

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**STĚNA ZE SKLENĚNÝCH CIHEL PŘI POŽÁRU**

**GLASS BRICKS WALL EXPOSED TO FIRE**

Autor: Bc. Lenka Šplíchalová

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: ŠPLÍCHALOVÁ Jméno: LEŇKA Osobní číslo: 410816  
Zadávací katedra: K 134  
Studijní program: SI  
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: STĚNA ZE SKLENĚNÝCH CIHEL PŘI POŽÁRU  
Název diplomové práce anglicky: GLASS BRICKS WALL EXPOSED TO FIRE  
Pokyny pro vypracování: VYHODNOCENÍ POŽÁRNÍHO EXPERIMENTU, VYTVOŘENÍ  
HUMERICKÉHO MODELU, POROVNÁNÍ S EXPERIMENTEM, STUDIE  
CITIVOSTI, MOŽNOSTI POUŽITÍ ZDVA ZE SKLENĚNÝCH CIHEL

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Zdeněk Štěl

Datum zadání diplomové práce: 11/10/2018 Termín odevzdání diplomové práce: 6/11/2019  
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného oř. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

11. 10. 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Zdeňka Sokola, Ph.D. a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací. Dále prohlašuji, že všechny použité informační zdroje a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

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), ve smyslu pozdějších znění tohoto zákona.

V Praze dne 4.1.2019

.....

Bc. Lenka Šplíchalová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce, Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D., za věcné připomínky a odborné vedení své diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Martině Eliášové, CSc. za odborné konzultace a poskytnutí odborné literatury.

Ráda bych také poděkovala své rodině, a především svému partnerovi Martinu Hejhalovi za podporu při tvorbě této práce.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat Ing. Lubošovi Chýlemu ze společnosti Vitrablok, s.r.o. za poskytnutí získaných dat z experimentu, která se stala cenným zdrojem této práce.

# Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na výzkum vlastností stěny ze skleněných cihel při požáru. V první, teoretické části jsou popsány zejména druhy stavebních skel, jejich výroba, možnosti jejich použití a také obecné vlastnosti skel, popřípadě jejich závislost na vzrůstající teplotě. Následující část práce představuje požární experiment, který se uskutečnil v roce 2017. Předmětem zkoušky byla právě stěna ze skleněných cihel. Následuje několik kapitol, které popisují vytvoření numerického modelu, který simuluje prostup tepla skleněnou konstrukcí. Po nalezení souladu dat získaných z experimentu a výstupních hodnot numerického modelu může být tato numerická analýza užitečným nástrojem při dalším zkoumání chování skleněných konstrukcí. Díky možnosti získání teplotních průběhů ve skleněných konstrukcích tak bude moci model přispívat k rozšíření užití skleněných prvků, zejména cihel.

## Klíčová slova

skleněné cihly; tepelné vlastnosti; numerický model; prostup tepla; MATLAB; požární experiment

# **Abstract**

This thesis focuses on research of glass brick properties at a high temperature. The first theoretical part describes different types of glass, their production, the possibilities of their use as well as their general properties. Some of the properties depend on increasing temperature. The following part presents a fire experiment that took place in 2007. The subject of it was a glass brick wall. Follow some chapters that describe the creation of a numerical model which can simulate heat transfer through a glass object. After finding the consistency of experimental data and the numerical model output values, this numerical analysis can be a useful tool in a further investigating the glass constructions behaviour. Thanks to the possibility of obtaining temperature curves through glass construction, the model can contribute to the expansion of glass elements use, especially glass bricks.

## **Keywords**

glass bricks; thermal properties; numerical model; heat transfer; MATLAB; fire experiment

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Historie a výroba skla</b> .....	<b>12</b>
2.1	Stručná historie skla .....	12
2.2	Výroba a typy skla .....	13
2.2.1	Foukání.....	13
2.2.2	Lití.....	13
2.2.3	Tažení.....	14
2.2.4	Válcování a sklo s drátěnou vložkou .....	14
2.2.5	Plavení a plavené sklo.....	14
2.2.6	Tepelně tvrzené sklo .....	15
2.2.7	Tepelně zpevněné sklo .....	16
2.2.8	Chemicky zpevněná skla.....	16
2.2.9	Vrstvené sklo.....	17
<b>3</b>	<b>Vlastnosti skla a skleněné cihly</b> .....	<b>19</b>
3.1	Obecné materiálové vlastnosti skla.....	19
3.2	Složení skla .....	19
3.3	Obecné mechanické a fyzikální vlastnosti .....	20
3.4	Vybrané mechanické a tepelně technické vlastnosti.....	21
3.4.1	Hustota .....	21
3.4.2	Teplotní roztažnost.....	22
3.4.3	Měrné teplo .....	24
3.4.4	Tepelná vodivost .....	26
3.5	Tavení a odtávání skla.....	27
3.6	Sklo v současném stavebnictví .....	28
3.7	Skleněné cihly .....	30
3.7.1	Výroba skleněných cihel .....	30
3.7.2	Spoje skleněných cihel.....	32
3.8	Užití zdiva ze skleněných plných cihel.....	33
3.8.1	Atocha Monument Madrid.....	33
3.8.2	Crystal Houses .....	35
3.8.3	Crown Fountain.....	36
3.8.4	Optical glass house.....	38
<b>4</b>	<b>Experimentální analýza</b> .....	<b>40</b>
4.1	Popis zkušební konstrukce .....	40
4.2	Průběh zkoušky .....	42
4.3	Data získaná z experimentu .....	45
<b>5</b>	<b>Numerická analýza</b> .....	<b>49</b>
5.1	Použitá metoda.....	49
5.2	Výpočetní prostředí.....	52
5.3	Specifikace modelu .....	53
5.4	Vstupní data .....	54
5.4.1	Veličiny nezávislé na teplotě .....	54

5.4.2	Veličiny závislé na teplotě .....	54
5.4.3	Hraniční teploty.....	56
5.5	Okrajové podmínky a výpočet .....	59
5.6	Výstupní data z numerického modelu.....	63
<b>6</b>	<b>Porovnání dat z experimentu a z numerického modelu .....</b>	<b>68</b>
6.1	Průběhy teplot na odvráceném povrchu konstrukce .....	68
6.2	Průběhy teplot uvnitř konstrukce .....	69
6.3	Časové řezy konstrukcí .....	72
6.4	Odtávání konstrukce .....	75
<b>7</b>	<b>Citlivostní analýza numerického modelu.....</b>	<b>75</b>
7.1	Koeficient směrnice teplotní vodivosti při $T > 400 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	76
7.2	Součinitel přestupu tepla $\kappa_2$ .....	77
7.3	Hraniční teploty $T_1$ a $T_2$ .....	78
<b>8</b>	<b>Možnosti použití zdiva ze skleněných cihel v požárně dělicích konstrukcích .....</b>	<b>80</b>
8.1	I15 – izolační schopnost po dobu 15 minut .....	81
8.2	I30 – izolační schopnost po dobu 30 minut .....	83
8.3	I60 – izolační schopnost po dobu 60 minut .....	84
8.4	I90 – izolační schopnost po dobu 90 minut .....	85
8.5	I120 – izolační schopnost po dobu 120 minut .....	86
8.6	Přehled a shrnutí.....	87
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>90</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>93</b>
<b>12</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>94</b>



# Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Název	Jednotky
<b>Latinské symboly</b>		
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
L; l	Délka	m
m	Hmotnost	kg
V	Objem	m <sup>3</sup>
t	Čas	s
q	Tepelný tok	W
T	Teplota	°C; K
k	korelační koeficient	-
<b>Řecké symboly</b>		
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
$\rho$	Objemová hmotnost (hustota)	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Napětí	MPa
$\alpha$	Délková teplotní roztažnost	1/K
$\alpha$	Součinitel teplotní vodivosti	m <sup>2</sup> /s
$\kappa$	Součinitel přestupu tepla	W/m <sup>2</sup> K
$\varepsilon$	Emisivita	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
<b>Zkratky</b>		
PVB, TPU, EVA	polyvinyl butyral, termoplastický polyuretan, etylvinyl acetát	
PET	polyester	
SGP	ionoplast	
ETFE	ethylen-tetrafluorethylen	
UV	ultra fialové záření	
R, E, I	mezní stavy požární odolnosti (nosnost, celistvost, izolace)	
PDK	požárně dělicí konstrukce	
DČŘ	daný časový řez	
MJ	modulová jednotka	
CA	citlivostní analýza	

# 1 Úvod

Problematika užití skla jako stavebního materiálu není zdaleka novodobým tématem. Jeho začleňování pouze do architektonické sféry stavitelství se ale pomalu stává minulostí a sklo začíná zaujímat své postavení také ve funkci nosného stavebního materiálu.

Stavebním prvkem, kterým se v práci budu zabývat, je skleněná cihla. Tento specifický produkt se na území České republiky nevyrábí, přesto je na českém trhu k dispozici například díky společnosti Vitrablok, s.r.o. Světově má poptávka po tomto stavebním prvku rostoucí tendenci. Pro širší veřejnost jsou v této oblasti více známé např. duté skleněné tvárnice, neodborně nazývané luxfery.

Před dvěma lety se mi naskytla příležitost zúčastnit se požárního experimentu, při kterém byla zkoušena konstrukce z plných skleněných cihel na účinky požáru. Experiment byl součástí dlouhodobého vědeckého výzkumu těchto skleněných cihel. Ráda bych zde zmínila, že se jednalo o jednu z prvních požárních zkoušek stěny tohoto typu, jelikož použití skleněných cihel v kombinaci s maltou je prakticky novým stavebním systémem. Základním parametrem, který byl zkoumán, bylo, jak dlouho je konstrukce schopna odolávat účinkům požáru, aniž by ztratila některé z důležitých vlastností z hlediska požární odolnosti. Jedná se především o celistvost, nosnost, stabilitu a také např. izolační schopnost. Zmíněné vlastnosti jsou totiž od konstrukce většinou vyžadovány i za zvýšených teplot. V rámci této práce se budu tudíž podílet na výzkumu chování skla, resp. skleněných cihel, při požáru.

V následujících kapitolách své práce se chci zaměřit zejména na možnosti užití skleněných cihel ve stavebnictví. K určení potenciálu tohoto prvku je samozřejmě zapotřebí nejprve zjistit jeho vlastnosti a chování ze běžné i zvýšené teploty a také například jeho soudržnost s ostatními materiály. Na základě studie vlastností skla při zvýšených teplotách vytvořím numerický model reflektující získané znalosti v problematice. V mém případě se bude jednat o model popisující vstup tepla skleněnou cihlou za zvýšené teploty. Bude se jednat o jednorozměrný model prostupu tepla, který dle mého názoru bude vzhledem ke zkoumání plošné konstrukce adekvátní.

Ve své práci také využiji data, která vzešla z již zmíněného požárního experimentu společnosti Vitrablok, s.r.o. ve spolupráci s katedrou ocelových a dřevěných konstrukcí fakulty stavební. Samotný požární experiment včetně získaných dat je předmětem několika následujících kapitol. Pro potřeby mé práce data získaná touto zkouškou slouží zejména k ověření správnosti a funkčnosti numerického modelu (validace a verifikace). Na základě těchto porovnání s reálným experimentem bude následně model upraven tak, aby co nejlépe popisoval reálné chování skleněné konstrukce za požáru.

Další důležitou částí této práce je studie citlivosti jednotlivých veličin, které více či méně ovlivňují výsledné hodnoty. Analýza se zaměří na několik vstupních hodnot a koeficientů numerického modelu.

Dále chci v práci uvést zamyšlení nad možnostmi použití vytvořeného numerického modelu, a to zejména z hlediska uplatnění v projekční činnosti a stavitelství v oblasti požární bezpečnosti.

Mou vizí je získání nástroje, numerického modelu, díky kterému určíme například minimální tloušťku skleněné konstrukce, která by splňovala normové požadavky kritéria izolace (I) dle ČSN 73 0810. Tato izolační schopnost konstrukce je v normách a odborné literatuře týkající se požární bezpečnosti staveb popsána jako schopnost konstrukce po určitou dobu nepřekročit vzrůst teploty na neohřívaném povrchu o 140 °C oproti počáteční teplotě. Novou legislativou se požadavek zpřísňuje s nutností nepřekročit teplotu 180 °C na neohřívané straně konstrukce. [1]

Základní otázkou tedy zůstává, jaký je průběh teplot skleněnou konstrukcí, která je vystavena požáru. Z teoretické části práce je patrné, že reálné chování takovýchto konstrukcí je ovlivněno mnoha faktory od typu použitého skla, přes tvar a rozměry cihly, výrobní faktory jako doba chladnutí a přesnost formy, použitý typ pojiva, geometrii konstrukce a v neposlední řadě také zohlednění zatížení konstrukce. Numerický model, který je stěžejní součástí této práce, bude díky možnosti konfrontace s reálným požárním experimentem co nejvíce odpovídat skutečnému chování.

## 2 Historie a výroba skla

### 2.1 Stručná historie skla

Sklo je přítomno na Zemi odnepaměti, jelikož vulkanické sklo obsidián je jedním z přirozeně se vyskytujících minerálů. Tento materiál je vlastně rychle ochlazená magmatická hornina, ve které došlo k velmi omezenému růstu krystalů. První zmínky o uměle vyrobeném materiálu připomínajícím dnešní sklo se datují do pátého tisíciletí před našim letopočtem a pocházejí z východního Středomoří. Je velmi pravděpodobné, že sklo vytvořené člověkem vzniklo jako vedlejší produkt keramické výroby.

První druh skla vyrobený člověkem pochází z Egypta, a to kolem roku 3500 př.n.l. V té době se z tohoto materiálu vyráběly různé druhy nádob a šperky. [2]

Další zlom je spojen s Římskou říší, kde bylo vyrobeno a pojmenováno čisté sklo – původní název glesum, dnes sklo. V té době byla výroba skla velmi obtížná a skleněné výrobky tak patřily k luxusnímu zboží. Například skleněná tabule v okně byla známkou velkého bohatství. První písemná zmínka o skle na našem území pochází až z roku 1162. [3]

Během středověku se sklo rozšířilo a v této době už mnoho domů a téměř všechny důležité a zejména sakrální stavby měly skleněná okna či vitráže. Tyto kroky byly důležitým posunem z architektonického hlediska, avšak z hlediska konstrukcí nehrálo sklo ještě žádnou roli. Až ke konci 19. století se objevily první pokusy o užití skla jako nosného prvku. Thadeus Hayatt využil skleněné dlaždice, které vložil do roštu z oceli či betonu a umístil je do úrovně chodníku, aby tak prosvětлил sklepní prostory. [4] Následně se začaly vyrábět skleněné prvky foukáním, šlo o tzv. tvarovky Falconier, předchůdce dnešních luxfer. [5] Vzniklé tvárnice byly tedy duté a projevíly se u nich velmi dobré tepelně technické i zvukově izolační vlastnosti.

Ve 20. století byly vynalezeny nové typy skla, například tvrzené sklo, drátěné sklo, anebo tzv. vrstvené (laminované) sklo. Technologie výroby tvárnice přechází z foukání na lisování. Principy výroby a vlastnosti skel, popř. tvárnice, jsou podrobněji popsány dále. Nyní stačí poznamenat, že myšlenka vrstveného skla umožnila pomýšlet na sklo jako na konstrukční materiál stavebních prvků. Časem se stalo vrstvené sklo fenoménem, bez něhož by se nosné skleněné konstrukce neprosadily, jelikož přichází s inovací v podobě porušení povrchové tabule bez nutnosti kolapsu konstrukce. U vrstvených skel se často s povrchovou tabulí skla ani nepočítá, tudíž její oběť jako ochranná vrstva nemusí mít vliv na únosnost konstrukce. [6]

V současné době je použití skla úzce spojeno s rozvojem ocelových prutových konstrukcí, které zajišťují nosnou funkci, a sklo je dnes velmi často používáno jako výplňový materiál. Nenosné skleněné prvky můžeme vidět v obvodových pláštích, prosklených pasážích či prosklených střešních konstrukcích.

## 2.2 Výroba a typy skla

Obecně se sklo vyrábí tavením křemičitého písku ve sklářské peci za přítomnosti alkalických tavidel, která tavení písku usnadňují. Alkalické látky jsou potřeba zejména kvůli vysoké teplotě tání oxidu křemene, která je okolo 2 000 °C. Mezi takové látky patří například soda (uhličitan sodný) a potaš (uhličitan draselný), které snižují teplotu tání asi na 1 000 °C. Protože alkálie současně také snižují odolnost skla vůči vodě, což je nežádoucí, přidává se také oxid vápenatý, který tuto odolnost zlepšuje. [2] Chemicky je tedy sklo druh křemičitanu. Jeho hlavní složkou je již zmíněný oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$  (70-75 %), který je obsažen v křemičitém písku (sklářském písku), a  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  nebo  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Vlastnosti skla se samozřejmě odvíjejí od jeho složení. Vlastnostem a složení se v práci budu věnovat v dalších kapitolách.

Přirozená barva skla závisí taktéž na složení a obsahu dalších příměsí, například sloučenin železa. Při vysokém obsahu sloučenin železa získává sklo nazelenalý až nahnědlý odstín. Až čištěním a odbarvováním se dosáhne čirosti skla. Dalšími zbarvujícími sloučeninami může být měď, kobalt nebo nikl. [7]

Z hlediska výroby skleněných tabulí rozlišujeme několik druhů skla, v následujících kapitolách jsou zmíněny ty nejzásadnější.

### 2.2.1 Foukání

Při ručním zpracování se nabere na sklářskou píšťalu roztavená sklovina a mírným vyfouknutím se vytvoří základní baňka. Na ni se nabírá podle velikosti výrobku další sklovina. Pomocí otáčení se vytvoří polotovár, který kombinací otáčení a foukání dostává konečnou podobu, popř. pomocí dřevěné namočené formy. Po oddělení od píšťaly postupuje výrobek do chladicí pece, kde několik hodin chladne, aby se ve skle vyrovnalo vnitřní pnutí. Jinak sklo popraská. Ostré okraje se zabrušují. S ohledem na vlastnosti formy nesmí teplota taveniny překročit 900 °C. [2]

Skleněné desky se také zpočátku vyráběly foukáním, a to vytvořením baňkovitého tvaru, který se nařízl a pomocí otáčení píšťaly a odstředivé síly se vytvořila kruhová placka připomínající desku. Později se přešlo na foukání do válců, které byly následně rozříznuty a vyhlazeny do roviny.

### 2.2.2 Lití

Litím se zhotovují například silné tabule výkladních skříní. Sklovina vytéká na litinový nebo měděný stůl ohraničený lištami a vyrovná se vyhříváním válcem. Surové vychlazené tabule se musí brousit a leštit. Tento způsob výroby se začal zavádět továrně a jejím cílem bylo nahradit nedostačující ruční výrobu skleněných tabulí. Desky vyrobené litím dosahují rozměrů až 1,2 x 2 metry. [8]

### 2.2.3 Tažení

Tažením vznikají například slabší okenní tabule. Nepřetržitý pás skloviny je vytahován z vany dvojicí válečků. Vychladlý pás se postupně rozřezává na tabule, které se prokládají papírem. Mezi tažená skla patří například zrcadlové sklo, bezpečnostní a tvrzená skla.

Myšlenka tažení skla vznikla ve Francii na počátku 20. století. Průlomová byla metoda v nepřetržitě způsobu výroby, způsobovala však ve skle defekty. Touto metodou byly vyráběny tabule šířky až 2,5 metru o tloušťce 0,6 – 50 mm. [8]

### 2.2.4 Válcování a sklo s drátěnou vložkou

Válcováním se vyrábí například zrcadlové sklo. Sklovina vytéká z vanové pece mezi chlazené vodorovné válce, které ji vyrovnávají v desku. Po průchodu chladicí pecí se tabule z obou stran brousí a leští. [6] Při válcování lze také do tabulí vtačovat vzor nebo vkládat drátěné pletivo.

Možnost úpravy skleněných desek různými vzory je úzce spjata s rozmachem skla jako dekorativního architektonického prvku. Vzorování se také může vytvářet už při válcování, a to tak, že jeden z válců při výrobě je opatřen vzorem. Přestože je výroba touto metodou velmi rychlá, vlivem kontaktu desek s licími válci se často objevovaly nerovnosti a sklo pak nebylo příliš vhodné pro pohledové použití.

Sklo s integrovanou drátěnou vložkou je typickým příkladem mechanické zvýšení odolnosti skla. Tato skla se nejčastěji vyrábějí právě válcováním, při kterém je do tabule přidána kovová drátěná vložka. Její funkce spočívá především v tom, že v případě poškození skla zadržuje střepy u sebe a brání tak jejich rozptýlu. Drátěná vložka nemá přímo vliv na zvýšení pevnosti skla, do kterého je přidávána, naopak ve skutečnosti pevnost skla snižuje, protože narušuje homogenitu hmoty a může způsobovat mikrotrhliny. Pevnost skel s drátěnou vložkou je o několik MPa menší než u plavených skel a asi o 75% nižší než pevnost tvrzených skel. Při rozbití je riziko oddělení mřížky od skla a hrozí tak nebezpečí úrazu. [6]

### 2.2.5 Plavení a plavené sklo

Převratnou změnu výroby zrcadlového skla přinesla technologie plavení. Vláčný pás skloviny o teplotě 1500 °C se přivádí v komoře s netečnou dusíkovou atmosférou na hladinu kovové lázně (cínu, hliníku, olova). Na roztaveném kovu získá tabule z obou stran ideálně hladký povrch. Pás je dále ochlazován mírným snižováním teploty a poté, co dosáhne dostatečné tuhosti, vstupuje do chladicí pece, z níž vystupuje jako finální produkt nevyžadující dodatečné broušení či leštění.

Tento způsob se u nás používá od roku 1958 a nazývá se float (plavené sklo). Dnešní výrobní kapacity mohou dosáhnout zpracování až 900 tun skla za den. V současnosti se jedná o nejrozšířenější metodu výroby skleněných tabulí. Skla vyráběná touto metodou mohou být velmi tenká, až pod 1 mm.

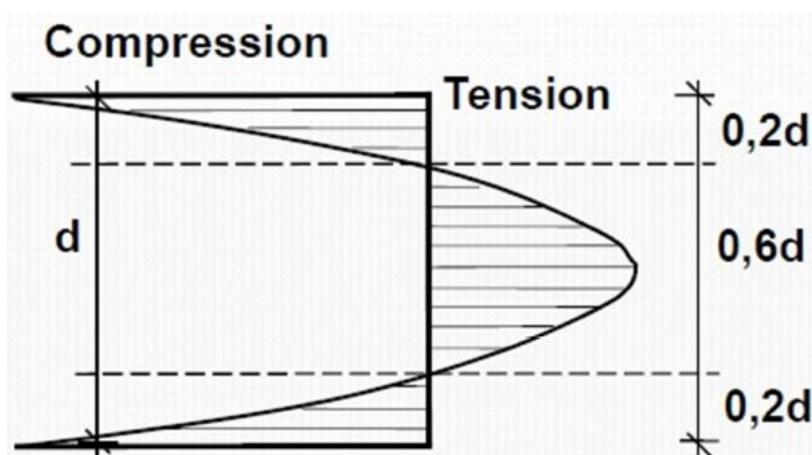
Plavené sklo se i navzdory poměrně nízké pevnosti v tahu (kolem 40 MPa) docela často používá ve stavebnictví (skleněné panely). Při porušení má plavené sklo tendenci rozbit se na velké

ostré kusy, a proto se nemůže používat jako bezpečnostní sklo. Má také nízkou odolnost proti teplotnímu šoku. Pokud je sklo uchycené v rámu, při porušení z něj nevypadne a zachová si tak zůstatkovou únosnost. [6] Typické tloušťky plaveného skla k dispozici od výrobce jsou 3 – 10, 12, 15, 19 a 25 mm. Maximální rozměry tabulí skla jsou 6,0 x 3,2 m. Rozměrová přesnost se pohybuje v rozmezí  $\pm 2-4$  mm pro délku a  $\pm 0,2-1,0$  mm pro tloušťku. [6]

## 2.2.6 Tepelně tvrzené sklo

Plavené sklo často nemá dostatečnou pevnost v tahu vhodnou pro použití na nosné konstrukce, a proto se plavené sklo dále upravuje (zpevňuje), aby se zlepšila jeho odolnost proti mechanickému a teplotnímu zatížení. Jedním z těchto vylepšených skel je tvrzené sklo.

Tepelně tvrzené sklo se vyrábí zahřátím plaveného skla na teplotu vyšší než  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  a následným rychlým ochlazením proudem studeného vzduchu tak, že povrch skla tvrdne rychleji než jeho jádro. To má za následek vznik tlakového napětí na povrchu skla, které je v rovnováze s vnitřním tahovým napětím – panel se předepe. Rozložení napětí má parabolický tvar a jeho průběh můžeme vidět na obr. 1.



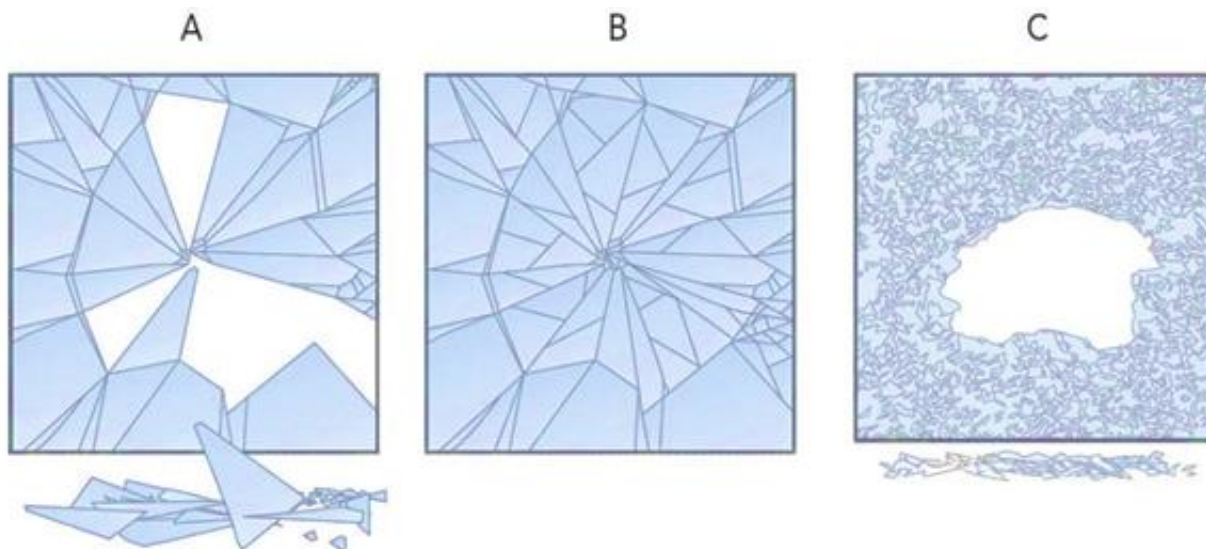
obr. 1: Rozdělení napětí po tloušťce skla [9]

Povrchové napětí v tlaku se obvykle pohybuje mezi 80 a 120 MPa a díky tomuto napětí získává sklo vysokou pevnost v ohybu. Povrchové napětí také zabraňuje růstu trhlin při tahovém namáhání. Tvrzené sklo je mnohonásobně odolnější vůči tepelnému namáhání. Při porušení se tvrzené sklo rozbije na malé kousky a nezůstane spojené, ani když je sklo uchyceno v rámu. [10]

Hlavní nevýhodou tvrzeného skla je možnost vzniku náhlých trhlin, které se obvykle objevují až dva roky po výrobě a často jsou způsobeny objemovou expanzí sulfidu niklu. [11] Dále musí být veškeré mechanické úpravy skla jako řezání nebo vrtání prováděny před tepelným ošetřením, protože po vytvrzení už další úpravy nejsou možné. V neposlední řadě bych zmínila větší počáteční deformace skleněných tabulí způsobené teplotním tvrzením. Počáteční deformace může mít hodnotu až  $L/300$ , pro srovnání počáteční imperfekce plaveného skla je  $L/2500$ . [6]

### 2.2.7 Tepelně zpevněné sklo

Tepelně zpevněné sklo vzniká stejným způsobem výroby jako sklo tepelně tvrzené, ale úroveň vnášeného napětí je menší, mezi 35 a 55 MPa. Při porušení se sklo rozbije stejným způsobem jako plavené sklo, ukázkou porušení skla podle typu viz obr. 2. Stejně jako v případě tvrzeného skla je nutné veškeré mechanické úpravy skla provést před tepelným zpevněním. Na rozdíl od tvrzeného skla nemá zpevněné sklo problém s náhlými trhlinami. [11] Z těchto vlastností se dá usoudit, že tento druh skla je jakýmsi kompromisem mezi plaveným a tvrzeným sklem.



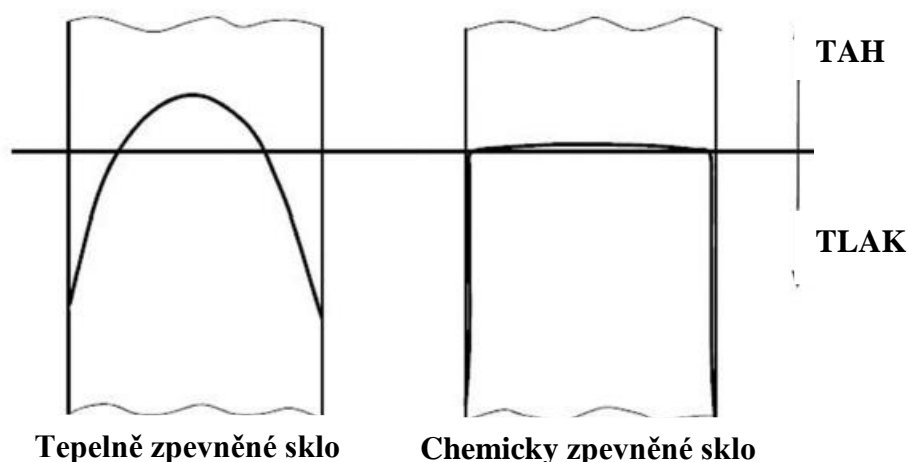
obr. 2: Druhy porušení skel; A – plavené sklo, B – tepelně zpevněné sklo, C – tvrzené sklo [9]

### 2.2.8 Chemicky zpevněná skla

Chemicky zpevněná skla vznikají namáčením tabulí skla do elektrolytické lázně, v které dochází k difuzi iontů a jsou vyměněny ionty sodíku Na za ionty draslíku K. Ionty draslíku jsou však o 30 % větší a tím vytvářejí ve vnější vrstvě tlakové napětí, viz obr. 3. Metodě se říká iontová výměna.

Výhodou tohoto způsobu zpevnění oproti tepelným úpravám je ten, že během procesu tvrzení dochází k minimální deformaci skla, a to umožňuje výrobu tenkých skleněných tabulí. Na druhé straně velkou nevýhodou metody je finanční náročnost oproti tepelné metodě a náchylnost k povrchovým vadám v důsledku malé tloušťky zpevněné oblasti, která dosahuje pouze několika desítek mikrometrů.[5]





obr. 3: Srovnání teplotně a chemicky zpevněného skla [12]

### 2.2.9 Vrstvené sklo

Laminované (vrstvené) sklo se vyrábí spojením dvou nebo více skleněných tabulí, které jsou spojeny pomocnou vnitřní vrstvou. Skleněné tabule mohou mít stejnou, ale i různou tloušťku i vlastnosti. Mezivrstvy jsou obvykle tvořeny jednou a více polymerovými foliemi tloušťky 0,38 mm. Cílem laminování skel je zvýšení únosnosti, bezpečnosti, tepelných a zvukově izolačních vlastností.

Materiály, které mohou být použity jako spojovací mezivrstva [5]:

- PVB (polyvinyl butyral)
- TPU (termoplastický polyuretan)
- EVA (etylvinyl acetát)
- PET (polyester)
- SGP (ionoplast)
- akrylát

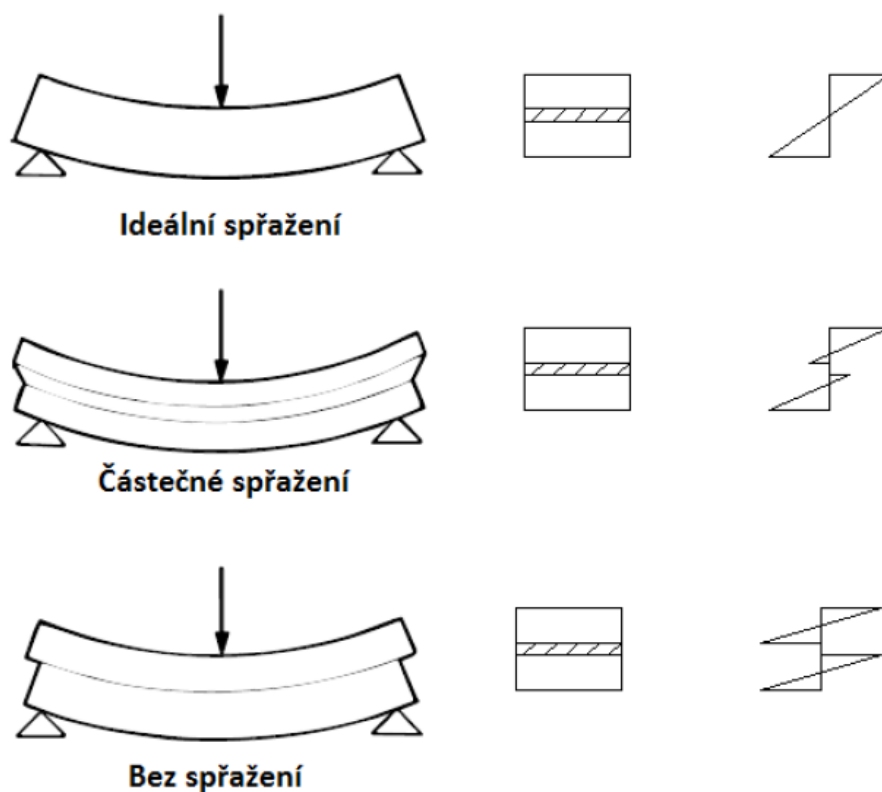
Vrstvené sklo má výrazně lepší chování při rozbití. Když se tabule laminovaného skla rozbije, fólie brání oddělení a vypadnutí jednotlivých střepů skla. Chování skla samozřejmě závisí na použitém druhu skla, ale také na použitém materiálu fólie. Vrstvené sklo se při dosažení požadovaných vlastností může používat na zasklení střeš, přístřešků a také pro výrobu skleněných nosníků a sloupů, čelní skla automobilů a dokonce i jako neprůstřelná skla. [13]

Princip výroby vrstveného skla spočívá v sestavení skleněných tabulí s mezivrstvami z polymerní folie, poté se tato sestava zahřeje na 70 °C a slisuje se mezi válci, během čehož dojde k vytlačení přebytečného vzduchu. V autoklávu je vrstvené sklo při teplotě 140 °C dále lisováno pod tlakem 0,8 MPa.

Další metodou laminování skla je využití lité živice (pryskyřice, epoxid, akryl, polyester), kde jsou dvě tabule skla umístěny svisle vedle sebe s předem definovanou mezerou, např. 2 mm, která je postupně injektáží vyplněna kapalnou živicí. Tímto způsobem se mohou vyrábět i skla velkých rozměrů, jelikož při této technice výroby není potřeba žádného stroje ani zařízení. V porovnání s polymerní folií poskytují živice lepší akustickou izolaci. Nevýhodou je menší zaručená bezpečnost při rozbití skla. [4]

Speciálním druhem vrstveného skla jsou protipožární skla s jednou či více vrstvami speciálních intumescentních gelů, které jsou za běžné teploty průhledné. Při překročení aktivující teploty způsobené požárem se tabule skla na straně plamene zlomí, ale nevysype se a jednotlivé vrstvy gelu začnou zpěňovat a vytváří neprůhledný izolační štít, který brání šíření tepla a požáru.

