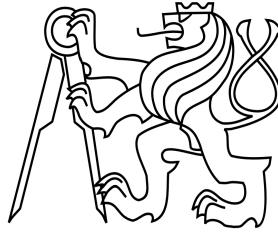


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ ZDĚNÉ SKLENĚNÉ STĚNY PŘI POŽÁRU

NUMERICAL MODELLING OF GLASS BRICK WALL EXPOSED TO FIRE

Bc. Anna Benedová

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

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Benedová, roz. Vacíková Jméno: Anna Osobní číslo: 459901
Zadávající katedra: K134
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Numerické modelování zděné skleněné stěny při požáru
Název diplomové práce anglicky: Numerical Modelling of Glass Brick Wall Exposed to Fire

Pokyny pro vypracování:

Modelování stěny ze skleněných cihel vystavené požáru, určení průběhu teploty po tloušťce, porovnání modelu s experimentem, numerická studie: průběh teploty v typických konstrukčních detailech stěny (roh, kout, přizdížený pilířek), určení kritéria I pro stěnu

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Zdeněk Sokol

Datum zadání diplomové práce: 2/10/2020 Termín odevzdání diplomové práce: 4/1/2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Anna Benedová
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 17. 01. 2021

.....
Bc. Anna Benedová

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji své rodině za veškerou podporu po celou dobu mého studia. Také bych chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce, Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D., za věcné připomínky a odborné vedení. V neposlední řadě děkuji Ing. Lence Hejhalové a Bc. Jirkovi Peterkovi za poskytnutí srovnávacích údajů.

Obsah

1 Úvod.....	3
1.1 Motivace.....	3
1.2 Cíle práce.....	3
2 Současný stav poznání.....	4
2.1 Základní vlastnosti skla.....	4
2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti.....	5
2.1.2 Měrná tepelná kapacita.....	9
2.1.3 Objemová hmotnost.....	10
2.1.4 Teplotní oblast měknutí.....	12
2.2 Dělení skel.....	13
2.2.1 Dle složení.....	13
2.2.2 Dle tepelné úpravy.....	13
2.2.3 Sklo ve stavebnictví.....	14
2.3 Princip požárně odolných skel.....	14
2.3.1 Sklo s drátěnou vložkou.....	15
2.3.2 Vrstvené sklo s vloženou fólií.....	15
2.3.3 Keramické sklo.....	16
2.4 Příklady užití skleněných cihel.....	16
2.4.1 Optical Glass House v Hirošimě.....	16
2.4.2 Atocha Memorial v Madridu.....	17
2.4.3 Chrystal Houses v Amsterdamu.....	18
2.4.4 Projekt nové věže v Isny.....	18
3 Řešený příklad.....	19
3.1 Experiment.....	19
3.1.1 Měřené hodnoty.....	20
3.2 Tvorba numerického modelu.....	21
3.2.1 Materiálové charakteristiky.....	21
3.2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti skla.....	21
3.2.1.2 Měrná tepelná kapacita skla.....	24
3.2.1.3 Objemová hmotnost skla.....	24
3.2.1.4 Součinitel tepelné vodivosti malty.....	25
3.2.1.5 Měrná tepelná kapacita malty.....	26
3.2.1.6 Objemová hmotnost malty.....	26
3.2.2 Další vstupní údaje.....	26
3.3 Porovnání s experimentem.....	27
3.4 Aplikace modelu.....	34
4 Závěr.....	40
Seznam obrázků a tabulek.....	45

Abstrakt

Diplomová práce shrnuje dosavadní poznatky o materiálových charakteristikách skla a malty, potřebných k vypracování numerického modelu, a také popisuje konkrétní použití skleněných cihel v mezinárodních stavbách. V praktické části je vypracován numerický model, který je porovnán s experimentem a aplikován na konstrukční detaily rohu. Nakonec je vyhodnoceno kritérium izolace pro dané konstrukce stěny.

Klíčová slova

tečení skla; skleněné zděné konstrukce; Optical Glass House; Atocha Memorial; Crystal Houses; kritérium izolace, numerický model

Abstract

The work summarizes the current knowledge about material characteristics of glass and mortar needed for creating the numerical model. There is practical usage of glass brick masonry mentioned in this work. Numerical model is confronted with data from experiment and applied to construction details. At the end, the insulation standard is assessed.

Keywords

melting point of glass; solid glass brick; glass block; glass brick masonry; Optical Glass House; Atocha Memorial; Crystal Houses; numerical modelling

1 Úvod

1.1 Motivace

Sklo je jedním z nejstarších stavebních materiálů. V současné architektuře oslovuje svými praktickými i estetickými vlastnostmi stále více a pomáhá naplňovat kreativní vize architektů a designerů.

Díky novým výzkumům může být sklo používáno novými způsoby a uplatní se i tam, kde dříve nemohlo. Proto bych ráda přispěla k většímu uplatňování nosných konstrukcí z plných skleněných cihel. Pro uplatnění v požárně dělicích konstrukcích je zapotřebí testování skleněných konstrukcí za různých podmínek. Aby se ušetřil čas a peníze, je snaha o pokročilé modelování metodou konečných prvků. To je zatím ztížené nedostatkem standardizovaných postupů a hlavně nedostatečným stanovením mechanických a tepelných vlastností materiálu.

1.2 Cíle práce

Hlavními cíli práce jsou:

- 1) shrnutí současných poznatků o tepelných vlastnostech skla a výstavbě z plných skleněných cihel,
- 2) tvorba numerického modelu šíření tepla konstrukcí z plných skleněných cihel při zatížení normovou teplotní křivkou,
- 3) porovnání s experimentem,
- 4) aplikace modelu a stanovení kritéria izolace pro různé konstrukční detaily.

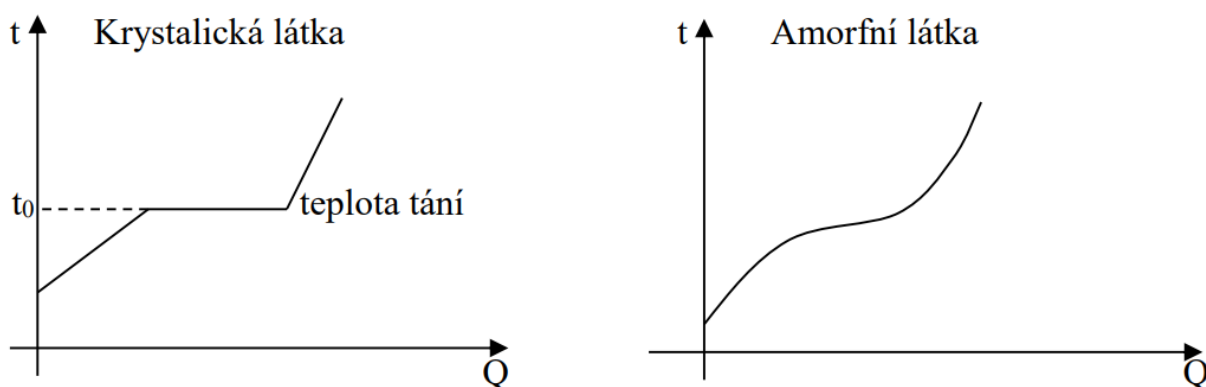
2 Současný stav poznání

V této kapitole jsou úvodem představeny základní vlastnosti skla, aktuální stav výzkumu vlastností zásadních pro šíření tepla a dělení skel s důrazem na jejich požární odolnost. Následuje část věnovaná skleněným cihlám, jejich vývoji a použití.

2.1 Základní vlastnosti skla

Sklo je jedním z nejstarších stavebních materiálů. Ještě dříve, než mezopotámští mistři vynalezli techniku výroby skla, používali lidé přírodní skla jako nástroje i jako ozdoby. Sklo totiž vzniká relativně rychlým ochlazením roztavené hmoty, v přírodě tedy například vulkanickou činností, či po úderu blesku nebo při důlních požárech.

Při rychlém ochlazení látka nemá dost času vytvořit krystalickou strukturu a zůstane tedy v amorfním stavu. Amorfní struktura je méně stabilní, proto v ní může docházet k dodatečnému pozvolnému krystalizačnímu procesu. Taková krystalizace trvající po tisíciletí pak může mít i destruktivní charakter. [1] Přestože jsou amorfní látky pevné, lze je považovat za tzv. podchlazené kapaliny s vysokou viskozitou. K jejich tání nedochází náhle po dosažení určité teploty, ale se zvyšováním teploty postupně měknou. Místo bodu tání je tedy možné mluvit o oblasti měknutí (viz obr. 1). [2]



obr. 1: Grafy závislosti teploty t [$^{\circ}\text{C}$] na dodaném teple Q [kJ]

Mezi charakteristické vlastnosti skla patří relativně vysoká propustnost světla v části viditelného spektra, tuhost a tvrdost při běžných teplotách a křehkost, významná při používání skla především v tenkostěnných výrobcích. Dále se sklo vyznačuje také homogenitou, odolností proti povětrnostním a chemickým vlivům, relativně vysokou odolností proti vodě a vzduchu, plynotěsností a relativně nízkou měrnou tepelnou a elektrickou vodivostí. [1]

Nejdůležitějšími vlastnostmi z hlediska šíření tepla jsou součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost a měrná tepelná kapacita. Vlastnosti skla jsou závislé na teplotě (podrobněji je tato závislost řešena pro každou sledovanou vlastnost zvlášť v příslušné kapitole) a na chemickém složení, tedy na použití jednotlivých sklářských složek a jejich poměrném množství. Pro zjednodušené příklady lze uvažovat průměrný rozsah hodnot pro běžné sklo (viz tab. 1), pro přesnější výsledky je ale vhodné zjistit konkrétní hodnoty pro konkrétní sklo.

tab. 1: Mechanické a fyzikální vlastnosti běžného skla [1]

Vlastnost	Velikost a rozměr
Hustota	2200 – 3600 kg.m ⁻³
Pevnost v tlaku	700 – 1200 MPa
Pevnost v tahu	30 – 90 MPa
Pevnost v ohybu	40 – 190 MPa
Modul pružnosti	50 – 90 GPa
Součinitel délkové teplotní roztažnosti (ploché sklo)	6 až 9.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti	0,6 – 0,9 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Poissonův součinitel	0,14 – 0,32 (-)
Tvrдость podle Mohsovy stupnice	6 – 7 (odpovídá tvrdosti křemene a živce)

Chemické složení ovlivňuje zejména viskozitu, teplotní oblast měknutí a součinitel teplotní roztažnosti skla. Závislost vlastností na chemickém složení lze vyjádřit takzvanou aditivitou. Sklo lze v této metodě považovat za soustavu jednotlivých oxidů, které jsou zastoupeny v určitém poměru. Princip aditivního výpočtu se aplikuje zjišťováním, jak je který oxid kvantitativně ve skle zastoupen a jak moc ovlivňuje sledovanou vlastnost. Následně lze určit aditivní faktor daného oxidu a empirický vztah pro výpočet sledované vlastnosti. Tabelované aditivní faktory nezahrnují obvykle celý rozsah chemického složení a jsou stanoveny jen pro určité okrajové podmínky. [3]

2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti ukazuje, kolik tepla projde jednotkovou tloušťkou daného materiálu při jednotkovém teplotním spádu. Zjednodušeně lze říct, že popisuje schopnost daného materiálu vést teplo. Je definován vztahem:

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad } \theta} \quad [\text{W}/(\text{mK})], \quad (1)$$

kde q je hustota tepelného toku sdíleného vedením v izotropním materiálu [W.m⁻²] a $\text{grad } \theta$ je gradient teploty [m.K⁻¹]. Záporné znaménko ukazuje pozitivní tok tepla ve směru snižující se teploty.

V materiálech prostupných pro tepelné záření se teplo šíří kromě vedením (kondukcí) také sáláním (radiací). Podíl sálání se jeví jako významný u teplot vyšších než 300 °C a roste se vzrůstající teplotou. Při vyšších teplotách, kdy je sklo ve formě tavenin, působí také přenos prouděním (konvekcí).[4]

Pro modelování prostupu tepla materiálem je součinitel tepelné vodivosti zcela zásadní. Existuje mnoho měření tepelných i ostatních vlastností skel. Dostupné prameny zahrnují spíše souhrn měřených dat, ačkoli některé se zmínily také o jejich porovnávání. [5], [6] Při měření však často dochází k mnohým potížím a nejednotným podmínkám (obtížné zabránění ztrátám tepla do okolí, měření teplot přesně na povrchu či vliv šíření tepla sáláním).

Zejména obtížné je měření tepelné vodivosti při vyšších teplotách asi od 400 °C, kdy se začíná uplatňovat tepelný tok sáláním. Sálavá tepelná vodivost (photonová) je totiž oproti tzv. pravé tepelné vodivosti (phononové) závislá nejen na materiálu, ale také na geometrii tělesa, na teplotě a na vnějších podmínkách. Proto jsou nejčastěji udávány hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro teploty asi do 400 °C. [7] Většina zdrojů udává hodnoty pouze pro několik teplot, jak lze vidět například na obr. 2.

TABLE 8.10
Thermal Conductivity of Na₂O–CaO–SiO₂ Glasses

Composition (mole %)			λ (W m ⁻¹ deg ⁻¹) at			Reference ^a
Na ₂ O	CaO	SiO ₂	0°C	30°C	100°C	
18	5	77	0.933		1.043	1
18	10	72	0.910		1.016	
18	15	67	0.905		0.972	
39.27	2.50	58.23		0.644		2
39.51	4.52	55.98		0.634		
39.30	7.49	53.12		0.625		
39.29	10.02	50.69		0.657		

^a Data from (1) Russ (1928) and (2) Ammar *et al.* (1982b, 1983).

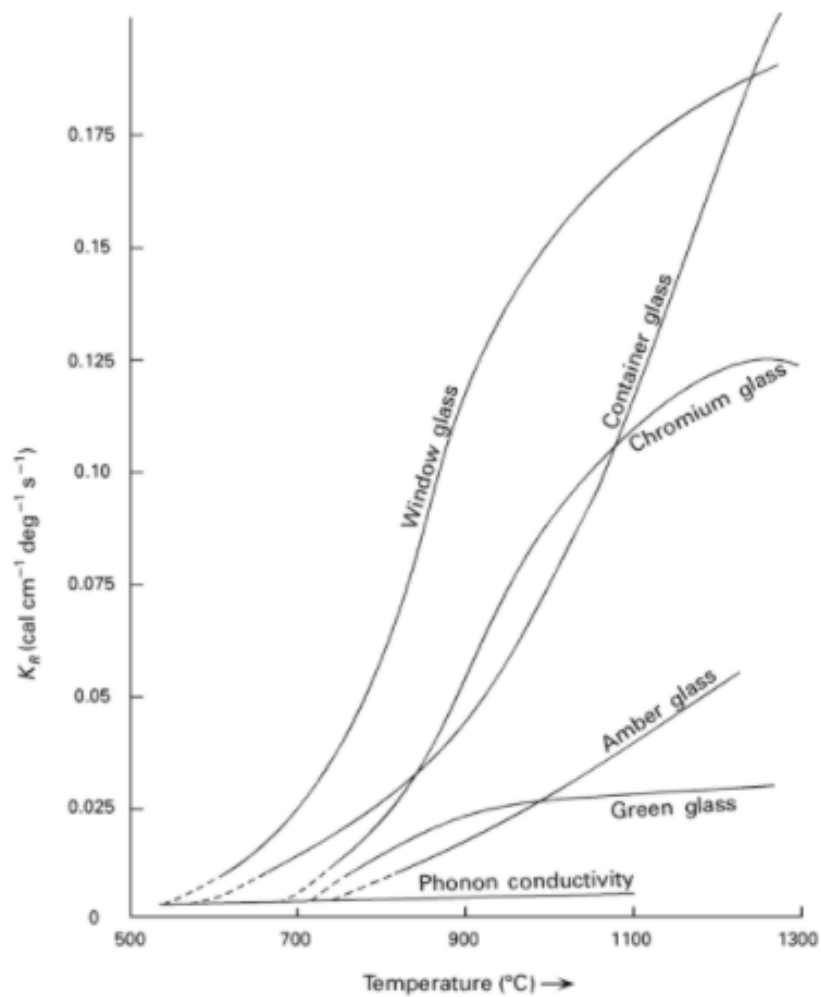
obr. 2: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti „Narottam - Russ“ [5]

Následující tabulka (tab. 2) zobrazuje hodnoty součinitele tepelné vodivosti po odstranění vlivu radiace, a to pro sklo se zastoupením oxidů: SiO₂ 72 %, Na₂O 13 %, CaO 8 %, Al₂O₃ 2 %, MgO 3 %, K₂O 1 % a jiné 1 %.

tab. 2: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti „Kiyohashi“ [8]

Teplota [K]	Součinitel tepelné vodivosti [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
303	0,92
573	1,19
773	1,20
973	1,37
1073	1,48
1173	1,59
1273	1,80
1373	2,23
1473	3,15

Na obr. 3 je naopak zobrazen průběh samotné radiální tepelné vodivosti. Lze si všimnout, že byl sálavý tepelný tok měřen až od 500 °C.



