotě*

### 3.4.2 Experiment při 600 °C

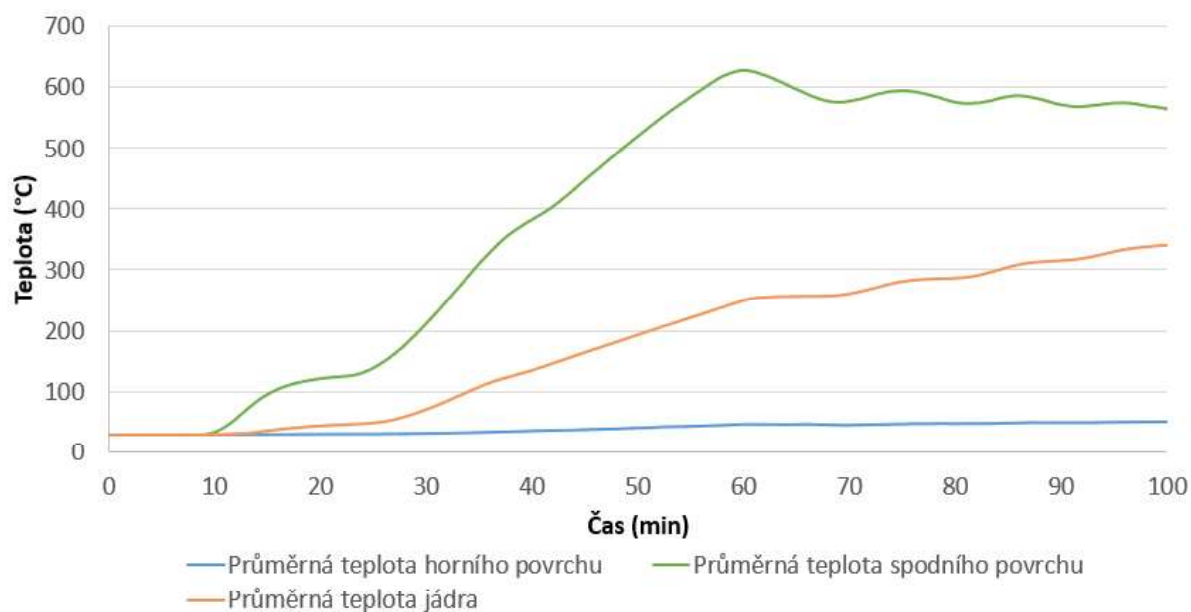
Sendvičový panel RUUKKI SPA 230E byl při teplotě 600 °C zkoušen 16. 8. 2018. Tento panel byl zatěžován s rychlostí 0,05 mm/s. Po dosažení průhybu 5 mm bylo zatěžování na 3 min pozastaveno a poté spuštěno se stejnými podmínkami, dokud nedošlo k selhání panelu. Zkoušený vzorek včetně zatěžovací sestavy před začátkem zatěžování je na obr. 64.

Počáteční teplota prostředí byla 29 °C. Na obr. 65 je vidět průměrná teplota spodního povrchu, průměrná teplota jádra a průměrná teplota horního povrchu. Průměrná teplota spodního povrchu byla vypočtena z teplot termočlánků TC 1, TC 4, TC 6, TC 10 a TC 13 (obr. 66). Teplota jádra byla vypočtena z teplot termočlánků TC 11a, TC 11b, TC 14a, TC 14b, TC 17a a TC 17b (obr. 67). Teplota horního povrchu byla vypočtena z termočlánků TC 12, TC 15 a TC 18. Z teploty

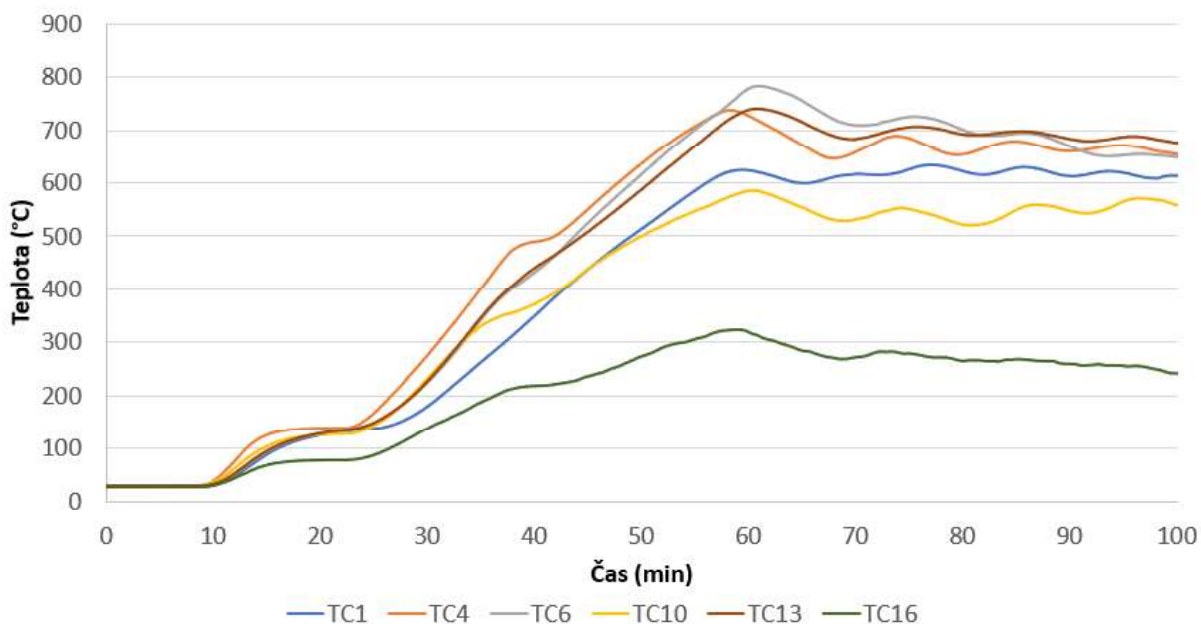
dolního povrchu je vidět, že řídicí stroj není schopný udržet po celou dobu experimentu všude přesně 600 °C. Řídicí stroj kontroloval teplotu pomocí termočlánků TC 1, TC 3 a TC 5 (každý termočlánek kontroloval 4 keramické dečky). Teplota proto může být na některých místech o něco vyšší nebo nižší, podle aktuální teploty daného termočlánku.



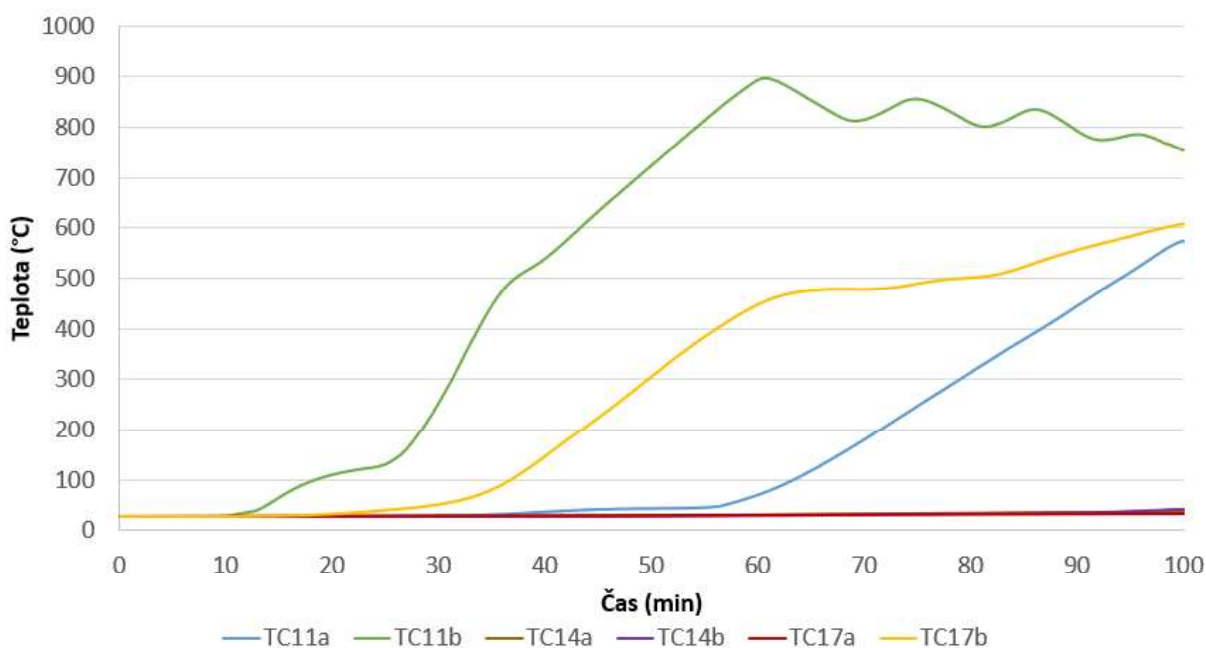
obr. 64: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 230E při 600 °C



obr. 65: Průměrné teploty panelu SPA 230E při 600 °C



obr. 66: Teploty naměřené na spodním povrchu panelu SPA 230E při 600 °C

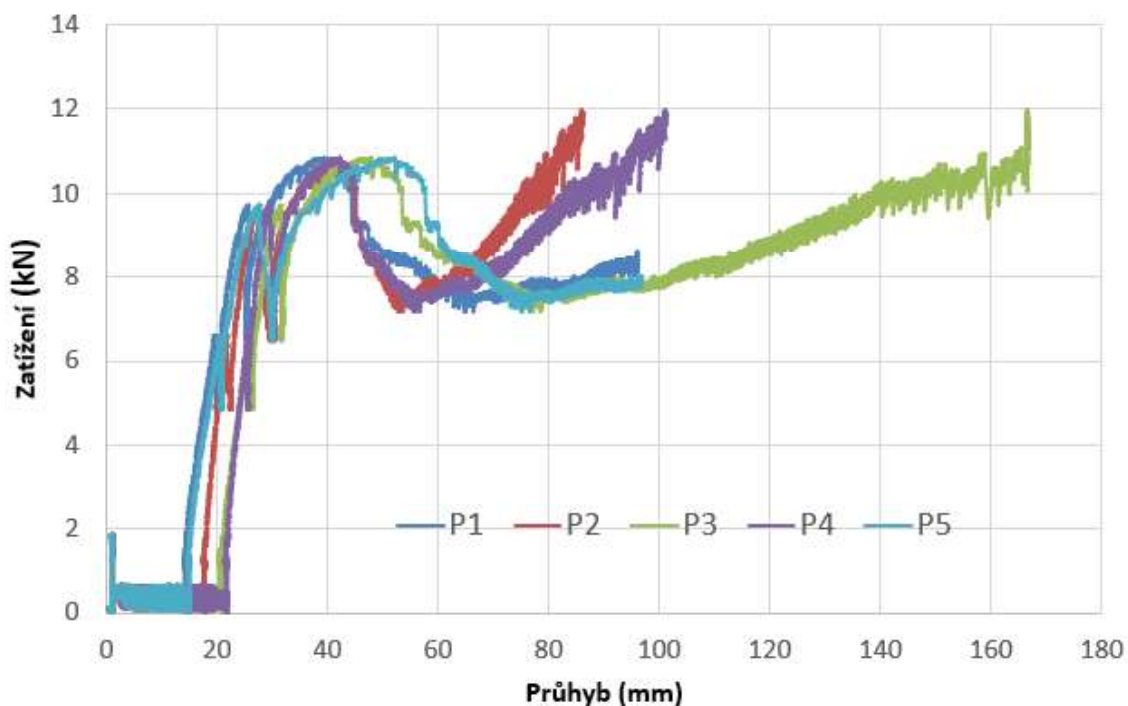


obr. 67: Teploty naměřené v jádru panelu SPA 230E při 600 °C

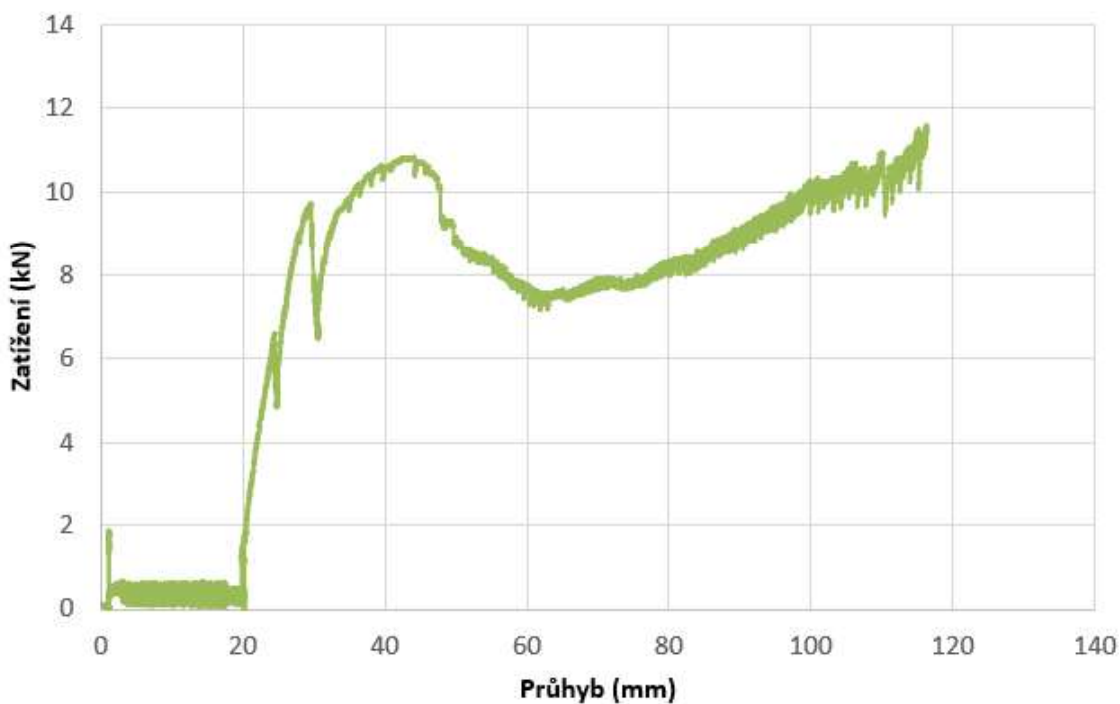
Průhyb jednotlivých průhyboměrů (P1, P2, P3, P4 a P5) je vidět na obr. 68. Průměrný průhyb vypočítaný ze všech průhyboměrů je na obr. 69. Grafy ukazují průhyb před položením celé zatěžovací soustavy (HEA profily, kruhové tyče) na sendvičový panel. V tomto případě uložení profilů způsobilo průhyb 1,2 mm. Poté bylo spuštěno zahřívání sendvičového panelu na požadovanou teplotu 600 °C (obr. 70 a obr. 71). Zahřátí způsobilo průhyb 16 – 22 mm. Následně byl panel mechanicky zatěžován. Na obr. 69 je vidět, že nárůst průhybu až do prvního vrcholu byl téměř lineární. Maximální hodnota zatížení byla 11 kN. Při této síle byl průhyb mezi



40 – 50 mm. Následně došlo k poklesu zatížení na 7,5 kN a nárůstu průhybu na 60 mm. Poté se začala odolnost panelu zase zvyšovat. Tento nárůst je způsoben membránovým chováním sendvičového panelu. Měření bylo ukončeno před dalším vrcholem, z důvodu velkého množství kouře v laboratoři. Průhyboměry dosáhly téměř svého limitu (P1 a P5 100 mm a P3 160 mm).