Z hlediska spolupůsobení skel a mezivrstev je ideálním stavem úplné spřažení, kdy se konstrukce chová jako jedna kompaktní tabule. Druhým krajním případem je pouze položení dvou tabulí skla na sebe, kdy se po sobě mohou volně skla pohybovat a působí každé zvlášť. Za běžných teplot se pohybuje sklo ve stavu mezi dvěma zmíněnými případy, jedná se o tzv. neúplné spřažení. Míra spřažení také závisí na teplotě. Čím vyšší je teplota, tím menší je míra spřažení. [6]



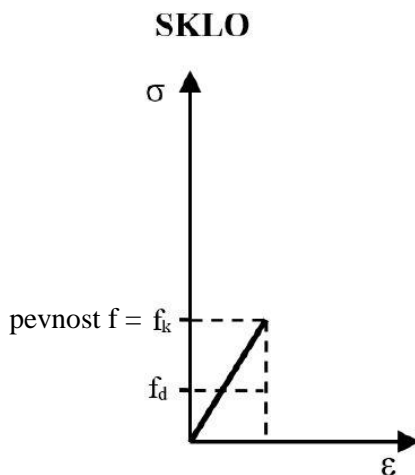
obr. 4: Průběhy napětí při různé míře spřažení [9]

## 3 Vlastnosti skla a skleněné cihly

### 3.1 Obecné materiálové vlastnosti skla

Z chemického hlediska se jedná o amorfni materiál vyrobený tavením surovin, vzniká sklovina a ta se pak dále upravuje na skleněné tabule či jiné produkty ze skla. Nejčastější složení skla je sodno–vápenato–křemičité. Vzhledem k tomu, že se jedná o amorfni látku, je těžké určit teplotu tání, navíc se zvýšenou teplotou se postupně mění vlastnosti skla včetně jeho struktury. Sklo jako materiál se chová izotropně, tzn. že jeho vlastnosti jsou stejné v každém směru. [4]

Sklo je také možné charakterizovat jako anorganický homogenní amorfni materiál, který tuhne bez nutnosti krystalizace. Jedná se o visko-elastický materiál, který je tuhý při pokojové teplotě, avšak při teplotách nad jeho přechodovou oblastí (nad cca 580 °C) se stává tekutým. V důsledku chybějící krystalické mřížky může přes sklo procházet neomezené množství světla, což je výhodná vlastnost při posuzování prosvětlenosti v budovách. Jeho největší slabinou je již zmíněná křehkost materiálu. [13] Sklo na rozdíl od materiálů, které mohou dosáhnout plastické deformace, se chová pružně až do porušení. Tuto vlastnost můžeme vidět na pracovním diagramu skla na obr. 5.



obr. 5: Pracovní diagram skla [9]

Při zatěžování skla tahovými silami narůstá množství trhlin až do porušení tzv. křehkým lomem, ke kterému dochází bez předchozího varování. Porušení skla závisí na množství trhlin a vad ve skle, na velikosti napětí zatíženého povrchu a na délce trvání zatížení. Vady a trhliny ve skle vznikají jak při výrobě, tak při úpravách skleněných tabulí. [14]

### 3.2 Složení skla

Chemickým složením lze sklo zjednodušeně chápat jako směs křemičitanů, tuhý roztok kovových oxidů v oxidu křemičitém. Běžné tzv. „normální sklo“ se vždy blíží chemickým složením hexakřemičitanu disodnovápenatému  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$  ( $\text{Na}_2\text{CaSi}_6\text{O}_{14}$ ). Samotná chemická vazba

Si-O je iontově kovalentní a předurčuje sklovině vysokou pevnost, viskozitu a chemickou odolnost. Dvojmocný atom kyslíku vytváří ve sklovině polymer (X)-Si-O-Si-(X).[2]

Sklo nemá sice přesnou teplotu tání, ale známe rozsah teplot, kdy s klesající teplotou roste viskozita. Tak vznikne průhledné sklo. Vhodnou skladbou surovin lze docílit požadovaných vlastností technických skel – mechanická a chemická odolnost, tvrdost, lesk, propustnost atd.

Mezi nejčastěji užívaná skla patří skla sodnovápenatá, křemičitá a borito-křemičitá (boritosilikátová). Dále se hojně využívají skla fluoridová nebo fosforečná. V následující Tabulce 1 je uvedeno typické složení plaveného a obalového skla.[2]

Tabulka 1: Typický příklad složení skla [2]

Příklad chemického složení (v % hmotnostních %) -	- plochého skla	- obalového skla
	rovněž označení „sodnovápenaté sklo“	
Oxid křemičitý (SiO <sub>2</sub> )	72,6	71 až 73
Oxid sodný (Na <sub>2</sub> O)	13,6	12 až 14
Oxid vápenatý (CaO) z uhličitanu vápenatého CaCO <sub>3</sub>	6 – 11 (obvykl. 8,6)	9 až 12
Oxid hořečnatý (MgO)	1,5 – 4,5 (obvykl. 4,1)	0,2 až 3,5
Oxid hlinitý (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,7	1 až 3
Oxid draselný (K <sub>2</sub> O)	0,3	0,3 až 1,5
Oxid sírový (SO <sub>3</sub> )	0,17	0,05 až 0,3

### 3.3 Obecné mechanické a fyzikální vlastnosti

Jak již bylo řečeno, sklo je velmi odlišný materiál ve srovnání s běžnými stavebními materiály. Nejpoužívanějším sklem ve stavebnictví je plavené sodno-vápenné sklo. Jedná se o trvanlivý materiál odolný vůči vodě, korozi, organickým rozpouštědlům a dokonce i silným kyselinám. Jeho elasticita je způsobena vysokým obsahem oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>), který má velký vliv jak na pevnost, tak i na křehkost skla.

Obecně můžeme říci, že mechanické vlastnosti skla jsou závislé zejména na kvalitě povrchu, tvaru a rozměrech výrobku a na tepelné historii, vliv složení skla je nižší.[7]

Pevnost skla v tlaku je srovnatelná v tlakovou pevností vysoce kvalitní oceli. Oproti tomu jeho pevnost v tahu už není tak impozantní, přestože jeho hodnota je stále vyšší než pevnost betonu nebo dřeva v tahu. Pevnost skla v tahu může být teoreticky až tisíc megapascalů, a to v případě dokonalé mikrostruktury a povrchu. Skutečná pevnost v tahu je značně ovlivněna mikro a makro trhlinami, které se náhodně objevují na povrchu skla. Tyto nedokonalosti pocházejí z výrobního procesu nebo jsou způsobeny manipulací se sklem – vrtání, čištění. Pevnost skla také závisí na velikosti prvku, délce trvání zatížení nebo i vlhkosti vzduchu. [11] Nejzásadnější vlastnosti materiálu plaveného skla jsou shrnuty v následující Tabulka 2: Materiálové vlastnosti skla

Tabulka 2: Materiálové vlastnosti skla [4]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	2 500	kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	20-100	MPa
Pevnost v tlaku	400-900	MPa
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	$9 \cdot 10^{-6}$	1/K
Modul pružnosti	70-74	GPa
Sálavost (intenzita vyzařování)	0,89	-
Součinitel teplotní vodivosti	1	W/mK
Měrná tepelná kapacita	720	J/kgK
Tažný modul	20-30	GPa
Poissonův součinitel	0,22-0,25	-

### 3.4 Vybrané mechanické a tepelně technické vlastnosti

#### 3.4.1 Hustota

Hustotu  $\rho$  definujeme jako hmotnost měrného objemu homogenní látky při dané teplotě a vyjadřujeme ji obvykle

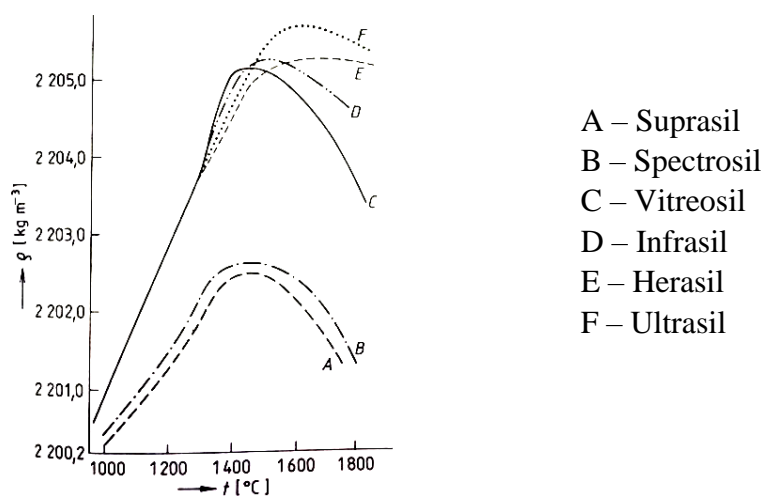
$$\rho = m/V \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

kde  $\rho$  - hustota homogenního tělesa při teplotě  $t$

$m$  - hmotnost tělesa [kg]

$V$  - objem tělesa při teplotě  $t$  [m<sup>3</sup>].

Hustota skla závisí na teplotě, popř. u křemenného skla na tzv. *fiktivní teplotě* (sklo je vyhřáté na definovanou teplotu a rychle ochlazeno, tzv. nestabilizované sklo). Se vzrůstem teploty hustota skel klesá, nad fiktivní teplotou  $t_g$  teplotní roztažnost vzrůstá a hustota klesá rychleji než pod  $t_g$ . Jak bylo řečeno, u křemenných skel lze uvádět závislost hustoty pouze na fiktivní teplotě, viz obr. 6.[8]



obr. 6: Závislost hustoty čirých křemenných skel na fiktivní teplotě [7]

Z průběhu závislosti hustoty na teplotě lze vidět, že změny hustoty jsou v řádu jednotek  $\text{kg/m}^3$ , tedy minimální.

### 3.4.2 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost skel můžeme definovat jako změnu rozměrů tělesa vyrobeného ze skla se změnou teploty za konstantního tlaku. Uvažujeme-li změnu délkových rozměrů, jde o délkovou roztažnost, jde-li o změnu objemu, jedná se o objemovou roztažnost. Kvantitativně charakterizujeme teplotní roztažnost nejčastěji součinitelem teplotní roztažnosti.

Součinitel délkové teplotní roztažnosti je definován vztahem:

$$\alpha = \frac{l \, dl}{l_0 \, dt}$$

kde  $l_0$  je délka měřeného vzorku při referenční teplotě  $t_0$ ,

$dl$  je prodloužení měřeného vzorku při změně teploty  $dt$ .

Součinitel objemové roztažnosti je definován vztahem:

$$\beta = \frac{l \, dV}{V_0 \, dt}$$

Pro pevné látky s izotropní mřížkou (strukturou), tzn. i pro skla, lze vzhledem k nízké hodnotě  $\alpha$  psát  $\beta = 3\alpha$ , kde  $\alpha$  i  $\beta$  jsou součinitele teplotní délkové a objemové roztažnosti [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ].

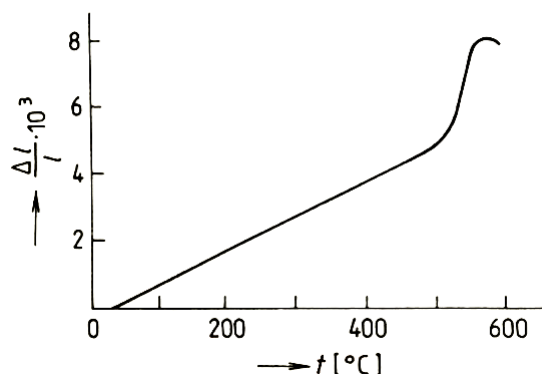
Jelikož je teplotní roztažnost obecně funkcí teploty, je možné uvažovat pro větší teplotní intervaly k vyjádření vztahu mezi délkou (popř. objemem) a teplotou vztah:

$$L = l_0 (1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2),$$

kde  $\alpha_1, \alpha_2$  jsou konstanty. [7]

Závislost délkové teplotní roztažnosti na teplotě, vyjádřenou graficky, nazýváme *dilatační křivkou*. Roztažnost skel s teplotou vzrůstá rovnoměrně, pokud nedochází ke strukturním změnám a sklo je správně vychlazené, viz obr. 7. Průběh dilatační křivky je pro sklo bez napětí, dobře vychlazené, přibližně lineární až do transformační teploty  $t_g$ , pro špatně vychlazené sklo pozorujeme prohnutí dilatační křivky už při  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  pro transformační teplotu  $t_g$ . Po této fázi následuje vzrůst dilatační křivky až do teploty bodu měknutí (deformační teplota  $t_d$ ), kdy může dojít k deformaci výrobků jejich vlastní hmotností. Průběh dilatační křivky by byl částečně odlišný, pokud by během změn teplot docházelo k ochlazování skla.

Na následujícím obr. 7 je zobrazena dilatační křivka skla, které je tzv. dobře vychlazené. Tím je myšleno, že proces chladnutí skla probíhal v pomalém tempu bez náhlých teplotních změn a šoků.



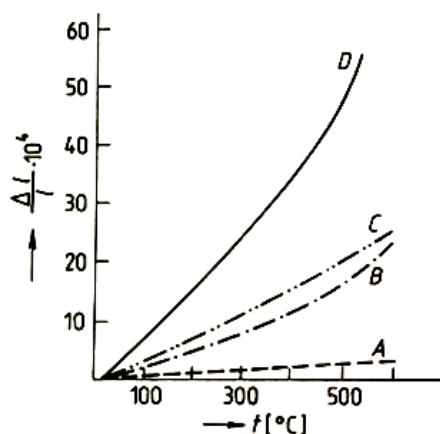
obr. 7: Dilatační křivka sodnovápenatého skla, dobře vychlazeného [7]

Teplotní rozsah délkové teplotní roztažnosti bývá obvykle definován pro  $\Delta t = 20 - 300$  °C. Pro jiný teplotní rozsah lze provést přepočet. V závislosti na teplotě se mění také součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$ , který je definován až do 500 °C. Přepočet se provádí vztahem

$$\alpha(t_3 - t_4) = 0,54 + [\alpha(t_1 - t_2) - 0,54] \frac{f(t_3, t_4)}{f(t_1, t_2)},$$

kde hodnoty  $f(t_i, t_j)$  jsou určeny vztahem zahrnující vliv součinitelů teplotních roztažností pro určitá rozpětí teplot, hodnota 0,54 je průměrná hodnota  $\alpha$  pro křemičité sklo.[7] Jedná se tedy o zavedení linearizovaného součinitele délkové tepelné roztažnosti v určitém rozmezí teplot tak, aby nebylo nutné používat nelineární vztah uvedený výše.

Dalším faktorem ovlivňujícím teplotní roztažnost je složení skla. Vliv můžeme vidět na zobrazení teplotní závislosti délkové teplotní roztažnosti křemenného skla ve srovnání s některými dalšími běžnými technickými skly, viz obr. 8.



Obr. 1. Délková teplotní roztažnost křemenného skla, v porovnání s technickými skly [29]:  
A – křemenné sklo, B – boritokřemičité sklo Pyrex,  
C – boritokřemičité sklo pro zátav s W, D – sodnovápenaté sklo pro žárovky

obr. 8: Délková teplotní roztažnost v závislosti na složení [7]

Jak vyplývá z obrázku, je teplotní závislost délkové roztažnosti, na rozdíl od křemenného skla, podstatně vyšší u běžných typů technických i užitkových skel. Je to způsobeno pevností vazeb základní struktury skla. Vnesením dalších složek je pevnost vazeb oslabena a teplotní závislost délkové roztažnosti se zvyšuje. Značně tedy závisí na složení skel.

### 3.4.3 Měrné teplo

Množství tepla, které je potřeba k ohřátí určitého množství látky z teploty  $T_1$  na teplotu  $T_2$ , je *tepelná kapacita*. Měrné teplo bylo zavedeno pro množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Vyjadřuje tedy změnu *entalpie*  $H$  s teplotou, při konstantním tlaku  $p$ . V soustavě SI se vyjadřuje v [J/ kg K]. V uvedeném případě jde o *pravé měrné teplo*.

$$c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

Při konstantním objemu  $V$  jde o změnu vnitřní energie  $U$  s teplotou.

$$C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

Měrné teplo charakterizuje průběh procesů výměny tepla při zahřívání či ochlazování skloviny. Proto jej využíváme při technických výpočtech tavících pecí (tepelných bilancí), dále při tvarování, dávkování skloviny a chlazení skla. [7]

K vyjádření vztahu mezi měrným teplem a teplotou vycházíme z rovnice pro pravé měrné teplo a dostáváme vztah

$$dQ = mc_p dt, \quad \text{a po integraci} \quad Q = m \int_{t_1}^{t_2} c_p dt.$$

Dalšími úpravami rovnice dostáváme vztah, pomocí něhož jsme schopni přepočítat obě veličiny (měrné teplo i teplotu), za předpokladu matematického vyjádření průběhu závislosti měrného tepla na teplotě. Množství tepla  $Q$  potřebné k ohřátí skla v širším rozmezí teplot lze tedy vyjádřit pomocí vztahů

$$Q = \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3, \quad (1.1)$$

$$Q = AT + BT^2 + C/T - D, \quad (1.2)$$

$$Q = \frac{at + c_0}{bt + 1} t, \quad (1.3)$$

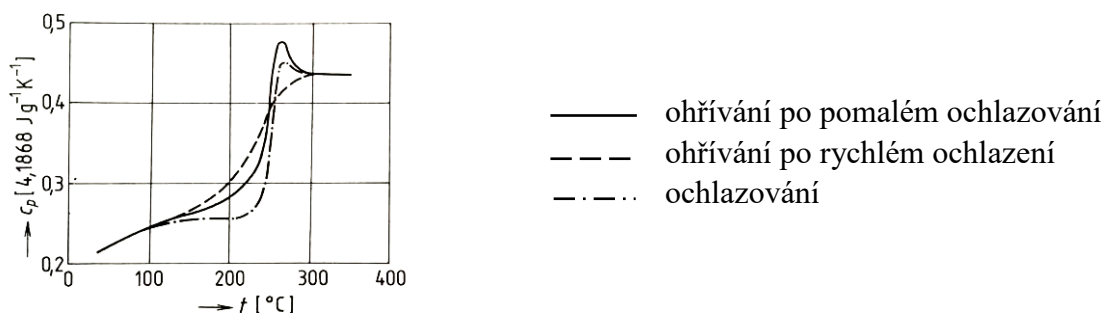
Kde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c_0$  jsou konstanty, charakteristické pro dané sklo,

$t$  - teplota [°C]

$T$  - termodynamická teplota [K]

Vztah (1.1) vyhovuje spíše užším teplotním intervalům, vztahy (1.2) a (1.3.) širokým teplotním rozsahům. Měrné teplo roste se vzrůstající teplotou zpočátku strmě, poté pozvolněji. V oblasti transformačního intervalu pozorujeme anomálii průběhu pravého měrného tepla v závislosti na teplotě, jak je uvedeno na obr. 9.

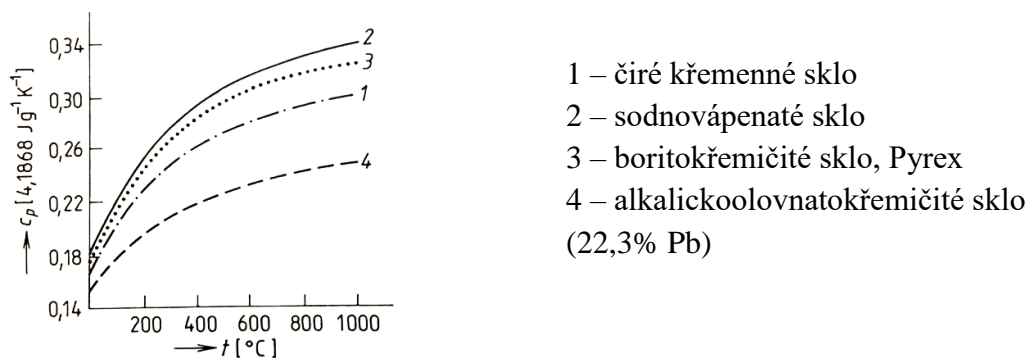




obr. 9: Průběh měrného tepla  $c_p$  v transformačním intervalu [7]

Vzhledem k tomu, že obvykle dochází pouze k částečné krystalizaci (nedochází k homogenní krystalizaci), není průběh měrného tepla v této oblasti teplot jednoznačný a závisí na tepelné historii skla, čase a teplotě zahřívání. [7]

Neopomenutelným vlivným faktorem měrného tepla je složení skla. Na následujícím obrázku můžeme vidět průběhy teplotní závislosti měrného tepla  $c_p$  čirého křemenného skla ve srovnání s průmyslovými skly, viz obr. 10.



obr. 10: Teplotní závislost měrného tepla na složení [7]

V následující Tabulka 3 jsou uvedeny hodnoty pravého měrného tepla čirého křemenného skla.

Tabulka 3: Hodnoty měrného tepla křemenného skla [8]

$t$ [°C]	$c_p$ [J/kg.K]
0	693,7
100	841,5
300	1 025,7
500	1 130,4
700	1 176,5
900	1 210,0
1100	1 230,9
1300	1 323,0
1500	1 419,3
1700	1 473,7

### 3.4.4 Tepelná vodivost

Je-li hustota tepelného toku úměrná teplotnímu gradientu

$$q = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

kde  $q$  - rychlost tepelného toku [J/s]  
 $\frac{dt}{dx}$  - teplotní gradient [K/m]  
 $\lambda$  - konstanta úměrnosti; *tepelná vodivost* [W/mK],

potom tepelná vodivost vyjadřuje množství tepla  $Q$ , které při ustáleném stavu projde za jednotku času  $\tau$  jednotkou plochy  $A$  rovinné stěny při jednotkové tloušťce  $d$  a při jednotkovém teplotním rozdílu  $\Delta T$  protilehlých povrchů. [7]

$$\lambda = \frac{Qd}{A\Delta T\tau}, \quad \text{přítom rozeznáváme:}$$

$\lambda$  - pravou tepelnou vodivost (vedení tepla)  
 $\lambda_r$  - radiační tepelnou vodivost (záření)  
 $\lambda_{op}$  - zjevnou tepelnou vodivost (vedení a záření)  
 $\lambda_{ef}$  - efektivní tepelnou vodivost (vedení, záření, proudění).

Zářivá složka tepelné vodivosti  $\lambda_r$  je při teplotě nižší než 400 °C minimální, pod teplotou 300 °C prostupuje teplo ve sklech pouze vedením. Při vyšších teplotách vzrůstá u bezbarvých skel podíl zářivé složky. Tepelná vodivost je tedy mírou šíření tepla ve skle, ovšem k posouzení, jak rychle se bude sklo ohřívat nebo ochlazovat, je třeba znát jednak *tepelný odpor* při přestupu tepla z prostředí do povrchu skla, a jednak *tepelnou kapacitu* skla.

Opět nesmíme opomenout vliv složení skla na tepelnou vodivost. Čisté křemičité sklo vykazuje nejvyšší tepelnou vodivost ze všech technických skel. Při 20 °C je tepelná vodivost čirého křemenného skla přibližně o 20 % větší než u boritokřemičitých skel a přibližně o 50% větší než u vysokého olovnatého skla (69 % PbO). [7]

Tabulka 4: Tepelná vodivost čirého křemenného skla [8]

teplota [K]	tepelná vodivost $\lambda$ [W/mK]
280	1,329
360	1,450
440	1,564
480	1,662
500	1,650

Za nízkých teplot, tj. přibližně do 300 °C, se ve sklech uplatňuje pouze fononová tepelná vodivost a rozdíly mezi skly různého chemického složení nejsou velké. Vzhledem k tomu, že největší tepelnou vodivost vykazuje křemenné sklo, potom záměnou SiO<sub>2</sub> ve sklech silikátových za jiné oxidy tepelná vodivost klesá. Nejméně klesá při záměně SiO<sub>2</sub> za B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nejvíce při záměně za PbO a alkálie.

Výše uvedené teplotní závislosti jednotlivých veličin, zejména tepelné vodivosti a měrného tepla, tvoří zásadní vstupní data numerického modelu prostupu tepla skleněnou konstrukcí. Jednou

z dalších veličin závislých na teplotě je měrná hmotnost, její změna je s rostoucí teplotou však tak nepatrná, že se jejím podrobným průběhem budu zabývat až v příslušné kapitole 545.4.

### 3.5 Tavení a odtávání skla

Tavení je nejčastější způsob přípravy oxidových skel. Jedná se o vysokoteplotní proces, při kterém z homogenní směsi sklářských surovin nazývané sklářský kmen vzniká sklotvorná tavenina nazývaná sklovina. Pokud se ke sklářskému kmeni ještě přidávají skleněné střepy v obvyklém množství 30-50 hmot.%, pak se tato směs označuje jako vsázka. Teplota tavení závisí na chemické složení skla, které se nejčastěji vyjadřuje v hmotnostních procentech oxidů prvků tvořících dané sklo. Běžné tavicí teploty křemičitých skel se pohybují v rozpětí 1400-1500°C. Základní surovinou křemičitých skel je nejčastěji sklářský písek, kterým se vnáší sklotvorný oxid  $\text{SiO}_2$ . Surovinami znělec nebo živec se vnáší podmíněně sklotvorný oxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tavicí teplota se snižuje surovinami, které vnášejí do skla oxidy tzv. modifikátorů. Jedná se zejména o suroviny:

- soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) – vnáší se  $\text{Na}_2\text{O}$
- vápenec ( $\text{CaCO}_3$ ) – vnáší  $\text{CaO}$
- dolomit ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) – vnáší  $\text{MgO}$  a  $\text{CaO}$  [15]

Další důležitou složkou je čeřivo, které odstraňuje bubliny ze skloviny, jež vznikají rozkladem uhličitánů nebo uzavřením vzduchu během natavování surovin. Tento proces se nazývá čeření skloviny. Pro čeření obalových a plochých skel se jako čeřivo používá síran sodný  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , který vnáší do skloviny anionty  $\text{SO}_4^{2-}$ . Tyto anionty se ve sklovině při teplotách nad 1400 °C rozkládají na  $\text{SO}_2$  a  $\text{O}_2$ . Tyto plyny pak difundují do malých bublin, zvětšují jejich objem a bubliny pak rychleji stoupají k hladině.

V technologii skla se tavicí proces dělí na tři na sebe navazující procesy:

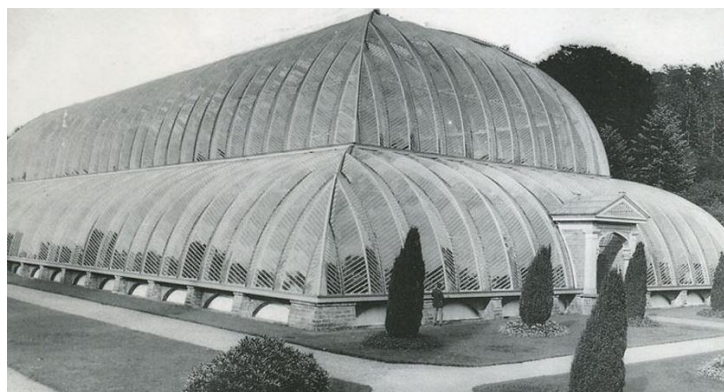
- tavení – během zahřívání dochází nejprve ke vzájemné reakci pevných surovin a jejich rozkladu. Vzniká alkalická tavenina, se kterou pevné částice reagují a rozpouštějí se v ní. Jako poslední se rozpouštějí částice oxidu  $\text{SiO}_2$ . Proces vlastního tavení končí rozpuštěním všech pevných částic.
- čeření a homogenizace – tyto procesy probíhají současně při dosažení maximální teploty tavení, kdy je viskozita skloviny nejnižší. Během čeření se sklovina přesytí plyny vznikajícími rozkladem čeřiva (např.  $\text{SO}_2$  a  $\text{O}_2$ ), které difundují do malých bublin, zvětšují jejich objem a tak urychlují jejich odstranění z taveniny. Při homogenizaci se vyrovnávají koncentrační gradienty v tavenině procesem difúze a rovněž konvekčním prouděním skloviny.
- sejítí skloviny na pracovní teplotu – snížením teploty nastane zvýšení viskozity skloviny na hodnotu, která je vhodná pro následné tvarování skloviny. [15]

Téma tavení a odtávání skla je také nedílnou součástí výzkumu v rámci této diplomové práce. Numerický model prostupu tepla bude totiž zohledňovat reálné chování skla při požáru, ke kterému odtávání neodmyslitelně patří. Výzkum tavení skla není zřejmě tak rozsáhlý pro stanovení jasné hranice teploty tavení, přesto se několik vědců tímto tématem zabývá.

V květnu roku 2018 proběhlo v Portugalsku světové setkání s názvem Konference na téma architektura a konstrukční uplatnění skla, během kterého byl uveden také příspěvek, jehož předmětem bylo právě tavení různých druhů skel. Jednalo se o článek zaměřený na teorii nekonečného procesu recyklace skla tavením bez ztráty jeho kvality, ve kterém bylo uvedeno několik zajímavých myšlenek. Jednou z hlavních otázek příspěvku bylo, zda je možné tzv. recyklované sklo použít na nosné konstrukce. [16] Přestože jsou výše uvedená zamyšlení nad rámec této diplomové práce, je v článku zmíněno několik zajímavých a podněcujících vět o rozmezí teplot tavení skla, o jejichž tvrzení jsem se opřela při stanovování vstupních hodnot numerického modelu. Je zde samozřejmě zmíněna variabilita složení skel a s tím související možnost snížení či zvýšení teploty tavení. U nejběžnějších křemičitých skel se teplota tavení, tedy fáze, kdy už se pevné sklo mění v tekutou sklovitou hmotu, pohybuje od teploty cca 860 °C výše v závislosti na složení. [16] V práci je také zmíněn proces změny struktury skla se zvyšující se teplotou, kterou lze u křemičitých skel pozorovat již od teploty cca 570 °C. [16] V rámci tvorby numerického modelu jsem počátek této fáze, kdy se struktura skla mění, určila hodnotou teploty  $T_1$ , která je více popsána v kapitole 5.4.3.

### 3.6 Sklo v současném stavebnictví

Sklo se přeneslo přes období materiálu pouze uměleckého a výplňového do dnešní doby, kdy začíná zaujímat postavení materiálu nosných konstrukcí. Přestože je sklo jako surovina velmi staré, jedná se v současnosti o moderní stavební materiál. Nepřehlédnutelnou výhodou materiálu je jeho průhlednost, a tím láká zejména architekty k jeho použití. Jeho velikou nevýhodou je však jeho křehkost, která musí být technologicky zohledněna. Skleněné prvky jsou náchylné k rozbití a takto poškozené skleněné prvky mají nulovou nosnost. Proto je hlavní prioritou při návrhu nosné konstrukce ze skla to, aby k jejímu poškození nedošlo. Kolapsu konstrukce v tomto případě zabraňuje laminované sklo díky systému jeho složení, viz 2.2.9.

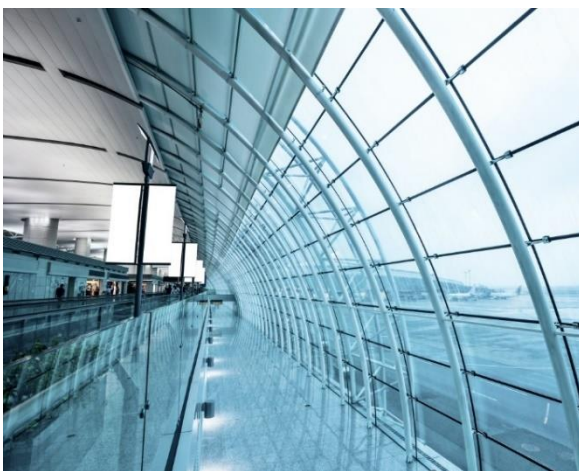


obr. 11: Skleník v Chatsworthu, Velká Británie, 1840 [17]

Moderní historie kultury skla je spjata s počátkem 19. století. Touha po pěstování a růstu exotických rostlin donutila zahradní architektky a inženýry začít budovat větší skleníky a experimentovat s konstrukcemi ze skla a oceli, viz obr. 11. Uvědomění si, že v těchto případech je potřeba uplatnit více skla než oceli, vede k použití skla jako nosného materiálu, a to především ve formě fasádní desky nebo kopulovité struktury. Posílilo tedy spojení funkčního a estetického materiálu. [2]

Nejběžnějším typem skla užívaného na nosné konstrukce je především sodno-vápenato-křemičité sklo vyráběné plavením, které může být během výroby mechanicky upraveno a tepelně nebo chemicky zpevněno. Při aplikaci na stavební konstrukce se většinou nepoužívá jednovrstvé sklo, ale sklo vrstvené, které má lepší mechanické i tepelné vlastnosti. Nejrozšířenější forma je kompaktní tabulové sklo užívané pro zasklívání výplní otvorů – oken a dveří. Kromě kompaktního skla se ve stavebnictví užívá řada výrobků na bázi skla, které mají výborné tepelné izolační vlastnosti, dokáží akumulovat teplo, vylehčovat kompozity atd. vše pod označením technické sklo.

V současnosti již používáme sklo prakticky všude, od výstavby autobusových zastávek po nejvyšší mrakodrapy. Díky neustálým výzkumům máme k dispozici mnoho druhů skel i metod použití pro téměř jakoukoli situaci. Skla s různými optickými, fyzikálními nebo mechanickými vlastnostmi mohou vést k verzi skla, které je zvukotěsné, odolává nárazu kladivem, je protipožární nebo dokonce neprůstřelné. Tato široká škála možností vlastností a spojení dělá ze skla nejen moderní materiál, ale stavební materiál budoucnosti. Pokud mluvíme o skleněných nosných konstrukcích, patří mezi běžné příklady použití skla konstrukce zábradlí, fasádových systémů dokonce i střeš. Štíhlé skleněné nosníky obdélníkového průřezu mohou být dnes využity i jako nosné konstrukční prvky střešních či podlahových konstrukcí nebo jako výztužná žebra skleněných fasád. Stále častěji je v současné architektuře používáno sklo na konstrukční prvky přenášející zatížení nejen vlastní tíhou, ale i sněhem, větrem či užitečné zatížení. [13] Mezi typické příklady skleněných konstrukcí přenášející nejen vlastní zatížení můžeme zařadit např. skleněné panely, trámy, nebo sloupy.



obr. 12: Skleněné průčelí [18]



obr. 13: Skleněná příčka v interiéru [19]

Z hlediska světového významu a možností použití skla moderními a architektonicky zajímavými způsoby je možné se s tematikou seznámit například díky publikaci Facade!.

V letošním vydání se navíc objevil zajímavý článek Chiary Bedon, která se zabývá numerickým modelováním skleněných konstrukcí. Její příspěvek pro mě byl tudíž velmi přínosný a několik jejích podnětů a zkušeností jsem následně promítla do tvorby vlastního numerického modelu přestupu tepla. [20] O jejím výzkumu se budu dále zmiňovat v kapitole 5.3.

Na obrázcích výše je zobrazeno možné použití skla jako součástí nosných konstrukcí, které byly v textu výše již zmíněny. Na obr. 12 je ukázka skleněného průčelí a na obr. 13 je zobrazena skleněná příčka v interiéru.

### 3.7 Skleněné cihly

V následujících podkapitolách se věnuji představení masivních skleněných cihel, které vykazují oproti dutým skleněným tvárnici vyšší pevnost v tlaku (typicky nad 200 MPa), což umožňuje jejich použití jako samostatný nosný komponent. Předpoklad použití skleněného prvku jako nosného ale vyžaduje mnoho technických podmínek. Jedná se o požadavek na absolutně rovnoměrnou opěrnou plochu bez jakýchkoliv nerovností, které by mohly vyvolat vysoké lokální napětí na těchto nerovnostech a tudíž způsobit lokální prasknutí prvku.

Tabulka 5: Vlastnosti skleněných cihel Vetropieno [21]

Základní elementy pro výpočty a verifikaci skleněných konstrukcí z tvárnice Vetropieno		
Fyzikální a mechanické vlastnosti:		
Modul elasticity	760	kg/cm <sup>2</sup>
Poissonův koeficient	0,2	-
Objemová hmotnost	2500	kg/m <sup>3</sup>
Tvrдость	6	-
Koeficient roztažnosti	0,000007	cm/cm°C

Skleněné cihly mohou být použity pro výstavbu různých druhů konstrukcí stejně jako ostatní skleněné stavební prvky, například z nich může být postaven nosný sloup, zábradlí či dělicí nosná stěna.