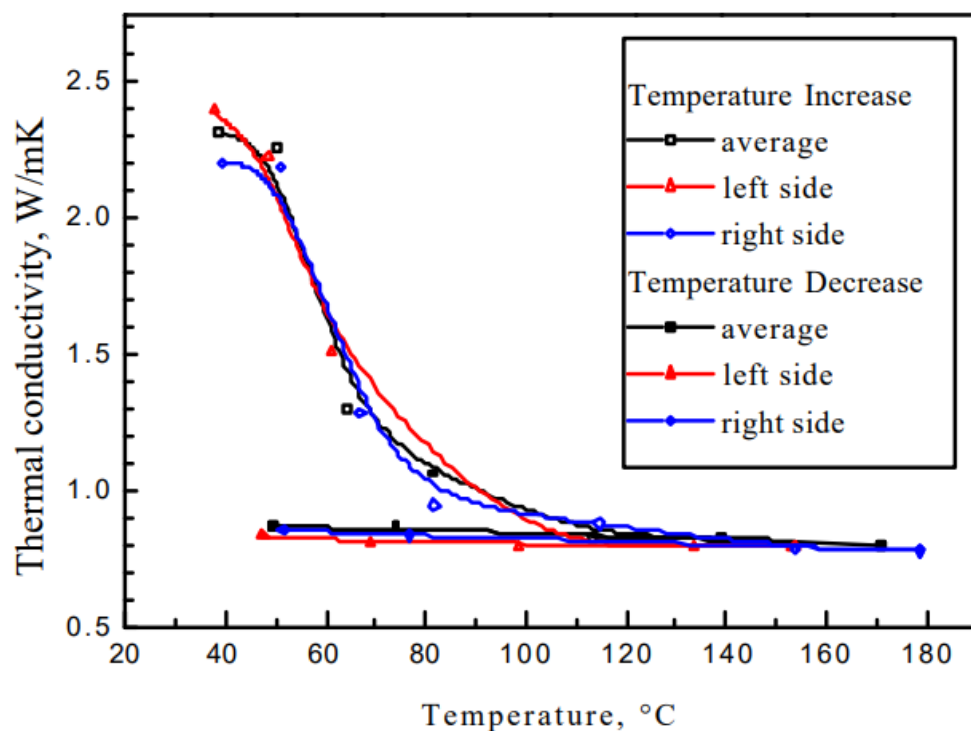
obr. 3: Graf závislosti radiální tepelné vodivosti na teplotě „Varshneya“ [9]

Během 90. let minulého století se začalo prosazovat také matematické modelování výroby skla. Mezinárodní sklářská komise založila dva technické výbory pro modelování procesů tavení a modelování výrobních procesů. Jejich primárním cílem bylo získat přesná data pomocí jednotného způsobu měření, neboť si byli vědomi toho, že přesnost modelu závisí na přesnosti vstupních údajů a že dostupnost věrohodných údajů o měknutí skla při vysokých teplotách byla téměř nulová. [10] Dá se předpokládat, že věrohodné údaje jsou poté shrnuty v těchto zdrojích, [11], [12] přestože nejsou momentálně k dispozici.

Novodobé výzkumy [13] se zabývají mechanismem přenosu energie a různými jeho modely. Základními modely jsou model kvantového tunelování pro nižší teploty a model fononového plynu pro teploty vyšší. Snaha těchto výzkumů je pomocí modelů popsat závislost tepelné vodivosti na teplotě pro co nejvíce možných případů. Objem těchto poznatků je ovšem nad rámec této diplomové práce.

Také pro maltu je součinitel tepelné vodivosti velmi ovlivněn složením a teplotou. Se snižujícím se poměrem cementu k písku se snižuje i součinitel tepelné vodivosti (zatímco pro maltu z jednoho dílu cementu a dvou dílů písku je součinitel roven $2,43 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, pro poměr 1:8 je součinitel roven $1,54 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). [14]

Závislost na teplotě lze sledovat z pohledu nárůstu teploty a z pohledu chladnutí. Při zahřívání součinitel nejrychleji klesá mezi $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a po odpaření vody se hodnota výrazně nemění (viz obr. 4)



obr. 4: Graf závislosti tepelné vodivosti malty na teplotě [15]

2.1.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita (měrné teplo) c [$\text{J}/(\text{kgK})$] vyjadřuje množství tepelné energie, kterou je potřeba dodat 1 kg materiálu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \text{grad} \theta} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}], \quad (2)$$

kde Q je teplo látky dodané/odebrané [J], m je hmotnost [kg] a $\text{grad} \theta$ je gradient teploty [$\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$].

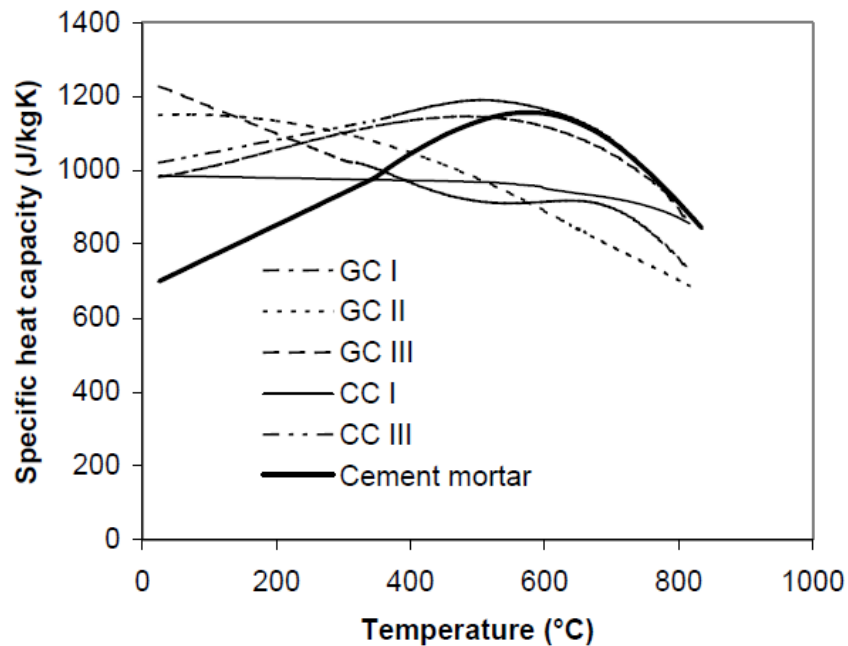
Měrná tepelná kapacita se mění v závislosti na vlhkosti a teplotě materiálu. Závislost na vlhkosti je způsobena měrnou tepelnou kapacitou vody ($4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), která má ze všech běžně známých látek kromě plynného vodíku ($14\,304 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu. Se zvyšující se vlhkostí měrná tepelná kapacita roste. Vztah mezi teplotou materiálu a jeho měrnou tepelnou kapacitou nelze popsat žádným obecně platným vzorcem. Tato závislost je zcela individuální pro každý druh materiálu. [1]

Měrná tepelná kapacita skla se vzrůstající teplotou roste a neobsahuje žádné měrné teplo skupenské přeměny, jako mají krystalické látky. První známé hodnoty (viz tab. 3) pro čisté křemičité sklo byly změřeny již v roce 1927 [16] a jsou využívány dodnes. Měrná tepelná kapacita je u čistého křemičitého skla vyšší než u alkalickoolovnatokřemičitých skel. Naopak je nižší než měrná tepelná kapacita borosilikátového a sodnovápenatokřemičitého skla. [17]

tab. 3: Měrná tepelná kapacita čisté křemičitého skla [16] a sodnovápenatokřemičitého skla [17]

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Měrná tepelná kapacita křemičitého skla [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita sodnovápenatokřemičitého skla [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
0	0,6937	0,7494
50	-	0,8374
100	0,8415	0,9169
200	0,9504	1,0383
300	1,0257	1,1304
400	1,0886	1,2016
500	1,1304	1,2560
600	1,1513	1,2979
700	1,1765	1,3272
800	1,1974	1,3481
900	1,2100	1,3649
1000	1,2225	1,3816
1100	1,2309	-
1200	1,2686	-

Na obr. 5 lze vidět průběh teplotní závislosti měrné tepelné kapacity malty, označené jako cement mortar. Ostatní průběhy se vztahují k cementovým pojivům vyztuženým skleněnými a uhlíkovými vlákny.



obr. 5: Graf závislosti měrné tepelné kapacity malty na teplotě [18]

2.1.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost skla je velmi závislá na jeho složení. Nejnižší hodnoty můžeme najít u čistě křemičitého skla 2200 kg.m^{-3} , horní hranici tvoří sklo olovnaté s 6000 kg.m^{-3} .

Pro sklo obsahující 67 až 76 hmotnostních procent SiO_2 lze vypočítat hustotu při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ pomocí aditivního empirického vztahu:

$$d = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{\frac{a_1}{f_1} + \frac{a_2}{f_2} + \dots + \frac{a_n}{f_n}} = \frac{100}{\sum \frac{a_i}{f_i}} \quad [\text{g/cm}^3], \quad (3)$$

kde d je hustota skla při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ v g/cm^3 , a_i je hmotnostní procento oxidu ve skle a f_i je aditivní faktor i -tého oxidu.

V následující tabulce (tab. 4) jsou sepsány aditivní faktory pro některé oxidy.

tab. 4: Tabulka aditivních faktorů pro hustotu [3]

Oxid	Aditivní faktor
SiO_2	2,24

Al ₂ O ₃	2,75
CaO	4,30
MgO	3,25
PbO	10,30
Na ₂ O	3,20
K ₂ O	3,20

Závislost objemové hmotnosti na teplotě lze popsat pomocí součinitele teplotní roztažnosti. Materiál se zahříváním rozpíná, přičemž se zákonitě objemová hmotnost zmenšuje.

Součinitel teplotní roztažnosti, který je spjatý s objemovou hmotností, má pro čistě křemičité sklo hodnotu $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a pro sodnovápenatokřemičité sklo $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. [19] Pro potvrzení z jiného zdroje součinitel teplotní roztažnosti sodnovápenatokřemičitého skla má hodnotu $85 - 90 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ při teplotě $-20 \text{ °C} - 40 \text{ °C}$. [20]

Pro lineární součinitel teplotní roztažnosti lze také provést aditivní výpočet zohledňující přesné chemické složení skla podle vztahu:

$$\alpha \cdot 10^7 = \sum a_i f_i \quad [-], \quad (4)$$

kde α je lineární součinitel teplotní roztažnosti, a_i je hmotnostní procento oxidu ve skle a f_i je aditivní faktor i-tého oxidu.

V následující tabulce (tab. 5) jsou sepsány aditivní faktory pro některé oxidy.

tab. 5: Tabulka aditivních faktorů pro teplotní roztažnost [3]

Oxid	Aditivní faktor
SiO ₂	0,05
Al ₂ O ₃	0,14
CaO	1,63
MgO	0,45
PbO	1,06
Na ₂ O	4,32
K ₂ O	3,90

Tento aditivní výpočet platí pro teplotní rozsah 25 °C až 95 °C . Pro rozsah 100 až 300 °C se vypočtená hodnota vynásobí číslem 1,08. [3]

2.1.4 Teplotní oblast měknutí

V úvodu kapitoly 2.1 bylo vysvětleno, proč se u skel (a dalších amorfních materiálů) nemluví o bodu tání, ale spíše o oblasti měknutí. Nejlépe lze pozorovat chování skla za různých teplot pomocí viskozity. Se zvyšováním teploty se sklo stává tekutějším a jeho odpor proti tečení (viskozita) se snižuje. Jednotkou viskozity je poise [P] (starší jednotka systému centimetr-gram-sekunda), v soustavě SI pak $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ (newton sekunda na metr čtvereční) nebo také Pa.s (pascal sekunda). Jeden poise je roven 0,1 Pa.s.

Pro různou viskozitu skla se používají určité termíny, které pomáhají při orientaci a stanovení sklářských pracovních postupů. Flow point je teplota, při které sklo začíná volně téct. Working point je teplota, při které se sklo snadno tvaruje, deformuje. Při teplotě softening point se sklo deformuje svojí vlastní vahou. Annealing point představuje teplotu, při které je redukováno vnitřní napětí na stanovenou hodnotu po dobu 15 min. Strain point popisuje teplotu, při které je vnitřní tření redukováno po dobu 4 hodin. [17]

Ačkoli se sklo uvažuje jako kapalina i po ztuhnutí a nemá žádné měrné skupenské teplo, užívá se pojem teplota změny stavu (transition temperature nebo také transformation temperature). Jde o teplotu, při které dojde k tuhnutí a pohybuje se zhruba kolem 530 °C pro sodnovápenatokřemičité sklo. [19][21]

Teplota tání (flow point) čistě křemičitého skla je zhruba 1710 °C, přidáním oxidů sodíku, draslíku či vápníku klesá až k rozmezí 1300 °C – 1600 °C. [19]

V následující tabulce (tab. 6) lze porovnat hraniční viskozity a teploty dvou různých zdrojů [17][19] a také porovnat hodnoty pro sodnovápenatokřemičité sklo (teplota „Shand“ a teplota „Haldimann“) s hodnotami pro sklo borokřemičité (poslední sloupec). Borokřemičitá skla odolávají vyšším teplotám než skla sodnovápenatokřemičitá.

tab. 6: Tabulka hraničních hodnot viskozity

	Viskozita „Shand“ [P]	Teplota „Shand“ [°C]	Viskozita „Haldimann“ [Pa.s]	Teplota „Haldimann“ [°C]	Teplota pro borosilikáty [°C]
strain	$10^{14,5}$	505	$10^{15,5}$	506	530
transformation	-	-	$10^{14,3}$	530	560
annealing	10^{13}	548	10^{14}	540	570
softening	$10^{7,5} - 10^8$	730	$10^{8,6}$	720	830
working	-	-	10^5	1040	1280
flow	10^5	920	-	-	-

2.2 Dělení skel

V této kapitole je zařazen stručný přehled o různých typech skel a o jejich použití.

2.2.1 Dle složení

Sklo se vyrábí společným tavením sklářského kmene, čeřiv a skleněných střepů. Jeho složení se vyjadřuje pomocí obsahu oxidů. Základní složkou sklářského kmene je křemičitý písek s obsahem SiO_2 zhruba 60 % až 80 %. Pro upravení rozpustnosti a chemické odolnosti se přidává oxid vápenatý ve formě mletého uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Také alkalické oxidy se přidávají ve formě uhličitanů (sody Na_2CO_3 a potaše K_2CO_3). Sodné sloučeniny snižují teplotu tavení, draselné zvyšují tvrdost.[1]

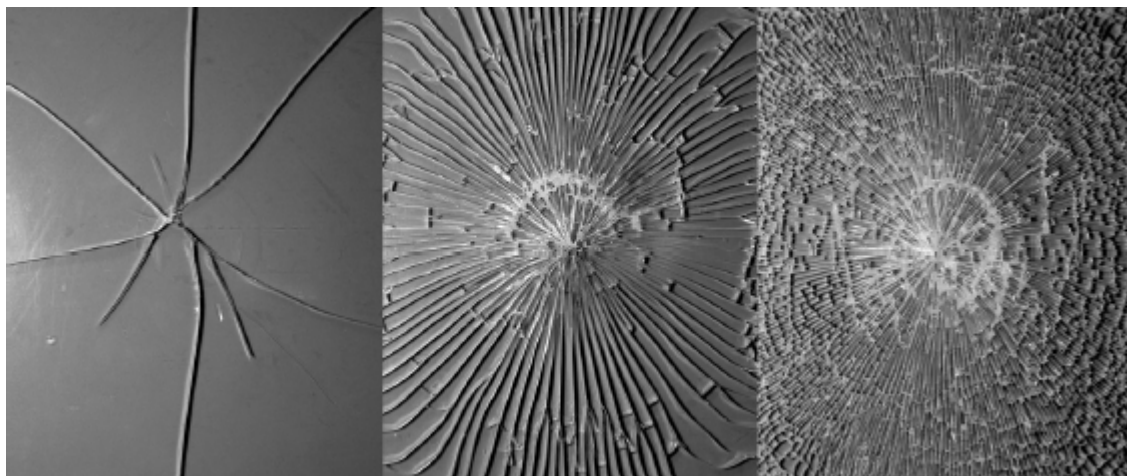
Nejběžnějším druhem skla je sodnovápenatokřemičité sklo. Používá se jako ploché, obalové a užitkové sklo. Je nejčastěji užívaným sklem ve stavebnictví. Mezi další významné skupiny se řadí křemičité sklo a borokřemičité sklo. Křemičité sklo se používá zejména v osvětlovacím a polovodičovém průmyslu. Se svou vyšší teplotu tavení je odolnější vůči teplotám, a proto také dražší. Borokřemičitá skla mají nejnižší tepelnou roztažnost, proto se uplatní tam, kde jsou dlouhodobě tepelně namáhaná. Jsou odolná vůči účinkům vody, vodní páry, kyselinám i roztokům solí. Draselná a olovnatá skla se označují za křišťálová. Slouží tedy především uměleckým a dekoračním účelům. Pro speciální účely se vyrábí skla fluoridová, fosforečná, chalkogenidová, ... [22]

2.2.2 Dle tepelné úpravy

Tepelné zpevnění je základním postupem, jak zlepšit odolnost skla. Princip spočívá v tom, že díky zvýšení povrchové teploty koncentruje tahové napětí v jádru skleněného prvku a na povrchu, kde hrozí tahové porušení v místě různých nedokonalostí, vzniká tlakové napětí. Dokud je tahové namáhání od zatížení menší než předem vnesené tlakové napětí, nedochází k náhlému tahovému porušení ani k rozvoji trhlin. [19]

Z hlediska zpevnování rozlišujeme plavené sklo, tepelně zpevněné sklo, tvrzené sklo a chemicky zpevněné sklo. Základním rozdílem jsou jejich mechanické vlastnosti a způsob porušení. Plavené sklo je zcela bez tepelné úpravy. Vykazuje nejnižší mechanickou pevnost. Při porušení vznikají velké střepy, které zajišťují větší zbytkovou pevnost oproti sklům s tepelnou úpravou. Tepelně zpevněné sklo je mnohdy výhodným kompromisem mezi vlastnostmi před porušením a vlastnostmi po porušení. Na obr. 6 je patrné, že střepy z tepelně zpevněného skla jsou menší, než střepy nezpevněného skla, a zároveň větší, než střepy tvrzeného skla. Tvrzené sklo má nejvyšší mechanickou pevnost a při porušení se rozbije na velmi malé střepy (zhruba

1 cm²), které mohou být vnímány jako méně nebezpečné. Zbytková pevnost po porušení je však velmi malá. [19]



obr. 6: Porovnání porušení: plavené (nezpevněné) sklo (vlevo), tepelně zpevněné sklo (uprostřed), tvrzené sklo (vpravo) [19]

2.2.3 Sklo ve stavebnictví

Sklo je materiál, který nalezneme snad v každé pozemní stavbě. Kompaktní ploché sklo může být plavené či válcované a právě plavené kompaktní sklo se používá především na zasklení oken, dveří, přepážek a stěn. Také je výchozím materiálem pro výrobu dalších druhů skla (determální skla, zrcadlová skla, bezpečnostní skla, ...). [1]

Sklo válcované se vyrábí kontinuálním litím a válcováním mezi dvěma kovovými válci. Výsledné sklo není průhledné, ale průsvitné. Povrchy se tedy vždy musí vyleštit, aby se dosáhlo opravdu čistého skla. Válcované sklo se vyskytuje ve tvaru plochem, tvaru U a tvaru trubky. [19] Používá se zejména na zasklení konstrukcí (světlíků, dveří, vrat, stěnových přepážek aj.).