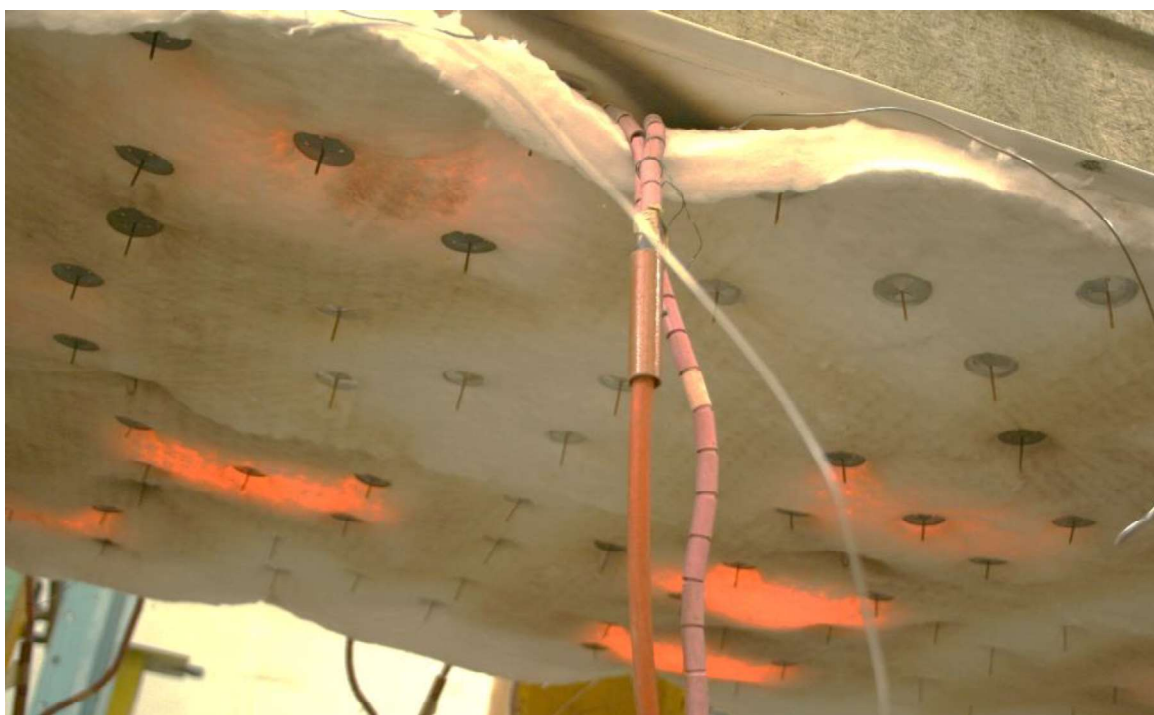
obr. 68: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 230E při 600 °C



obr. 69: Průměrný průhyb na panelu SPA 230E při 600 °C



*obr. 70: Sendvičový panel SPA 230E během zahřívání na 600 °C*



*obr. 71: Detail zahřívajícího panelu SPA 230E*

Průběh experimentu je shrnut v tab. 8. K největší deformaci došlo mezi prvním a druhým zatěžovacím HEA nosníkem zprava. V tomto místě je vidět velké prohnutí plechu panelu. Došlo zde také k popraskání minerální vlny. K porušení minerální vlny došlo v místě styku 2 bloků izolace obr. 72 a obr. 73. Při experimentu došlo k oddělení spodního plechu od zbytku sendvičového panelu. Jednotlivé bloky minerální izolace, ze které se sendvičový panel skládá, se vlivem deformace pohnuly a vznikly mezi nimi velké mezery obr. 74. Na obr. 75 je vidět, že došlo k oddělení plechu panelu a s ostatními vrstvami už nespolečně působil.

tab. 8: Průběh experimentu na panelu SPA 230 E při 600 °C

Čas (h:min)	Průběh experimentu
	Instalace sendvičového panelu v 11:57
0:00	Položení nosníků a podložky – průhyb 1,2 mm
0:08	Začátek zahřívání a měření teploty
00:48	Začátek mechanického zatěžování, průhyb od teploty 20 mm
01:12	První viditelná prasklina pod druhým nosníkem zprava
01:22	Rozšíření praskliny a zvětšení průhybu
01:37	Konec experimentu ve 13:34



obr. 72: Sendvičový panel SPA 230 E během experimentu - 600 °C (vznik praskliny)



obr. 73: Sendvičový panel SPA 230 E během experimentu - 600 °C (rozšíření praskliny)



obr. 74: Detail jádra sendvičového panelu SPA 230E po experimentu – 600 °C



obr. 75: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C

### 3.5 Shrnutí a porovnání

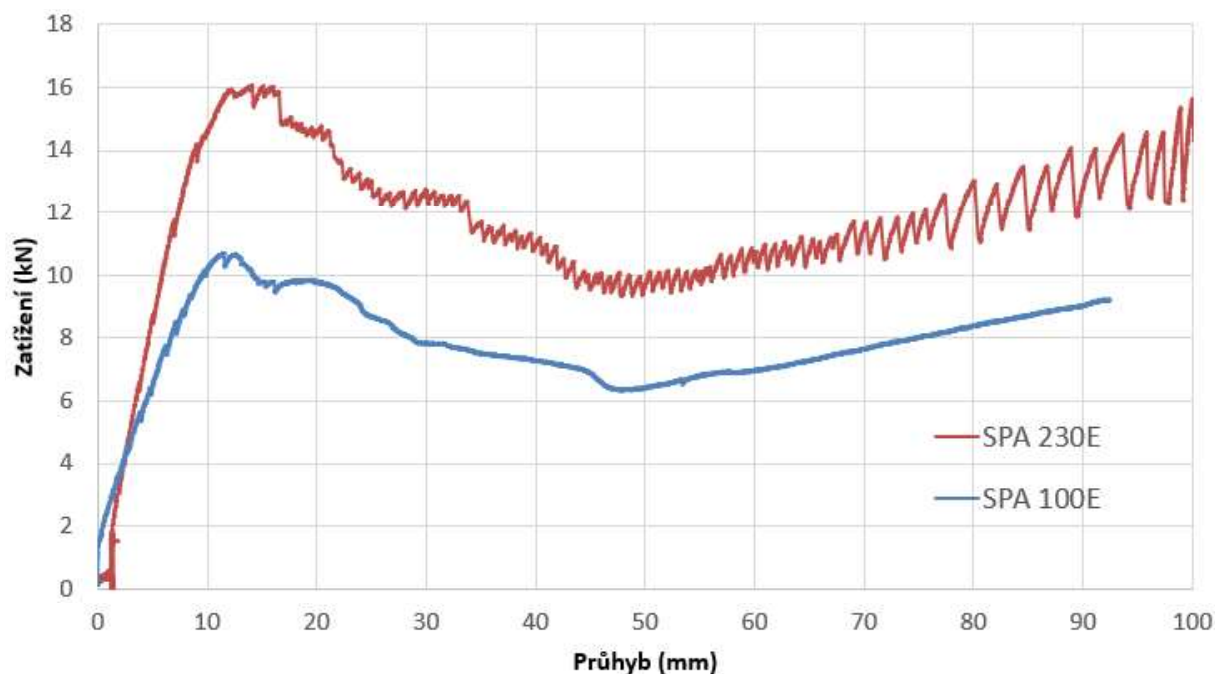
Experimenty na sendvičových panelech SPA E ukázaly, že panely zkoušené za běžné teploty selhaly stříhem, to může být způsobeno malým rozponem sendvičového panelu. Panely pravděpodobně nebyly dostatečně dlouhé, aby mohlo dojít k porušení v ohybu za běžné teploty. Větší panely ale nemohly být v laboratoři zkoušeny. U sendvičových panelů zkoušených při teplotě 600 °C nedošlo ke kolapsu vůbec. Během těchto experimentů došlo pouze k velkým deformacím panelů způsobených ohybem. Během všech experimentů docházelo k odtržení spodního plechu panelu od jádra. K porušení panelu docházelo v místech styku jednotlivých lamel minerální vlny. Sendvičový panel není vyráběn z jednoho kusu minerální vlny, ale z více menších lamel, jak je uvedeno v kapitole 2.1.1. Jednotlivé lamely minerální vlny se vlivem deformací posouvaly a v místě jejich styku docházelo k porušení. Po experimentech bylo vidět, že jednotlivé

vrstvy sendvičového panelu spolu již nespolutpůsobí. V tab. 9 je shrnut způsob porušení jednotlivých zkoušených vzorků.

tab. 9: Shrnutí způsobu porušení

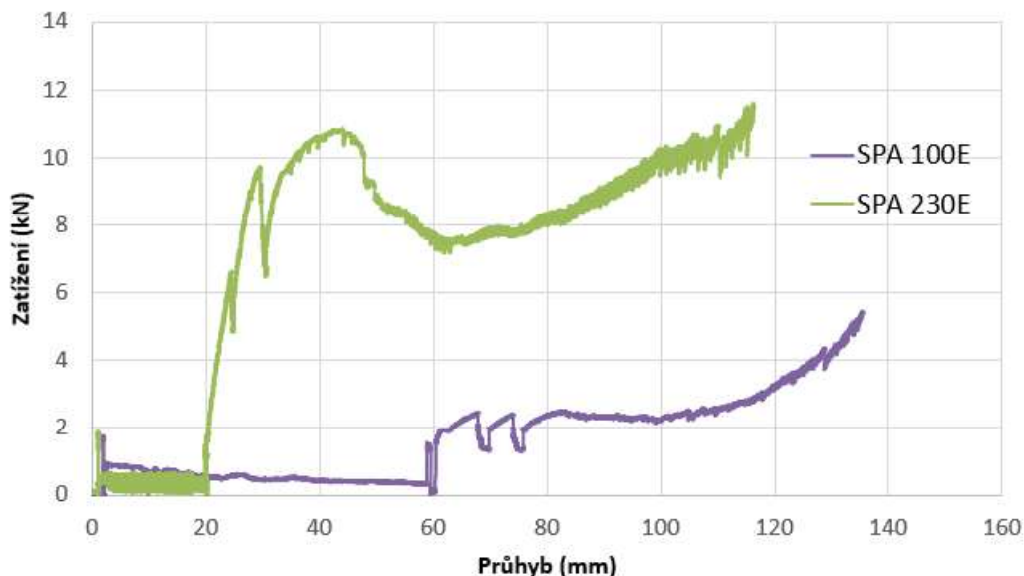
Tloušťka panelu (mm)	Teplota (°C)	Způsob porušení
100	20	Prasklina v blízkosti obou podpor, porušení stříhem
	600	Velké deformace vlivem ohybu, nedošlo ke kolapsu
230	20	Prasklina pod 2. zatěžovacím nosníkem zprava
	600	Velké deformace způsobené ohybem, oddělení jednotlivých lamel, nedošlo ke kolapsu

Na obr. 76 je vidět graf vyjadřující průměrný průhyb sendvičových panelů SPA 100E a SPA 230E zkoušených za běžné teploty. Je zde patrné, že průběh průhybu je velice podobný. Sendvičový panel tloušťky 230 mm dosáhl o cca 5 kN větší únosnosti než panel tloušťky 100 mm. U obou sendvičových panelů došlo při maximální síle k průhybu přibližně 15 mm. Poté je vidět pokles únosnosti až do průhybu cca 50 mm, kdy začalo působit membránové chování panelu a únosnost se začala opět zvyšovat.



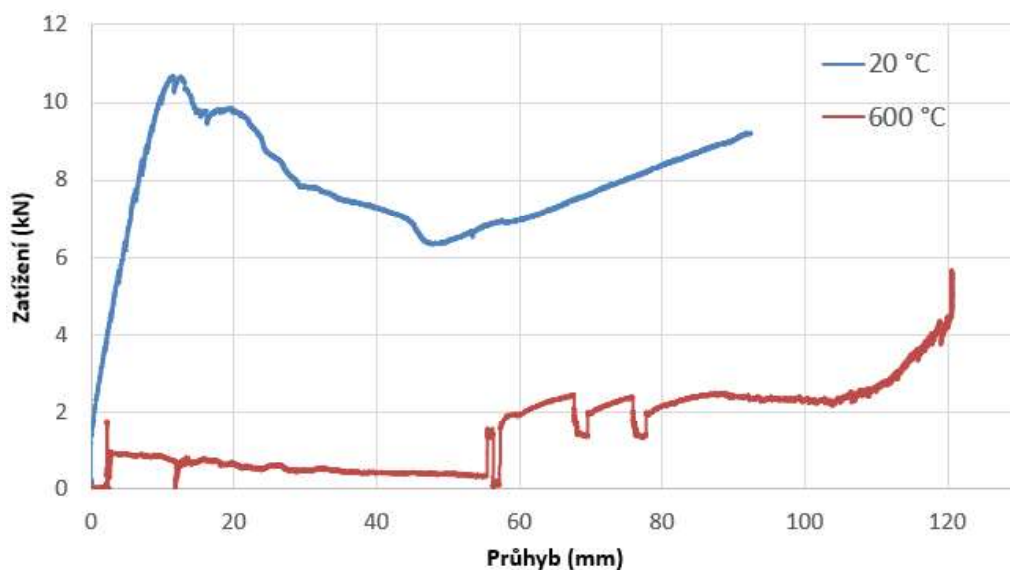
obr. 76: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E a SPA 230E při běžné teplotě

Porovnání průměrných průhybů sendvičových panelů SPA 100E a SPA 230E při teplotě 600 °C je vidět na obr. 77. Samotné zahřátí na teplotu 600 °C způsobilo výrazně větší průhyb u panelu tloušťky 100 mm než u panelu tloušťky 230 mm (cca o 40 mm). Únosnost panelu SPA 230E byla o přibližně 8,5 kN větší než u panelu SPA 100E. Membránové chování začalo u obou panelů působit při podobném průhybu (100 mm). Ani u jednoho panelu nedošlo ke kolapsu, u obou došlo pouze k velkým průhybům až 120 mm. Obě zkoušky byly ukončeny dosažením maximální hodnoty průhybu potenciometru.



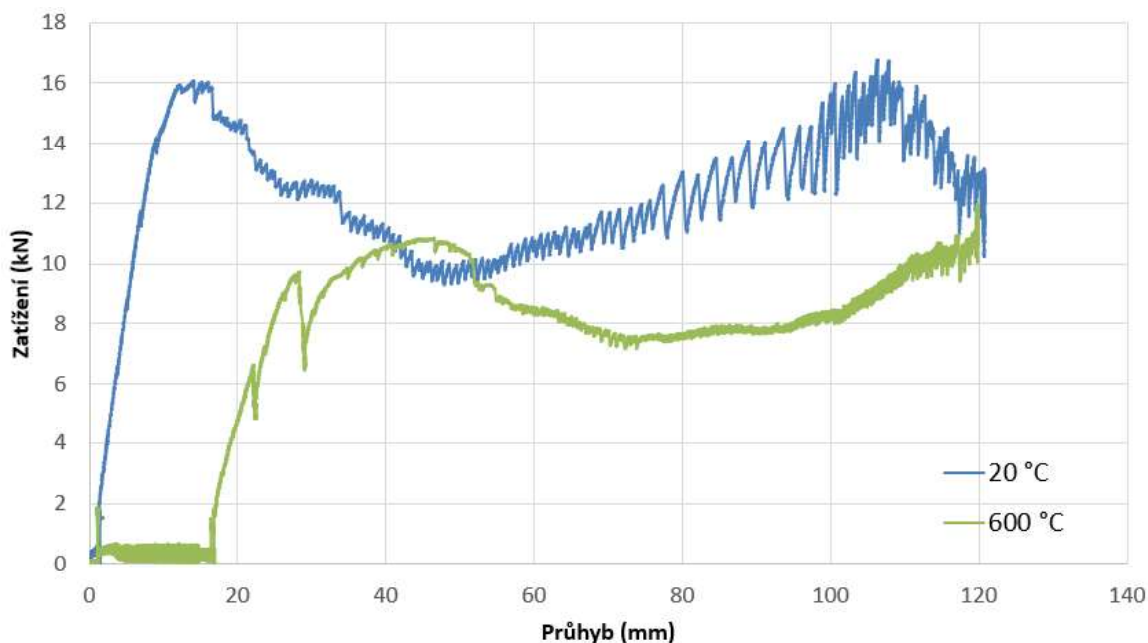
obr. 77: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E a SPA 230E při teplotě 600 °C

Na obr. 78 jsou vidět průměrné průhyby panelu SPA 100E při 20 °C a při 600 °C. Je zde patrný výrazný pokles únosnosti sendvičového panelu vlivem zahřátí. Při teplotě 600 °C je únosnost nižší o 10 kN.



obr. 78: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E při teplotě 20 °C a 600 °C

Z porovnání průměrných průhybů pro panel SPA 230E při teplotách 20 °C a 600 °C (obr. 79) je patrný pokles únosnosti sendvičového panelu vlivem zvýšené teploty. Tento pokles je 5 kN. Není tedy tak výrazný jako u panelu tloušťky 100 mm. Při běžné teplotě i při teplotě 600 °C je z grafu patrné membránové chování panelu. Při běžné teplotě začalo membránové chování působit při průhybu cca 50 mm, při teplotě 600 °C začalo působit přibližně při průhybu 70 mm.



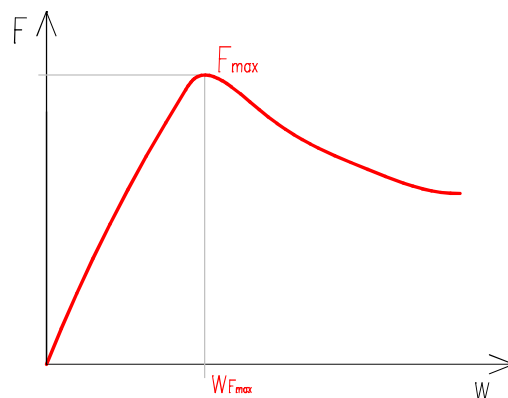
obr. 79: Porovnání průměrného průhybu SPA 230E při teplotě 20 °C a 600 °C

### 3.5.1 Ohybová tuhost

Na základě experimentální studie byla určena ohybová tuhost sendvičových panelů SPA E za běžné i za zvýšené teploty. Ohybová tuhost byla určena pomocí zatěžovací síly  $F_{max}$  a průhybu  $w_{F,max}$ . Tuhost byla vypočtena z následujícího vzorce:

$$k = \frac{F_{max}}{w_{F,max}} \quad [\text{kN/mm}]$$

Síla  $F_{max}$  je určena z jednotlivých grafů průměrného průhybu sendvičových panelů.  $F_{max}$  je hodnota prvního vrcholu těchto grafů – únosnost sendvičového panelu v kN.  $w_{F,max}$  je hodnota průhybu při působení síly  $F_{max}$  uvedená v mm. Určení síly  $F_{max}$  a průhybu  $w_{F,max}$  je vidět na obr. 80.



obr. 80: Znárodnění maximální síly a průhybu

Hodnoty maximální síly  $F_{max}$ , průhybu  $w_{Fmax}$  a ohybové tuhosti  $k$  pro jednotlivé panely a teploty jsou shrnuty v následující tab. 10.

tab. 10: Shrnutí ohybové tuhosti sendvičových panelů

Tloušťka panelu (mm)	Teplota (°C)	Síla $F_{max}$ (kN)	Průhyb $w_{Fmax}$ (mm)	Ohybová tuhost $k$ (kN/mm)
100	20	10,7	11,89	0,9
	600	2,5	10,48	0,24
230	20	16,1	12,71	1,27
	600	10,6	24,01	0,44

### 3.5.2 Membránové chování

Během experimentální studie bylo u všech jednotlivých zkoušek pozorováno membránové chování sendvičových panelů. Při dosažení únosnosti panelu (první vrchol v grafu závislosti průhybu na síle) docházelo k porušení jádra panelu a nárůstu deformace i při poklesu zatěžovací síly. Po této fázi docházelo znovu k nárůstu únosnosti sendvičových panelů, což bylo způsobeno membránovým působením. Fáze nárůstu průhybu s podobnou zatěžovací silou byla delší s rostoucí teplotou panelu. Tato fáze byla u panelu SPA 100E při 600 °C cca 40 mm. Únosnost při membránovém chování panelu je dána tuhostí podpor v horizontálním směru. Posun podpor v horizontálním směru nebyl při experimentální studii měřen. Tuhost podpor v horizontálním směru a zamezení posunu v tomto směru bylo zajištěno pomocí ocelových tyčí a desek. Podpora je detailněji popsána v kapitole 3.1.2. Během experimentů ale docházelo k proříznutí panelu závitovými tyčemi (obr. 81), pomocí kterých byly přichyceny ocelové desky podpory, nebo k deformaci závitových tyčí (obr. 82).