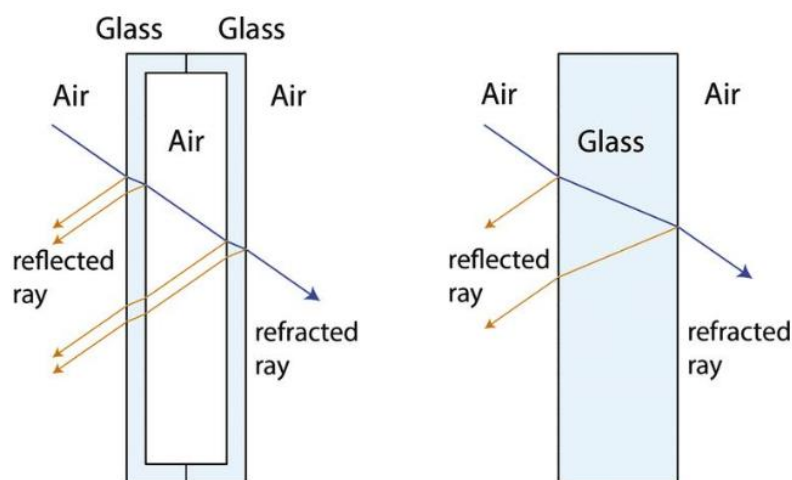
#### 3.7.1 Výroba skleněných cihel

Předmětem mého zájmu v následujícím odstavci je technologie výroby skleněných plných cihel. Jedná se o stavební prvek, který se zatím na území České republiky nevyrobí, veškeré technologické postřehy a postupy jsou tedy převzaty ze zahraniční literatury. V oblasti výroby skleněných cihel je světová produkce koncentrována do několika oblastí, k nám nejbližší se jedná zejména o Itálii (např. Poesia Company).

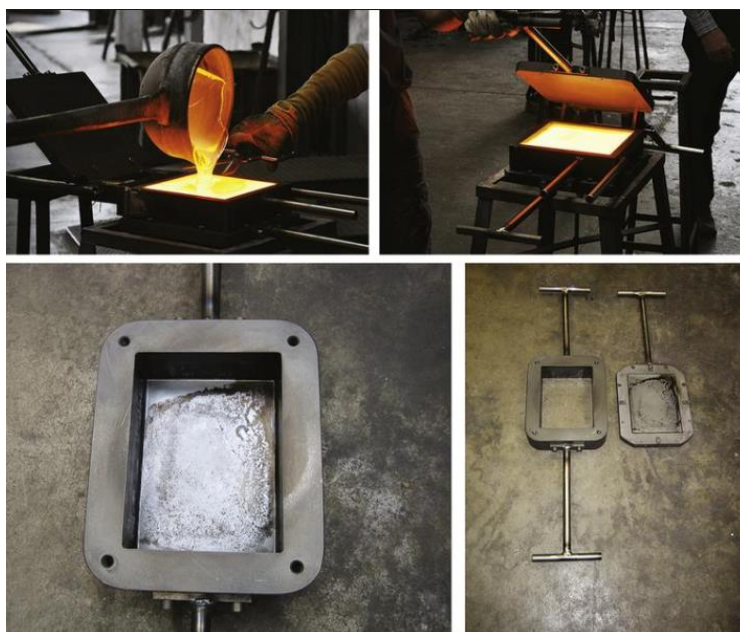
Obecně způsob výroby skleněných plných tvárnice zahrnuje následující kroky: vytvoření substrátu skla pro tváření cihel, příprava skleněného granulovaného materiálu a příprava suspenze skleněné vrstvy. [22] Metoda výroby zahrnuje především smíchání a hnětení připravených surovin a pojiva a poté následuje tvarování této hmoty v předem připravených formách.

Bloky, resp. cihly, z masivního skla se vyrábějí nalitím tekutého skla do ocelových forem. Každý blok se poté kontrolovaně ochlazuje po dobu několika hodin, tato doba je závislá na velikosti daného prvku, aby nedošlo k prasklinám způsobeným nerovnoměrnými teplotami mezi povrchem a jádrem cihly. Toto pomalé kontrolované chladnutí také zabraňuje vzniku vnitřního pnutí v blocích. [23]

Ve srovnání s dutými skleněnými tvárnici mají tyto plné skleněné bloky podobnou průhlednost, ale způsobují podstatně méně optického zkreslení. Jejich monolitická hmota má konstantní refrakční index, který vede k přeměrování světelných paprsků pouze na obou vnějších površích, a tím způsobuje menší zkreslení objektů promítaných za nimi (viz obr. 14). Pevné bloky však mají menší tepelný odpor ve srovnání s těmi dutými. Vzhledem k nižším tepelným izolačním vlastnostem, zřetelně vyšším výrobním nákladům a nestandardnímu výrobnímu procesu jsou skleněné cihly zřídka kdy používány pro stavbu vnějších skleněných stěn. [23]



obr. 14: Průnik světelných paprsků přes dutou a plnou tvárnici [23]



obr. 15: Výroba skleněných tvárnic, firma Poesia Company [23]

### 3.7.2 Spoje skleněných cihel

V následujících odstavcích zmíním několik světových staveb, při jejichž realizaci byly použity právě skleněné cihly. Jelikož se svým způsobem jedná o nový stavební systém, který nemá zažité postupy, každá z následujících staveb je jakýmsi prototypem ve výstavbě. Nejprve zkráceně popíšu možnosti spojů skleněných cihel, respektive již použité postupy při výstavbách zmíněných staveb, k rozboru jednotlivých objektů se dostávám až v následující kapitole 3.8.

Jak již bylo uvedeno dříve v textu, při použití skleněných cihel ve fasádě značných rozměrů je často nutná dodatečná nosná konstrukce. Kromě toho vzhledem k nedostatku standardizovaných strukturálních specifikací a údajů o pevnosti transparentních lepidlech je většina projektů, které používají masivní skleněné cihly, také závislá na užití předpjaté ocelové výztuži, aby se zajistila tuhost, a aby se zabránilo vybočení konstrukce. Tento typ spojování skleněných plných tvárnic byl použit například v případě výstavby Optical House (viz 3.8.4). Jedná o předpjatou vertikální síť z prutů z nerezavějící oceli, na kterou jsou napichovány a šroubovány skleněné bloky s předem vytvořenými otvory. Pro odolnost proti vertikálním silám tyče z nerezavějící oceli též protínají skleněné cihly i ve vertikálním směru v daných intervalech. Spoj v tomto případě neobsahuje použití jakékoliv malty. O podobný princip ztužení konstrukce se jedná i v případě Korunní fontány (viz 3.8.3), kde se nerezový rám skládá z T-profilů a tvoří tak vnitřní strukturu skleněné stěny. [4]

Nicméně k dosažení zcela transparentního vzhledu skleněné stěny je potřeba se vyhnout neprůhledným výztužným prvkům. Jediným způsobem, jak tohoto výsledku docílit, je použití transparentního lepidla nebo malty. Zvolená malta nebo lepidlo by měly být odolné a nabízet krátkodobou a dlouhodobou pevnost vazby a stlačitelnosti. To zajistí chování skleněné zděné stěny jako celku vůči zatížení. Přesto, že je v mnoha případech dosaženo dostatečně tuhého zděného systému, může být nevyztužená skleněná stěna náchylná k deformaci v důsledku vlastního zatížení nebo ohybu mimo rovinu, např. povětrnostní vlivy. Bez použití ocelových rámců v konstrukci lze tento problém vyřešit pouze geometrií konstrukce. Jako příklad je uvedena stavba Atocha Memorial v Madridu (viz 3.8.1), v jejímž případě jsou skleněné masivní tvárnice spojované transparentním UV-vytvrzovacím lepidlem do tvaru válcovité trubky, který výrazně přispívá k tuhosti konstrukce, čímž eliminuje nutnost užití ocelových prvků. [23] Obdobný postup spojování skleněných cihel je aplikován i v případě Crystal Houses (viz 3.8.2), v tomto případě se však nejedná o válcovitou stavbu.

Lepidla, která vyhovují požadavkům na použití v takovéto skleněné konstrukci jsou jednokomponentní a transparentní UV-modifikované akryláty, určené výhradně pro spojování skel. Toto lepidlo je fotokatalyticky vytvrzené a po vytvrzení se stává odolným proti vlhkosti a vodě. Specifické lepidlo dosáhne své optimální pevnosti, pokud je aplikováno ve vrstvě o tloušťce přibližně 0,1 až 0,3 mm.

Důležitou informací při použití akrylátového lepidla je fakt, že nerovnosti na povrchu skleněných bloků mohou mít za následek nerovné roztírání lepidla, které ovlivní nosnost stěny vytvořením slabých míst, jelikož tloušťka vrstvy lepidla zásadně ovlivňuje smykovou pevnost lepidla a tím i jeho účinnost. Aby bylo dosaženo nejvýhodnější strukturální kapacity, musí být



skleněné tvárnice vyrobeny s velmi vysokou rozměrovou přesností, aby bylo zajištěno rovnoměrné a tenké rozložení lepidla. Základním rozdílem mezi tímto lepícím systémem a běžným maltovým systémem je, že malta umožňuje vyrovnání rozměrů cihel, zatímco lepidlo toto neumožňuje. [23]

Výše popsané případy spojování skleněných tvárnic v konstrukci ukazují, že pro samonosné a kompletně průhledné fasády ze skleněných bloků je nutné nejprve použít skleněné cihly, které nevyžadují další opěrné prvky, a za druhé aplikovat průhledné pojivo pro fixaci a stabilizaci bloků, to vše užitě vzhledem k použité geometrii konstrukce, která hraje zásadní roli v celkové strukturální výkonnosti.

### 3.8 Užití zdiva ze skleněných plných cihel

Nové technologie a materiály nachází využití také v oblasti zděných staveb. Jak bylo zmíněno výše, sklo rozšiřuje své uplatnění na poli návrhu nosných konstrukcí. Jedná se o nosníky, sloupy, pilíře a také o zděné konstrukce. Ukázka plné skleněné cihly je na obr. 16. V tomto případě se jedná o 3,5 kg těžkou cihlu čiré barvy o rozměrech 53 mm x 240 mm x 117 mm (v x š x tl), kterou vyrábí a prodává firma SEVES GLASS BLOCK pod názvem Vetropiento. Na trhu jsou také k dispozici skleněné cihly polovičních rozměrů, které se vyrábějí rozříznutím celých skleněných cihel. Rozměr poloviční cihly je tudíž 53 mm x 120 mm x 117 mm (v x š x tl). Obě velikostní varianty jsou také dostupné v několika barvách: čirá (NEUTRO), modrá (BLU), hnědá (SIENA) a šedá (NORDICA). [21] V následujících podkapitolách budou zmíněny vybrané stavby, které využívají skleněných plných cihel jako nosných zdících prvků. [24]

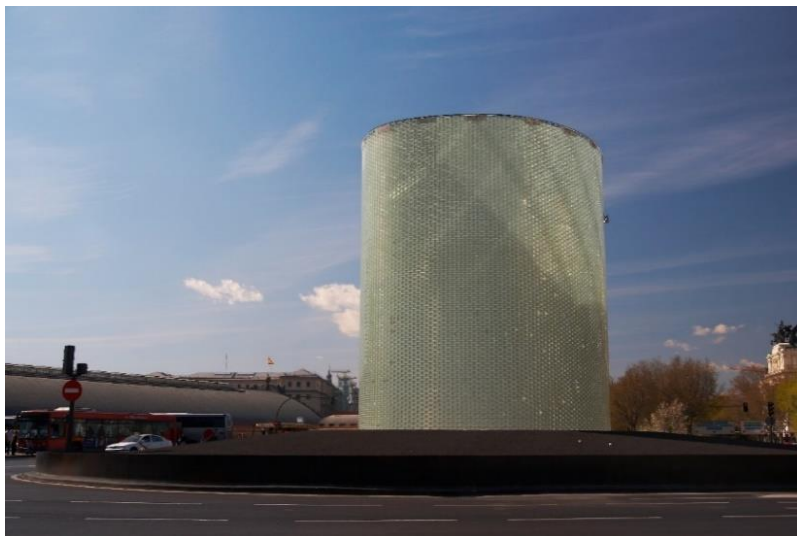


obr. 16: Skleněná cihla [21]

#### 3.8.1 Atocha Monument Madrid

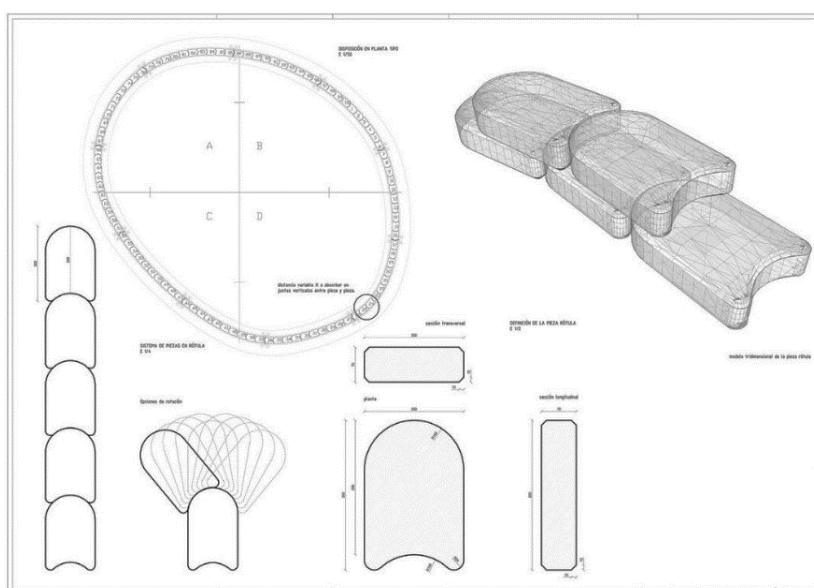
Stavba slouží jako památník, který byl odhalen v březnu roku 2007 ke třetímu výročí teroristického útoku ve Španělsku. Vzhledově se jedná o skleněný cylindr oválného tvaru, který váží celkem 140 tun, je 11 metrů vysoký a má průměr 8 až 10,5 metrů. Monument se skládá ze dvou částí, skleněného válce a podzemní prezentační místnosti. Nadzemní část stavby je zhotovena z 15 100 zakřivených plných skleněných bloků vzájemně slepených tekutou akrylátovou hmotou, která byla vytvrzena ultrafialovými lampami. Střešní část památníku tvoří 5 skleněných trámů o délce 8,5 metrů, které podpírají 12 skleněných krycích desek. Na vnitřní stěně věže je umístěna ETFE membrána potíštěná zprávami od truchlících, pro zajištění stability folie je v prostorách

stavby udržován trvalý přetlak. [25] Zmíněnou nadzemní skleněnou část monumentu můžeme vidět na obr. 17.



obr. 17: Atocha Monument [25]

Z hlediska technologie výstavby zde byly poprvé užity masivní skleněné bloky bez nutnosti spojení mechanickými prvky. Plné tvárnice z boritého skla byly vyrobeny v kulatých tvarech na jedné straně vypuklé a na druhé vyduté. Tento tvar umožnil propojit tvárnice v jednotlivých vrstvách do kruhového tvaru a celkově tak vytvořit válcový tvar pomníku. Tvar tvárnice a technologie výstavby je patrná z obr. 18. Tvárnice samotná váží 8,4 kg, měří 200 x 300 mm a je 70 mm vysoká. Při výrobě padla volba na borité sklo z důvodu malé výsledné rozměrové odchylky a vysoké teplotní stability. Podle požadavků měl materiál také odolávat silnému větru a extrémním změnám počasí v Madridu. Stejně požadavky byly kladeny také na konstrukci ploché střechy, kam byly vyrobeny skleněné desky tloušťky 10 a 12 mm s neobyčejně vysokou světelnou prostupností. Pro zlepšení mechanických vlastností bylo sklo také tepelně vytvrzeno.[25]



obr. 18: Technologie výstavby [25]

### 3.8.2 Crystal Houses

Stavba Crystal Houses se nachází v Amsterdamu v ulici s obchody s luxusním zbožím a slouží jako obchodní dům značky CHANEL, čelní pohled na fasádu můžeme vidět na obr. 19. [26] Na skleněnou konstrukci bylo použito přes 6 500 skleněných cihel o rozměrech 210 x 105 x 65 mm, nejvýše položená skleněná cihla v konstrukci je umístěna 8,8 m nad úrovní okolního terénu. Maximální tolerance délky skleněného prvku byla pouhý +/- 1 mm. [27] Masivní skleněné cihly, které byly použity na výstavbu konstrukce, byly individuálně odlévány a zpracovány poblíž města Benátky. Kvůli citlivosti materiálů byla vyžadována extrémně vysoká úroveň přesnosti a řemeslného zpracování a v průběhu celého procesu byl k dispozici technický odborný vývojový tým. Skleněnou konstrukci doplňuje betonový oblouk, který zajišťuje stabilitu a bezpečnost budovy pro případ nárazu automobilu do budovy. Navzdory křehkému vzhledu mechanické zkoušky týmu Delft University Technology prokázaly, že skleněná konstrukce je v mnoha ohledech pevnější než beton, a že celoskleněná konstrukce by mohla odolat nárazu o síle až 42 kN. [26]



obr. 19: Průčelí Crystal Houses [27]

Výzkum prováděný TU Delft ve spolupráci s inženýrskou firmou ABT a dodavatelem společnosti Wessels Zeist vedl k vývoji strukturálních řešení a výrobních technik s využitím vysoce pevného, transparentního lepidla ke spojení cihel bez potřeby tradiční malty. [26] Pro

zachování neomezené průhlednosti konstrukce bylo tedy hlavním pojivem čiré lepidlo vysoké tuhosti vytvrzené ultrafialovým zářením. Technologii stavby a užití UV záření lze vidět na obr. 20. Experimentální analýzou bylo dokázáno, že ideálních výsledků je dosaženo, pokud se lepidlo aplikuje ve vrstvě tloušťky 0,2-0,3 mm. Jedná se o první zcela průhlednou samonosnou skleněnou fasádu. Lepidlem byly spojeny pouze horizontální spoje, vertikální spoje byly ponechány bez pojiva a umožňují vyrovnání teplotních roztažností. [27]

Vývoj nových stavebních postupů také odhalil další možnosti pro budoucí výstavbu v oblasti minimalizace odpadních materiálů. Skleněné prvky jsou totiž zcela recyklovatelné. Nedokonalé cihly byly roztaveny a znovu vytvarovány pro opětovné použití materiálu. [26] Na rozdíl od Atocha Memorial byly ke stavbě skleněné konstrukce Crystal Houses užity cihly ze sodno-vápenatého skla, které vyžadují výrazně nižší pracovní teplotu než borosilikáty - o cca 200 °C. Nevýhodou tohoto materiálu byl vyšší koeficient teplotní roztažnosti ( $9,1-9,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) oproti borosilikátovému sklu ( $3,2-4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ). Tato vlastnost byla ale upřednostněna pro dosažení přesnějšího tvaru cihly s minimální možností odchylek. Další nevýhodou, kterou bylo nutno respektovat, byla dlouhá doba kontrolovaného chladnutí prvků, a to až 38 hodin. Jako finální kontrola skleněných cihel byla provedena kvalitativní analýza pomocí polarizovaného zdroje bílého světla a zkřížené polarizované fólie, která blokuje přenos světla, pro odstranění cihel s vyšším vnitřním pnutím, které vykazovaly optickou anizotropii. [27]



obr. 20: Technologie spojování skleněných cihel [27]

### 3.8.3 Crown Fountain

Další stavbou posouvající hranice nových technologií a užití skla jako stavebního materiálu je Crown Fountain (Korunní fontána). Fontána se nachází v jihovýchodní části Millenium Parku v Chicagu. Objekt byl navržen jako unikátní místo setkání a reflexe města.

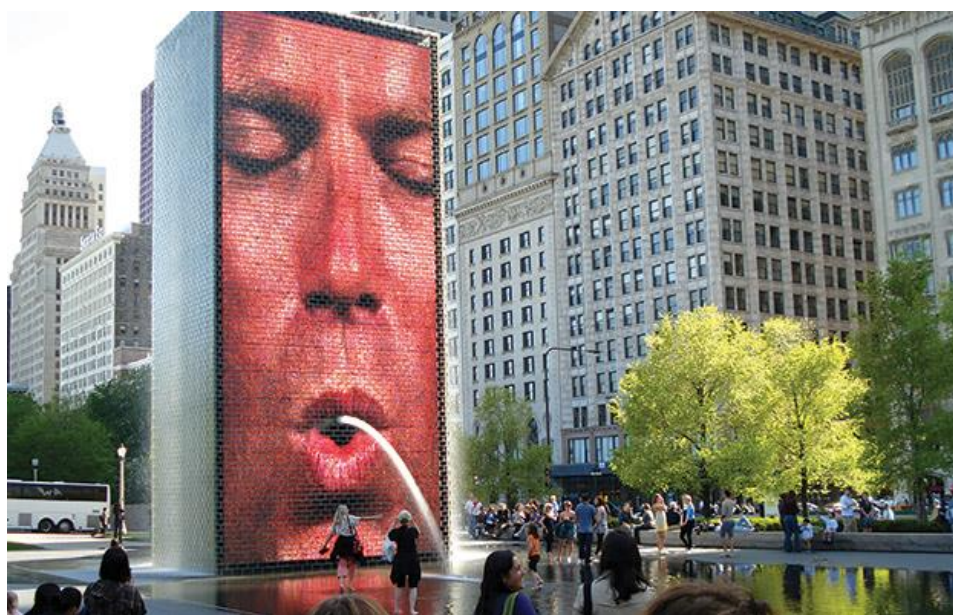
Stavbu tvoří dvě skleněné věže a bazén s půdorysnými rozměry 70,7 x 14,6 metrů. Na obou koncích bazénu jsou umístěny zmíněné skleněné věže výšky 15,2 m. Na stavbu obou věží fontány bylo použito 22 000 kusů skleněných cihel, každá o váze 4,5 kg. Skleněné cihly jsou kotveny v ocelových T-rámech, které jsou vysoké 1,5 metrů a 4,9 – 7 metrů široké, tyto rámy byly navrženy pro přenos vertikálního zatížení do základů. Každá věž se skládá ze 44 těchto ráků a na každý připadá cca 250 kusů cihel. [28] Ocelové rámy na skleněné cihly můžeme vidět na obr. 21.



obr. 21: Ocelové rámy na skleněné cihly [28]

Na vnitřní strany věží jsou promítány obličejové širokého spektra občanů Chicaga v kombinaci s moderní podobou chrliče vody, viz obr. 22. Do každé věže je zabudován speciální kovový rám, který vyrovnává zatížení 15metrových skleněných zdí a zároveň působí jako ztužující konstrukce celého objektu. Boční stabilita konstrukce je zajištěna tyčemi, které rámy kotví k ocelové vnitřní konstrukci, na které jsou umístěny barevné žárovky pro vytvoření obrazu obličejové. Díky tomu, že jsou cihly dokonale čiré, jsou obličejové vždy barevně autentické a důvěryhodné. [29]

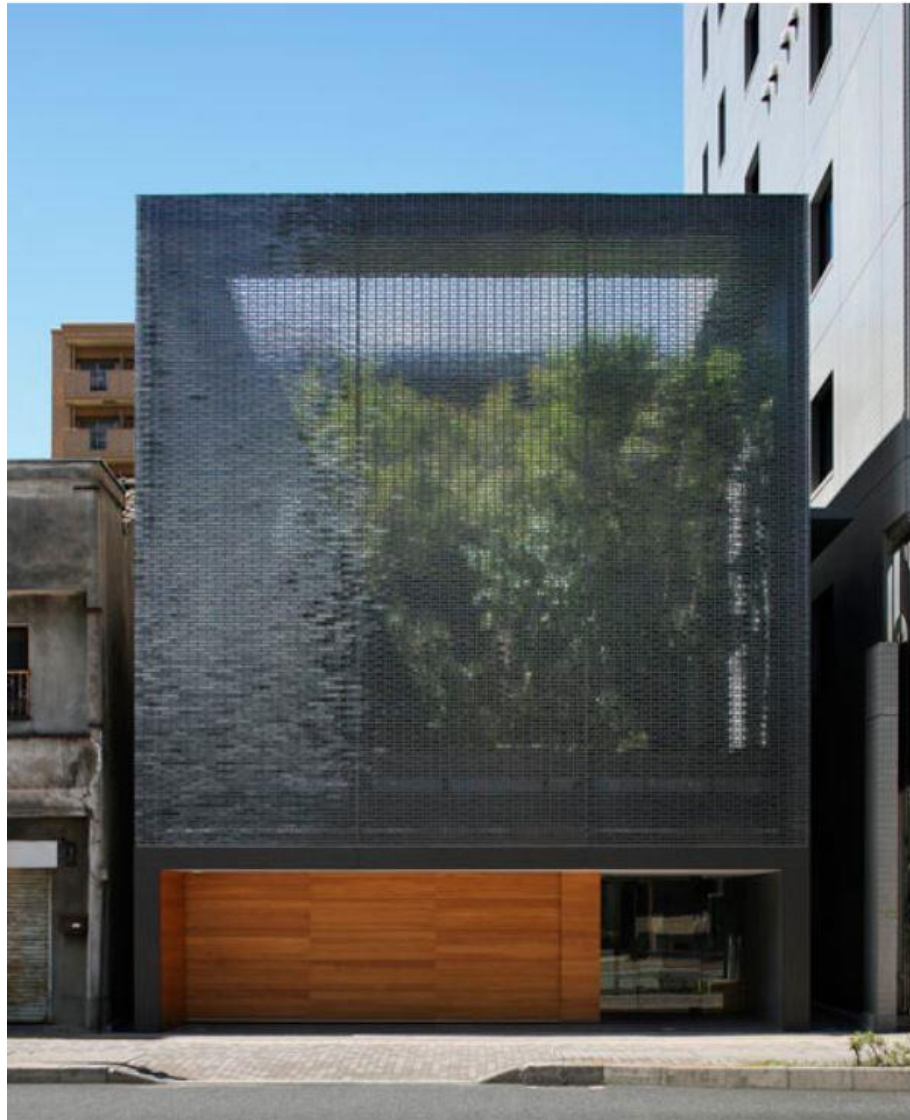
Nedílnou součástí návrhu je voda, která je pumpována, recyklována a rozdělována do vrcholů věží a do jednotlivých chrličů vody. Celá stavba je tedy dokonalou koordinací skla, vody a žárovek.



obr. 22: Obličej na Korunní fontáně [29]

### 3.8.4 Optical glass house

Neobyčejný rodinný dům v centru Hirošimy v Japonsku, který má místo hlavní fasády optickou stěnu propouštějící do domu zejména světlo, hluk z blízké hlavní ulice však zůstává venku. Cílem projektu bylo vytvořit akusticky chráněnou klidnou oázu za krystalovou oponou, která by umožňovala pohled na město, viz obr. 23.



*obr. 23: Pohled na fasádu z ulice [30]*

Zed' je sestavena z 6 000 skleněných zdících prvků s rozměry 50 x 235 x 50 mm, stabilizována a upevněna je pomocí 75 závitových kovových tyčí, viz obr. 24, které jsou zavěšeny na předpjatém nosníku v několika úrovních fasády. Tyto tyče dokonale sladují cihly do perfektních řad. Cihly jsou podpírány kovovými vložkami o rozměrech 40 x 4 mm, jež jsou rozloženy v intervalech 10 cm. Podložky pomáhají ztužovat stěnu proti vodorovným zatížením a také přispívají k těsnění mezi skleněnými bloky. Finálním ztužením konstrukce je betonové zesílení ocelového rámu po obvodu fasády. [31] Celá konstrukce optické stěny váží cca 13 tun a pohledově navozuje efekt vodopádu o ploše 74m<sup>2</sup>. [26]

Cihly jsou opět odlity z borosilikátového skla v otevřených formách. [31] Zdící prvky jsou odlévány v celku, otvory na závitové tyče jsou do nich vyvrtány po přirozeném zchlazení. [30]



*obr. 24: Zdící prvky zavěšené na závitové tyče [31]*

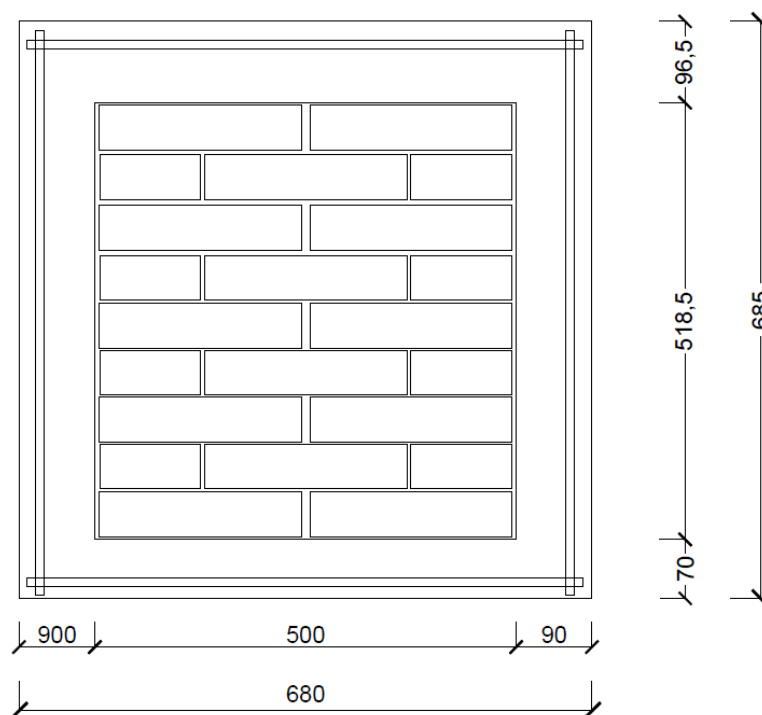
## 4 Experimentální analýza

V následující části diplomové práce je detailně popsána experimentální zkouška, která je jedním ze základních zdrojů informací a dat této práce. Získaná data z experimentu budou v následujících kapitolách sloužit také jako porovnávací a verifikační hodnoty teplot získaných numerickým modelem.

Zmíněná experimentální zkouška požární odolnosti skleněné zděné konstrukce proběhla dne 3.11. 2017 v dopoledních hodinách v Duchcově pod záštitou katedry ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze a firmy Vitrablok, s.r.o.

### 4.1 Popis zkušební konstrukce

Zkoušenou konstrukcí byla stěna o rozměrech 685 mm (výška) x 680 mm (šířka) x 115 mm (tloušťka). Konstrukce vystavená požáru se skládala z nehořlavého tuhého betonového rámu a ze samotného skleněného zdiva. Do konstrukce bylo umístěno celkem 14 celých plných a 8 polovičních skleněných cihel Vetropieno o rozměrech 53 mm x 240 mm x 117 mm (v x š x tl). Vlastní část konstrukce vyzděná skleněnými cihlami zabírala plochu velikosti 518,5 x 500 mm.



60

obr. 25: Schéma zkoušené konstrukce, pohled na neexponovanou stranu

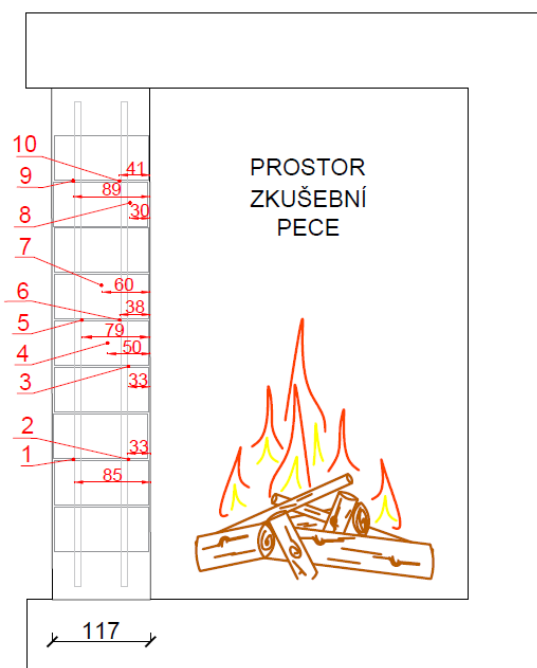
Jednalo se tedy o stěnu z plných skleněných cihel, které byly vzájemně spojeny maltou. Použitá malta se skládala z pojiva (cement, vápno) a kameniva (písek), jedná se o maltu pro spojování skleněných dutých tvarovek (luxfer), jako produkt se prodává pod názvem Vetromalta.



Zděná část konstrukce byla opatřena celkem 19 termočlánky pro získání teplotních dat z experimentu. Termočlánky byly umístěny buď na povrchu konstrukce, který byl odvrácen od požáru, nebo přímo v konstrukci, ve spárách v různých vzdálenostech od povrchu na straně požáru. Pro lepší přehled umístění termočlánků, jejichž data budu dále zpracovávat, slouží následující Tabulka 6 a náčrt na obr. 26:

Tabulka 6: Přehled termočlánků ve zkušební konstrukci

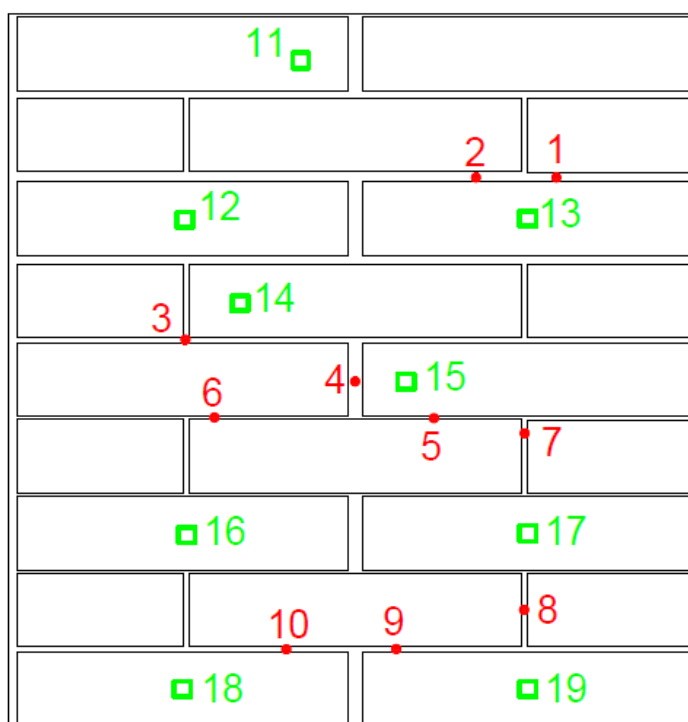
Označení termočlánku	Uložení	Vzdálenost od povrchu u požáru	Poznámka
1	spára	85 mm	-
2	spára	33 mm	-
3	spára	33 mm	-
4	spára	50 mm	-
5	spára	79 mm	-
6	spára	38 mm	chybné měření
7	spára	60 mm	-
8	spára	30 mm	-
9	spára	89 mm	-
10	spára	41 mm	-
11	povrch	117 mm	-
12	povrch	117 mm	-
13	povrch	117 mm	-
14	povrch	117 mm	chybné měření
15	povrch	117 mm	-
16	povrch	117 mm	-
17	povrch	117 mm	-
18	povrch	117 mm	-
19	povrch	117 mm	-



obr. 26: Umístění termočlánků po tloušťce konstrukce

V Tabulka 6 je také zanesen sloupec chybné měření, jelikož už během zkoušky bylo možné pozorovat, že hodnoty některých termočlánků jsou naměřeny chybně. Jedná se o termočlánky 6 a 14, jejichž data po objektivním porovnání s ostatními teplotními průběhy nejsou brána jako použitelná výstupní data pro další použití v rámci této práce. Více o výstupních datech a jejich následnému zpracování se věnuji v následující kapitole 4.3.

Na následujícím nákresu (obr. 27) konstrukce jsou graficky znázorněny termočlánky z obr. 26, nyní však při pohledu na neexponovanou stranu konstrukce. Červeně znázorněné plášťové termočlánky typu K jsou umístěny ve spárách konstrukce v různých vzdálenostech od exponovaného povrchu, zatímco zeleně označené deskové termočlánky byly umístěny na povrchu konstrukce.