2.3 Princip požárně odolných skel

Pro hodnocení požární odolnosti se používají různá kritéria. Základní je kritérium celistvosti (E). Aby bylo toto kritérium splněno, nesmí v konstrukci po stanovenou dobu vzniknout trhliny a otvory většího rozměru, nesmí se vznítit přiložený bavlněný polštářek a nesmí se objevit na neohřívané straně souvislé plameny. Dalším kritériem je kritérium snížené radiace (W). Jde o dobu, po kterou maximální hodnota radiace na neohřívaném povrchu nepřekročí 15 kW.m⁻². Posledním kritériem pro plnění požárně dělicí funkce je kritérium izolace (I). To po stanovenou dobu omezuje vzrůst průměrné teploty na neohřívaném povrchu na 140 °C nad průměrnou počáteční teplotu, přičemž maximální bodový vzrůst teploty v kterémkoli místě nesmí být více než 180 °C. [23]

Běžné tenkostěnné sklo při požáru popraská během několika minut v důsledku rozdílné teploty obou povrchů. Kalení a tvrzení tuto dobu prodlouží, ale ne o mnoho. Proto se objevila tzv. protipožární skla.

V budovách se používají různé typy protipožárního zasklení: a) vrstvené sklo z různých skel a s různou fólií (alespoň jedna bývá intumescentní), b) sklo s drátěnou vložkou, c) keramické sklo, d) vrstvené sklo spojované pryskyřicí, e) vrstvené sklo spojované gelem, f) tepelně zpevněné AES sklo (alkaline earth silicate). [21] Některé typy jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

2.3.1 Sklo s drátěnou vložkou

Ploché sklo s drátěnou vložkou vzniká poprvé v roce 1898. [24] Drátěná síť se do skla přidává při výrobě plochého válcovaného skla. Dříve se sklo s drátěnou vložkou zahrnovalo mezi bezpečnostní a protipožární skla, dnes už je ale překonáno vrstveným lepeným sklem. [19]

Vrstvené sklo s drátěnou vložkou většinou popraská ještě dříve než obyčejné sklo, kvůli pnutí vzniklému rozdílnou teplotou povrchů. Jejich bezpečnostní přínos spočívá pouze v tom, že drátěná vložka drží střepy na místě. [21]

2.3.2 Vrstvené sklo s vloženou fólií

Vrstvené sklo se skládá ze dvou a více skleněných tabulí spojených dohromady průhlednou plastickou mezivrstvou. Skleněné tabule mohou být rozdílných tloušťek i rozdílného tepelného zpracování. Nejčastěji dochází k laminování v autoklávu při zhruba 140 °C. Zalaminování plastické vrstvy výrazně zlepšuje chování prvku po prasknutí skla. Čím větší jsou střepy, tím větší zbytkovou únosnost prvek má. Proto dosahují lepších výsledků vrstvená skla z tepelně zpevněných tabulí či z plaveného skla. [19]

Vrstvené sklo bylo vyvinuto pro automobilový průmysl na počátku 20. století. [21] Výhodou je dosažení požadované tuhosti a nosnosti použitím běžných tloušťek skel pouze jejich slepením. Dalším nesporným přínosem je bezpečnost při porušení skla, střepy jsou drženy fólií a snižují se tak rizika poranění.

Jako spojovací fólie je většinou použita PVB (polyvinyl butyral) fólie, ionoplast či EVA (ethylene-vinyl acetate) fólie. Spojovací fólie jsou charakterizované jako viskózní, a proto jsou citlivé na teplotní a dlouhodobé zatížení. Mezi další nevýhody patří relativně nižší pevnost ve smyku, než vykazuje běžné sklo, a to i při pokojové teplotě. [21]

Kromě průhledných folií jsou k dispozici na trhu také barvené či potištěné folie. Dokonce se používají fólie k ukrytí fotovoltaických článků či světelných diod (LED). Pro protipožární

účely s používají vrstvy intumescentní. Po prasknutí první tabule skla se vrstva zakalí a zvýší svůj objem. Tím vytvoří izolaci před druhou tabulí skla. [19]

2.3.3 Keramické sklo

Sklokeramika je materiál vytvářený řízenou krystalizací skla za zvýšených teplot. Svou strukturou získává vyšší pevnost a volbou složení lze ovlivnit další vlastnosti. Sklokeramika lithnohlinitokřemičitá má téměř nulovou teplotní roztažnost a je velmi odolná vůči teplotním rázům. Keramické sklo nejčastěji najdeme jako varné desky či v křbových dvířkách, kde se uplatní vyšší součinitel tepelné vodivosti sklokeramiky ve srovnání například s tvrzeným sklem. [25]

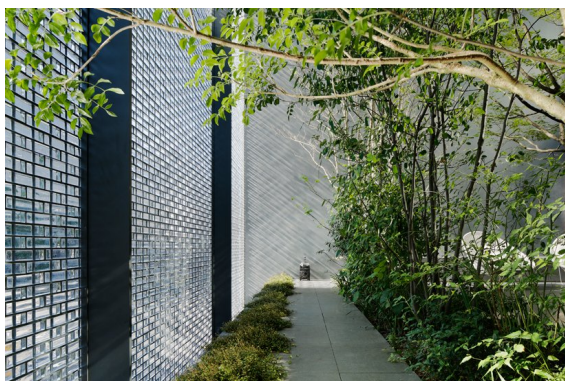
2.4 Příklady užití skleněných cihel

Přestože je použití plných skleněných cihel při zdění konstrukcí stále vnímáno jako netradiční a inovativní, příkladů užití v praxi pomalu přibývá. Některé konstrukce nevyužívají nosnost cihel, ale doplňují je nosnými ocelovými prvky. Zástupcem z této skupiny je Optical Glass House v Hirošimě. Jiné konstrukce však plně využívají potenciál nosných plných skleněných cihel. Podrobněji budou popsány Atocha Memorial, Chrystal Houses v Amsterdamu, projekt nové věže ve městě Isny.

2.4.1 Optical Glass House v Hirošimě

Optical Glass House v Hirošimě je pozoruhodným představitelem konstrukcí, které využívají nosné ocelové prvky. Jde o obytný dům na velmi rušné ulici, což bývá udáváno jako důvod, proč architekt Hiroshi Nakamura zvolil skleněnou fasádu ve spojení se zimní zahradou, aby obyvatelům poskytl klidné útočiště a omezil hluk přecházející do obytných místností.

Skleněná fasáda se skládá zhruba z šesti tisíc skleněných cihel a prochází přes dvě patra. Na takovou výšku by byla potřebná mnohokrát větší tloušťka stěny, než plánovaných 50 mm. Proto jsou cihly navlékány na závitové tyče a pro ochranu cihel při utahování matek na závitech jsou mezi jednotlivé řady vloženy ocelové pásy. [26]



(a) zimní zahrada za skleněnou fasádou



(b) navlékání skleněných cihel na závitové tyče

obr. 7: Optical Glass House v Hirošimě [26]

2.4.2 Atocha Memorial v Madridu

Pravděpodobně první aplikací nosné konstrukce pouze ze skleněných cihel je Atocha Memorial, postavený na památku bombových útoků na madridské vlaky v roce 2004, při nichž zahynulo 191 osob a později také jeden policista při snaze zadržet pachatele. [27]

Stavba je tvořena plnými skleněnými cihlami spojovanými tenkovrstvým lepidlem vytvrzeným pomocí UV záření. Oválný skleněný válec váží 140 tun a je vysoký 11 m. Uvnitř věže je přetlakem udržována ETFE membrána potíštěná vzkazy truchlících sepsanými po útoku (viz obr. 8). Plochou střechu tvoří 10 mm a 12 mm silné skleněné desky uložené na pěti skleněných trámech délky 8,5 m. Tento impozantní pomník byl odhalen 11. března 2007 u příležitosti třetího výročí přímo naproti nádražní budově. [28]



(a) Atocha Memorial naproti nádražní budově



(b) ETFE membrána potíštěná vzkazy

obr. 8: Atocha Memorial [28]

2.4.3 Chrystal Houses v Amsterdamu

V literatuře mnohokrát popisovaným zástupcem staveb z plných skleněných cihel je budova zvaná Crystal Houses v Amsterdamu. Za účelem modernizace obchodního domu a zároveň zachování historického rázu města byla navržena skleněná fasáda, ve které skleněné cihly na rozmezí druhého a třetího nadzemního podlaží postupně přecházejí v historické terakotové cihly.

Na návrhu konstrukce spolupracovalo architektonické studium MVRDV s řadou předních výzkumných pracovišť (Technologickou univerzitou Delft, firmou ABT, společností Brouwer & Kok aj.). Cihly vyrobila italská sklárna Poesia in Resana ručním odléváním a jako spojovací materiál bylo použito průhledné lepidlo vytvrzované UV zářením, aby spáry nenarušovaly vzhled budovy. [29]

2.4.4 Projekt nové věže v Isny

Předchozí příklady představovaly zdění přesných cihel na tenkovrstvé lepidlo. Poněkud jednodušší na výrobu cihel, technologii zdění a požadavky na přesnost je zdění na obyčejnou maltu s aditivou pro zvýšení přídržnosti. Ta totiž může vyrovnat případné nerovnosti. Tuto technologii měla využít nová věž ve městě Isny na jihu Německa. Na místě původní historické brány měla být vztyčena inovativní skleněná, ale tradičně zděná konstrukce.

Návrh se skládal ze tří tubusů, které se směrem nahoru rozšiřovaly. Nahoře se měly propojit v jeden prstenec držící ocelovou kouli, ve které mělo být dřevěné auditorium pro 120 osob. Pro dosažení téměř pasivní termoregulace byla zvolena tloušťka stěn 50 cm. Takto silná stěna dokáže absorbovat až 90 % sluneční energie a zbytkové teplo může být odváděno potrubním systémem. Pro výrobu cihel si švýcarský architekt Peter Zumthor vybral českou firmu Happy Materials. [30] Navzdory pečlivé přípravě a rozsáhlému testování materiálů a konstrukčních prvků byl projekt vetován téměř ¾ obyvatel města Isny, protože návrh vypadal jako zubní stolička či kalhoty. [31]

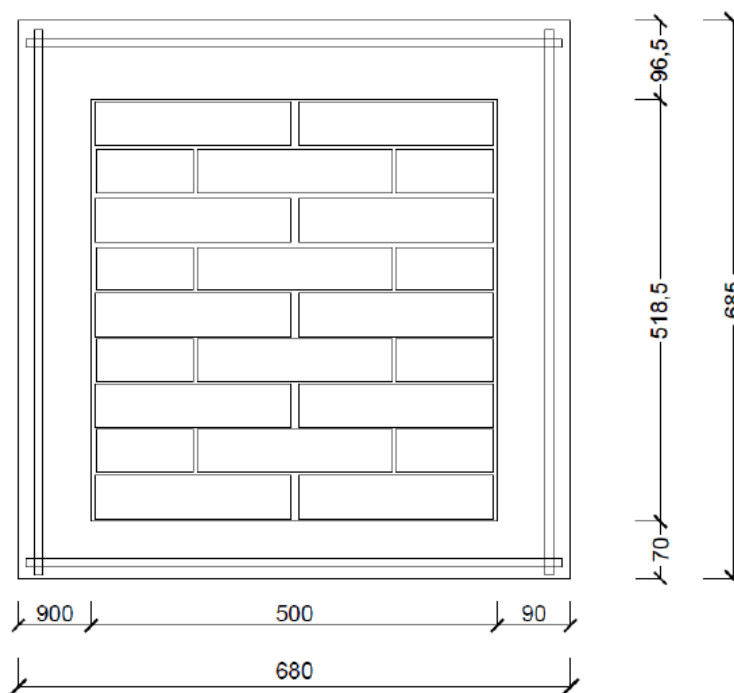
3 Řešený příklad

Řešeným příkladem je numerický model šíření tepla v konstrukci z plných skleněných cihel namáhané normovou teplotní křivkou.

3.1 Experiment

Jedním ze základních podkladů k této práci je experiment provedený v říjnu roku 2017 pod vedením pracovníků Katedry ocelových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze ve spolupráci se společností Vitrablok, s. r. o. Naměřená data slouží k verifikaci teplot získaných numerickým modelem. Současně je většina informací v této kapitole přejata z diplomové práce Bc. Lenky Šplíchalové, [32] na kterou navazují, a z článku o daném experimentu. [33]

Jednalo se o malorozměrový experiment zahřívání zděné stěny z plných skleněných cihel firmy Vitrablok s. r. o. s maltou (označovanou obchodně Vetromalta) jako spojovacím materiálem. Konstrukce měla rozměry 685 mm (výška) x 680 mm (šířka) x 117 mm (tloušťka). Skleněné cihly byly vyzděny do betonového rámu, samotná zděná část tvořila plochu zahřívané strany o velikosti 518,5 mm x 500 mm (viz obr. 9).



obr. 9: Schéma zkoušené konstrukce [32]

3.1.1 Měřené hodnoty

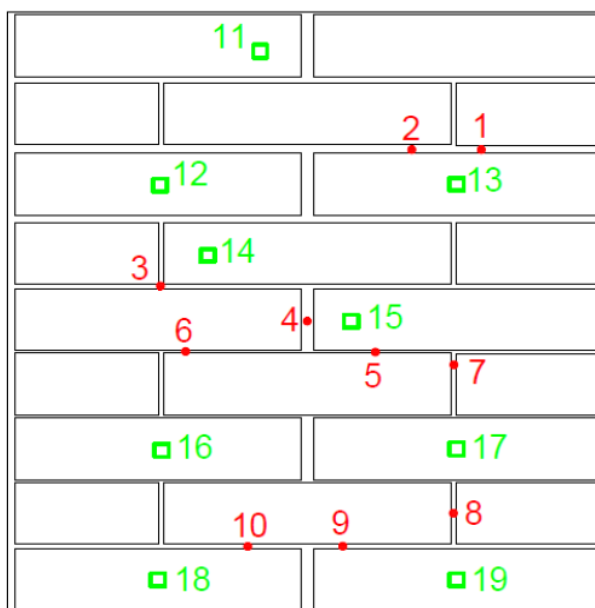
Pro měření teplot v konstrukci bylo použito celkem 19 termočlánků, z nichž deset jich bylo zavedeno do malty do různých vzdáleností od tepelně zatíženého povrchu a devět bylo umístěno na neohřívaný povrch konstrukce. Číselné označení a umístění jednotlivých termočlánků je vypsáno v tab. 7.

tab. 7: Přehled použitých termočlánků

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

Z průběhu teplot měřených termočlánky 6 a 14 bylo jasně patrné, že docházelo k chybnému měření, proto nebyly dále uvažovány pro porovnání s numerickým modelem.

Schéma na obr. 10 zobrazuje rozmístění jednotlivých termočláneků na neohřívané straně konstrukce. Červeně jsou zobrazeny plášťové termočláanky typu K ve spárách konstrukce, zeleně jsou znázorněny deskové termočláanky na povrchu konstrukce.



obr. 10: Schéma rozmístění termočláneků [32]

3.2 Tvorba numerického modelu

Model byl vytvářen v programu ANSYS pomocí platformy Workbench. Tato platforma umožňuje propojit jednotlivé moduly v intuitivním uživatelském prostředí. K vypracování modelu byly použity tyto moduly: SpaceClaim (grafické prostředí pro vytváření geometrie), tabulky (zaznamenání materiálových vlastností) a ANSYS Academic Research Mechanical and CFD (výpočetní prostředí).