*obr. 81: Detail rozšíření otvoru ve spodním plechu sendvičového panelu*



*obr. 82: Deformované závitové tyče po experimentu*

## 4 Numerická studie

Pro numerickou studii byl zvolen software ANSYS Workbench 19.2, který je založen na metodě konečných prvků. Jedná se o software, který je schopen řešit lineární i nelineární úlohy. ANSYS se skládá z mnoha modulů, pomocí kterých lze řešit různé analýzy např. mechanickou analýzu, dynamickou analýzu, teplotní analýzu, akustické chování, proudění tekutin atd. Jednotlivé moduly lze navzájem propojovat, což poskytuje obrovskou variabilitu softwaru. Ve výpočetním programu lze definovat jakýkoli materiál pomocí jeho materiálových vlastností, např. zadáním hustoty, pevnosti, délkové roztažnosti, Poissonovo čísla, specifického tepla, teplotní vodivosti atd.

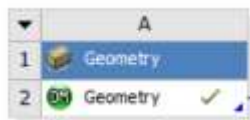
Pro numerickou studii byl zvolen statický model „Transient structural“, který umožňuje zjistit velký průhyb sendvičového panelu při požadovaném zatížení.

ANSYS poskytuje studentskou licenci softwaru, která nabízí všechny dostupné moduly s omezením počtu uzlů. Pro numerický model byla využita tato studentská licence ve verzi softwaru 19.1.

Numerická studie je rozdělena na 2 části. První část se zabývá teplotní analýzou sendvičového panelu tl. 100 mm při teplotě 600 °C, během teplotní analýzy je zkoumán přestup tepla konstrukcí. Druhá část se zabývá mechanickou analýzou sendvičového panelu tl. 100 mm za běžné teploty, během které je sledován průhyb uprostřed rozpětí sendvičového panelu.

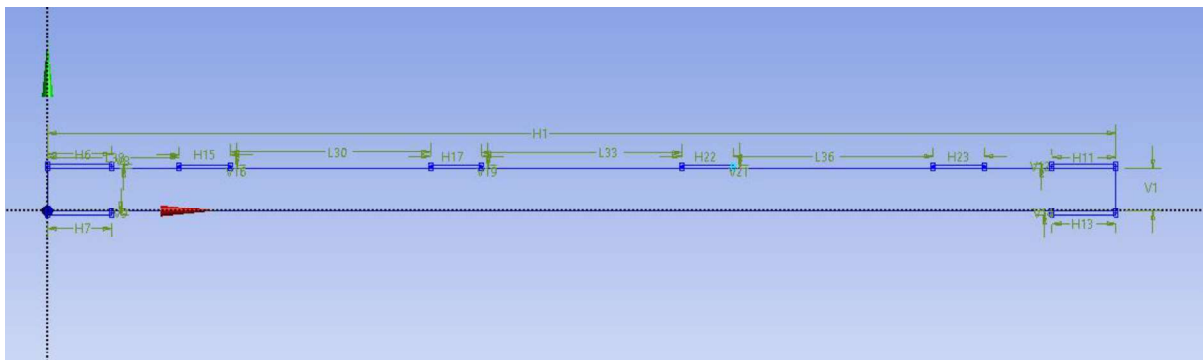
### 4.1 Vytvoření geometrie modelu

Numerický model byl vytvořen v uživatelském prostředí Workbench, které software ANSYS nabízí k jednoduššímu používání. V prostředí Workbench byl nejdříve použit modul „Geometry“ (obr. 83), který slouží k nakreslení potřebné geometrie modelu. K tomuto účelu je v ANSYS software „Design Modeler“.



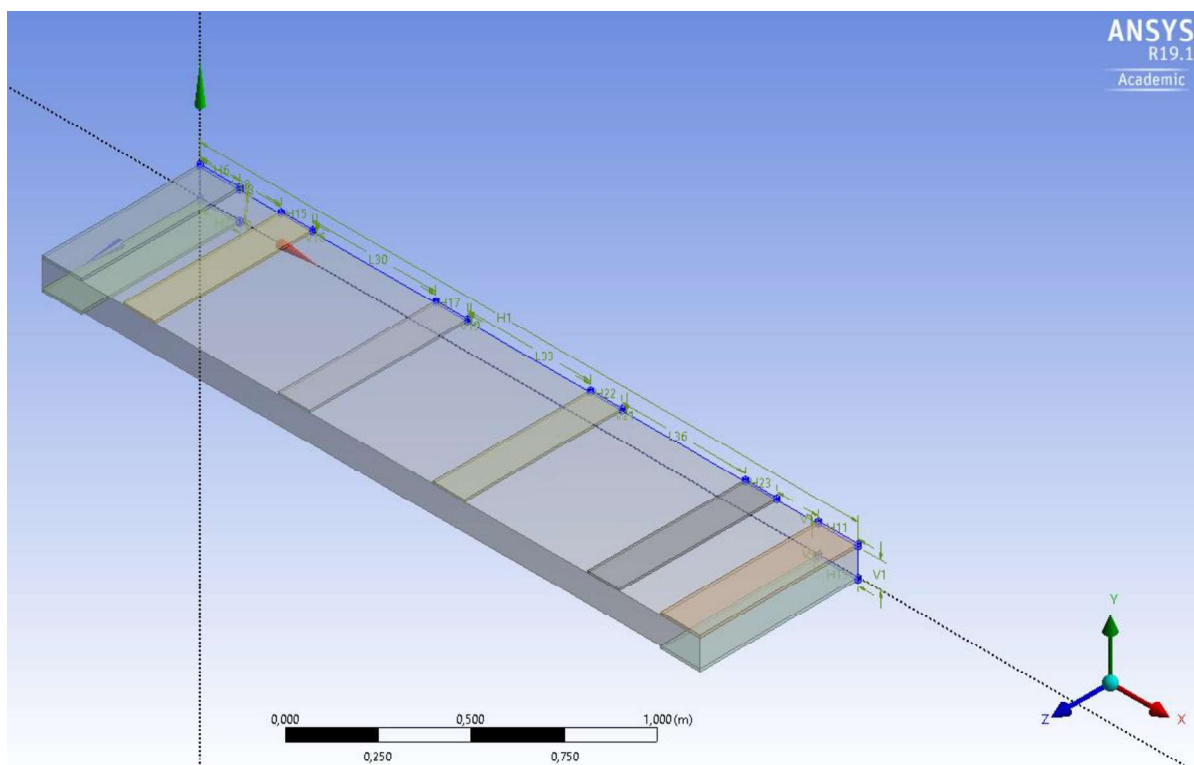
obr. 83: Modul Geometry v softwaru ANSYS

V „Design Modeler“ byl nakreslen řez sendvičového panelu pomocí funkce „Sketch“ ve zvolené rovině. V záložce „sketching“ byly řez nakreslen a okótován (obr. 84). Jádru panelu bylo namodelováno jako jednolitý kus, bez dělení na jednotlivé lamely. Ačkoliv může být jejich vliv na chování panelu v ohybu značný, byl v modelu z důvodu chybějících informací o jednotlivých lamelách zanedbán. Modelován byl panel o tloušťce 100 mm a šířce 2500 mm. Dále byly nakresleny ocelové desky o tloušťce 10 mm a šířce 150 mm a ocelové desky simulující pásnice HEA profilů o tloušťce 8 mm a šířce 120 mm. Pomocí těchto pásnic profilů bylo do sendvičového panelu vnášeno zatížení.



obr. 84: Vytvořený řez sendvičovým panelem

Následně byl v záložce „modeling“ z řezu vymodelován 3D model. Třetí rozměr byl zadán pomocí příkazu „Extrude“. Při modelování bylo využito symetrie vzorku a rozměr byl tedy zvolen poloviční, konkrétně šířky 600 mm. Poté byl vygenerován požadovaný 3D model (obr. 85).

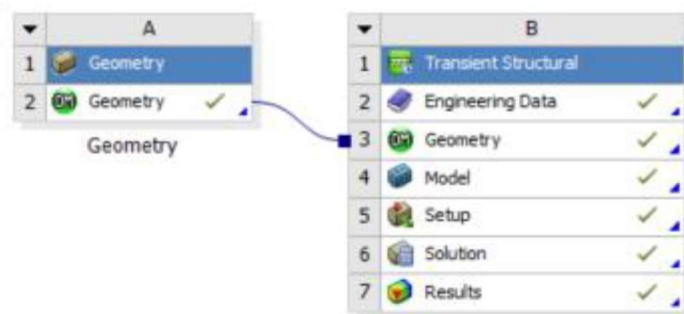


obr. 85: Vytvořený 3D model zkušební vzorku

Posledním krokem v „Design Modeler“ bylo vytvoření plechů sendvičového panelu pomocí příkazu „Surfaces from faces“ v záložce „Concept“. Tímto příkazem byly vytvořeny oba plechy sendvičového panelu vybráním horního a spodního povrchu panelu.

Dále byl zvolen modul „Transient structural“ pro zadání materiálových vlastností, okrajových podmínek, zatížení a stanovení průhybu sendvičového panelu při požadovaném zatížení (obr. 86). Tento modul byl zvolen s ohledem na velké deformace sendvičového panelu,

ke kterým může díky zatížení panelu docházet. Vytvořená geometrie modelu byla do modelu „Transient structural“ importována. Tento modul byl dále propojen s modulem „Transient Thermal“, který slouží k teplotní analýze.



obr. 86: Modul Transient structural

## 4.2 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti byly zadány v záložce „Engineering Data“. Vytvořeny byly 2 různé materiály – minerální vlna a ocel. V softwaru je možné zadávat mechanické vlastnosti i tepelné technické vlastnosti jednotlivých materiálů. Jednotlivé vlastnosti je možné zadávat např. v závislosti na teplotě, což by vedlo k zpřesnění modelu.

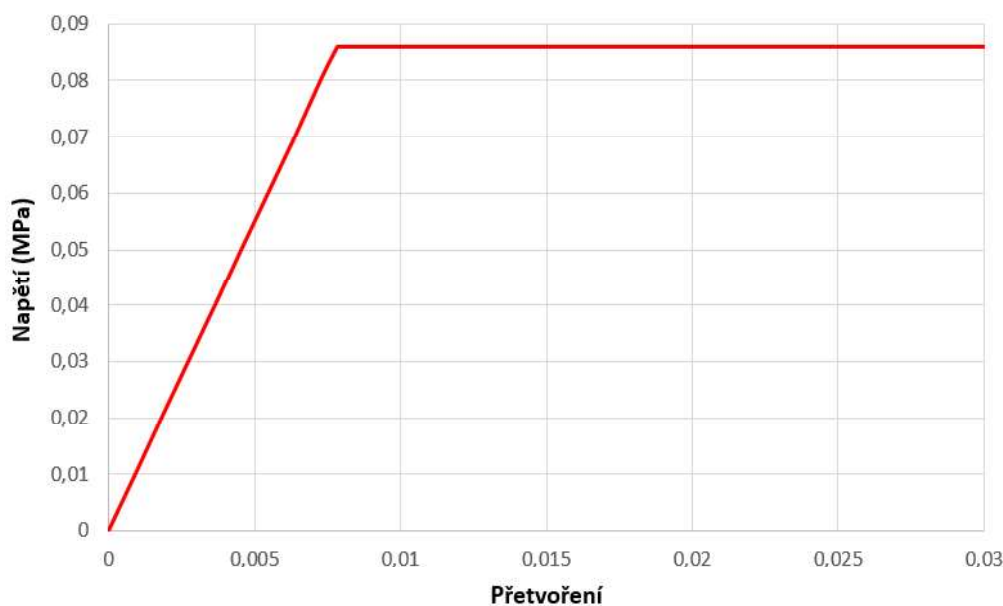
### 4.2.1 Minerální vlna

Pro minerální vlnu byly zadány vlastnosti, které jsou shrnuty v tab. 11. Tyto hodnoty poskytl výrobce sendvičových panelů. Pro přesnější numerický model by bylo nutné zpřesnit tyto vlastnosti např. pomocí vlastních zkoušek samotného materiálu.

tab. 11: Materiálové vlastnosti minerální vlny

Materiálové vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	85	kg/m <sup>3</sup>
Modul pružnosti	11	MPa
Poissonovo číslo	0	-
Mez pevnosti v tahu	0,086	MPa
Mez pevnosti v tlaku	0,06	MPa
Tepelná vodivost	0,041	W/mK
Měrné teplo	720	J/kgK

Pro minerální vlnu byl zvolen zjednodušený bilineární pracovní diagram, který je na obr. 87. Zadány byly hodnoty pro elastické i plastické chování materiálu.



obr. 87: Pracovní diagram minerální vlny

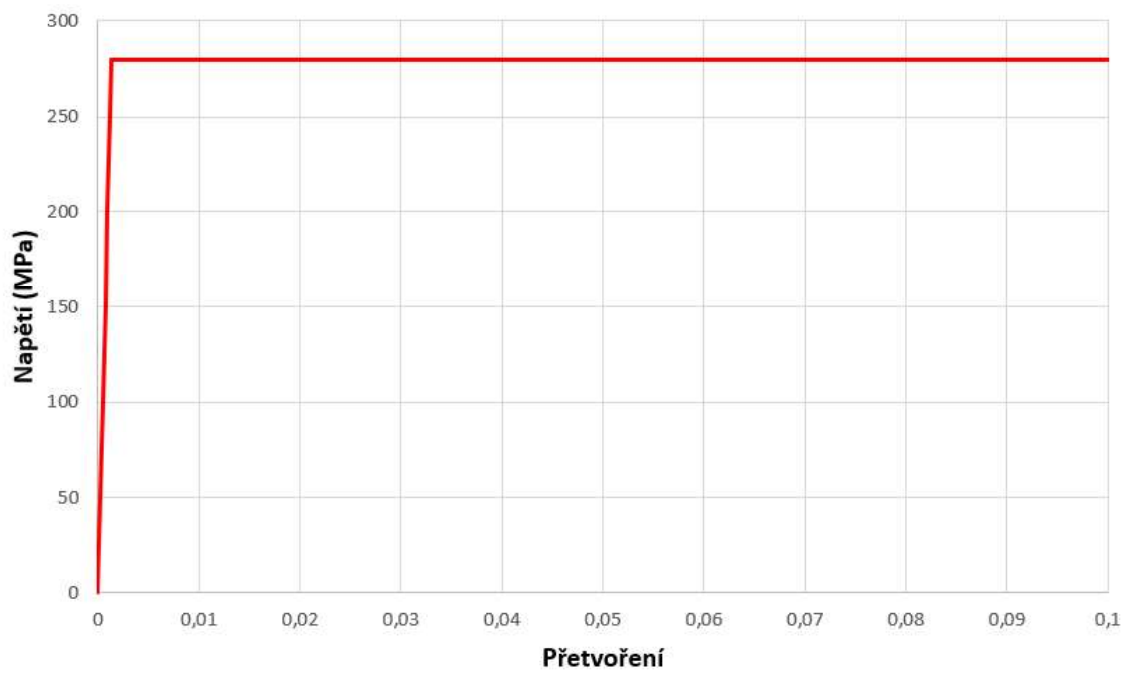
Tepelně technické vlastnosti minerální vlny byly zadány pouze konstantní. Vlastnosti měnící se v závislosti na teplotě nebyly výrobcem dodány.