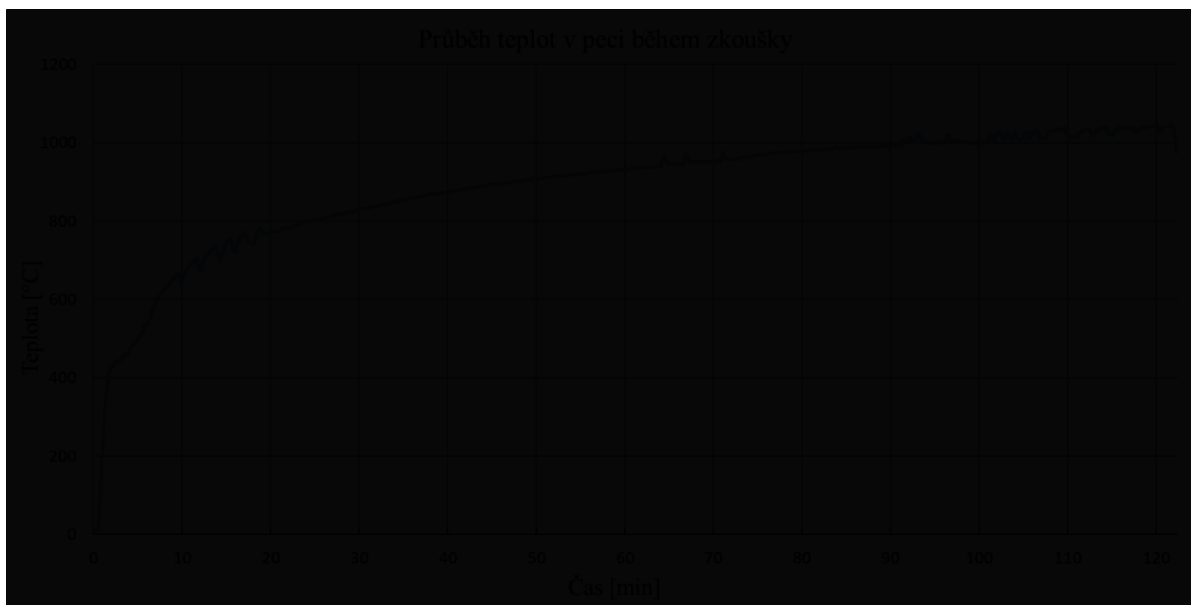
obr. 27: Schéma umístění termočlánků z pohledu

## 4.2 Průběh zkoušky

Zkouška proběhla dne 3.11.2017 v Duchcově ve spolupráci katedry ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze a firmy Vitrablok. Zkoušená konstrukce byla vystavena požáru, jehož reálný teplotní průběh je zobrazen na obr. 28. Vlastní zkouška začala v 10:30 hodin dopoledne a skončila v 12:35 odpoledne. Průběhy teplot pomocí termočlánků byly tedy měřeny po dobu celých 125 minut. Teplota venkovního okolního vzduchu před začátkem zkoušky byla naměřena na 10,8 °C. Na obr. 29 a obr. 30 jsou fotografie z průběhu zkoušky.

V rámci zkoušky byla teplota požáru regulována tak, aby to nejpřesněji odpovídala normové teplotní křivce ISO 834. Data k vytvoření grafu na obr. 28 byla získána od společnosti Vitrablok, s.r.o. Během zkoušky byla data z termočlánků zaznamenávána pomocí dataloggeru.

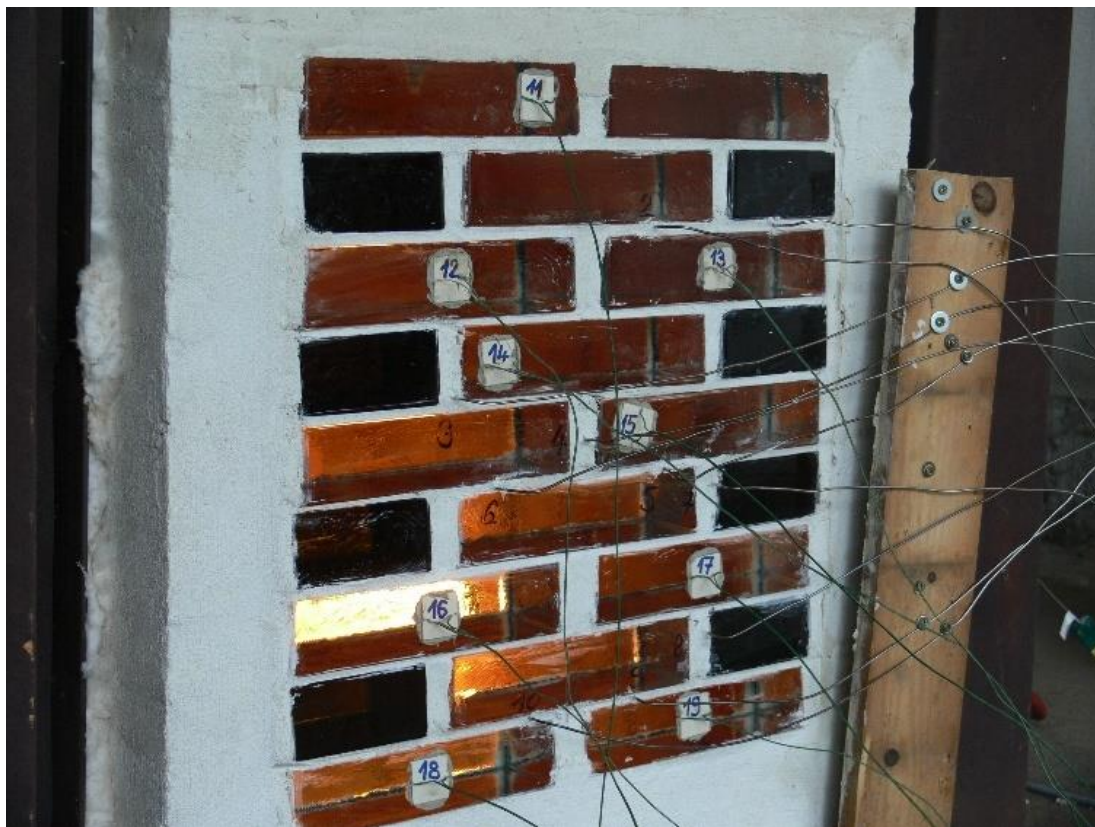
Ráda bych ale ještě zmínila, že jsem měla možnost získat snímky konstrukce ze strany požáru po úplném vychladnutí pece, které mi následně pomohly zejména pro regulaci reálného odtávání skla konstrukce při tvoření numerického modelu. Fotografie z vnitřní strany konstrukce je na obr. 31.



*obr. 28: Teplotní průběh požáru během zkoušky*



*obr. 29: Zkušební konstrukce během zkoušky [32]*



*obr. 30: Pohled na konstrukci během zkoušky, detailní pohled na termočlánky [32]*



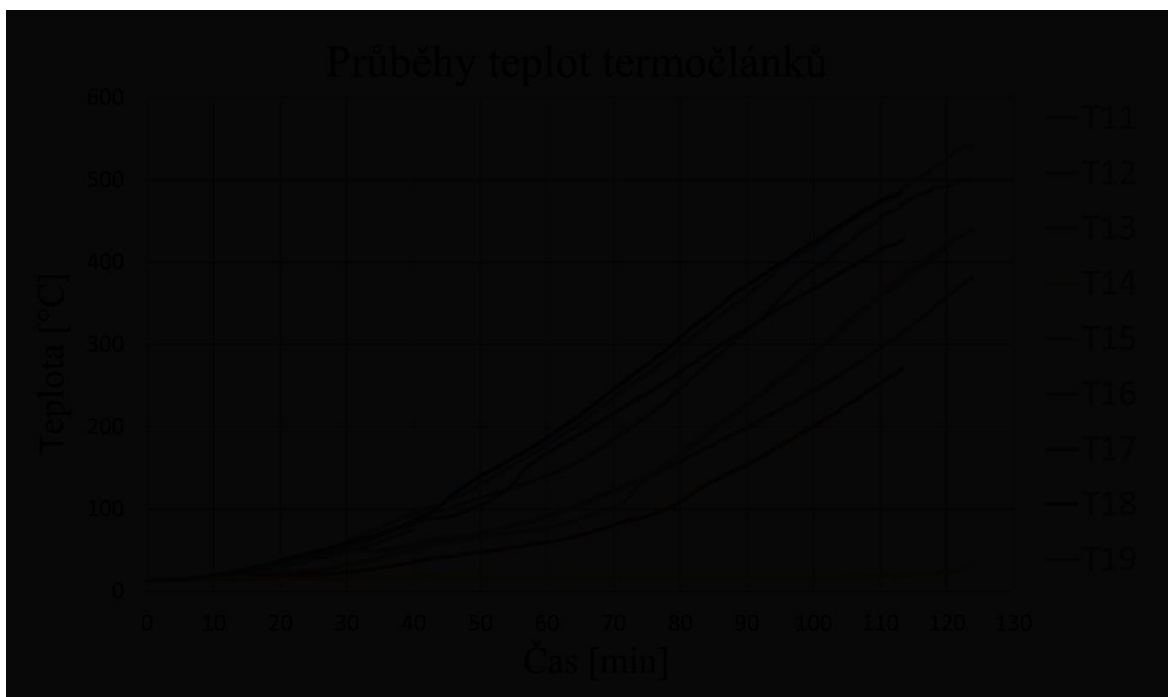
*obr. 31: Detail stěny z vnitřní strany po požární zkoušce [32]*

Závěrem k této kapitole bych jen zmínila několik situací, které během zkoušky nastaly. Jedná se především o začínající únik vodní páry ze spár konstrukce ve 23. minutě požáru a také o fakt, že po 73. minutě zkoušky začala skleněná cihla v pravém dolním rohu (umístěn termočlánek 19) masivněji praskat. V průběhu celého experimentu docházelo k mírnému praskání skleněných cihel, avšak tyto praskliny ani jiné skutečnosti nevedly k porušení celistvosti po celou dobu zkoušky.

Z popisu průběhu zkoušky je patrné, že spáry ve stěně jsou možná slabá místa konstrukce, v mém případě zejména z pohledu požární odolnosti, tj. z hlediska kritéria EI. Mým prioritním předmětem zájmu je však izolační schopnost konstrukce, tedy samotné kritérium I. Toto kritérium je definováno maximálním rozdílem teplot na površích konstrukce, a navíc maximální teplotou na odvráceném povrchu od požáru. Jelikož povrchové termočlánky jsou umístěny vždy pouze na povrchu skleněné cihly, nebudu se dále vlivem a funkcí maltových spár v této práci zabývat.

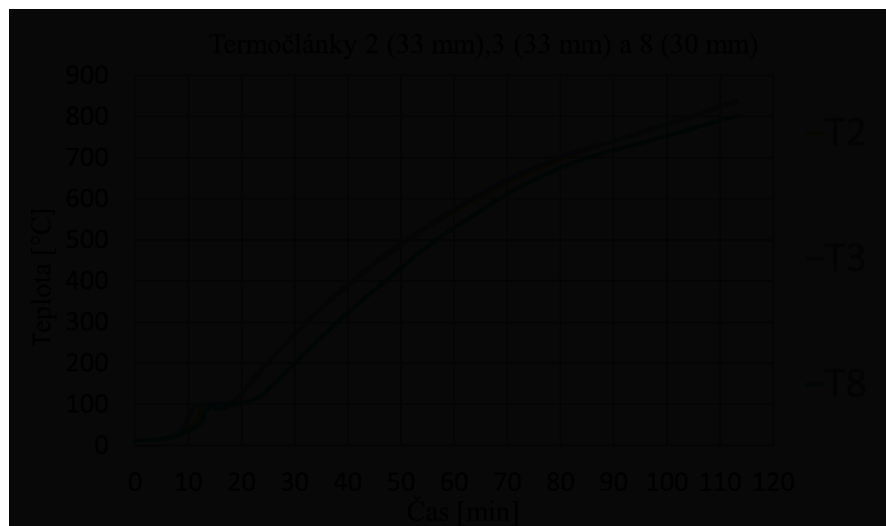
### 4.3 Data získaná z experimentu

Výstupními daty ze zkoušky jsou teplotní průběhy v místech termočláneků. Na obr. 32 je znázorněn graf se všemi teplotními průběhy termočláneků, které byly umístěny na neexponované straně konstrukce. Jednotlivé křivky jsou barevně odlišeny a je jim přiřazeno číslo odpovídající termočlátku dle nákresů na obr. 26 a obr. 27.

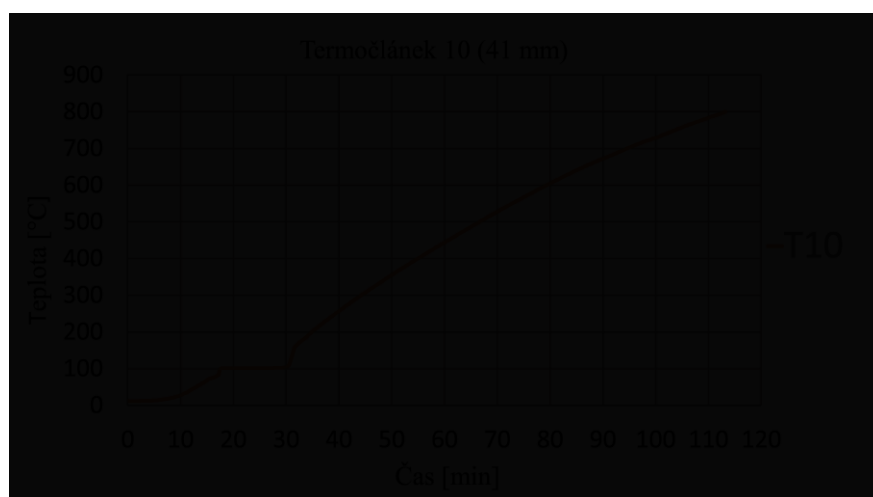


obr. 32: Průběhy teplot z termočláneků na povrchu skleněné konstrukce [33]

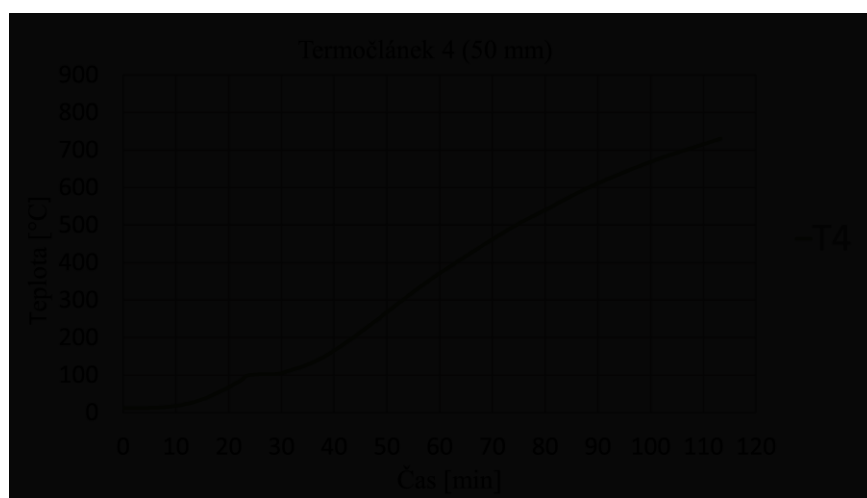
Kromě povrchových teplot byly naměřeny také teplotní průběhy po tloušťce konstrukce díky termočlámkům umístěným ve spárách. Jedná se celkem o 10 vnitřních termočláneků, jejich výsledky jsem rozdělila do několika skupin podle umístění v konstrukci. V popisu je u každého termočlátku uvedena vzdálenost v milimetrech od vnitřní strany konstrukce vystavené požáru.



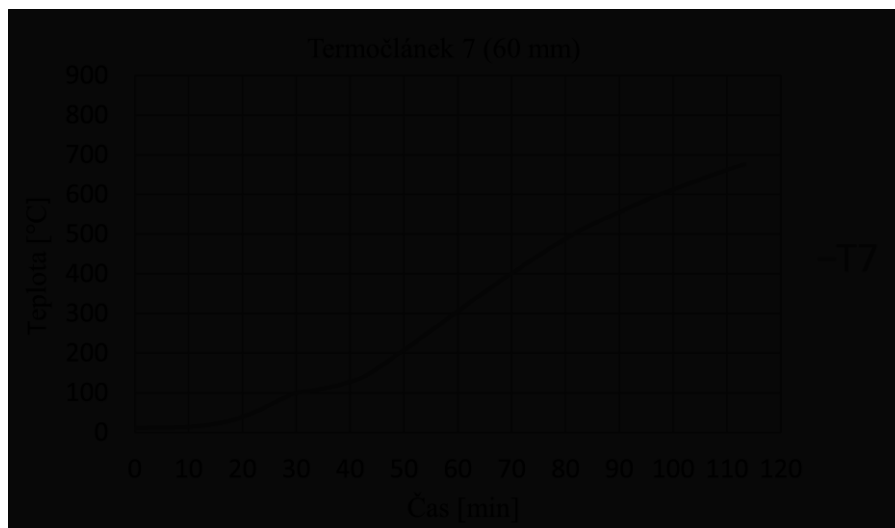
obr. 33: Teplotní průběhy termočlánků 2, 3 a 8 [33]



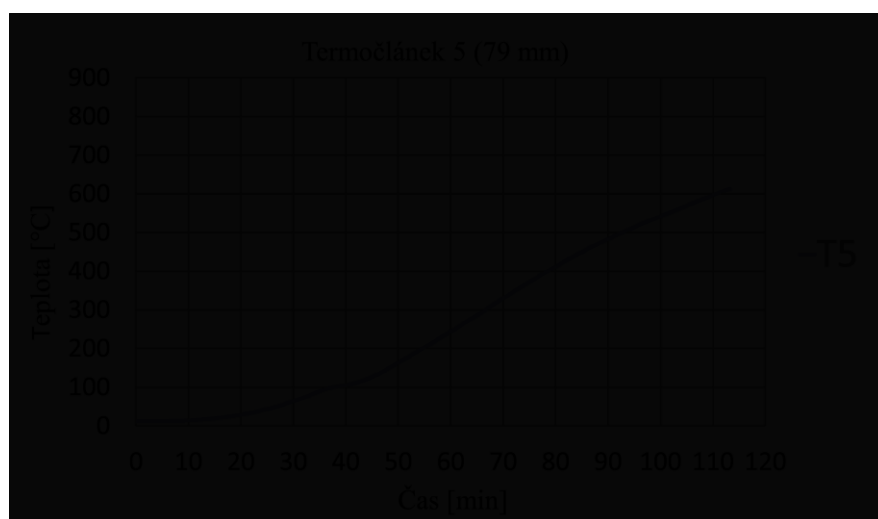
obr. 34: Teplotní průběhy termočlánku 10 [33]



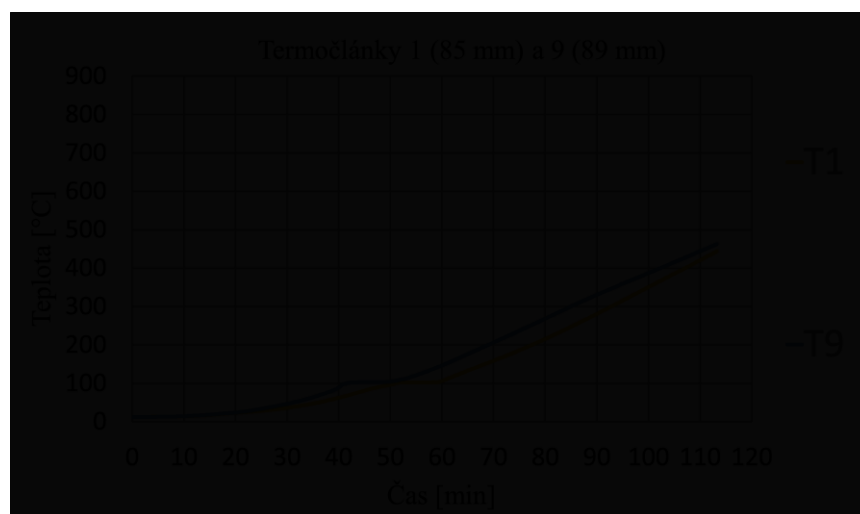
obr. 35: Teplotní průběh termočlánku 4 [33]



obr. 36: Teplotní průběh termočláнку 7 [33]



obr. 37: Teplotní průběh termočláнку 5 [33]



obr. 38: Teplotní průběhy termočláneků 1 a 9 [33]

Na výše zobrazených průbězích teplot termočlánků umístěných ve spárách si můžeme všimnout, že kolem teploty 100 °C se v teplotních průbězích pravidelně vyskytuje zpomalení nárůstu teplot, v některých případech až k jeho chvilkovému zastavení. S nejvyšší pravděpodobností se jedná o časový úsek, během kterého se vypařuje vázaná voda v maltě. Uvolnění vody tedy způsobí dočasné zastavení růstu teploty, a tudíž snižuje nárůst teplot termočlánku. Tento jev u termočlánků umístěných na povrchu stěny nepozorujeme, jelikož zde tento proces neprobíhá a průběhy teplot neovlivňuje.



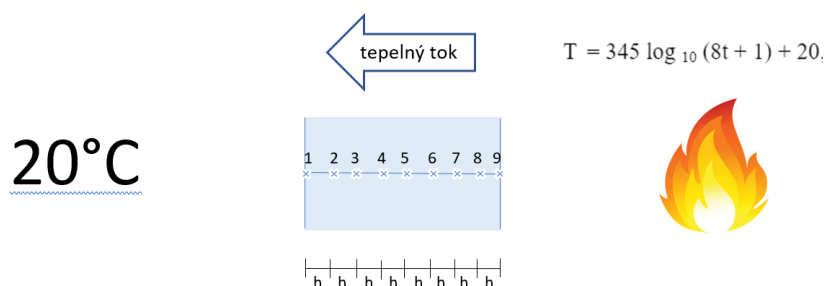
## 5 Numerická analýza

V následujících kapitolách je popsán postup při vytváření numerického modelu, jehož cíle a účel bych ráda nyní specifikovala.

V první řadě mám zájem vytvořit numerický model, který bude popisovat prostup tepla skleněnou konstrukcí při požáru. Jednou z hlavních ambicí modelu je nahrazení náročných reálných požárních zkoušek. Pokud budeme díky modelu schopni popsat reálné teplotní chování v konstrukci a na jejích površích, může být model použit jako nástroj předpovědi teplotních průběhů při požáru. Domnívám se, že v některých nesporných a jednodušších případech by mohl tento model požární zkoušky plně nahradit. K dosažení tohoto cíle je zapotřebí věrné popsání chování skleněných prvků ve stěně.

Nejprve v následujících kapitolách popíšu zvolenou metodu řešení problematiky prostupu tepla, následně prostředí, které jsem si pro modelování zvolila a samozřejmě tvorbu samotného modelu. Vzhledem k tomu, že během procesu vytváření modelu docházelo často k jeho změnám a přizpůsobením, budu v následujících kapitolách popisovat zejména finální verzi vzniklého numerického modelu.

Pro přibližnou představu grafického znázornění řešeného problému je na obr. 39 zachyceno zjednodušené schéma situace.



obr. 39: Schématický popis modelu

### 5.1 Použitá metoda

K výše popsanému zadání problému, který má model řešit, je nutné vybrat vhodnou analytickou metodu. Základem dané problematiky je vedení tepla, které je obecně popsáno následující rovnicí. [34]

$$c_p dV \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + q_z dV$$

Jedná se o parciální diferenciální rovnici druhého řádu ve všech třech rozměrech. Jelikož je problematika řešená diplomovou prací značně jednodušší, stačí použít pouze jednorozměrné rovnice, která je uvedena dále jako parciální diferenciální nehomogenní rovnice. [34]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = f(x, y, z, t)$$

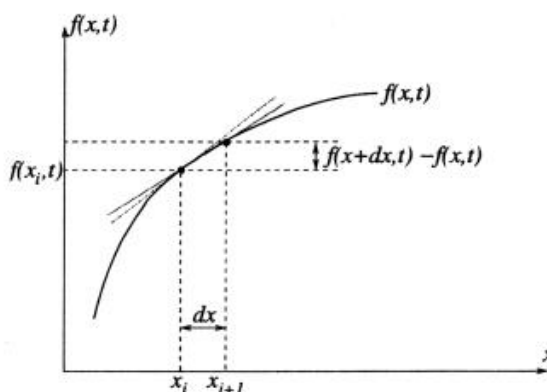
Ve výše uvedené jednorozměrné rovnici vedení tepla mimo derivace vystupují také dvě neznáme. Jedná se o zdroj tepla  $f$ , který je v mém konkrétním případě roven nule, jelikož simuluji situaci, ve které žádný zdroj tepla nefiguruje. V druhé řadě pak koeficient  $\alpha$ , který reprezentuje součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. [34]

Dále je pro výpočet potřeba definovat počáteční a okrajové podmínky na obou površích, které jsou konkrétně řešeny v 5.5. Nyní přichází na řadu zvolení numerické metody, která bude danou problematiku řešit.

Mezi základní numerické metody patří bilanční rovnice, metoda sítí a také metoda konečných prvků. Ve své práci jsem použila zmíněnou metodu sítí, jinak také nazývanou metodu konečných diferencí. Tato metoda je založena na diskretizaci parciálních diferenciálních rovnic popisující daný problém. Rovnici v našem případě tzv. diskretizujeme v čase i prostoru, jedná se totiž o jednorozměrné vedení tepla konstrukcí. Hledáme tedy řešení v konečném množství bodů prostoru a konečném množství časových okamžiků. Pracujeme přímo s parciálními diferenciálními rovnicemi, říkáme, že řešíme tzv. silnou formulaci problému. Opakem je slabá formulace, kdy pracujeme s řešením integrovaným přes plochu prvku – toho využívá metoda konečných prvků. [35]

V případě diskretizace času nahradíme derivace z parciálních diferenciálních rovnic následujícím způsobem:

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \approx \frac{f(x, t + dt) - f(x, t)}{dt}$$



obr. 40: Schéma explicitního algoritmu, dopředná diference [36]

Z matematického hlediska se tedy jedná o nahrazení derivací funkce konečnými diferencemi, neboli rozdíly. Obdobným způsobem jako na obrázku výše můžeme nahradit i derivace druhého řádu, při které využíváme tzv. Taylorova polynomu.

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} \cong \frac{f(x + dx, t) - 2f(x, t) + f(x - dx, t)}{dx^2}$$

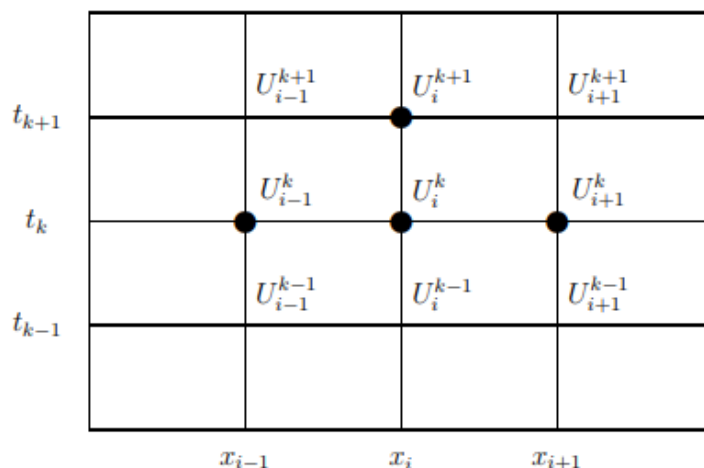
obr. 41: Vztah mezi náhradou diference a druhou derivací [37]

Aplikace metody sítí je v mém případě využita k řešení jednorozměrného vedení tepla skleněnou konstrukcí. Řešení diferenciální rovnice je převedeno na diskrétní řešení ve zvolených bodech – uzlech sítě po tloušťce konstrukce (viz obr. 39). Následně se řeší soustava lineárních rovnic, která v diskrétních časových okamžicích poskytuje teploty v těchto bodech.

Pro tento konkrétní výpočet jsem pro tvorbu modelu použila explicitního schématu metody sítí, resp. používám centrální diferenci pro derivaci podle  $x$  (v mém případě se jedná o umístění po tloušťce konstrukce). Její předpis je dán následující rovnicí. [38]

$$f''(x) \approx \frac{\delta_h^2[f](x)}{h^2} = \frac{f(x + h) - 2f(x) + f(x - h)}{h^2}.$$

Dále se určuje dopředná diference v čase  $t_n$  pro derivaci podle času. Na následujícím obrázku můžeme vidět explicitní schéma soustavy rovnic, které bude v modelu použito.



obr. 42: Grafické schéma explicitního řešení metody sítí [36]

Hlavní výhodou tohoto řešení metody sítí spočívá v určení jediné neznáme v čase  $t_{k+1}$  na základě tří známých hodnot v čase  $t_k$ . Není tedy nutné řešit soustavu rovnic s několika neznámými. Nevýhodou je, že toto schéma je náchylné na použitou kombinaci prostorového a časového kroku. Explicitní schéma totiž konverguje a je numericky stabilní pouze pro  $r < 0,5$ . Písmenem  $r$  je označován koeficient korelace, což je ukazatel míry vztahu dvou metrických proměnných, jejichž vztah je lineární. V mém případě se jedná o tzv. střední koeficient, což mě nutí volit pro malé prostorové kroky  $\Delta x$  sítě zhruba o řád menší časový krok  $\Delta t$ . Proto zvýšení přesnosti výpočtů při použití explicitního schématu vede k prudkému růstu počtu kroků. [37] Obecně se v případě řešení jednorozměrných problémů jedná o velmi stabilní a užívanou metodu.

## 5.2 Výpočetní prostředí

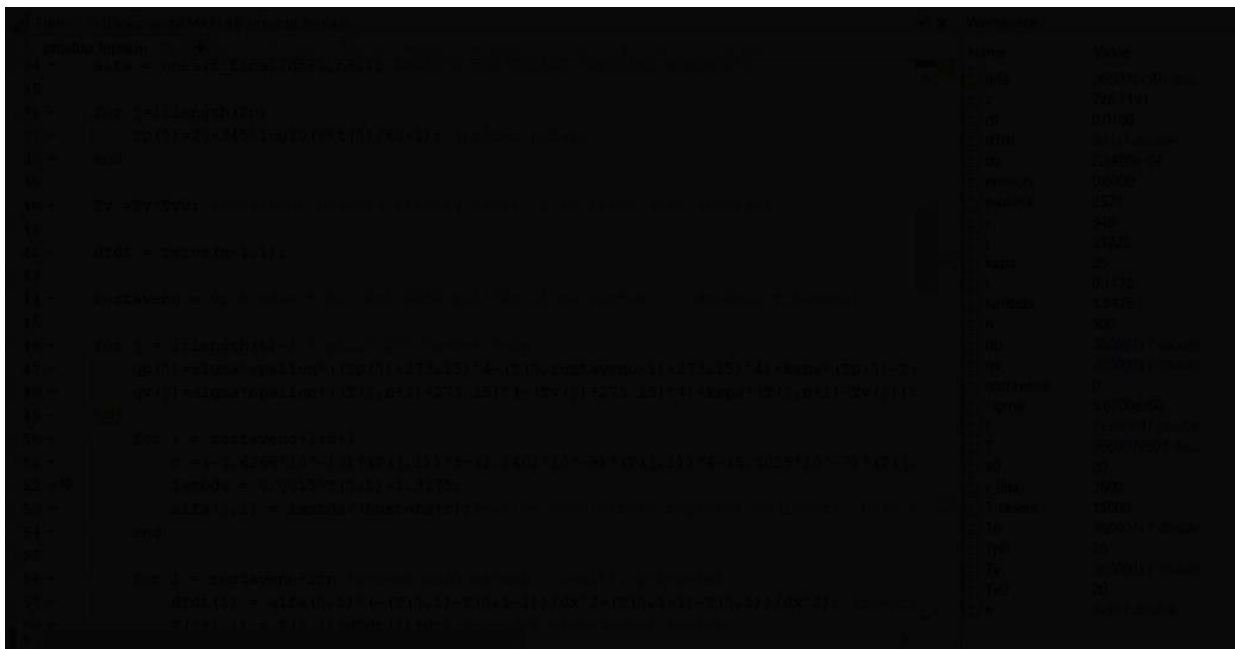
Pro vypracování numerické analýzy jsem si v rámci diplomové práce zvolila software MATLAB. Jedná se o jeden z mnoha softwarů, který je pro studenty ČVUT v Praze v rámci výuky volně přístupný díky studentským licencím.

MATLAB (matrix laboratory) je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. Program MATLAB je vyvíjen společností MathWorks a v březnu 2017 vyšla verze R2017a, která je k dispozici zdarma pro studenty ČVUT v Praze prostřednictvím Výpočetního a informačního centra ČVUT. MATLAB umožňuje počítání s maticemi, vykreslování grafů funkcí, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat i vytváření aplikací včetně uživatelského rozhraní.

Původně byl jazyk určen pro matematické účely, ale časem byl upraven, byly přidány nové funkce a rozšíření, rozrostl se různými směry a dnes je využitelný v široké paletě aplikací. V roce 2004 měl MATLAB přes milión uživatelů, a to především z řad vědeckotechnických pracovníků, studentů a zaměstnanců vysokých škol. MATLAB je využíván pro vědecké a výzkumné účely, a to jak v soukromém sektoru, tak i v akademických řadách.

Hlavní oblastí využití jsou technické obory a ekonomie. Někteří odborníci nepovažují MATLAB za programovací jazyk, jiní o něm zase říkají, že je velice cenným a užitečným programovacím jazykem. [39]

Pro lepší představu o práci se softwarem přikládám na následujícím obrázku fotografii obrazovky při spuštění softwaru.



*obr. 43: Ukázka pracovního prostředí MATLAB R2017a [39]*

### 5.3 Specifikace modelu

Cílem modelu je tedy popsat teplotní chování konstrukce při požáru. Vzhledem k tomu, že model je řešen jako jednorozměrný prostup tepla homogenní konstrukcí, chci v následujících odstavcích popsat myšlenky, které vedly k redukci a zjednodušení reálného modelu konstrukce. Ráda bych vysvětlila, proč jsem přesvědčena, že i takto zjednodušený model může za určitých podmínek věrně popsat teplotní chování konstrukce za požáru.

Prvním velkým rozhodnutím a snahou redukovat výpočetní proces bylo zanedbání spár vyplněných maltou jako spojovací materiál skleněných cihel. Při plošném rozboru konstrukce můžeme povrch stěny rozdělit na plochu skla a plochu spár. Z geometrie stěny je patrné, že plocha skla odpovídá cca 88,3 % pohledové plochy stěny, zatímco spáry zaujímají plochu pouze 11,7 %. Z hlediska plochy tedy spáry tvoří poměrně malou část povrchové plochy stěny, kterou model popisuje. Jednou z dalších úvah zanedbání spár je také částečná podobnost materiálového složení jednotlivých stavebních prvků. Použité skleněné cihly jsou tvořeny cca 74 % křemičitými oxidy, přibližně 10 % oxidy vápenatými, asi 13 % oxidy sodnými a dalšími stopovými prvky. [40]

Jak už bylo zmíněno, přesné složení použité malty není k dispozici, obecně se však skládá z písku, vápna, cementu a vody. Cement a vápno zastupují složku vápenatých oxidů, částečně oxidů křemičitých a také oxidů hlinitých. Písek je ve skutečnosti směs drobných kamínků různého původu, kde rozhodně nebudou výjimkou krystaly křemene, sodíku i hliníku. Samozřejmě se jedná pouze o porovnání základních chemických složek, které jsou v jednotlivých stavebních prvcích konstrukce v různých modifikacích, přesto není jejich podobnost zanedbatelná.

Za zmínku stojí i podobnost několika vlastností obou materiálů, jako je hustota ( $2\,500\text{ kg/m}^3$ ), měrné teplo (cca  $800 - 1\,000\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) a součinitel tepelné vodivosti kolem hodnoty  $1,6\text{ W/m}^2\text{K}$ . Značný rozdíl ve složení shledávám například v obsahu vody v maltě, která se při vyšších teplotách odpařuje, viz průběh teplot ve spárách zjištěný při experimentu.

Touto redukcí se dostáváme k modelování čistě homogenní stěny, kterou v mém případě tvoří materiál skleněných tvárníc Vetropieno. Dalším důvodem, proč usiluji o vytvoření modelu reprezentující pouze skleněný prvek je právě jeho nezávislost na použitém pojivu, které se pro potřeby výstavby může více či méně měnit a ovlivňovat tak chování konstrukce.

Už jsem v práci zmínila, že vytvořený model bude sloužit také jako možná náhrada reálných požárních zkoušek, a to zejména z hlediska izolačního kritéria I. Pro posuzování a hodnocení izolačních schopností konstrukce nebo prvku je stěžejní znalost povrchových teplot. Pro porovnání dat z numerického modelu s reálnou zkouškou máme k dispozici povrchová data pouze z ploch skleněných cihel, což je další důvod zanedbání spár v modelu.

Jak bylo zmíněno v dřívější kapitole v této diplomové práci, díky článku Chiary Bedon v publikaci *Journal of Facade Design and Engineering* jsem mohla čerpat inspiraci z jejich dosavadních výzkumů a zkušeností s numerickým modelováním skleněných konstrukcí. Předmětem zmíněného článku je numerický model konečných prvků monolitického a laminovaného skleněného panelu při zvýšených teplotách. Představuje zde svůj jednorozměrný numerický model prostupu tepla konstrukcí, který pracuje především s veličinami jako jsou měrné

teplo, hustota a tepelná vodivost. [17] Stejně jako já přistupuje k určitým zjednodušením při tvorbě numerického modelu pro jasnější zadání problému.

Nyní je tedy specifikováno, jak numerický model vypadá. V dalších kapitolách je popsáno, jaká vstupní data jsou potřeba k výpočtu, a jeho podrobnější popis.