3.2.1 Materiálové charakteristiky

V modelu jsou použity dva materiály: sklo a malta. Pro výpočet šíření tepla v konstrukci je třeba zadat každému materiálu součinitel tepelné vodivosti, měrnou tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost. Protože tyto vlastnosti nebyly měřeny pro použité materiály, vycházím při jejich stanovení z dostupných údajů shrnutých v příslušných kapitolách (2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3).

3.2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti skla

Skleněné cihly použité v experimentu jsou dle chemického rozboru [34] tvořeny 73,4 hmotnostními procenty křemičitých oxidů, 13,4 hm. % sodných oxidů, 10,65 hm. % vápenatých

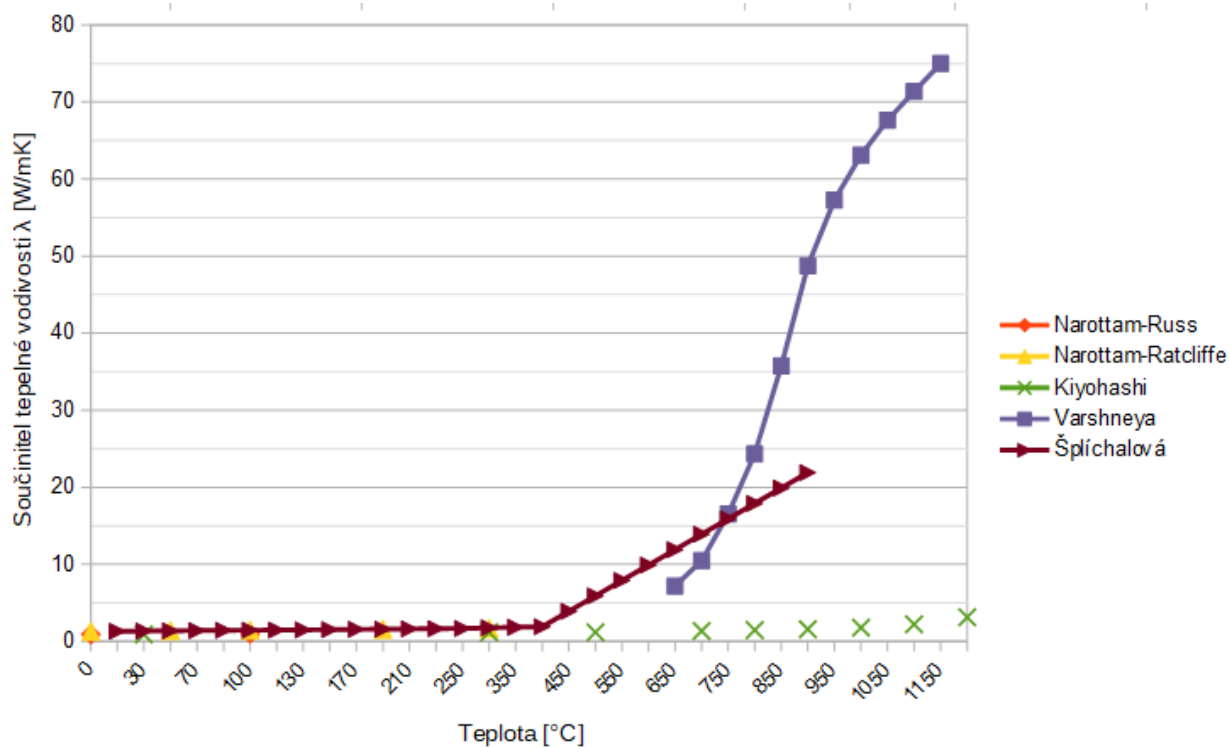
oxidů, 1,40 hm. % hlinitých oxidů a dalšími stopovými prvky. Patří tedy do skupiny sodnovápenatokřemičitých skel.

V následující tabulce jsou shrnuté hodnoty pro součinitel tepelné vodivosti. Kromě údajů vypsaných v kapitole 2.1.1 jsou v ní zahrnuty ještě hodnoty čistě křemičitého skla dle [5, str. 19] označené jako Narottam-Ratcliffe a dále hodnoty, které byly použity v [32, str. 58] pro tvorbu 1D modelu zjednodušeného zanedbáním malty. Tyto hodnoty jsou označené jako Šplíchalová.

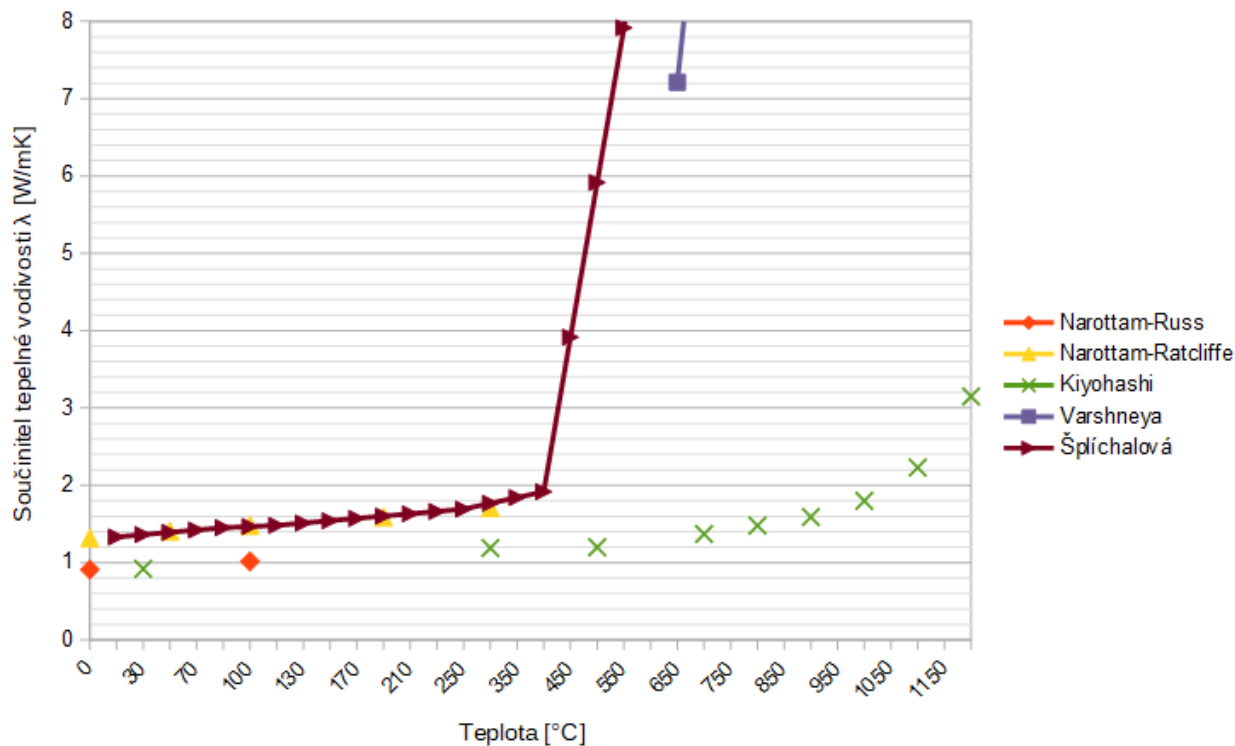
tab. 8: Souhrn dostupných hodnot součinitele tepelné vodivosti [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

Teplota [°C]	Narottam-Russ	Narottam-Ratcliffe	Kiyohashi	Varshneya	Šplíchalová
	Na-Ca-Si	SiO ₂	Bez radiace	Jen radiace	S vlivem malty
0	0,910	1,32			
10					1,33
30			0,92		1,36
50		1,41			1,39
100	1,016	1,48			1,465
150					1,515
200		1,59			1,565
250					1,615
300		1,71	1,19		1,665
350					1,705
400					1,745
450					1,785
500			1,2		1,825
550					1,865
600					1,905
650				7,21	3,905
700			1,37	10,47	5,905
750				16,55	7,905
800			1,48	24,36	9,905
850				35,76	11,905
900			1,59	48,76	13,905
950				57,28	
1000			1,8	63,10	
1050				67,64	
1100			2,23	71,35	
1150				74,99	
1200			3,15		

Tyto hodnoty jsou také zaneseny do grafu (viz obr. 11). Pro lepší přehlednost graf na obr. 12 nezobrazuje hodnoty vyšší než $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.



obr. 11: Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti pro sklo



obr. 12: Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti pro sklo, zaměřeno na $0 - 8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Hodnoty použité do modelu jsou sepsané v tab. 9. Vysoké hodnoty pro $t > 900$ °C ztvárňují odtávání skla.

tab. 9: Použité hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro sklo

Teplota [°C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
0 - 100	$\lambda = 0,0015t + 1,315$
101 - 300	$\lambda = 0,001(t - 100) + \lambda_{100}$
301 - 600	$\lambda = 0,0008(t - 300) + \lambda_{300}$
601 - 900	$\lambda = 0,04(t - 600) + \lambda_{600}$
950	30
1000	40
1050	50
1100	60
1150	70

3.2.1.2 Měrná tepelná kapacita skla

Měrná tepelná kapacita je převzata ze sloupce pro sodnovápenatokřemičité sklo z tab. 3 v kapitole 2.1.2.

3.2.1.3 Objemová hmotnost skla

Objemovou hmotnost je třeba určit podle přesného složení skla. K tomu slouží vzorec 3 a tab. 4 uvedené v kapitole 2.1.3. Výpočet zde uvedu:

tab. 10: Hodnoty pro aditivní výpočet hustoty skla

Oxid	Aditivní faktor	Hmotnostní %
SiO ₂	2,24	73,4
Al ₂ O ₃	2,75	1,4
CaO	4,30	10,65
MgO	3,25	0,08
PbO	10,30	0
Na ₂ O	3,20	13,4
K ₂ O	3,20	0,8

$$d = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{\frac{a_1}{f_1} + \frac{a_2}{f_2} + \dots + \frac{a_n}{f_n}} = \frac{73,4 + 1,4 + 10,65 + 0,08 + 13,4 + 0,8}{\frac{73,4}{2,24} + \frac{1,4}{2,75} + \frac{10,65}{4,3} + \frac{0,08}{3,25} + \frac{13,4}{3,2} + \frac{0,8}{3,2}} = 2,480 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$$

Objemová hmotnost skla použitého v experimentu je tedy $2480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro stanovení průběhu objemové hmotnosti v závislosti na teplotě nejprve spočítám lineární součinitel teplotní roztažnosti s využitím aditivního výpočtu dle vzorce 4 a tab. 5 z kapitoly 2.1.3.

tab. 11: Hodnoty pro aditivní výpočet teplotní roztažnosti skla

Oxid	Aditivní faktor	Hmotnostní %
SiO ₂	0,05	73,4
Al ₂ O ₃	0,14	1,4
CaO	1,63	10,65
MgO	0,45	0,08
PbO	1,06	0
Na ₂ O	4,32	13,4
K ₂ O	3,90	0,8

$$\alpha \cdot 10^7 = \sum a_i f_i = 0,05 \cdot 73,4 + 0,14 \cdot 1,4 + 1,63 \cdot 10,65 + 0,45 \cdot 0,08 + 4,32 \cdot 13,4 + 3,9 \cdot 0,8 = 82,3$$

Lineární součinitel teplotní roztažnosti α je roven $8,23 \cdot 10^{-6}$. Objemový součinitel teplotní roztažnosti β lze zjednodušeně uvažovat jako trojnásobek lineárního součinitele, tedy $2,47 \cdot 10^{-5}$. Tento součinitel platí jen pro teplotní rozsah do $100 \text{ }^\circ\text{C}$, pro vyšší teploty se násobí koeficientem 1,08, tedy $2,67 \cdot 10^{-5}$. Následující vzorce předpokládám jako obecně známé.

$$V = V_0(1 + \beta t)$$

$$\rho = \frac{m}{V_0(1 + \beta t)} = \frac{m}{\frac{m_0}{\rho_0}(1 + \beta t)} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}$$

3.2.1.4 Součinitel tepelné vodivosti malty

Přesné složení použité malty není známé. Výrobce uvádí tabulkovou hodnotu malty v suchém stavu $\lambda_{10,\text{dry}} = 0,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [35]

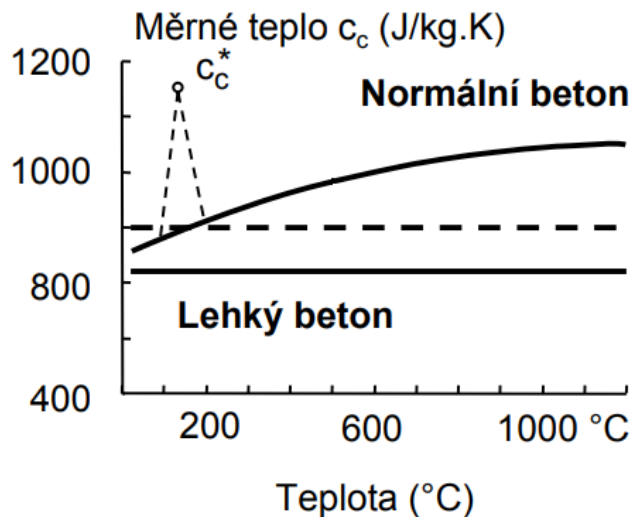
Hodnoty pro řešený model jsem tedy stanovila s ohledem na tento údaj a na průběh součinitele tepelné vodivosti obyčejné malty na obr. 4.

tab. 12: Součinitel tepelné vodivosti malty použitý v modelu

Teplota [$^\circ\text{C}$]	10	50	70	100	120	1200
$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	2	1,8	1,1	0,9	0,83	0,83

3.2.1.5 Měrná tepelná kapacita malty

Měrná tepelná kapacita malty je odhadnutá z obr. 5 a dle průběhu měrné tepelné kapacity betonu, který znázorňuje odpařování vody prudkým nárůstem měrné tepelné kapacity ve 100 °C.



obr. 13: Měrná tepelná kapacita betonu [36]

Použitý průběh měrné tepelné kapacity pro maltu lze zapsat jako:

$$c = 10 \cdot \ln(t) + 800 \quad ,$$

kromě výjimky v teplotním rozmezí 100 °C až 200 °C, kde je zapsán lineární průběh s vrcholem ve 150 °C a měrnou tepelnou kapacitou $c = 1150 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

3.2.1.6 Objemová hmotnost malty

Objemová hmotnost zatvrdlé malty uvedená výrobcem je $1500 - 1800 \text{ kg.m}^{-3}$. Uvažovala jsem tedy hodnotu 1500 kg.m^{-3} jako nejnižší v celém teplotním průběhu. Závislost objemové hmotnosti malty na teplotě byla odborně odhadnuta dle dostupných zdrojů. [37]

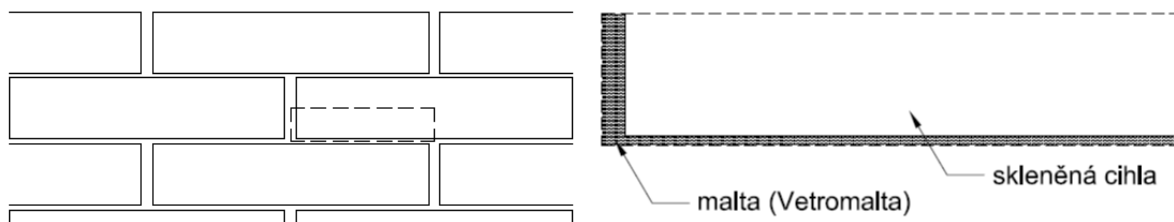
tab. 13: Objemová hmotnost malty použitá v modelu

Teplota [°C]	10	600	1000	1200
$\rho \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	1688	1639	1519	1500

3.2.2 Další vstupní údaje

Model je tvořen pro analýzu Transient Thermal (šíření tepla v čase) prvky Hex20, umožňujícími 3D vedení tepla.

Pro snížení výpočetního času je vhodné zmenšit modelovanou část pomocí symetrie. V zadané konstrukci jsem tedy hledala nejmenší možnou část, která by pomocí symetrie pokryla celou konstrukci. Při zanedbání vlivu styčné spáry na cihlu nad a pod touto styčnou spárou je hledanou částí čtvrtina cihly s polovinou přilehlých spár (viz obr. 14).



a) zobrazení výřezu pro symetrii

b) popis rozložení materiálů

obr. 14: Modelovaná část konstrukce

Velikost sítě je volena s ohledem na výpočetní čas a na přesnost výsledků. Z důvodu postupného odtávání skla je vhodné, aby velikost elementu ve směru šíření tepla byla co nejmenší. V modelu je zvolena jako 1 mm. Ostatní rozměry sítě se pohybují kolem 5 mm.

Modelu je nastavena počáteční teplota 10,8 °C a okrajové podmínky zahrnují konvekci a radiaci. Na ohříváné straně se teplota mění dle normové teplotní křivky [38]:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (5)$$

kde Θ_g je teplota plynu [$^{\circ}\text{C}$] a t je čas [min].

