



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Experimentální a výpočtová zkoumání vybraných tepelně
technických vlastností oken

Experimental and computational investigation of selected
thermal and technical performance of windows

Diplomová práce

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Bc. Jakub Mazura

Praha 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Mazura Jméno: Jakub Osobní číslo: 468649
Zadávací katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: (N3649) Budovy a prostředí
Studijní obor/specializace: (3608T006) Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální a výpočtová zkoumání vybraných tepelně technických vlastností oken

Název diplomové práce anglicky: Experimental and computational investigation of selected thermal properties of windows

Pokyny pro vypracování:

1) Zkoumání součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek

- realizace měření součinitele prostupu tepla zasklením při různých teplotních spádech
- sestavení vlastního výpočetního modelu pro prostup tepla zasklením se zohledněním teplotní závislosti tepelného odporu prouděním a sáláním,
- sestavení obdobného výpočetního modelu v softwaru WINDOW7,
- porovnání výsledků experimentů s oběma výpočtovými modely,
- návrh a realizace zvláštního experimentu pro sledování vertikálního rozložení povrchových teplot na zasklívací jednotce s využitím termokamery.

2) Komplexní porovnání vlastností zasklívacích jednotek (jen, pokud na to bude čas)

- porovnání vlastností zasklení (součinitel prostupu tepla, energetická propustnost zasklení, světelná propustnost),
- energetické vyhodnocení čistého tepelného toku přes zasklení.

3) Studie přidržitosti pásek používaných k utěsnění připojovací spáry

- návrh experimentu pro testování přidržitosti okenních pásek,
- realizace experimentů pro porovnání přidržitosti různých typů okenních pásek na různých materiálech ostění za různých okrajových podmínek.

4) Studie lineárního činitele prostupu tepla detailu okenního ostění

- vyhodnocení dopadu předřazení pozice okna v rámci okenního ostění při různých kombinacích součinitele prostupu tepla okna a stěny.

Seznam doporučené literatury:

MUNEER, T. Windows in buildings: thermal, acoustic, visual, and solar performance. Oxford: Architectural Press, 2000.


Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2022

Termín odevzdání DP v IS KOS: 9.1.2023


Údaj uveďte v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny 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).

V Praze 08. 01. 2023

.....podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval především panu Ing. Pavlovi Kopeckému, Ph.D. za předání cenných rad a zkušeností, bez kterých by tuto práci nebylo možné uskutečnit. Dále bych rád poděkoval i panu Ing. Kamilovi Staňkovi, Ph.D. za rady a konzultace týkající se měření zasklívacích jednotek a celému UCEEB za možnost uskutečnit experimentální části této práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá experimentálním měřením součinitele prostupu tepla zasklením u vybraných zasklívacích jednotek. Součinitele prostupu tepla jsou stanoveny také různými výpočetními metodami. Výsledkem je porovnání součinitelů prostupu tepla zasklením stanovených pomocí výpočetních metod a měřením v šesti teplotních spádech. Součástí zkoumání součinitele prostupu tepla zasklením je i analýza vlivu šířky plynové dutiny mezi skly a analýza stanovení Nusseltova čísla dle různých autorů. Práce se věnuje také testováním přídržnosti okenních pásek na různých materiálech a testováním vlivů, které přídržnost pásek mohou ovlivňovat. Součástí práce je také studie prostupu tepla vybraných detailů okenního ostění, kde jsou sledovány lineární činitele prostupu tepla a nejnižší vnitřní povrchové teploty okna.

Klíčová slova

okna, zasklení, součinitel tepelné vodivosti, Nusseltovo číslo, okenní pásy

Abstract

This work deals with the experimental measurement of the heat transfer coefficient of glazing for selected glazing units. Heat transfer coefficients are also determined by various calculation methods. The result is a comparison of the heat transfer coefficient of glazing determined using calculation methods and measurements in six temperature gradients. An analysis of the influence of the width of the gas cavity between the glasses and an analysis of the determination of the Nusselt number according to various authors are part of the investigation of the heat transfer coefficient of glazing. The work is also devoted to testing the adhesion of window tapes on various materials and testing the influences that can affect the adhesion of the tapes. Part of the work is also a study of the heat transfer of selected details of the window lining, where linear factors of heat transfer and the lowest internal surface temperature of the window are monitored.

Keywords

windows, glazing, heat transfer coefficient, Nusselt number, window tapes

Obsah

Seznam použitých veličin.....	8
1. Úvod.....	10
1.1. Globální kontext.....	10
1.2. Role oken v budově.....	10
1.3. Cíle diplomové práce	11
2. Experimentální měření součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek.....	12
2.1. Přenos tepla přes zasklení	12
2.2. Stanovení součinitele prostupu tepla zasklením na základě měření	13
2.2.1. Popis měření	13
2.2.2. Odlišnosti od normového postupu měření.....	17
2.2.3. Kalibrace měření.....	18
2.2.4. Způsob vyhodnocení měřených údajů.....	20
2.2.5. Deklarované hodnoty prostupu tepla zasklení U	21
2.2.6. Stanovené hodnoty součinitele prostupu tepla zasklením U na základě měření	22
2.2.7. Diskuse výsledků.....	23
2.3. Měření vertikálního rozložení teplot na zasklívací jednotce.....	24
2.3.1. Popis měření rozložení teplot povrchu IR snímkováním	24
2.3.2. Výsledky měření.....	25
2.3.3. Diskuse výsledků.....	27
3. Zkoumání součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek (výpočetní metody).....	28
3.1. Výpočet v softwaru WINDOW 7.....	28
3.1.1. Software WINDOW 7	28
3.1.2. Způsob výpočtu a okrajové podmínky	29
3.1.3. Výsledky výpočtu hodnoty U v softwaru WINDOW 7	30
3.1.4. Analýza vlivu rozměru plynové dutiny na výpočet hodnoty U	31
3.2. Vlastní výpočetní modely	33
3.2.1. Výpočetní model sestavený v Matlab Simulink	33
3.2.2. Hodnoty U vypočtené vlastním výpočetním modelem	37
3.2.3. Zjednodušený výpočet dle ČSN EN 673.....	38
3.2.4. Testování výpočetních vztahů pro Nusseltovo číslo	40
3.3. Porovnání výsledků výpočetních metod s měřením a hodnotou U deklarovanou výrobcem ..	44
3.3.1. Porovnání výsledků	44
3.3.2. Diskuse porovnání	54
4. Testování přídržnosti okenních pásek	55
4.1. Úvod.....	55
4.1.1. Normový postup zkoušky.....	56
4.2. Zkoušené okenní pásy	57
4.3. Metodika odtrhové zkoušky.....	57
4.3.1. Popis zkoušky.....	58

4.3.2.	Způsob vyhodnocení a nejistoty měření	62
4.4.	Výsledky a porovnání okenních pásek.....	62
4.4.1.	Výsledky odtrhové zkoušky	63
4.4.2.	Výsledky za zvýšené vlhkosti.....	69
4.4.3.	Výsledky za zvýšené teploty	69
4.5.	Diskuse výsledků	71
5.	Studie prostupu tepla detailem okenního ostění.....	73
5.1.	Lineární činitel prostupu tepla	73
5.1.1.	Způsob výpočtu	73
5.1.2.	Vybrané detaily.....	74
5.1.3.	Výsledky.....	75
5.2.	Tepelná ztráta prostupem modelové fasády.....	77
5.2.1.	Způsob výpočtu	77
5.2.2.	Modelové fasády.....	77
5.2.3.	Výsledky.....	78
5.3.	Nejnižší povrchová teplota vybraných detailů.....	79
5.3.1.	Požadavky na nejnižší vnitřní povrchovou teplotu.....	79
5.3.2.	Vybraná okna a detaily	80
5.3.3.	Výpočtový model	81
5.3.4.	Porovnání povrchových teplot vybraných detailů	82
5.4.	Diskuse výsledků	85
	Závěr.....	87
	Použitá literatura.....	92
	Přílohy	94

Seznam použitých veličin

symbol	název	jednotka
Φ	hustota tepelného toku	W/m ²
T	průměrná povrchová teplota zasklení	K
R	tepelný odpor zasklení	(m ² K)/W
h_e	součinitel přestupu tepla na vnější straně	W/(m ² K)
h_i	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně	W/(m ² K)
U	součinitel prostupu tepla	W/(m ² K)
λ	součinitel tepelné vodivosti	W/(m K)
R_{si}	odpory při přestupu tepla na vnitřní straně	(m ² K)/W
R_{se}	odpory při přestupu tepla na vnější straně	(m ² K)/W
U_b	rozšířená standartní nejistota	-
$U_{g\,mea}$	součinitel prostupu tepla zasklením (měření)	W/(m ² K)
$U_{g\,dek}$	součinitel prostupu tepla zasklením (deklarovaná hodnota výrobcem dle ČSN EN 673)	W/(m ² K)
$U_{g\,win}$	součinitel prostupu tepla zasklením (výpočet v softwaru WINDOW 7)	W/(m ² K)
$U_{g\,calc}$	součinitel prostupu tepla zasklením (výpočet vlastním výpočetním modelem)	W/(m ² K)
C	tepelná kapacita	J/(m ² K)
R_g	tepelný odpor skla	m ² K/W
h_r	součinitel přestupu tepla zářením	W/(m ² K)
h_c	součinitel přestupu tepla prouděním a vedením	W/(m ² K)
ρ	objemová hmotnost	kg/m ³
c	měrná tepelná kapacita	J/(kg K)
σ	Stefan-Bolzmannova konstanta	W/(m ² K ⁴)
ε	emisivita povrchu	-
T_m	průměrná teplota povrchů skla obklopující plynovou dutinu	K
Nu	Nusseltovo číslo	-
Ra	Rayleighovo číslo	-
Ar	poměr stran plynové dutiny	-

symbol	název	jednotka
s	šířka plynové dutiny	m
H	výška plynové dutiny	m
Gr	Grashofovo číslo	-
Pr	Prandtlovo číslo	-
g	gravitační zrychlení	m^2/s
μ	dynamická viskozita plynu	$N\ s/m^2$
h_t	celková plošná tepelná propustnost zasklení	$W/(m^2K)$
h_s	celkový součinitel přestupu tepla v dutině	$W/(m^2K)$
U_w	součinitel prostupu tepla oknem	$W/(m^2K)$
U_{wall}	součinitel prostupu tepla stěnou	$W/(m^2K)$
L	tepelná propustnost	$W/(m\ K)$
ψ	lineární činitel prostupu tepla	$W/(m\ K)$
$\Delta\theta$	rozdíl teplot na vnější a vnitřní straně konstrukce	$^{\circ}C$
Q_p	tepelné ztráty prostupem	W
f_{Rsi}	teplotní faktor vnitřního povrchu	-
$f_{Rsi,cr}$	kritický teplotní faktor vnitřního povrchu	-
θ_{ai}	teplota na vnitřní straně konstrukce	$^{\circ}C$
θ_e	teplota na vnější straně konstrukce	$^{\circ}C$
θ_{si}	nejnižší vnitřní povrchová teplota	$^{\circ}C$
θ_{ex}	návrhová teplota na vnější straně konstrukce	$^{\circ}C$
θ_w	teploty rosného bodu	$^{\circ}C$
$\varphi_{i,r}$	relativní vlhkost vnitřního vzduchu	%
$\varphi_{si,cr}$	kritická vnitřní povrchová vlhkost	%

1. Úvod

1.1. Globální kontext

Je rok 2022 a Evropa i celý svět se potýká s mnoha důsledky změny klimatu, které svými důsledky ovlivňují čím dál větší počet lidí. Hesla jako globální oteplování, zvyšování cen energií a snižování energetické náročnosti jsou každodenními tématy.

Země EU se zavázaly do roku 2050 učinit Evropu klimaticky neutrální. [1] Rada EU pracuje na tvorbě nových pravidel „Fit for 55“, kterými chce docílit snížení emisí EU alespoň o 55 % do roku 2030 (ve srovnání s rokem 1990). V současnosti tvoří spotřeba energie v budovách států EU 40 % veškeré spotřeby energie a 36 % emisí skleníkových plynů. [2] Součástí balíčku „Fit for 55“ je i snížení energetické náročnosti budov, a to tak, že všechny nové budovy mají být s nulovými emisemi od roku 2030 a do roku 2050 se mají stát bezemisní i budovy stávající. [1]

Mezi hlavní pilíře snižování energetické náročnosti budov patří zlepšení tepelně technických vlastností obálky budov. Proti tomu jde však několik faktorů typických pro moderní výstavbu. Jedná se například o zvyšování hustoty zástavby i podlažnosti, vyšší nároky uživatelů na denní osvětlení i trend zvětšování prosklených ploch, a to jak u administrativních, tak u bytových objektů.

Stavebně fyzikální vlastnosti oken hrají významnou roli při snižování energetické náročnosti budov. Vyšší podíl zasklení v ploše obálky s sebou nese nejen zvýšení tepelné propustnosti budovy v zimním období, ale i nutnost řešení efektivního stínění, případně dokonce chlazení budovy v letním období, kvůli nadměrnému přehřívání. Na okna jsou kladeny čím dál větší nároky. Cílem je co největší snížení prostupu tepla z interiéru do exteriéru za současné regulace množství prostupující energie ze slunečního záření do interiéru (odstínění v letním období, naopak vítané v zimním období). Nároky na zasklení jsou však kladeny i na prostup světla nebo vzduchovou neprůzvučnost.

1.2. Role oken v budově

Okno je jedním ze základních stavebních prvků tvořící obálku budovy neboli rozhraní mezi vnitřním a venkovním prostředím. Jeho hlavním účelem je přísun denního světla do interiéru a vizuální kontakt člověka s okolím. Při plnění těchto funkcí musí však okno odolávat vnějším vlivům a udržovat žádoucí podmínky v interiéru, jako je například definovaná teplota nebo zamezení hluku z exteriéru. Hlavní část okna tvoří zasklení, které

plní jeho hlavní účel. Pro možnost ukotvení zasklení do stavebního otvoru slouží rám okna, který zároveň u většiny oken zajišťuje jeho otevíravost, k možnosti větrání a čištění vnější strany zasklení. Poslední a neméně důležitou částí okna je připojovací spára tvořící styk rámu s okenním otvorem, která musí také odolávat dříve zmíněným vnějším vlivům.

1.3. Cíle diplomové práce

Tato práce se zabývá zkoumáním vybraných parametrů, které ovlivňují prostup tepla skrze okno. Cílem práce je stanovení součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek, a to jak experimentálním měřením, tak i pomocí výpočtů. Práce má odhalit parametry ovlivňující prostup tepla zasklením a vývoj prostupu tepla se snižující se teplotou venkovního prostředí. K tomu má napomoci i zkoumání výpočtu součinitele prostupu tepla zasklením různými výpočetními metodami. Různé způsoby stanovení součinitele prostupu tepla zasklením budou porovnány a bude zhodnoceno do jaké míry se podobají a bude odhalen případný důvod rozdílných výsledků.

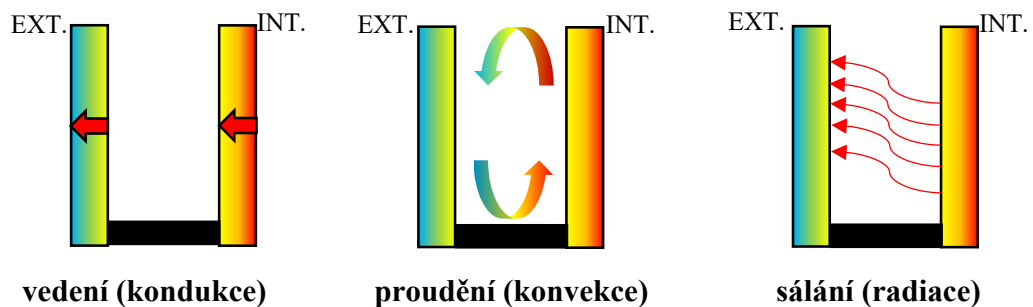
Dalším úkolem práce je i experimentální zkoumání přídržnosti okenních pásek. Cílem je porovnání několika okenních pásek z hlediska jejich přídržnosti k různým stavebním materiálům. Pro porovnání má být navržena experimentální zkouška, která umožní testování pásek z hlediska jejich přídržností. Testovány mají být i různé faktory ovlivňující přídržnost, jako jsou doba přilepení, použití adhezního nástřiku, zvýšená vlhkost podkladu nebo zvýšená teplota.

Posledním cílem práce je zkoumání prostupu tepla skrze detail napojení okna a obvodové stěny. Porovnáván má být lineární činitel prostupu tepla vybraných detailů a tepelné ztráty vlivem těchto tepelných vazeb. U vybraných detailů bude pozorována i nevhodnější poloha osazení okna vůči ostění obvodové stěny, a to nejen z pohledu lineárního činitele prostupu tepla, ale i z pohledu nejnižší povrchové teploty vnitřního povrchu okna.

2. Experimentální měření součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek

2.1. Přenos tepla přes zasklení

Prostup tepla zasklením nastává při teplotním rozdílu na jeho vnější a vnitřní straně. Teplo se šíří z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou a přenos tepla může probíhat třemi způsoby, vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Při prostupu tepla izolačním dvojsklem nebo trojsklem dochází k přenosu tepla všemi těmito způsoby.



Hustota tepelného toku Φ (W/m^2) vyjadřuje kolik tepla při daném teplotním rozdílu projde jedním metrem čtverečním zasklení o určitém tepelném odporu za jednu sekundu.

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R} = U \cdot (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Kde T ($^{\circ}\text{C}$) je teplota povrchů zasklení, R ($(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$) je tepelný odpor a U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) je součinitel prostupu tepla.

Součinitel prostupu tepla zasklením (hodnota U) je vlastnost zasklení, která udává hustotu tepelného toku v ustáleném stavu při jednotkovém teplotním rozdílu v centrální části zasklení, tj. dostatečně daleko od vlivu rámečku podél okrajů zasklení. Hodnota U závisí na tepelném odporu zasklení a na součinitelích přestupu tepla na vnějším a vnitřním povrchu. [3]

$$\frac{1}{U} = R + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} \quad (2)$$

Kde R ($(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$) je tepelný odpor zasklení z povrchu na povrch, h_e ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) je součinitel přestupu tepla na venkovní straně a h_i ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně.

Tepelný odpor zasklení R se vypočítá z povrchových teplot a hustot tepelných toků naměřených na vnější a vnitřní straně zasklení.

$$R = 2 \cdot (T_1 - T_2) / (\phi_1 + \phi_2) \quad (3)$$

Kde T ($^{\circ}\text{C}$) je měřená teplota povrchů zasklení a Φ (W/m^2) je měřená hustota tepelného toku.

Pro zasklení bez nízkoemisních povlaků na vnějších površích se pro deklarovanou hodnotu U vypočtenou dle více uvedených vztahů použijí normové součinitele přestupu tepla. [3] Pro součinitel přestupu tepla na vnitřní straně $h_i = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a pro součinitel přestupu tepla na vnitřní straně $h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

2.2. Stanovení součinitele prostupu tepla zasklením na základě měření

2.2.1. Popis měření

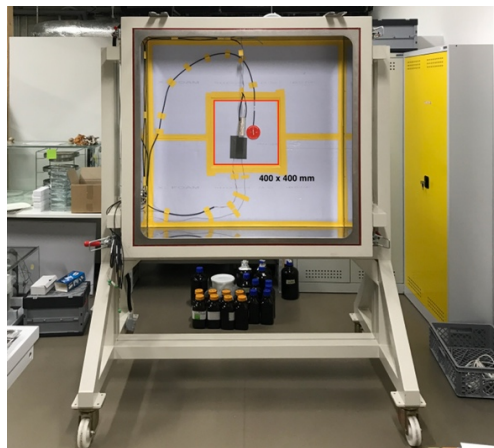
Z výše uvedených vztahů vyplývá, že součinitel prostupu tepla zasklením lze vypočítat na základě měření teploty povrchů a hustoty tepelného toku na interiérové a exteriérové straně zasklívací jednotky. Měření byla prováděna na vzorcích zasklívacích jednotek s různou konfigurací dvojskel a trojskel (viz Tabulka 2). Měření součinitele prostupu tepla zasklením bylo prováděno v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze v laboratoři stavební fyziky.

Měření probíhala na vzorcích zasklívacích jednotek o rozměrech $400 \times 400 \text{ mm}^2$, které byly umístěny mezi prostředí o různé teplotě. K nastavení a udržování podmínek prostředí byly použity klimatické komory WEISS (viz Obr. 1). Klimatická komora WEISS WK3-1000/0 byla použita pro simulaci vnitřního prostředí. Klimatická komora WEISS WK3-1000/40 byla použita k simulaci okrajových podmínek na vnější straně zasklení. Mezi tyto komory byl umístěn střední mezikus s rámem z extrudovaného polystyrenu o tloušťce 50 mm (viz Obr. 2).

Zasklívací jednotky byly osazovány do rámu z extrudovaného polystyrenu (viz Obr. 2), kde byly fixovány páskou z obou stran, která zároveň utěsnila spáru mezi zasklením a hranou otvoru v rámu. Osazení vzorků bylo provedeno tak, aby vnitřní strana zasklení (dle označení výrobcem) směřovala do interiérové komory. Případné pokovení v rámci zasklení bylo tedy v pozici zamýšlené výrobcem.

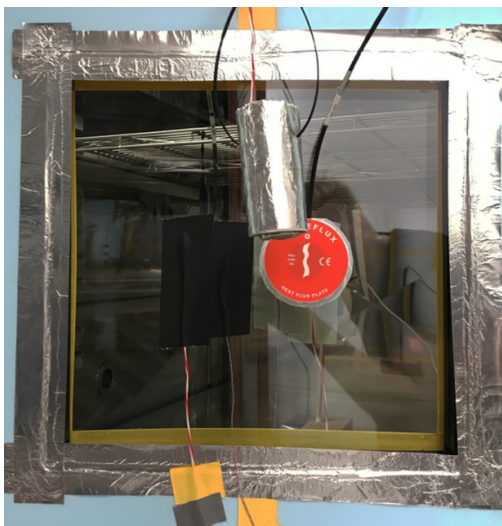


Obr. 1 Sestava klimatických komor s mezikusem

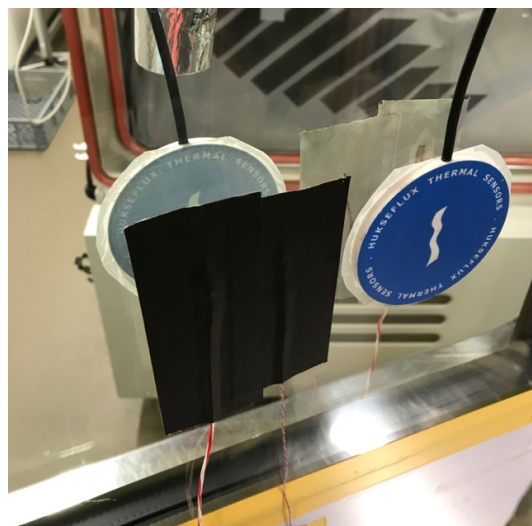


Obr. 2 Mezikus s rámem z XPS

Vzorky byly následně osazeny senzory tepelného toku Hukseflux HFP01 a termočlánky Tc a Tt pro měření povrchové teploty (viz Obr. 3). Senzory tepelného toku byly k povrchu skla lepeny oboustrannou lepicí páskou na pravou stranu od středu zasklení (viz Obr. 4). Termočlánky byly přilepeny černou textilní páskou na levou stranu od středu zasklení. Umístění senzorů bylo zvoleno, tak aby měřené hodnoty reprezentovaly střed zasklení a nebyly ovlivněny okrajovou částí vzorku. Senzory nebyly navzájem umístěny naproti sobě, aby nemohlo docházet k ovlivnění měření prvního senzoru vlivem hmoty druhého senzoru umístěného přímo v jeho ose. Černá textilní páska pro fixaci termočlánků má emisivitu blízkou emisivitě povrchu skla, a nedochází tak k ovlivnění měření touto páskou.

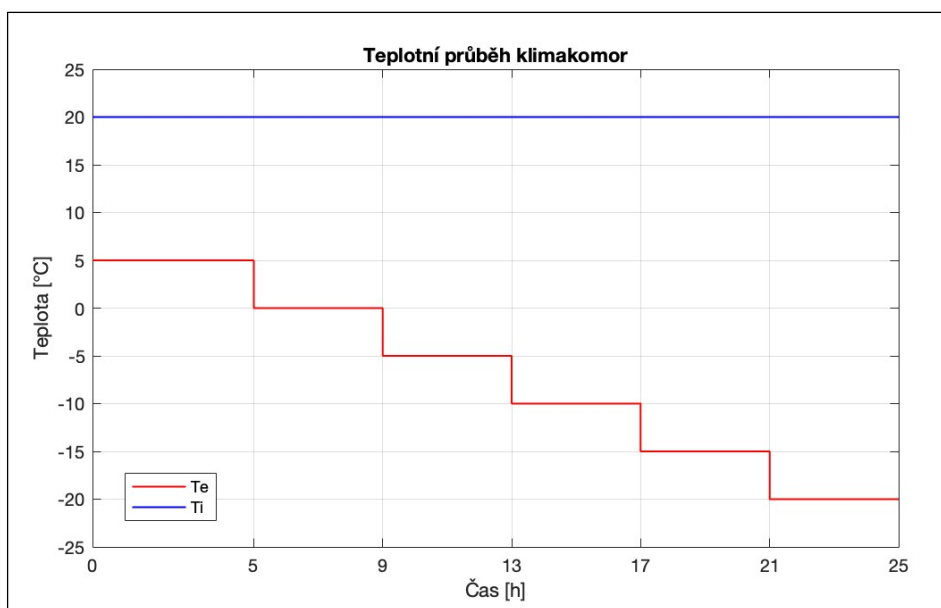


Obr. 3 Osazená zasklívací jednotka



Obr. 4 Poloha senzorů a termočlánků

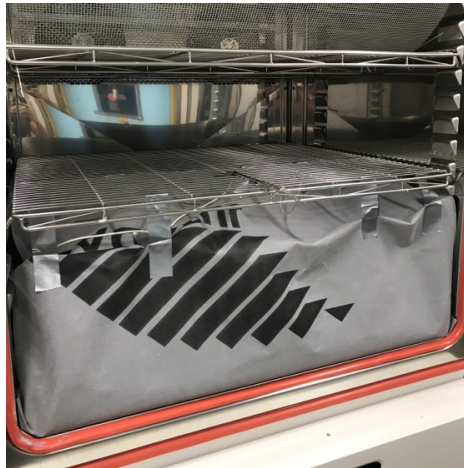
Měření byla prováděna pro různé rozdíly teplot. Na interiérové straně zasklení byla klimatická komora nastavena na stálou teplotu 20 °C. Na straně exteriéru byla teplota měněna od 5 °C do -20 °C s krokem 5 °C (viz Graf 1). Doba měření jednoho teplotního spádu byla nastavena na čtyři hodiny, což je dostatečná doba k ustálení podmínek (ustálení hustoty tepelných toků a teplot na obou stranách zasklení). Jelikož při prvním teplotním spádu docházelo k ochlazení vnější strany zasklení na 5 °C z teploty 23 °C, ve které byly vzorky uskladněny, byla doba ustálení pro první teplotní spád prodloužena na pět hodin.



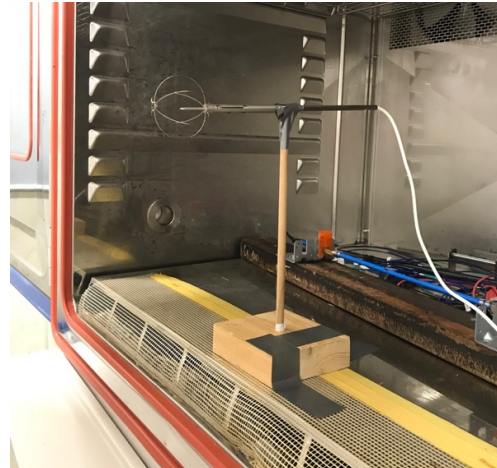
Graf 1 - Nastavení okrajových podmínek v klima komoře v průběhu měření

Okrajové podmínky, za kterých bylo prováděno měření, byly nastaveny tak, aby co nejvíce reprezentovaly stavy běžné po zabudování. Pro kontrolu okrajových podmínek vytvářených v klima komorách, byla měřena teplota a rychlost proudění vzduchu před vzorkem zasklení z obou jeho stran. Teplota vzduchu byla měřena pomocí termočlánků T_c umístěných v ochranném krytu, který zamezuje ovlivnění čidla sáláním vůči povrchu skla.

Použité klima komory neumožňují regulaci rychlosti přiváděného vzduchu. Vzduch o dané teplotě proudí z dolní části komory s rychlostí přibližně 6 m/s, a proto byla rychlost proudění vzduchu v interiérové komoře regulována instalací difuzní folie na 3 m/s (viz Obr. 5). Měření rychlosti proudění vzduchu bylo prováděno pomocí dvou termických anemometrů umístěných v úrovni středu zasklení před jeho vnitřní a vnější stranou ve vzdálenosti 10 cm (viz Obr. 6).