## 5.4 Vstupní data

Nezbytnou součástí tvorby numerického modelu je zadání a specifikace vstupních hodnot. Pro dostatečné popsání rovnic prostupu tepla konstrukcí byly definovány tyto veličiny.

### 5.4.1 Veličiny nezávislé na teplotě

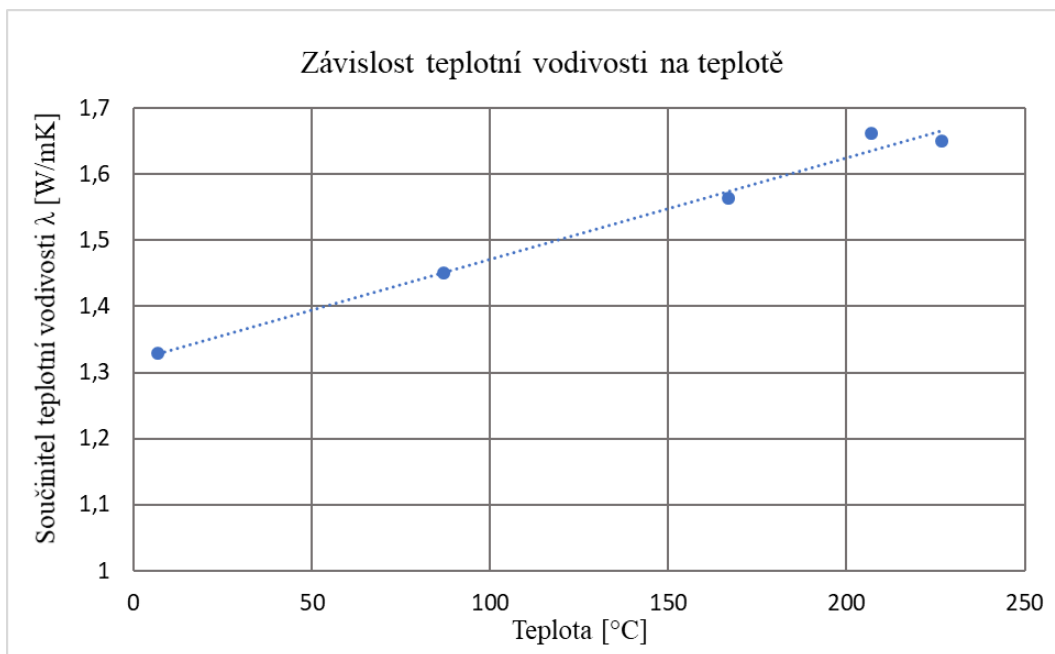
- $L = 0,117$  tloušťka řešené skleněné konstrukce [m]
- $n = 500$  počet výpočetních dílů po tloušťce konstrukce [-]
- $T_0 = 10,8$  počáteční teplota okolního prostředí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_{0,k} = 10,8$  počáteční teplota konstrukce [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $\kappa_1 = 25$  součinitel přestupu tepla vzduch – sklo, pro požár [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
- $\kappa_2 = 3,0$  součinitel přestupu tepla sklo – vzduch, venkovní prostředí [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
- $\varepsilon = 0,89$  emisivita skla [-]
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ]
- $\alpha = 85 \cdot 10^{-8}$  koeficient délkové teplotní roztažnosti [ $1/\text{K}$ ]

Uvedené hodnoty, které nebyly získány vlastním měřením či byly v rámci tvoření modelu zvoleny, jsou převzaty z odborné literatury týkající se dané problematiky. [7]

### 5.4.2 Veličiny závislé na teplotě

- $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
- $c$  měrné teplo [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]
- $\rho$  objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\alpha$  součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

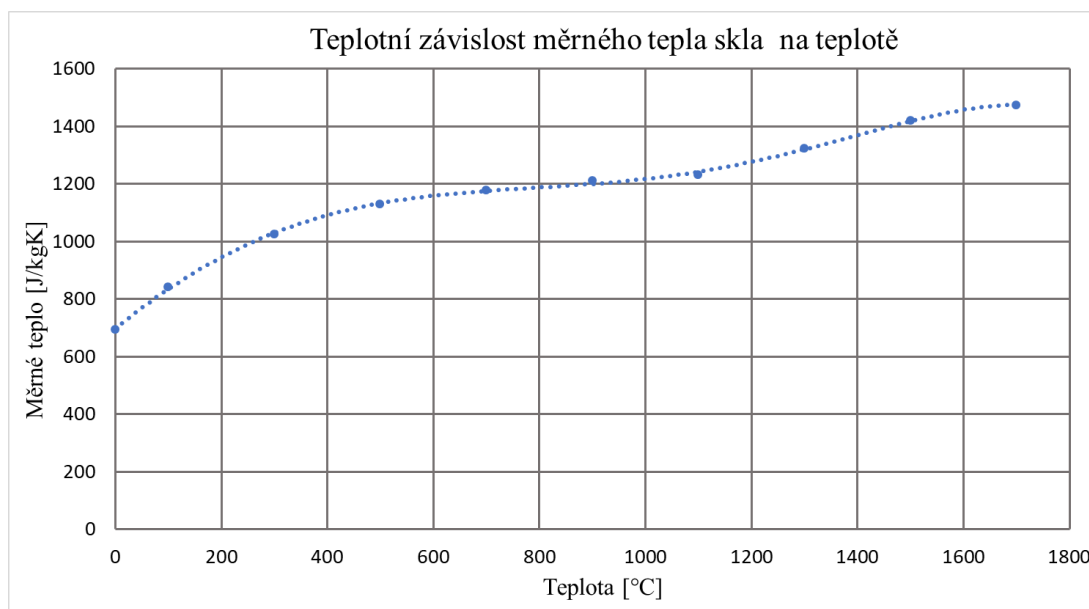
Zmíněné veličiny závislé na teplotě jsou pro tuto práci stěžejní. Závislost tepelné vodivosti na teplotě můžeme vidět na obr. 44. Uvedená křivka však popisuje průběh do teploty cca  $230^{\circ}\text{C}$ . Její graficky znázorněný průběh můžeme popsat pomocí rovnice  $y = 0,0015T + 1,3175$ , pro  $T < 230^{\circ}\text{C}$ . Jak se tato vlastnost skla mění po překročení hranice  $230^{\circ}\text{C}$  není v literatuře popsáno. Tato neznámá oblast se stala předmětem mého zájmu zejména pro simulaci změny tuhosti skla, kterou se budu zabývat dále v textu.



obr. 44: Teplotní závislost teplotní vodivosti [8]

Druhou veličinou závislou na teplotě je měrné teplo  $c$ , které je obecně pro křemičité sklo graficky zachyceno na obr. 45. Teplotní rozsah v tomto případě dosahuje až 1800 °C, což je pro stávající potřeby modelu dostačující. Zobrazenou křivku popisuje rovnice:

$$y = -3,626 \cdot 10^{-13} x^5 + 1,14 \cdot 10^{-9} x^4 - 5,302 \cdot 10^{-7} x^3 - 1,222 \cdot 10^{-3} x^2 + 1,495x + 6,973 \cdot 10^2$$



obr. 45: Teplotní závislost měrného tepla [8]

V poslední řadě se jedná o objemovou hmotnost, která se v závislosti na teplotě mění sice minimálně, ale přece. Koeficient teplotní roztažnosti skla je pohybuje v hodnotách 8-9  $\cdot 10^{-6}$  1/K. Na základě tohoto údaje je možné určit jednotkovou objemovou změnu při vzrůstající teplotě.

$$V(T) = V_0 \cdot (1 + \Delta l \cdot \Delta T)^3 \text{ [m}^3\text{]}$$

$\Delta l$ ..... délková změna tělesa [m]

$V_0$ .....objem tělesa v čase 0 s, při standartní teplotě cca 20 °C [m<sup>3</sup>]

Následuje jednoduchá aplikace do vztahu pro výpočet objemové hmotnosti. Platí vztah  $\rho = m/V$ , a tudíž

$$\rho_{(T_0 + \Delta T)} = \rho_{T_0} \cdot (1 / (1 + \Delta l \cdot \Delta T)^3) \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

Závěrem je zde zmíněna veličina  $\alpha$ , jedná se o součinitel teplotní vodivosti, která je závislá na teplotě skrze všechny výše zmíněné veličiny. Vztah mezi veličinami určující součinitel teplotní vodivosti je uveden v následující kapitole ve výčtu aplikovaných rovnic.

### 5.4.3 Hraniční teploty

- T1 = 400                      teplota, při které sklo začíná ztrácet svou tuhost [°C]
- T2 = 923                      teplota stečení skla [°C]

Naposledy zmíněné hraniční teploty reflektují chování skla při vzrůstající teplotě. Jedná se o definovanou teplotu T1, při které se pevné tuhé sklo začíná měnit ve sklovitou polotuhou hmotu, a tudíž dochází k částečným změnám materiálových vlastností, zejména v oblasti teplotní vodivosti. V druhé řadě o teplotu T2, která reprezentuje chování skla už jako tekuté látky, která je schopna samovolně stéci po konstrukci. Konkrétní hodnoty těchto teplot byly do modelu zaneseny po několika sériích zkušebních výpočtů tak, aby co nejlépe reflektovaly skutečné chování skla při požáru. Podrobnější průběh procesu tečení skla neřeším, jelikož je tato problematika nad rámec mé diplomové práce.

Mezi další důležité zdroje poznání, na jejichž základě jsem teploty T1 a T2 volila, jsou v práci již zmíněné články ze zahraniční literatury jako například Thermal Assessment of Glass Facade Panels under Radiant Heating: Experimental and Preliminary Numerical Studies, který vyšel v publikaci Journal of Facade design & Engineering Volume 6 v roce 2018. [17] Podobným zdrojem přínosných informací byl také článek uvedený ve sborníku Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass na téma teploty tavení různých druhů skel včetně teploty, kdy dochází ke změně jejich struktury skla při zvýšených teplotách. [16] O obou článcích jsem se v práci již zmiňovala společně s konkrétními podněty na vylepšení fungování numerického modelu.

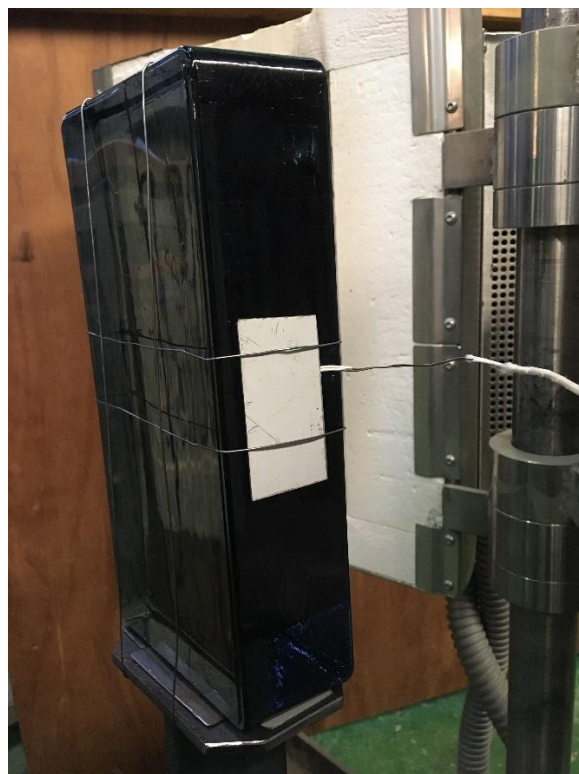
Nyní bych ráda ještě uvedla, že jsem v rámci diplomové práce uskutečnila vlastní experiment v laboratoři katedry ocelových a dřevěných konstrukcí na fakultě Stavební ČVUT v Praze. Jednalo se o zkoušku, jejíž cílem bylo zjistit chování skleněné cihly při zvýšených



teplotách a pozorovat jeho měknutí. Zkoušená konstrukce byla skleněná cihla upevněná na kovové stojině zajišťující stabilitu, cihlu jsem upevnila ke stojině pomocí drátků společně s destičkou přidržující termočlánek, díky kterému jsem mohla regulovat teplotu v peci. Termočlánek jsem připevnila k povrchu cihly pro přesnější kontrolu povrchové teploty cihly, nikoliv pouze teploty vzduchu v peci.



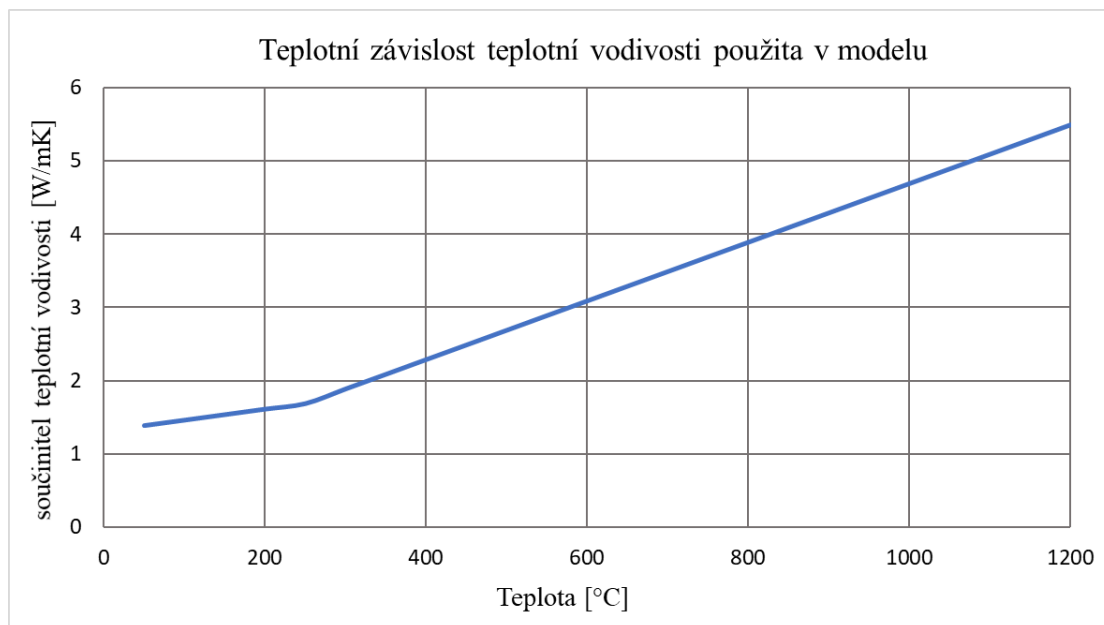
obr. 46: Zkouška skleněné cihly



obr. 47: Upevněný termočlánek na cihle

Následně jsem cihlu zahřívala pomocí laboratorní pece, jejíž maximální dosažitelná teplota byla cca 650 °C. Začala jsem na teplotě 20 °C, poté jsem cihlu zahřívala na 300 °C, následně jsem nechala prvek 15-20 minut tepelně temperovat. Poté jsem pomocí ocelové tyče zaznamenávala její tuhost. Následně jsem zvyšovala teplotu vždy o 100 °C a teplotní temperaci jsem prodlužovala až na 45 minut. Celá zkouška trvala cca 3,5 hodiny. Po 2,5 hodinách dosáhla teplota v peci 600 °C, po celou dobu zkoušky jsem k mému překvapení nezaznamenala změnu tuhosti skleněné cihly. Po 60 minutách vystavení cihly teplotě 600 °C došlo k náhlému kolapsu skleněného prvku bez předchozího varování.

Zvolená teplota  $T_1$  určuje hraniční teplotu, při které sklo začíná ztrácet tuhost. Jak je uvedeno výše, teplotní vodivost máme z literatury definovanou pouze do 230°C. [7] V modelu předpokládám tendenci prakticky lineární závislosti stejnou jako z literatury až do teploty 400 °C ( $T_1$ ). Hlavní myšlenkou změny teplotní vodivosti je simulovaná změna tuhosti skla, která se v modelu projevuje právě pomocí teploty  $T_1$ . V následujících řádcích vysvětluji myšlenkový pochod vedoucí k definici teploty  $T_1$ .



obr. 48: Průběh teplotní vodivosti použitý v modelu

Nejprve bych zde ráda uvedla, že sklo není krystalická látka, takže nelze uvažovat dvě oddělené skupenské fáze, které mohou u krystalických látek existovat dokonce i společně. Zatímco sklo postupně měkne a plynule se mění z pevné látky na kapalnou. Nejspíše existuje hraniční teplota, kdy už jej lze považovat za více tekuté než pevné, a právě tuto fázi změny stavu reprezentují teploty  $T_1$  a  $T_2$ .

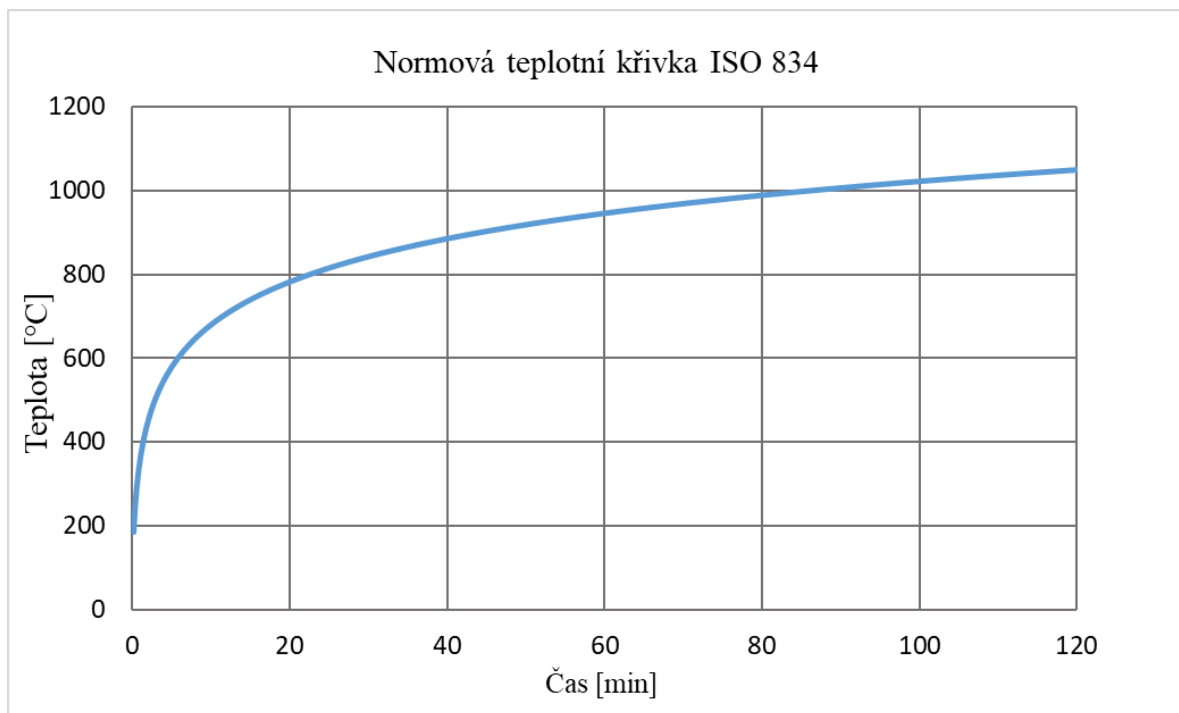
Tuto myšlenku rozdílu mechanismu přenosu tepla v pevných a kapalných látek vnáším do modelu pomocí změny závislosti teplotní vodivosti na teplotě. Rovnice popisující průběh závislosti teplotní vodivosti po zvolené teplotě  $400^\circ\text{C}$  je sestavena jako:

$$y = 0,004 \cdot (T-400) + 1,9175, \text{ pro } T > 400^\circ\text{C}$$

Grafické zobrazení celkového průběhu teplotní závislosti, která je aplikována v modelu, je zachyceno na obr. 48

Tento vzrůstající průběh teplotní vodivosti je definován až do stanovené teploty  $T_2$ , která je v konečné podobě modelu rovna  $923^\circ\text{C}$ . Výpočetní buňka, která dosáhne této teploty, přestane v rámci numerického výpočetního modelu existovat. Toto schéma výpočtu reprezentuje stav skla při tak vysoké teplotě, kdy se hmota natolik tekutá, že svou vlastní tíhou stéká po konstrukci směrem dolů. Detailnější popis samotného výpočtu je předmětem samostatné kapitoly.

Posledním nezbytným vstupem do výpočtu prostupu tepla je teplotní průběh požáru. V numerickém modelu jsem k popsání požáru použila nominální teplotní křivku, resp. normovou teplotní křivku ISO 834, kterou popisuje rovnice  $T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1)$ . Její průběh je zobrazen na obr. 49.



obr. 49: Normová teplotní křivka ISO 834

## 5.5 Okrajové podmínky a výpočet

V následující kapitole je detailněji popsán průběh výpočtu prostupu tepla skleněnou konstrukcí. Součástí této kapitoly je také vývojový diagram numerického modelu.

Jedny ze základních okrajových podmínek tvoří teploty okolního prostředí konstrukce. Na straně požáru je uvažována teplota plynů dle normové teplotní křivky ISO 834, která je zobrazena na obr. 49. Na odvrácené straně je na počátku výpočtu uvažováno s teplotou 10,8 °C. Tato teplota se však postupem času zvyšuje v závislosti na množství tepla, které prostupuje skleněnou konstrukcí.

Pro výpočet povrchových teplot konstrukce je potřeba zohlednit tepelný tok působící v daný čas na konstrukci, a to jak na straně požáru, tak na odvrácené straně. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím výpočet je koeficient přestupu tepla  $\kappa$  na rozhraní vzduch – sklo na straně požáru a sklo – vzduch na odvrácené straně.

Rovnice tepelného toku na straně požáru:

$$q_p = \kappa_l (T_{p,t} - T_{pv,t}) + \sigma (T_{p,t}^4 - T_{pv,t}^4) \quad (5.1)$$

$q_p$	hustota tepelného toku působící na konstrukci ze strany požáru [W/m <sup>2</sup> ]
$T_{p,t}$	teplota vzduchu na straně požáru v čase $t$ [K]
$T_{pv,t}$	teplota povrchu konstrukce na straně požáru v čase $t$ [K]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\varepsilon$	emisivita skla [-]
$\kappa_l$	součinitel přestupu tepla vzduch – sklo, strana požáru [W/m <sup>2</sup> K]

Obdobná aplikace rovnice tepelného toku na odvrácené straně od požáru:



$q_v$	tepelný tok působící na konstrukci na odvrácené straně [W/m <sup>2</sup> ]
$T_{v,t}$	teplota vzduchu na odvrácené straně v čase $t$ [K]
$T_{pv,t}$	teplota povrchu konstrukce na odvrácené straně v čase $t$ [K]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\varepsilon$	emisivita skla [-]
$\kappa_2$	součinitel přestupu tepla sklo - vzduch, odvrácená strana [W/m <sup>2</sup> K]

Po určení tepelných toků následuje výpočet jednotlivých teplot uvnitř konstrukce. Rovnice pro určení teploty buňky uvnitř konstrukce:



R1

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \cdot dt \cdot (T_{t-1,x-1} - 2 \cdot T_{t-1,x} + T_{t-1,x+1}) / dx^2$$

R2

$\frac{dT}{dt}$	přírůstek teploty v daném místě a čase [°C]
$\alpha$	součinitel teplotní vodivosti [W/mK]
$dt$	délka časového kroku [s]
$dx$	délkový přírůstek na ose průřezu konstrukcí [m]
$T_{t,x}$	teplota v daném místě (x) a čase (t) [°C]

Určení součinitele teplotní vodivosti:

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c)$$

$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
$c$	měrné teplo [J/kgK]
$\rho$	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]

Všechny veličiny určující koeficient teplotní vodivosti jsou v modelu definovány v závislosti na teplotě. Jednotlivé průběhy veličin jsou popsány rovnicí a graficky znázorněny v kapitole 5.4.

Dále je pro kompletní analýzu nutné určit teploty na obou povřích konstrukce. Rovnice pro výpočet teploty na povrchu konstrukce na straně požáru je dána rovnicí:



R3

$T_{pv,t}$	teplota povrchu konstrukce na straně požáru v čase $t$ [K]
$q_p$	tepelný tok působící na konstrukci ze strany požáru [W/m <sup>2</sup> ]
$dx$	délkový přírůstek na ose průřezu konstrukcí [m]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
$T$	teplota v daném místě (x) a čase (t) [°C]

Obdobně potom rovnice pro určení teploty povrchu na odvrácené straně konstrukce:



R4

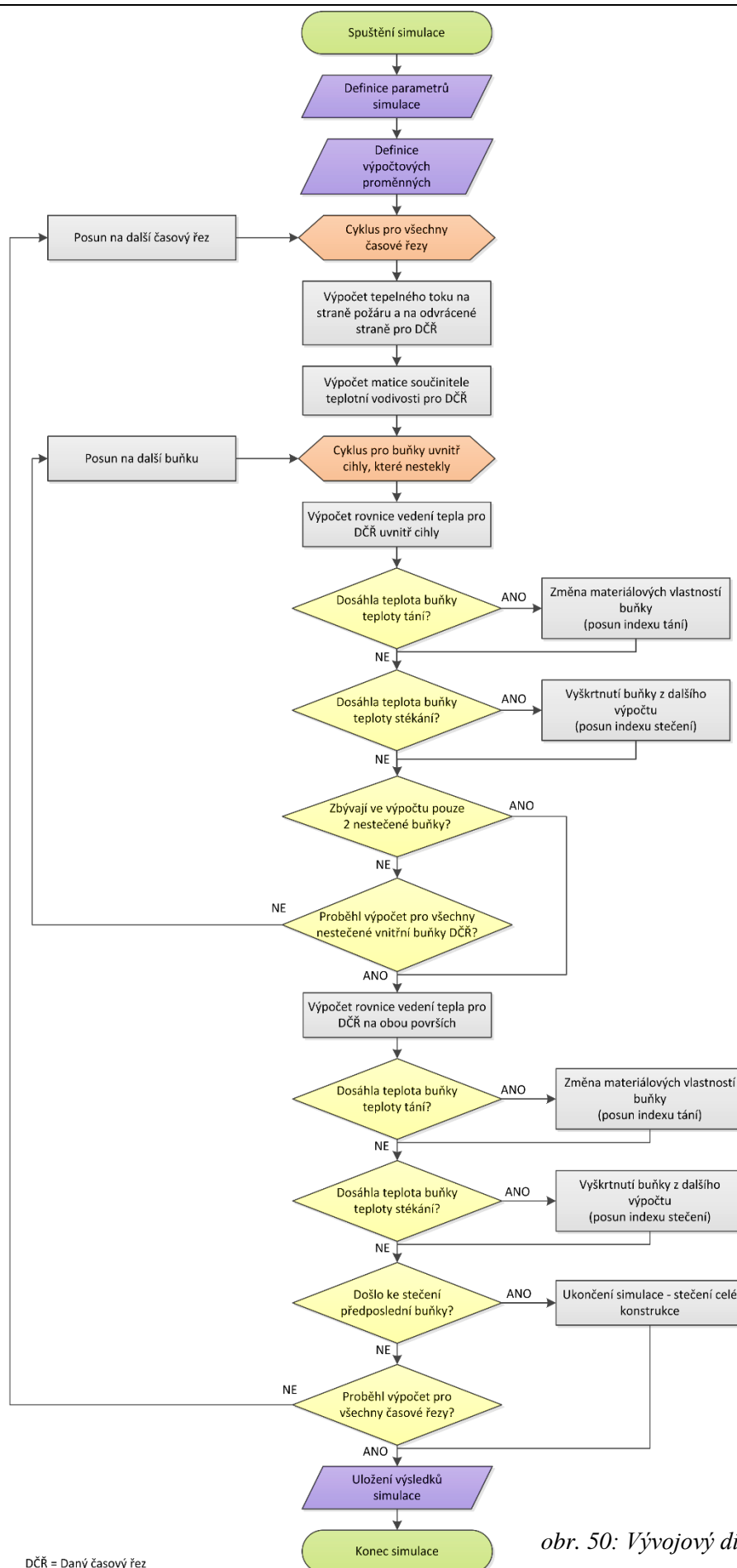
$T_{v,t}$	teplota povrchu konstrukce na odvrácené straně v čase $t$ [K]
$q_v$	tepelný tok působící na konstrukci na odvrácené straně [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$dx$	délkový přírůstek na ose průřezu konstrukcí [m]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
$T$	teplota v daném místě ( $x$ ) a čase ( $t$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Výpočet začíná s počátečním stavem konstrukce, kdy je v každé buňce teplota počáteční podmínky, tj. teplota  $10,8^{\circ}\text{C}$ . Použitím rovnic R1 a R2 se spočtou teploty ve všech vnitřních bodech konstrukce v následujícím časovém kroku ( $t+1$ ). Teploty na povrchu konstrukce se spočtou podle rovnic R3, resp. R4. Tím jsou známy teploty ve všech bodech a celý cyklus se může opakovat. Cyklus výpočtu může být ukončen stanoveným časem výpočtu nebo v případě, že během stanovené doby dojde k celkovému roztavení konstrukce. Jednotlivé propojující a navazující procesy jsou přesněji zaneseny ve zmíněném vývojovém diagramu. Zjednodušeně však lze říci, že sklo během požáru, který je modelem simulován, prochází třemi fázemi. První fází je sklo v pevném a tuhém stavu, ve kterém má materiálové vlastnosti prakticky totožné s vlastnostmi při pokojové teplotě. Následuje fáze tavení, která je zespoda ohraničena teplotou  $T_1$ . Jedná se o již zmíněnou fázi částečné změny skupenství skla. Tato druhá fáze je ukončena teplotou  $T_2$ , která reprezentuje možné úplné stečení skla z konstrukce. Navazující třetí fáze spočívá ve vyřazení výpočetních buněk konstrukce, které tuto definovanou teplotu překročily, tudíž dále ve výpočtu nefigurují.

Numerický model, tak jak je popsán výše, reprezentuje zejména nejslabší místa stěnové skleněné konstrukce, a to především díky možnému stečení skla. Uvedené chování skla by například vypadalo odlišně v případě spodní části stěny, kde se naopak může tekutější sklovina kumulovat a tím docílit i zvětšení tloušťky konstrukce. Jelikož však platí pravidlo, že celá konstrukce je jen tak silná, jako její slabá místa, zaměřuje se model právě na ně. V těchto místech konstrukce tedy dochází k jejímu ztenčení, které značně přispívá ke zrychlení procesu prostupu tepla. Toto tvrzení je možné opřít o řadu grafů, zobrazujících výstupní data, která jsou uceleně prezentována v následující kapitole.

Na následující straně je umístěn vývojový diagram popisující výpočet numerického modelu. Jsou zde zachyceny jednotlivé kroky, ze kterých se výpočet skládá. Z diagramu je patrné, že model sestává z výpočtu tepelného toku na straně požáru, přestupu tepla do konstrukce, vedení tepla konstrukcí, přestupu tepla z konstrukce a tepelného toku na odvrácené straně. Dále jsou zde uvedeny všechny podmínky pro pokračování výpočtu a definice jednotlivých kroků pro dané časové řezy.

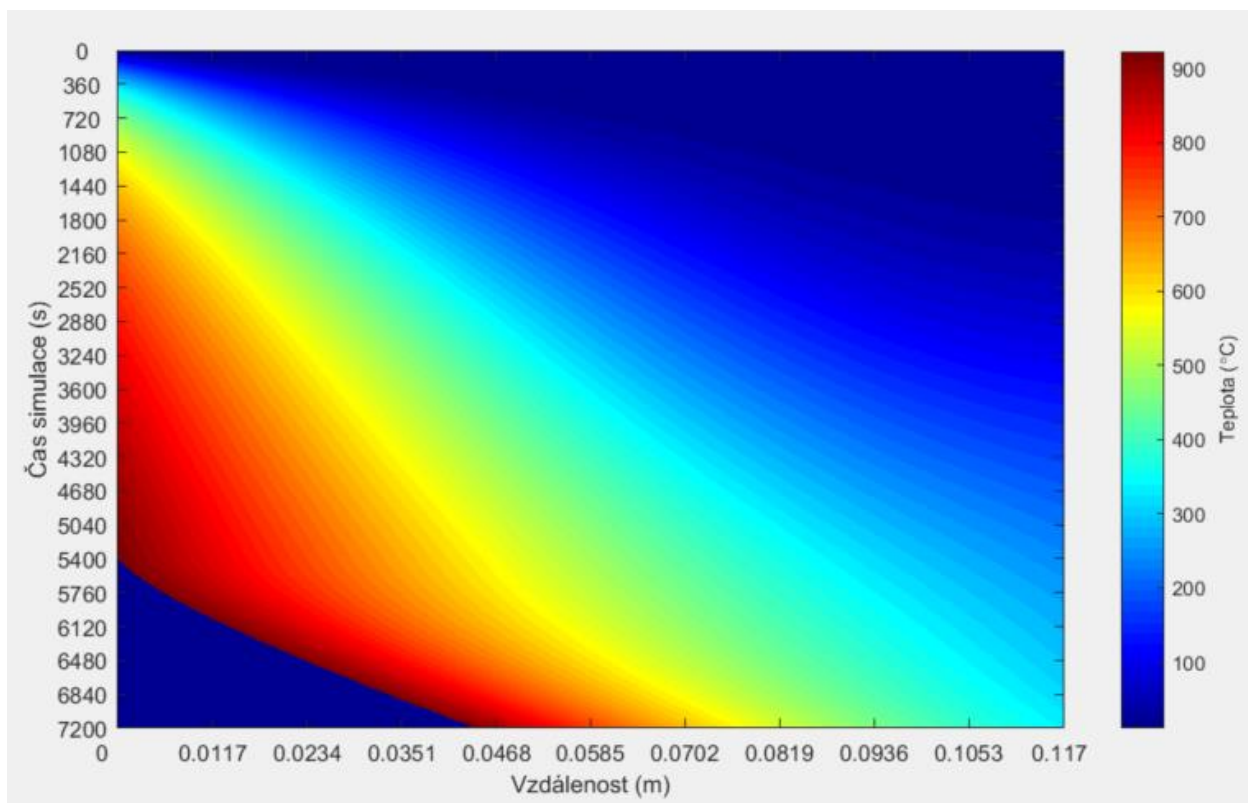
Konečná verze numerické analýzy (zdrojový soubor), tak jak je popsána výše, je součástí CD, které je umístěno na vnitřní straně zadních desek této diplomové práce, společně s elektronickou verzí diplomové práce.



obr. 50: Vývojový diagram modelu

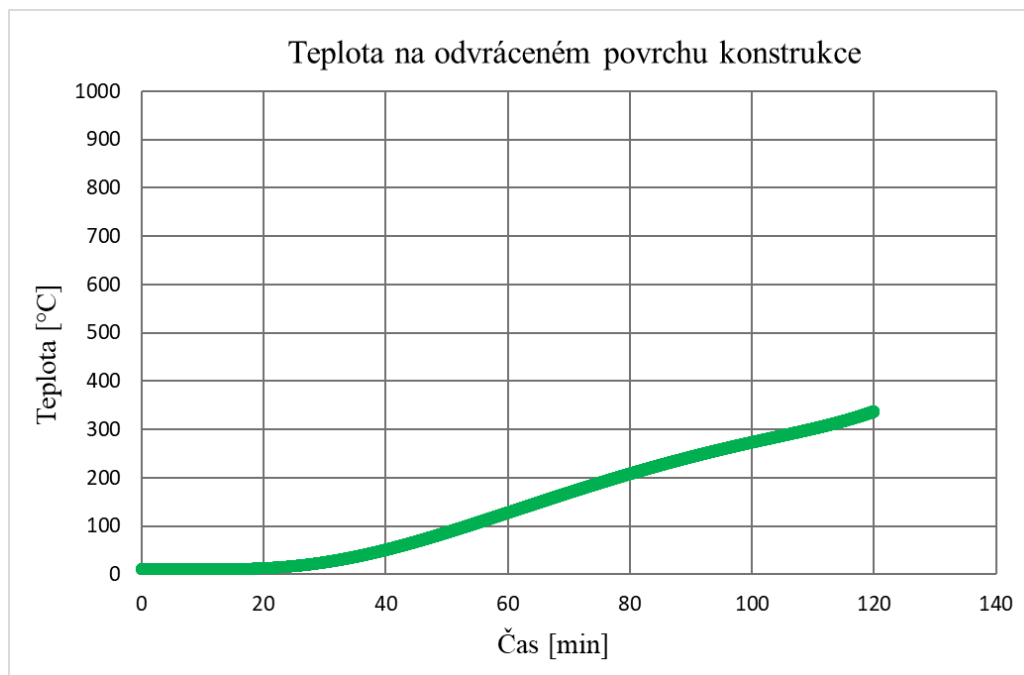
## 5.6 Výstupní data z numerického modelu