#### 4.2.2 Ocel

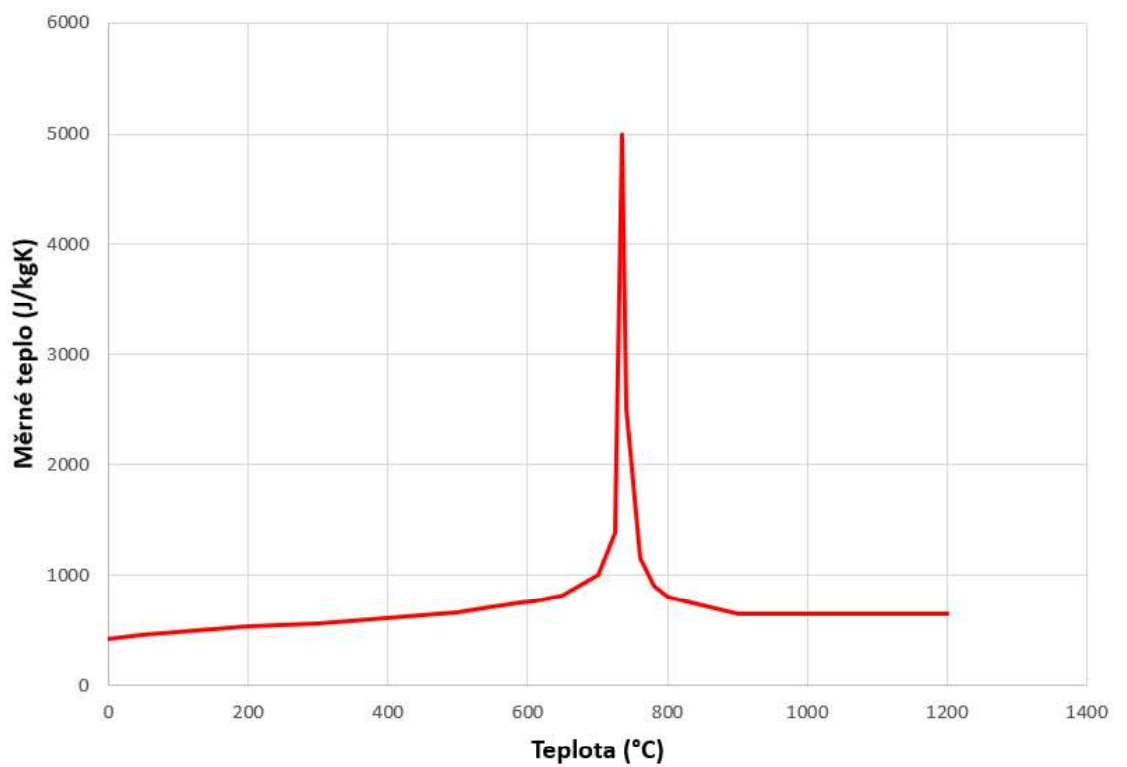
Ocel použitá na plech sendvičových panelů byla třídy S280GD+Z. Použité materiálové vlastnosti jsou shrnuty v tab. 12. Pro numerický model byl zvolen bilineární pracovní diagram oceli se zpevněním (obr. 88). Tepelně technické vlastnosti byly zadány v závislosti na teplotě. Hodnoty měrného tepla (obr. 89) a tepelné vodivosti (obr. 90), které jsou zadány v závislosti na teplotě, byly převzaty z [12].

tab. 12: Materiálové vlastnosti oceli

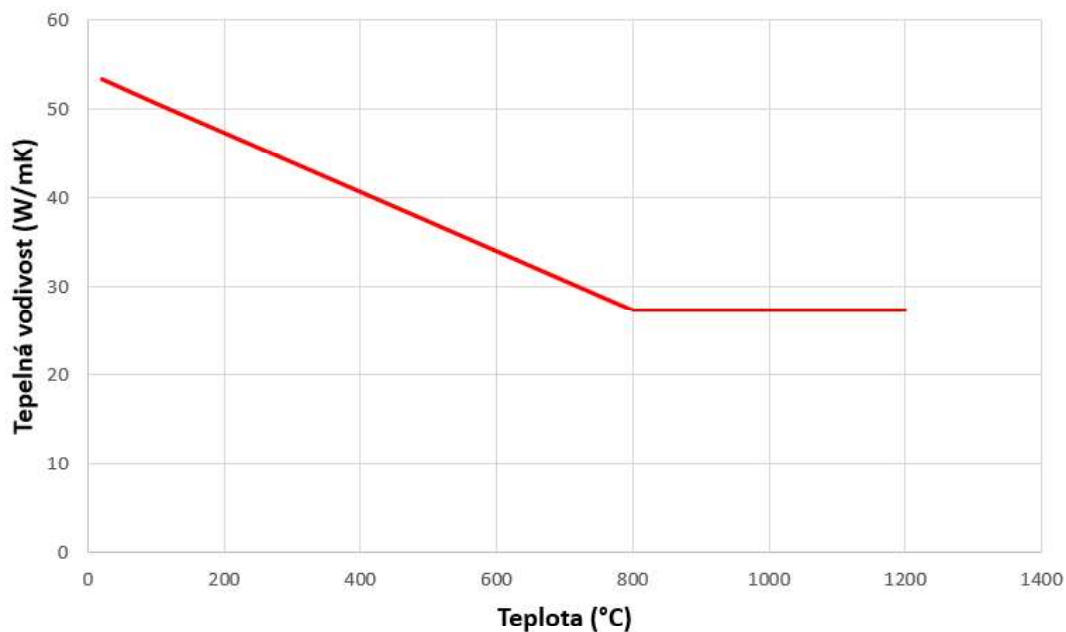
Materiálové vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	7850	kg/m <sup>3</sup>
Koeficient délkové teplotní roztažnosti	1,2*10 <sup>-5</sup>	C <sup>-1</sup>
Modul pružnosti	210	GPa
Poissonovo číslo	0,3	-
Mez pevnosti v tahu	360	MPa
Mez kluzu	280	MPa



obr. 88: Pracovní diagram oceli



obr. 89: Měrné teplo oceli použité v numerickém modelu

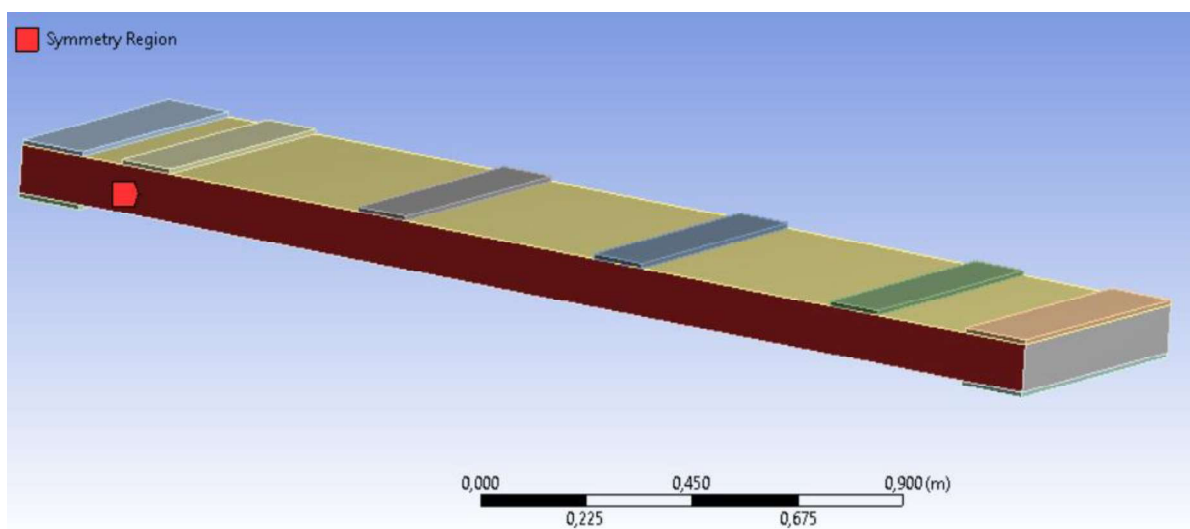


obr. 90: Tepelná vodivost oceli použitá v numerickém modelu

### 4.3 Okrajové podmínky

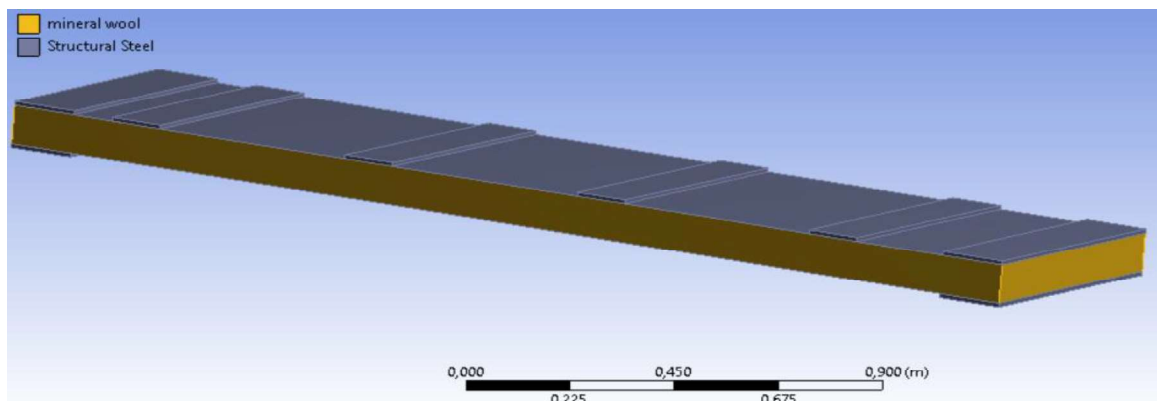
Pomocí „Model designer“ lze zadávat okrajové podmínky modelu, zatížení modelu, volit jednotlivé kontakty mezi materiály, vytvářet výpočetní síť modelu i zjišťovat výsledky numerického modelu.

Nejprve byla pomocí příkazu „Symmetry“ a „Symmetry region“ zvolena rovina symetrie celého modelu (obr. 91). V záložce „geometry“ byla hornímu a spodnímu plechu, které byly v „Design Modeler“ určeny pouze jako povrch, zadána tloušťka 0,5 mm a 0,6 mm.



obr. 91: Rovina symetrie modelu

Poté byl k jednotlivým prvkům zvolen materiál, který byl vytvořen v předchozí kapitole. Na obr. 92 je vidět zvolený materiál jednotlivých prvků.



obr. 92: Materiály numerického modelu

Následně byly určeny kontakty mezi jednotlivými částmi modelu. Mezi krajními ocelovými deskami a plechem sendvičového panelu byl zvolen kontakt „Rough“, který simuluje tuhé spojení. Při experimentu byly desky s panelem spojeny pomocí 3 závitových tyčí. Plechy sendvičového panelu a minerální vlna byly spojeny pomocí kontaktu „Bonded“, který simuluje lepidlo, jehož vlastnosti nejsou uváděny a v numerickém modelu byla tato vrstva lepidla zanedbána. Tento druh kontaktu neumožňuje žádné posunutí ani oddělení jednotlivých částí. Posledním použitým typem kontaktu byl „Frictional“, který umožňuje tření mezi jednotlivými prvky. Koeficient tření byl použit 0,15. Tento kontakt byl použit mezi plechem sendvičového panelu a pásnicemi HEA profilů.

## 4.4 Výpočetní síť

Dalším krokem bylo vytvoření výpočetní sítě numerického modelu pomocí příkazu „Mesh“. Síť byla vygenerována automaticky a nemohla být dále zjemněna z důvodu omezeného počtu uzlů studentské licence softwaru. Pomocí příkazu „Face Meshing“ byla vytvořena síť plechů panelu, ve které byla každá buňka určena 4 body. Ostatní prvky byly vytvořeny se sítí, ve které byla každá buňka určena 8 body. Pomocí upřesnění sítě „nonlinear mechanical“ byla vytvořena síť, která umožňuje nelineární chování modelu.

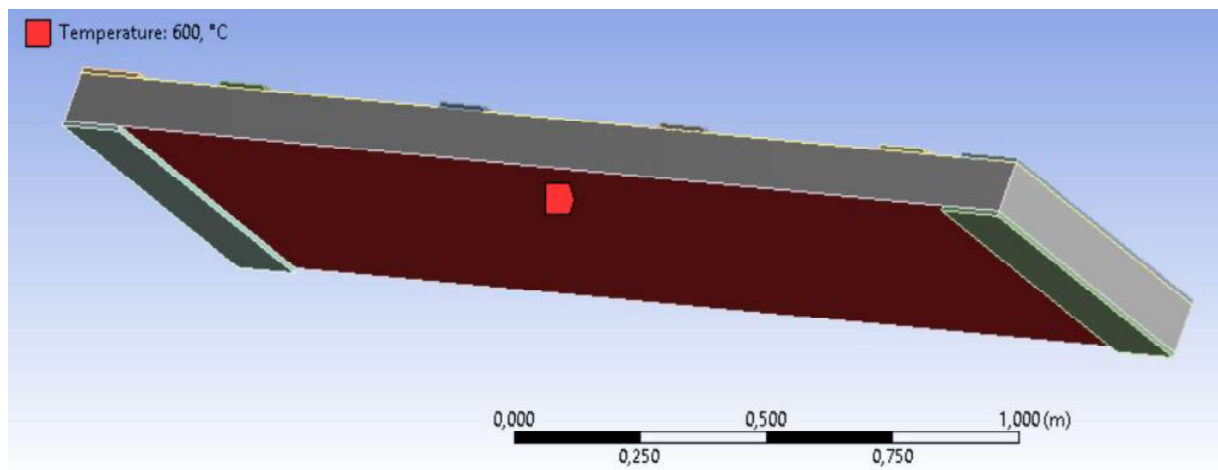
## 4.5 Teplotní analýza

### 4.5.1 Vstupní data

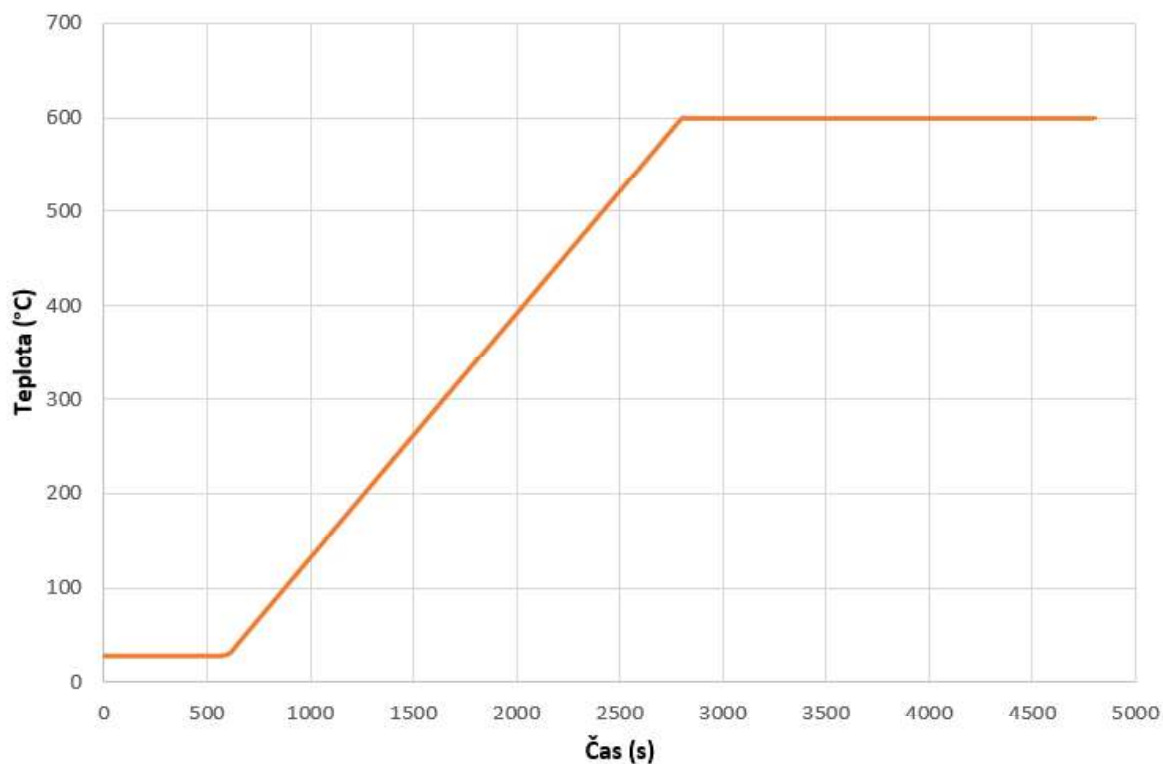
Pro teplotní analýzu byl použit modul „Transient Thermal“. V modulu byl vyřešen přestup tepla do jednotlivých částí modelovaného vzorku. V záložce „Analysis Setting“ bylo nastaveno zatížení teplotou, které bylo aplikováno na celý spodní povrch sendvičového panelu (obr. 93). Spodní povrch byl tedy zahříván rovnoměrně. Během experimentu probíhalo zahřívání pomocí



keramických deček, které měly povrch zahřívát co nejvíce rovnoměrně. Jejich rozmístění dle skutečnosti bylo v numerickém modelu zanedbáno. Použitá křivka zatížení teplotou v numerickém modelu je vidět na obr. 94.



obr. 93: Zahřívání povrch sendvičového panelu



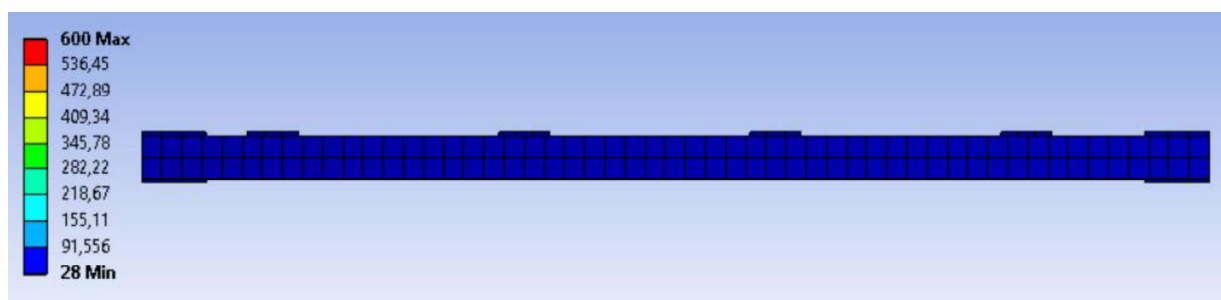
obr. 94: Teplotní zatížení spodního povrchu sendvičového panelu

Počáteční teplota výpočtu byla nastavena na 28 °C, jako teplota prostředí naměřená v době experimentu v laboratoři. V čase 500 s bylo spuštěno zahřívání vzorku, v čase 2800 s bylo

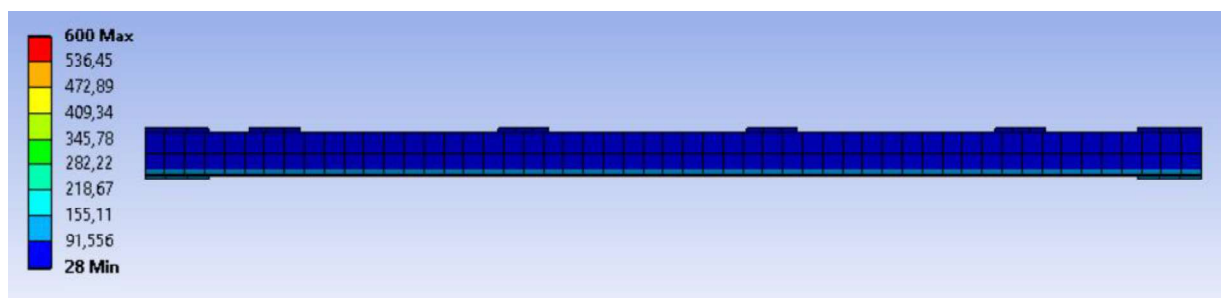
dosaženo požadované teploty 600 °C, která byla následně ve vzorku udržována. Výpočet byl ukončen v čase 4800 s, ve kterém došlo během experimentu k selhání vzorku.