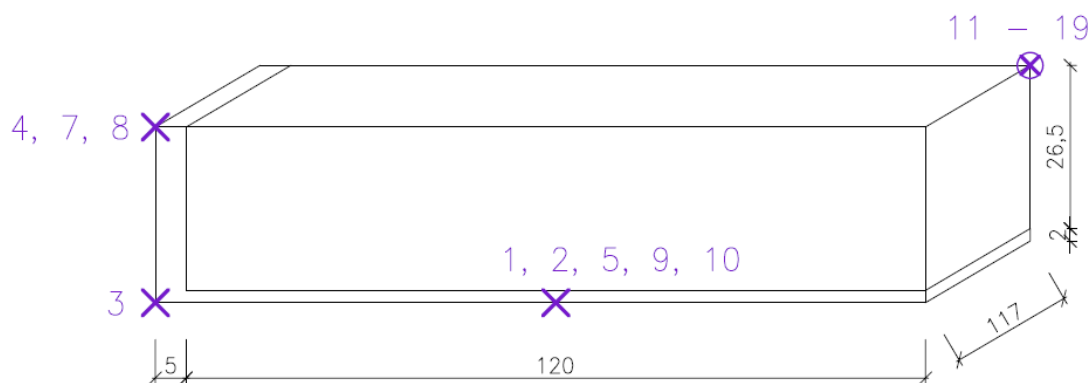
Konstrukce je zahřívána 120 min. Časové kroky výpočtu jsou dlouhé pět minut kromě prvního kroku, který trvá pouze jednu minutu. Počet mezikroků se vždy určí dle potřeby iterace do maximálního počtu 10. Součinitel přestupu tepla α je na obou stranách 25. Teplota prostředí na neohříváné straně je 10,8 °C. Emisivita je rovna 0,94.

3.3 Porovnání s experimentem

K porovnání s experimentem slouží data měřená termočlánky. Na obr. 15 je znázorněno, ve kterých místech při pohledu na ohřívánou stranu konstrukce byla hodnota měřena v modelu. V tab. 14 je přehled, v jaké vzdálenosti je měřené místo od ohříváné strany.

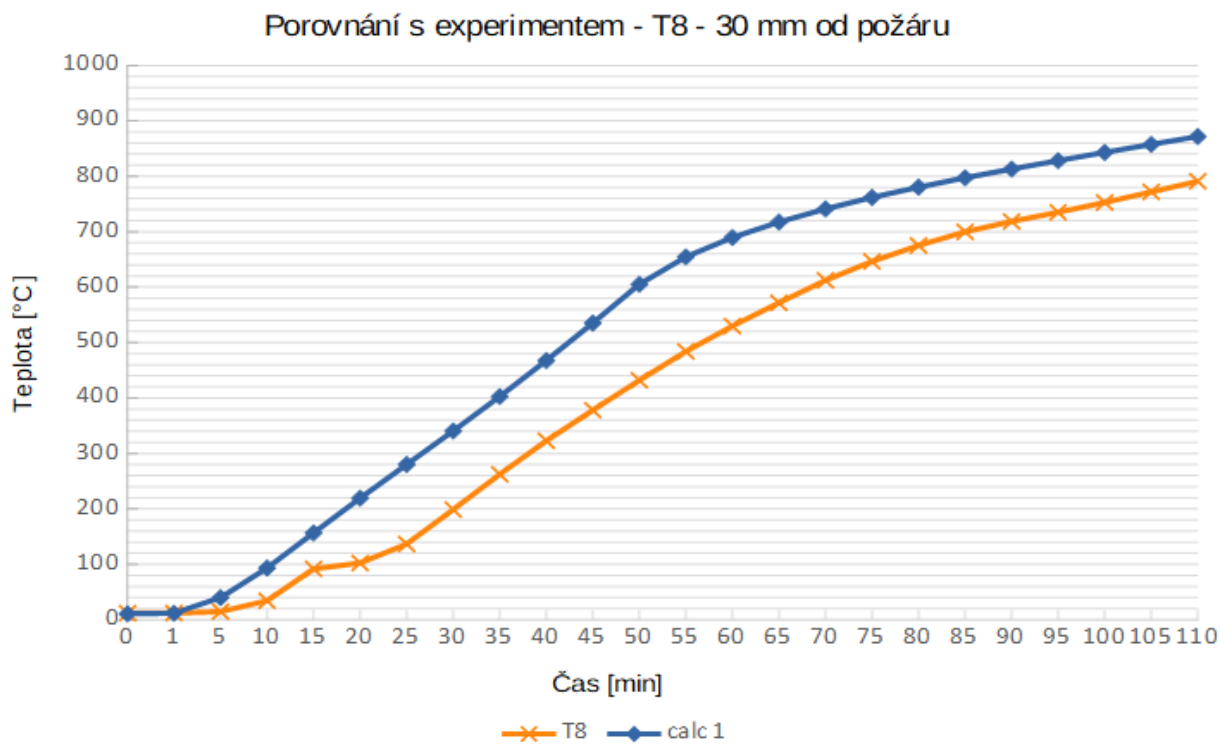
tab. 14: Přehled vzdáleností plášťových termočlánků od ohříváné strany konstrukce

Vzdálenost od ohříváné strany [mm]	30	33	41	50	60	79	85	89
Termočlánky	T8	T2	T10	T4	T7	T5	T1	T9
		T3						



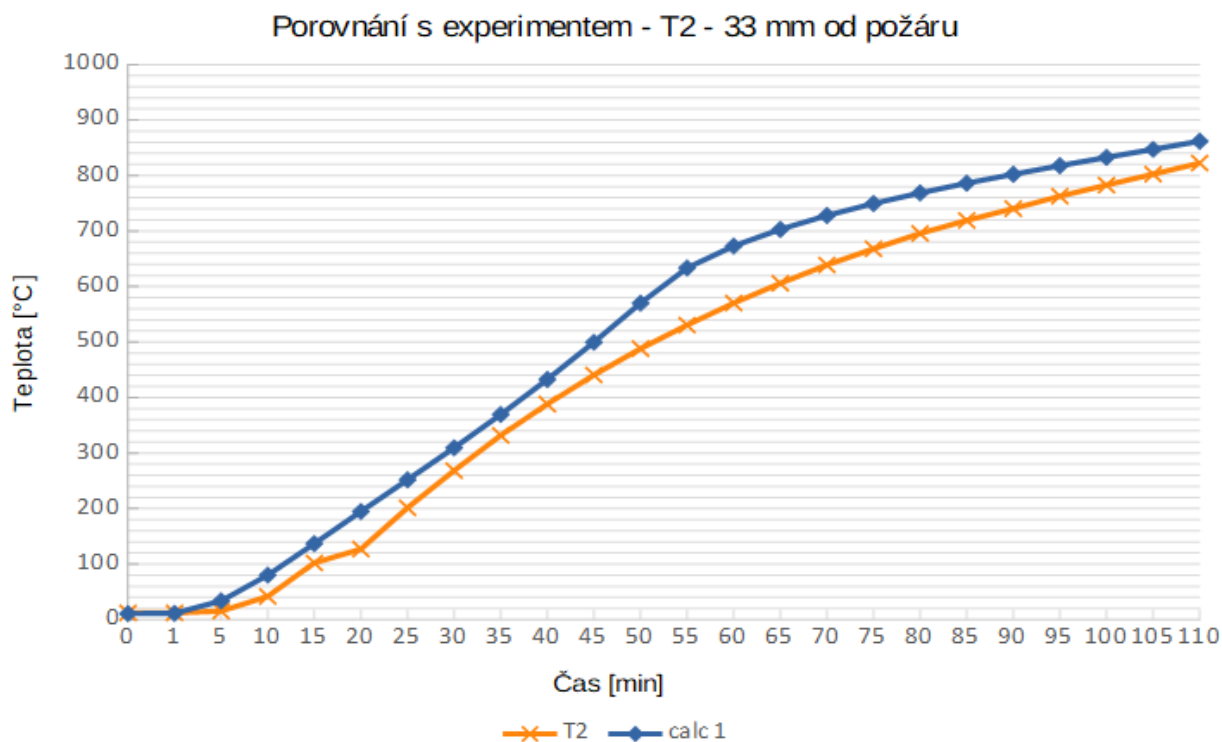
obr. 15: Schéma umístění kontrolních bodů

Pro větší přehlednost jsou grafy srovnání průběhu teplot v čase seřazeny dle vzdálenosti od ohřívaného povrchu.

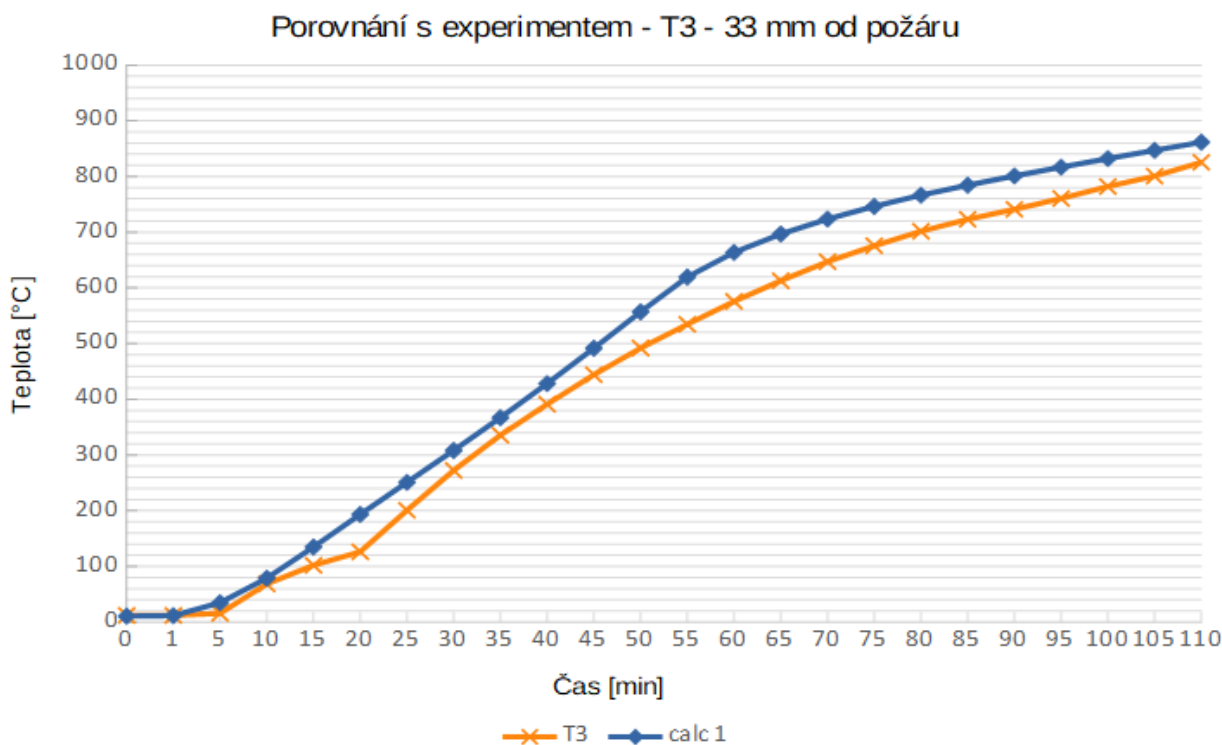


obr. 16: Porovnání s experimentem - termočlánek 8

Na průběhu teplot změřených termočlánekem 8 během experimentu lze dobře pozorovat zpomalení růstu při 100 °C způsobené odpařováním vody obsažené v maltě.

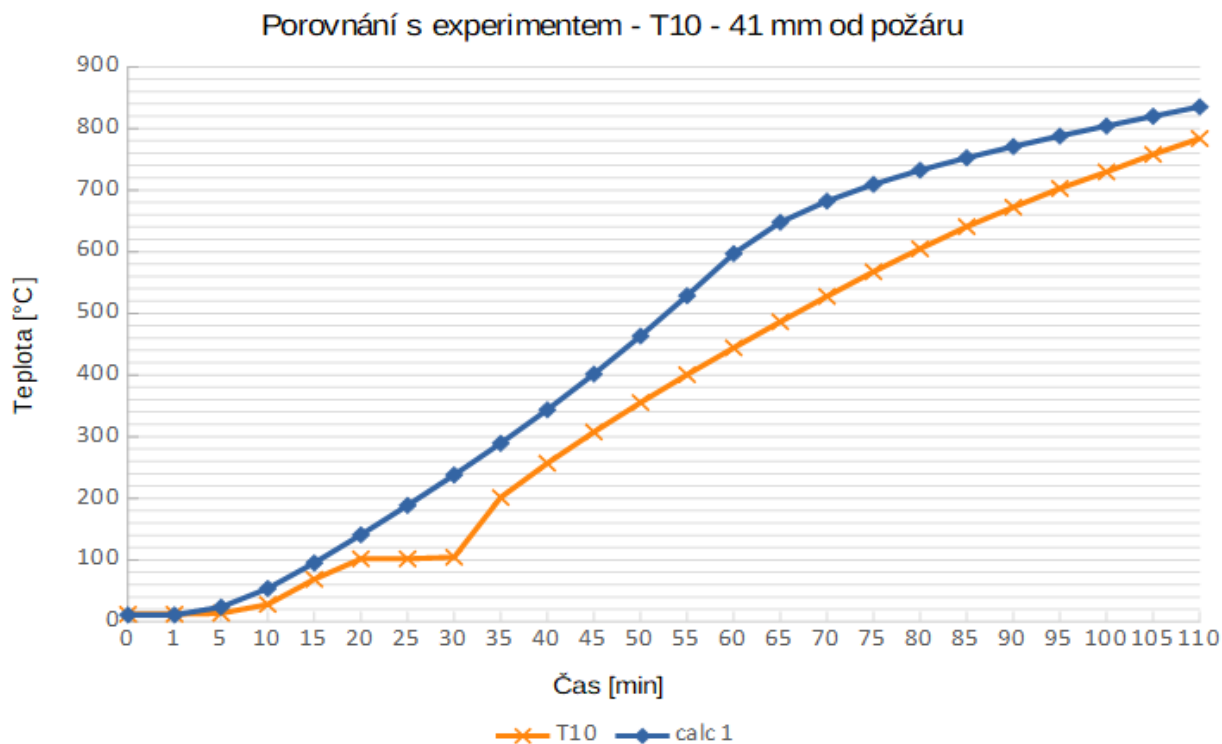


obr. 17: Porovnání s experimentem - termočlánek 2

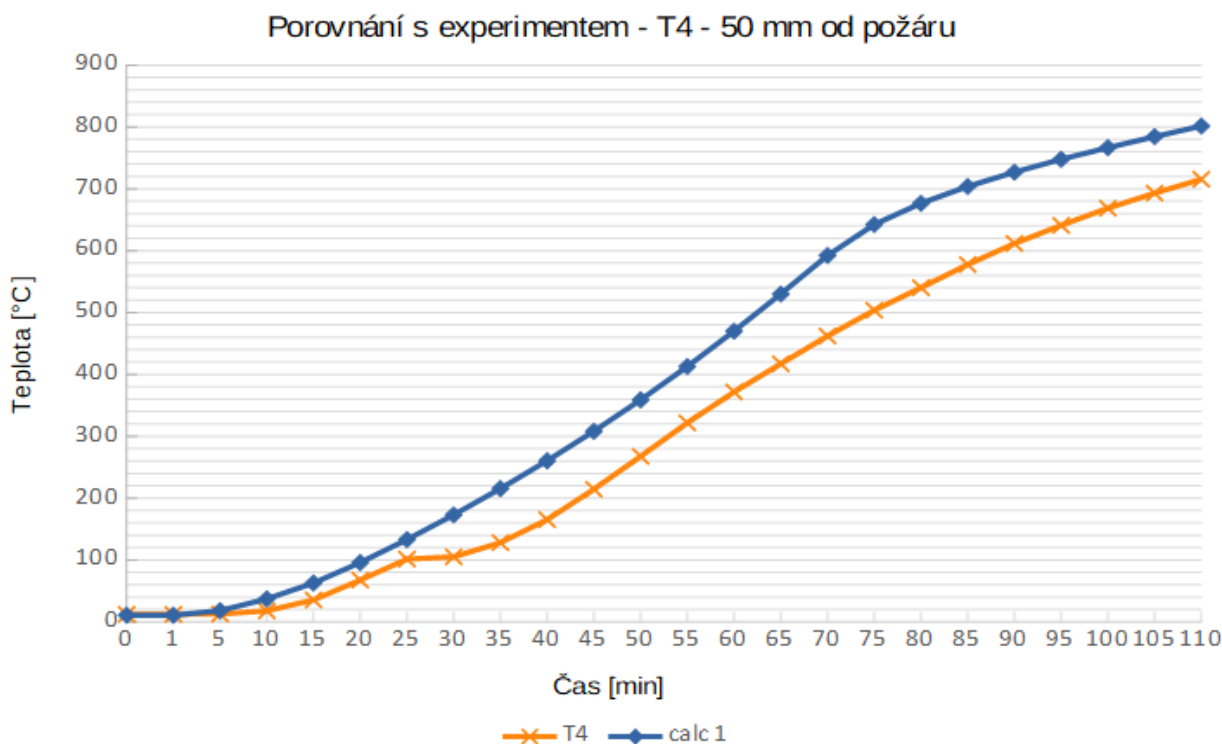


obr. 18: Porovnání s experimentem - termočlánek 3

Na obr. 17 a obr. 18 lze pozorovat na rozmezí teplot 450 °C - 650 °C mírně větší sklon křivky znázorňující teploty modelu než sklon křivky teplot změřených při experimentu.