Po detailním popisu funkce modelu je vhodné specifikovat, jaká data je možné z modelu získat. Jelikož se jedná o řešení rovnice jednorozměrného vedení tepla, bylo možné ve výpočetním softwaru vytvořit velké množství matic popisující jednotlivé vlastnosti buněk v konkrétním čase simulace. Na následujícím obr. 51 jsou hromadě zobrazeny všechny časové řezy po tloušťce konstrukce během simulace požáru společně s barevnou škálou reprezentující výši teploty.



obr. 51: Teplotní mapa skleněné cihly během požáru

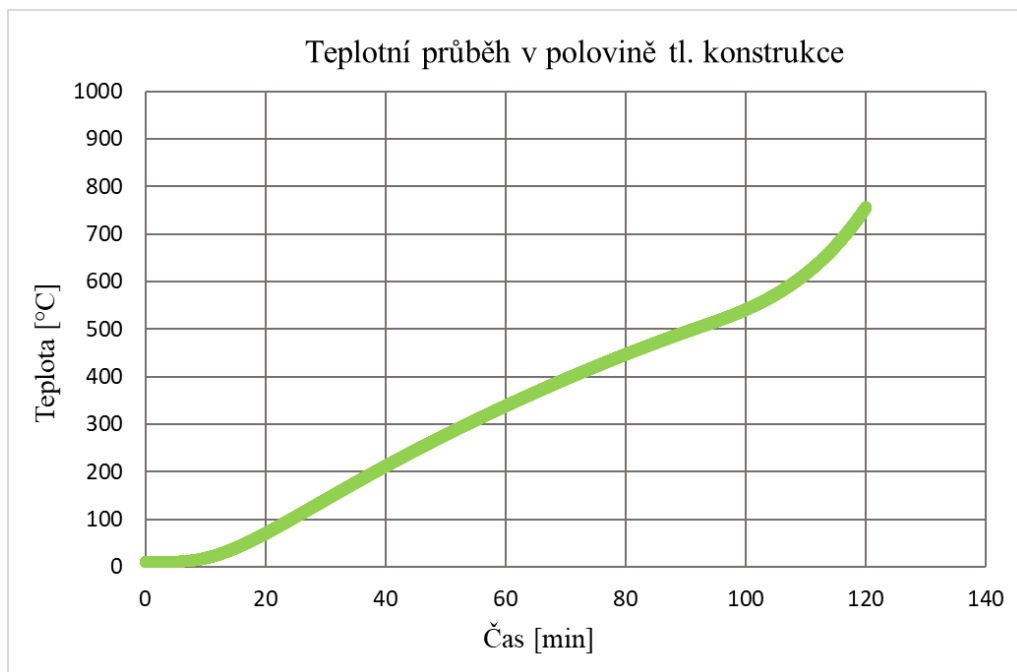
Tepelná mapa prostupu tepla je sice komplexním popisem řešení problému, je však poněkud komplikovanější na porovnávání jednotlivých získaných hodnot. Na obr. 51 si můžete všimnout tmavě modré plochy v levém dolním rohu, která reprezentuje odtávání skleněné konstrukce. Můžeme tedy říci, že v čase 120 minut je tloušťka skleněné konstrukce přibližně 73 mm silná, což odpovídá zkušenosti z reálného měření cihel, které byly součástí zkoušené konstrukce.



obr. 52: Teplota na odvráceném povrchu konstrukce

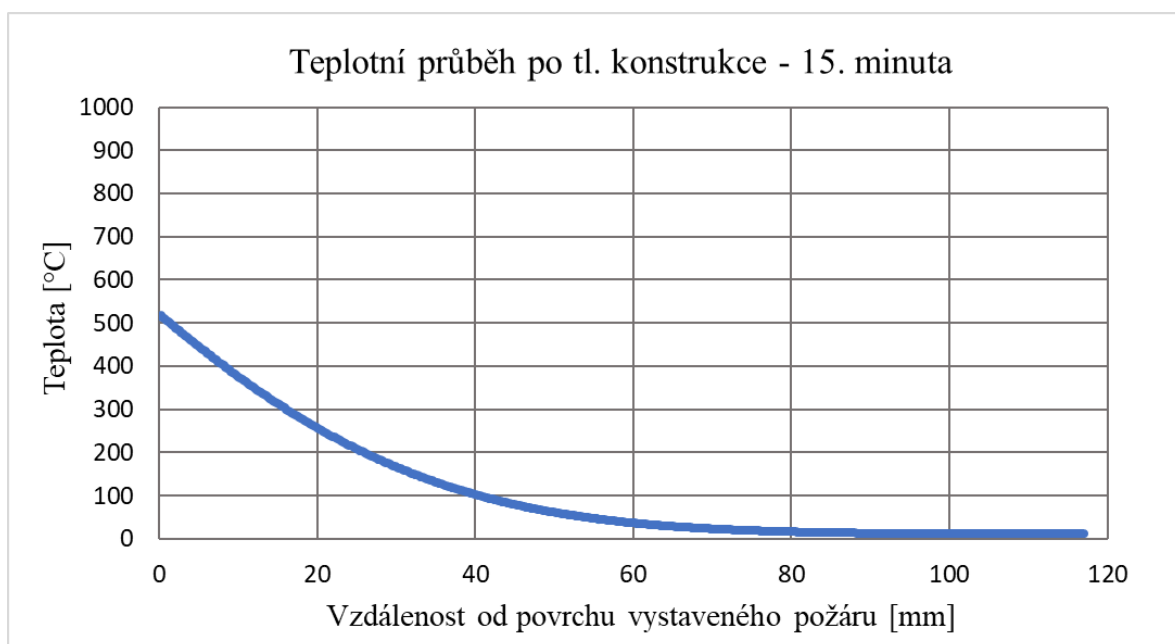
Výstupy z modelu se samozřejmě dají prezentovat pouze ve formě jednotlivých křivek. V mém případě se jedná o dva typy grafů, které zobrazují výsledky výpočtů modelu. První případem je grafické zobrazení průběhu teploty v závislosti na čase v konkrétním bodě konstrukce. V rámci jednorozměrného modelu tudíž mluvíme o bodu, který určuje umístění po tloušťce konstrukce. Model reprezentuje prostup tepla skleněnou cihlou tl. 117 mm. Jako reprezentativní příklady zastupující první skupinu grafických výstupů jsem zvolila teplotní průběh na povrchu konstrukce a v polovině tloušťky konstrukce, viz obr. 52 a obr. 53: Teplotní průběh v polovině tloušťky konstrukce



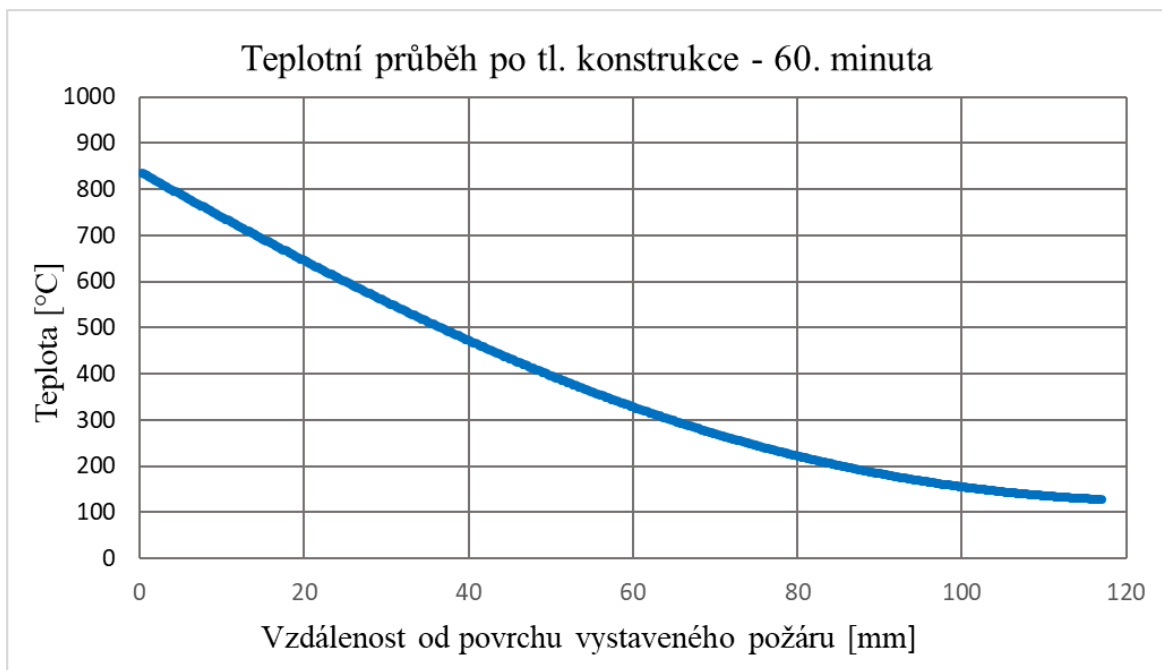


obr. 53: Teplotní průběh v polovině tloušťky konstrukce

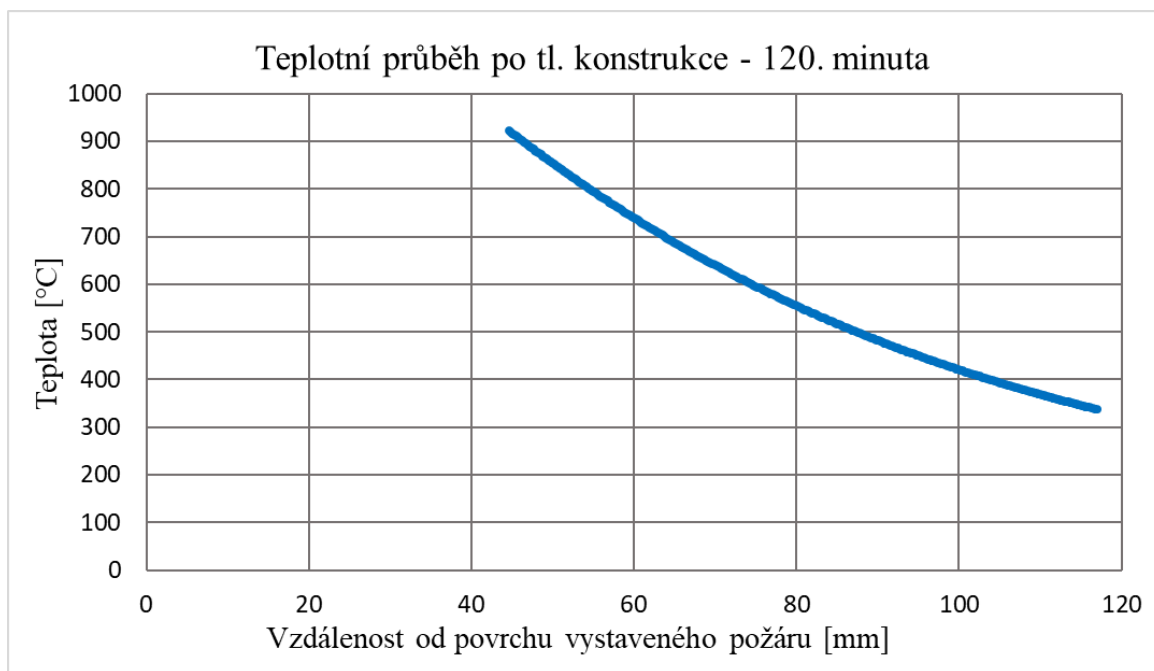
Druhou skupinou grafů jsou zobrazení časových řezů. Jedná se o zobrazení teplotního průběhu po celé tloušťce konstrukce (117 mm) v konkrétním čase. Reprezentativními grafy jsou časové řezy v 15., v 60. a ve 120. minutě simulace požáru, viz obr. 54, obr. 55 a obr. 56.



obr. 54: Teplotní průběh po tl. konstrukce v 15. minutě



obr. 55: Teplotní průběh po tl. konstrukce v 60. minutě



obr. 56: Teplotní průběh po tl. konstrukce ve 120. minutě

Na výše uvedených obrázcích můžeme vidět nárůst teplot v konstrukci v závislosti na čase. Například na posledním grafu na obr. 56 je výsledná povrchová teplota na odvrácené straně ve 120. minutě simulace přibližně 340 °C, což odpovídá konečné hodnotě v grafu na obr. 52. Na stejném grafu je možné také pozorovat vliv odtávání skla na vnitřní straně konstrukce. V tomto případě je výstupem numerického modelu teplotní křivka začínající až na hodnotě cca 44 mm, což

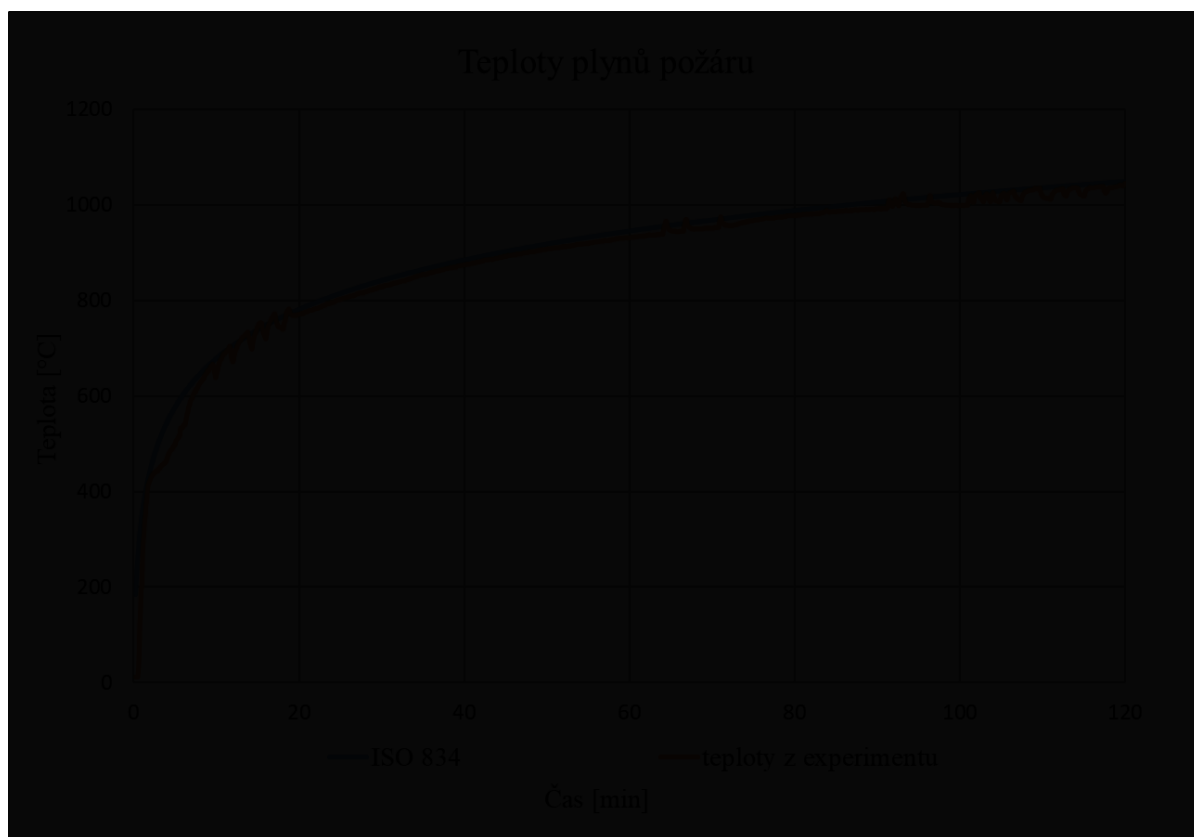
znamená že všechny předchozí buňky modelu dosáhly dané teploty  $T_2 = 923 \text{ °C}$  a v dalších výpočtech nefigurují. Křivka tedy reprezentuje skutečnou tloušťku konstrukce.

Tato kapitola pouze zkráceně představuje možnosti zobrazení výstupních dat numerické analýzy. Další možné výstupy z modelu jsou použity v následující kapitole.

## 6 Porovnání dat z experimentu a z numerického modelu

V této kapitole budou postupně porovnávány určité skupiny dat, které jsou k dispozici jak z experimentální části, tak z numerické analýzy. Můžeme také tuto kapitolu nazvat jako verifikaci numerického modelu.

Jedno z prvních porovnání dat, které bych zde ráda uvedla, se vyskytuje na úrovni vstupních dat numerického modelu. Jedná se o teplotní průběh plynů v peci během požáru. Na následujícím grafu je tak zároveň s teplotní normovou křivkou ISO 834, která byla použita v numerickém modelu, zobrazena také křivka popisující reálný teplotní průběh plynů v peci během zkoušky.



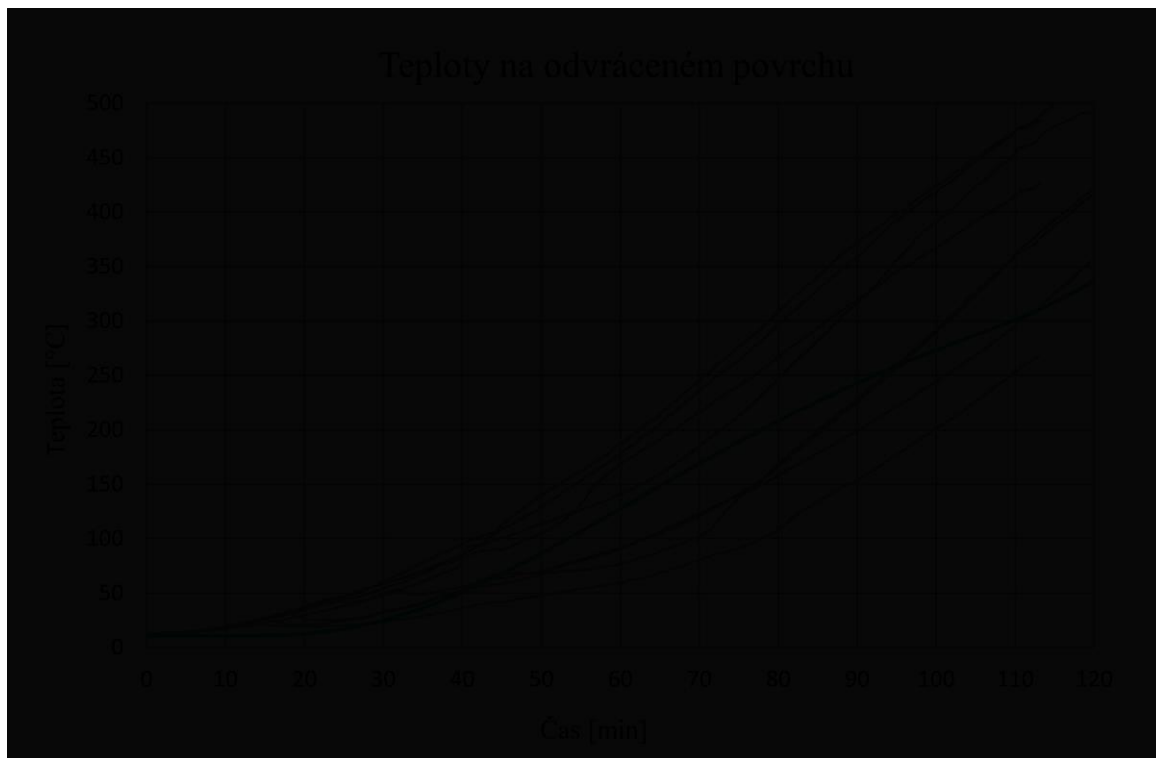
obr. 57: Teplotní průběhy požárů

Jak je vidět z obr. 57, rozdíly mezi oběma průběhy jsou minimální. Použití normové teplotní křivky by tedy nemělo mít vliv na výsledné hodnoty teplot, které budou porovnávány s daty ze zkoušky. Užití normové teplotní křivky do numerické analýzy bylo záměrné, především s ohledem na budoucí možnosti použití modelu a jeho nezávislost vůči jedné experimentální zkoušce.

### 6.1 Průběhy teplot na odvráceném povrchu konstrukce

Teploty, ke kterým je z experimentální analýzy nejvíce podkladů, jsou teploty odvráceného povrchu skleněné konstrukce. Pro lepší přehled a porovnání výpočtu s daty z experimentu jsem zvolila grafické zobrazení, kde všechna použitelná data z experimentální zkoušky jsou zobrazena

šedě a ohraničují tak rozmezí získaných povrchových teplot. Do grafu je zeleně zanesen výpočet povrchové teploty numerickým modelem. Graf je kombinací výstupů z obr. 32 a obr. 52.



obr. 58: Souhrn teplotních průběhů na odvráceném povrchu

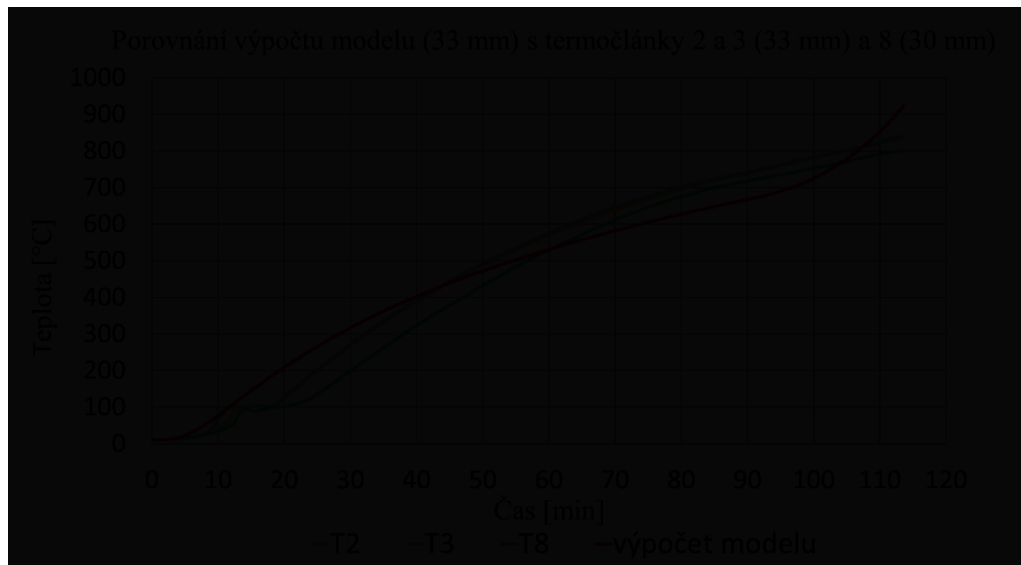
Jako zhodnocení výše zobrazeného grafu bych uvedla, že průběh povrchové teploty spočtené numerickým modelem spadá do oblasti ohraničené průběhy teplot ze zkoušky. Do 90. minuty dokonce výpočet prochází pomyslným středem ohraničené oblasti, poté se teploty získané výpočtem začínají pohybovat spíše ve spodní části experimentální oblasti. Při porovnání pouze povrchových teplot neposkytuje model tak vysoké výsledné teploty jako většina teplotních průběhů ze zkoušky, při zohlednění průběhu teploty v čase však model reprezentuje souhrn jednotlivých povrchových teplotních průběhů.

## 6.2 Průběhy teplot uvnitř konstrukce

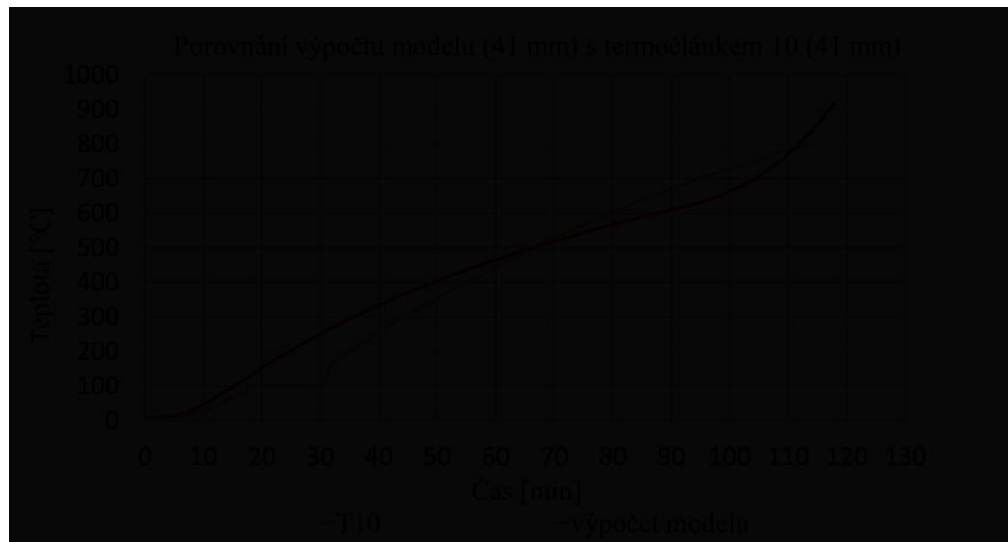
Pro detailnější porovnání výsledků numerického modelu jsou na následujících obrázcích uvedeny grafy, které jsou již zobrazeny v kapitole 4.3, nyní však doplněné o křivku teplotního průběhu získanou výpočtem. V každém grafu je červeně reprezentován výstup numerického modelu a v názvu jsou vždy uvedeny vzdálenosti bodu od strany požáru, ve kterých jsou průběhy zachyceny.

Na teplotních průbězích ze zkoušky jsou zachovány zpomalující fáze, které reflektují odpařování vázané vody v maltě, pro zachování autenticity dat. Možnost porovnávání dat z termočlánků, které byly umístěny ve stavebních spárách vyplněných maltou, s výpočtem z modelu představujícím prostup tepla homogenní skleněnou konstrukcí, resp. cihlou, stavím na stejných úvahách, faktech a předpokladech, které jsou uvedeny v kapitole 5.3. Jde především

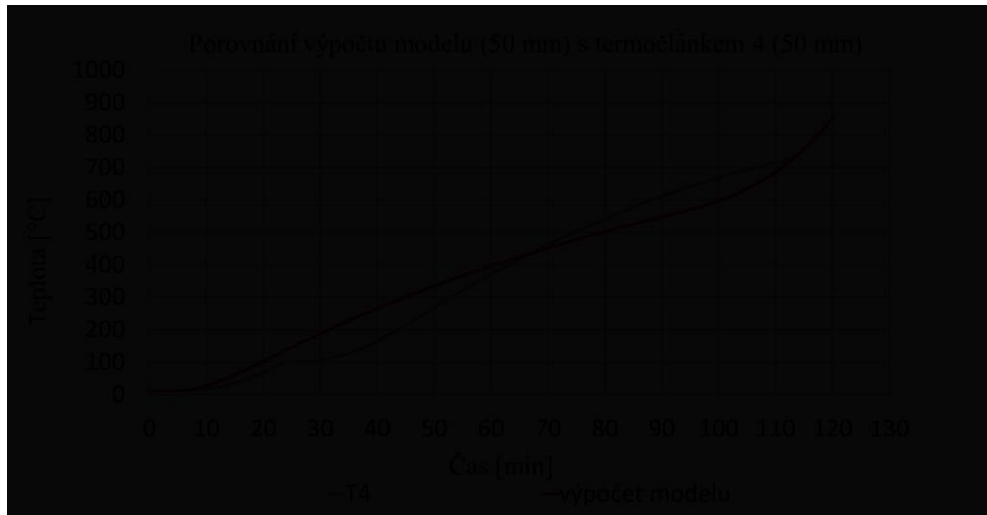
o zachování myšlenky, že lze skleněnou konstrukci stěny dostatečně přesně a reálně reprezentovat pouze modelem založeným na řešení principu jednorozměrného vedení tepla homogenní konstrukcí.



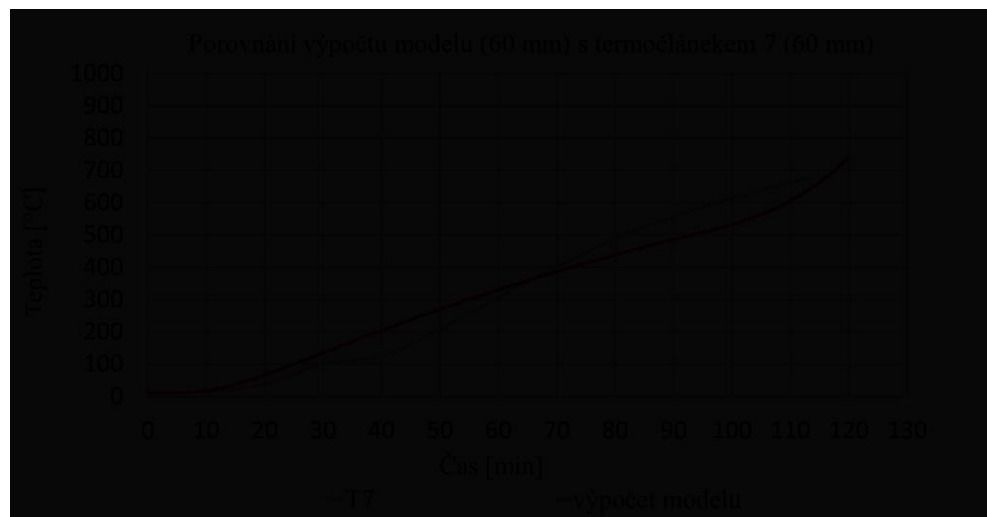
obr. 59: Porovnání teplotních průběhů, 33 mm



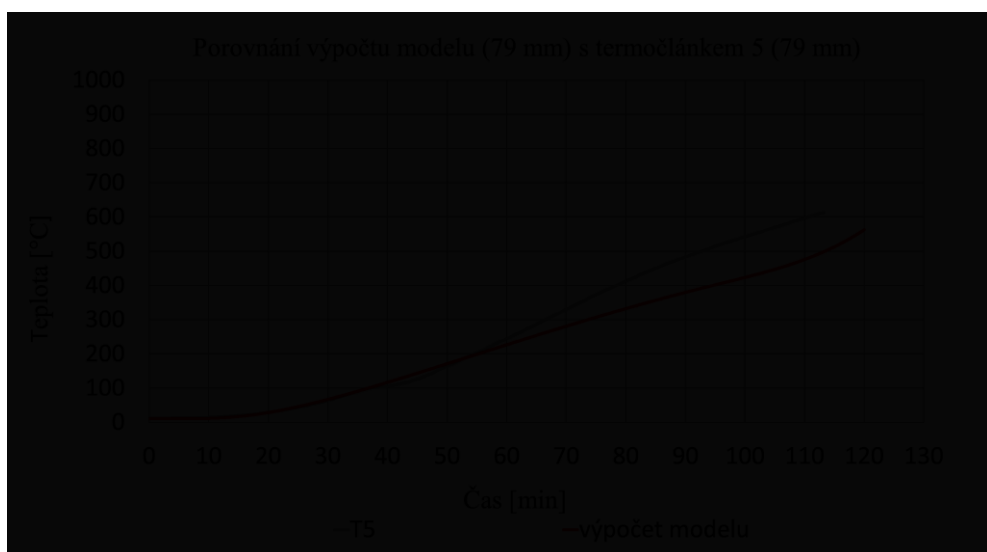
obr. 60: porovnání teplotních průběhů, 41 mm



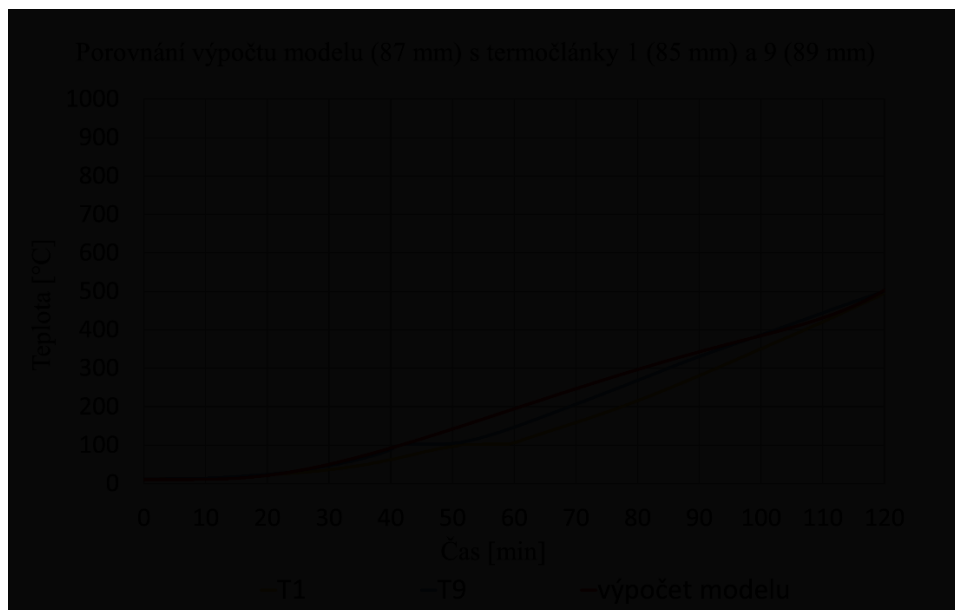
obr. 61: Porovnání teplotních průběhů, 50 mm



obr. 62: Porovnání teplotních průběhů, 60 mm



obr. 63: Porovnání teplotních průběhů, 79 mm



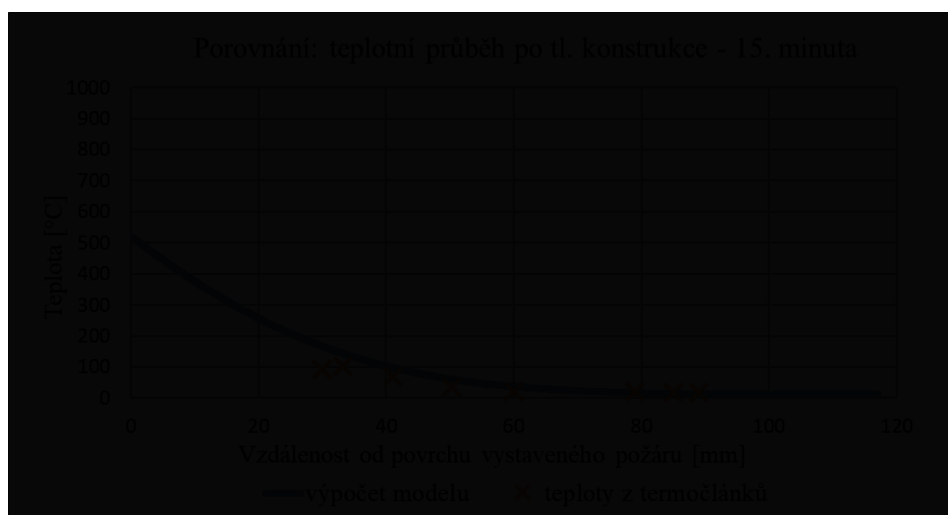
obr. 64: Porovnání teplotních průběhů, 87 mm

Myslím si, že porovnání teplotních průběhů z termočláneků umístěných v konstrukci s výstupy z numerického modelu může být shrnuto celkově. Z grafů na obrázcích je patrné, že výsledky výpočetního modelu se v určitých místech shodují spíše více než méně. Ve většině případů se výsledné teploty ve stejném místě neliší o více než cca 80°C. Dle mého názoru se jedná o velmi příznivou shodu výsledků.

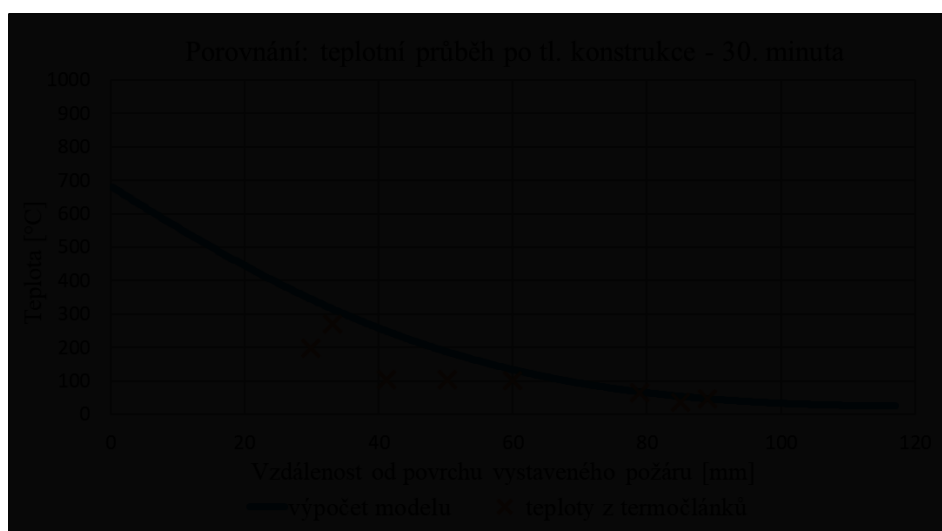
### 6.3 Časové řezy konstrukcí

Pro možnost srovnání dat z jiného úhlu jsem do práce umístila několik časových řezů po celé tloušťce konstrukce, na kterých je vždy modrou křivkou zobrazen teplotní průběh daný numerickým modelem. Do grafu jsou také zaneseny jednotlivé hodnoty teplot získané vnitřními termočláanky odpovídající danému časovému řezu. Jednotlivé křížky reprezentují články umístěné po tloušťce konstrukce, umístění křížku přesně odpovídá umístění reálného termočláanky z experimentální zkoušky. Na každém grafu je zobrazeno 8 křížkových bodů, přestože vnitřních termočláneků bylo celkem 10, a to z důvodu, že termočlánek č. 6 byl z použitelných dat vyřazen kvůli chybnému měření a termočláanky 2 a 3 jsou oba umístěny ve vzdálenosti 33 mm od exponovaného povrchu. Hodnoty jednotlivých teplot v případě termočláneků 2 a 3 jsou natolik shodné, že jsou v grafech reprezentovány pouze jedním společným bodem.