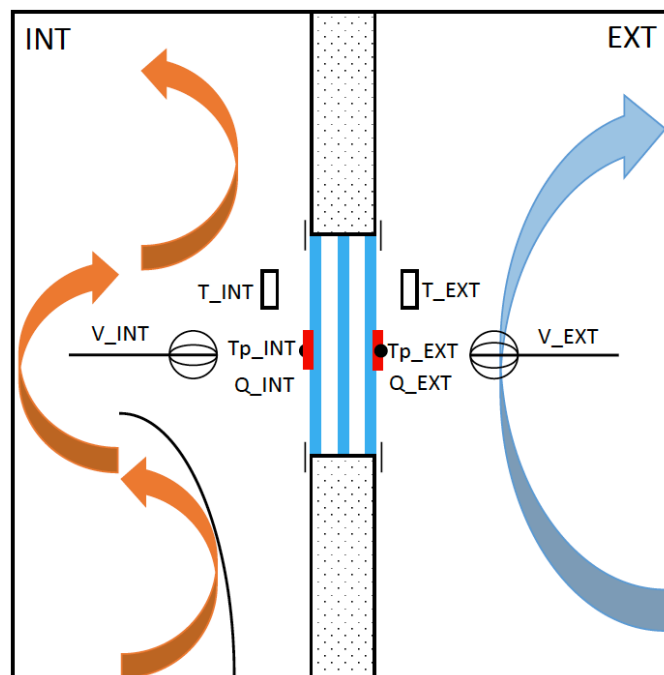


Obr. 5 Interiérová klima komora s folií



Obr. 6 Exteriérová klima komora s anemometrem

Všechny měřené veličiny byly zapisovány v půlminutovém kroku pomocí multifunkčního dataloggeru Datataker DT-85, který naměřené napětí ze všech senzorů automaticky převedl na požadované veličiny se zohledněním zadaných kalibračních konstant, dle kalibrací jednotlivých senzorů.

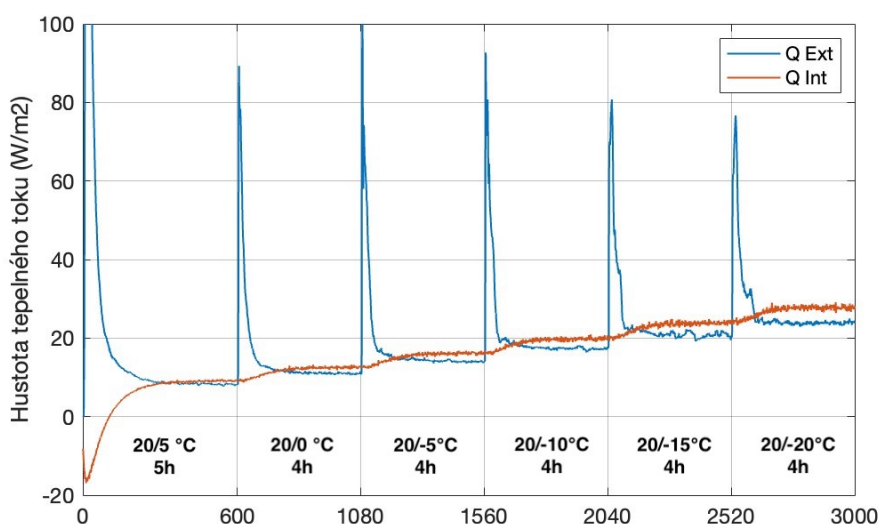


Obr. 7 Schéma měření

2.2.2. Odlišnosti od normového postupu měření

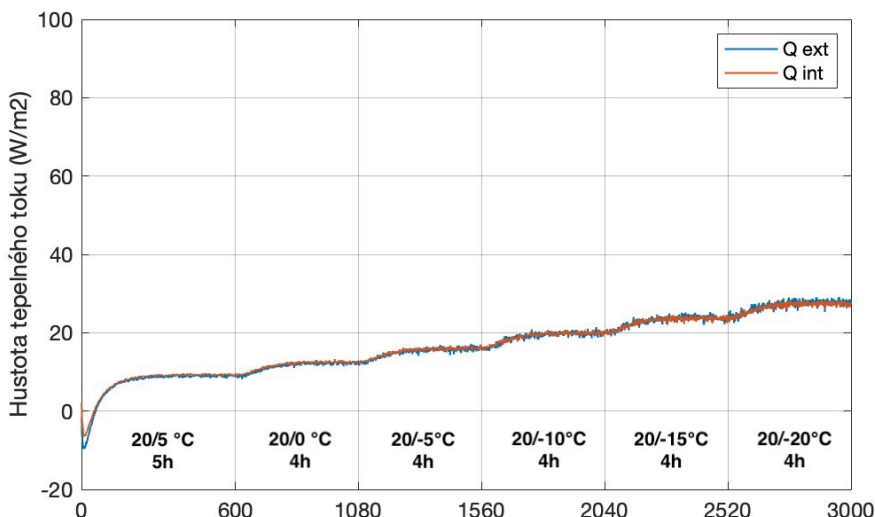
Postup stanovení součinitele prostupu tepla zasklením metodou měření tepelného toku definuje norma ČSN EN 675. Hlavní odlišností od normového postupu měření je způsob vytvoření okrajových podmínek na interiérové a exteriérové straně zasklení. V provedeném experimentu byly okrajové teploty nastaveny v klima komorách. U normového postupu jsou povrchy skla ohřívány, respektive chlazeny přímo na jejich povrchu pomocí teplé a studené desky. Pokud tedy měříme hustotu tepenného toku při teplotním spádu 20/0 °C, jsou v případě použití normového postupu nastaveny teploty povrchů velmi blízké 20 a 0 °C, zatímco u měření pomocí klima komor jsou tyto teploty nastaveny pro okolní vzduch. Kvůli vlivu odporů při přestupu tepla mezi vzduchem v klima komoře a povrchem skla jsou teploty na površích skla odlišné od nastavených podmínek prostředí. Skutečný rozdíl teplot mezi povrchy se mění v závislosti na tepelných vlastnostech měřeného zasklení. Například 15/2 °C pro dvojsklo bez pokovení s $U = 2,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, 17,5/0,5 °C pro dvojsklo s pokovením s $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a 18,5/0,5 °C pro izolační trojsklo s $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Z naměřených průběhů hustoty tepelného toku na interiérové a exteriérové straně se ukázalo, že senzor na exteriérové straně měří ve srovnání se senzorem interiérovým nižší hodnoty. Rozdíl se zvětšoval s nižší teplotou v exteriérové komoře (viz Graf 2). Při ustáleném stavu by se hodnoty naměřené oběma senzory neměly lišit.



Graf 2 - Porovnání měřené hustoty tepelného toku na interiérové a exteriérové straně

Pro ujištění, že senzor na exteriérové straně funguje správně, bylo provedeno srovnání, při kterém byly oba senzory umístěny na interiérovou stranu zasklení a z grafu níže je patrné, že oba senzory naměřily stejné hodnoty (viz Graf 3).



Graf 3 - Srovnávací měření hustoty tepelného toku se senzory na int. straně

Na základě kontrolního porovnání, ale také údajů z jednotlivých dílčích měření, se domnívám, že použité senzory tepelného toku vykazují teplotní závislost. Vzhledem k tomu, že teplotní závislost výrobce neuvádí, byla všechna vyhodnocení výsledků měření prováděna pouze na základě senzoru hustoty tepelného toku umístěného na interiérové straně.

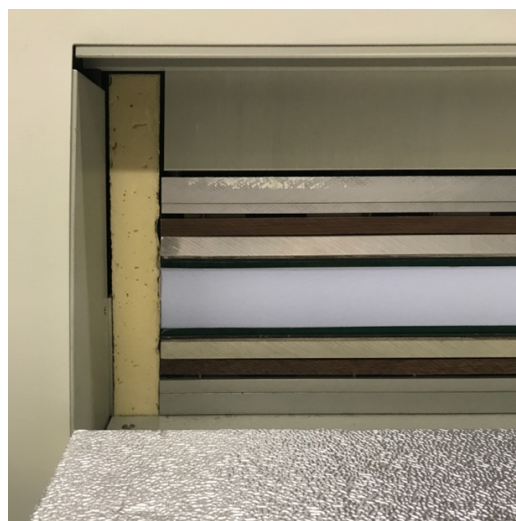
2.2.3. Kalibrace měření

Pro ověření přesnosti měření v klima komorách byla provedena kalibrace měření za pomoci Heat Flow Metru (dále jen HFM). HFM (viz Obr. 8) je přístroj pro měření součinitele tepelné vodivosti (λ) stavebních materiálů. Měřený vzorek stavebního materiálu je vložen mezi teplou a chladnou desku. Přístroj neumožňuje měření při záporných teplotách a v praxi byl problém i s teplotním spádem 20/0 °C. Proto byla kalibrace prováděna pro teplotní spád 20/5 °C. Kalibrace nemohla být provedena na vzorku zasklení, neboť v HFM lze měřit vzorky o rozměrech 300 × 300 mm² a pouze v horizontální poloze. Jelikož se vzorky zasklení, díky dutinám a v nich probíhajícímu přestupu tepla konvekcí, chovají jinak ve vertikální a horizontální poloze, bylo nutné pro kalibraci použít jiný referenční materiál. Jako referenční materiál byl zvolen extrudovaný polystyren XPS, který byl opatřen čtyř milimetrovým sklem z obou stran (viz. Obr. 9). Cílem bylo dosáhnout co největší podobnosti obou zkoušek, především s ohledem

na přilepení senzorů hustoty tepelného toku a termočlánků. Z jednoho kusu desky XPS tloušťky 40 mm byly vyříznuty dva vzorky, jeden o rozměrech $400 \times 400 \text{ mm}^2$ pro měření v klimatické komoře, a druhý o rozměrech $300 \times 300 \text{ mm}^2$ pro měření v HFM. Nejprve bylo provedeno měření referenčního vzorku v klima komoře při teplotním spádu $20/5 \text{ }^\circ\text{C}$. Poté byly nastaveny stejné teploty v HFM jako naměřené hodnoty povrchových teplot při měření v klima komoře.



Obr. 8 Heat Flow Meter (HFM)



Obr. 9 Referenční vzorek XPS se sklem v HFM

Tabulka 1 - Výsledky kalibrace měření (XPS se sklem)

Tloušťka vzorku:	46,8 mm	
Teplotní spád:	18,9/5 $^\circ\text{C}$	
Měřicí přístroj:	Klima komora	HFM
Φ :	$9,8 \pm 0,3 \text{ W/m}^2$	$11,3 \pm 0,2 \text{ W/m}^2$
U (bez odporů na přestupu):	$0,71 \pm 0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$0,816 \pm 0,015 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
λ :	$33 \pm 4 \text{ m W}/(\text{m K})$	$38,2 \pm 0,8 \text{ m W}/(\text{m K})$

Jak je patrné z výsledků kalibrace (viz Tabulka 2) jsou měřené hodnoty hustoty tepelného toku v HFM o cca 15 % vyšší než při měření v klima komoře. Na základě této kalibrace však nelze hustotu tepelného toku měřenou v klima komoře korigovat. Při měření v klima komoře může docházet i k chybě měření povrchových teplot, naopak hustota tepelného toku může být měřena správně. Pro ověření správnosti měření povrchových teplot v klima komoře napomohlo měření povrchových teplot na zasklívací jednotce pomocí IR kamery popsané níže (viz kap. 2.3).

2.2.4. Způsob vyhodnocení měřených údajů

Vyhodnocení dat z měření bylo prováděno v prostředí softwaru MATLAB [10], který umožnil efektivní vyhodnocení naměřených dat. Pro stanovení součinitele prostupu tepla byla vybrána data z poslední hodiny každého teplotního spádu. Vyhodnocení bylo provedeno jen na základě měření hustoty tepelného toku interiérovým senzorem. Teploty povrchů skla naměřené pomocí T_c a T_t termočlánků byly pro každou stranu zasklení průměrovány. Z naměřených teplot povrchů a hustoty tepelného toku byl stanoven nejprve tepelný odpor zasklení R a následně součinitel prostupu tepla zasklením U s normovými odpory přestupu tepla $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ a $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

$$R = \frac{\frac{T_{c_{int}} + T_{t_{int}}}{2} - \frac{T_{c_{ext}} + T_{t_{ext}}}{2}}{\phi_{int}} \quad (4)$$

Kde T_c a T_t ($^{\circ}\text{C}$) jsou měřené teploty povrchu zasklení pomocí termočlánků T_t a T_c a Φ (W/m^2) je měřená hustota tepelného toku.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (5)$$

Kde U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) je součinitel prostupu tepla zasklením (hodnota U), R_{si} a R_{se} ($(\text{m}^2\text{K)/W}$) jsou normové odpory při přestupu tepla a R ($(\text{m}^2\text{K)/W}$) je tepelný odpor z rovnice (4).

Každé měření je zatíženo nejistotou způsobenou různými nedokonalostmi měřicí techniky, způsobu měření, ale i vlivy operátora. Výsledky měření je potřebné uvádět s odhadovanou nejistotou měření zahrnující všechny vlivy. Způsob stanovení nejistoty je uveden v příloze A. Prezentace všech výsledků měření je uváděna s rozšířenou standardní nejistotou U_b , která je rozšířena koeficientem $k = 2$ a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %.

2.2.5. Deklarované hodnoty prostupu tepla zasklení U

Tabulka 2 – Seznam měřených vzorků zasklení

č.	Sklo 1	Mezera 1	Sklo 2	Mezera 2	Sklo 3	Pokovení	U *	Výrobce
1	4	18	4	18	4	iplus 1.1	0,5	AGC Glass Europe
2	4	12	4	12	4	iplus 1.0	0,4	AGC Glass Europe
3	6	18	4	16	4	iplus 1.1	0,5	AGC Glass Europe
4	8	16	4	16	4	iplus 1.1	0,6	AGC Glass Europe
5	4	16	4	-	-	iplus 1.1	1,1	AGC Glass Europe
6	4	16	4	-	-	iplus 1.0	1,0	AGC Glass Europe
7	8	16	4	-	-	iplus 1.1	1,1	AGC Glass Europe
8	4	18	4	18	4	iplus LS	0,6	AGC Glass Europe
9	4	18	4	18	4	iplus LS	0,6	AGC Glass Europe
10	6	16	6	14	6	iplus LS	0,7	AGC Glass Europe
11	4	18	4	18	4	ECLAZ	0,5	Saint-Gobain
12	6	18	4	16	4	ECLAZ	0,5	Saint-Gobain
13	6	18	4	16	4	Energy 72/38	0,5	AGC Glass Europe
14	6	16	6	14	6	Energy 72/38	0,6	AGC Glass Europe
15	6	18	4	16	4	COOL LITE	0,5	Saint-Gobain
16	4	16	4	-	-	-	2,7	AGC Glass Europe
17	3	16	3	-	-	-	2,7	AGC Glass Europe

* Hodnota součinitele prostupu tepla (vertikální zasklení) dle ČSN EN 673 udávaná výrobcem.

Legenda		sklo bez pokovení
		sklo s nízkoemisním pokovením
		Argon 90 %
		Krypton 90 %
		vzduch 100 %

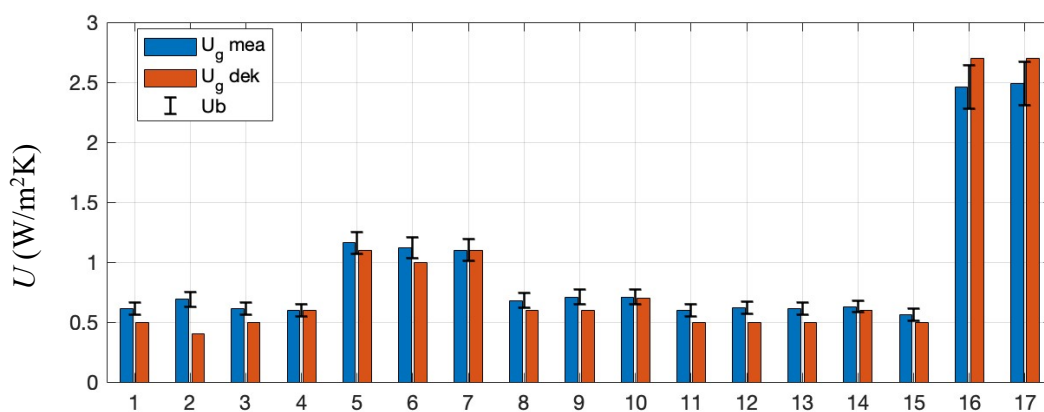
Technické listy s podrobnou specifikací vzorků zasklení jsou uvedeny v příloze B pod číslem dle výše uvedeného seznamu.

2.2.6. Stanovené hodnoty součinitele prostupu tepla zasklením U na základě měření

Tabulka 3 – Výsledky stanovených součinitelů prostupu tepla zasklením U (W/m^2K) $\pm U_b$ na základě měření

č.	20/5 °C	20/0 °C	20/-5 °C	20/-10 °C	20/-15 °C	20/-20 °C
1	0,59±0,06	0,61±0,05	0,63±0,05	0,65±0,04	0,67±0,04	0,68±0,04
2	0,69±0,07	0,69±0,06	0,69±0,05	0,69±0,04	0,69±0,04	0,69±0,04
3	0,60±0,06	0,61±0,05	0,62±0,04	0,63±0,04	0,65±0,04	0,66±0,03
4	0,59±0,07	0,60±0,05	0,60±0,04	0,61±0,04	0,63±0,04	0,64±0,03
5	1,11±0,11	1,16±0,09	1,21±0,08	1,26±0,07	1,31±0,07	1,35±0,06
6	1,06±0,11	1,12±0,09	1,17±0,08	1,22±0,07	1,27±0,06	1,31±0,06
7	1,06±0,11	1,10±0,09	1,16±0,08	1,21±0,07	1,25±0,06	1,29±0,06
8	0,66±0,07	0,68±0,06	0,69±0,05	0,70±0,04	0,72±0,04	0,73±0,04
9	0,70±0,08	0,71±0,06	0,73±0,05	0,75±0,05	0,76±0,04	0,77±0,04
10	0,70±0,08	0,71±0,06	0,72±0,05	0,72±0,04	0,72±0,04	0,73±0,04
11	0,59±0,06	0,60±0,05	0,62±0,04	0,64±0,04	0,65±0,04	0,66±0,03
12	0,61±0,07	0,62±0,05	0,63±0,04	0,64±0,04	0,65±0,04	0,66±0,03
13	0,60±0,06	0,61±0,05	0,62±0,04	0,63±0,04	0,64±0,04	0,66±0,03
14	0,62±0,07	0,63±0,05	0,63±0,04	0,64±0,04	0,64±0,04	0,65±0,03
15	0,55±0,06	0,56±0,05	0,57±0,04	0,59±0,04	0,60±0,03	0,62±0,03
16	2,48±0,24	2,46±0,18	2,44±0,15	2,42±0,12	2,40±0,11	2,39±0,10
17	2,52±0,24	2,49±0,18	2,48±0,15	2,46±0,13	2,44±0,11	2,42±0,10

Grafické znázornění hodnot součinitele prostupu tepla zasklením U_{mea} stanovených na základě měření je patrné v kap. 3.3 včetně uvedených nejistot.



Graf 4 - Porovnání měřených a deklarovaných hodnot U pro teplotní spád 20/0 °C

2.2.7. Diskuse výsledků

U většiny vzorků zasklení je patrný nárůst součinitele prostupu tepla zasklením U s rostoucím teplotním spádem neboli větším rozdílem teplot na interiérové a exteriérové straně zasklení. Rozdíl je u některých vzorků až 10 % v porovnání mezi teplotními spády 20/5 °C a 20/-20 °C, a to i přes skutečnost, že součinitel tepelné vodivosti plynů klesá s klesající teplotou. Důvodem rozdílů je s velkou pravděpodobností zvýšení přestupu tepla prouděním v plynové dutině vzorku zasklení. U některých měřených vzorků je patrný rozdíl ve srovnání s hodnotou U uvedenou výrobcem. Důvod rozdílu je zkoumán v kap. 3.2.3. Vzorek zasklení č. 2 (viz Graf 15) se od hodnoty uváděné výrobcem liší natolik, že se domnívám, že došlo k záměně plnicího plynu anebo ke špatnému označení zasklení.

Na velikosti stanoveného součinitele prostupu tepla zasklení U má kromě teplotního spádu vliv i mnoho dalších aspektů, jako velikost plynové mezery, použitý plyn nebo emisivita použitého pokovení. Zásadní vliv použitého pokovení a plnicího plynu zasklívací jednotky je patrný při porovnání vzorků č. 5 a 16 (viz Graf 15 a Graf 29). U vzorků bez pokovení č. 16 a 17 (viz Graf 29 a Graf 30) je zajímavý opačný trend (klesající) hodnoty U s větším rozdílem teplot. Pravděpodobné je, že u těchto vzorků zasklení je míra konvekce už při nižších teplotních spádech taková, že se její vliv s klesající teplotou na exteriérové straně zasklení již příliš nezvyšuje. Klesající tendenci hodnoty U pak způsobuje klesající součinitel tepelné vodivosti plynu.

Zajímaví je také neznatelný rozdíl měřených hodnot U u vzorků se stejným pokovením, ale rozdílnou velikostí plynových dutin, jako je tomu například u vzorků č. 9 a 10 (viz Graf 22 a Graf 23).

K lepšímu pochopení, jakým způsobem různé vlivy ovlivňují hodnoty U u různých druhů zasklení, byly součinitele prostupu tepla zasklením zkoumány pomocí výpočtových metod a modelů popsaných v kap. 3.

2.3. Měření vertikálního rozložení teplot na zasklívací jednotce

Při měření součinitele prostupu tepla zasklení nastala otázka, zda při dané velikosti vzorku nedochází k ovlivnění měření vlivem okrajové části. K zodpovězení této otázky bylo využito měření IR kamerou, která je schopna ukázat rozložení teplot po celém povrchu měřeného zasklení. Měření rozložení teplot měla také odhalit nižší teploty na spodním okraji zasklení z interiérové strany, které byly indikovány díky orosení spodní části zasklení při odsunutí interiérové komory bezprostředně po ukončení měření.

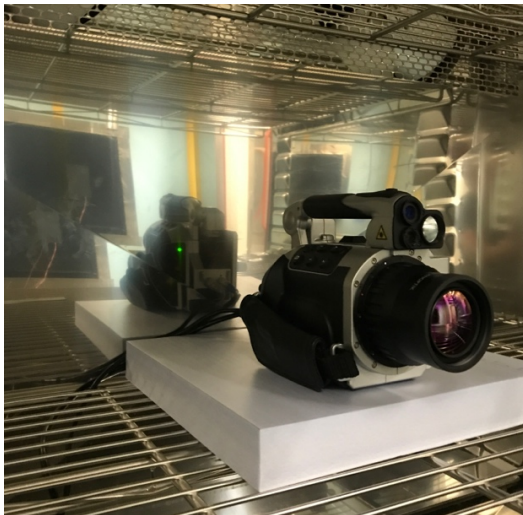
Pro IR snímkování byly vybrány dva vzorky zasklení. Jako první vzorek bylo vybráno zasklení s nejnižším tepelným odporem (vzorek č. 17), kde se předpokládal maximální možný vliv okrajových částí. Druhý vybraný vzorek zasklení byl zvolen naopak s nejvyšším tepelným odporem (vzorek č. 11), kde se předpokládaly vysoké povrchové teploty v celé ploše vzorku. Předpokladem byly také rozdílné hustoty tepelného toku při horním a dolním okraji, proto bylo měření doplněno o další senzory v těchto polohách.

2.3.1. Popis měření rozložení teplot povrchu IR snímkováním

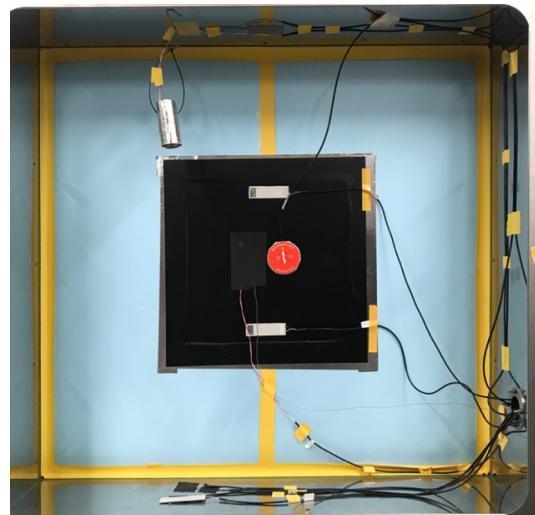
Rozložení teplot na povrchu vzorku zasklení bylo měřeno na interiérové straně vzorku zasklení. Byl použit maximální teplotní spád 20/–20 °C. Vybrané vzorky zasklení byly opatřeny černou laminační folií s emisivitou blízkou povrchu zasklení ($\epsilon = 0,95$), tak aby bylo možné povrch zasklení měřit pomocí IR kamery. Měření bez opatření laminační folie by bylo zkresleno tepelným „odrazem“ stěn klima komory v měřeném skle. [6]

Měření bylo prováděno IR kamerou VarioCAM HD inspect 800 s rozlišením 1024×768 pixelů (viz Obr. 10). Každý pixel představuje hodnotu měřené teploty, tak dochází k měření 786432 hodnot teploty v jednom snímku. IR kamera byla před zahájením měření vložena do klima komory na interiérovou stranu vzorku zasklení a během měření byla ovládána na dálku prostřednictvím připojeného počítače. Snímky byly pořízeny v ustáleném stavu po ustálení tepelných toků. Pro možnost vyhodnocení naměřených dat IR snímku byla měřena teplota vzduchu v klima komoře (teplota prostředí) a vzdálenost mezi IR kamerou a měřeným povrchem skla. Měření IR kamerou bylo kalibrováno pomocí měření termočlánky T_c a T_t .

Součástí měření bylo i sledování rozdílů mezi hustotou tepelných toků po výšce vzorku, proto byla přidána čidla na horní a spodní okraj zasklení (viz Obr. 11).



Obr. 10 Termokamera v interiérové klima komoře

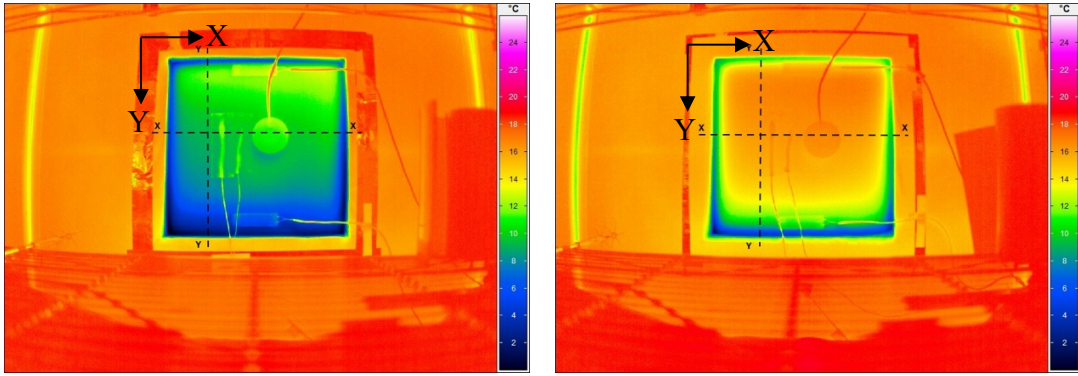


Obr. 11 Vzorek zasklení s laminační folií

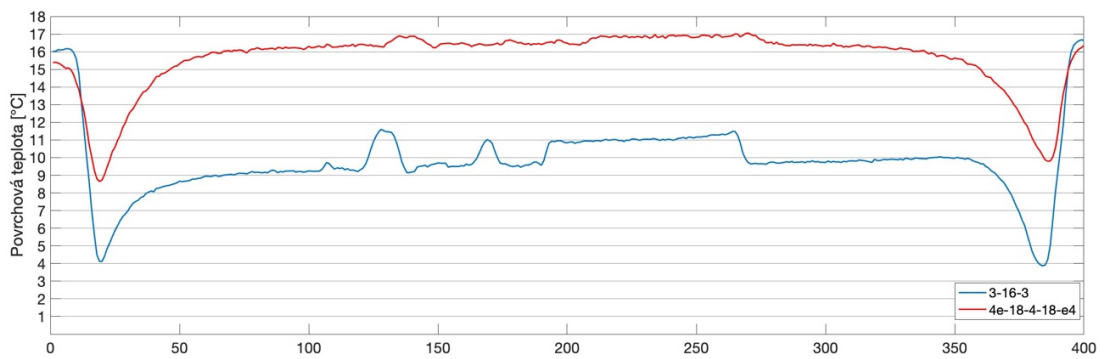
2.3.2. Výsledky měření

Zpracování IR snímků z měření bylo provedeno pomocí softwaru IRBIS 3. Pro správnou korekci naměřených IR snímků, byla zadána teplota prostředí (měřená teplota vzduchu v klima komoře), vzdálenost mezi IR kamerou a měřeným povrchem zasklení a emisivita folie umístěné na měřeném vzorku ($\epsilon = 0,95$). Následně byly exportovány termogramy, které pomocí barevné škály znázorňují rozložení teplot na povrchu měřeného vzorku zasklení. Pro možnost dalšího zpracování byly snímky exportovány i v datovém formátu, jako matice naměřených hodnot teplot povrchu. Tyto datové soubory byly následně zpracovány v softwaru MATLAB, kde byly z dat vytvořeny řezy termogramem ve vertikálním i horizontálním směru. Řezy byly vytvořeny průměrem teplot z deseti řádků, respektive sloupců v místech vyznačených v termogramech.