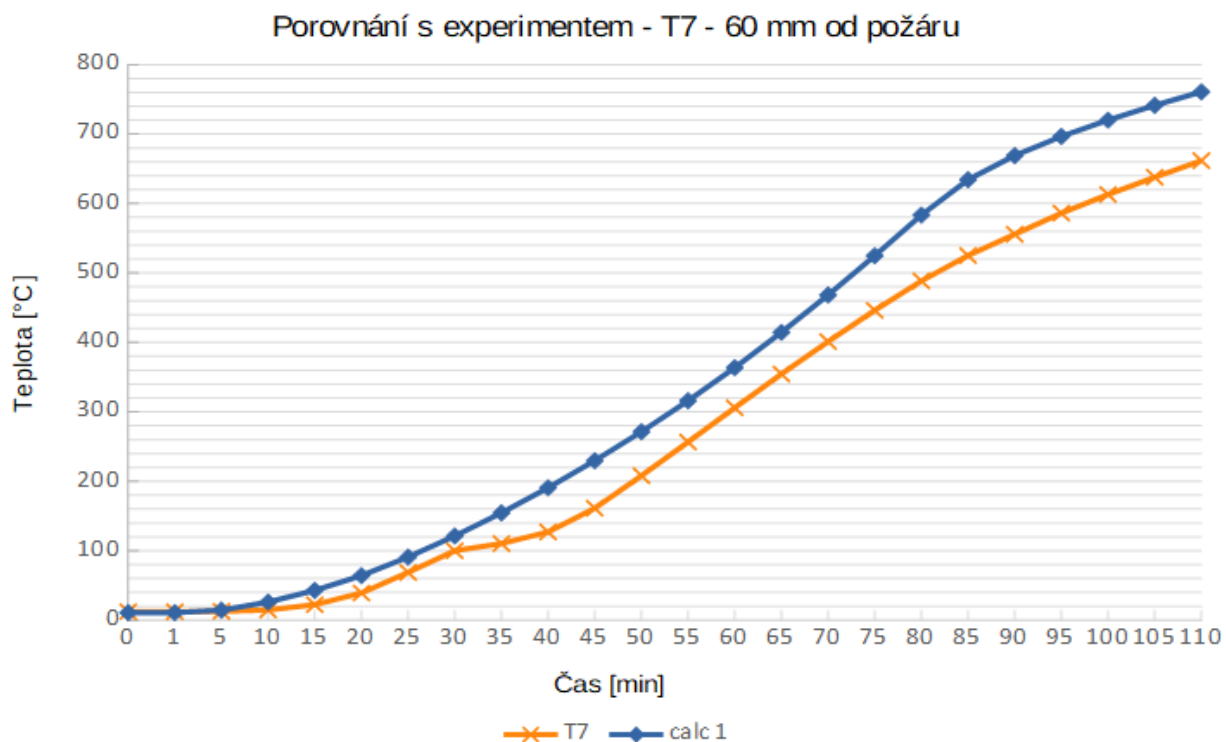


obr. 19: Porovnání s experimentem - termočlánek 10

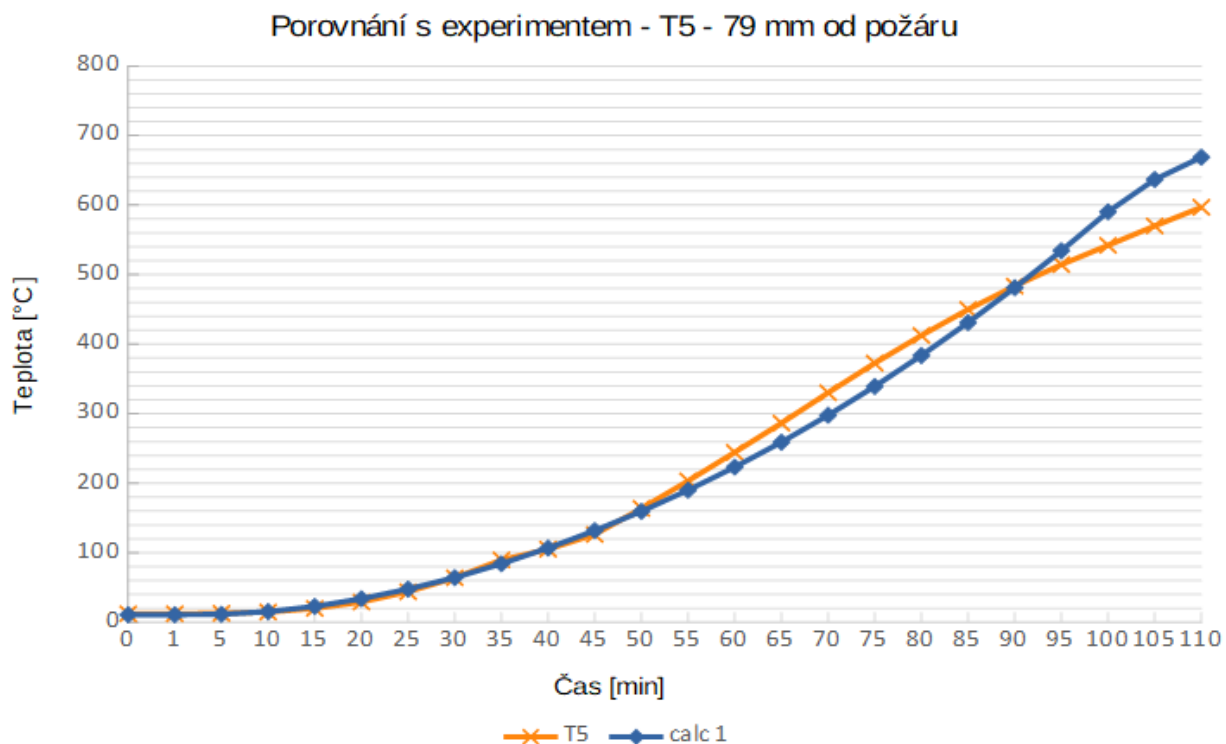


obr. 20: Porovnání s experimentem - termočlánek 4

V některých úsecích jsou průběhy teplot vypočtené modelem velmi podobné průběhům změřeným při experimentu, avšak s rozdílem cca 80 °C (viz obr. 19 a obr. 20).

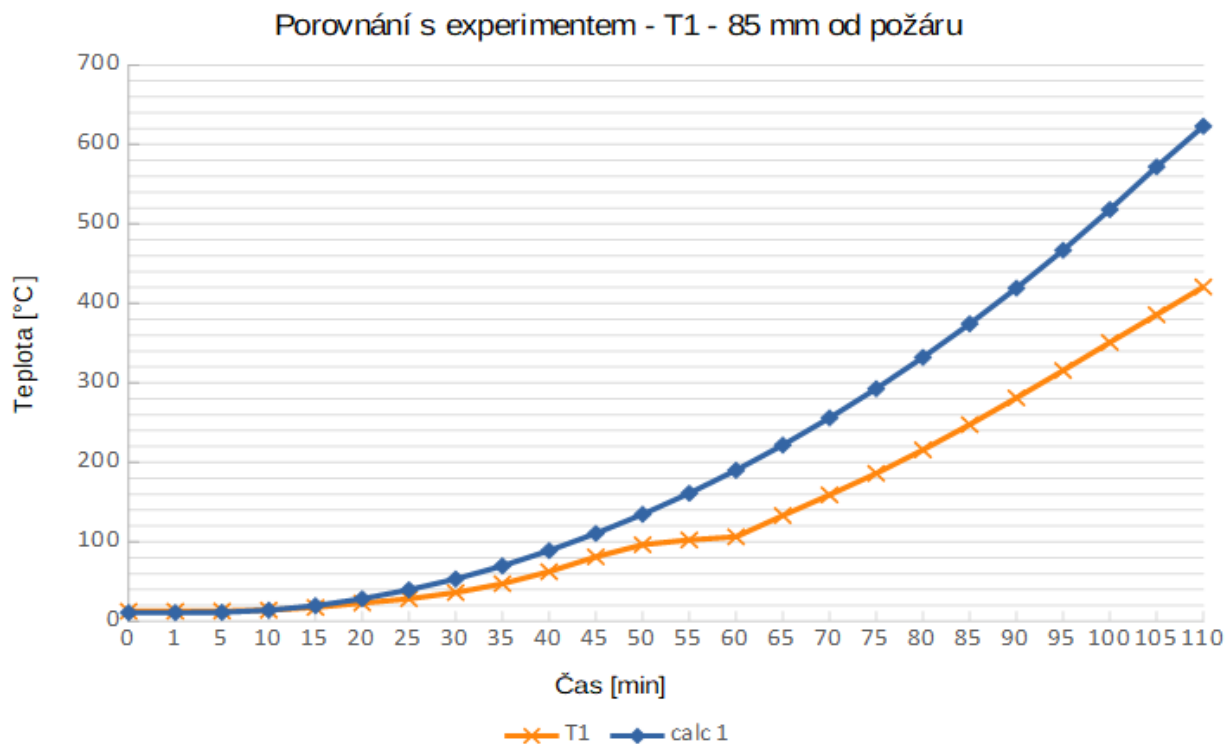


obr. 21: Porovnání s experimentem - termočlánek 7

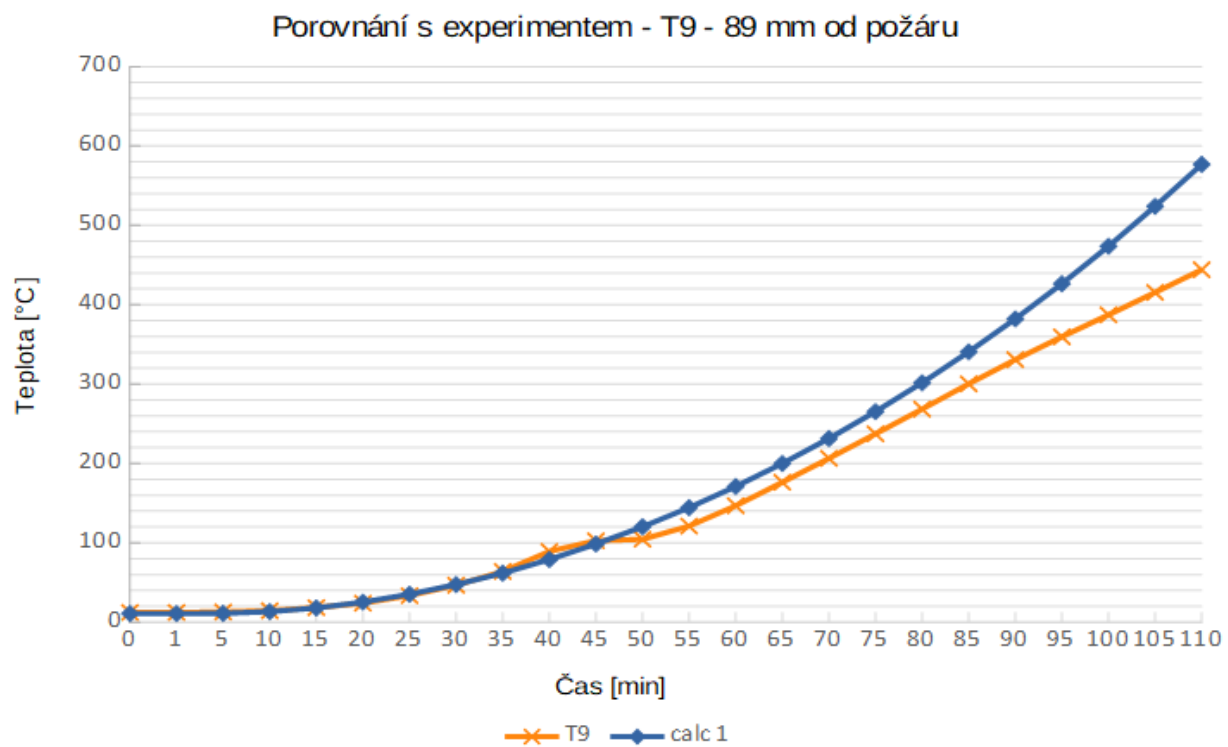


obr. 22: Porovnání s experimentem - termočlánek 5

Přestože se na první pohled na obr. 22 zdá, že je průběh teplot z modelu téměř ideálně blízko průběhu teplot změřených při experimentu, sklon křivek je odlišný již od 50. minuty.



obr. 23: Porovnání s experimentem - termočlánek 1



obr. 24: Porovnání s experimentem - termočlánek 9

Pro zhodnocení podobnosti průběhů jsem použila porovnání sklonů křivek, které napoví, na jakém teplotním intervalu je třeba upravit součinitel tepelné vodivosti, a dále jsem použila maximální okamžitý rozdíl (viz tab. 15) a průměr absolutních hodnot těchto rozdílů (viz tab. 16).

tab. 15: Maximální okamžité rozdíly mezi průběhem teplot dle experimentu a dle modelu

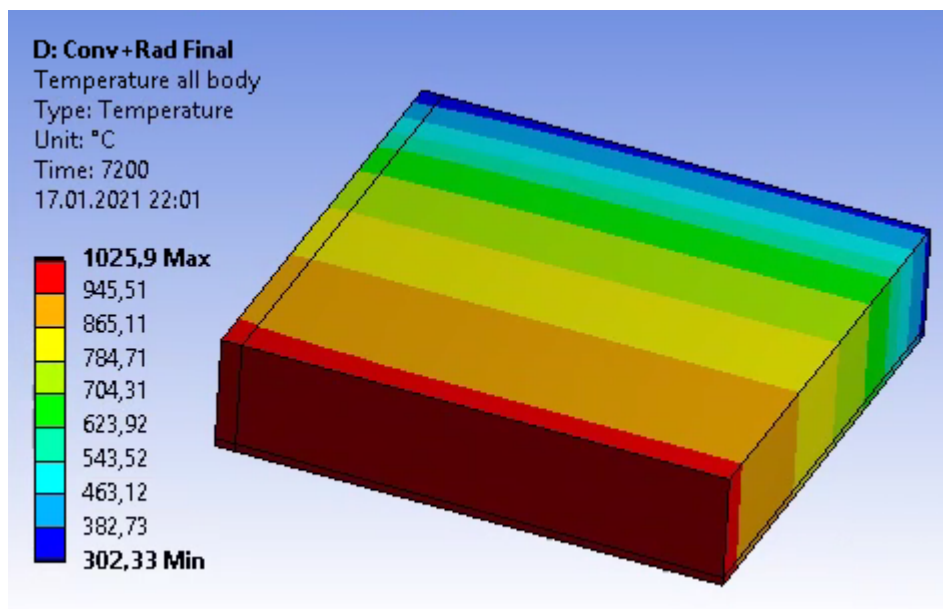
Rozdíl [°C]	0 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200	≥ 200	
Termočlánky	T5	T3	T2 T4	T7 T9	T8 T10	T1

tab. 16: Průměr absolutních hodnot rozdílů mezi průběhem teplot dle experimentu a dle modelu

Průměr [°C]	0 - 20	20 - 50	50 - 80	80 - 100	≥ 100
Termočlánky	T5	T9 T3	T2 T4 T7	T8 T10	

V průměru se tedy hodnoty nelišily o více než 100 °C, maximální okamžitý rozdíl však u většiny grafů 100 °C přesáhl. Pro zlepšení výsledků lze zvýšit hodnotu měrné tepelné kapacity malty $c_{(t=150\text{ °C})}$ nebo pozměnit součinitele tepelné vodivosti (větší vliv mají vlastnosti skla, než malty), zejména na intervalu 400 °C - 700 °C.

Na obr. 25 je zobrazeno rozložení teplot v celém modelu po 7200 s (2 h) zatížení normovou teplotní křivkou. Pro lepší představu připomenu teplotu tzv. softening point, kdy se sklo deformuje svojí vlastní vahou, která se pohybuje okolo 720 °C. Také je možné si všimnout vyšší tepelné vodivosti malty.



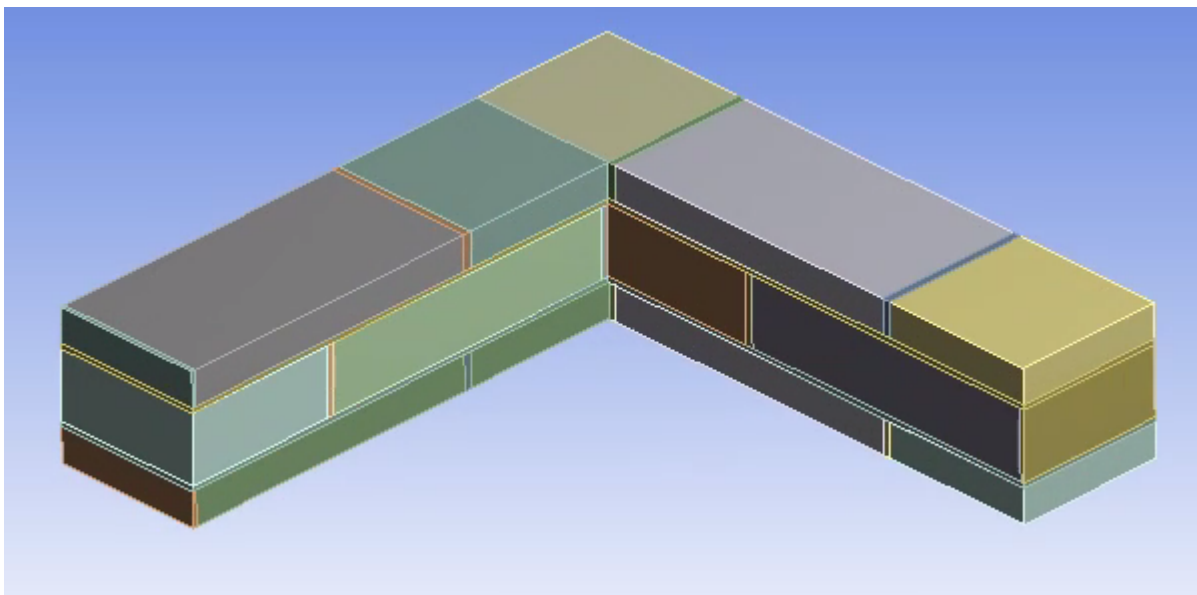
obr. 25: Rozložení teplot v čase 7200 s

3.4 Aplikace modelu

Model lze dále využít k zobrazení průběhu teplot v různých konstrukčních detailech a k další analýze těchto konstrukcí, například k vypočítání kritéria izolace či k počítání únosnosti po požáru. V této diplomové práci se budu věnovat pouze kritériu izolace.