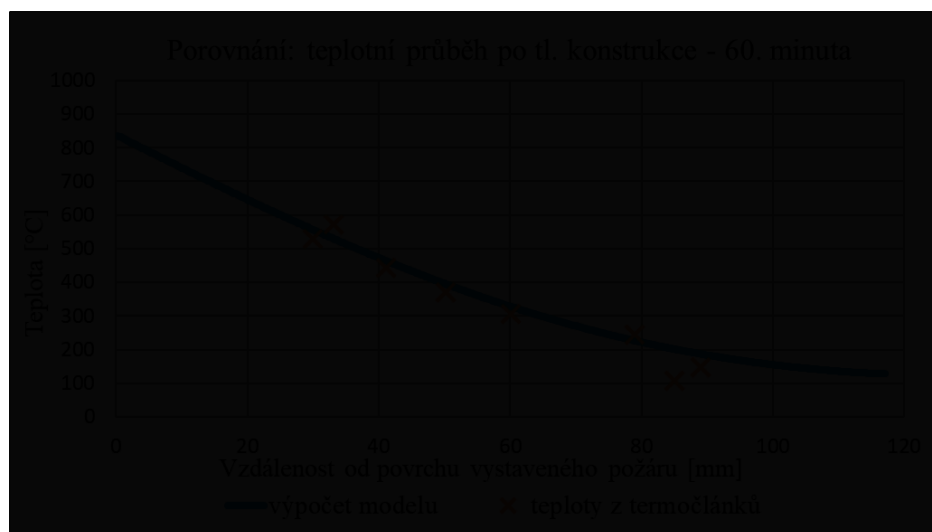




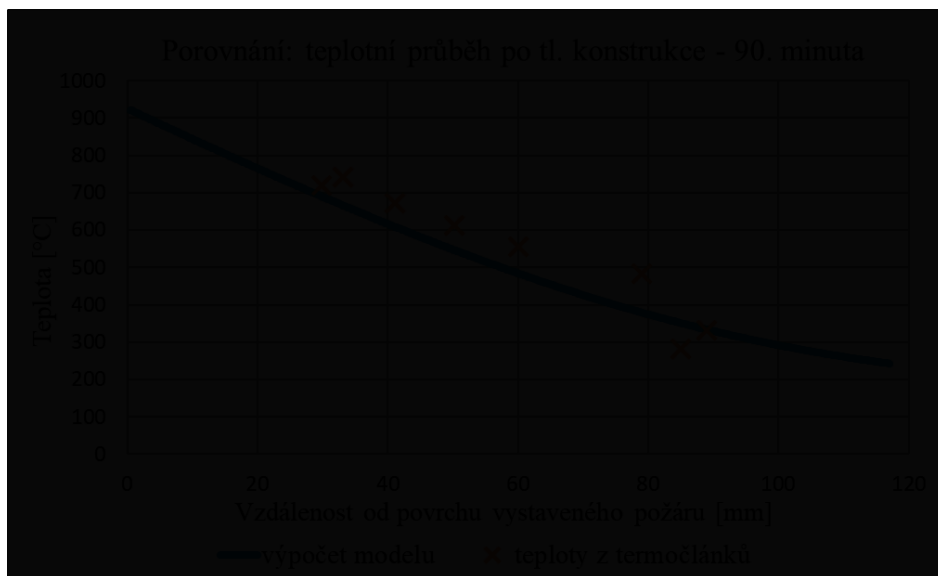
obr. 65: Porovnání teplot, čas 15 minut



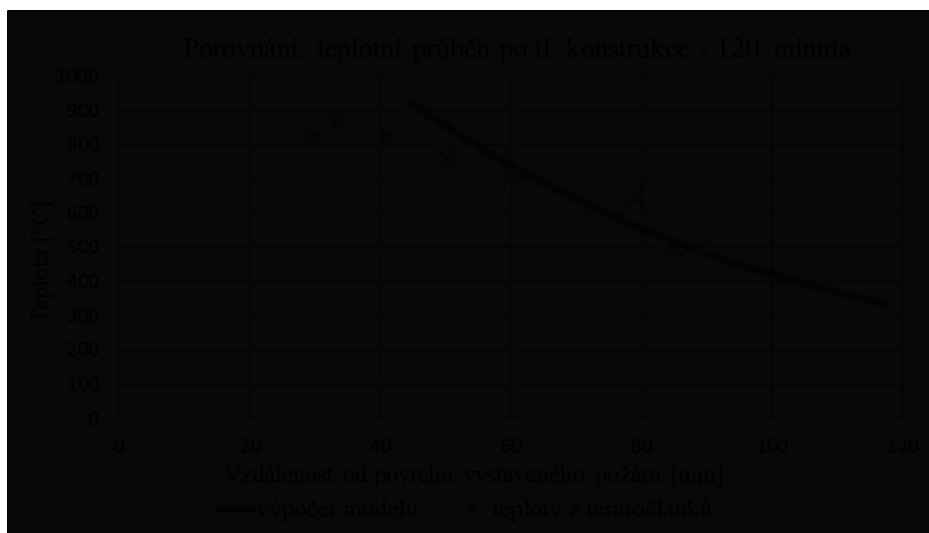
obr. 66: Porovnání teplot, čas 30 minut



obr. 67: Porovnání teplot, čas 60 minut



obr. 68: Porovnání teplot, čas 90 minut



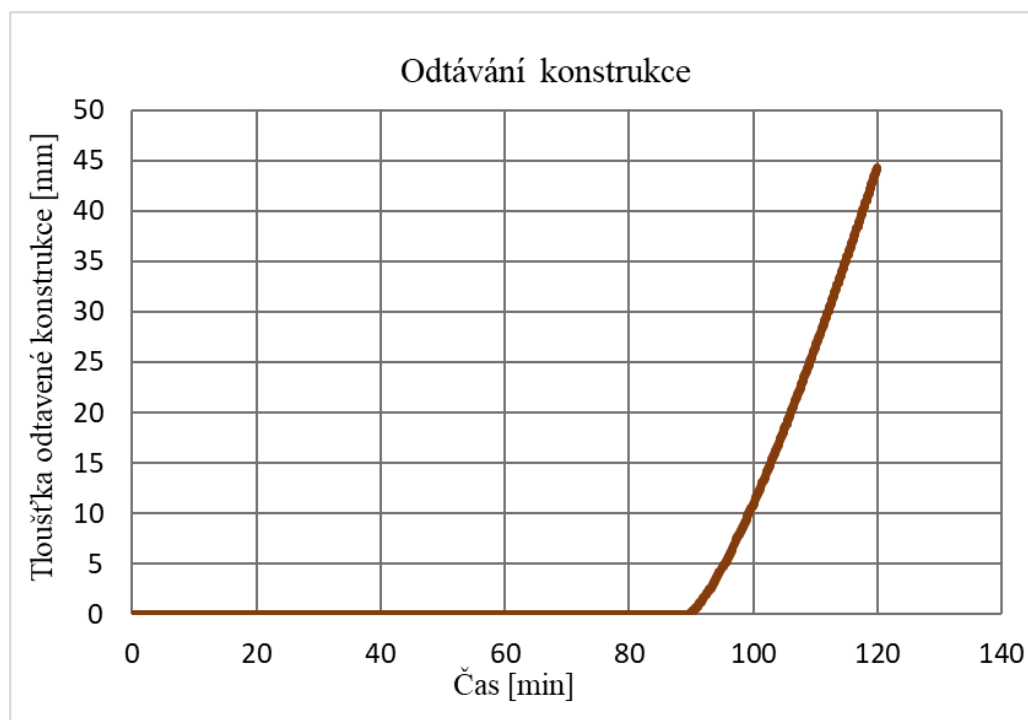
obr. 69: Porovnání teplot, čas 120 minut

Na základě výše zobrazených časových řezů, na kterých je shoda mezi výstupy z modelu a daty z experimentu velmi dobrá, si myslím, že je vytvořený numerický model schopen do dostatečné míry reprezentovat reálný prostup tepla skleněnou konstrukcí.

Na obr. 69, kde je zobrazen časový řez ve 120. minutě, je velmi dobře vidět dopad simulace odtávání skla. Křivka teplotního průběhu začíná až v místě 44,5 mm od exponovaného povrchu, což je dáno nastavením teploty T1 a teploty T2. Termočlánky, které jsou umístěny ve vzdálenosti 33 mm a 41 mm od povrchu stěny na straně požáru, jsou umístěny v maltové spáře nikoliv ve skleněné cihle, tudíž se jich proces odtávání netýká a jejich teplotní data tak můžeme v grafu vidět, přestože skleněná hmota na stejném místě je už v modelu považována za stečenou. To, že model však reflektuje skutečné chování skla, potvrzuje i obr. 31, na kterém je zobrazen pohled na stěnu po požáru z vnitřní strany.

## 6.4 Odtávání konstrukce

Dalším důležitým a sledovaným faktorem jak během experimentu, tak během tvorby modelu, bylo odtávání hmoty skla. Na následujícím obrázku je zobrazena křivka popisující množství stečeného skla z konstrukce. Finálním výstupem z modelu je hodnota 44,46 mm, která reprezentuje tloušťku konstrukce od strany požáru, která během 120 minut vystavení zvýšeným teplotám odtála.



obr. 70: Graf odtávání konstrukce

Měla jsem možnost během vytváření této práce nahlédnout do laboratoře, ve které byly umístěny zbylé poloroztavené skleněné cihly ze zkoušky. Provedla jsem několik měření tlouštěk odtavených částí cihel pro budoucí možnost porovnání s výstupy z modelu. Většina naměřených hodnot se pohybovala v rozmezí 42–47 mm, což je rozmezí hodnot, kam výsledná hodnota odtavení z modelu spadá (44,46 mm).

## 7 Citlivostní analýza numerického modelu

Tato kapitola je zaměřena na vstupní data a míru jejich vlivu na výsledky výpočtu modelu. Obecné informace o vstupních datech jsou již sepsány v kapitole 5.4. V rámci tvorby citlivostní analýzy jsem zvolila vybrané veličiny, popř. faktory, kterými se v následující části budu více zabývat.

Grafy zastupující vizuální a grafickou podobu sdělné části citlivostní analýzy jsou vždy reprezentovány tak, že sledovaný faktor či veličina jsou zastoupeny v rovině osy x a na ose y jsou zobrazeny výsledné povrchové teploty na odvrácené straně skleněné stěny. Sledovanou výslednou veličinou, ke které je celá citlivostní analýza vztažena, je tedy výsledná povrchová teplota na odvrácené straně od požáru po 120 minutách vystavení požáru. Ještě bych ráda před konkrétními grafy uvedla, že teplotní rozpětí povrchové teploty dle dat získaných zkouškou je 270 až 480 °C. Povrchová teplota spočítaná numerickým modelem v čase 120 minut odpovídá 337,3 °C, což je teplota spadající do výše uvedeného rozmezí teplot. Při hodnocení citlivostní analýzy a volbě konečných vhodných hodnot sledovaných veličin je nutné přihlídnout také k faktu, že vytvořený model zároveň simuluje odtávání skla při požáru, které bylo při výběru a určení konkrétních výsledných a použitých hodnot důležitým a více či méně rozhodujícím faktorem. Nastavení modelu respektuje několik kritérií, z nichž nejvýznamnějšími jsou kritéria povrchové teploty a odtávání skla. V rámci citlivostní analýzy jsem se zaměřila pouze na kritérium povrchové teploty, protože citlivostní analýza pro více kritérií by přesahovala rámec diplomové práce.

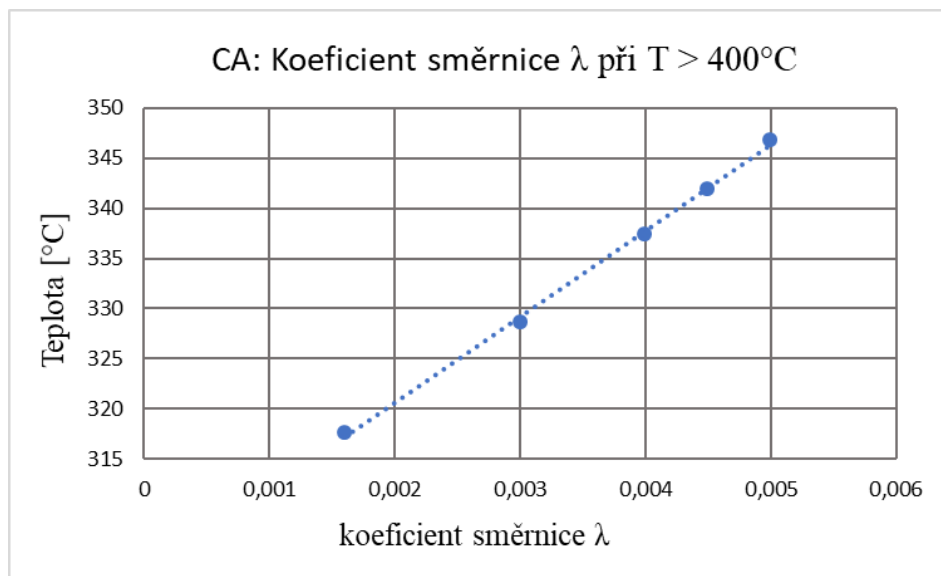
### 7.1 Koeficient směrnice teplotní vodivosti při $T > 400$ °C

První sledovanou vstupní hodnotou, která byla vybrána pro citlivostní analýzu modelu, je koeficient vystupující v popisu teplotní závislosti teplotní vodivosti  $\lambda$  [W/mK]. Jak je popsáno v kapitole o vstupních datech, závislost tepelné vodivosti na vzrůstající teplotě můžeme opřít o vědeckou literaturu [7] pouze do přibližně 230 °C. Průběh teplotní závislosti této veličiny, který byl reálně zadán do vstupních dat modelu, je zobrazen na obr. 48. Numericky můžeme průběh zapsat pomocí rovnic:

$$\lambda = 0,0015T + 1,3175, \text{ pro } T < 400 \text{ °C}$$

$$\lambda = 0,004(T - 230) + 1,9175, \text{ pro } T > 400 \text{ °C}$$

Zmíněným sledovaným koeficientem je v tomto případě hodnota odpovídající směrnici k proměnné T v případě  $T > 400$  °C, jelikož tato druhá část průběhu teplotní závislosti vznikla čistě na základě myšlenek popsanych v kapitole 5.4. Ve finální verzi rovnice, která je užitá v modelu, se koeficient rovná hodnotě 0,004. Jsem tedy přesvědčená že citlivostní analýza tohoto koeficientu bude přínosná.



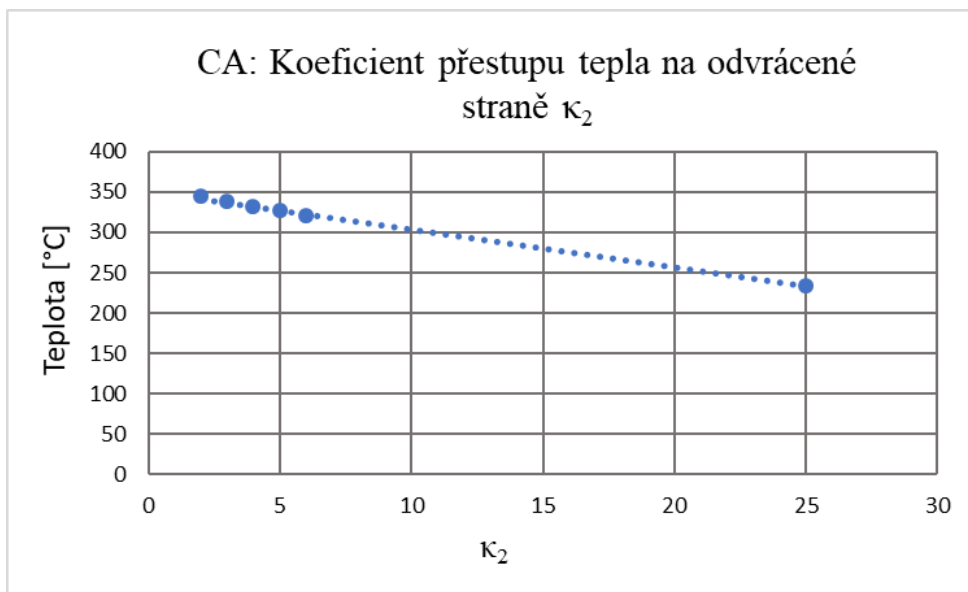
obr. 71: Citlivostní analýza – koeficient směrnice  $\lambda$

Z grafu můžeme vidět, že pokud bychom v rovnici teplotní závislosti pro vyšší teploty ponechali hodnotu 0,0015, výsledná povrchová teplota odvráceného povrchu by se pohybovala kolem 317 °C, což je hodnota, která se pohybuje spíše ve spodní části rozmezí teplot dle zkoušky a pro požadovanou shodu výsledků by nebyla dostatečná. Celkem strmý sklon výsledné spojnice jednotlivých hodnot naznačuje významnější závislost sledované povrchové teploty na daném koeficientu. Více jak 2,5násobný vzrůst směrnice teplotní vodivosti se mi však už jevil značně nereálný, proto jsem u modelu zůstala u střední hodnoty 0,004. Nutno také zmínit, že při vyšších hodnotách koeficientu se konstrukce dle numerického modelu roztavila o značně větší část, než by odpovídalo realitě.

Můžeme tedy souhrnně říci, že s rostoucí směrnici stoupá i sledovaná povrchová teplota. Jelikož hodnoty koeficientu se pohybují od hodnoty 0,015 až po trojnásobek této počáteční hodnoty a změny v teplotě jsou řádově v desítkách stupňů. Závěrem lze říci, že je výpočet na tuto veličinu citlivější.

## 7.2 Součinitel přestupu tepla $\kappa_2$

Druhou zvolenou veličinou pro aplikaci citlivostní analýzy je koeficient přestupu tepla na neexponované straně konstrukce  $\kappa_2$ . Standardní koeficient přestupu tepla mezi materiály sklo - vzduch je na základě odborné literatury [41] ve většině případů uvažován jako  $\kappa = 25$  při působení požáru na skleněný povrch. V rámci vytváření modelu jsem se však rozhodla o zohlednění rozdílného proudění na obou stranách skleněné konstrukce. Zatímco na straně požáru probíhá silné proudění teplého vzduchu způsobené požárem, na odvrácené straně jsou podmínky proudění naprosto odlišné. Na základě konzultace s vedoucím diplomové práce jsem se rozhodla ponechat reprezentativní hodnotu koeficientu přestupu tepla na straně požáru ( $\kappa_1$ ) a zdokonalit výsledky výpočtu změnou koeficientu přestupu tepla na odvrácené straně požáru ( $\kappa_2$ ).

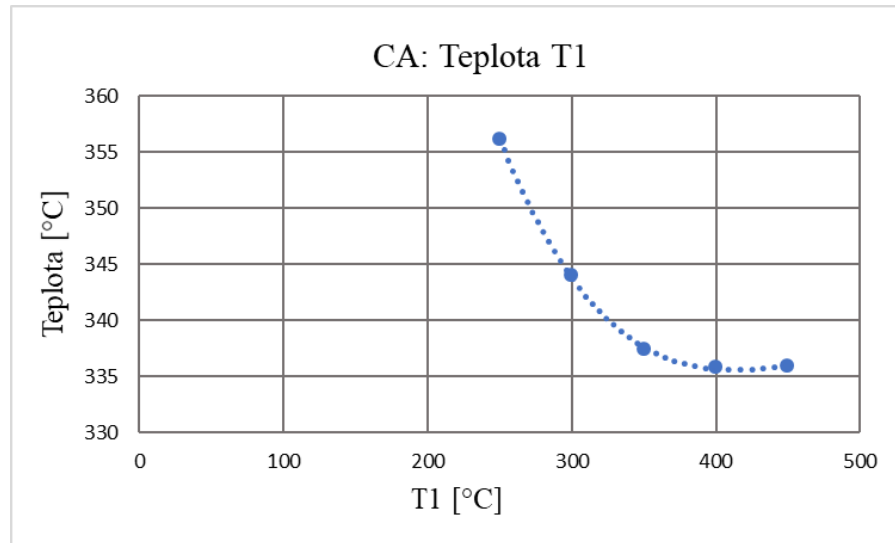
obr. 72: Citlivostní analýza –  $\kappa_2$ 

Z grafu vyjadřující závislost výsledné povrchové teploty na tomto koeficientu můžeme říci, že průběh této závislosti je téměř lineární. Se zvyšující se hodnotou koeficientu se povrchová teplota mírně snižuje. Z pohledu vlivu na výslednou teplotu si nemyslím, že je tento koeficient rozhodujícím, jelikož při rozptylu hodnot  $\kappa_2$  od 2 do 6 se pohybujeme v teplotním rozpětí cca 24 °C. Abychom zůstali na straně bezpečnosti, tak uvažuji  $\kappa_2$  nižší, především z toho důvodu, že vzrůstá teplota povrchu konstrukce v důsledku horšího ochlazování daného povrchu. Pro numerický model byla finálně zvolena hodnota 3,0. Tato zvolená hodnota zároveň částečně koresponduje se závěry odborných zahraničních článků, které jsou v této práci zmíněny výše. [17]

### 7.3 Hraniční teploty T1 a T2

Následující dvě vstupní veličiny jsou dle mého názoru stěžejními a velmi ovlivňujícími výslednou povrchovou teplotu. Jedná se o již zmíněné teploty T1 a T2, neboli teploty určující změny chování teplotně závislých vlastností skla a fázi pokročilého tavení s následkem stečení skelné hmoty ze své pozice. První teplota T1 zohledňuje zmíněný začátek změn vlastností. Popis zvolení dané hodnoty včetně detailnějšího rozboru funkce dané hodnoty je součástí kapitoly 5.4.3.

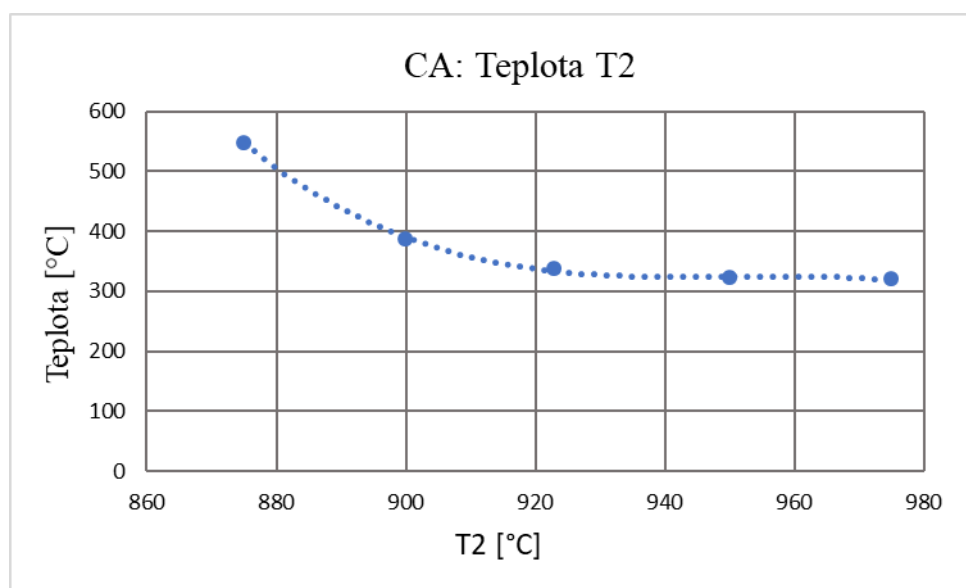
Zjednodušeně lze napsat, že zvolením konkrétní hodnoty této teploty určíme hranici, kdy se teplo konstrukcí začne šířit rychleji, a tudíž dochází k výraznějšímu rychlostnímu nárůstu prohřátí konstrukce, které vede ke zvýšení povrchové teploty.



obr. 73: Citlivostní analýza – T1

Z grafu je patrné, že v rozmezí hodnot pro T1 od 250 °C do 450 °C dostáváme výsledky povrchové teploty v rozmezí od 358 °C do 335 °C, což je rozpětí cca 23 °C výsledné povrchové teploty. Lze tedy říct, že se vzrůstající teplotou T1 klesá hodnota výsledné povrchové teploty, avšak tato závislost není nijak výrazná vzhledem k sledovanému výslednému faktoru.

Poslední hodnotou, kterou se v citlivostní analýze zabývám, je teplota T2. Jedná se o teplotu reprezentující pravděpodobné stečení sklovité hmoty z konstrukce. Z níže uvedeného grafu je vidět, že se vzrůstající teplotou T2 klesá povrchová teplota, což je způsobeno zpomalením odtávání konstrukce. Při stanovení teploty T2 > cca 940 °C se výsledná povrchová teplota již nemění, jelikož hodnota teploty stečení (T2) je vyšší než povrchová teplota konstrukce na straně požáru, konstrukce tudíž neodtává a v důsledku toho se povrchová teplota stěny nemění.



obr. 74: Citlivostní analýza – T2

Závěrem citlivostní analýzy lze říci, že zvolené zkoumané veličiny více či méně ovlivňují výslednou povrchovou teplotu. Mezi nejcitlivější vstupní hodnoty patří koeficient popisující směrnici teplotní vodivosti a teplota  $T_1$ .



## 8 Možnosti použití zdiva ze skleněných cihel v požárně dělících konstrukcích

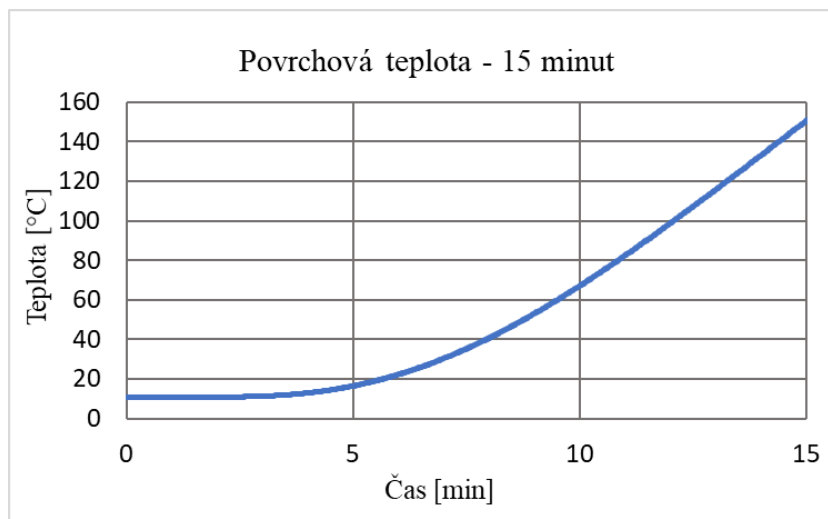
Cílem této práce nebylo pouze vytvoření numerického modelu, který by byl schopen reálně popsat prostup tepla skleněnou konstrukcí, ale také prezentovat možnosti jeho uplatnění. Jak už bylo v práci zmíněno dříve, jedním z dílčích cílů této práce je použití vytvořeného modelu pro odhad tepelně-izolačních schopností konstrukce. Jedná se o charakteristiku vlastností požární odolnosti konstrukcí, jejíž mezní stav je označován I. Jedná se o tepelně-izolační schopnost, kdy je sledován vzrůst teploty na neohřívaném povrchu a je omezen na 140 °C nad průměrnou počáteční teplotou. [1]

Nyní si tedy stanovíme základní otázku pro aplikaci modelu z hlediska izolační schopnosti konstrukce. Jak silná celistvá vrstva skla musí být vystavena požáru, aby pro danou časovou hodnotu požární odolnosti (15, 30, 60 minut atd) vyhověla kritériu I? Na následujících grafech budou postupně zobrazeny jednotlivé průběhy povrchové teploty na neohřívané straně konstrukce společně s tepelnými mapami, které podrobněji popisují celkový průběh prostupu tepla konstrukcí v čase. Všechny následující výpočty mají společnou počáteční teplotu konstrukce 10,8 °C, která je v modelu zachována. Cílová hodnota teploty povrchu konstrukce, která nesmí být pro zachování izolační schopnosti překročena, je 150,8 °C.

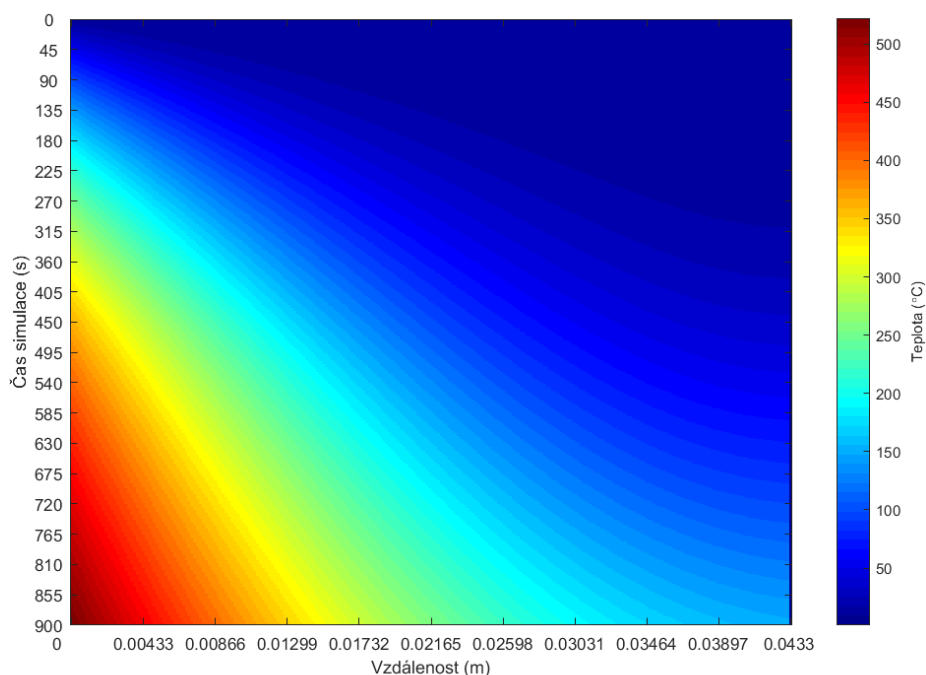
Vzhledem k faktu, že výroba plných skleněných cihel je technologicky velmi náročná, bych však spíše předpokládala minimalizaci možností různých tvarů a velikostí. Proto bude pro účel porovnání jednotlivých výsledných tloušťek uvažováno dělení pouze na poloviny, max. třetiny celkových rozměrů skleněné cihly. Nicméně s ohledem na popsanou technologickou náročnost výroby bude poměr vůči modulové jednotce reprezentován celou šířkou cihly (240 mm).

### 8.1 I15 – izolační schopnost po dobu 15 minut

Díky pozorování vzrůstu povrchové teploty je možné stanovit tloušťku konstrukce, jejíž povrchová teplota nepřekročí 150,8 °C po uplynutí 15 minut vystavení požáru.



obr. 75: Kritérium I – 15 minut

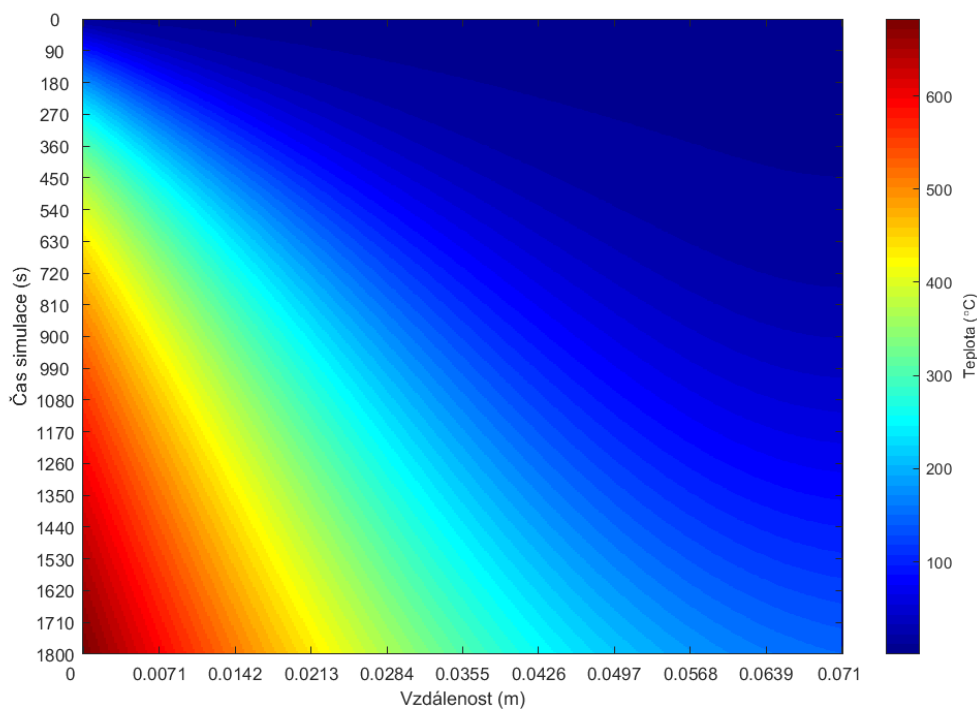


obr. 76: Tepelná mapa, I15

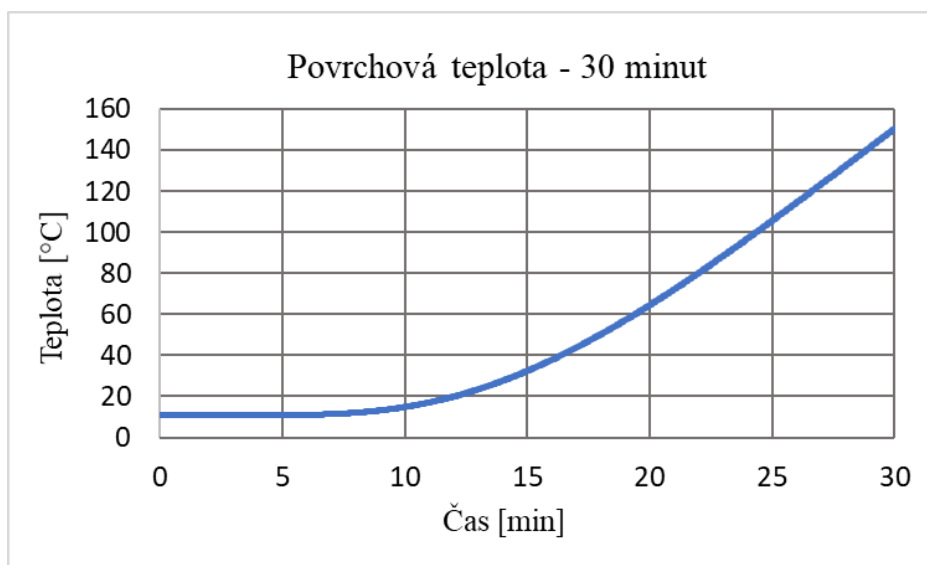
Z výše uvedených obrázků je patrné, že pro dobu simulace 900 s (15 minut) byla nalezena shoda požadované povrchové teploty s tloušťkou konstrukce  $L = 43,3$  mm. Po 15 minutách dosáhl vzrůst teploty na neohřívaném povrchu  $140$  °C. Základním stavebním prvkem v případě zdiva ze skleněných cihel je samozřejmě samotná skleněná cihla. Pro přehlednost a možnost porovnání jednotlivých výsledných tloušťek skla pro různé časy budou výsledné tloušťky konstrukce z modelu zastoupeny poměrem modulové jednotky, kterou v tomto případě bude zastupovat skleněná cihla Vetropieno o rozměrech  $53$  mm x  $240$  mm x  $117$  mm (v x š x tl), viz. obr. 16. Pro uchování izolační schopnosti by v tomto případě postačovala tloušťka konstrukce odpovídající výšce skleněné cihly ( $53$  mm).