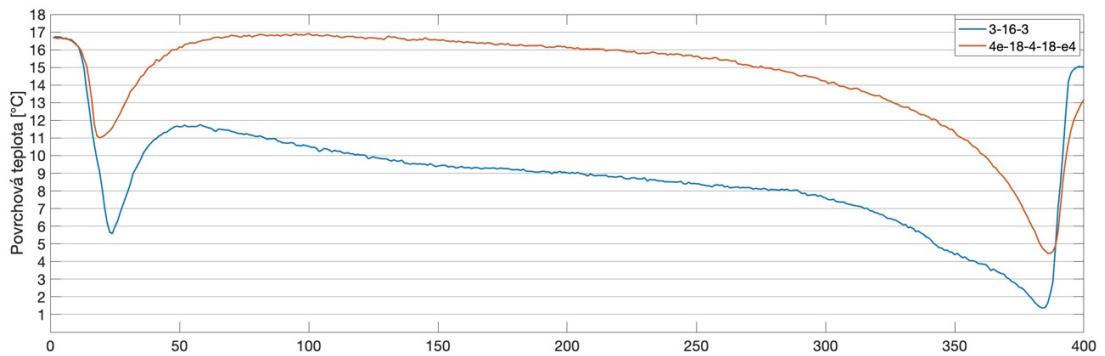
V softwaru MATLAB byly zpracovány také data z měření hustoty tepelných toků po výšce. Hodnoty tepelných toků byly vyhodnoceny při ustáleném stavu a byly stanoveny rozšířené standardní nejistoty.



Obr. 12 Termogram (vzorek č.17 - vlevo, vzorek č. 11 - vpravo)



Graf 5 Průběh teploty povrchů (vodorovný řez) stanovený z termogramů



Graf 6 Průběh teploty povrchů (svislý řez) stanovený z termogramů

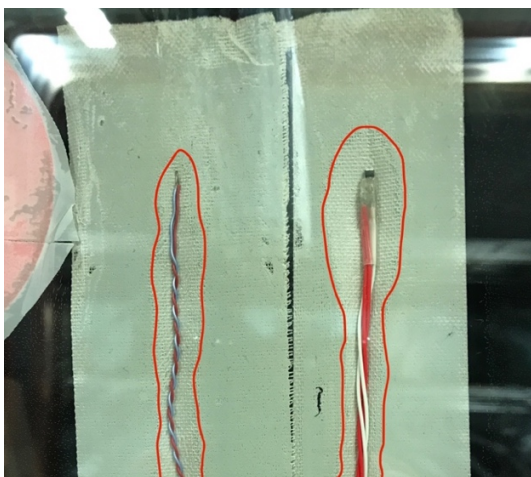
Tabulka 4 Hustota tepelného toku po výšce vzorku zasklení při teplotním spádu 20/-20 °C

3-16-3	Poloha	Φ [W/m ²]	4e-18-4-18-e4	Poloha	Φ [W/m ²]
	horní	109 ± 4 W/m ²		horní	28,9 ± 0,9 W/m ²
střední	110 ± 4 W/m ²	střední	25,8 ± 0,8 W/m ²		
dolní	136 ± 5 W/m ²	dolní	86,6 ± 2,6 W/m ²		

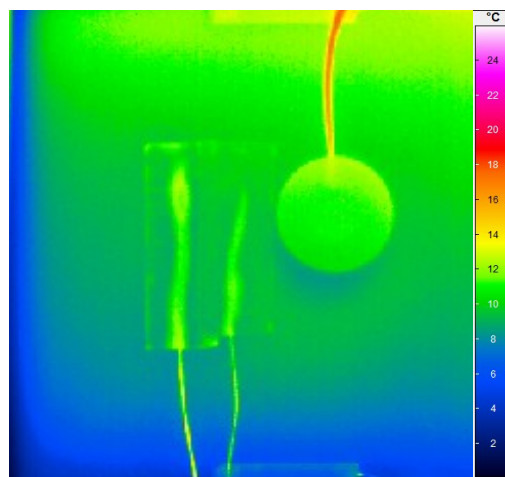
2.3.3. Diskuse výsledků

Měření rozložení povrchových teplot dvou vzorků zasklení s nejnižším a nejvyšším součinitelem prostupu tepla pomocí IR kamery při největším teplotním spádu 20/−20 °C ukázalo, že poloha senzorů hustoty tepelného toku i termočlánků byla zvolena správně. Vzorky mají dostatečnou velikost. Z termogramů je patrné, že k ovlivnění měření vlivem okrajových částí nedochází.

Pomocí IR snímkování byla zjištěna nepřesnost měření povrchové teploty pomocí termočlánků. Nepřesnost byla patrně způsobena nedokonalostí přilepení (viz Obr. 13). Vzduchové bubliny v těsné blízkosti termočlánků vlivem nedokonalého přilepení způsobovaly vyšší měřené povrchové teploty až o 1,5 °C (viz Obr. 14). Tato nepřesnost měření byla zohledněna při stanovení nejistoty typu B při výpočtu hodnot součinitelů prostupu tepla na základě měření.



Obr. 13 Pohled na termočlánek T_t (vlevo) a T_c (vpravo) z exteriéru



Obr. 14 Det. termogramu s vyšší povrchovou teplotou v místě vzduchových bublin kolem termočlánků

Z výsledků měření pomocí IR kamery je patrné vertikální rozložení povrchových teplot, z kterého je patrné, že existuje proudění plynu v uzavřené dutině mezi skly. Ohříváný plyn proudí v mezeře směrem vzhůru podél teplé strany, a naopak ochlazovaný plyn postupně chladne a klesá podél chladné strany. Dochází k cirkulaci výplňového plynu tím více, čím větší je rozdíl teplot chladného a teplého povrchu skla obklopující plynovou mezeru. Se zvyšující se rychlostí proudění plynu v dutině se zvyšuje tepelný tok prouděním. V důsledku tohoto jevu lze na termogramech pozorovat relativně velké rozdíly povrchových teplot při dolním a horním okraji zasklení. Míru proudění však může ovlivňovat také např. šířka a výška dutiny nebo parametry plnicího plynu.

3. Zkoumání součinitele prostupu tepla zasklívacích jednotek (výpočetní metody)

Výpočetními metodami se snažím lépe pochopit prostup tepla skrze vzorky okenních zasklení, které byly použity při experimentálním měření. Předmětem zájmu byl především způsob prostupu tepla v prostoru plynových mezer mezi skly. Sledované byly parametry, které tento prostup tepla ovlivňují a spolurozhodují tak o celkovém tepelném odporu zasklení. Úkolem bylo také porovnat součinitele prostupu tepla vybraných vzorků zasklení stanovené na základě měření s vypočtenými pomocí výpočetních modelů. Součástí této kapitoly je i diskuze způsobu stanovení deklarovaných hodnot součinitele prostupu tepla výrobcem a zjištění možné příčiny jejich odchylky od měřených hodnot, pozorované u některých měřených vzorků.

3.1. Výpočet v softwaru WINDOW 7

Součinitel prostupu tepla zasklením byl u testovaných vzorků počítán softwarem WINDOW 7. Software je dílem Lawrenceovi národní laboratoře v Berkley v Kalifornii, která je součástí Kalifornské univerzity a dlouhodobě se zabývá vědeckou činností v mnoha oblastech mezi které patří i stavební fyzika. Software WINDOW 7 byl vyvinut pro výpočet tepelně technických a optických parametrů zasklení a oken jako celku. Součástí programu je i bohatá databáze skel se všemi potřebnými parametry, čítající více než šest tisíc druhů skel od více než 20 výrobců z celého světa.

3.1.1. Software WINDOW 7

Software WINDOW 7 je volně dostupný na internetových stránkách laboratoře v Berkley (<https://windows.lbl.gov/software/window>). Práce se softwarem je intuitivní a není obtížné se v něm orientovat. V prostředí programu lze nastavovat parametry zasklení i okrajové podmínky výpočtu. Před výpočtem je třeba v programu nastavit okrajové podmínky jako jsou teploty okolního vzduchu a způsob výpočtu odporů při přestupu tepla na exteriérové i interiérové straně počítaného vzorku zasklení. Ukázka zadání při výpočtu součinitele prostupu tepla zasklením je na Obr. 15.

Spuštění výpočtu

Počet vrstev skla

Horní lišta záložek pro různé druhy výpočtu

Rozměr vzorku

Schéma zasklení s naznačenou polohou nízkoemisního pokovení

Nastavení složení zasklení

Okrajové podmínky

Vstup do databáze skel

Součinitel prostupu tepla zasklením

Teploty na rozhraní vrstev

The screenshot displays the WINDOW 7 software interface. At the top, there are menu options (File, Edit, Libraries, Record, Tools, View, Help) and a toolbar. The main window shows calculation parameters for a glazing system. A table lists the layers of the glazing system:

ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
4553	top10_4_gvb	#	3.9	∞	0.439	0.409	0.463	0.771	0.172	0.147	0.000	0.841	0.030	1.000	
9	Air (10%) / Argon (90%)		12.0												
888	CLR_4_AFG	#	4.0		0.845	0.078	0.078	0.899	0.077	0.077	0.000	0.840	0.840	1.000	
9	Air (10%) / Argon (90%)		12.0												
4553	top10_4_gvb	#	3.9		0.439	0.463	0.409	0.771	0.147	0.172	0.000	0.030	0.841	1.000	

Below this table, there are sections for 'Center of Glass Results', 'Temperature Data', 'Optical Data', 'Angular Data', 'Color Properties', and 'Radiance Results'. The 'Temperature Data' section shows the U-factor (0.710 W/m²·K) and SC (0.383). The 'Radiance Results' section shows various coefficients (Keff, Layer 1 Keff, Gap 1 Keff, Layer 2 Keff, Gap 2 Keff, Layer 3 Keff) in W/m²·K.

The 'Součinitel prostupu tepla zasklením' (U-factor) is highlighted as 0.710 W/m²·K. The 'Teploty na rozhraní vrstev' (Temperatures at layer interfaces) section shows the following values:

	Outside Air	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Inside Air				
	Outer Surface	Inner Surface	Outer Surface	Inner Surface	Outer Surface	Inner Surface	Outer Surface	Inner Surface	Inside Air
Ufactor	0.0	0.6	0.7	9.5	9.6	18.2	18.2	20.0	

Obr. 15 Prostředí softwaru WINDOW 7

3.1.2. Způsob výpočtu a okrajové podmínky

Software WINDOW 7 provádí výpočet součinitele prostupu tepla zasklením dle normy [9], která je v Severní Americe používána k výpočtu tepelných a optických vlastností oken. Výpočet je založen na podrobném modelu popisujícím postup tepla zasklením vedením, prouděním a sáláním. Zatímco postup tepla vedením a sáláním je počítán pomocí fyzikálních vztahů, postup tepla prouděním v plynové dutině je počítán pomocí korelačních vztahů založených na experimentálních měřeních.

Tepelná propustnost plynové mezery $h_{c,i}$ (W/(m²K)) mezi skly způsobena konvekcí je počítána z Nusseltova čísla $N_{u,i}$ stanoveného podle Wrighta v roce 1990 pro sklon zasklení 90° (vertikální poloha zasklení). Nusseltovo číslo je funkcí Rayleighova čísla a poměru tloušťky a výšky vzduchové mezery. Rayleighovo číslo závisí na mnoha parametrech, jako jsou například hustota plynu, šířka plynové mezery, gravitační konstanta, tepelná kapacita plynu, teploty povrchů skel na rozhraní mezery, střední

teplota plynového meziprostoru, dynamická viskozita plynu a součinitel tepelné vodivosti plynu. Podrobně jsou tyto vztahy popsány v kapitole 3.2.1.

Aby bylo možné vypočtené součinitele prostupu tepla vzorků zasklení porovnat s naměřenými hodnotami byly pro výpočet nastaveny stejné okrajové podmínky jako při měření. Výpočet byl proveden ve všech šesti teplotních spádech měřených v klima komoře. Stejně jako při stanovení součinitele prostupu tepla na základě měření, byly i ve výpočtech uvažovány normové odpory při přestupu tepla na vnější a vnitřní straně.

3.1.3. Výsledky výpočtu hodnoty U v softwaru WINDOW 7

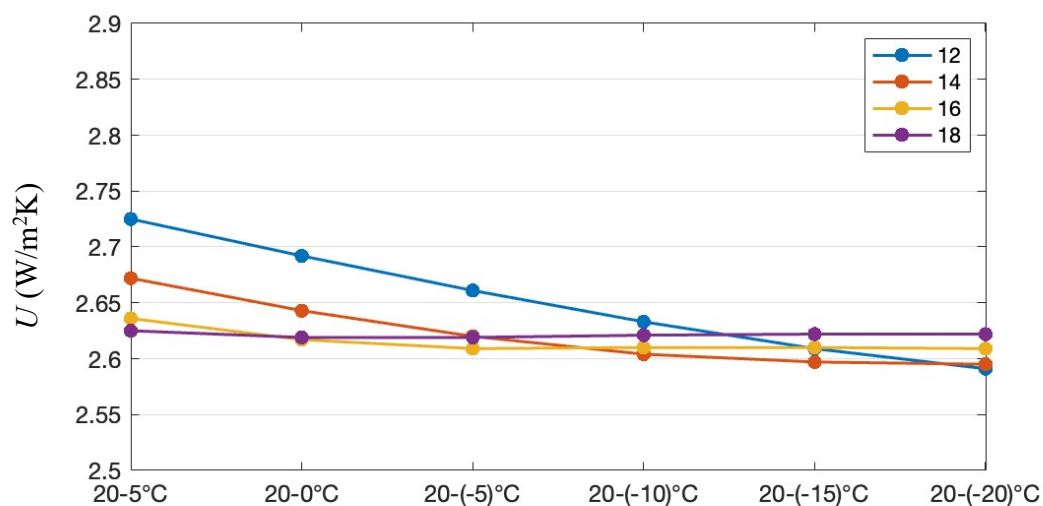
Tabulka 5 Vypočtený součinitel prostupu tepla zasklením U v softwaru WINDOW7

U (W/m ² K)						
č.	20/5 °C	20/0 °C	20/-5 °C	20/-10 °C	20/-15 °C	20/-20 °C
1	0,578	0,611	0,640	0,674	0,709	0,742
2	0,446	0,468	0,502	0,536	0,567	0,596
3	0,596	0,616	0,638	0,668	0,701	0,733
4	0,585	0,595	0,613	0,641	0,673	0,706
5	1,128	1,205	1,283	1,354	1,417	1,475
6	1,118	1,196	1,275	1,346	1,410	1,468
7	1,122	1,197	1,275	1,344	1,406	1,463
8	0,684	0,712	0,736	0,765	0,796	0,826
9	0,684	0,712	0,736	0,765	0,796	0,826
10	0,737	0,740	0,749	0,765	0,784	0,804
11	0,586	0,619	0,647	0,680	0,715	0,748
12	0,604	0,624	0,645	0,675	0,707	0,739
13	0,584	0,605	0,627	0,658	0,691	0,724
14	0,628	0,636	0,651	0,673	0,695	0,719
15	0,583	0,605	0,628	0,659	0,692	0,724
16	2,758	2,737	2,727	2,728	2,736	2,742
17	2,773	2,753	2,742	2,744	2,752	2,759

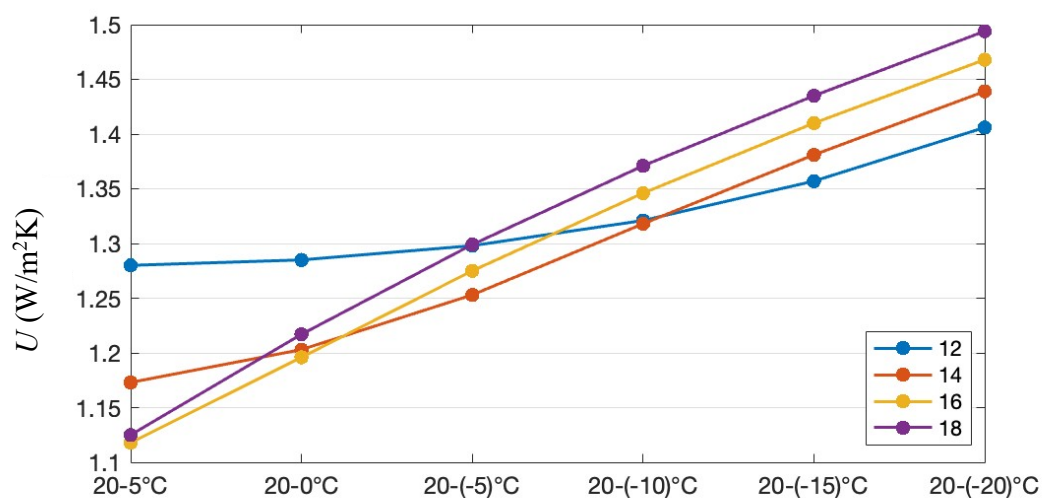
Grafické znázornění hodnot součinitele prostupu tepla zasklením U_{win} vypočtených v softwaru WINDOW 7 viz kap. 3.3.

3.1.4. Analýza vlivu rozměru plynové dutiny na výpočet hodnoty U

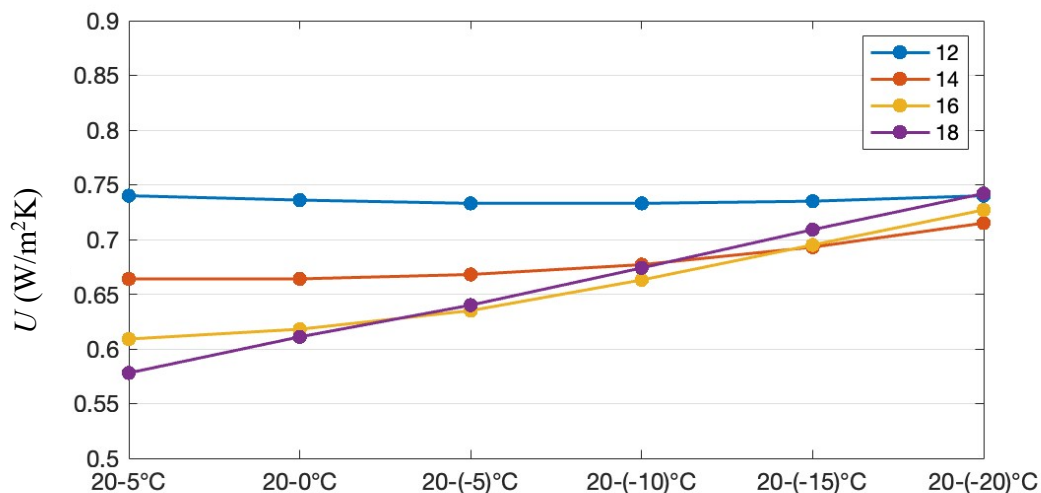
V softwaru WINDOW 7 byla provedena analýza vlivu šířky plynové dutiny a výšky zasklení na výpočet součinitele prostupu tepla U . K analýze byly vybrány tři vzorky zasklení, dvojsklo bez pokovení, dvojsklo s nízkoemisním pokovením a trojsklo s nízkoemisním pokovením na vnějším a vnitřním skle. U vybraných vzorků byl vypočten součinitel prostupu tepla zasklením U ve všech šesti teplotních spádech s různou šířkou plynové dutiny od 12 mm do 18 mm a různou výškou zasklení od 400 mm do 2400 mm. První vzorek zasklení je dvojsklo s 4mm skly bez pokovení plněné vzduchem. Druhý vzorek je dvojsklo s 4mm skly s pokovením vnitřního skla plněné Argonem. Třetí vzorek je trojsklo s 4mm skly s pokovením krajních skel plněné Argonem.



Graf 7 Závislost šířky plynové mezery na součinitel prostupu tepla (4 - Air - 4)



Graf 8 Závislost šířky plynové mezery na součinitel prostupu tepla (4 - Ag - 4)



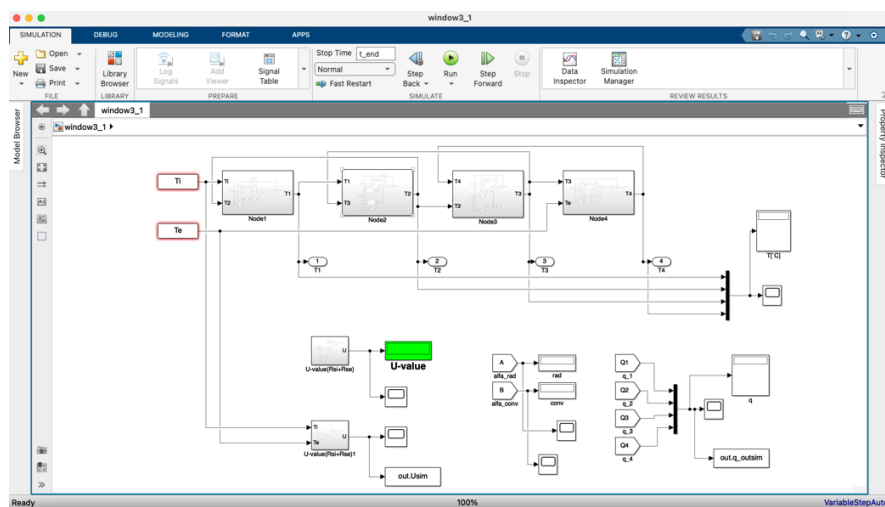
Graf 9 Závislost šířky plynové mezery na součinitel prostupu tepla (4 - Ag - 4 - Ag - 4)

Z výše uvedených grafů jsou patrné průběhy součinitele prostupu tepla U pro vybrané tři druhy zasklení v různých teplotních spádech s různou tloušťkou plynového meziprostoru. U vzorků zasklení 4 - Ag - 4 a 4 - Ag - 4 - Ag - 4 (viz Graf 8 a Graf 9) je patrné, že při nižším rozdílu teplot 20/5 °C výrazně klesá hodnota U s rostoucí šířkou dutiny. Při zvětšujícím se teplotním rozdílu se naopak vyšší šířka dutiny stává nevýhodná, neboť umožňuje lepší proudění plynu v dutině a tím zvýšení prostupu tepla. V prvním analyzovaném vzorku zasklení bez nízkoemisního pokovení a se vzduchem jako výplňovým plynem se součinitel prostupu tepla se vzrůstajícím teplotním spádem výrazně nezvětšuje (viz Graf 7). Hodnota U naopak u tohoto vzorku při nižších šířkách vzduchové dutiny s vyšším teplotním spádem klesá, neboť nad vlivem zvyšujícího se prostupu tepla konvekcí převládá vliv klesajícího součinitele tepelné vodivosti plynu s klesající teplotou. Analýza neprokázala změnu hodnoty U pro výšky vzorku (400 mm, 1200 mm a 2400 mm), přestože výška zasklení do výpočtu Nusseltova čísla vstupuje. Lze tedy konstatovat, že rychlost proudění plynu v meziprostoru se dle výpočtu v programu WINDOW7 s výškou zasklení výrazně nemění a výška zasklení nemá výrazný vliv na hodnotu součinitele prostupu tepla zasklením.

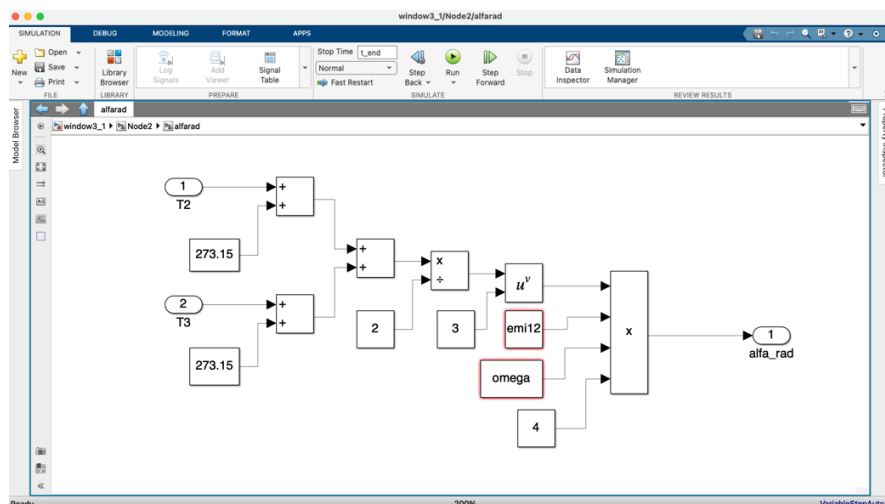
3.2. Vlastní výpočetní modely

3.2.1. Výpočetní model sestavený v Matlab Simulink

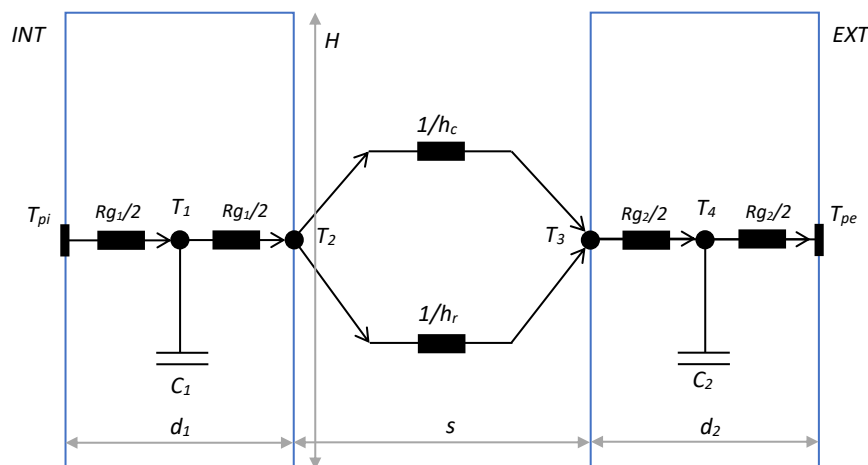
Prostup tepla skrze vzorky zasklení byl také počítán vlastním výpočetním modelem, který byl vytvořen v softwaru Matlab Simulink [10][11]. Software umožňuje vizuální modelování výpočtu pomocí propojování parametrů a neznámých veličin mezi sebou přes různé matematické operace. Prostředí softwaru s výpočetním modelem je na Obr. 16 a ukázka dílčího výpočtu na Obr. 17. Výpočet byl dynamický, jako okrajové podmínky byly použity měřené teploty povrchů zasklení (viz kap. 2). Model prostupu tepla přes zasklení byl vytvořen na základě elektrické analogie (viz Obr. 18).



Obr. 16 Prostředí softwaru Matlab Simulink



Obr. 17 Ukázka dílčího výpočtu v softwaru Matlab Simulink



Obr. 18 Schéma výpočtu prostupu tepla zasklením (elektrická analogie)

V každém teplotním uzlu musí být splněn zákon zachování energie. Změna zásoby tepla se rovná rozdílu mezi přítokem a odtokem tepla v čase. Prostup tepla vrstvou skla č.1 lze tedy zapsat jako:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_{pi} - T_1)}{0,5R_{g1}} - \frac{(T_1 - T_2)}{0,5R_{g1}} \quad (6)$$

kde C ($J/(m^2K)$) je tepelná kapacita, T (K) je teplota, t (s) je čas, a R_g ($(m^2K)/W$) je tepelný odpor skla.

Prostup tepla na rozhraní skla č.1 a dutiny lze zapsat jako:

$$0 = \frac{(T_1 - T_2)}{0,5R_{g1}} - \frac{(T_2 - T_3)}{h_r} - \frac{(T_2 - T_3)}{h_c} \quad (7)$$

kde T (K) je teplota, R_g ($(m^2K)/W$) je tepelný odpor skla, h_r ($W/(m^2K)$) je součinitel přestupu tepla zářením a h_c ($W/(m^2K)$) je součinitel přestupu tepla prouděním a vedením.

Prostup tepla na rozhraní dutiny a skla č.2 lze zapsat jako:

$$0 = \frac{(T_2 - T_3)}{h_r} + \frac{(T_2 - T_3)}{h_c} - \frac{(T_3 - T_4)}{0,5R_{g2}} \quad (8)$$

kde T (K) je teplota, R_g ($(m^2K)/W$) je tepelný odpor skla, h_r ($W/(m^2K)$) je součinitel přestupu tepla zářením a h_c ($W/(m^2K)$) je součinitel přestupu tepla prouděním a vedením.

Prostup tepla vrstvou skla č.2 lze zapsat jako:

$$C_2 \frac{dT_4}{dt} = \frac{(T_3 - T_4)}{0,5R_{g2}} - \frac{(T_4 - T_{pe})}{0,5R_{g2}} \quad (9)$$

kde C (J/(m²K)) je tepelná kapacita, T (K) je teplota, t (s) je čas, a R_g ((m²K)/W) je tepelný odpor skla.

$$C = \rho \cdot d \cdot c \quad (10)$$

kde ρ (kg/m³) je objemová hmotnost skla, d (m) je tloušťka skla a c (J/(kg K)) je měrná tepelná kapacita skla.

$$R_g = d/\lambda \quad (11)$$

kde R_g ((m²K)/W) je tepelný odpor vrstvy skla, d (m) je tloušťka skla a λ (W/(m K)) je součinitel tepelné vodivosti skla.

Přenos tepla přes plynovou dutinu probíhá zářením (radiací) a prouděním (konvekci). Součinitel přestupu tepla zářením závisí na emisivitách povrchu skla směrem do plynové mezery a průměrné teplotě těchto povrchů:

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3 \quad (12)$$

kde σ (W/(m²K⁴)) je Stefan-Bolzmannova konstanta, ε (-) je emisivita povrchu skla (pro počítané vzorky zasklení byla převzata z databáze softwaru WINDOW 7) a T_m (K) je průměrná teplota povrchů skla obklopující plynovou dutinu.

Přenos tepla prouděním závisí na šířce plynové dutiny, tepelné vodivosti výplňového plynu a Nusseltově čísle:

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{s} \quad (13)$$

kde Nu je Nusseltovo číslo, λ (W/(m K)) je součinitel tepelné vodivosti plynu a s (m) je šířka plynové dutiny.