## 4.5.2 Výsledky

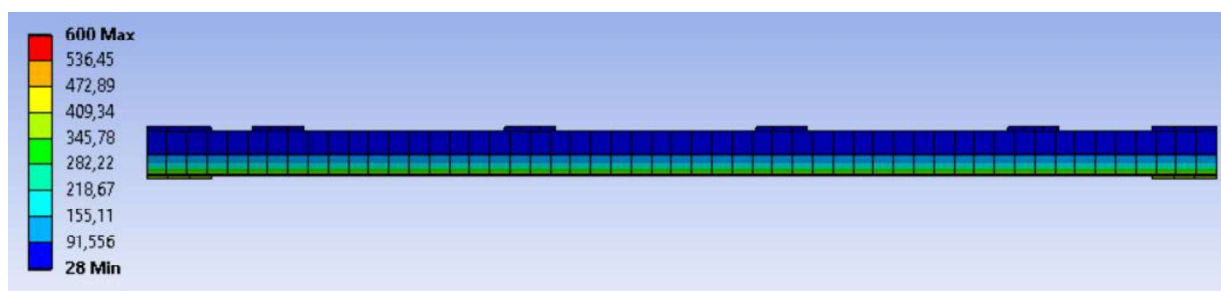
Na obr. 95 - obr. 100 jsou vidět teplotní profily sendvičového panelu v časech 0 s, 1000 s, 2000 s, 3000 s, 4000 s a 4800 s včetně teplotní škály udávající hodnoty ve °C.



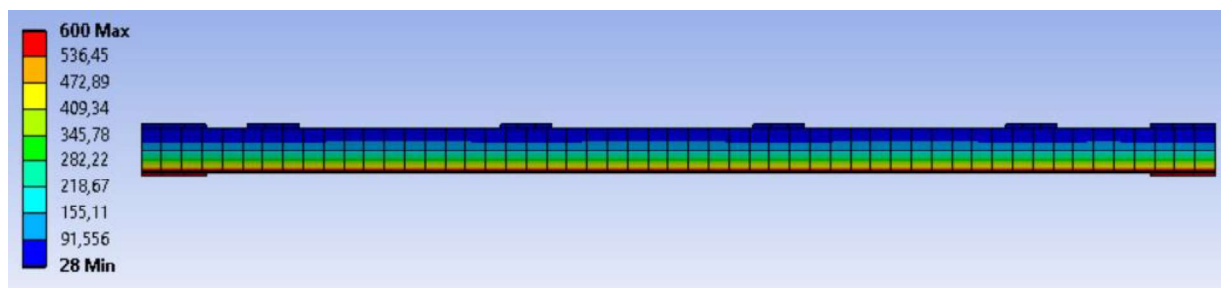
obr. 95: Teplotní profil v čase 0 s



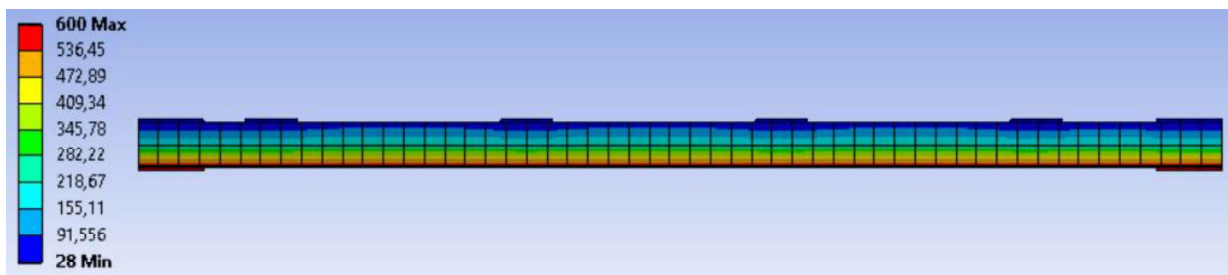
obr. 96: Teplotní profil v čase 1000 s



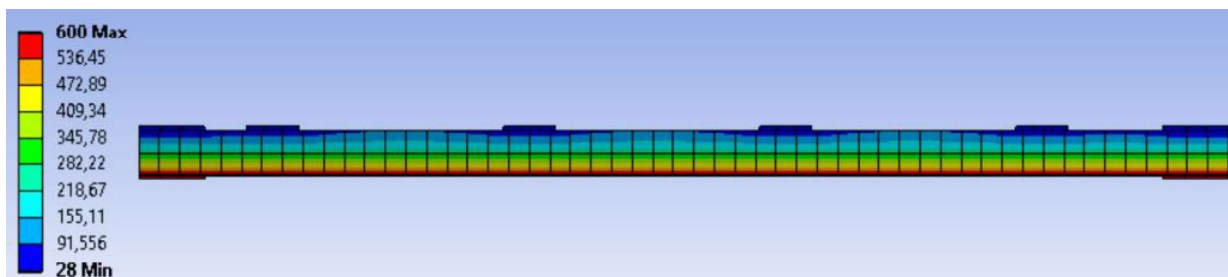
obr. 97: Teplotní profil v čase 2000 s



obr. 98: Teplotní profil v čase 3000 s

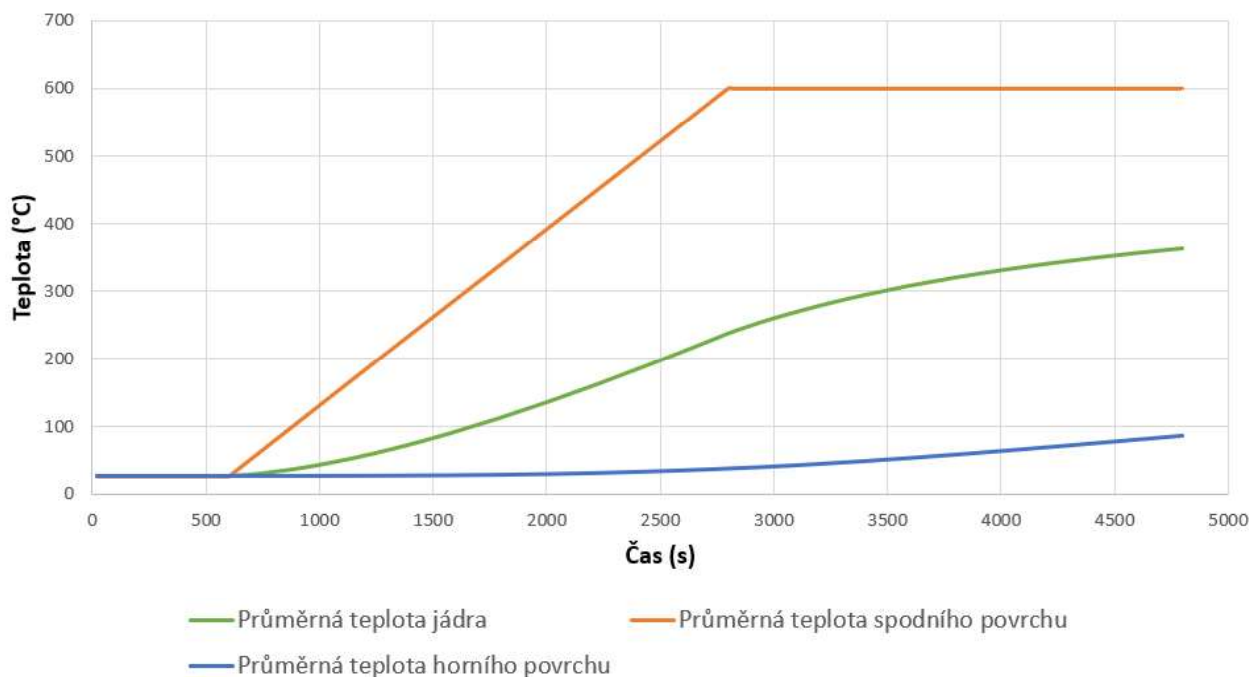


obr. 99: Teplotní profil v čase 4000 s



obr. 100: Teplotní profil v čase 4800 s

Na obr. 101 je vidět graf průměrných teplot vypočítaných pomocí numerického modelu. Teploty byly sledovány ve stejných bodech, ve kterých byly během experimentu umístěny termočlánky. Z těchto teplot byla vypočtena průměrná teplota spodního povrchu, průměrná teplota jádra a průměrná teplota horního povrchu.



obr. 101: Průměrné teploty sendvičového panelu numerického modelu

## 4.6 Mechanická analýza

### 4.6.1 Vstupní data

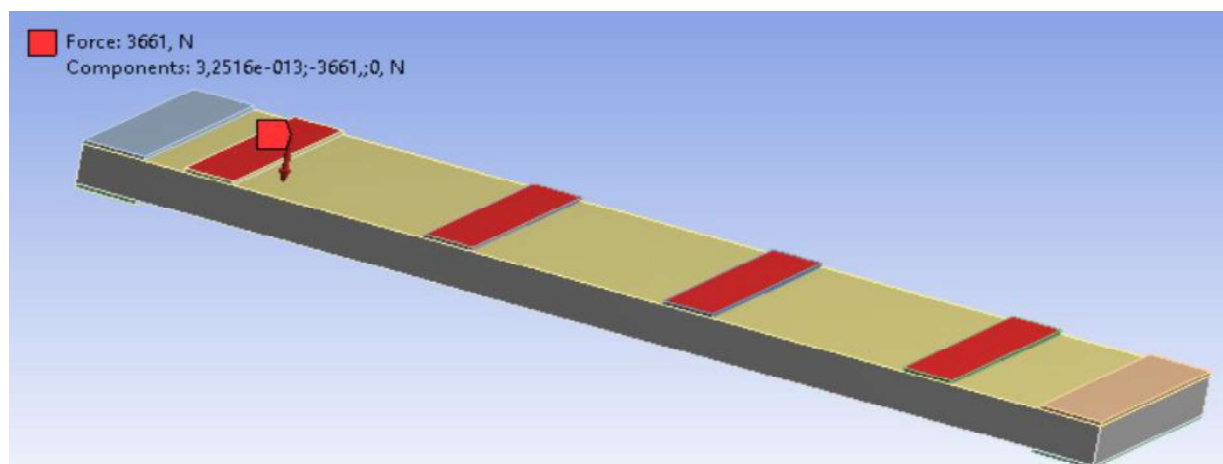
K mechanické analýze byl použit modul „Transient Structural“. V záložce „Analysis settings“ byl nastaven počet a velikost výpočetních kroků a celkový čas výpočtu. Zvolen byl jeden časový krok. Nejmenší časový úsek výpočtu byl stanoven 10 s a největší výpočetní časový úsek byl 20 s.

Pomocí záložky „Supports“ byly do modelu vloženy podpory. Zvoleny byly 2 fixní podpory, které bránily posunutí i pootočení ve všech 3 směrech. Umístění podpor je vidět na obr. 102.



obr. 102: Podepření sendvičového panelu v numerickém modelu

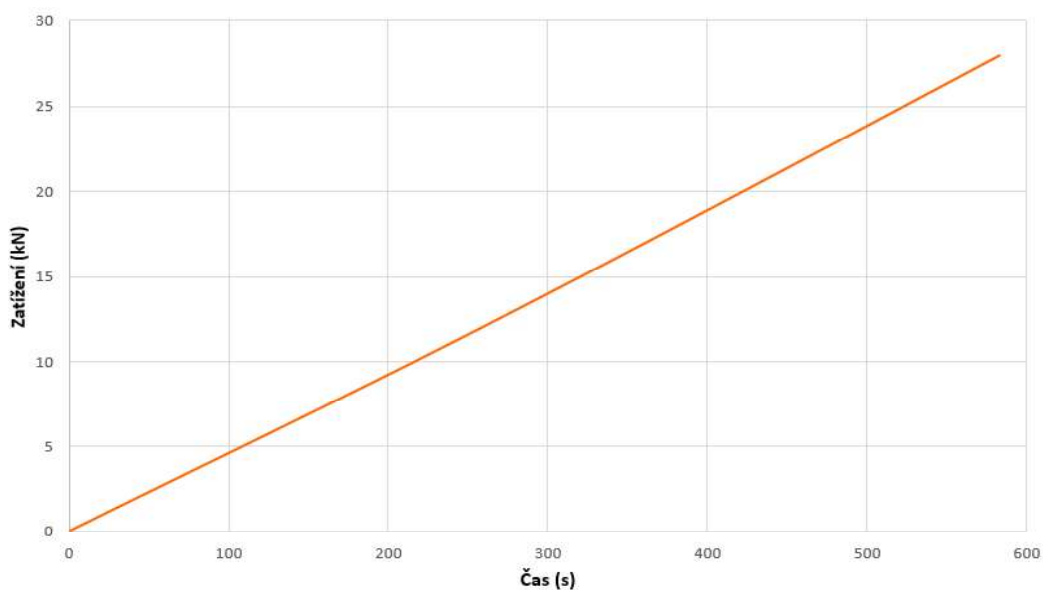
V záložce „Loads“ byla určena síla (příkaz „Force“) působící na sendvičový panel. Zatížení bylo vnášeno do pásnic HEA nosníků a bylo proměnné v čase. Místa působení zatížení jsou vidět na obr. 103 (označeny červenou barvou). V záložce „Force“ byl určen průběh působení síly, hodnota i orientace působícího zatížení.



obr. 103: Působící zatížení v numerickém modelu

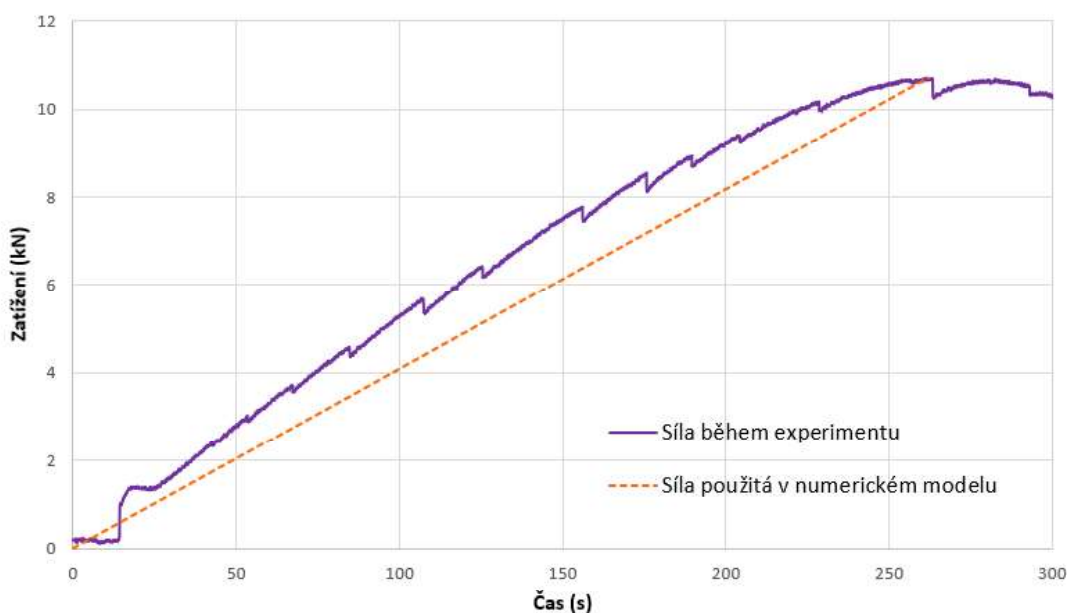
Modelovány byly 2 případy zatížení. V obou případech byla použita stejná rychlost zatěžování, ale maximální hodnota se lišila. Nejprve byla ověřena maximální únosnost při elastickém chování materiálu. Pro tento případ bylo zvoleno maximální zatížení 28 kN a konec výpočtu byl nastaven na 583 s. Průběh zatížení v čase je na obr. 104. Síla byla rozdělena pro každý

nosník. Zadávaná hodnota pro jednotlivé nosníky byla 7 000 N. V tomto případě byla pouze ověřena maximální únosnost panelu.



obr. 104: Průběh zatížení v čase do maximální únosnosti

V druhém případě byla modelována část do únosnosti sendvičového panelu při experimentu, tedy do maximální síly, která během experimentu působila. Tato hodnota byla během experimentu 10,71 kN v čase 262 s. Průběh působícího zatížení byl pro účely numerického modelu zjednodušen a nahrazen lineárním průběhem. Na obr. 105 je vidět síla v závislosti na čase během experimentu v požadovaném časovém úseku a zjednodušený průběh síly, který byl použit v numerickém modelu. V tomto případě byla sledována deformace sendvičového panelu.