## 8.2 I30 – izolační schopnost po dobu 30 minut

Při navýšení doby simulace požáru na 30 minut (1800 s) se tloušťka konstrukce pro nepřesáhnutí povrchové teploty 150,8 °C zvětšila na hodnotu 71 mm. Tloušťka 71 mm v přepočtu k modulové jednotce tudíž odpovídá cca 2/3 tloušťky skleněné cihly (2/3 z 117 mm = 78 mm). Lze tedy říci, že stěna ze skleněných cihel tl. 78 mm dle numerického modelu vykazuje I30.



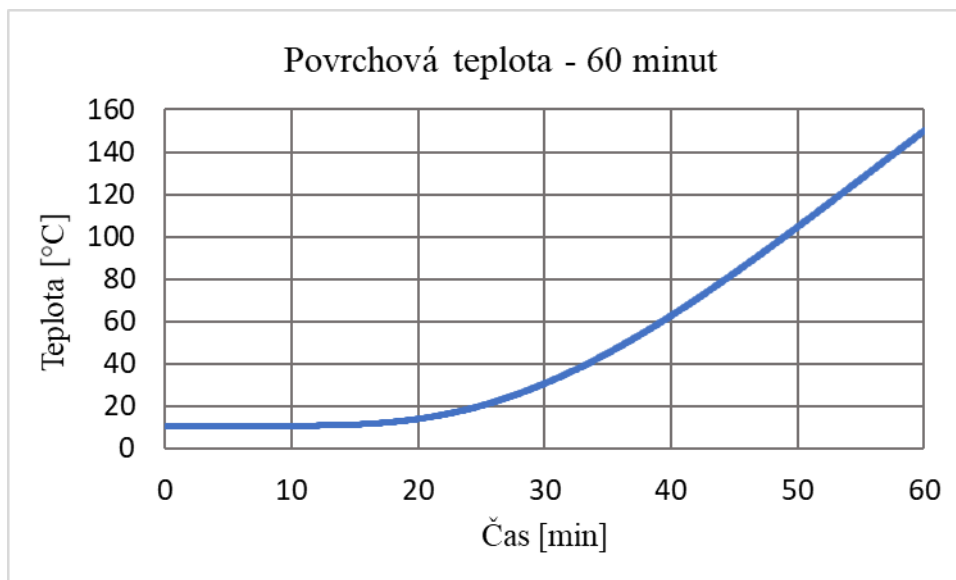
obr. 77: Tepelná mapa, I30



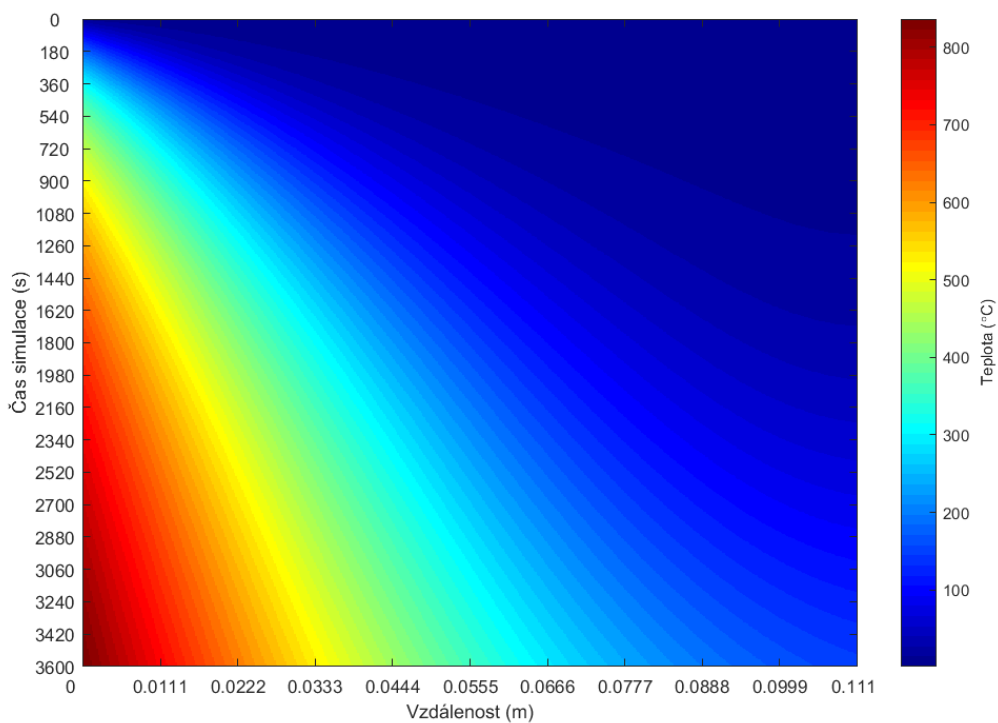
obr. 78: Kritérium I – 30 minut

### 8.3 I60 – izolační schopnost po dobu 60 minut

Při uvažování délky simulace 60 minut (3600 s) se pro splnění podmínek izolační schopnosti dostáváme na tloušťku konstrukce  $L = 111$  mm. Modulově tato hodnota přibližně odpovídá celé tloušťce konstrukce (117 mm). Na následujících obrázcích je uveden průběh povrchové teploty po dobu simulace a tepelná mapa konstrukce.



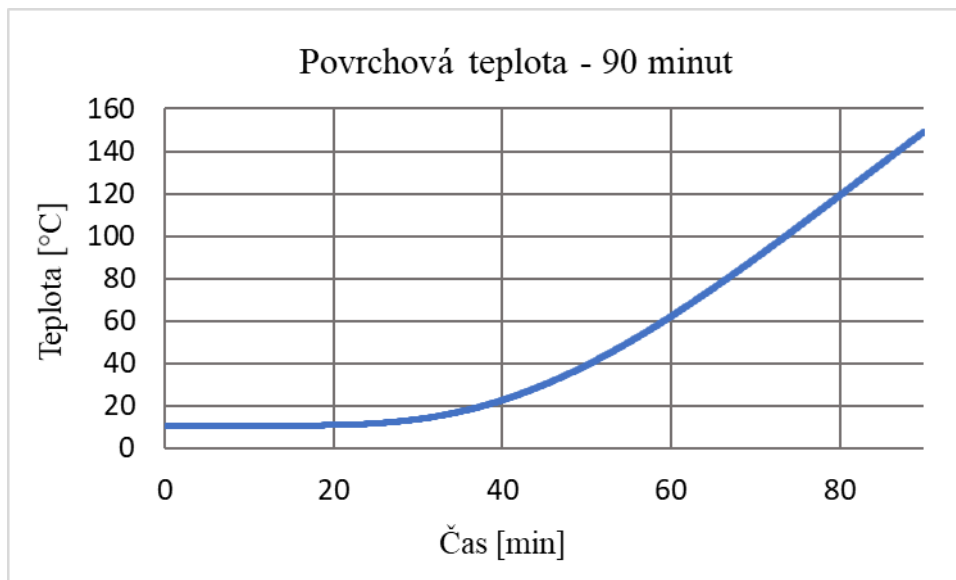
obr. 79: Kritérium I – 60 minut



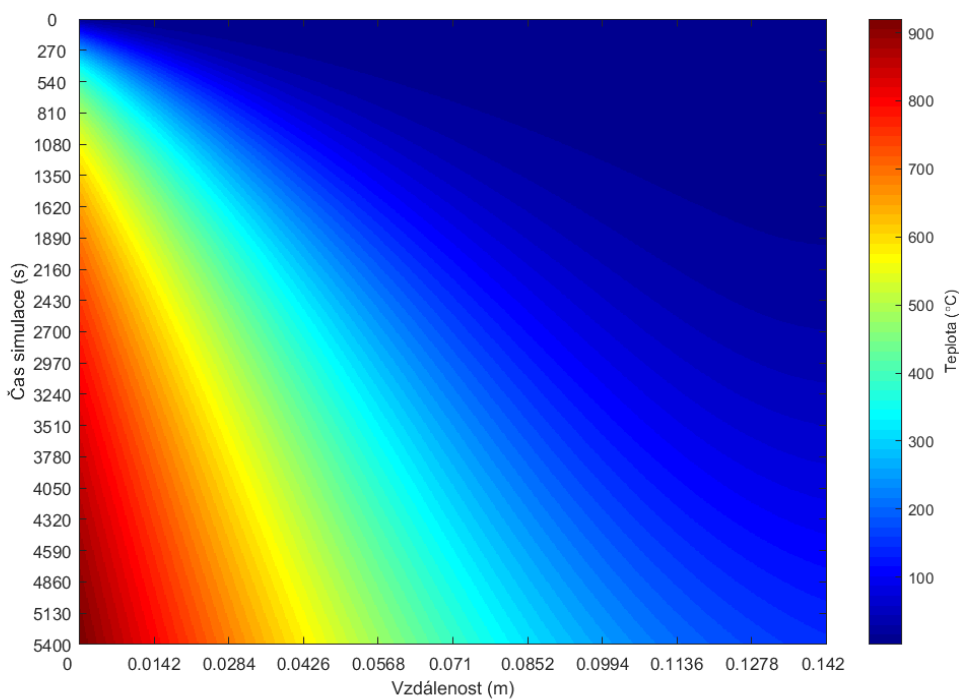
obr. 80: Tepelná mapa, I60

## 8.4 I90 – izolační schopnost po dobu 90 minut

Pro zajištění izolační schopnosti po dobu 90 minut (5400 s) je dle výpočtu numerického modelu potřebná tloušťka konstrukce  $L = 142 \text{ mm}$ . V převodu na jednotkový modul se hodnota přibližuje cca  $2/3$  šířky cihly ( $2/3$  z  $240 \text{ mm} = 160 \text{ mm}$ ).



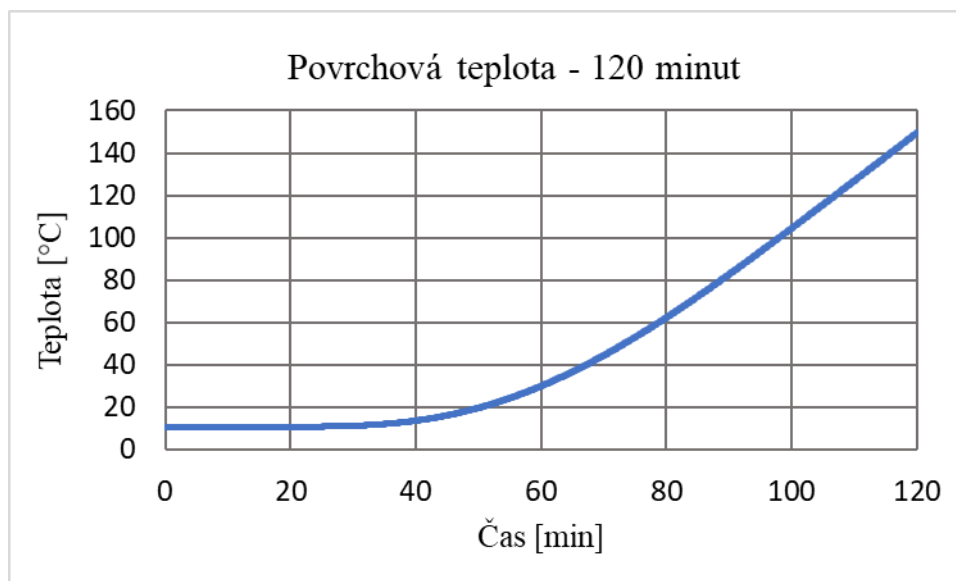
obr. 81: Kritérium I – 90 minut



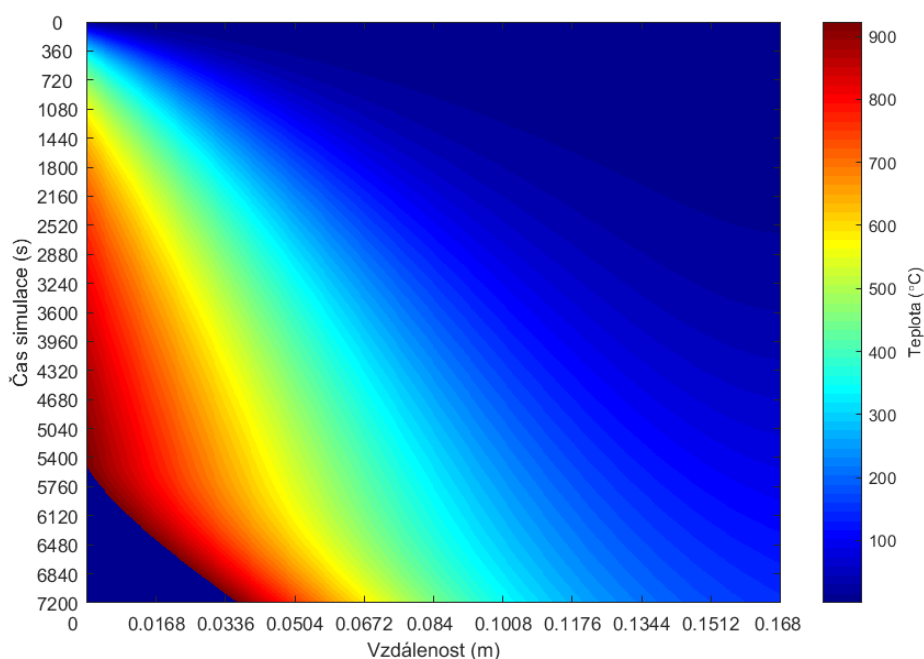
obr. 82: Tepelná mapa, I90

## 8.5 I120 – izolační schopnost po dobu 120 minut

Poslední a nejvyšší požadovanou dobou, po kterou bude stanovena tloušťka konstrukce, je 120 minut (7200 s). Výslednou tloušťkou konstrukce dle výpočtu numerického modelu je hodnota  $L = 168$  mm. V převodu na modulovou jednotku je tato hodnota těsně nad hodnotou  $2/3$  šířky cihly (160 mm). Za předpokladu neomezených technologických možností výroby těchto cihel by bylo možné uvažovat s hodnotou 180 mm, která odpovídá  $3/4$  šířky cihly ( $3/4$  z 240 mm).



obr. 83: Kritérium I – 120 minut



obr. 84: Tepelná mapa, I120

## 8.6 Přehled a shrnutí

Výsledky této kapitoly jsem shrnula v Tabulka 7, ve které je uveden souhrn hodnot uvedených v předchozím textu.

Tabulka 7: Přehled výsledných tloušťek pro dosažení izolační schopnosti

Kritérium	Čas	Požadovaná min. tloušťka	Tloušťka dle MJ	
			poměr k MJ	[mm]
I15	15	43	1 x výška	53
I30	30	71	2/3 x tloušťka	78
I60	60	111	1 x tloušťka	117
I90	90	142	2/3 x šířka	160
I120	120	168	1x šířka	240

Pozn. MJ = modulová jednotka, cihla o rozměrech 53 x 240 x 117 mm (v x š x tl)

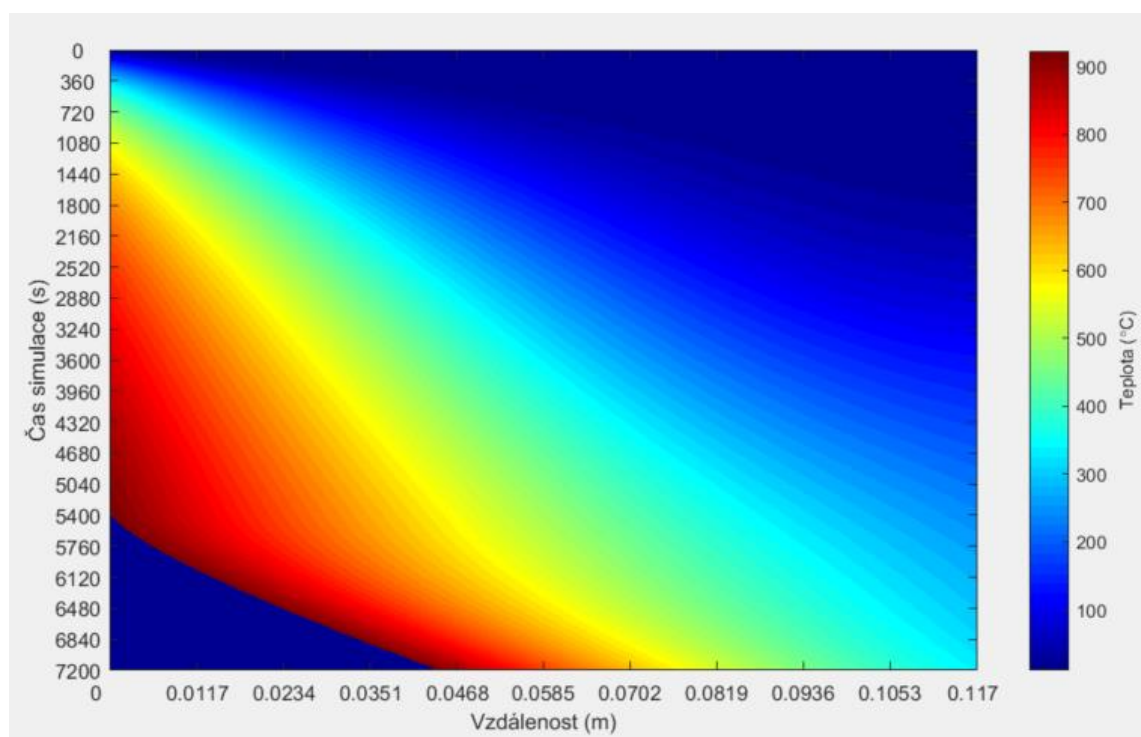
Na základě předložených výsledků modelu lze říci, že model je možné použít k získání teplotních průběhů např. na povrchu konstrukce. Tato data lze tedy využít k určení minimální potřebné tloušťky konstrukce pro zajištění izolační schopnosti skleněné konstrukce tak, jak vidíme ve výše uvedené tabulce.

## 9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření numerického modelu popisující prostup tepla skleněnou konstrukcí při požáru. V úvodních kapitolách této práce jsem shrnula obecné informace o skle, druzích skla, jejich výrobě a použití. Následně jsem se zaměřila na plně skleněné cihly za běžné teploty, kde jsem představila jejich technologie spojení, a také světové stavby využívající právě tohoto stavebního prvku.

V dalších kapitolách jsem popsala experiment zaměřený na výzkum chování skleněné stěny při požáru. Kapitola také obsahuje charakteristiku konstrukce, popis průběhu zkoušky a rozbor získaných dat.

Dále jsem se zaměřila na výčet kroků vedoucí k vytvoření numerického modelu prostupu tepla. Součástí práce je představení výpočetního prostředí a popis použité metody, která vedla k sestavení numerického modelu. Jedná se o rovnici jednorozměrného vedení tepla řešenou metodou sítí v diskretizaci času i prostoru. Výsledná numerická analýza je tedy simulována jako jednorozměrný prostup tepla skleněnou konstrukcí. Důležitou podkapitolou, která popisuje numerický model, je část definující vstupní data modelu. Jedná se jak o teplotně závislé, tak teplotně nezávislé veličiny. Jmenovitě jde zejména o koeficient teplotní vodivosti, měrnou tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost. V práci jsem jednotlivě zanalyzovala všechny teplotní průběhy těchto veličin, které jsou vneseny do výpočetního modelu. Teplotní závislosti měrného tepla a hustoty jsem opřela o odbornou literaturu, zatímco teplotní závislost tepelné vodivosti jsem mimo teplotní rozsah definovaný v literatuře stanovila odborným odhadem na základě úvah a rozboru fyzikálních dějů. Samotný výpočet spočívá v řešení diferenciální rovnice pomocí náhrad diferencí. Model sestává z výpočtu tepelného toku na straně požáru, přestupu tepla do konstrukce, vedení tepla konstrukcí, přestupu tepla z konstrukce a tepelného toku na odvrácené straně.





Souhrnně jsou výsledné teploty po tloušťce konstrukce v průběhu simulovaných 120 minutách zobrazeny na obrázku výše. Jedná se o tepelnou mapu konstrukce v prostoru a čase. Pro detailní analýzu jsem jednotlivé průběhy teplot v konkrétním čase nebo v konkrétní tloušťce konstrukce v práci zobrazila v samostatných grafech s komentáři.

Další velkou a důležitou kapitolou práce je validace a verifikace modelu pomocí již zmíněných dat z experimentu. K porovnání mi sloužilo prolnutí grafických výstupů z modelu a ze zkoušky ve shodném čase či bodě po tloušťce konstrukce, důležitým sledovaným výstupem byla mimo jiné povrchová teplota konstrukce.

Právě k výsledné povrchové teplotě konstrukce jsem po nalezení souladu dat z modelu a z experimentu vytvořila citlivostní analýzu. Jednalo se o zhodnocení několika vstupních parametrů modelu, jmenovitě se jednalo o koeficient směrnice teplotní vodivosti nad 400 °C, koeficient přestupu tepla na odvrácené straně konstrukce a dvě hraniční teploty zanesené do modelu – T1 a T2. Teplota T1 reprezentuje teplotu, kdy se tuhé sklo začíná měnit v měkkou sklovitou a viskózní hmotu, v numerickém modelu je reprezentována hodnotou 400 °C. Hodnota teploty T2 reflektuje stav skla, které je už natolik roztavené, že samotná sklovitá hmota vlastní tíhou stéká z konstrukce stěny směrem dolů. V případě modelu se jedná o 923 °C. Obě dvě teploty jsou pomyslnými hraničními hodnotami v průběhu výpočtu, což je také patrné z vývojového diagramu modelu, který je uveden na straně 63.

Závěrečná kapitola mé práce slouží k uvedení možnosti použití zdiva ze skleněných cihel v požárně dělicích konstrukcích, kde díky modelu získáváme potřebné tloušťky konstrukce pro splnění kritéria izolace z hlediska požární odolnosti. Text je vždy doplněn teplotní mapou a průběhem povrchové teploty pro daný zkoumaný čas (15, 60, 90 a 120 minut).

Kritérium	Čas	Požadovaná min. tloušťka	Tloušťka dle MJ	
			poměr k MJ	[mm]
I15	15	43	1 x výška	53
I30	30	71	2/3 x tloušťka	78
I60	60	111	1 x tloušťka	117
I90	90	142	2/3 x šířka	160
I120	120	168	1x šířka	240

Shrnutí závěrečné kapitoly je reprezentováno výše zobrazenou tabulkou z kapitoly 8.6. Jedná se o přehled požadovaných tlouštěk konstrukce dle modelu pro splnění kritéria maximálního vzrůstu teploty na neohřívaném povrchu o 140 °C oproti původní teplotě povrchu.

Vytvořený numerický model má tedy potenciál stát se užitečným nástrojem na poli projekční či vědecké činnosti v oblasti stavebnictví.

## 10 Seznam obrázků

obr. 1: Rozdělení napětí po tloušťce skla [9] .....	15
obr. 2: Druhy porušení skel [9] .....	16
obr. 3: Srovnání teplotně a chemicky zpevněného skla [12] .....	17
obr. 4: Průběhy napětí při různé míře spřažení [9].....	18
obr. 5: Pracovní diagram skla [9].....	19
obr. 6: Závislost hustoty čirých křemenných skel na fiktivní teplotě [7].....	21
obr. 7: Dilatační křivka sodnovápenatého skla, dobře vychlazeného [7] .....	23
obr. 8: Délková teplotní roztažnost v závislosti na složení [7] .....	23
obr. 9: Průběh měrného tepla $c_p$ v transformačním intervalu [7].....	25
obr. 10: Teplotní závislost měrného tepla na složení [7] .....	25
obr. 11: Skleník v Chatsworthu, Velká Británie, 1840 [17] .....	28
obr. 12: Skleněné průčelí [18], obr. 13: Skleněná příčka v interiéru [19].....	29
obr. 14: Průnik světelných paprsků přes dutou a plnou tvárnici [23] .....	31
obr. 15: Výroba skleněných tvárníc, firma Poesia Company [23].....	31
obr. 16: Skleněná cihla [21] .....	33
obr. 17: Atocha Monument [25].....	34
obr. 18: Technologie výstavby [25] .....	34
obr. 19: Průčelí Crystal Houses [27] .....	35
obr. 20: Technologie spojování skleněných cihel [27] .....	36
obr. 21: Ocelové rámy na skleněné cihly [28] .....	37
obr. 22: Obličej na Korunní fontáně [29].....	37
obr. 23: Pohled na fasádu z ulice [30].....	38
obr. 24: Zdící prvky zavěšené na závitové tyče [31] .....	39
obr. 25: Schéma zkoušené konstrukce, pohled na neexponovanou stranu .....	40
obr. 26: Umístění termočlánků po tloušťce konstrukce .....	41
obr. 27: Schéma umístění termočlánků z pohledu .....	42
obr. 28: Teplotní průběh požáru během zkoušky .....	43
obr. 29: Zkušební konstrukce během zkoušky [32] .....	43
obr. 30: Pohled na konstrukci během zkoušky, detailní pohled na termočlánky [32] .....	44
obr. 31: Detail stěny z vnitřní strany po požární zkoušce [32] .....	44

---

obr. 32: Průběhy teplot z termočlánků na povrchu skleněné konstrukce [33] .....	45
obr. 33: Teplotní průběhy termočlánků 2, 3 a 8 [33] .....	46
obr. 34: Teplotní průběhy termočlánku 10 [33] .....	46
obr. 35: Teplotní průběh termočlánku 4 [33] .....	46
obr. 36: Teplotní průběh termočlánku 7 [33] .....	47
obr. 37: Teplotní průběh termočlánku 5 [33] .....	47
obr. 38: Teplotní průběhy termočlánků 1 a 9 [33] .....	47
obr. 39: Schématický popis modelu .....	49
obr. 40: Schéma explicitního algoritmu, dopředná diference [36] .....	50
obr. 41: Vztah mezi náhradou diference a druhou derivací [37] .....	51
obr. 42: Grafické schéma explicitního řešení metody sítí [36] .....	51
obr. 43: Ukázka pracovního prostředí MATLAB R2017a [39] .....	52
obr. 44: Teplotní závislost teplotní vodivosti [8] .....	55
obr. 45: Teplotní závislost měrného tepla [8] .....	55
obr. 46: Zkouška skleněné cihly, obr. 47: Upevněný termočlánek na cihle .....	57
obr. 48: Průběh teplotní vodivosti použitý v modelu .....	58
obr. 49: Normová teplotní křivka ISO 834 .....	59
obr. 50: Vývojový diagram modelu .....	62
obr. 51: Teplotní mapa skleněné cihly během požáru .....	63
obr. 52: Teplota na odvráceném povrchu konstrukce .....	64
obr. 53: Teplotní průběh v polovině tloušťky konstrukce .....	65
obr. 54: Teplotní průběh po tl. konstrukce v 15. minutě .....	65
obr. 55: Teplotní průběh po tl. konstrukce v 60. minutě .....	66
obr. 56: Teplotní průběh po tl. konstrukce ve 120. minutě .....	66
obr. 57: Teplotní průběhy požárů .....	68
obr. 58: Souhrn teplotních průběhů na odvráceném povrchu .....	69
obr. 59: Porovnání teplotních průběhů, 33 mm .....	70
obr. 60: porovnání teplotních průběhů, 41 mm .....	70
obr. 61: Porovnání teplotních průběhů, 50 mm .....	71
obr. 62: Porovnání teplotních průběhů, 60 mm .....	71
obr. 63: Porovnání teplotních průběhů, 79 mm .....	71
obr. 64: Porovnání teplotních průběhů, 87 mm .....	72

---

obr. 65: Porovnání teplot, čas 15 minut .....	73
obr. 66: Porovnání teplot, čas 30 minut .....	73
obr. 67: Porovnání teplot, čas 60 minut .....	73
obr. 68: Porovnání teplot, čas 90 minut .....	74
obr. 69: Porovnání teplot, čas 120 minut .....	74
obr. 70: Graf odtávání konstrukce.....	75
obr. 71: Citlivostní analýza – koeficient směrnice $\lambda$ .....	77
obr. 72: Citlivostní analýza – $\kappa_2$ .....	78
obr. 73: Citlivostní analýza – T1.....	79
obr. 74: Citlivostní analýza – T2.....	79
obr. 75: Kritérium I – 15 minut.....	82
obr. 76: Tepelná mapa, I15 .....	82
obr. 77: Tepelná mapa, I30 .....	83
obr. 78: Kritérium I – 30 minut.....	83
obr. 79: Kritérium I – 60 minut.....	84
obr. 80: Tepelná mapa, I60 .....	84
obr. 81: Kritérium I – 90 minut.....	85
obr. 82: Tepelná mapa, I90 .....	85
obr. 83: Kritérium I – 120 minut.....	86
obr. 84: Tepelná mapa, I120 .....	86

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Typický příklad složení skla [2] .....	20
Tabulka 2: Materiálové vlastnosti skla [4].....	21
Tabulka 3: Hodnoty měrného tepla křemenného skla [8].....	25
Tabulka 4: Tepelná vodivost čírého křemenného skla [8].....	26
Tabulka 5: Vlastnosti skleněných cihel Vetropinto [21].....	30
Tabulka 6: Přehled termočlánků ve zkušební konstrukci .....	41
Tabulka 7: Přehled výsledných tloušťek pro dosažení izolační schopnosti .....	87

## 12 Literatura

- [1] VÁCLAV KUPILÍK. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. STAVITEL. B.m.: GRADA, 2006.
- [2] VACEK, Zdeněk. *Sklo jako moderní konstrukční materiál*. 2013
- [3] Kapitoly z tisícileté historie sklářství v Čechách a na Moravě [online]. nedatováno. Dostupné z: [http://www.glass.cz/hist\\_main.htm](http://www.glass.cz/hist_main.htm)
- [4] HALDIMANN, Matthias, Andreas LUIBLE a Mauro OVEREND. *Structural use of glass*. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008. Structural engineering documents, 10. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [5] INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS, ed. *Structural use of glass in buildings*. London: SETO, 1999. ISBN 978-1-874266-51-8.
- [6] ELIÁŠOVÁ, Martina. *Nosné konstrukce ze skla*. 2005. ISBN 80-01-03279-5.
- [7] FANDERLÍK, Ivan. *Vlastnosti skel*. Praha: Informatorium, 1996. ISBN 978-80-85427-91-2.
- [8] FANDERLÍK, Ivan. *Křemenné sklo a jeho využití v praxi*. 1985.
- [9] VOLF, M. B. *Chemická odolnost, hustota a mechanické vlastnosti skel*. Praha: SNTL, 1967.
- [10] FELDMANN, Markus, R KASPER, B ABELN, P CRUZ, Jan BELIS, J BEYER, J COLVIN, F ENSSLEN, Mariana ELIÁŠOVÁ, L GALUPPI, A GEßLER, C GRENIER, A HAESE, H HOEGNER, R KRUIJS, K LANGOSCH, Christian LOUTER, G MANARA, T MORGAN, J NEUGEBAUER, Vlatka RAJČIĆ, Gianni ROYER-CARFAGNI, J SCHNEIDER, S SCHULA, G SIEBERT, Z SULCOVA, Frank WELLERSHOFF, Roko ŽARNIĆ a S DIMOVA. *Guidance for European structural design of glass components: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxemburg: European Union, 2014. ISBN 978-92-79-35094-8.
- [11] LORENZ, Jan. *Master thesis: Numerical analysis of glass pane, A blind point connection*. 2016
- [12] FÍLA, Jiří. *Diplomová práce: Skleněné nosníky ve stavebních konstrukcích*. B.m.: ČVUT v Praze. 2012
- [13] LAUFS, Wilfried a Andreas LUIBLE. *Introduction on use of glass in modern buildings*. B.m.: Whitby Bird & Partners, London. 2003
- [14] MINDA, Branislav. *Diplomová práce: Analýza skrytého kotevního bodu pro skleněné konstrukce*. B.m.: ČVUT v Praze. 2018
- [15] DR. ING. MARTIN MÍKA, ING. FRANTIŠEK LAHODNÝ. *Tavení skla - návod na laboratorní práci*

- 
- [16] LOUTER, BOS, BELIS, VEER. *Challenging Glass 6 -Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. B.m.: Delft University of Technology, 2018. ISBN 978-94-6366-044-0.
- [17] EDITORS IN CHIEF ULRICH KNAACK AND TILLMANN KLEIN GUEST EDITORS ANDREAS LUIBLE, LAURA AELENEI, MARCO PERINO, FRANK WELLERSHOFF AND UTA POTTGIESSER. *Journal of facade design & engineering*. B.m.: TU Delft open Journals, nedatováno. NUMNER 3, VOLUME 6. ISBN 978-94-6366-099-0.
- [18] *Skleněná zábradlí* [online]. Dostupné z: <http://www.alfaglass.cz/sklenene-zabradli/>
- [19] *portfolio OGB* [online]. Dostupné z: <http://www.ogb.cz/portfolio/sklenena-pricka-v-autosalonu/#prettyPhoto>
- [20] EDITORS IN CHIEF ANDREAS LUIBLE, SUSANNE GOSZTONYI. *Facade 2018 - adaptive!* Lucerne, Switzerland: Lucerne University of Applied Sciences and Arts, 2018. ISBN 978-94-6366-102-7.
- [21] *SEVES GLASS BLOCK* [online]. Dostupné z: <http://en.sevesglassblock.com/product>
- [22] Polishing glass facing brick and manufacturing method thereof [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/>
- [23] OIKONOMOPOULOU F., VEER F., NIJSSE R. a BAARDOLF K. *A completely transparent, adhesively bonded soda-lime glass block masonry system* [online]. Dostupné z: <https://content.iospress.com/articles/journal-of-facade-design-and-engineering/fde0021>
- [24] CEN/TC 129. *ČSN EN 1051-1 Sklo ve stavebnictví: skleněné tvárnice a skleněné dlaždice. Část 1: Definice a popis*
- [25] Atocha Monument Madrid - 11 March Memorial. *e-architect* [online]. 18. prosinec 2007 [vid. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.e-architect.co.uk/madrid/atocha-monument-madrid>
- [26] *MVRDV - Crystal Houses* [online]. [vid. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.mvrdv.nl/>
- [27] OIKONOMOPOULOU, F., T. BRISTOGIANNI, F. A. VEER a R. NIJSSE. The construction of the Crystal Houses façade: challenges and innovations. *Glass Structures & Engineering* [online]. 2018, 3(1), 87–108. ISSN 2363-5142, 2363-5150. Dostupné z: doi:10.1007/s40940-017-0039-4
- [28] *Crown Fountain | Millennium Park Foundation* [online]. [vid. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://millenniumparkfoundation.org/places/crown-fountain/>
- [29] HILL, John. *Crown Fountain* [online]. [vid. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://archidose.blogspot.com/2005/03/crown-fountain.html>
- [30] Hiroshi Nakamura & NAP: Optical glass house. *designboom | architecture & design magazine* [online]. 21. leden 2013 [vid. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.designboom.com/architecture/hiroshi-nakamura-nap-optical-glass-house/>
-

- 
- [31] Optical Glass House / Hiroshi Nakamura & NAP. *ArchDaily* [online]. 20. prosinec 2017 [vid. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/885674/optical-glass-house-hiroshi-nakamura-and-nap>
- [32] ŠPLÍCHALOVÁ LENKA. *Fotografie z experimentu, Duchcov*. 2017
- [33] LUBOŠ CHÝLE, ZDENĚK SOKOL. *Data z experimentu, Duchcov*
- [34] PROF. ING. JINDŘICH PETRUŠKA, CSC. Řešení úloh vedení tepla a teplotní napjatost pomocí MKP. In: . Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [35] DAVID MAŠÍN. Numerické metody. In: . Karlova Univerzita v Praze.
- [36] Numerické metody - schéma sítě. In: . B.m.
- [37] ING. ZDENĚK SOKOL, PH.D. Prezentace: Metody sítí. In: . B.m.
- [38] ZDENĚK PUCHOLT. *Vedení tepla*. B.m.: katedra experimentální fyziky přírodovědecké fakulty univerzity Palackého v Olomouci. 2013
- [39] MATLAB [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [40] Š. SAMAROVÁ, ING. V. TESAŘOVÁ. *Chemický rozbor cihel*. 26. leden 2018
- [41] ÚNMZ. *ČSN EN 1993-1-2., Navrhování ocelových konstrukcí na účinky požáru*, 2007