Nusseltovo číslo závisí na vlastnostech plynu, teplotách povrchů skla a rozměrech dutiny. Bylo vypočteno stejným způsobem jako v softwaru WINDOW 7 metodou podle Wrighta (1990) [12]:

$$Nu = \max[Nu_1, Nu_2] \quad (14)$$

$$Nu_1 = 0,7Ra^{\frac{1}{3}} \rightarrow 5 \times 10^4 < Ra < 10^6$$

$$Nu_1 = 0,03Ra^{0,4134} \rightarrow 10^4 < Ra \leq 5 \times 10^4$$

$$Nu_1 = 1 + 1,76 \times 10^{-10}Ra^{2,298} \rightarrow Ra \leq 10^4$$

$$Nu_2 = 0,242(Ra/Ar)^{0,272} \rightarrow Ar \leq 110$$

kde Ra je Rayleighovo číslo a Ar je poměr stran plynové dutiny.

$$Ar = H/s \quad (15)$$

kde H (m) je výška plynové dutiny a s (m) je šířka plynové dutiny.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot c \cdot (T_2 - T_3) \cdot s^3}{T_m \cdot \mu \cdot \lambda} \quad (16)$$

kde Gr je Grashofovo číslo, Pr je Prandtlovo číslo, g (m^2/s) je gravitační zrychlení, c (J/(kg K)) je měrná tepelná kapacita plynu, T (K) je teplota povrchu skla, s (m) je šířka plynové dutiny, T_m (K) je průměrná teplota povrchů skla obklopující plynovou dutinu, μ (N s/m²) je dynamická viskozita plynu a λ (W/(m K)) je součinitel tepelné vodivosti plynu.

Součinitele prostupu tepla zasklením U lze vypočítat z rovnice:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} \quad (17)$$

kde h_i a h_e (W/(m²K)) jsou součinitele přestupu tepla na vnější a vnitřní straně a h_t (W/(m²K)) celková plošná tepelná propustnost zasklení (od T_{pi} po T_{pe} viz Obr. 18).

$$\frac{1}{h_t} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{s,i}} + \sum_{j=1}^M R_{g,j} \quad (18)$$

kde h_s (W/(m²K)) je celkový součinitel přestupu tepla v i -té dutině, N je počet dutin, $R_{g,j}$ ((m K)/W) je tepelný odpor j -tého skla a M je počet skel.

Součinitel přestupu tepla s dutině h_s se vypočítá jako:

$$h_s = h_r + h_c \quad (19)$$

kde h_r (W/(m²K)) je součinitel přestupu tepla zářením a h_c (W/(m²K)) je součinitel přestupu tepla prouděním a vedením.

Vypočtené hodnoty U pro jednotlivé teplotní spády jsou uvedeny v Tabulka 6. Jedná se o průměrnou hodnotu vypočtenou z dílčích výsledků dynamického výpočtu. Průměr byl vypočten z hodnot vypočtených během poslední hodiny před změnou teplotního spádu.

3.2.2. Hodnoty U vypočtené vlastním výpočtním modelem

Tabulka 6 Vypočtený součinitel prostupu tepla zasklením U

U [W/m ² K]						
č.	20/5 °C	20/0 °C	20/-5 °C	20/-10 °C	20/-15 °C	20/-20 °C
1	0,586	0,617	0,641	0,671	0,700	0,723
2	0,472	0,516	0,553	0,584	0,612	0,636
3	0,584	0,614	0,639	0,667	0,693	0,717
4	0,556	0,588	0,614	0,635	0,663	0,688
5	1,144	1,222	1,287	1,341	1,389	1,430
6	1,137	1,216	1,283	1,338	1,387	1,425
7	1,139	1,216	1,282	1,329	1,380	1,418
8	0,693	0,721	0,740	0,766	0,790	0,811
9	0,689	0,715	0,736	0,759	0,781	0,801
10	0,683	0,709	0,730	0,746	0,765	0,784
11	0,596	0,626	0,650	0,680	0,708	0,732
12	0,593	0,623	0,648	0,674	0,701	0,724
13	0,572	0,603	0,629	0,655	0,683	0,707
14	0,575	0,606	0,630	0,651	0,674	0,697
15	0,572	0,604	0,630	0,656	0,684	0,708
16	2,738	2,741	2,739	2,744	2,744	2,744
17	2,805	2,818	2,832	2,844	2,848	2,850

Grafické znázornění hodnot součinitele prostupu tepla zasklením U_{calc} vypočtených pomocí vlastního výpočtního modelu je patrné v kap. 3.3.

3.2.3. Zjednodušený výpočet dle ČSN EN 673

Normový výpočet hodnoty U je ve srovnání s výše uvedenými výpočetními modely zjednodušený. Vztahy pro výpočet se liší především ve způsobu výpočtu Nusseltova čísla, které je dle normy vypočteno jako:

$$\text{Nu} = A \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n \quad (20)$$

kde A je konstanta (pro svislé zasklení $A = 0,035$), Gr je Grashofovo číslo, Pr je Prandtlovo číslo a n je exponent (pro svislé zasklení $n = 0,38$).

$$\text{Gr} = \frac{9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \quad (21)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (22)$$

kde s (m) je šířka plynové mezery, ΔT (K) je teplotní rozdíl povrchů skla obklopující plynovou dutinu, ρ (kg/m³) je hustota plynu, T_m (K) je průměrná teplota povrchů skla obklopující plynovou dutinu, μ (N s/m²) je dynamická viskozita plynu, c (J/(kg K)) je měrná tepelná kapacita plynu a λ (W/(m K)) je součinitel tepelné vodivosti plynu.

Pro výpočet deklarované hodnoty U jsou použity normové okrajové podmínky. K výpočtu se použije předepsaný teplotní rozdíl mezi povrchy skla 15 K a předepsaná střední teplota plynového meziprostoru 10 °C. Z toho plyne, že normový výpočet je prováděn při teplotách vnitřního a vnějšího povrchu skla 17,5 °C a 2,5 °C, což pro dvojsklo odpovídá teplotnímu spádu okolního prostředí přibližně 20/0 °C.

Vypočtené deklarované hodnoty U musí být dle normy zaokrouhleny na jedno desetinné místo. Je-li druhé desetinné místo pět, zaokrouhlí se výsledek směrem nahoru. Deklarovaná hodnota 0,6 W/m²K může například znamenat, že výsledek normového výpočtu může být od 0,55 do 0,649 W/m²K. Zaokrouhlení tedy může být v mnoha případech také jedna z příčin rozdílu mezi deklarovanou a měřenou hodnotou součinitele prostupu tepla zasklením.

Pro výpočet zasklení s více než jedním plynovým meziprostorem je výpočet proveden iteračním postupem. V prvním kroku iterace se pro výpočet použije teplotní rozdíl $\Delta T = 15/N$, kde N je počet plynových meziprostorů. Z tepelných propustností plynových meziprostorů h_s vypočtených v první iteraci se vypočítají nové teplotní rozdíly ΔT takto:

$$\Delta T = 15 \frac{1/h_s}{\sum_1^N 1/h_s} \quad (23)$$

kde h_s (W/(m²K)) je celkový součinitel přestupu tepla v plynové dutině.

Nové hodnoty ΔT se použijí pro výpočet další iterace a tento postup se opakuje, dokud tepelný odpor zasklení $\sum_1^N 1/h_s$ nekonverguje na třetím platném místě.

V tabulce (viz Tabulka 7) je uvedena ukázka iterace pro vzorek zasklení se složením 6 – 18 – 4 – 16 – 4 a nízkoemisním pokovením krajních skel s emisivitou vnějšího skla $\varepsilon = 0,024$ a emisivitou vnitřního skla $\varepsilon = 0,05$.

Tabulka 7 Ukázka výpočtu hodnoty U pomocí iterace

Číslo iterace	1	2
$1/h_s$ pro meziprostor 1 ((m ² K)/W)	0,9002	0,9002
$1/h_s$ pro meziprostor 2 ((m ² K)/W)	0,7365	0,7365
$\sum_1^2 1/h_s$ ((m ² K)/W)	1,6367	1,6367
ΔT pro meziprostor 1 (K)	8,2751	8,2502
ΔT pro meziprostor 2 (K)	6,7249	6,7498
hodnota U (W/(m ² K))	0,5493	0,5490
zaokrouhlení		0,5

Tabulka 8 Normový výpočet deklarované hodnoty U pro měřené vzorky zasklení

Číslo	U	U zaokrouhleno	Číslo	U	U zaokrouhleno
1	0,541	0,5	10	0,721	0,7
2	0,457	0,5*	11	0,549	0,5
3	0,564	0,6*	12	0,573	0,6*
4	0,569	0,6	13	0,550	0,6*
5	1,113	1,1	14	0,558	0,6
6	1,103	1,1*	15	0,549	0,5
7	1,108	1,1	16	2,738	2,7
8	0,648	0,6	17	2,753	2,8*
9	0,648	0,6			

*Hodnoty U jsou odlišné od hodnoty uvedené na technickém listu výrobce.

Důvod odlišnosti některých vzorků zasklení je nejasný a mohl by být způsoben chybným přiřazením typu skla a jeho emisivity. Emisivity pokovených skel byly dohledány v databázi softwaru WINDOW 7 dle označení skel v technických listech.

3.2.4. Testování výpočetních vztahů pro Nusseltovo číslo

Rychlost přenosu tepla volnou konvekcí mezi dvěma deskami je obvykle korelována pomocí dvou nebo tří bezrozměrných čísel. Mezi tyto takzvaná kritériální čísla patří Nusseltovo číslo (Nu), Rayleighovo číslo (Ra) a Prandtlovo číslo (Pr). Vztahy některých autorů používají výpočet i pomocí Grashofova čísla (Gr), které je poměrem Rayleighova čísla a Prandtlova čísla.

Pro dvě paralelní desky vyjadřuje Nusseltovo číslo poměr čistého vodivostního odporu (s/λ) a konvektivního odporu ($1/h_c$). [13] Rayleighovo číslo je vypočteno podle rovnice (14). Grashofovo číslo je vypočteno podle rovnice (19). Prandtlovo číslo je definováno rovnicí (20).

Pro stanovení Nusseltova čísla existuje hned několik přístupů od různých autorů. Jak způsob výpočtu Nu ovlivní výslednou hodnotu U je předmět následující analýzy. Byly vybrány různé způsoby stanovení Nu (viz dále). Jejich vliv byl porovnán u dvou vzorků zasklení, a to u dvojskla 4-16-4 s Argonem a pokovením interiérového skla ($\varepsilon = 0,03$) a u trojskla 4-16-4-16-4 s Argonem a pokovením krajních skel ($\varepsilon = 0,03$). Výsledky jsou shrnuty v Graf 10 až Graf 13.

Poznámka:

Výpočty byly prováděny pomocí vlastního výpočetního modelu popsaného v kap. 3.2.1 s upraveným stanovením Nu, s tím rozdílem, že nebyli použity měřené teplotní spády, ale teploty na površích skla byly zadávány pevně dle počítaného teplotního spádu. Tento způsob výpočtu simuluje měření v HFM s jasně definovanými teplotami na površích skla.

Vybrané výpočetní metody pro stanovení Nusseltova čísla

ČSN EN 673

$$Nu = \max [1, 0,035(Gr \cdot Pr)^{0,38}]$$

Raithby, Hollands and Unny (1977)

$$Nu = \max [1, 0,75C_i(\sin(F Ra))/Ar)^{1/4}, 0,29C_t(\sin(F Ra))^{1/3}]$$

pro $F > 70^\circ$ a $3,5 \leq Ar \leq 110$ a kde

$$C_i = 0,50/(1 + (0,49/Pr)^{9/16})^{4/9}, C_t = \min[0,15, 0,14Pr^{0,084}]$$

kde $F [^\circ]$ je orientace zasklení vůči horizontální poloze.

El-Sherbiny, Hollands and Raithby(1982)

$$Nu = \max [1, 0,288(Ra/Ar)^{1/4}, 0,062Ra^{1/3}]$$

pro $Ar \leq 110$

Inaba (1984)

$$Nu = \max [1, 0,271Ar^{-0,21}(Ra \sin F)^{0,25}]$$

pro $5 \times 10^3 \leq Ra \sin F \leq 1,2 \times 10^6$ a $5 \leq Ar \leq 83$

Wright (1990)

$$Nu = \max[Nu_1, Nu_2]$$

$$Nu_1 = 0,7Ra^{1/3} \rightarrow 5 \times 10^4 < Ra < 10^6$$

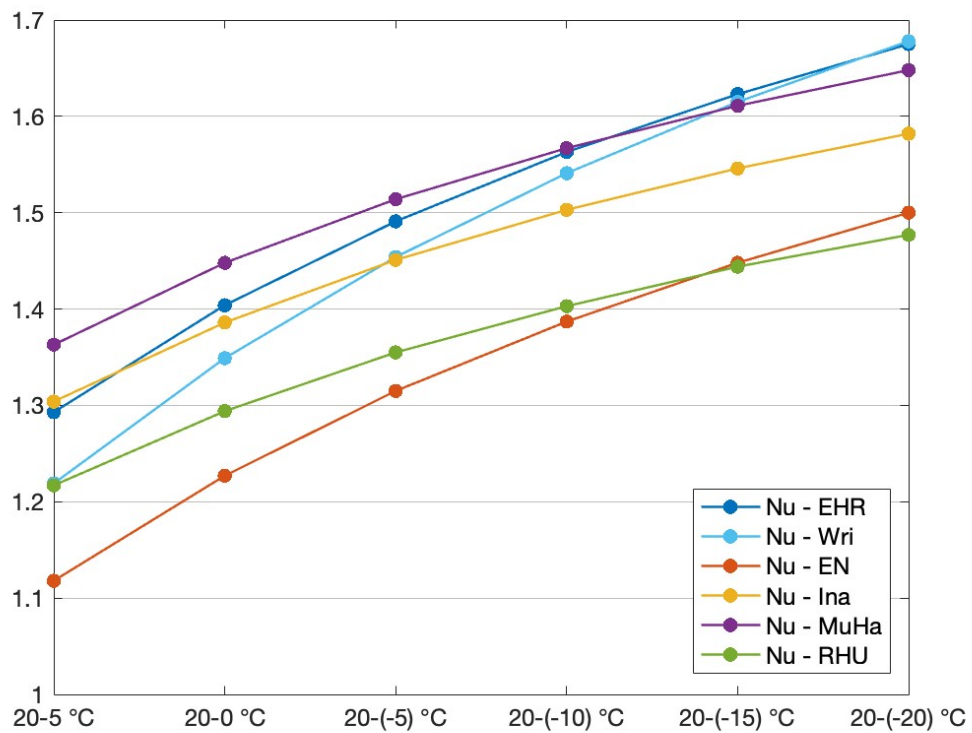
$$Nu_1 = 0,03Ra^{0,4134} \rightarrow 10^4 < Ra \leq 5 \times 10^4$$

$$Nu_1 = 1 + 1,76 \times 10^{-10} Ra^{2,298} \rightarrow Ra \leq 10^4$$

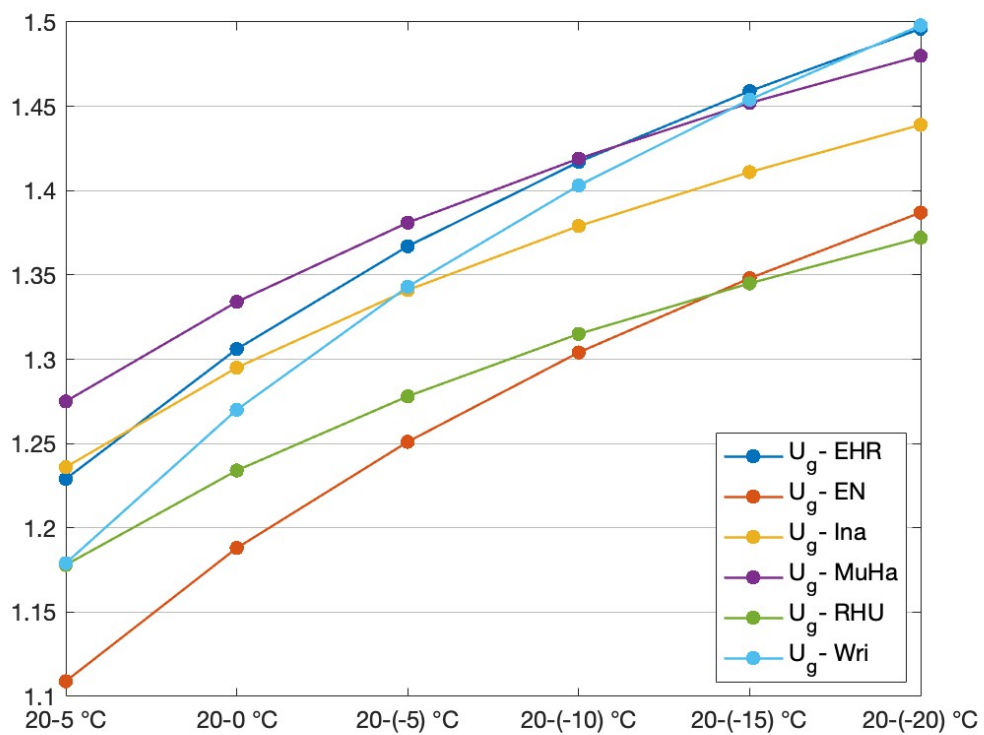
$$Nu_2 = 0,242(Ra/Ar)^{0,272} \rightarrow Ar \leq 110$$

Muneer and Han (1996)

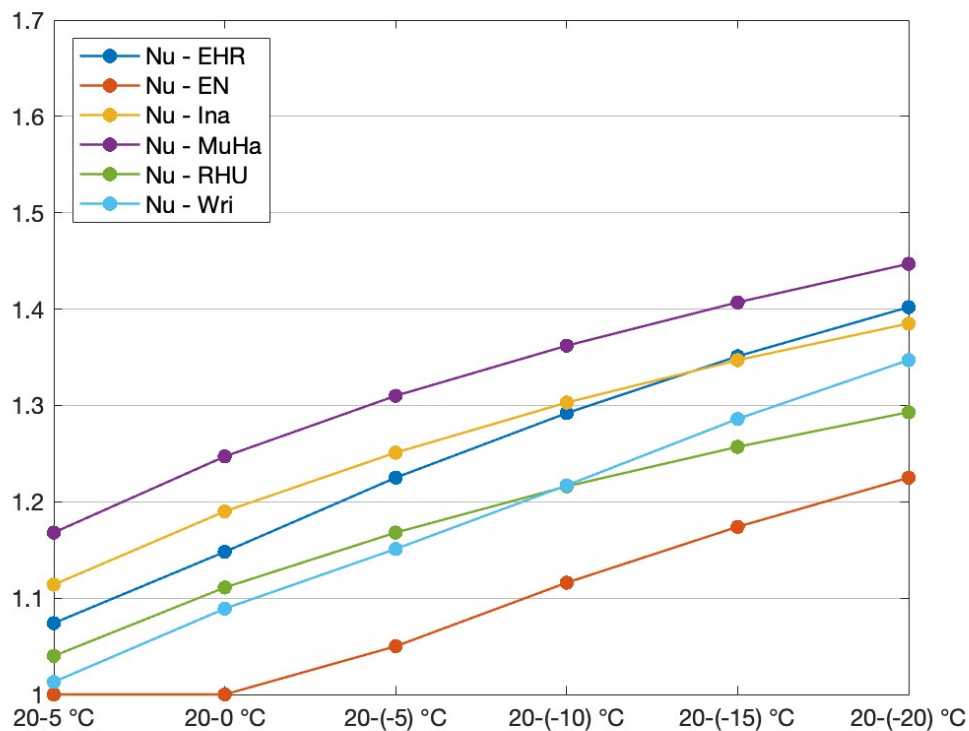
$$Nu = \max [1, 0,36(GrPr)^{0,245} Ar^{-0,28}]$$



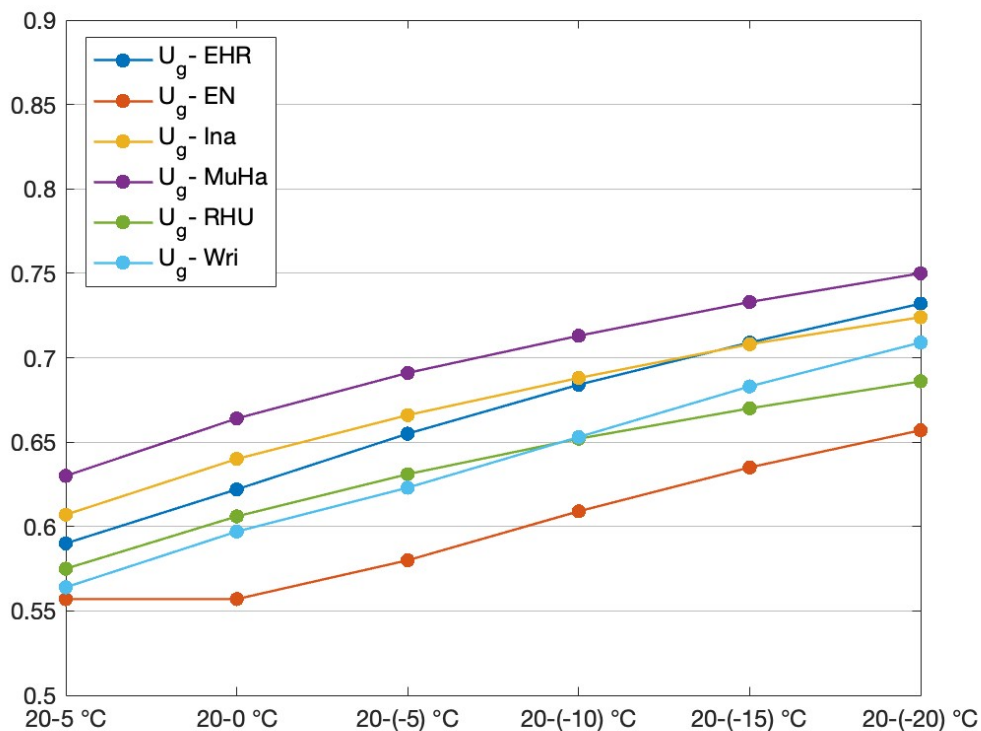
Graf 10 Nusseltovo číslo v závislosti na použité metodě výpočtu (4-16-4)



Graf 11 Hodnota Ug v závislosti na použité metodě výpočtu Nu (4-16-4)



Graf 12 Nusseltovo číslo v závislosti na použité metodě výpočtu (4-16-4-16-4)



Graf 13 Hodnota U v závislosti na použité metodě výpočtu Nu (4-16-4-16-4)

Způsob stanovení Nusseltova čísla má významný vliv na výpočet součinitele prostupu tepla zasklením. Rozdíly v hodnotě součinitele prostupu tepla zasklením mohou být vlivem použité metody pro stanovení Nusseltova čísla u dvojskla více než dvě desetiny a u trojskla více než desetinu. Je překvapivé zjištění, že stanovení Nusseltova čísla podle normy ČSN EN 673 bylo v porovnání s ostatními pozorovanými metodami nejvíce optimistické.

Zajímavý je i průběh křivek při stanovení Nusseltova čísla podle Wrighta, který je ze všech křivek nejvíce rostoucí s klesající teplotou na povrchu vnějšího skla. Tato metoda je použita v softwaru WINDOW 7 a byla také použita ve vlastním výpočtovém modelu. Dle analýzy vykazuje největší nárůst součinitele prostupu tepla zasklením s klesající teplotou. Tento trend byl pozorován i z porovnání výpočetních metod s měřením uvedeným níže, kde se ukázalo, že ve většině případů výpočet při nižších teplotách vykazuje nižší hodnoty U než měření (např. viz Graf 16). Z toho se lze domnívat, že při použití jiné metody stanovení Nusseltova čísla, například podle Raithbyho, Hollandse and Unnyho (1977) pro trojskla a podle Inaba (1984) pro dvojskla, by mohlo být dosaženo lepší shody s měřením.

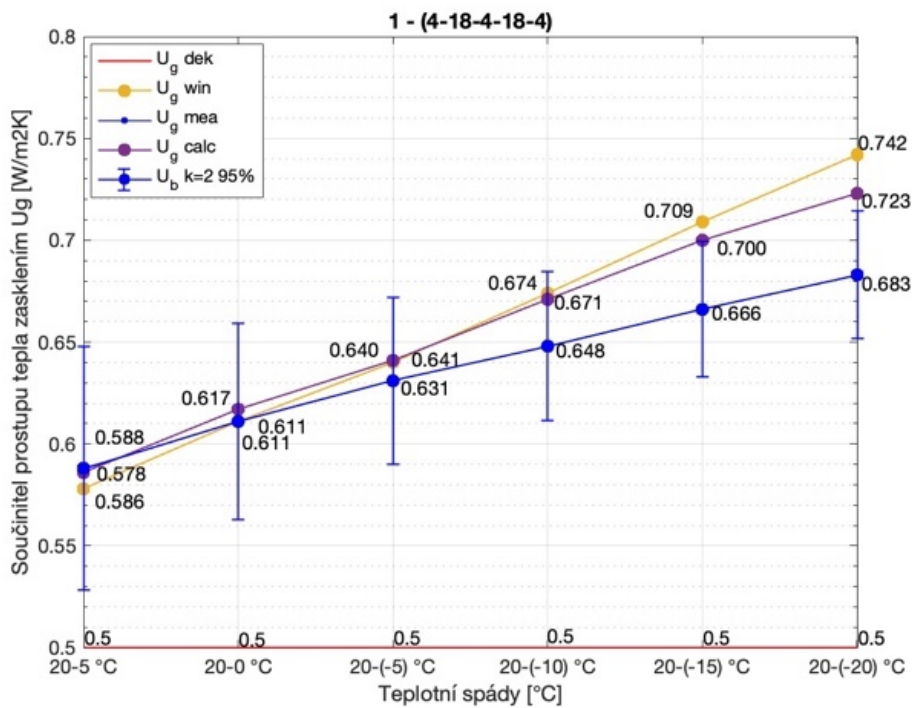
3.3. Porovnání výsledků výpočetních metod s měřením a hodnotou U deklarovanou výrobcem

3.3.1. Porovnání výsledků

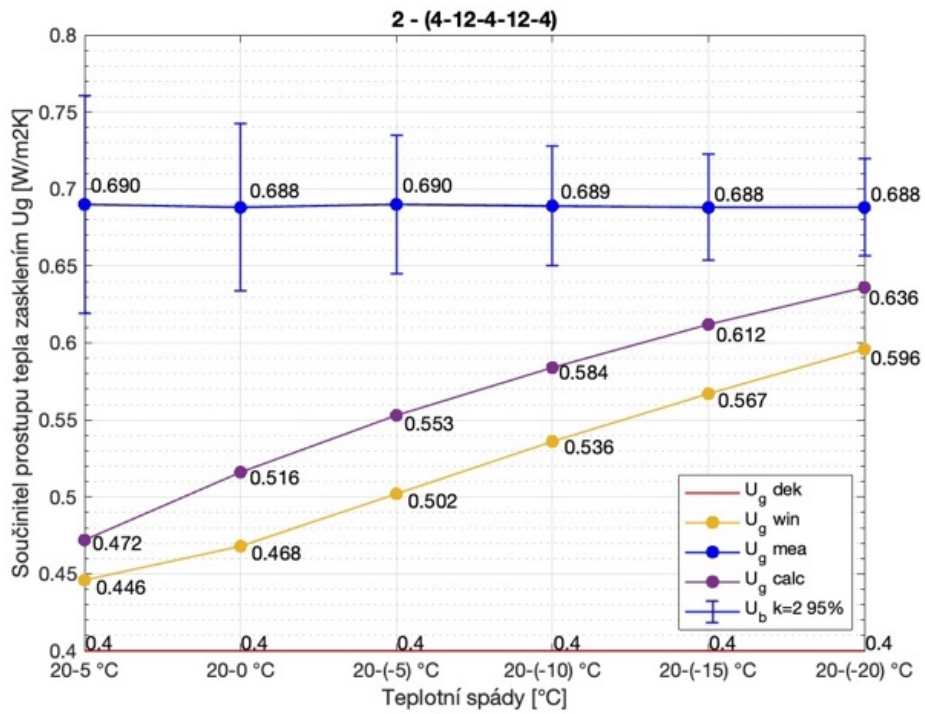
Hodnoty součinitele prostupu tepla zasklením U stanovené na základě měření i hodnoty U vypočtené pomocí softwaru WINDOW 7 a pomocí vlastního výpočetního modelu byly pro porovnání vyneseny v grafech. V grafech jsou patrné hodnoty součinitele prostupu tepla zasklením pro různé teplotní spády (od 20/5 °C do 20/-20 °C, na ose X zleva doprava). U hodnot U stanovených na základě měření jsou zobrazeny i rozšířené standardní nejistoty U_b , které odpovídají pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Pro každý vzorek zasklení jsou v grafech červenou čarou zobrazeny i deklarované hodnoty uvedené výrobcem dle technických listů (viz příloha B). Pro možnost porovnání různých vzorků zasklení mezi sebou, jsou grafy zobrazeny ve stejném měřítku. Stejně měřítko mají vždy zvlášť grafy pro zasklení trojsklem, dvojsklem s pokovením a dvojsklem bez pokovení.