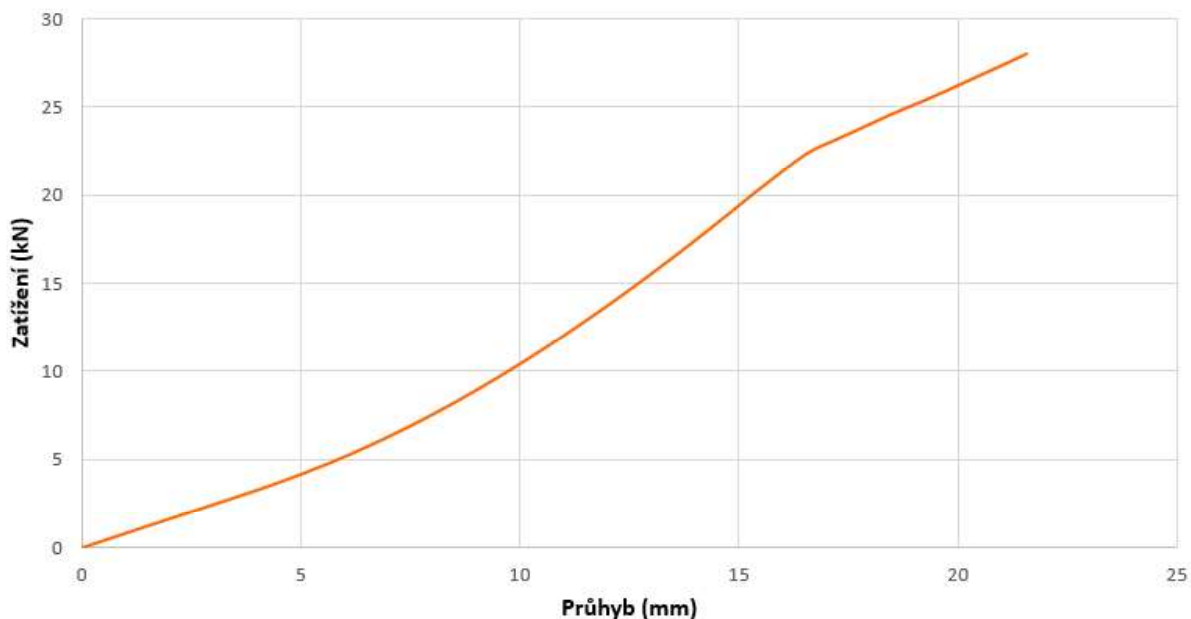
obr. 105: Průběh zatížení z experimentální studie

K této síle byla dále připočtena síla působící od vlastní tíhy zatěžovací sestavy včetně ocelové podložky, které byla během experimentu použita. Vlastní tíha sestavy byla 1,848 kN. Maximální působící síla byla  $10,71 + 1,848 = 12,558$  kN. Hodnota maximální působící síly byla přepočtena na jednotlivé pásnice HEA nosníků jako čtvrtina celkové síly. Zadávaná síla byla 3140 N.

#### 4.6.2 Výsledky

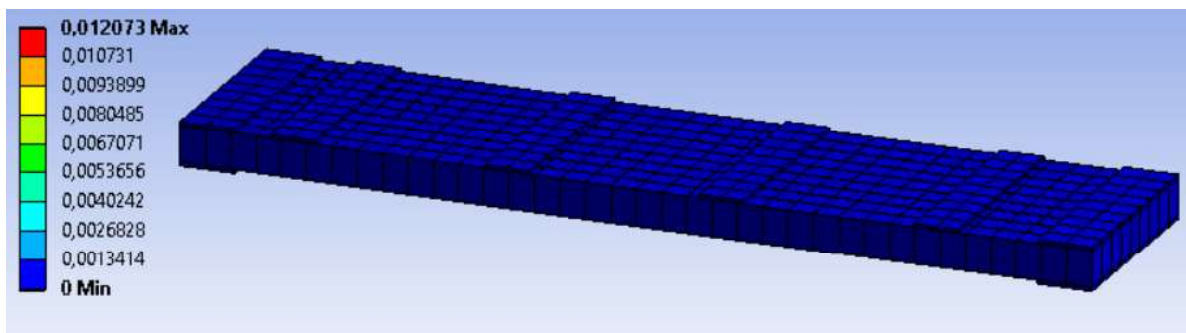
V „Mechanical designer“ v „Solution“ byla zvolena záložka „Total deformation“ pro zjištění celkové deformace sendvičového panelu a „Directional Deformation“ pro průběh průhybu pro požadovaný bod. Zvolen byl bod uprostřed rozpětí panelu a deformace byla zkoumána ve směru osy y.

Na obr. 106 je graf vyjadřující maximální únosnost při elastickém chování materiálu z prvního případu zatížení, tedy silou 28 kN.

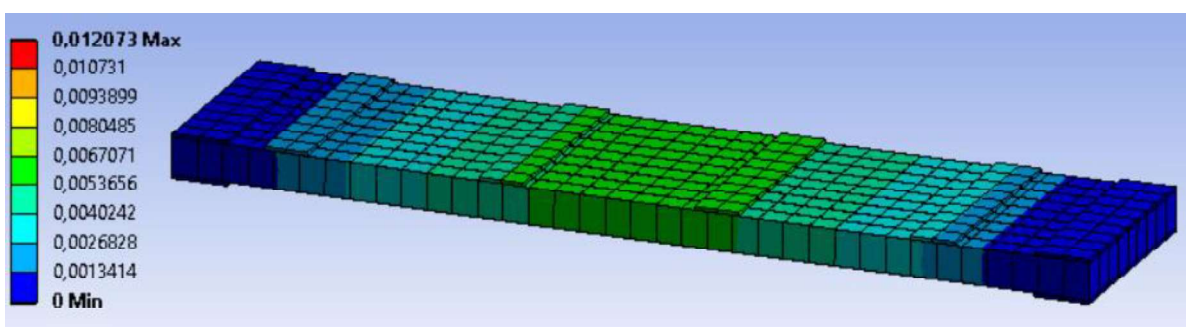


obr. 106: Zatížení v závislosti na průhybu uprostřed rozpětí do únosnosti materiálu

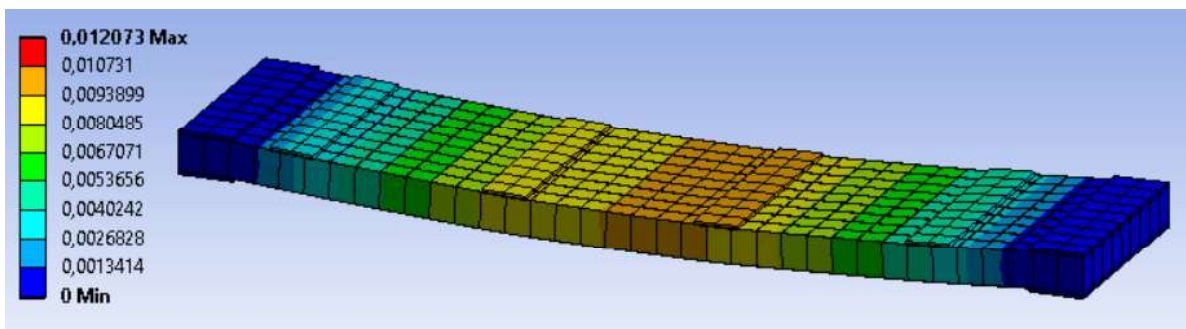
Na obr. 107 - obr. 110 jsou vykresleny celkové deformace sendvičového panelu tloušťky 100 mm při zatížení maximální silou při experimentu 3140 N na každý nosník v časech 0 s, 100 s, 200 s a 262 s. Průhyb je znázorněn včetně barevné škály, která udává hodnoty průhybu v metrech. Průběh průhybu uprostřed sendvičového panelu je znázorněn na obr. 111.



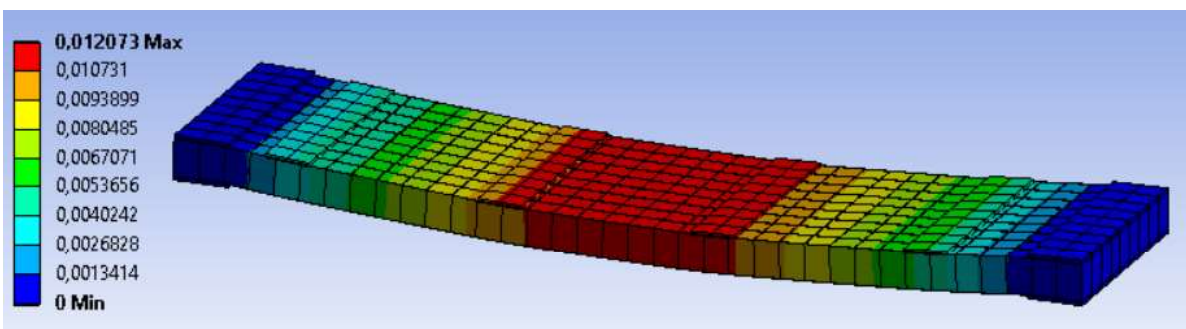
obr. 107: Celková deformace sendvičového panelu v čase 0 s



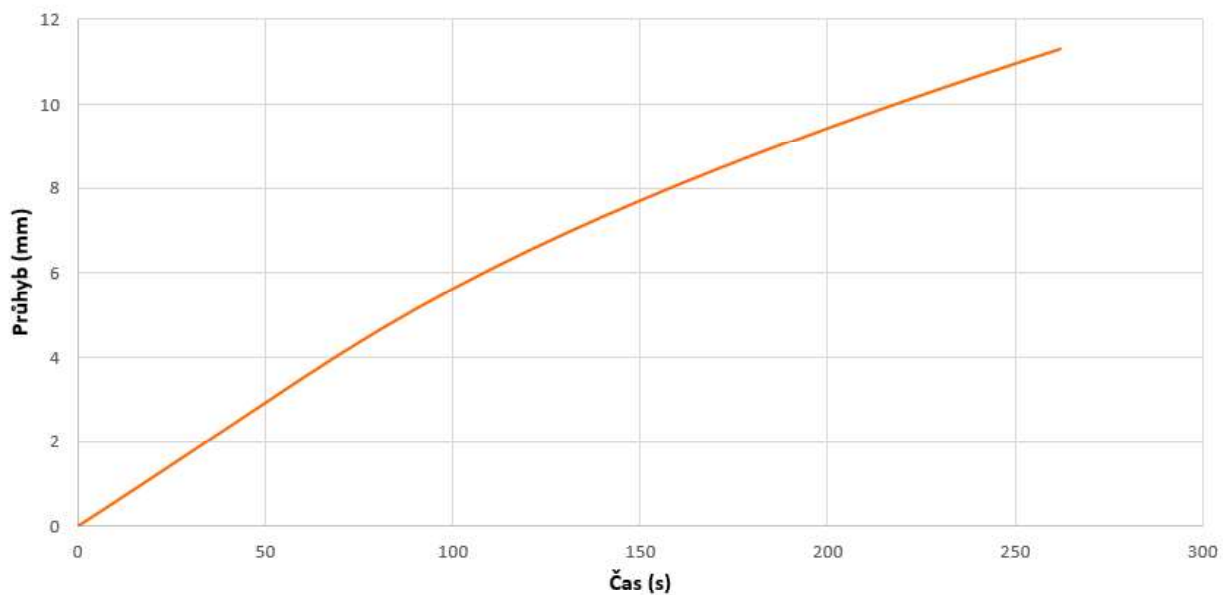
obr. 108: Celková deformace sendvičového panelu v čase 100 s



obr. 109: Celková deformace sendvičového panelu v čase 200 s

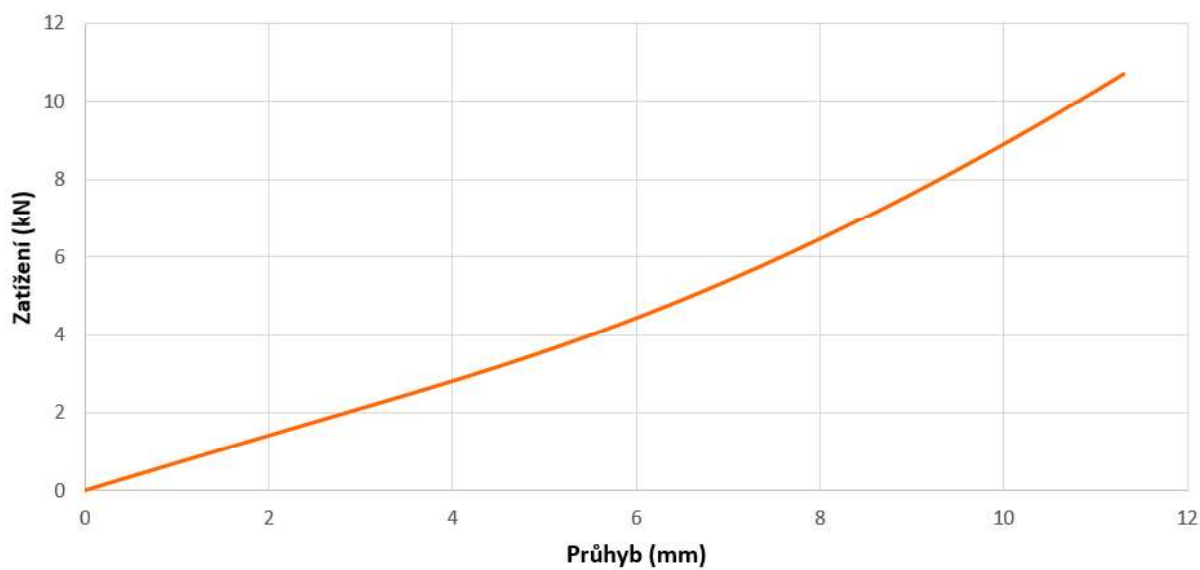


obr. 110: Celková deformace sendvičového panelu v čase 262 s



obr. 111: Průběh průhybu uprostřed rozpětí panelu

Graf vyjadřující závislost působícího zatížení a průhybu je na obr. 112. Tento graf vyjadřuje maximální sílu působící během experimentu.



obr. 112: Zatížení v závislosti na průhybu uprostřed rozpětí sendvičového panelu



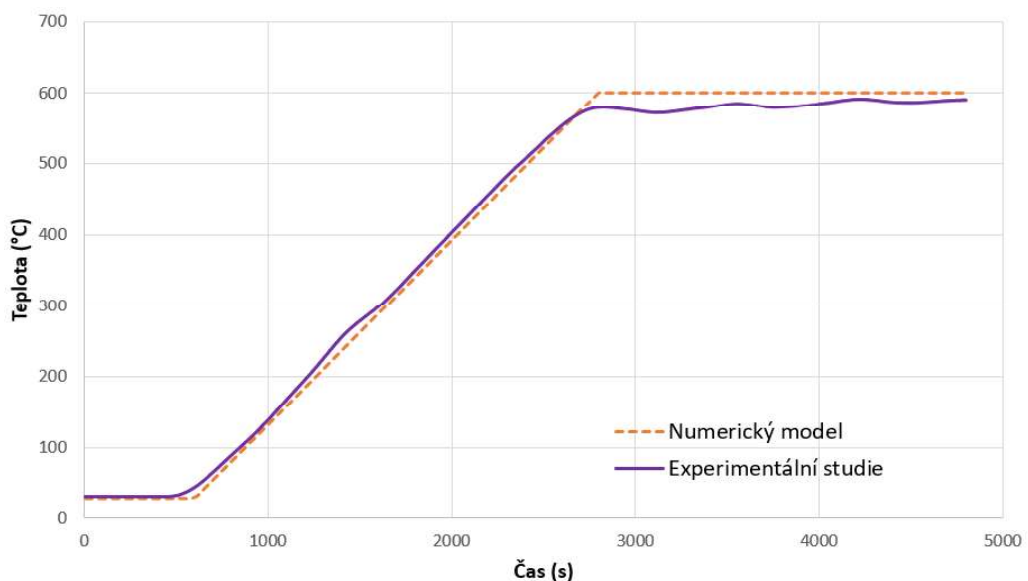
## 5 Validace numerického modelu

Každý numerický model je nutné validovat pomocí fyzikálního modelu. K tomu nejlépe slouží experimenty. Vzhledem k velkému množství vstupních hodnot, které lze do numerického modelu zadávat, je nutné ověřit jeho správné chování. Proces ověření tohoto chování se nazývá validace. Cílem validace je dojít k co nejmenším rozdílům mezi experimenty a numerickým modelem. Hodnoty z numerického modelu však nebudou vlivem nejistot vstupních dat nikdy naprosto shodné s reálnými výsledky z experimentů.