Pro představení možností modelu jsem připravila konstrukční detail rohu a konstrukční detail ztužujícího pilíře. Obě konstrukce jsem vypočítala pro požár z vnější strany i pro požár z vnitřní strany. Následně z teplot na vnější stěně získám průměrný a maximální vzrůst teploty a porovnám je s počáteční teplotou pro běžné časy požární odolnosti (15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min a 120 min). Nakonec vyhodnotím, zda konstrukce v daných časech splnila kritérium izolace.

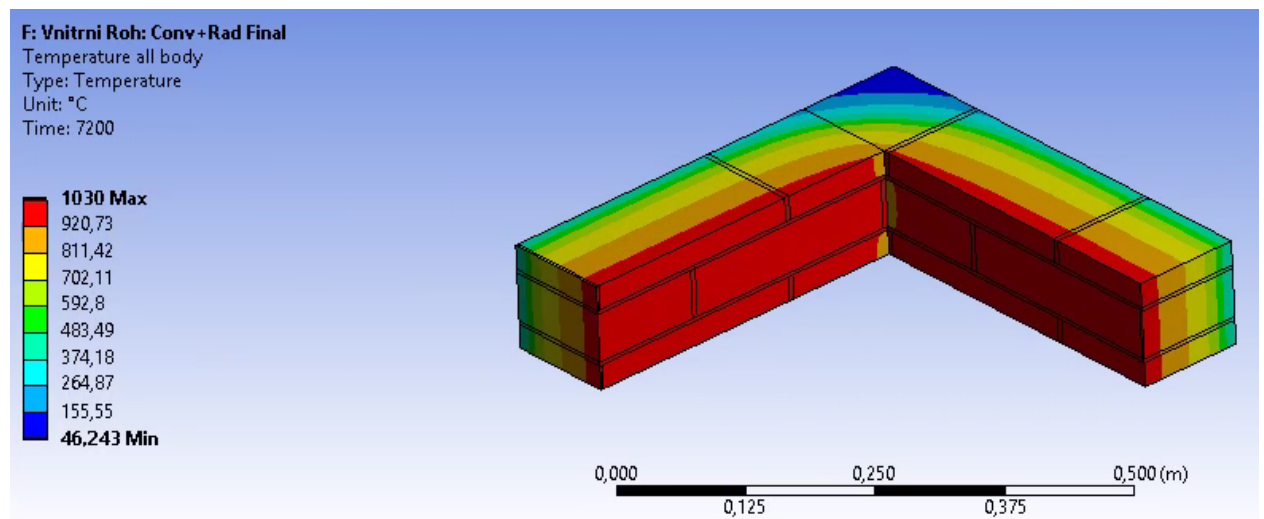
Konstrukční detail rohu (viz obr. 26) zobrazuje 489 mm dlouhé stěny (měřen vnější rozměr) stýkající se v pravém úhlu. Cihla je má rozměry 240 mm x 117 mm x 53 mm, tloušťka ložné spáry je 4 mm a tloušťka styčné spáry je 6 mm. Po výšce je model opět přizpůsoben využití symetrie, rovina symetrie vede středem výšky cihly. Pro potřeby modelu musela být cihla, která je součástí vazby v rohu rozpůlena v polovině délky. Na šíření tepla to ale nemá vliv.



obr. 26: Model rohu stěny

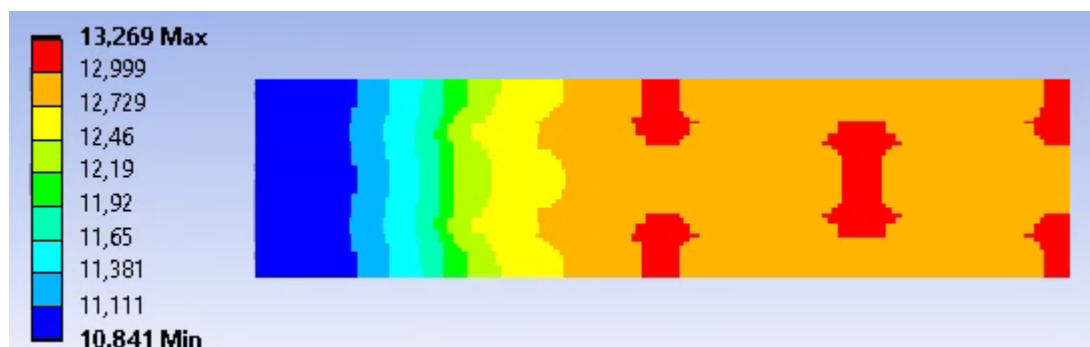
Vstupní údaje byly ponechány stejné jako byly stanoveny v kapitole 3.2.

Na obr. 27 je zobrazeno teplotní pole modelované konstrukce v čase 7200 s. Lze si všimnout, že vnitřní roh je chladnější než stěny roh tvořící, neboť je zahříván jen v úhlu 90°.

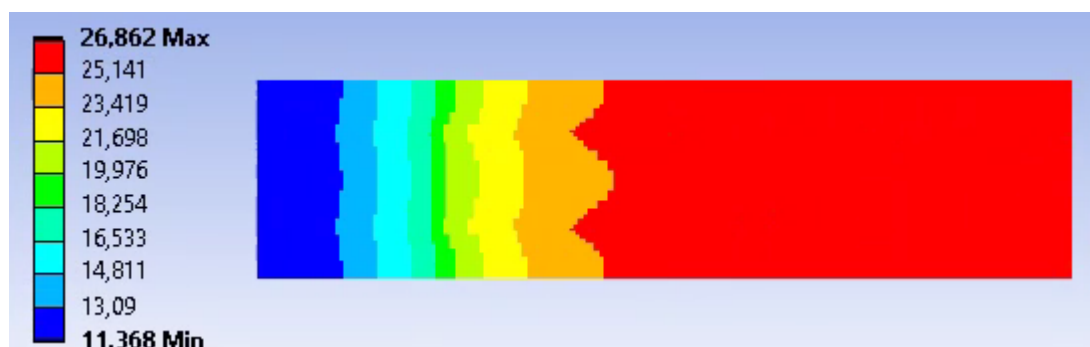


obr. 27: Teplotní pole na 3D zobrazení vnějšího rohu

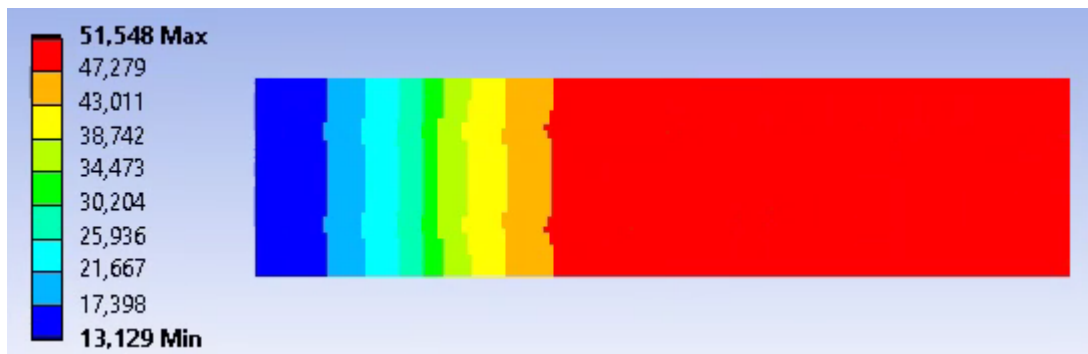
Na následujících obrázcích je zobrazeno teplotní pole vnější stěny modelovaného rohu při požáru z vnitřní strany. Na počátku se prokreslují spáry, protože rychleji vedou teplo.



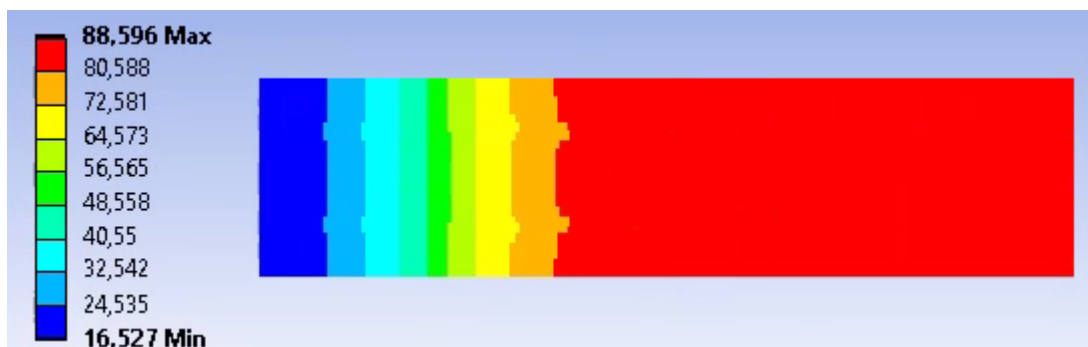
obr. 28: Teplotní pole vnější stěny v čase 900 s



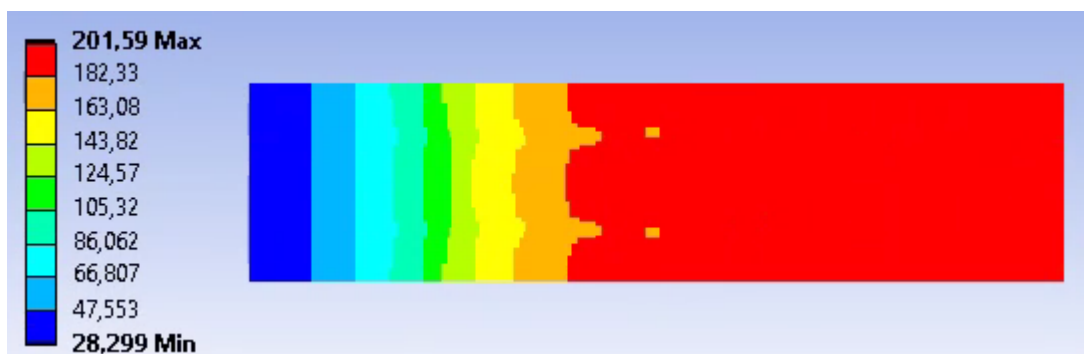
obr. 29: Teplotní pole vnější stěny v čase 1800 s



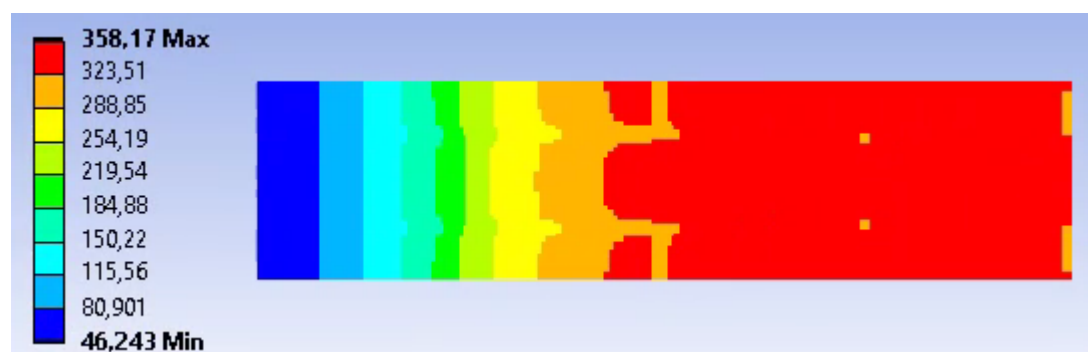
obr. 30: Teplotní pole vnější stěny v čase 2700 s



obr. 31: Teplotní pole vnější stěny v čase 3600 s



obr. 32: Teplotní pole vnější stěny v čase 5400 s



obr. 33: Teplotní pole vnější stěny v čase 7200 s

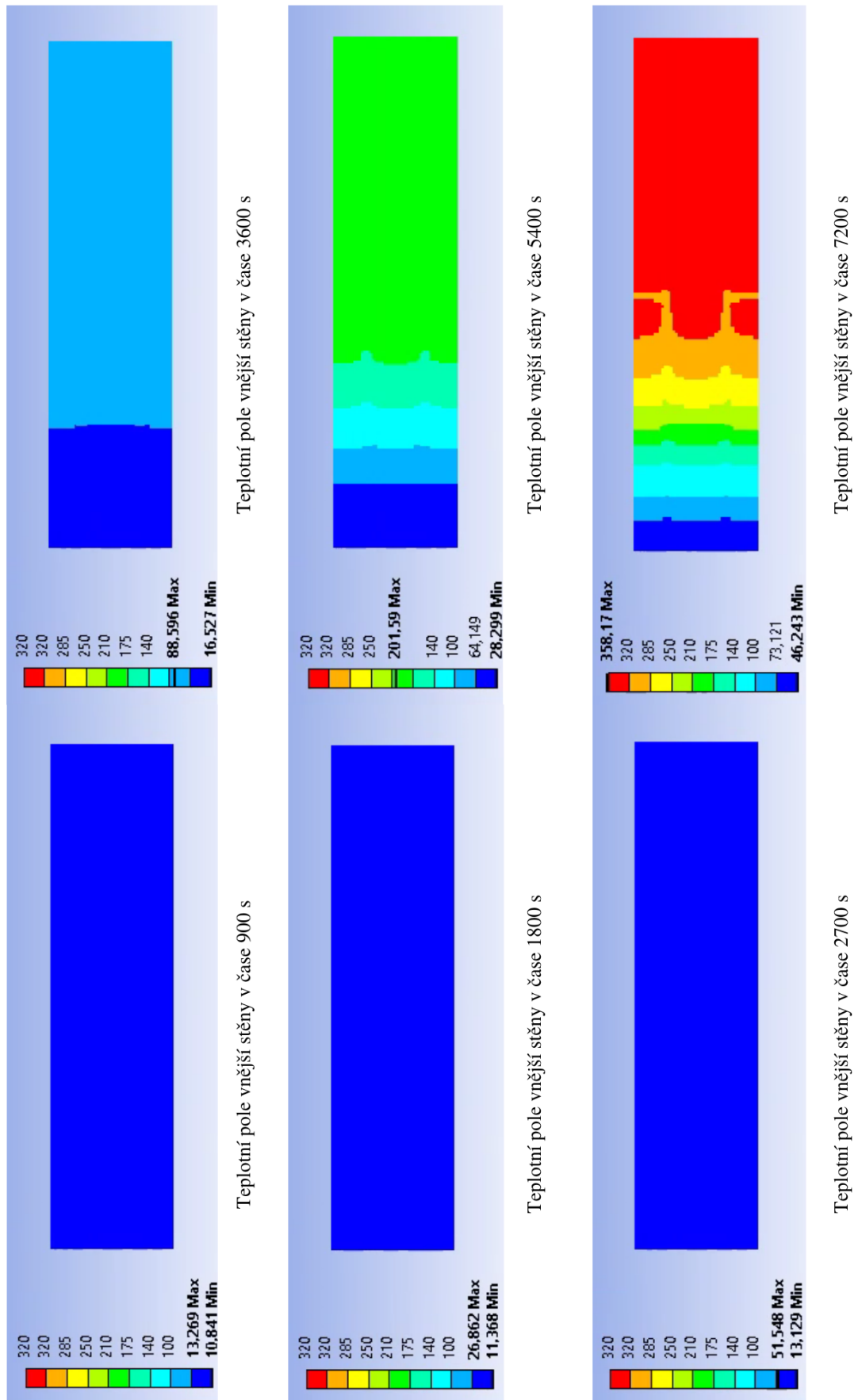
Pro zhodnocení kritéria izolace byla ze všech teplot na povrchu jedné stěny rohu (jako na obr. 27 - obr. 32) vybrána hodnota maximální a hodnota průměrná. Od nich byla odečtena počáteční teplota 10,8 °C a vzniklé teploty jsou nazvány maximální vzrůst a průměrný vzrůst. Pro větší přehlednost jsou vypsány do tab. 17.

tab. 17: Kritérium izolace pro konstrukci s vnitřním rohem

Čas [min]	15	30	45	60	90	120
Průměrný vzrůst t [°C]	1,7	12	31	61	166	266
Maximální vzrůst t [°C]	2,5	16	41	78	214	347
Kritérium izolace	OK	OK	OK	OK	NE	NE

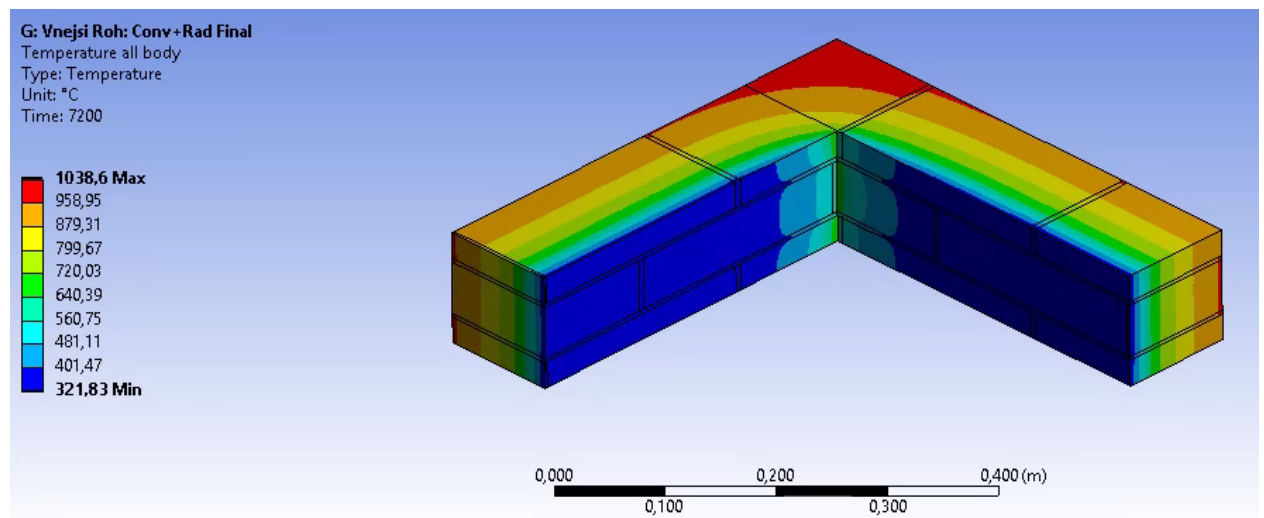
Konstrukce splňuje požární odolnost I60.