Vysvětlení zkratk uvedených v legendách grafů je:

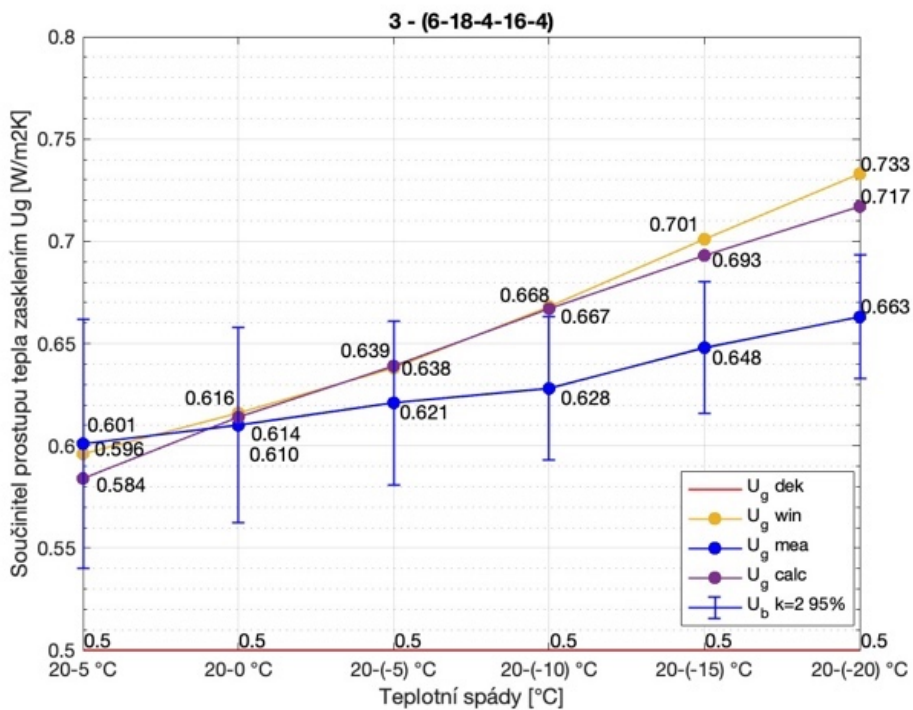
- $U_g \text{ dek}$ hodnota U deklarovaná výrobcem
- $U_g \text{ win}$ hodnota U vypočtená softwarem WINDOW 7
- $U_g \text{ mea}$ hodnota U stanovená na základě laboratorního měření
- $U_g \text{ calc}$ hodnota U vypočtená vlastním výpočetním modelem
- $U_b \text{ k}=2 \text{ 95 \%}$ rozšířená standartní nejistota U_b hodnoty U stanovené na základě měření rozšířená koeficientem $k = 2$ odpovídající pravděpodobnosti pokrytí 95 %



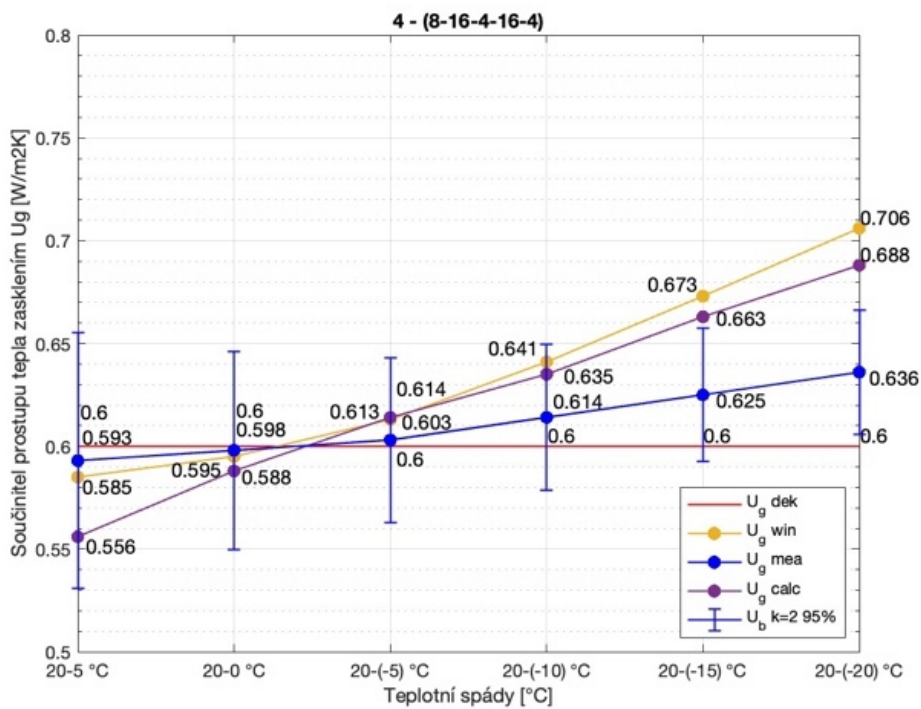
Graf 14 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 1)



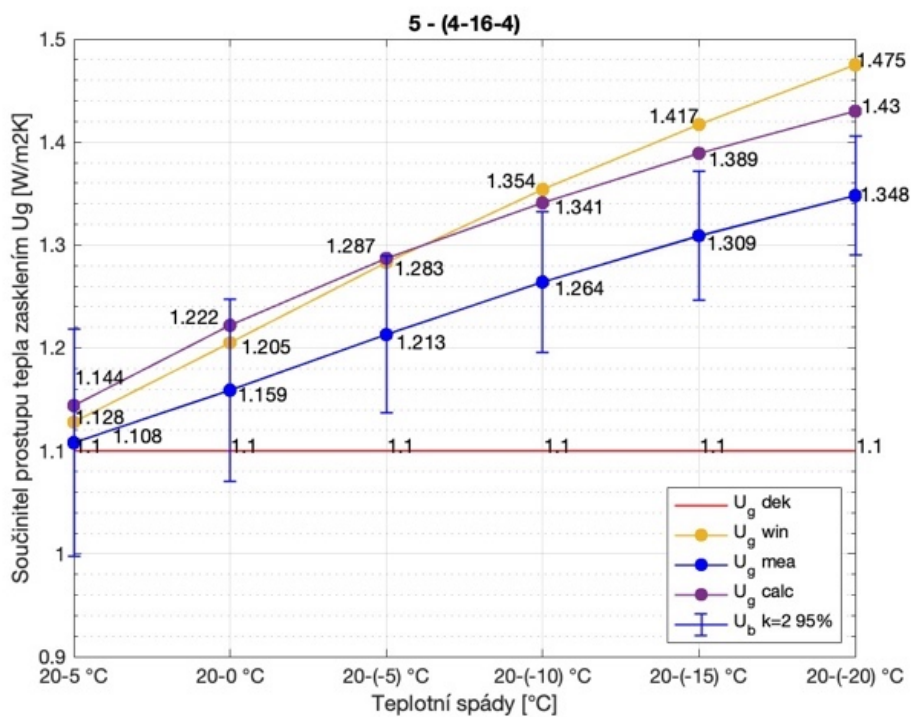
Graf 15 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 2)



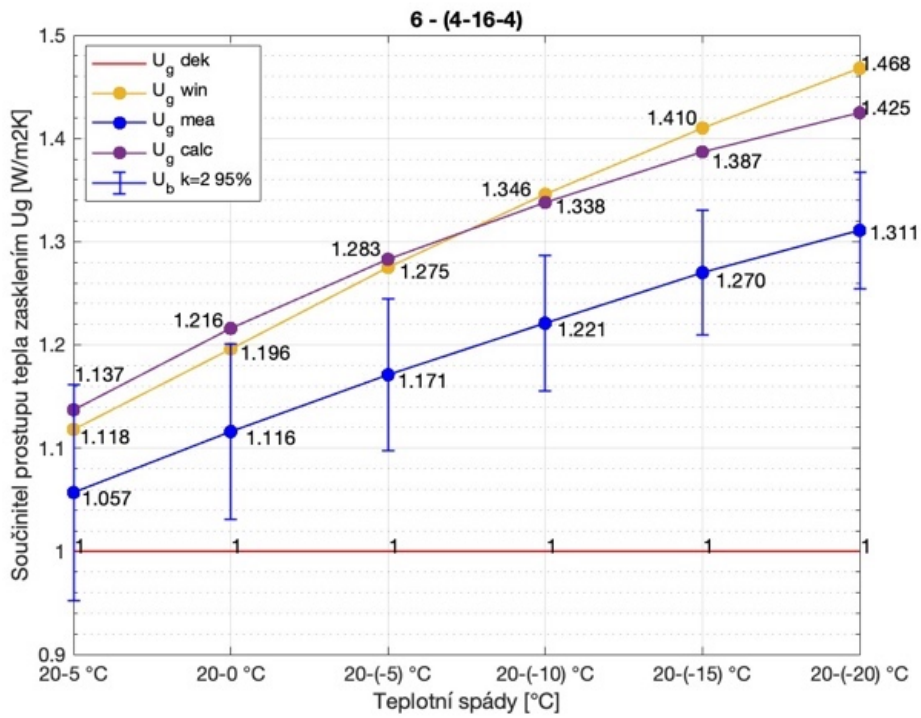
Graf 16 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 3)



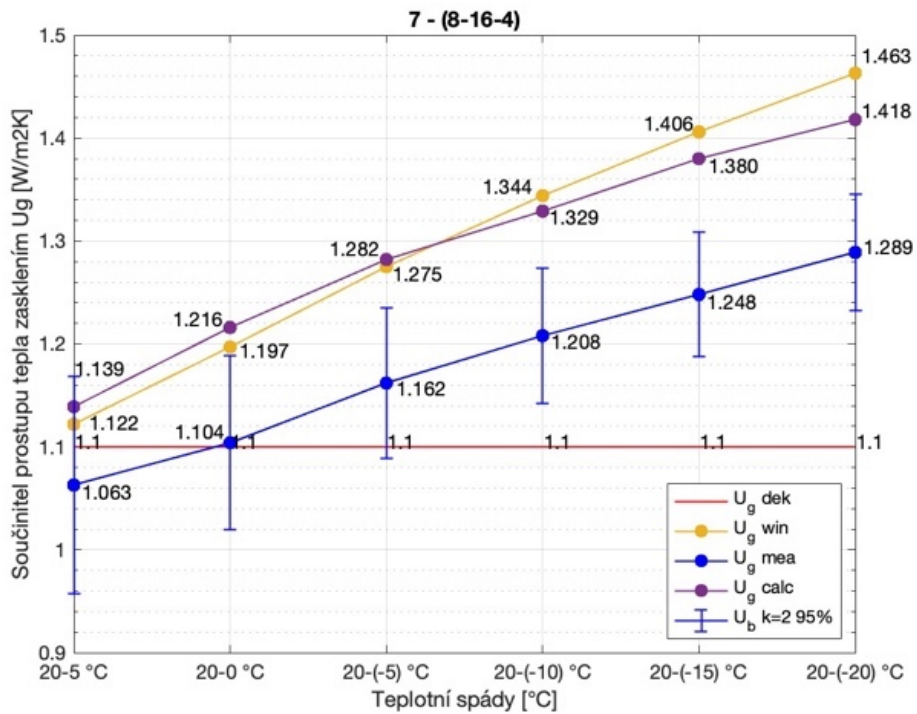
Graf 17 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 4)



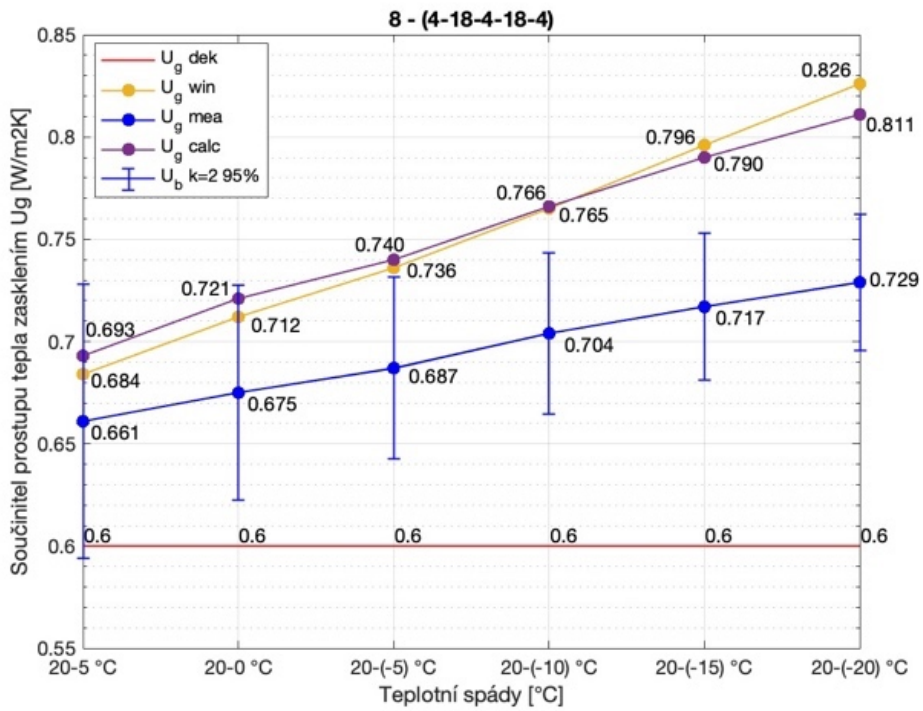
Graf 18 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 5)



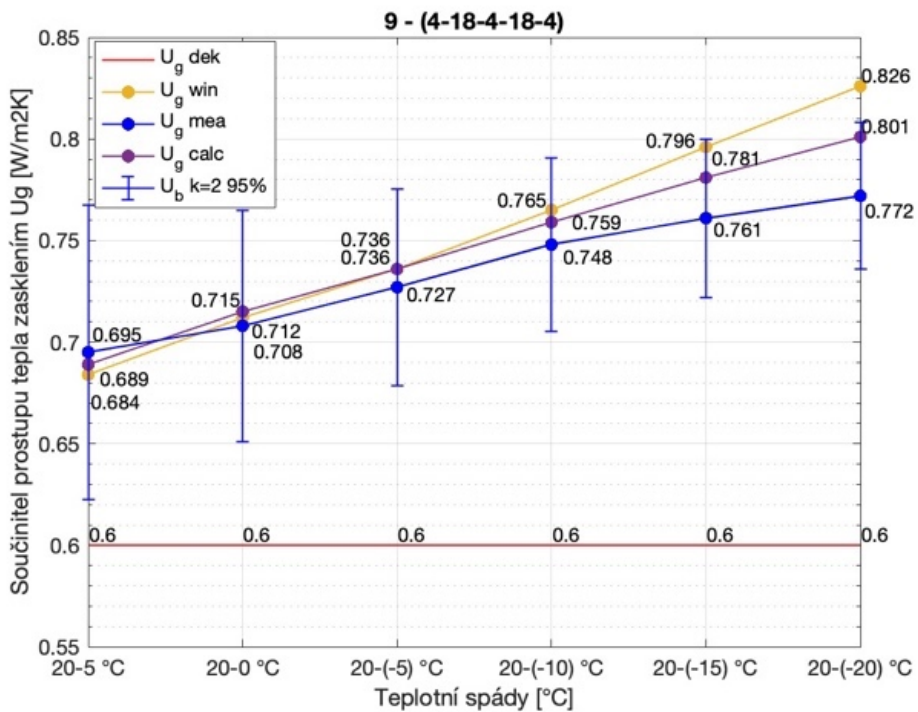
Graf 19 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 6)



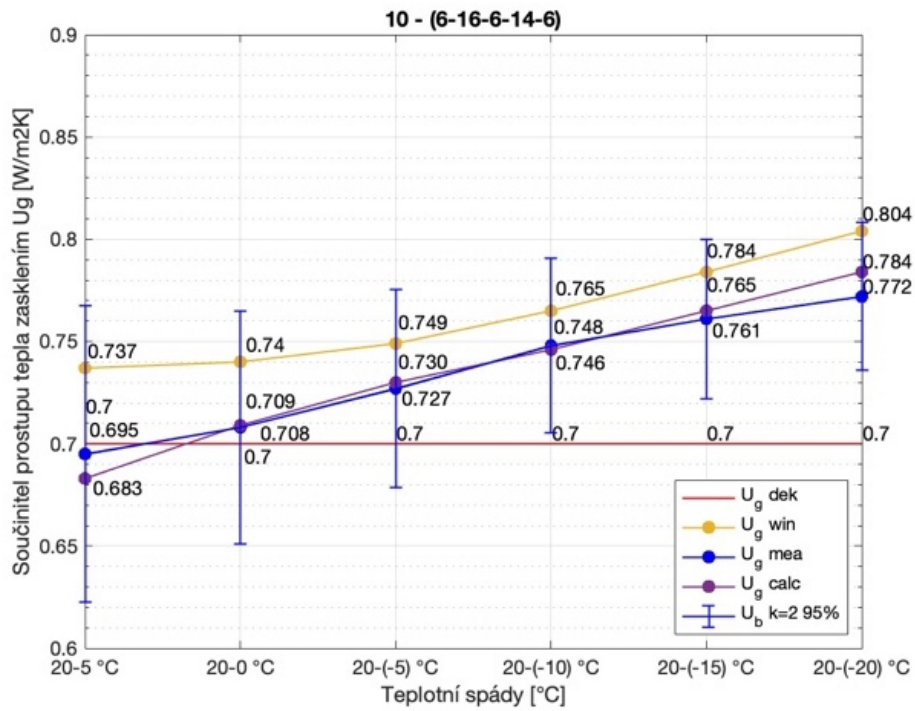
Graf 20 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 7)



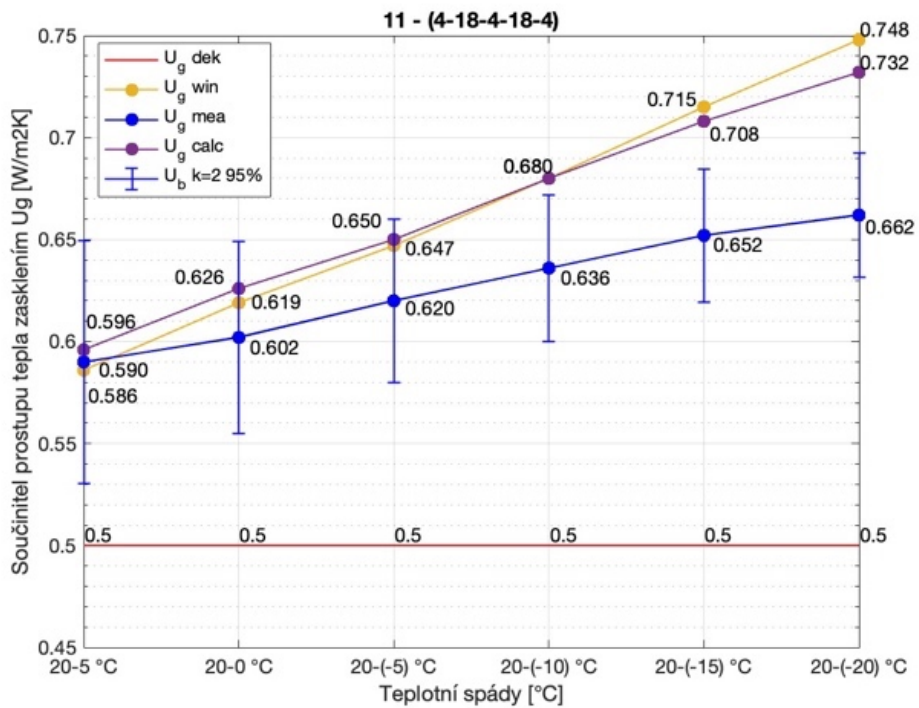
Graf 21 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 8)



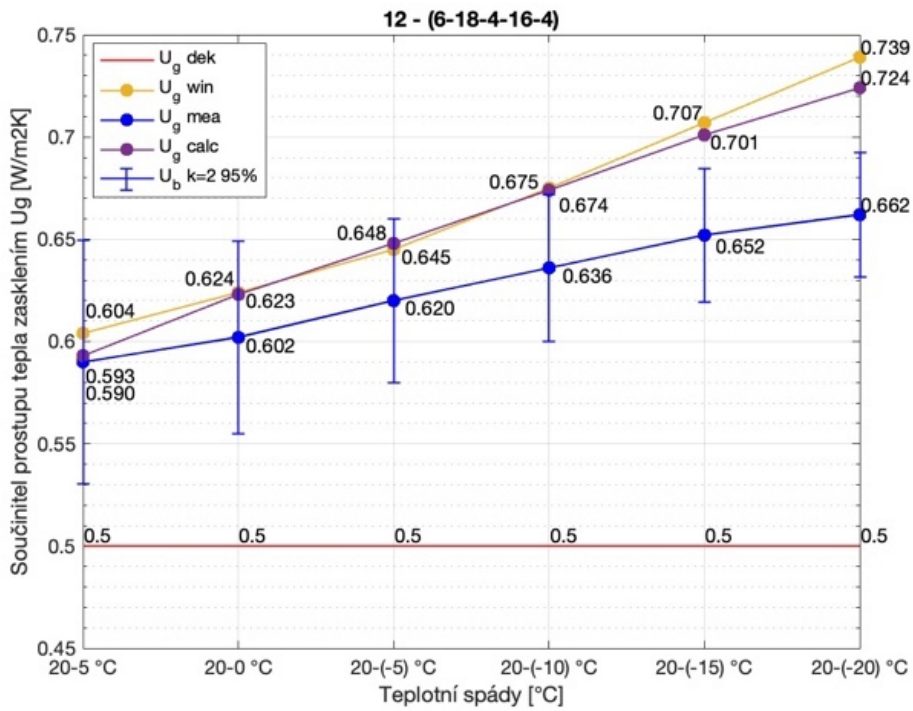
Graf 22 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 9)



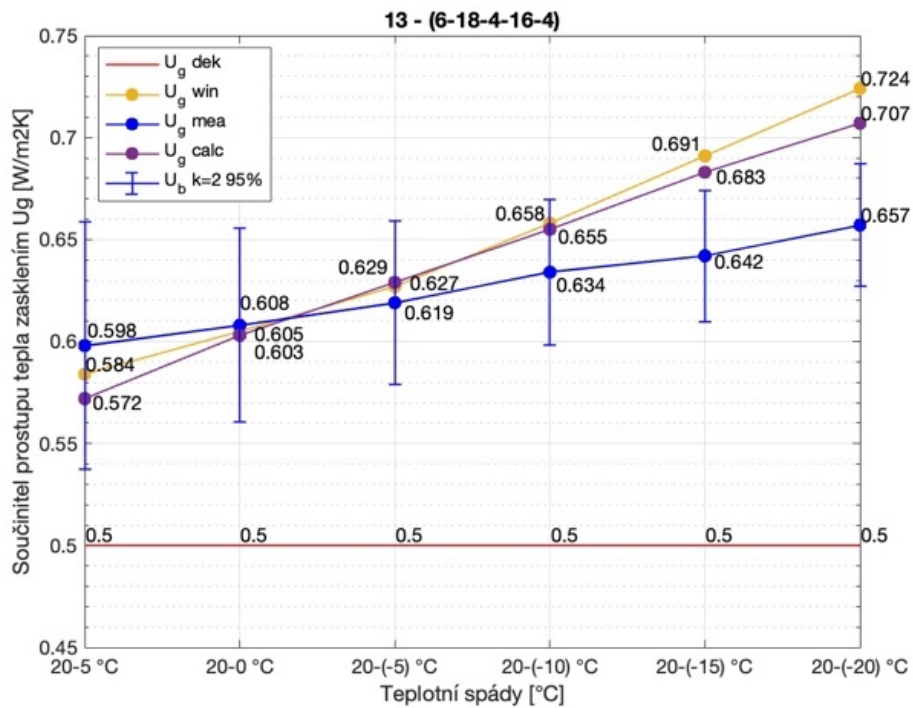
Graf 23 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 10)



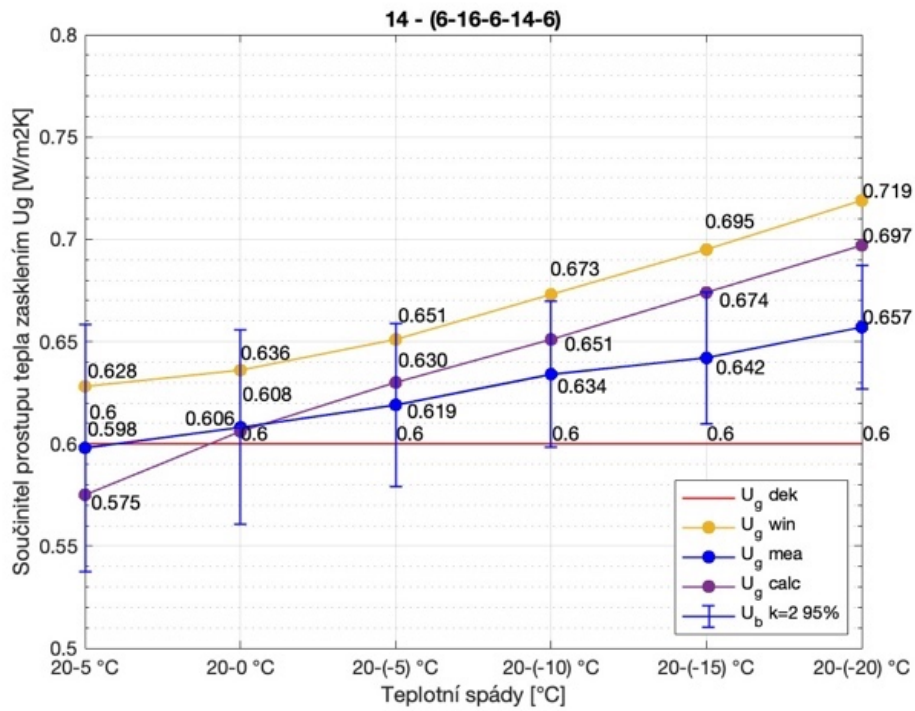
Graf 24 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 11)



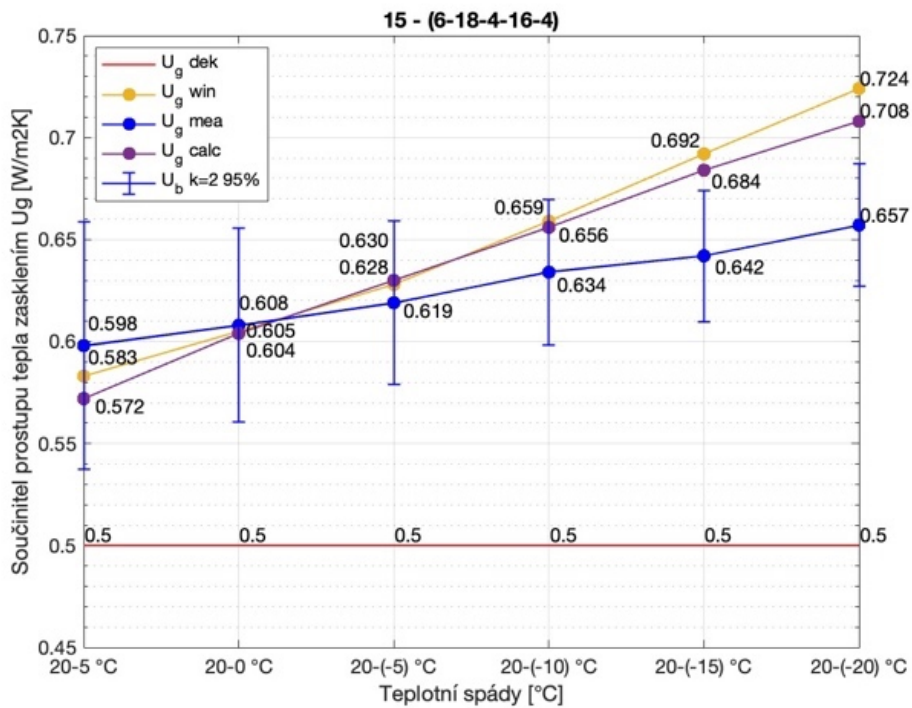
Graf 25 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 12)



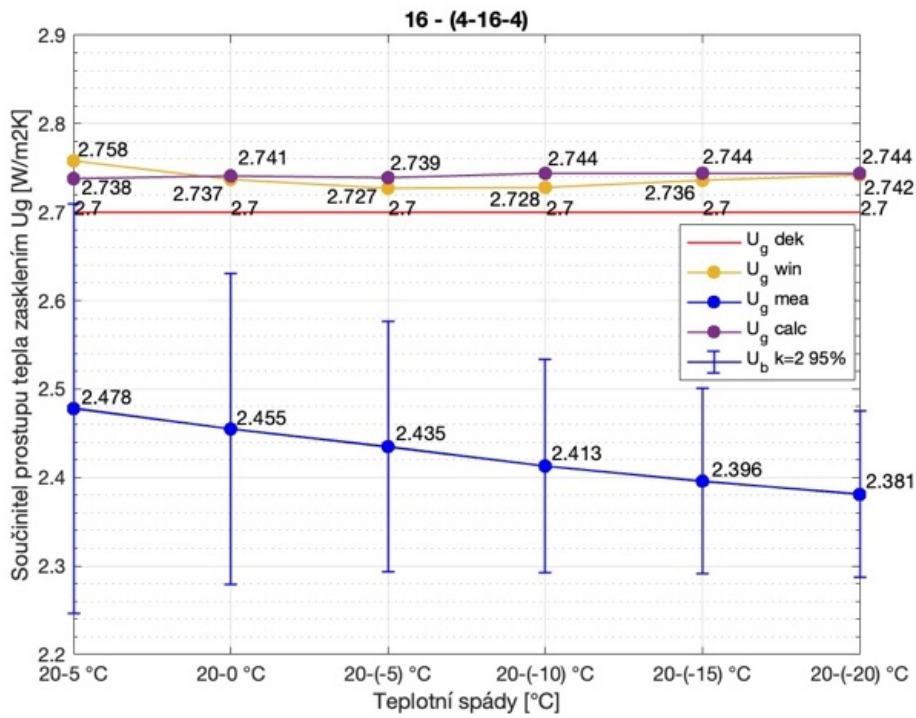
Graf 26 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 13)



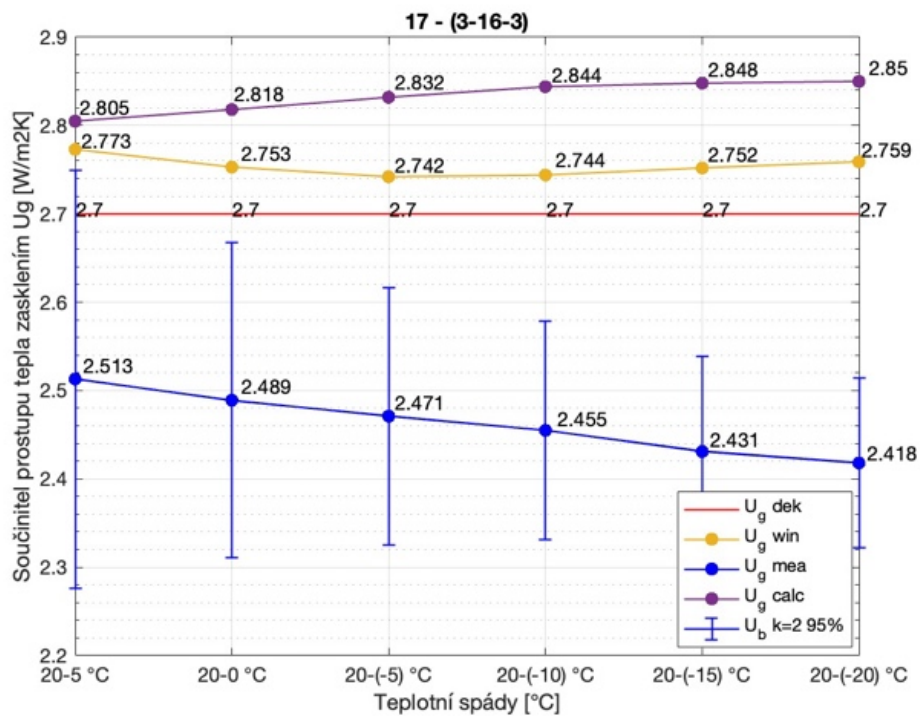
Graf 27 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 14)



Graf 28 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 15)



Graf 29 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 16)



Graf 30 Porovnání výsledků stanovení hodnoty U (vzorek č. 17)

3.3.2. Diskuse porovnání

Z porovnání výpočtu provedeného vlastním výpočtovým modelem a výpočtem provedeným v softwaru WINDOW 7 je patné, že výsledky byly u většiny vzorků zasklení velmi podobné. Lze tedy konstatovat, že vytvořený vlastní výpočtový model je pro stanovení hodnoty U velmi dobře použitelný. Odchyłka výpočetních modelů u některých skel by mohla být způsobena, mimo jiné, nepřesností měření povrchových teplot zasklení, na základě kterých byly hodnoty U ve vlastním výpočetním modelu počítány.