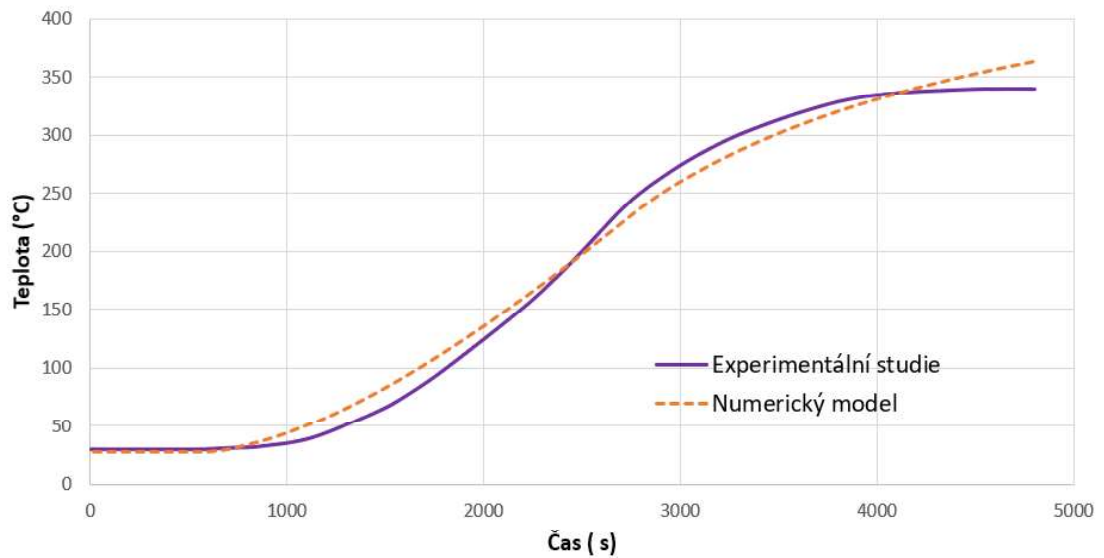
Vytvořený numerický model byl validován na základě hodnot z experimentů, které byly popsány v předchozích kapitolách. Validace byla provedena pro vzorek o tl. 100 mm.

### 5.1 Validace teplotní analýzy

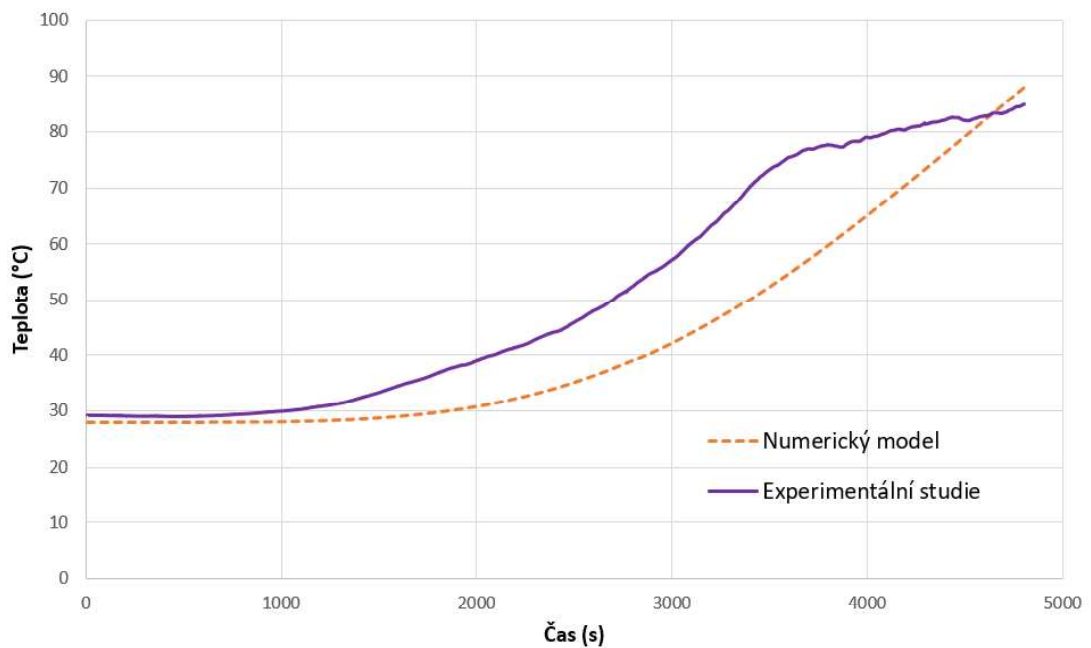
Na obr. 113 jsou vidět průběhy průměrných teplot spodního povrchu numerického modelu a experimentální studie. Teplota v numerickém modelu byla zadána zjednodušeně na celý spodní povrch ve 3 lineárních krocích. Průběhy průměrných teplot jádra jsou patrné z obr. 114. Průměrné teploty dosahovaly stejných hodnot jako při experimentu. Průběhy teplot horního povrchu jsou vidět na obr. 115. Teploty dosahují podobných hodnot, pouze nárůst teploty v numerickém modelu je pozvolnější. Odlišnosti v průběhu jsou způsobeny neznalostí přesných materiálových vlastností minerální vlny a neznalostí změny těchto vlastností v závislosti na teplotě. Vliv má také řídicí stroj použitý během experimentu, který nebyl schopný držet přesnou požadovanou teplotu po celou dobu experimentu a na všech keramických dečkách. Teplota během experimentu mírně kolísala okolo požadovaných 600 °C. Na základě uvedených výsledků teplotní analýzy lze konstatovat, že model vykazuje dobrou shodu s výsledky experimentu.



obr. 113: Porovnání teplot spodního povrchu sendvičového panelu



obr. 114: Porovnání teplot jádra sendvičového panelu



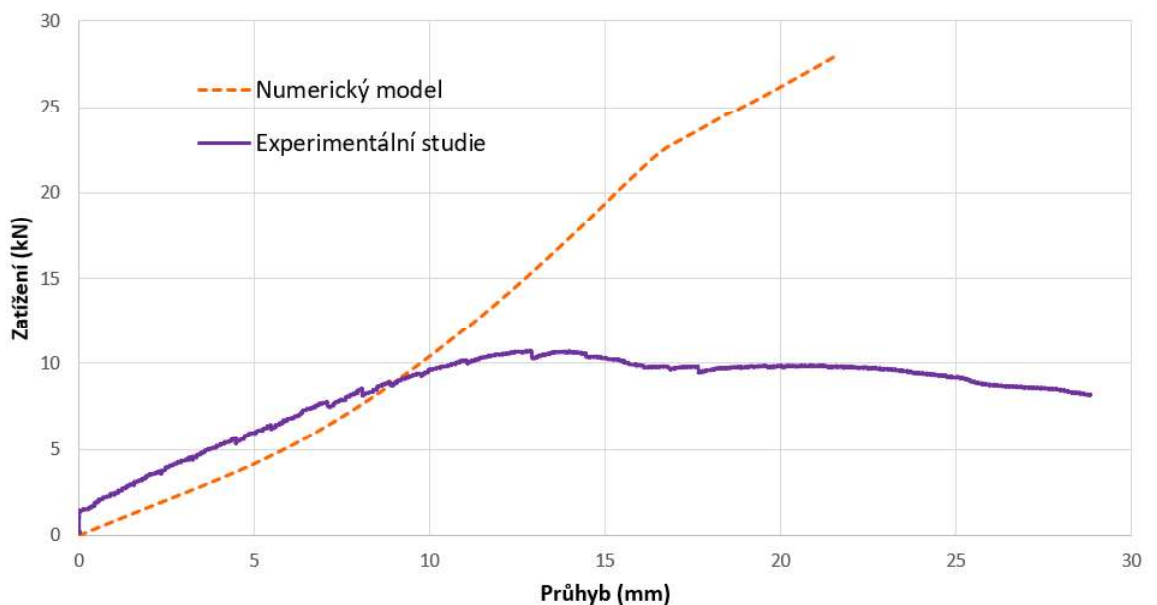
obr. 115: Porovnání teplot horního povrchu sendvičového panelu

## 5.2 Validace mechanická analýzy

Mechanická analýza byla validována pro část elastického chování materiálu, tzn. do dosažení prvního porušení vzorku. Přesné plastické chování sendvičového panelu není známo, a proto nemohla být plastická část chování panelu modelována. Únosnost panelu při experimentu je rovněž ovlivněna porušením vlivem přítomnosti lamel v sendvičovém panelu (vzájemné posunutí lamel, oddálení lamel vlivem průhybu atd.). Dělení jádra na jednotlivé lamely nebylo

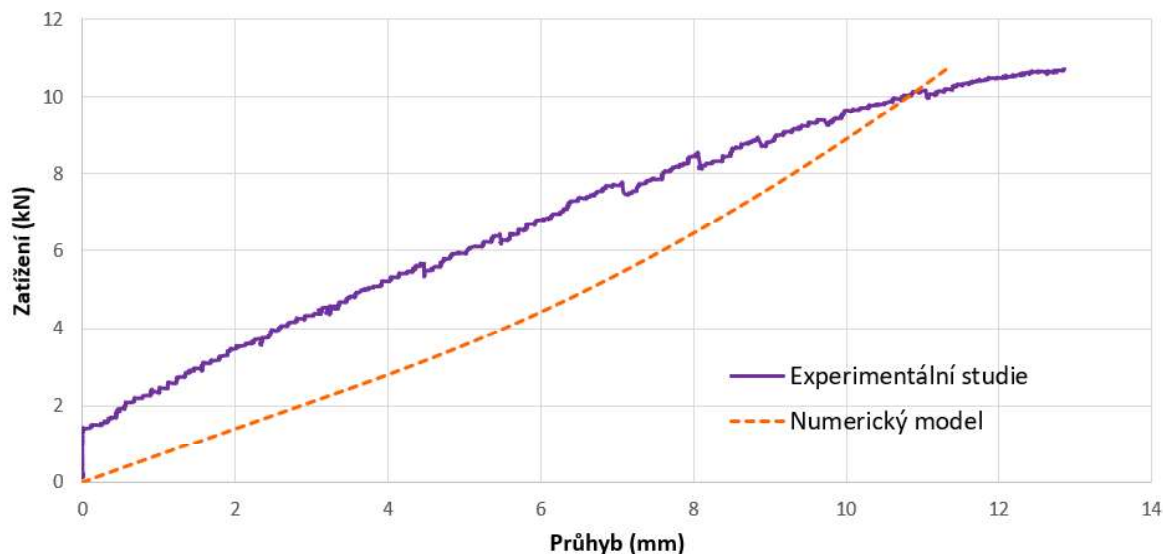
v numerickém modelu zahrnuto. Zachytit okamžik porušení jako při experimentu je proto v modelu velice náročné, při dané úrovni informací o materiálu až nemožné.

Na obr. 116 je porovnána únosnost sendvičového panelu z experimentu a únosnost z numerického modelu. Z obrázku je patrné, že únosnost v numerickém modelu byla několikanásobně vyšší. To je způsobeno namodelováním minerální vlny jako jednoho celku. Zanedbáním rozdělení na jednotlivé lamely nemohlo dojít k lokálnímu porušení mezi lamelami, ke kterému došlo při experimentu. Nepřesnost je také způsobena tím, že nejsou známy přesné materiálové vlastnosti sendvičového panelu. Únosnost sendvičového panelu by mohla být přiblížena k hodnotě únosnosti z experimentu pomocí takzvané kalibrace. Jedná se o upravení vstupních hodnot na základě známého výsledku. Toto řešení v diplomové práci nebylo použito. Ke kalibraci modelu by bylo ideální provést experiment víckrát a kalibrovat na základě většího počtu výsledků.



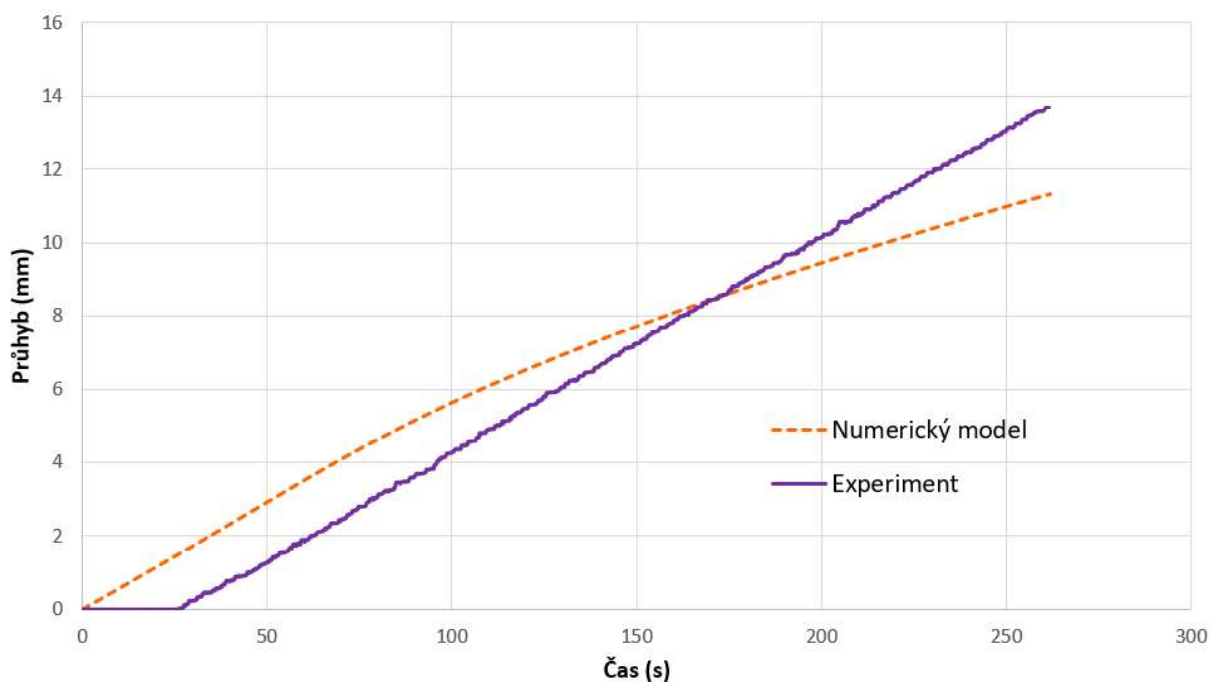
obr. 116: Porovnání maximální únosnosti při experimentální studii a numerickém modelu

Dále je validována pouze první část průběhu průhybu. Sklon této části křivky vyjadřuje tuhost sendvičového panelu. Z grafu na obr. 117 je patrné, že tuhost sendvičového panelu v numerickém modelu je velice podobná tuhosti sendvičového panelu naměřené během experimentu. Sklon obou křivek v grafu je velice podobný. Hodnota průhybu při dosažení síly 10,71 kN (dosažení únosnosti panelu při experimentu) je o 1,5 mm nižší, než byla naměřena během experimentální studie.



obr. 117: Porovnání tuhosti panelu při experimentální studii a numerickém modelu

Na obr. 118 je vidět graf vyjadřující průhyb v závislosti na čase pro numerický model i experimentální studii. Opět je vidět, že průhyb během experimentální studie byl o cca 1,5 mm vyšší než v numerickém modelu. Tato odchylka je způsobena neznalostí přesných materiálových vlastností minerální vlny a zanedbáním jednotlivých lamel v sendvičovém panelu.

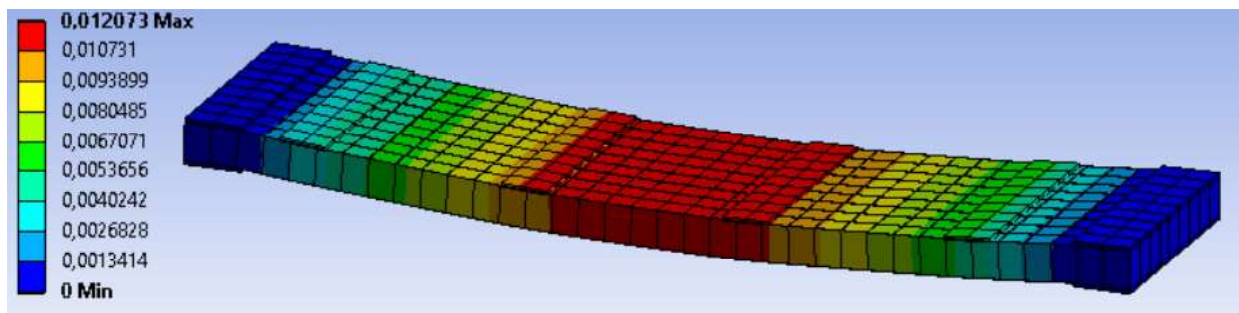


obr. 118: Porovnání průběhu průhybu mezi experimentální studii a numerickým modelem

Na obr. 119 je zaznamenána reálná konstrukce v čase přibližně 260 s. Na obr. 120 je zobrazena celková deformace vzorku ve stejném čase včetně barevné škály udávající průhyb v metrech.



*obr. 119: Vzorek při experimentální studii v čase přibližně 260 s*



*obr. 120: Deformace celého vzorku z numerického modelu v čase 262 s*

## 6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo popsat chování sendvičového panelu v ohybu za běžné i zvýšené teploty, popsat experimentální studii, vytvořit numerický model a na základě experimentu tento model validovat.