Stejně údaje jako na obrázcích 28 až 33 lze zobrazit také pro stálou teplotní škálu. Zvýrazní se tak lépe, v jakém čase teploty překračují parametry kritéria izolace.



obr. 34: Porovnání teplotních polí vnější stěny s jednotnou teplotní škálou

Stejný postup byl uplatněn i při požáru z vnější strany (tedy u vnějšího rohu). Průběh teplot v čase 7200 s je zobrazen na obr. 35.



obr. 35: Teplotní pole na 3D zobrazení vnějšího rohu

Při porovnání maximálních a průměrných vzrůstů je zřejmé, že vnější roh je dříve prohřátý a teplota na neohřívaném povrchu rychleji stoupá nad stanovenou mez.

tab. 18: Kritérium izolace pro konstrukci s vnějším rohem

Čas [min]	15	30	45	60	90	120
Průměrný vzrůst t [°C]	2,3	16	43	83	245	421
Maximální vzrůst t [°C]	3,5	23	60	119	398	687
Kritérium izolace	OK	OK	OK	OK	NE	NE

Také v tomto případě konstrukce splňuje požární odolnost I60.

4 Závěr

Pro podrobné matematické modelování jsou zásadní zejména věrohodné vstupní údaje. V kapitole 2 jsou dostupné údaje shrnuty a mnou vypracovaný model jim odpovídá. Model byl dále porovnán s hodnotami naměřenými během experimentu. Dle mého názoru je model dostatečně přesný pro běžné aplikace a pro prvotní výpočty, které mohou ušetřit výrobcům peníze za nákladné požární zkoušky. Pro větší přesnost by bylo vhodné změřit potřebné tepelné technické charakteristiky použitých materiálů.

Model zobrazuje průběh teploty ve 3D konstrukci a je připraven pro nastavení různých teplotních křivek a různého tepelného namáhání. V modelu lze po drobných úpravách sledovat i fázi chladnutí.

Pro ukázkou aplikace byly zvoleny konstrukční detaily rohu, namáhané normovou teplotní křivkou z vnější nebo z vnitřní strany. Pro větší variabilitu mohly být ještě přidány konstrukční detaily ztužujícího pilíře, ty se však v zadaném čase nepodařilo zpracovat.

Nakonec bylo posouzeno kritérium izolace pro modelované konstrukce stěny a všechny cíle tím byly splněny.

Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA, L. Stavební hmoty. 4. vydání. Praha. 2018. In: *Osobní stránka L. Svoboda Fakulta stavební ČVUT*. [online]. 19. 11. 2020. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodals/sh/SH4v1.pdf>
- [2] BARÁKOVÁ, T., SYSEL, S., KAŇA, T., KADEŘÁBEK, Z. Skupenské změny látek. In: *Fyzika - Gymnázium Brno, Křenová 36* [online]. 5. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.gymkren.cz/wp-content/uploads/13.-Skupenské-změny-látek-2015.pdf>
- [3] VOLF, M. B. *Sklo ve výpočtech*. 1. vydání. Státní nakladatelství technické literatury. Praha. 1984
- [4] FANDERLIK, I. *Křemenné sklo a jeho využití v praxi*. 1. vydání. Státní nakladatelství technické literatury. Praha. 1985
- [5] BANSAL, N. P. *Handbook of Glass Properties*. . Academic Press, Inc.. New York. 1986
- [6] MAZURIN, O. V., STRELTSINA, M. V., SHVAIKO-SHVAIKOVSKAYA, T. P. *Handbook of Glass Data - Part A Silica Glass and Binary Silicate Glasses*. . Elsevier Science Publishers B. V.. Amsterdam. 1983
- [7] FANDERLÍK, I. *Křemenné sklo a jeho využití v praxi*. . Státní nakladatelství technické literatury. Praha. 1985
- [8] KIYOHASHI, H., HAYAKAWA, N., ARATANI, S., MASUDA, H. Thermal conductivity of heat-absorbed soda-lime-silicate glasses at high temperatures. In: *High Temperatures - High Pressures*. volume 34. 2002. in print.
- [9] VARSHNEYA, A. K., MAURO, J. C. *Fundamentals of Inorganic Glasses*. . Third Edition. Elsevier. 2019
- [10] CHOUDHARY, M. K., VENUTURUMILLI, R., HYRE, M. R. Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Melting, Delivery and Forming Processes. *International Journal of Applied Glass*. 2010. [online] 05.10.2020. Dostupné z: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-1294.2010.00018.x>
- [11] CHOUDHARY, M. K., POTTER, R. M. Heat Transfer in Glass-Forming Melts. *Properties of Glass Forming Melts*. eds., PYE, L. D., MONTENERO, A., JOSEPH, I. CRC Press. Boca Raton. FL. USA. 2005. cit. In: CHOUDHARY, M. K., VENUTURUMILLI, R., HYRE, M. R. Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Melting, Delivery and Forming Processes. In: *International Journal of Applied Glass*. 2010. [online] 05.10.2020. Dostupné z: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-1294.2010.00018.x>.
- [12] PROKHORENKO, O. Radiative Thermal Conductivity of Melts *High Temperature Glass Melt Property Database for Process Modeling*. eds. SEWARD, T. P., VASCOTT, T.

American Ceramic Society. Westerville, OH, USA. 2005. cit. In: CHOUDHARY, M. K., VENUTURUMILLI, R., HYRE, M. R. Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Melting, Delivery and Forming Processes. In: *International Journal of Applied Glass*. 2010. [online] 05.10.2020. Dostupné z: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-1294.2010.00018.x>.

[13] KRIVCHIKOV, A., JEZOWSKI, A. Thermal conductivity of glasses and disordered crystals. 2020. In: *Research Gate Publications* [online]. 1.12.2020. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/346510975_Thermal_conductivity_of_glasses_and_disordered_crystals

[14] SHAFIGH, P., ASADI, I., AKHIANI, A. R., MAHYUDDIN, N. B., HASEMI, M. (2020) Thermal properties of cement mortar with different mix proportions. In: *Mater. Construcc.* 70 [339], e224 [online]. 1.12.2020. Dostupné z: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2293/3054>

[15] WEIDENFELD, G., AHARON, Y., HOCHBAUM, I. The Effect of High Temperatures on the Effective Thermal Conductivity of Concrete. In: *INIS Repository* [online]. 10.01.2021. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/083/34083273.pdf

[16] SOSMAN, R. B. *Properties of Silica*. American Chemical Monograph Series. Reinhold Publ. Co. New York. 1927. cit. In: FANDERLIK, I. *Křemenné sklo a jeho využití v praxi*. 1. vydání. Státní nakladatelství technické literatury. Praha. 1985

[17] SHAND, E. B. *Glass Engineering Handbook*. 2. vydání. Mc Graw - Hill Book Company, Inc.. New York. 1958

[18] PODĚBRADSKÁ, J., PAVLÍK, J., TOMAN, J., ČERNÝ, R. Specific Heat Capacity of Cementitious Composites in High-Temperature Range (2003). In: . Research Gate Publications. . in print.

[19] HALDIMANN, M., LUIBLE, A., OVEREND, M. *Structural Use of Glass*. ilustrované vydání. IABSE. Draft. 2007

[20] ŠTULÍK, A. Sklo ve stavebnictví. . Státní nakladatelství politické literatury. 1995. In: *Praha*. [online]. . Dostupné z: Digitální knihovna NTK - Covid

[21] BEDON, CH. Structural Glass Systems under Fire: Overview of Design Issues, Experimental Research and Developments (2017). In: *Research Gate Publications* [online]. 6. 4. 2020. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321254518_Structural_Glass_Systems_under_Fire_Overview_of_Design_Issues_Experimental_Research_and_Developments

[22] Studijní podklady k předmětu Stavební hmoty Sklo. In: *VŠB – Technická univerzita Ostrava* [online]. 6. 4. 2020. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_sklo.pdf

-
- [23] HEJTMÁNEK, P., NAJMANOVÁ H., POKORNÝ M. Požární odolnost stavebních konstrukcí. In: *Požární bezpečnost staveb TZB-info* [online]. 10.01.2021. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>
- [24] KEILLER, A., WALKER, A., LEDBETTER, S. and WOLMUTH, W. *Guidance on glazing at height*. CIRIA Publication C632. CIRIA. London. 2005. cit. In: HALDIMANN, M., LUIBLE, A., OVEREND, M. *Structural use of Glass*. ilustrované vydání. IABSE. Draft. 2007
- [25] VACEK, M. Sklokeramika v ČR. In: *Technika, technologie - Glass Revue*. vydání 23/2004 [online]. 10.01.2021. Dostupné z: <http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=3118&cid=6.html>
- [26] HUDSON, D., NAKAMURA, H. Optical glass house. In: *DesignBoom* [online]. 8. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.designboom.com/architecture/hiroshi-nakamura-nap-optical-glass-house/>
- [27] STRAŠÍKOVÁ, L. Španělsko těsně před volbami v roce 2004 zažilo nejhorší teroristický útok v dějinách. In: *Hlavní zprávy ČT24* [online]. 9. 6. 2020. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/archiv/1460813-spanelsko-tesne-pred-volbami-v-roce-2004-zazilo-nejhors-teroristicky-utok-v-dejinach>
- [28] Pomník obětem bombového útoku na vlakovém nádraží Atocha. In: *archiweb* [online]. 9. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/pomnik-obetem-bomboveho-utoku-na-vlakovem-nadrazi-atocha>
- [29] HROMKOVÁ, K. Spojením historie a inovace vznikla unikátní fasáda ze skleněných cihel. In: *insidecor* [online]. 8. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.insidecor.cz/blog/spojenim-historie-a-inovace-vznikla-unikatni-fasada-ze-sklenenych-cihel>
- [30] Nová městská věž v Isny. In: *ASB Portal* [online]. 5. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/architektura/obcanske-stavby/kultura/nova-mestska-vez-v-isny>
- [31] MEDINA, S. German Town Rejects Peter Zumthor-Designed Glass Tower. In: *Architizer* [online]. 9. 6. 2020. Dostupné z: <https://architizer.com/blog/inspiration/industry/german-town-rejects-peter-zumthor-designed-glass-tower>
- [32] ŠPLÍCHALOVÁ, L. *Stěna ze skleněných cihel při požáru*. Diplomová práce. Praha: ČVUT. 2019
- [33] SOKOL, Z., ELIÁŠOVÁ, M. Performance of glass brick wall exposed to fire. In: *4th International Conference on Structures and Architecture*. Lisabon. 2019. in print.
- [34] SAMAROVÁ, Š., TESAŘOVÁ, V. *Chemický rozbor cihel*. 26. leden 2018. cit. In: ŠPLÍCHALOVÁ, L. *Stěna ze skleněných cihel při požáru*. Diplomová práce. Praha: ČVUT. 2019.

-
- [35] Vetromalta GB - návod na zdění GlassMix. In: *Glass Blocks* [online]. 5. 6. 2020. Dostupné z: <https://www.glassblocks.cz/prislusenstvi-pro-luxfery/95-vetromalta-bila-5kg.html>
- [36] ČSN EN 1992-1-2 (731201): 2006, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru
- [37] VOVESNÝ, V. *Studium vlastností plniv do kompozitů s požadavkem na vysokou teplotní odolnost*. Diplomová práce. Brno: VUT. 2016
- [38] ČSN EN 1991-1-2 (730035): 2004, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru

Seznam obrázků a tabulek

obr. 1: Grafy závislosti teploty t [$^{\circ}\text{C}$] na dodaném teple Q [kJ].....	4
obr. 2: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti „Narottam - Russ“ [5].....	6
obr. 3: Graf závislosti radiační tepelné vodivosti na teplotě „Varshneya“ [9].....	7
obr. 4: Graf závislosti tepelné vodivosti malty na teplotě [15].....	8
obr. 5: Graf závislosti měrné tepelné kapacity malty na teplotě [18].....	10
obr. 6: Porovnání porušení: plavené (nezpevněné) sklo (vlevo), tepelně zpevněné sklo (uprostřed), tvrzené sklo (vpravo) [19].....	14
obr. 7: Optical Glass House v Hirošimě [26].....	17
obr. 8: Atocha Memorial [28].....	17
obr. 9: Schéma zkoušené konstrukce [32].....	19
obr. 10: Schéma rozmístění termočlánků [32].....	21
obr. 11: Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti pro sklo.....	23
obr. 12: Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti pro sklo, zaměřeno na $0 - 8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	23
obr. 13: Měrná tepelná kapacita betonu [36].....	26
obr. 14: Modelovaná část konstrukce.....	27
obr. 15: Schéma umístění kontrolních bodů.....	28
obr. 16: Porovnání s experimentem - termočlánek 8.....	28
obr. 17: Porovnání s experimentem - termočlánek 2.....	29
obr. 18: Porovnání s experimentem - termočlánek 3.....	29
obr. 19: Porovnání s experimentem - termočlánek 10.....	30
obr. 20: Porovnání s experimentem - termočlánek 4.....	30
obr. 21: Porovnání s experimentem - termočlánek 7.....	31
obr. 22: Porovnání s experimentem - termočlánek 5.....	31
obr. 23: Porovnání s experimentem - termočlánek 1.....	32

obr. 24: Porovnání s experimentem - termočlánek 9.....	32
obr. 25: Rozložení teplot v čase 7200 s.....	33
obr. 26: Model rohu stěny.....	34
obr. 27: Teplotní pole na 3D zobrazení vnějšího rohu.....	35
obr. 28: Teplotní pole vnější stěny v čase 900 s.....	35
obr. 29: Teplotní pole vnější stěny v čase 1800 s.....	35
obr. 30: Teplotní pole vnější stěny v čase 2700 s.....	36
obr. 31: Teplotní pole vnější stěny v čase 3600 s.....	36
obr. 32: Teplotní pole vnější stěny v čase 5400 s.....	36
obr. 33: Teplotní pole vnější stěny v čase 7200 s.....	36
obr. 34: Porovnání teplotních polí vnější stěny s jednotnou teplotní škálou.....	38
obr. 35: Teplotní pole na 3D zobrazení vnějšího rohu.....	39
tab. 1: Mechanické a fyzikální vlastnosti běžného skla [1].....	5
tab. 2: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti „Kiyohashi“ [8].....	7
tab. 3: Měrná tepelná kapacita čistě křemičitého skla [16] a sodnovápenatokřemičitého skla [17].....	9
tab. 4: Tabulka aditivních faktorů pro hustotu [3].....	10
tab. 5: Tabulka aditivních faktorů pro teplotní roztažnost [3].....	11
tab. 6: Tabulka hraničních hodnot viskozity.....	12
tab. 7: Přehled použitých termočláneků.....	20
tab. 8: Souhrn dostupných hodnot součinitele tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].....	22
tab. 9: Použité hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro sklo.....	24
tab. 10: Hodnoty pro aditivní výpočet hustoty skla.....	24
tab. 11: Hodnoty pro aditivní výpočet teplotní roztažnosti skla.....	25
tab. 12: Součinitel tepelné vodivosti malty použitý v modelu.....	25
tab. 13: Objemová hmotnost malty použitá v modelu.....	26
tab. 14: Přehled vzdáleností plášťových termočláneků od ohřívané strany konstrukce.....	27

tab. 15: Maximální okamžité rozdíly mezi průběhem teplot dle experimentu a dle modelu.....	33
tab. 16: Průměr absolutních hodnot rozdílů mezi průběhem teplot dle experimentu a dle modelu	33
tab. 17: Kritérium izolace pro konstrukci s vnitřním rohem.....	37
tab. 18: Kritérium izolace pro konstrukci s vnějším rohem.....	39