U velkého počtu vzorků je v případě výpočetních metod z porovnání patrný stejný trend většího poklesu hodnoty U s klesající teplotou než bylo prokázáno za základě měření. To znamená, že výpočetní modely předpokládají větší míru proudění plynu v meziprostoru se snižující se teplotou než ukázalo měření. To je dobře patrné například u vzorku č. 3 (viz Graf 16).

Zajímavostí je vzorek zasklení číslo 2 (viz Graf 15), u kterého měl být použit jako výplňový plyn Krypton s lepšími tepelně technickými vlastnostmi. Tento vzorek měl vykazovat nejnižší hodnotu U , ale měření prokázalo hodnotu U o více než dvě desetiny vyšší a lze se tak domnívat, že došlo k záměně a skutečným výplňovým plynem je u tohoto vzorku Argon. Naopak u vzorků číslo 16 a 17 (viz Graf 29 a Graf 30) se lze na základě měření domnívat, že výplňovým plynem nebyl vzduch, ale opět Argon.

Typickým trendem bylo deklarování nižší hodnoty U výrobcem, než byla skutečně naměřena anebo vypočtena. U normového výpočtu by člověk předpokládal, že při použití všech zmíněných nepříznivých kombinací hned několika zjednodušení, bude výpočet nastaven tak, aby byl na straně bezpečnosti. Výpočet dle normy se naopak ukázal být příliš optimistický.

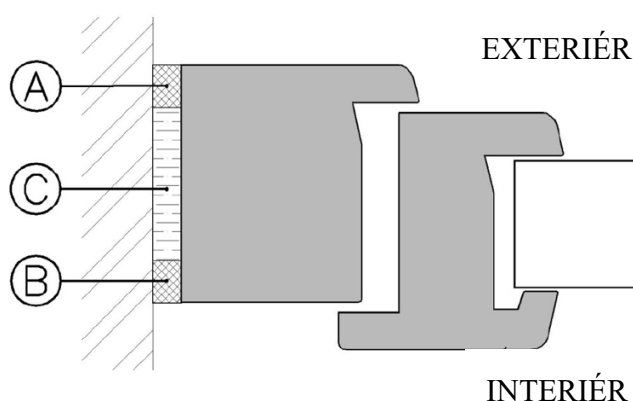
Odchyłky mohou být způsobeny do značné míry zaokrouhlením výsledků výpočtů nařizeným v ČSN EN 673. Může se ale také jednat o přílišné zjednodušení normového výpočtu, například při stanovení Nusseltova čísla. Deklarované hodnoty na základě výpočtu dle normy byly ve většině případů přibližně o jednu desetinu nižší, než prokázalo měření i výpočty. Zaokrouhlení směrem nahoru by tak vedlo ke snížení nepřesnosti deklarovaných hodnot U .

4. Testování přídržnosti okenních pásek

4.1. Úvod

Okno jako výrobek se po zabudování do stavebního otvoru stává součástí stavebního díla a musí plnit všechny požadavky, které jsou na stavební dílo kladeny. Prostor, který se nachází mezi rámem okna a ostěním stavebního otvoru se nazývá přípojovací spára. Ta je ve stavební praxi při realizaci často podceňována a její nekvalitní provedení může velkou mírou ovlivnit funkčnost i tepelnou propustnost otvorové výplně. Přípojovací spára se skládá ze tří základních zón (viz Obr. 19).

- A vnější uzávěr přípojovací spáry
- B vnitřní uzávěr přípojovací spáry
- C tepelně izolační výplň



Obr. 19 Základní zóny přípojovací spáry [14]

Účel jednotlivých částí přípojovací spáry je definován v normě ČSN 74 6077 [14]:

- Vnější uzávěr přípojovací spáry je těsnící materiál, který má zajistit trvalou vodotěsnost přípojovací spáry, tj. zabránit průniku vody z vnějšího prostředí po dobu předpokládané životnosti otvoru výplně.
- Tepelně izolační výplň je materiál, který výrazně omezuje šíření tepla v místě přípojovací spáry. (tj. např. nízko expanzní PU pěna)
- Vnitřní uzávěr přípojovací spáry je těsnící materiál, který má zajistit trvalou parotěsnost a vzduchotěsnost přípojovací spáry, tj. po dobu předpokládané životnosti otvorové výplně zabraňuje průniku vzduchu a difuzi vodní páry v místě přípojovací spáry.

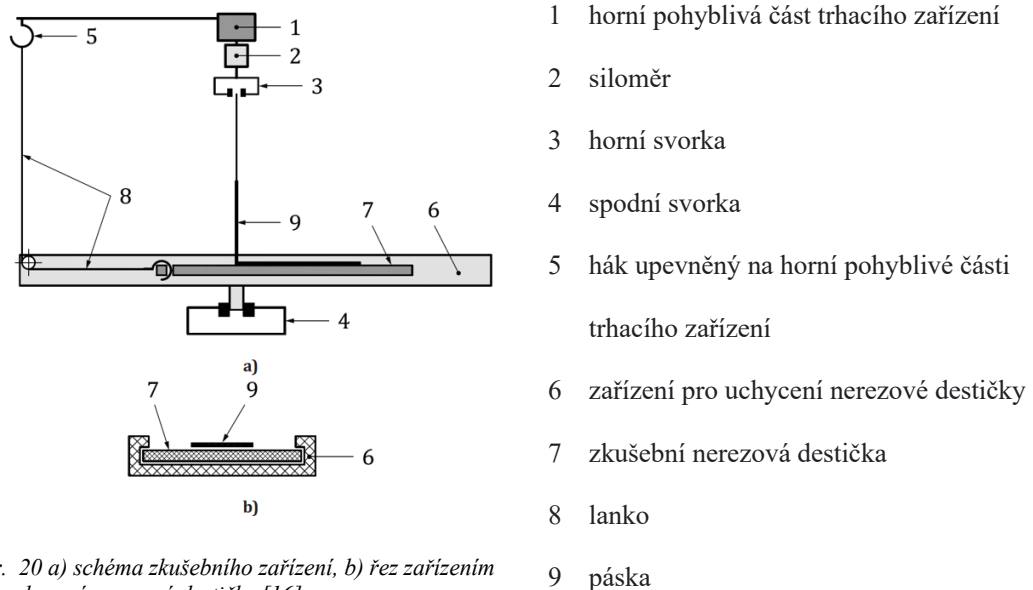
Jednou z možností, jak technicky řešit provedení vnějšího a vnitřního uzávěru, je použití tzv. funkčních pásek. Provádění montáže oken bez funkčních pásek není v souladu s platnou legislativou [14]. Ke správnému fungování pásek je nutná jejich dostatečná přídržnost k ostění stavebního otvoru a k rámu okna. Kritická doba je především časová prodleva mezi osazením okna a přilepením pásek až do doby, než dojde k zajištění pásek

finálními vrstvami ostění, jako jsou například omítky a parapety. U menších staveb, jako jsou například rodinné domy, může být prodleva minimální, nicméně u rozsáhlých staveb se prodleva může protáhnout až na několik měsíců. Touto kapitolou se snažím zjistit rozdílnosti v přídržnosti vybraných pásek a další vlivy, které mohou jejich přídržnost zásadně ovlivnit. [15]

4.1.1. Normový postup zkoušky

Stanovením pevnostních vlastností při odlupování se zabývá ČSN EN ISO 29862 z prosince 2019, která nahradila původní ČSN EN 1939 z února 2004.

Princip normové zkoušky lepivosti spočívá v měření síly potřebné k odtržení testované pásky z povrchu nerezové destičky pod úhlem 90° za stanovené rychlosti odtrhávání. Výsledkem zkoušky pak není čas odtržení pásky při daném zatížení, ale síla potřebná k odtržení pásky od nerezové destičky. Schéma normové zkoušky je patrné z Obr. 20.



Obr. 20 a) schéma zkušebního zařízení, b) řez zařízením pro uchycení nerezové destičky [16]

Vzhledem k tomu, že normový postup je příliš složitý a mým cílem nebylo přesně určit trhací sílu, ale porovnat přídržnost pásek na různých materiálech a při různých podmínkách, nebyl normový postup měření použit.

4.2. Zkoušené okenní pásy

Byly testovány tři funkční okenní pásy, z toho dvě pro vnější uzávěr připojovací spáry (exteriérové) a jedna pro vnitřní uzávěr připojovací spáry (interiérová).



Obr. 21 Testované pásy

Tabulka 9 Základní vlastnosti testovaných okenních pásek

Páska:	Ext. páska 1 (černá)	Ext. páska 2 (bílá)	Int. páska (červená)
Materiál:	Polypropylen	polypropylen	hliníková fólie
Nosná vrstva:	Neuvedeno	třívrstvá kompozitní textilie	netkaná textilie
Pevnost v tahu: (EN12311-1)	Neuvedeno	340(216) N/ 50 mm	250(1165) N/ 50 mm
Lepivost: (EN1939)	> 25 N/ 25 mm	neuvedeno	neuvedeno
Ekvivalentní difuzní tloušťka: (EN12572)	$s_d < 0,5$ m	$s_d = 0,06$ m	$s_d = 550$ m
Aplikační teplota: * s primerem	+5 °C až 45 °C * -10 °C až +45 °C	+5 °C až 45 °C * -5 °C až +45 °C	+5 °C až 45 °C * -5 °C až +45 °C
Typ fólie:	celoplošné lepidlo	celoplošné lepidlo	celoplošné lepidlo

Uvedená technická data jsou dle technických listů od výrobců. Jelikož touto prací nemám v úmyslu někoho poškodit, nejsou přesné typy a výrobci okenních pásek uvedeny.

4.3. Metodika odtrhové zkoušky

Pro zjištění přídržnosti vybraných pásek byla navržena odtrhová zkouška. Při návrhu odtrhové zkoušky byla snaha o co největší podobnost situace se stavební praxí a snadnou a relativně rychlou opakovatelnost. Principem je měření času potřebného k odtržení

pásky, která byla zatížena definovaným závažím a přilepena v definované ploše k podkladnímu materiálu.

Účelem zkoušky bylo porovnat okenní pásky mezi sebou a zároveň porovnat vliv různého materiálového provedení ostění na přídržnost. Pro zkoušky byly vybrány stavební materiály, a to cementová stěrka 3 dny po její aplikaci, cihla Porotherm, pórobeton Ytong, hoblované dřevo a Purenit používaný jako termopodložka například pro francouzská okna.

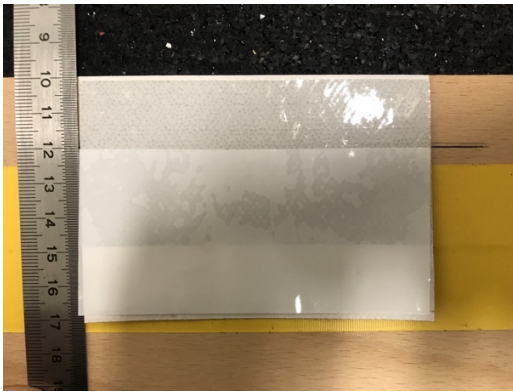
Mezi další vliv sledovaný při zkouškách okenních pásek patří vliv aplikace adhezního nástřiku pod lepenou pásku, který má zlepšovat přídržnost pásek k podkladnímu materiálu. Byla předpokládána změna přídržnosti v čase od okamžiku přilepení. Z toho důvodu byly zkoušky provedeny v různých časových odstupech od aplikace okenních pásek. Sledovaný byl také vliv zvýšené vlhkosti materiálu a vliv zvýšené teploty.

Každá kombinace zkoušených pásek, materiálu a dalších podmínek byla zkoušena alespoň na třech vzorcích, čímž bylo v průběhu zkoušení provedeno více než 180 odtržení.

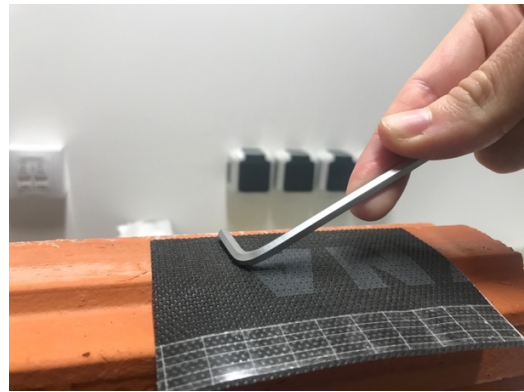
4.3.1. Popis zkoušky

Přídržnost okenních pásek byla zkoušena na vzorcích pásek o délce 10 cm, které byly lepeny na podkladní materiál v šířce 2 cm jejich lepicí plochy. Pásky i zkoušený materiál byly před zkouškou temperovány na teplotu 22 °C, což je stálá teplota v laboratoři, kde byly materiály skladovány a následně i zkoušeny.

Při lepení byla odtržena ochranná folie lepicí pásky, která byla nalepena zpět tak, aby odhalovala pruh 2 cm lepicí plochy. Páska byla nalepena na zkoušený materiál, z něhož byly suchým ubrouskem setřeny povrchové nečistoty, které by mohli ovlivnit zkoušku. Po přilepení byl vytlačen přebytečný vzduch z prostoru mezi páskou a materiálem, tak aby byla páska přilepena k podkladu v celé předepsané ploše. Toto vytlačení bylo prováděno dvěma tahy imbusovým klíčem (lze použít i přitlačný váleček, nebo jiný materiál, který zajistí přitlačení pásky k povrchu a pásku neporuší) po přilepené pásce za použití mírného tlaku, čímž byla páska i mírně k podklad přitlačena. Přitlačení bylo prováděno ve všech případech stejným způsobem a přibližně stejnou silou.



Obr. 22 Plocha přilepení 20 x 100 mm



Obr. 23 Způsob přitlačení pásky k podkladu

Byla sledována doba odtržení pásky z podkladu za použití závaží o hmotnosti 1,5 kg. Odtržení bylo prováděno pod úhlem 90° (viz Obr. 25) a hmotnost byla na pásku přenášena rovnoměrně pomocí speciálně vyrobeného závěsu (viz Obr. 24), který po dobu zkoušky svíral pásku v celé její délce a přenášel tak hmotnost závaží na celou délku nalepené pásky. Závěs byl vyroben tak, aby na pásku byla síla od závaží vnášena co nejbližně rovinně pásky (bez excentricity).



Obr. 24 Ukázka odtrhové zkoušky



Obr. 25 Detail závěsu

Pro zaznamenání času a charakteru odtržení byla každá odtrhává zkouška zaznamenána na videokameru. Z videozáznamu byla následně odečtena doba od počátku zatížení do prvního otvoru mezi páskou a zkoušeným materiálem. Nebyla tedy sledována doba od zatížení k úplnému odtržení, ale pouze k momentu, kdy vznikne mezera mezi podkladním materiálem a páskou. Toto opatření bylo zvoleno na základě zkušeností z několika testovacích zkoušek, kdy některé pásky vykazovaly relativně dlouhou dobu

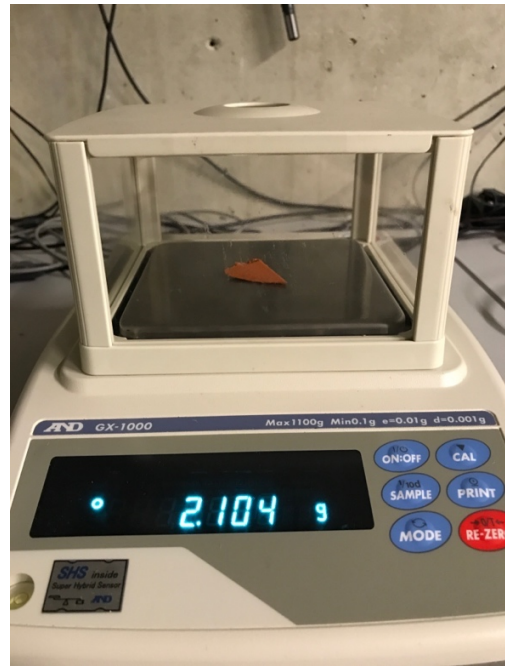
kdy se dokázali udržet jen na části přilepené plochy, to však již páska ze své podstaty neplní svou funkci a tato doba nemůže být započítána do doby přídržnosti.

Pro zjištění vývoje přídržnosti pásek v čase byly pásy odtrhávány po 1 hodině a následně po 24 hodinách od jejich aplikace. Dále byl sledován vliv použití penetrace (adhezní nástřik), proto byly pásy na všech typech materiálů a pro obě doby přilepení zkoušeny i s aplikací penetračního nástřiku na zkoušený materiál. Adhezní nástřik byl aplikován dle pracovního postupu uvedeného výrobcem. Plechovka byla před použitím důkladně protřepána min. 20× a byl proveden nástřik na zkoušený materiál ze vzdálenosti 15 až 20 cm, tak aby byl povrch zcela pokryt jemným filmem (dva tahy podél materiálu). Po nastříkání penetrace byl nástřik nechán odvětrat přibližně 60 s a následně byla nalepena páska, tak jak je popsáno výše.

Vliv vlhkosti materiálu na přídržnosti pásek byl sledován při odtrhové zkoušce exteriérových pásek z cihelného bloku Porotherm. Původně měla být zkouška prováděna na části cihly ponořené ve vodě, nicméně při první zkoušce bylo zjištěno, že i po důkladném otření povrchu dříve namočené část cihly není možné pásku přilepit a přídržnost všech zkoušených pásek je na takto extrémně vlhkém povrchu nulová. K zajištění zvýšené vlhkosti povrchu cihly byla spodní část ponořena do vody po dobu jednoho týdne a vlivem vztlínání vody došlo ke zvýšené vlhkosti povrchu horní části cihly. Na takto vlhký povrch cihly byla aplikována páska, která byla po jedné hodině od aplikace odtržena předepsaným způsobem popsáným výše. Vlhkost povrchu cihly, ze kterého byly pásy odtrženy, byla měřena gravimetrickou metodou. Bezprostředně po ukončení odtrhové zkoušky byly odebrány malé vzorky cihly odštipnuté z oblasti přilepení, které byly následně zváženy na přesných laboratorních vahách. Po vysušení vzorků v sušičce při teplotě 60 °C po dobu 24 h bylo provedeno opětovné měření jejich hmotnosti a byla stanovena hmotnostní vlhkost w (%).



Obr. 26 Způsob vlhčení povrchu cihly



Obr. 27 Vážení vzorku povrchu vlhké cihly

Posledním zkoušeným vlivem přídržnosti byla zvýšená teplota podkladního materiálu i pásky samotné. Odrhované byly obě exteriérové pásky z povrchu cihelného bloku Porotherm. Cihly i pásky byli předehřáty po dobu 24 hodin na zvolenou teplotu 35 °C. Po předehřátí byly aplikovány pásky na povrch cihly a po dobu jedné hodiny byly ponechány v sušárně stále při teplotě 35 °C. Před začátkem odtrhové zkoušky byly cihly s nalepenými páskami vyjmuty ze sušárny a kvůli zpomalení chladnutí byly cihly vloženy do obalu z extrudovaného polystyrenu. Na začátku i na konci zkoušky byla IR kamerou změřena povrchová teplota cihly v místě aplikace pásek.



Obr. 28 Předehřátí cihel v sušárně



Obr. 29 Odrhová zkouška při zvýšené teplotě

4.3.2. Způsob vyhodnocení a nejistoty měření

Čas odtržení jednotlivých pásek byl vyhodnocen na základě pořízených videozáznamů, z kterých byl odečten čas počátku zatížení od času kdy došlo k první mezeře mezi páskou a materiálem. Pro každou variantu zkoušky byly provedeny tři měření času odtržení. Hodnoty času uvedené pro jednotlivé varianty zkoušky jsou aritmetické průměry tří měřených časů v sekundách s uvedenou rozšířenou nejistotou U_b pro $k = 2$, která odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Stanovení nejistot bylo provedeno způsobem popsaným v příloze A. Vzhledem k počtu (n) opakování měření byla nejistota typu A rozšířena opravným koeficientem (k_s).

$$u_A = k_s \cdot s_{\bar{x}}$$

Tabulka 10 Opravné koeficienty

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k_s	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

I přes velké odchylky v měřených časech u některých vzorků nebyly žádné odlehlé hodnoty z měření odstraněny. Odstraněny a opakovány byly pouze zkoušky u kterých bylo na základě videozáznamu prokázáno chybné měření například vlivem zaseknutí závěsu a vyvolání momentu sil při odtrhávání.

4.4. Výsledky a porovnání okenních pásek

Naměřené doby odtržení byly zaneseny do tabulek a následně vyhodnoceny. Tabulky jsou uvedeny zvlášť pro každou ze zkoušených pásek. Z naměřených dat byly vytvořeny grafy, které ukazují nejpříznivější a nejméně příznivý materiál pro každou z testovaných pásek. Dále byl pomocí grafů znázorněn vliv použití adhezního nástřiku (primer) pro každou pásku. Pro znázornění nárůstu či poklesu doby odtržení v čase byly výsledky pro každý materiál a jednotlivé pásky porovnány v grafech. Pro přehlednost byly ve všech grafech zachovány stejné barvy pro označení časů odtržení z jednotlivých materiálů. Ve všech grafech je zachováno stejné měřítko, tak aby byl na první pohled zřejmý výrazný rozdíl mezi časy odtržení jednotlivých pásek.

U výsledků odtržení za zvýšené vlhkosti jsou v tabulkách uvedeny hmotnostní vlhkosti měřené pro jednotlivé pokusy měření. Výsledky za zvýšené teploty jsou doplněny o termogramy dokazující teploty povrchů cihly na začátku a na konci odtrhové zkoušky. Všechny uvedené časy odtržení jsou uvedeny ve formátu h:mm:ss.

4.4.1. Výsledky odtrhové zkoušky

Tabulka 11 Doby odtržení – Exteriérová páska 1 (černá)

materiál	primer	odtržení	t_1	t_2	t_3	Průměr ± Ub
stěrka po 3 dnech zrání	ANO	po 1 h	0:03:17	0:03:18	0:02:38	0:03:04 ± 0:01:01
		po 24 h	0:07:01	0:07:31	0:06:32	0:07:04 ± 0:00:42
	NE	po 1 h	0:05:04	0:06:41	0:05:18	0:05:41 ± 0:02:19
		po 24 h	0:13:43	0:13:34	0:11:07	0:12:25 ± 0:04:53
cihelný blok Porotherm	ANO	po 1 h	0:04:49	0:05:06	0:05:14	0:05:03 ± 0:00:34
		po 24 h	0:07:49	0:07:36	0:09:26	0:08:34 ± 0:01:43
	NE	po 1 h	0:11:01	0:08:49	0:12:57	0:10:56 ± 0:05:30
		po 24 h	0:16:09	0:23:15	0:17:23	0:18:56 ± 0:10:05
pórobeton Ytong	ANO	po 1 h	0:06:21	0:09:29	0:06:13	0:07:21 ± 0:04:55
		po 24 h	0:09:55	0:07:50	0:06:33	0:08:06 ± 0:04:31
	NE	po 1 h	0:09:09	0:09:22	0:12:45	0:10:25 ± 0:05:22
		po 24 h	0:13:02	0:15:59	0:09:03	0:12:41 ± 0:09:14
hoblované dřevo	ANO	po 1 h	0:12:28	0:10:44	0:08:00	0:10:24 ± 0:05:59
		po 24 h	0:09:22	0:06:39	0:07:19	0:07:47 ± 0:03:46
	NE	po 1 h	0:11:52	0:15:48	0:18:39	0:15:26 ± 0:09:03
		po 24 h	0:14:49	0:23:42	0:16:34	0:18:22 ± 0:12:30
Purenit	ANO	po 1 h	0:09:12	0:08:09	0:07:06	0:08:09 ± 0:02:47
		po 24 h	0:21:35	0:13:11	0:11:31	0:15:26 ± 0:14:20
	NE	po 1 h	0:12:26	0:11:47	0:19:32	0:14:35 ± 0:11:25
		po 24 h	0:30:37	0:24:29	0:23:00	0:26:02 ± 0:10:43

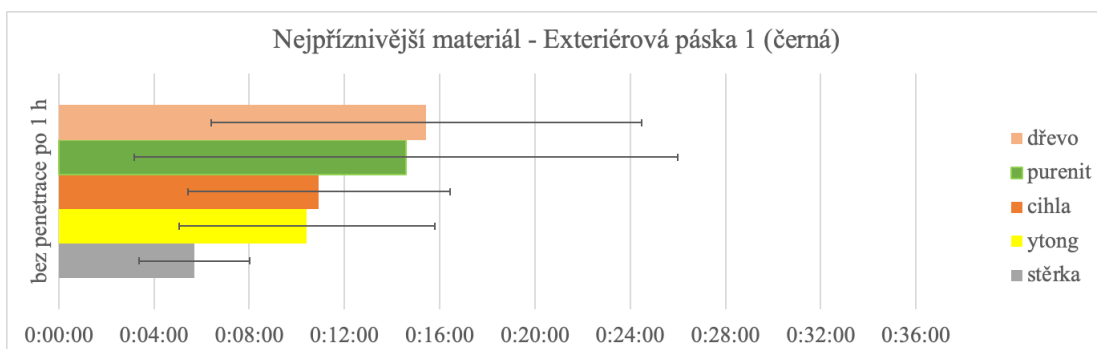
Tabulka 12 Doby odtržení – Exteriérová páska 2 (bílá)

materiál	primer	odtržení	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	Průměr ± Ub
stěrka po 3 dnech zrání	ANO	po 1 h	0:02:36	0:01:45	0:01:44	0:02:02 ± 0:01:19
		po 24 h	0:01:54	0:01:56	0:02:17	0:02:02 ± 0:00:34
	NE	po 1 h	0:00:57	0:01:11	0:01:30	0:01:13 ± 0:00:44
		po 24 h	0:01:10	0:01:37	0:01:36	0:01:28 ± 0:00:41
cihelný blok Porotherm	ANO	po 1 h	0:01:19	0:01:38	0:01:57	0:01:38 ± 0:00:51
		po 24 h	0:02:19	0:01:30	0:02:29	0:02:06 ± 0:01:24
	NE	po 1 h	0:01:49	0:02:12	0:01:30	0:01:50 ± 0:00:56
		po 24 h	0:01:39	0:01:54	0:01:57	0:01:50 ± 0:00:26
porobeton Ytong	ANO	po 1 h	0:02:12	0:02:12	0:02:14	0:02:13 ± 0:00:05
		po 24 h	0:01:42	0:02:00	0:02:03	0:01:55 ± 0:00:30
	NE	po 1 h	0:01:36	0:01:03	0:01:45	0:01:28 ± 0:00:59
		po 24 h	0:01:13	0:01:04	0:01:27	0:01:15 ± 0:00:31
hoblované dřevo	ANO	po 1 h	0:01:57	0:02:12	0:02:05	0:02:05 ± 0:00:20
		po 24 h	0:02:03	0:01:23	0:01:24	0:01:37 ± 0:01:01
	NE	po 1 h	0:01:25	0:02:08	0:02:23	0:01:59 ± 0:01:20
		po 24 h	0:01:29	0:01:47	0:01:48	0:01:41 ± 0:00:29
Purenit	ANO	po 1 h	0:01:45	0:01:58	0:01:35	0:01:46 ± 0:00:31
		po 24 h	0:02:01	0:01:52	0:02:05	0:01:59 ± 0:00:18
	NE	po 1 h	0:02:16	0:01:31	0:01:21	0:01:43 ± 0:01:18
		po 24 h	0:01:57	0:01:54	0:02:11	0:02:01 ± 0:00:24