První část práce popisuje typy sendvičových panelů a jejich rozdílné vlastnosti. Dále jsou v této části popsána typická konstrukční řešení stěnových i stropních sendvičových panelů. Následně jsou shrnuty dosavadní poznatky o stabilizaci konstrukce pomocí sendvičových panelů. Za běžné teploty lze panely použít ke stabilizaci, pokud jsou sendvičové panely i spojení s nosnou konstrukcí dostatečně tuhé. Za zvýšené teploty je důležitá především soudržnost opláštění a jádra panelu, aby nedošlo k delaminaci vrstev. Podstatné je také kotvení panelu k nosné konstrukci. Pokud je dostatečně bráněno jeho vodorovnému posunu, dojde k membránovému působení a odolnost celé konstrukce je vyšší. V práci je také popsána vlastní ohybová tuhost sendvičového panelu za požáru. Podle [10] je tuhost závislá především na tloušťce opláštění panelu. Vliv tuhosti samotného jádra je prakticky zanedbatelný.

V druhé části práce je popsán průběh experimentální studie sendvičových panelů, která proběhla v laboratoři FSV ČVUT v Praze. Cílem experimentu bylo ověřit chování sendvičového panelu za zvýšené teploty. V práci je popsáno statické schéma experimentu i způsob, jakým byl panel zahříván. Experiment proběhl na panelech o rozměrech 1200 mm x 2500 mm a 1200 mm x 4000 mm. Ze spodní strany byly panely zahřívány pomocí keramických deček, po dosažení požadované teploty byl panel mechanicky zatěžován z horní strany. Teplota byla v panelu po dobu zatěžování udržována přibližně konstantní. Při experimentu byl měřen průhyb panelu uprostřed rozpětí. V práci jsou podrobně popsány experimenty, které probíhaly za běžné teploty a experimenty při teplotě 600 °C. Popsané experimenty probíhaly na sendvičových panelech o rozměrech 1200 mm x 2500 mm a tloušťce 100 mm a 230 mm.

Následně byl pro tyto experimenty sestaven graf vyjadřující závislost zatížení a deformace. Z porovnání těchto grafů vyplývá, že při běžné teplotě mají panely tloušťky 230 mm o cca 5 kN větší únosnost než panely tloušťky 100 mm. Při maximální působící síle byl u obou panelů průhyb cca 15 mm. Poté bylo u obou panelů pozorováno membránové chování. Z porovnání průběhu průhybu při teplotě 600 °C bylo vidět, že u panelu tloušťky 100 mm došlo k výrazně většímu průhybu, který byl způsoben pouze ohřátím sendvičového panelu na požadovanou teplotu. Panel tloušťky 230 mm měl o cca 8,5 kN větší únosnost než panel tloušťky 100 mm. Membránové chování začalo vždy působit při podobném průhybu. Únosnost panelu tloušťky 100 mm byla při teplotě 600 °C cca o 10 kN nižší než za běžné teploty. U sendvičového panelu tloušťky 230 mm byl pokles únosnosti při teplotě 600 °C cca 5 kN oproti únosnosti za běžné teploty.

Ohybová tuhost sendvičového panelu tloušťky 100 mm byla za běžné teploty 0,9 kN/mm, při teplotě 600 °C byla 0,24 kN/mm. Při tloušťce panelu 230 mm byla ohybová tuhost 1,27 kN/mm za běžné teploty a 0,44 kN/mm při teplotě 600 °C.

V poslední části diplomové práce je popsán a validován numerický model sendvičového panelu tloušťky 100 mm. Numerický model byl vytvořen v softwaru ANSYS. Provedena byla teplotní analýza při teplotě 600 °C a mechanická analýza za běžné teploty. Teploty naměřené během experimentální studie byly téměř totožné s teplotami v numerickém modelu, pouze nárůst teploty horního povrchu byl v numerickém modelu pozvolnější. Rozdíl je způsobený neznalostí přesných materiálových vlastností minerální vlny a neznalostí jejich změny v závislosti na teplotě. Během mechanické analýzy byly sledovány průhyby sendvičového panelu za běžné teploty. Numerický model dobře vystihoval chování sendvičového panelu pro elastické chování materiálu, během kterého se průhyb od experimentální studie lišil o 1,5 mm. Tuhost materiálu byla v této části také velice podobná, což je patrné ze skonu křivky vyjadřující závislost zatížení na průhybu. Lze konstatovat, že pro elastické chování numerický model dobře vystihuje chování sendvičového panelu. Přesné plastické chování materiálu není známo, a proto nemohla být tato část správně modelována.

Pro další práci by mohl být uvedený numerický model zdokonalen např. namodelováním jednotlivých lamel jádra sendvičového panelu. To by vedlo k přesnější hodnotě únosnosti sendvičového panelu. Musely by však být známy přesné polohy a natočení jednotlivých lamel ve zkoušeném vzorku. Zdokonalení modelu by také mohlo být dosaženo zpřesněním jednotlivých materiálových vlastností minerální vlny. Vlastnosti by musely být zjištěny pomocí jednotlivých materiálových zkoušek. Další zpřesnění modelu by mohlo být dosaženo zjemněním výpočetní sítě modelu, to by ovšem prodloužilo výpočetní čas a musel by být použit software s plnou licencí, který nemá omezení pro počet uzlů.

## Seznam obrázků

obr. 1: Sendvičový panel s jádrem z minerální vlny [2] .....	8
obr. 2: Schéma sendvičového panelu s lamelami (přeloženo z [3]).....	9
obr. 3: Sendvičový panel s jádrem z PUR pěny [5] .....	10
obr. 4: Montáž stěnových sendvičových panelů [6].....	10
obr. 5: Minimální vzdálenosti upevňovacích prvků od okraje panelu [6] .....	11
obr. 6: Kotvení střešního panelu k vaznici [6] .....	11
obr. 7: Kotvení dvou střešních panelů [6].....	12
obr. 8: Kotvení střešního panelu u hřebenu [6].....	12
obr. 9: Schéma zkoušky (přeloženo z [8]) .....	13
obr. 10: Porovnání experimentu a modelu podle [8].....	14
obr. 11: Doporučený způsob kotvení střešního panelu [1] .....	15
obr. 12: Závislost membránové síly a průhybu na teplotě [1].....	16
obr. 13: Maximální průhyb panelů v závislosti na teplotě [10] .....	17
obr. 14: Sendvičový panel tl. 100 mm .....	20
obr. 15: Sendvičový panel tl. 230 mm .....	20
obr. 16: Schéma experimentu – pohled.....	21
obr. 17: Schéma experimentu - Řez AA' .....	21
obr. 18: Zatěžovací sestava .....	21
obr. 19: Schéma podpory panelu.....	22
obr. 20: Ocelová podložka mezi zdvihákem a nosníkem.....	22
obr. 21: Rozmístění snímačů průhybu .....	23
obr. 22: Řídící stroj Mannings HTC 70 kW.....	24
obr. 23: Prodlužovací kabely keramických deček.....	24
obr. 24: Přichycení keramického ohřívače a termočlánků k panelu .....	25
obr. 25: Sendvičový panel překrytý žáruvzdornou rohoží Fiberfrax .....	25
obr. 26: Rozmístění keramických deček na panelech o rozměrech 1200 mm x 2500 mm.....	26
obr. 27: Rozmístění keramických deček na panelu o rozměrech 1200 mm x 4000 mm .....	26
obr. 28: Předpokládaný průběh teploty .....	27
obr. 29: Průběh teploty na spodním povrchu panelu při zkoušce 600 °C .....	27
obr. 30: Uchycení termočlánku na povrchu panelu .....	28



---

obr. 31: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 2500 mm – půdorys ...	28
obr. 32: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 2500 mm – řezy .....	28
obr. 33: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměrech 1200 mm x 4000 mm – půdorys ...	29
obr. 34: Rozmístění termočlánků na panelu o rozměru 1200 mm x 4000 mm - řez.....	29
obr. 35: Schéma experimentu na panelech SPA 100E – pohled.....	30
obr. 36: Schéma experimentu na panelech SPA 100E – řez A-A.....	30
obr. 37: Schéma rozmístění potenciometrů při experimentu na panelech SPA 100E .....	30
obr. 38: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 100E při běžné teplotě.....	31
obr. 39: Průhyb jednotlivých průhyboměrů na panelu SPA 100E při běžné teplotě .....	32
obr. 40: Průměrný průhyb panelu SPA 100E při běžné teplotě uprostřed rozpětí.....	32
obr. 41: Vzorek během experimentu SPA 100E při běžné teplotě - viditelná deformace .....	33
obr. 42: Vzorek během experimentu SPA 100E při běžné teplotě - zvětšení deformací.....	33
obr. 43: Vzorek po experimentu SPA 100E při běžné teplotě .....	34
obr. 44: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 100E při 600 °C.....	34
obr. 45: Průměrné teploty panelu SPA 100E při 600 °C .....	35
obr. 46: Teploty naměřené na spodním povrchu panelu SPA 100E při 600 °C .....	35
obr. 47: Teploty naměřené v jádru panelu SPA 100E při 600 °C.....	36
obr. 48: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 100E při 600 °C.....	37
obr. 49: Průměrný průhyb na panelu SPA 100E při 600 °C .....	37
obr. 50: Sendvičový panel SPA 100E během zahřívání na 600 °C .....	38
obr. 51: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C .....	39
obr. 52: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C .....	39
obr. 53: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C .....	39
obr. 54: Schéma experimentu na panelech SPA 230E – pohled.....	40
obr. 55: Schéma experimentu na panelech SPA 230E – řez A-A.....	40
obr. 56: Schéma rozmístění potenciometrů při experimentu na panelech SPA 230E .....	41
obr. 57: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 230E při běžné teplotě.....	41
obr. 58: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 230E při běžné teplotě.....	42
obr. 59: Průměrný průhyb panelu SPA 230E při běžné teplotě uprostřed rozpětí panelu .....	42
obr. 60: Vzorek během experimentu SPA 230E při běžné teplotě - viditelná deformace .....	43
obr. 61: Vzorek během experimentu SPA 230E při běžné teplotě - zvětšení deformací.....	43
obr. 62: Vzorek po experimentu SPA 230E při běžné teplotě .....	44

---

obr. 63: Detail trhliny po testu panelu SPA 230E při běžné teplotě .....	44
obr. 64: Zkušební sestava před začátkem testu panelu SPA 230E při 600 °C .....	45
obr. 65: Průměrné teploty panelu SPA 230E při 600 °C .....	45
obr. 66: Teploty naměřené na spodním povrchu panelu SPA 230E při 600 °C .....	46
obr. 67: Teploty naměřené v jádru panelu SPA 230E při 600 °C .....	46
obr. 68: Průhyb jednotlivých potenciometrů na panelu SPA 230E při 600 °C .....	47
obr. 69: Průměrný průhyb na panelu SPA 230E při 600 °C .....	47
obr. 70: Sendvičový panel SPA 230E během zahřívání na 600 °C .....	48
obr. 71: Detail zahřívajícího panelu SPA 230E .....	48
obr. 72: Sendvičový panel SPA 230 E během experimentu - 600 °C (vznik praskliny) .....	49
obr. 73: Sendvičový panel SPA 230 E během experimentu - 600 °C (rozšíření praskliny) ....	49
obr. 74: Detail jádra sendvičového panelu SPA 230E po experimentu – 600 °C .....	50
obr. 75: Sendvičový panel SPA 100 E po experimentu - 600 °C .....	50
obr. 76: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E a SPA 230E při běžné teplotě .....	51
obr. 77: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E a SPA 230E při teplotě 600 °C .....	52
obr. 78: Porovnání průměrného průhybu SPA 100E při teplotě 20 °C a 600 °C .....	52
obr. 79: Porovnání průměrného průhybu SPA 230E při teplotě 20 °C a 600 °C .....	53
obr. 80: Znárodnění maximální síly a průhybu .....	54
obr. 81: Detail rozšíření otvoru ve spodním plechu sendvičového panelu .....	55
obr. 82: Deformované závitové tyče po experimentu .....	55
obr. 83: Modul Geometry v softwaru ANSYS .....	56
obr. 84: Vytvořený řez sendvičovým panelem .....	57
obr. 85: Vytvořený 3D model zkušební vzorku .....	57
obr. 86: Modul Transient structural .....	58
obr. 87: Pracovní diagram minerální vlny .....	59
obr. 88: Pracovní diagram oceli .....	60
obr. 89: Měrné teplo oceli použité v numerickém modelu .....	60
obr. 90: Tepelná vodivost oceli použitá v numerickém modelu .....	61
obr. 91: Rovina symetrie modelu .....	61
obr. 92: Materiály numerického modelu .....	62
obr. 93: Zahřívání povrchu sendvičového panelu .....	63
obr. 94: Teplotní zatížení spodního povrchu sendvičového panelu .....	63

---

---

obr. 95: Teplotní profil v čase 0 s .....	64
obr. 96: Teplotní profil v čase 1000 s .....	64
obr. 97: Teplotní profil v čase 2000 s .....	64
obr. 98: Teplotní profil v čase 3000 s .....	64
obr. 99: Teplotní profil v čase 4000 s .....	65
obr. 100: Teplotní profil v čase 4800 s .....	65
obr. 101: Průměrné teploty sendvičového panelu numerického modelu .....	65
obr. 102: Podepření sendvičového panelu v numerickém modelu .....	66
obr. 103: Působící zatížení v numerickém modelu .....	66
obr. 104: Průběh zatížení v čase do maximální únosnosti .....	67
obr. 105: Průběh zatížení z experimentální studie .....	67
obr. 106: Zatížení v závislosti na průhybu uprostřed rozpětí do únosnosti materiálu .....	68
obr. 107: Celková deformace sendvičového panelu v čase 0 s .....	69
obr. 108: Celková deformace sendvičového panelu v čase 100 s .....	69
obr. 109: Celková deformace sendvičového panelu v čase 200 s .....	69
obr. 110: Celková deformace sendvičového panelu v čase 262 s .....	69
obr. 111: Průběh průhybu uprostřed rozpětí panelu.....	70
obr. 112: Zatížení v závislosti na průhybu uprostřed rozpětí sendvičového panelu .....	70
obr. 113: Porovnání teplot spodního povrchu sendvičového panelu .....	71
obr. 114: Porovnání teplot jádra sendvičového panelu .....	72
obr. 115: Porovnání teplot horního povrchu sendvičového panelu.....	72
obr. 116: Porovnání maximální únosnosti při experimentální studii a numerickém modelu ..	73
obr. 117: Porovnání tuhosti panelu při experimentální studii a numerickém modelu .....	74
obr. 118: Porovnání průběhu průhybu mezi experimentální studií a numerickým modelem ..	74
obr. 119: Vzorek při experimentální studii v čase přibližně 260 s.....	75
obr. 120: Deformace celého vzorku z numerického modelu v čase 262 s.....	75

## Seznam tabulek

tab. 1: Vztah tuhosti opláštění sendvičového panelu a teploty [10].....	17
tab. 2: Seznam zkoušek.....	18
tab. 3: Vlastnosti použitých sendvičových panelů.....	19
tab. 4: Shrnutí použitých nosníků.....	20
tab. 5: Průběh experimentu na panelu SPA 100 E při běžné teplotě.....	33
tab. 6: Průběh experimentu na panelu SPA 100 E při 600 °C.....	38
tab. 7: Průběh experimentu na panelu SPA 230 E při běžné teplotě.....	43
tab. 8: Průběh experimentu na panelu SPA 230 E při 600 °C.....	49
tab. 9: Shrnutí způsobu porušení.....	51
tab. 10: Shrnutí ohybové tuhosti sendvičových panelů.....	54
tab. 11: Materiálové vlastnosti minerální vlny.....	58
tab. 12: Materiálové vlastnosti oceli.....	59

---

## Literatura

- [1] COOKE, Gordon M. E. Stability of lightweight structural sandwich panels exposed to fire. *Fire and Materials* [online]. 2004, **28**(24), 299–308. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.851
- [2] <https://cdn.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/epd/5ruukki-light-weight-sandwich-element-system.pdf?sfvrsn=49>.
- [3] POZORSKA, Jolanta. Numerical modelling of sandwich panels with a non-continuous soft core. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **157**, 06007. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201815706007
- [4] FOSTER, Andrew. *Understanding, predicting and improving the performance of foam filled sandwich panels in large scale fire resistance tests*. Manchester, 2014. The University of Manchester.
- [5] <https://www.ruukki.com/b2b/products/sandwich-panels/sandwich-panel-details/sandwich-panel-sp2e-x-pir>.
- [6] [https://cdn.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/sandwich-panels/mont%C3%A1zn%C3%AD-navod-pro-sendvi%C4%8Dov%C3%A9-panely-2017.pdf?sfvrsn=46f02085\\_6](https://cdn.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/sandwich-panels/mont%C3%A1zn%C3%AD-navod-pro-sendvi%C4%8Dov%C3%A9-panely-2017.pdf?sfvrsn=46f02085_6).
- [7] CIB WORKING COMMISSION W056 SANDWICH PANELS, EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK, COMMITTEE TC7, WORKING GROUP TWG 7.9 a INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. *European recommendations on the stabilisation of steel structures by sandwich panels*. 2013. ISBN 978-90-6363-081-2.
- [8] HEDMAN-PÉTURSSON, Eva. *Column Buckling with Restraint from Sandwich Wall Elements*. B.m., 2001. Luleå University of Technology.
- [9] HAVULA, Jarmo, Markku HEINISUO a Zhongcheng MA. Numerical analysis of steel columns stabilized by sandwich panels. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*. 2017, (2).
- [10] BIRMAN, V., G.A. KARDOMATEAS a G.J. SIMITSES. Response of a sandwich panel subject to fire or elevated temperature on one of the surfaces. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. July, **2006**.
- [11] ČSN EN 1993-1-3 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-3: Obecná pravidla - Doplňující pravidla pro za studena tvarované prvky a plošné profily. 2008.
- [12] EN 1993-1-2, Eurocode 3. *Design of steel structures - Part 1-2: General rules -Structural fire design*. 2005.