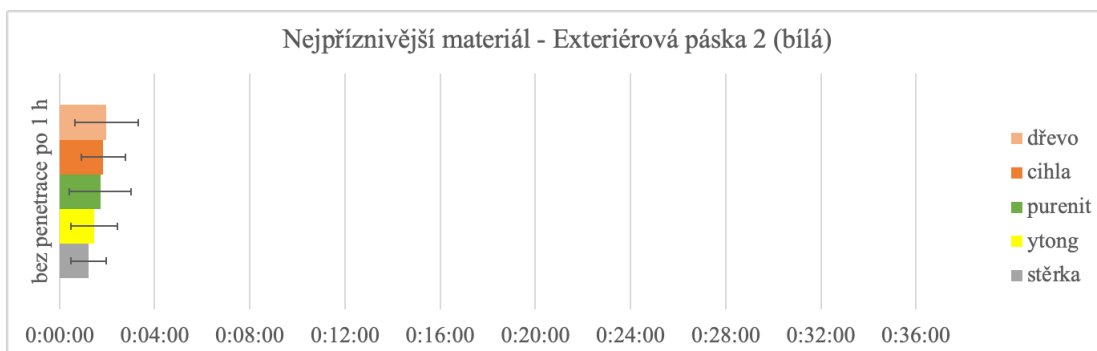
Tabulka 13 Doby odtržení – Interiérová páska (červená)

materiál	primer	odtržení	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	Průměr ± Ub
stěrka po 3 dnech zrání	ANO	po 1 h	0:01:23	0:01:18	0:01:53	0:01:31 ± 0:00:50
		po 24 h	0:01:59	0:02:35	0:02:37	0:02:24 ± 0:00:57
	NE	po 1 h	0:01:18	0:00:46	0:01:32	0:01:14 ± 0:00:40
		po 24 h	0:01:53	0:01:49	0:02:00	0:01:54 ± 0:00:15
cihelný blok Porotherm	ANO	po 1 h	0:01:11	0:01:14	0:01:24	0:01:16 ± 0:00:19
		po 24 h	0:02:02	0:02:15	0:02:10	0:02:09 ± 0:00:18
	NE	po 1 h	0:01:00	0:01:02	0:00:52	0:00:58 ± 0:00:15
		po 24 h	0:02:15	0:02:23	0:02:13	0:02:17 ± 0:00:15
porobeton Ytong	ANO	po 1 h	0:01:56	0:02:29	0:02:41	0:02:22 ± 0:01:02
		po 24 h	0:02:54	0:02:38	0:02:35	0:02:42 ± 0:00:27
	NE	po 1 h	0:02:02	0:02:00	0:01:57	0:02:00 ± 0:00:08
		po 24 h	0:02:33	0:02:09	0:01:57	0:02:13 ± 0:00:49
hoblované dřevo	ANO	po 1 h	0:01:08	0:01:07	0:01:04	0:01:06 ± 0:00:07
		po 24 h	0:01:55	0:02:24	0:01:32	0:01:57 ± 0:01:09
	NE	po 1 h	0:02:07	0:00:59	0:00:53	0:01:20 ± 0:01:49
		po 24 h	0:02:17	0:02:16	0:02:16	0:02:16 ± 0:00:04
Purenit	ANO	po 1 h	0:01:15	0:01:14	0:01:32	0:01:20 ± 0:00:27
		po 24 h	0:01:41	0:01:47	0:01:51	0:01:46 ± 0:00:14
	NE	po 1 h	0:00:44	0:00:49	0:00:52	0:00:48 ± 0:00:11
		po 24 h	0:01:37	0:01:26	0:01:31	0:01:31 ± 0:00:15

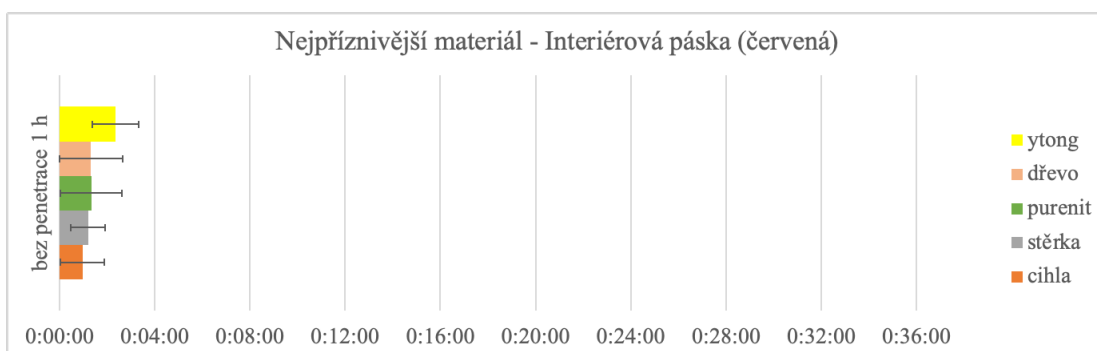
Grafické znázornění výsledků – vliv materiálu na přídržnost pásek



Graf 31 Srovnání doby odtržení od různých materiálů – Exteriérová páska 1 (černá)

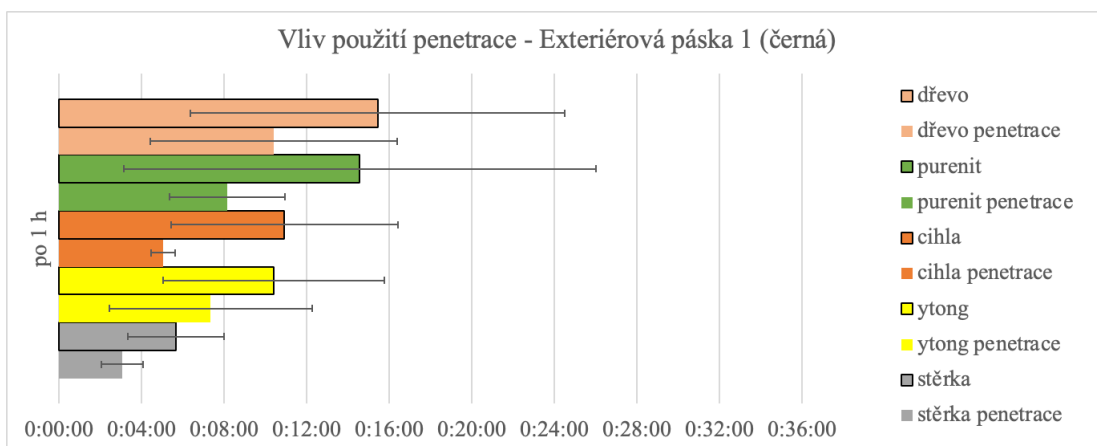


Graf 32 Srovnání doby odtržení od různých materiálů – Exteriérová páska 2 (bílá)

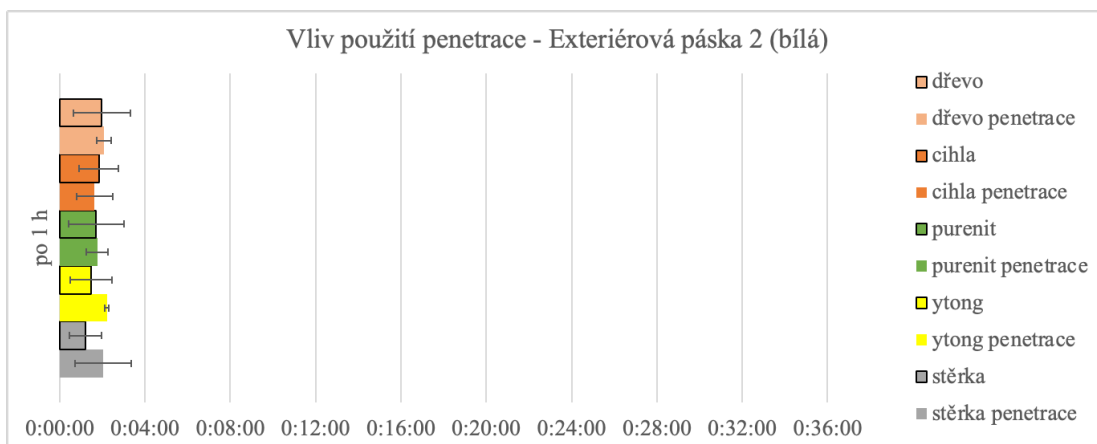


Graf 33 Srovnání doby odtržení od různých materiálů – Interiérová páska (červená)

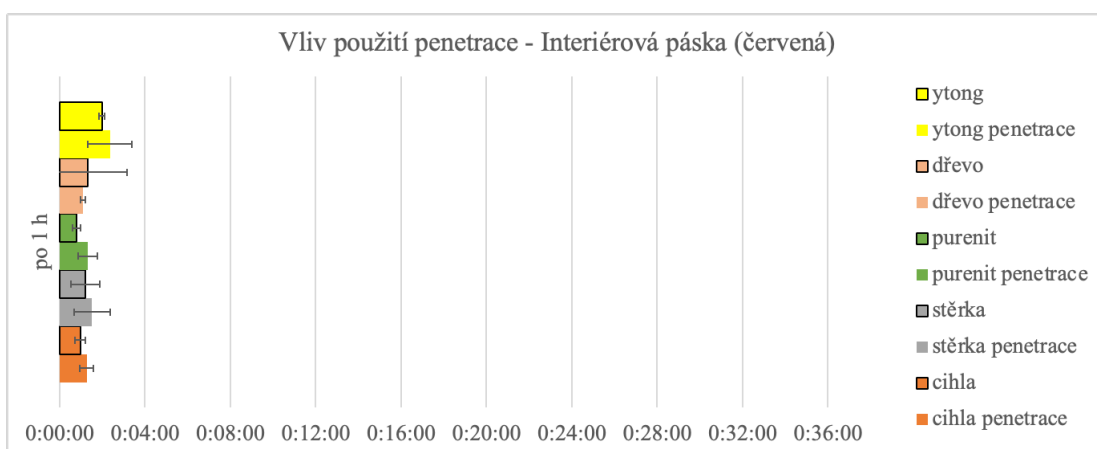
Grafické znázornění výsledků – vliv použití penetrace na přídržnost pásek



Graf 34 Vliv použití penetrace – Exteriérová páska 1 (černá)

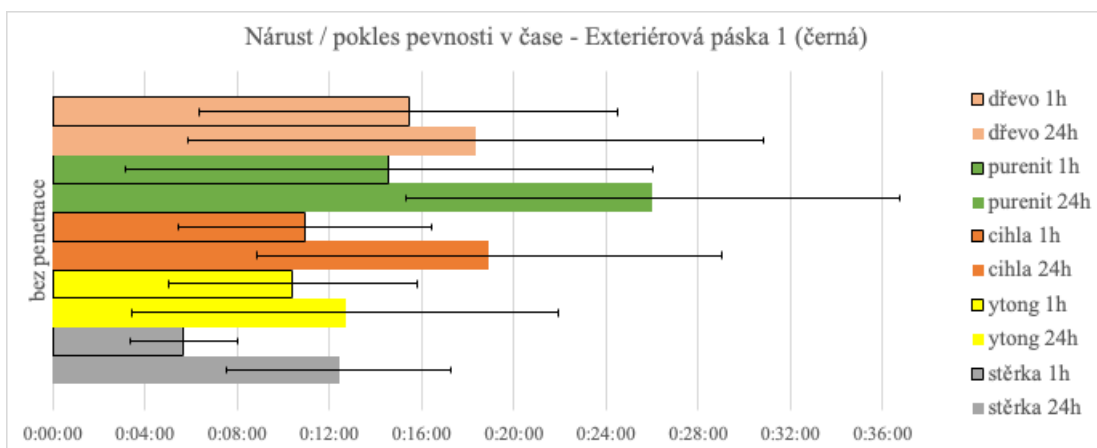


Graf 35 Vliv použití penetrace – Exteriérová páska 2 (bílá)

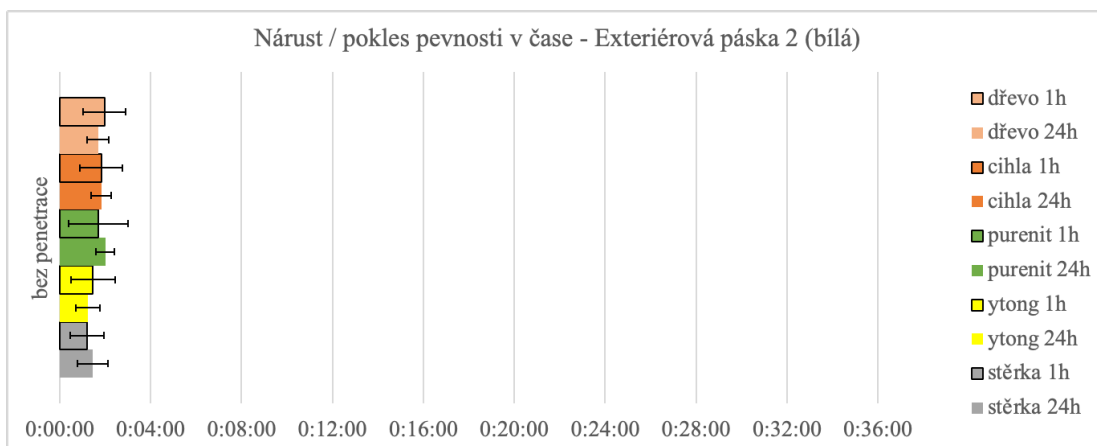


Graf 36 Vliv použití penetrace – Interiérová páska (červená)

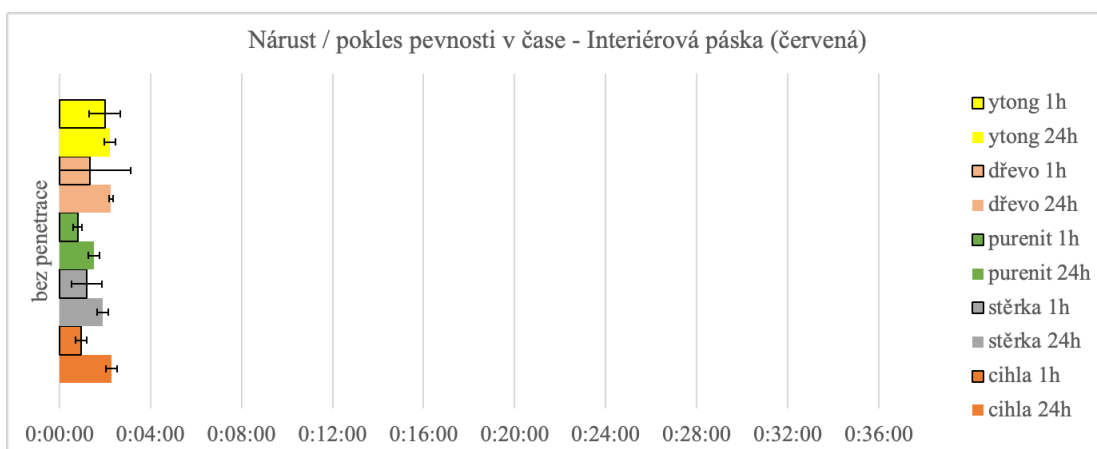
Grafické znázornění výsledků – nárůst/pokles přídržnosti pásek v čase



Graf 37 Nárůst / pokles pevnosti v čase – Exteriérová páska 1 (černá)



Graf 38 Nárůst / pokles pevnosti v čase – Exteriérová páska 2 (bílá)



Graf 39 Nárůst / pokles pevnosti v čase – Interiérová páska (červená)

4.4.2. Výsledky za zvýšené vlhkosti

Odrhová zkouška exteriérových pásek z vlhké cihly bez penetrace

Tabulka 14 Výsledky zkoušky exteriérových pásek z vlhké cihly bez penetrace

páska	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	Průměr ± Ub
Ext. páska 1 (černá)	0:07:53	0:05:43	0:25:18	0:00:15	0:09:47 ± 0:18:25
Hmotnostní vlhkost <i>w</i> (%)	10,85	12,78	13,46	11,92	12,25
Ext. páska 2 (bílá)	0:02:17	0:02:31	0:01:32	0:01:19	0:01:55 ± 0:00:59
Hmotnostní vlhkost <i>w</i> (%)	11,48	12,31	12,92	12,53	12,31

Výsledek exteriérové pásky 1 (černá) v suchém stavu byl **0:10:56 ± 0:05:30**.

Výsledek exteriérové pásky 2 (bílá) v suchém stavu byl **0:01:50 ± 0:00:56**.

4.4.3. Výsledky za zvýšené teploty

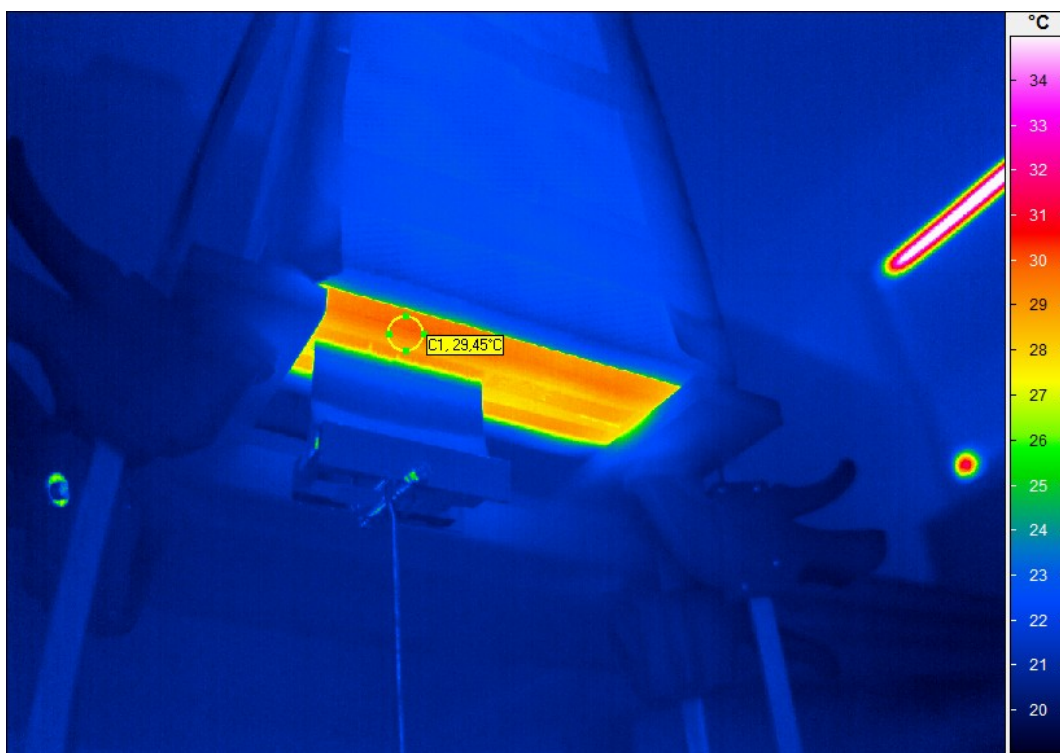
Odrhová zkouška exteriérových pásek z předehřáté cihly (35 °C) bez penetrace

Tabulka 15 Výsledky zkoušky exteriérových pásek z předehřáté cihly (35 °C) bez penetrace

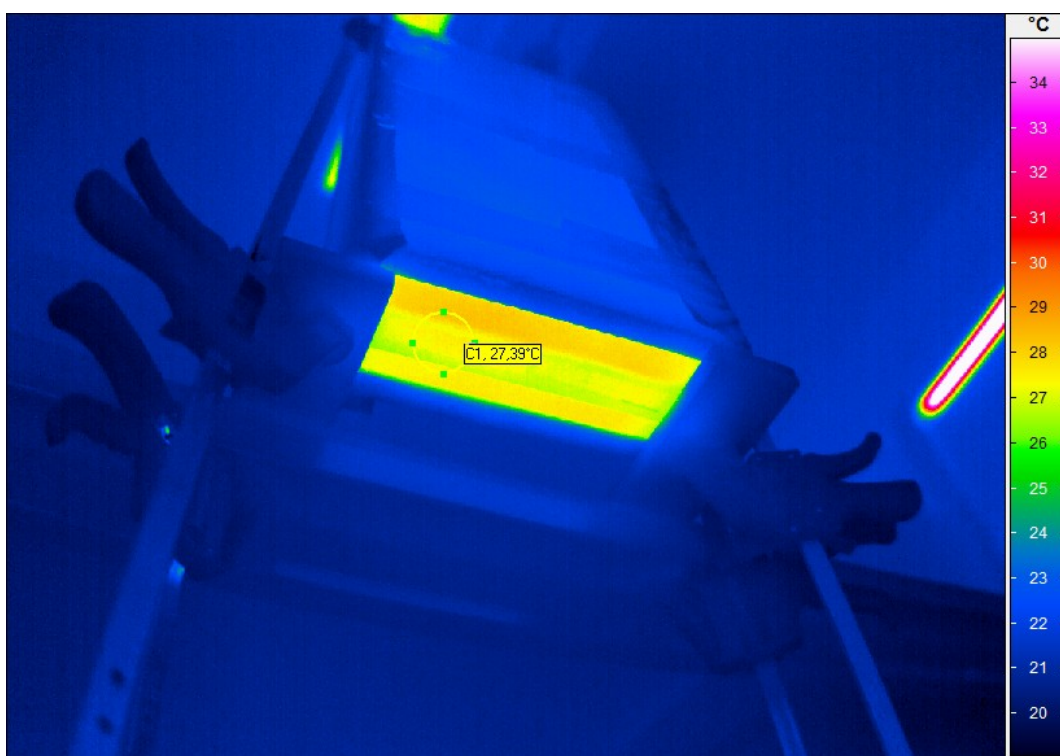
páska	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	Průměr ± Ub
Ext. páska 1 (černá)	0:18:11	0:23:02	0:07:35	0:14:07	0:15:44 ± 0:11:07
Ext. páska 2 (bílá)	0:00:46	0:00:29	0:00:34	0:00:25	0:00:34 ± 0:00:16

Výsledek exteriérové pásky 1 (černá) za pokojové teploty (22 °C) byl **0:10:56 ± 0:05:30**.

Výsledek exteriérové pásky 2 (bílá) za pokojové teploty (22 °C) byl **0:01:50 ± 0:00:56**.



Obr. 30 Termogram povrchu cihly na počátku zkoušky (29,5 °C)



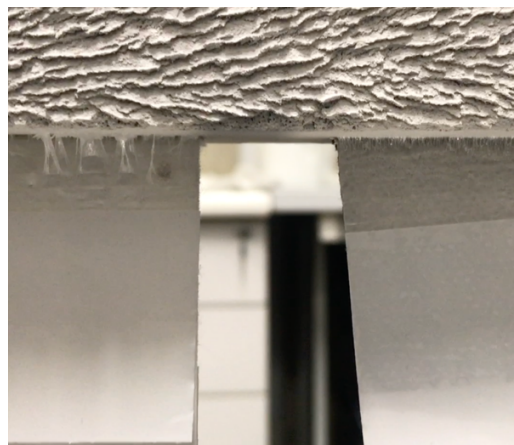
Obr. 31 Termogram cihly na konci zkoušky (27,4 °C)

4.5. Diskuse výsledků

Na první pohled je z výsledků odtrhových zkoušek patrné, že exteriérová páska 1 (černá) svou přídržností ve všech zkoušených případech výrazně převyšuje ostatní zkoušené pásy. Rozdílnost pásek byla patrná i ve způsobu odtrhávání. Bílá a červená páska se od zkoušeného materiálu odtrhávaly za vzniku dlouhých protažených částí lepidla, tak jak je to patrné na Obr. 33. K odtržení těchto pásek docházelo nikoli na rozhraní mezi lepidlem a materiálem, ale na rozhraní mezi lepidlem a nosnou vrstvou, o čemž svědčí jednak páska, která byla po odtržení téměř bez lepidivé vrstvy (viz Obr. 32), ale i zkoušený materiál na kterém bylo místo přilepení po ukončení zkoušky zcela pokryto lepidlem. Naopak černá páska se od materiálů odtrhovala za vzniku velkého počtu velmi jemných a krátkých protažených částí lepidla a k odtržení docházelo mezi lepidlem a materiálem. Po odtržení zůstal materiál čistý bez známek lepidla.



Obr. 32 Povrch lepidivé části pásek po odtrhové zkoušce (vpravo bílá, vlevo černá)



Obr. 33 Způsob otrhávání pásek z povrchu pórobetonu (vpravo černá, vlevo bílá)

Ze srovnání materiálů na základě doby přídržnosti u jednotlivých pásek se prokázalo téměř stejné pořadí materiálů u exteriérových pásek. U interiérové pásy se trendu lehce vymyká Ytong a cihla. Pořadí materiálů na základě doby přídržnosti zároveň koreluje s drsností jejich povrchů. Ukazuje se, že čím hladší je materiál tím lepší přídržnost pásy lze očekávat.

Dále byl zkoumán vliv penetrace aplikované na zkoušený materiál. Ta se překvapivě ukázala jako nežádoucí u černé exteriérové pásy, a to ve všech případech zkoušených materiálů. To může být způsobeno skutečností, že přídržnost samotné pásy je větší než přídržnost adhezního nástřiku a dochází k odtržení mezi adhezním nástřikem a materiálem. Naopak u bílé a červené pásy se téměř ve všech případech nějaké zlepšení

přidržnosti při použití adhezního nástřiku prokázalo. Doba odtržení bílé a červené pásky ale i tak zůstala mnohem kratší, než v případě černé pásky.

Nárůst pevnosti v čase mezi odtržením po 1 hodině a po 24 hodinách je patrný téměř ve všech případech. Lze tedy konstatovat jistý proces vyzrání lepidla, které s časem nabývá na pevnosti. Otázkou však zůstává, jak dlouho tento proces nárůstu pevnosti pokračuje a zda se v určitém časovém horizontu přidržnost vlivem stárnutí naopak nezačne zhoršovat. Z výsledků lze konstatovat, že zajištění okenních pásek finálními vrstvami ostění jako jsou například omítky je vhodné provádět s určitým časovým odstupem například 24 hodin, aby došlo k vyzrání lepidla a páska měla v době jejího omítání dostatečnou přidržnost a nedošlo k jejímu odtržení. Delší časový odstup fixace pásky v řádu měsíců může být naopak nežádoucí. Páska vystavená povětrnostním vlivům po takto dlouhou dobu může naopak svou přidržnost ztratit a v době její fixace finální vrstvou již nemusí správně plnit svou funkci.

Změna přidržnosti se zvýšenou vlhkostí materiálu vlivem vztlínající vody nebyla prokázána, nicméně u černé pásky se ukázal nejistý výsledek. Zatímco v jednom případě byla doba odtržení více než 25 minut, v jiném případě byla pouze 15 sekund. Pro prokázání vlivu vlhkosti, by muselo být testováno mnohem více vzorků.

Posledním sledovaným vlivem, u kterého se očekávala změna doby přidržnosti pásek, byla zvýšená teplota. Vliv zvýšené teploty se prokázal pouze u exteriérové pásky 2 (bílá), u níž se čas odtržení výrazně zkrátil. Vliv zvýšené teploty byl patrný i na charakteru odtržení této pásky, při němž došlo k oddělení veškerého lepidla z nosné vrstvy.

U mnoha variant pokusů odtrhových zkoušek se ukázal velký rozdíl mezi naměřenými časy odtržení, který způsobil velkou nejistotu měření. V některých případech byla stanovena nejistota větší než naměřený čas odtržení, nicméně spodní hranice nejistoty se záporným znamínkem není možná. V těchto případech je spodní hranice nejistoty nula. Důvod těchto odchylek nebyl zjištěn. Předpokládá se, že jsou způsobeny hned několika aspekty, které do procesu měření tyto odchylky přinášejí. Mezi ovlivňující vlivy může patřit rozdílnost povrchů, a to i v rámci jednoho zkoušeného materiálu, nedokonalost pásek ve formě špatného přilnutí lepidla k nosné vrstvě pravděpodobně vlivem ohybu v klubu pásky, které se vyskytovaly u bílé a červené pásky, ale také možná rozdílnost v síle přitlačení pásek. Pro zdokonalení zkoušky by bylo vhodné vyvinout přitlačný mechanismus, který by pásky přitlačoval vždy stejnou silou.

5. Studie prostupu tepla detailem okenního ostění

5.1. Lineární činitel prostupu tepla

Důležitým aspektem ovlivňujícím správnou funkci zabudovaného okna je vedle kvality přídržnosti okenních pásek i vhodná poloha osazení okna v obvodové stěně. Poloha osazení okna může zásadně ovlivnit jak tepelnou ztrátu budovy, tak i teplotu na vnitřním povrchu. Nízké povrchové teploty mohou vést ke kondenzaci vodní páry na vnitřním povrchu zasklení, rámu a navazujících povrchů (parapet, ostění, nadpraží), k růstu plísní a po delší době i k degradaci okna.

V blízkosti napojení obvodové stěny a okna dochází ke zvýšenému tepelnému toku. Takové místo bývá označováno jako tepelná vazba. K vyjádření množství tepla, které prochází při jednotkovém teplotním rozdílu jednotkovou délkou tepelné vazby, se používá lineární činitel prostupu tepla. [17]

Pro porovnání velikosti tepelné vazby okna a obvodové stěny byly vybrány typické detaily reprezentující historické stavby, jejich různé rekonstrukce a moderní zástavbu. V některých případech byla sledována i různá poloha okna v ostění. Hodnocené detaily jsou uvedeny v Tabulka 17.

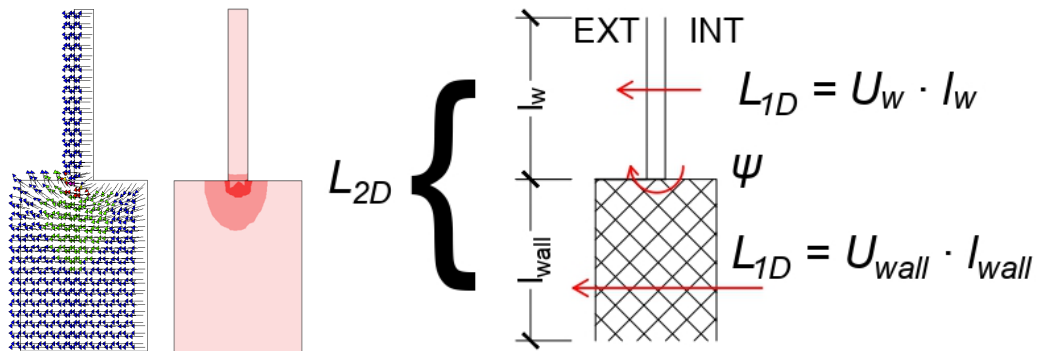
Pro každý detail byla vypočtena jeho tepelná propustnost L (W/(m K)). Výpočet byl proveden řešením ustáleného dvourozměrného vedení tepla. Z hodnoty tepelné propustnosti byl následně dopočten lineární činitel prostupu tepla ψ (W/(m K)).

5.1.1. Způsob výpočtu

Výpočet prostupu tepla přes vybrané detaily byl proveden v softwaru [20]. Pro účely studie byly detaily zjednodušeny. Okna byla modelována jako obdélník s odpovídajícím součinitelem tepelné vodivosti určeného z šířky obdélníku odpovídajícímu šířce rámu a součinitele prostupu tepla oknem U_w . Vybrané detaily, jejich rozměry a součinitele prostupu tepla oknem U_w a stěnou U_{wall} jsou uvedené v Tabulka 17. Výpočet prostupu tepla byl proveden pro následující okrajové podmínky teplot $T_e = -15$ °C a $T_i = 21$ °C a odporů při přestupu tepla $R_{si} = 0,13$ (m²K)/W a $R_{se} = 0,04$ (m²K)/W. Z výpočtu tepelné propustnosti L_{2D} (W/(m K)) detailu se lineární činitel prostupu tepla ψ (W/(m K)) určí takto [18]:

$$\psi = L_{2D} - L_{1D} = L_{2D} - \sum U_j \cdot l_j \quad (24)$$

kde L_{2D} (W/(m K)) je vypočtená tepelná propustnost hodnoceného detailu, U_j (W/(m²K)) je součinitel prostupu tepla j -té dílčí plošné konstrukce a l_j (m) je délka j -té konstrukce.



Obr. 34 Zvýšená hustota tepelného toku (vlevo), znázornění výpočtu lineárního činitele prostupu tepla (vpravo)

Požadované a doporučené hodnoty lineárního činitele jsou uvedeny v normě [17] (viz Tabulka 16).

Tabulka 16 Požadovaný lineární činitel prostupu tepla ψ_N podle ČSN 730540-2 [17]

	Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
	ψ_N	ψ_{rec}	ψ_{pas}
	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
Styk vnější stěny a výplně otvoru	0,10	0,03	0,01

Výsledky výpočtů tepelné propustnosti L a stanovené lineární činitele prostupu tepla ψ jsou uvedeny v Tabulka 17.

5.1.2. Vybrané detaily

Studie lineárního činitele prostupu tepla detailu okenního ostění byla provedena pro pět vybraných variant detailů. Detaily reprezentují jak historické budovy a jejich rekonstrukce, tak i moderní budovy dle současných požadavků na výstavbu. Varianty byly zvoleny tak, aby obsáhly co největší počet případů realizovaných staveb v našich zeměpisných šířkách a zároveň ukázaly rozdíl mezi historickou a moderní zástavbou.

Detail 1

Detail 1 představuje bytovou výstavbu z počátku 20. stol. Jde o detail napojení špaletového okna s jednoduchým zasklením a stěny z cihel plných pálených. S tímto detailem se můžeme stále setkat u mnoha historických staveb v centrech měst.

Detail 2

Detail 2 vychází z detailu 1 a představuje výměnu špaletového okna za moderní okno s nízkým součinitelem prostupu tepla oknem U_w . Tato varianta představuje výměnu oken do vnitrobloku historických budov bez zateplení původní cihelné stěny.

Detail 3

Detail 3 vychází opět z detailu 1 a představuje zateplení fasády na úroveň doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro pasivní budovy při zachování původních špaletových oken. Tato varianta představuje zateplení fasády do vnitrobloku historických budov, neboť zateplení uliční fasády tímto způsobem obvykle není možné.

Detail 4

Detail 4 představuje především napojení okna a stěny s požadovanými hodnotami součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2 [17]. Obvodová stěna je jednovrstvá z plynosilikátových bloků a okna s izolačním dvojsklem. Varianta může odpovídat výstavbě rodinných domů z konce 20. stol. nebo panelové výstavbě po rekonstrukci. Pro detail 4 je také sledována různá poloha okna v rámci ostění (zarovnání okna s vnitřním a vnějším lícem stěny a klasická střední poloha okna).

Detail 5

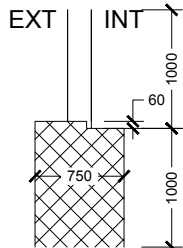
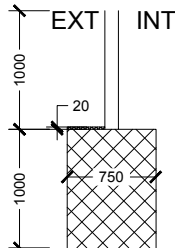
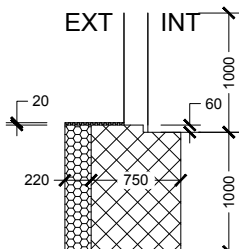
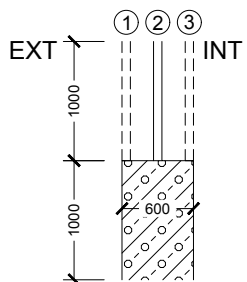
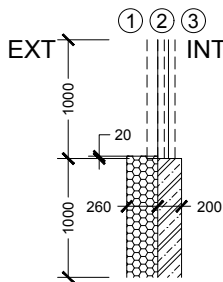
Detail 5 představuje moderní výstavbu. Jedná se o napojení kvalitního okna s izolačním trojsklem na železobetonovou stěnu s kontaktním zateplovacím systémem. Hodnoty součinitelů prostupu tepla okna a stěny odpovídají doporučeným hodnotám pro pasivní budovy. Porovnání je opět provedeno pro různé polohy okna. V první variantě se jedná o předsazenou montáž okna, ve druhé je okno zarovnáno s vnějším lícem železobetonové stěny a ve třetí je okno umístěno uprostřed ŽB stěny.

Seznam všech vybraných variant detailů je v Tabulka 17.

5.1.3. Výsledky

Výsledky výpočtů tepelné propustnosti L ($W/(m K)$) a lineárního činitele prostupu tepla ψ ($W/(m K)$) vybraných detailů jsou uvedeny v Tabulka 17. V tabulce je vždy uveden schématický detail a hodnoty součinitele prostupu tepla okna U_w ($W/(m^2K)$) a stěny U_{wall} ($W/(m^2K)$). U vybraných detailů jsou uvedeny výsledky i pro různé varianty osazení okna označené 1-3.

Tabulka 17 Seznam variant s výsledky výpočtu lineárního činitele prostupu tepla

	DET.1 Bytová výstavba (1930)				
	U_W :	2,5	W/(m ² K)		
	U_{Wall} :	0,9	W/(m ² K)		
	L :	3,527	W/(m K)		
	DET.2 Bytová výstavba (1930) – rekonstrukce oken				
	U_W :	0,6	W/(m ² K)		
	U_{Wall} :	0,9	W/(m ² K)		
	L :	1,780	W/(m K)		
	DET.3 Bytová výstavba (1930) – rekonstrukce fasády				
	U_W :	2,5	W/(m ² K)		
	U_{Wall} :	0,15	W/(m ² K)		
	L :	2,831	W/(m K)		
	DET.4 Bytová výstavba (1970) – požadované hodnoty[18]				
	U_W :	1,5	W/(m ² K)		
	U_{Wall} :	0,3	W/(m ² K)		
		1	2	3	
	L :	1,949	1,876	1,958	W/(m K)
ψ :	0,164	0,091	0,173	W/(m K)	
	DET.5 Bytová výstavba (2022) – pasivní standard				
	U_W :	0,7	W/(m ² K)		
	U_{Wall} :	0,15	W/(m ² K)		
		1	2	3	
	L :	0,866	0,941	1,001	W/(m K)
ψ :	0,022	0,098	0,166	W/(m K)	

5.2. Tepelná ztráta prostupem modelové fasády

5.2.1. Způsob výpočtu

Tepelné ztráty prostupem Q_p (W) byly vypočteny pro modelové fasády odpovídající vybraným detailům (viz Tabulka 18). Tepelnou ztrátu prostupem včetně vlivu dvourozměrných tepelných vazeb je možné vypočítat jako [18]:

$$Q_p = \left(\sum U_j \cdot A_j + \sum \psi_j \cdot l_j \right) \cdot \Delta\theta \quad (25)$$

kde U_j (W/(m²K)) je součinitel prostupu tepla j -té plošné konstrukce, A_j (m²) je její plocha, ψ_j (W/m K) je lineární činitel prostupu tepla j -té tepelné vazby, l_j (m) je délka a $\Delta\theta$ (°C) je rozdíl mezi vnitřní návrhovou teplotou a teplotou na vnější straně.


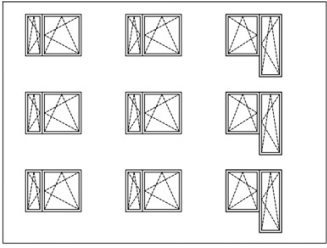
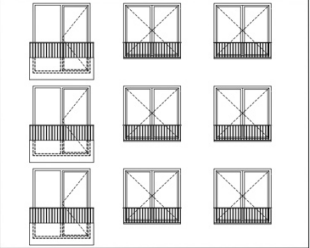
Pro nadpraží a ostění byly ve výpočtu uvažovány stejné hodnoty ψ jako byly vypočteny pro parapet (viz Tabulka 17), který z těchto hodnot bývá nejhorší.

5.2.2. Modelové fasády

Byly vybrány tři výřezy fasád bytových domů o ploše 100 m².

- Detailům 1-3 odpovídá fasáda 1 představující fasádu bytového domu z roku 1932. Tato fasáda je typická velkou zdobností a úzkými vysokými okny. Celkový podíl prosklení je ve srovnání s dnešní výstavbou menší.
- Detailu 4 odpovídá fasáda 2 typická pro panelovou i jinou výstavbu konce 20. stol.
- Detailu 5 odpovídá fasáda 3, která představuje dnešní výstavbu, která je typická větším podílem zasklení a nulovými nebo sníženými parapety.

Tabulka 18 Fasády pro výpočet tepelné ztráty prostupem

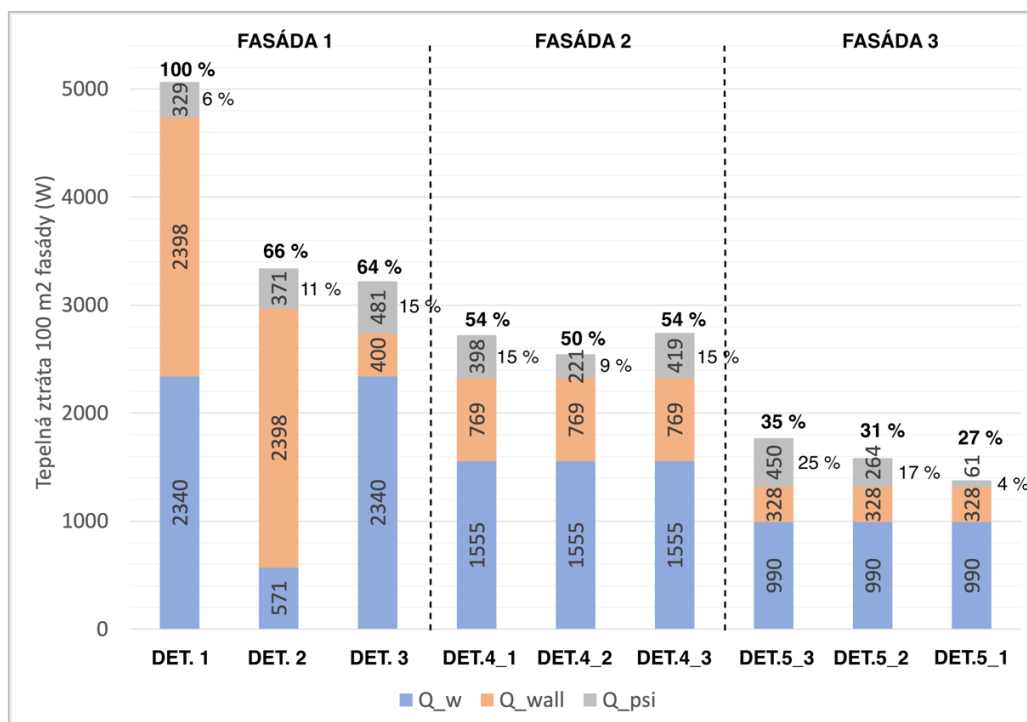
Fasáda 1 – 1932				Fasáda 2 – 1972				Fasáda 3 – 2022			
A_w (m ²)	A_{wall} (m ²)	l_w (m ²)	A_w/A_{tot} (%)	A_w (m ²)	A_{wall} (m ²)	l_w (m ²)	A_w/A_{tot} (%)	A_w (m ²)	A_{wall} (m ²)	l_w (m ²)	A_w/A_{tot} (%)
26,0	74,0	73,2	26,0	28,8	71,2	67,5	28,8	39,3	60,7	75,3	39,3
											

A_w (m²) je plocha oken, A_{wall} (m²) je plocha stěny, l_w (m) je celková délka tepelné vazby (obvod oken) a A_w/A_{tot} (%) je podíl zasklení k ploše fasády.

5.2.3. Výsledky

Z výsledků lineárních činitelů prostupu tepla vybraných detailů byla dle vztahu (25) vypočtena tepelná ztráta prostupem pro 100 m² odpovídající fasády dle

Tabulka 18. Vypočtené tepelné ztráty byly zaneseny do Graf 40. Modrou barvou je znázorněna tepelná ztráta okny Q_w (W), oranžově je znázorněna tepelná ztráta fasádou Q_{wall} (W) a šedě je Q_{psi} (W) znázorněna tepelná ztráta tepelnou vazbou napojení okna a obvodové stěny. Nad každou variantou je v grafu znázorněn poměr tepelné ztráty prostupem v procentech v porovnání s referenční variantou detailu 1. Napravo od sloupců je pak uveden procentuální podíl tepelné ztráty tepelnou vazbou napojení okna a stěny z celkové tepelné ztráty prostupem dané varianty.



Graf 40 Srovnání tepelných ztrát prostupem pro vybrané fasády a odpovídající detaily

5.3. Nejnižší povrchová teplota vybraných detailů

5.3.1. Požadavky na nejnižší vnitřní povrchovou teplotu

Nejnižší vnitřní povrchová teplota je u detailů sledována kvůli hodnocení rizika kondenzace vodní páry a vyloučení rizika růstu plísní na vnitřním povrchu konstrukce.

Požadavky jsou uvedeny v ČSN 73 0540-2, která používá pro hodnocení rizika kondenzace teplotní faktor vnitřního povrchu f_{Rsi} (-). Teplotní faktor je poměrná veličina, která nezávisí na rozdílu teplot a je spíše vlastností konstrukce [21]. Vztah pro vyjádření nejnižšího teplotního faktoru vnitřního povrchu je [17]:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_{ai} - \theta_e} \quad (26)$$

kde θ_{ai} (°C) je teplota na vnitřní straně konstrukce, θ_e (°C) je teplota na vnější straně konstrukce a θ_{si} (°C) je nejnižší vnitřní povrchová teplota.

Pro vyloučení růstu plísní se považuje hraniční relativní vlhkost vnitřního povrchu 80 %. U okenních výplní je požadováno vyloučení povrchové kondenzace odpovídající relativní vlhkosti vnitřního povrchu 100 %.

Norma ČSN 73 0540-2 stanovuje podmínku splnění teplotního faktoru ve všech místech vnitřního povrchu konstrukce takto [17]:

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr} \quad (27)$$

kde $f_{Rsi,cr}$ (-) je kritický teplotní faktor vnitřního povrchu.

Kritický teplotní faktor vnitřního povrchu konstrukce představuje hodnotu, při které bude relativní vlhkost povrchu konstrukce odpovídat požadovanému maximu a stanoví se pomocí vztahu [17]:

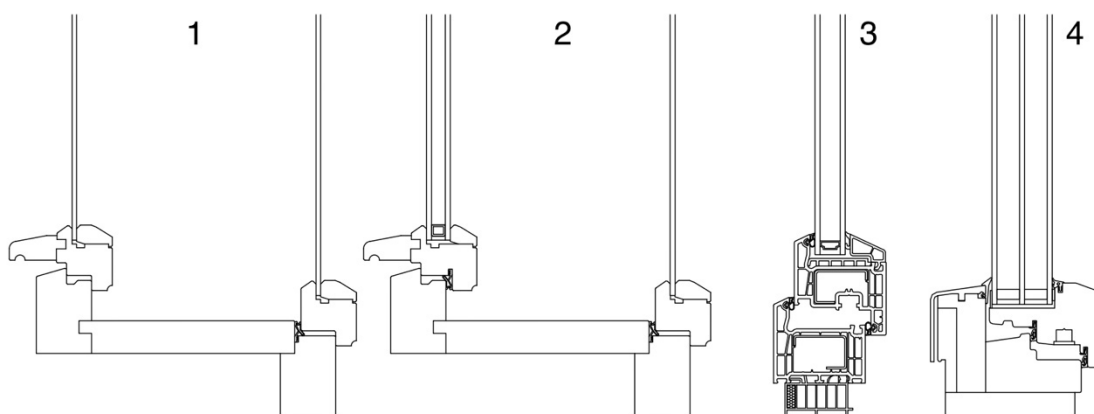
$$f_{Rsi,cr} = 1 - \frac{237,3 + 2,1 \cdot \theta_{ai}}{\theta_{ai} - \theta_{ex}} \cdot \frac{1}{1,1 - 17,269/\ln(\varphi_{i,r}/\varphi_{si,cr})} \quad (28)$$

kde θ_{ai} (°C) je návrhová teplota vnitřního vzduchu, θ_{ex} (°C) je návrhová teplota na vnější straně konstrukce, $\varphi_{i,r}$ (%) je relativní vlhkost vnitřního vzduchu a $\varphi_{si,cr}$ (%) je kritická vnitřní povrchová vlhkost.

Pro zvolené okrajové podmínky výpočtů povrchových teplot ($\theta_{ai} = 21$ °C, $\theta_{ex} = -15$ °C, $\varphi_{si,cr} = 100$ % (pro okenní otvor), $\varphi_{i,r} = 50$ %) byla odečtena z normy [18] tabelovaná hodnota kritického teplotního faktoru $f_{Rsi,cr} = 0,656$.

5.3.2. Vybraná okna a detaily

Pro výpočet povrchových teplot vybraných detailů nelze výpočetní model oken příliš geometricky zjednodušovat. Pro výpočty povrchových teplot byly vybrány čtyři varianty provedení oken.



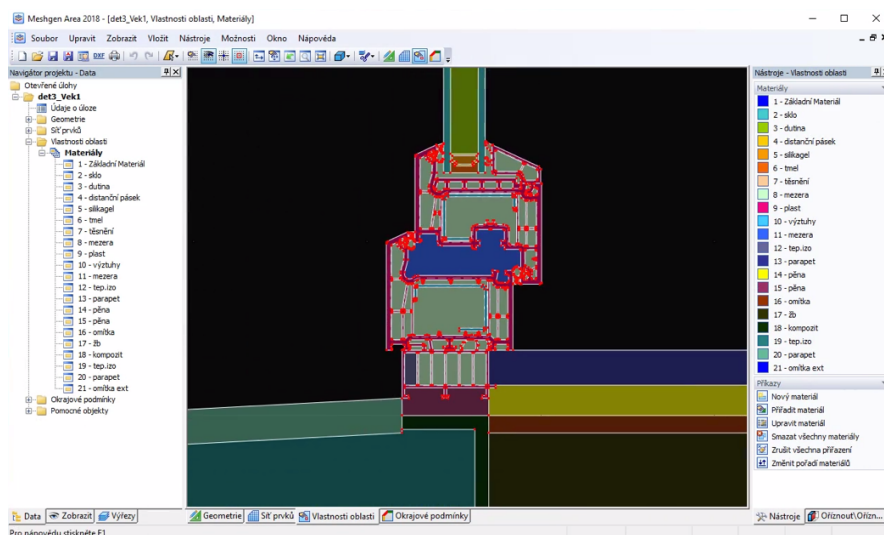
Obr. 35 Vybrané varianty provedení oken

- 1 – Původní špaletové okno
- 2 – Špaletové okno s izolačním dvojsklem $U_g = 1,1$ na vnější straně
- 3 – Plastové okno s izolačním dvojsklem VEKRA Praktik $U_w = 1,2$, $U_g = 1,1$
- 4 – Dřevěné okno pro pasivní domy Slavona Progression $U_w = 0,61$, $U_g = 0,5$

Pro výpočet povrchových teplot byl vybrán det.1 z Tabulka 17 a povrchové teploty byly vypočteny s oběma variantami špaletových oken. Dále byl vybrán det.5 u něhož byly vypočteny povrchové teploty pro všechny tři polohy osazení okna a výpočet byl proveden jak s oknem č.3, tak i s oknem č. 4.

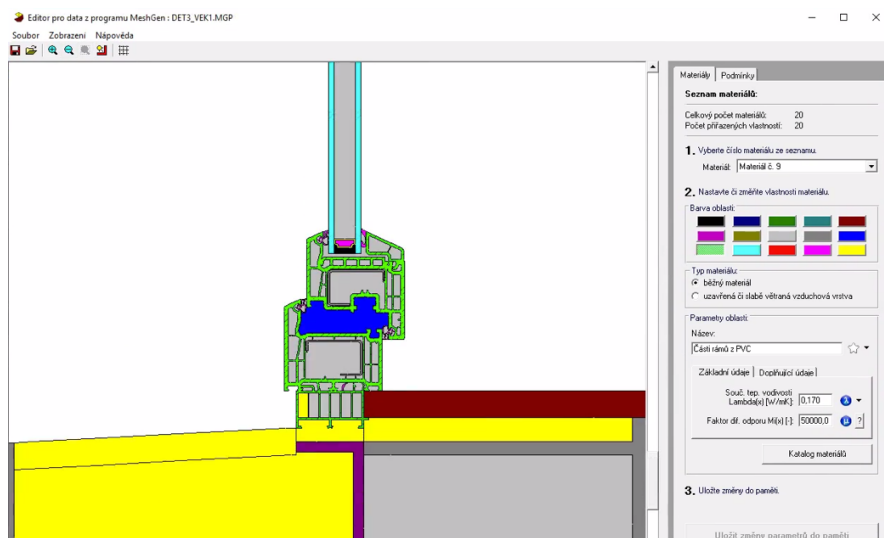
5.3.3. Výpočtový model

Výpočet povrchových teplot byl proveden pomocí softwaru [20]. Připravený CAD výkres vybraného detailu byl pomocí softwaru [19] převeden na výpočetní model (viz Obr. 36), který byl následně nahrán do výpočetního softwaru [20].



Obr. 36 Ukázka prostředí softwaru Meshgen [19]

V softwaru Area byly přiřazeny tepelně technické parametry všech modelovaných materiálů daného detailu a byly zadány okrajové podmínky výpočtu.



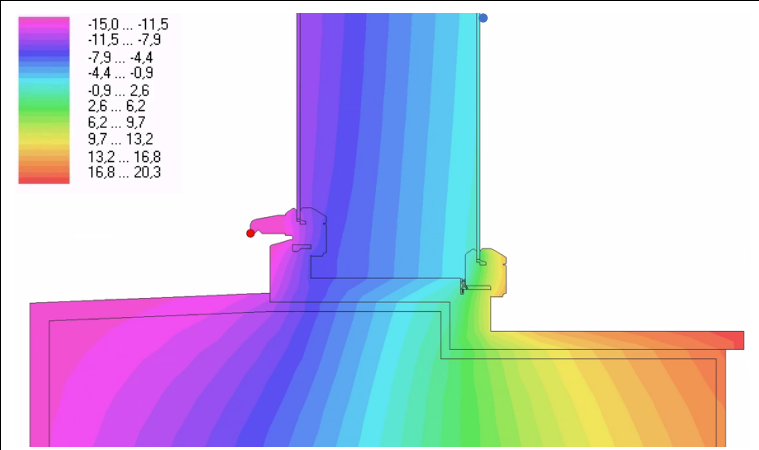
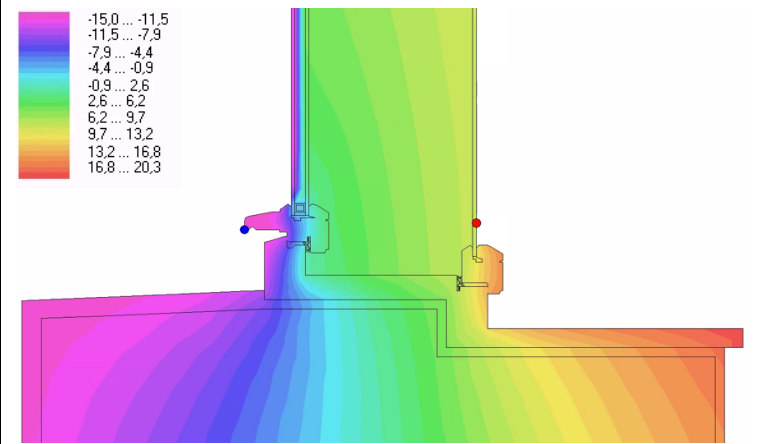
Obr. 37 Ukázka prostředí softwaru Area [20]

Všechny vstupní parametry výpočtu jako jsou tepelně technické vlastnosti použitých materiálů a okrajové podmínky výpočtů jsou uvedeny v protokolech generovaných softwarem Area v příloze C.

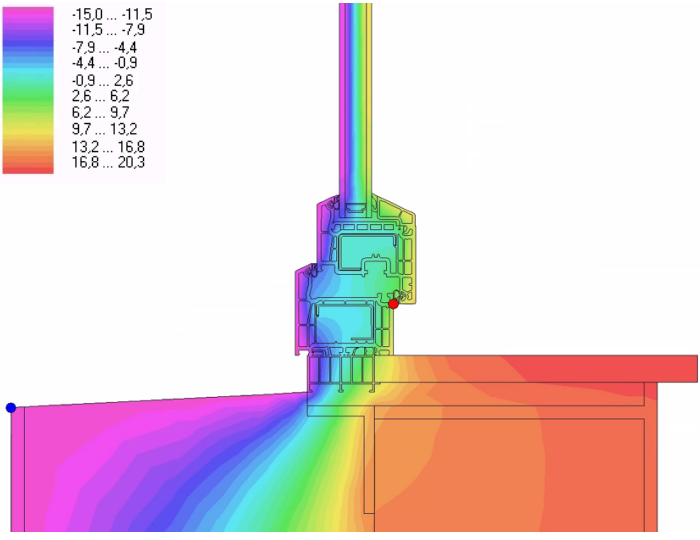
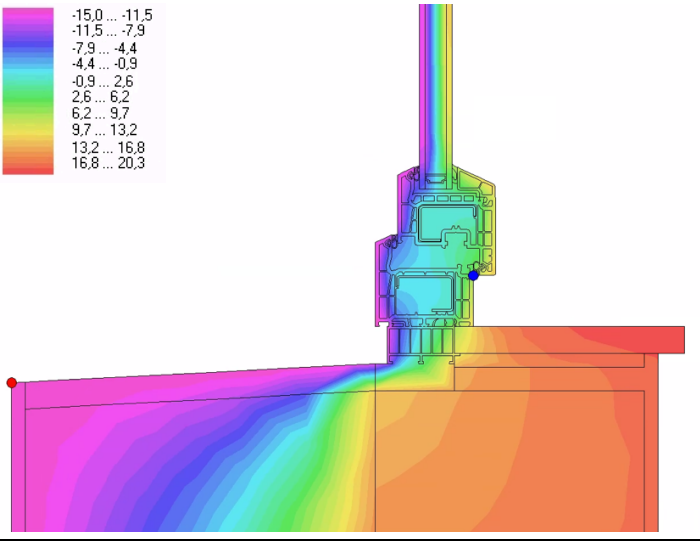
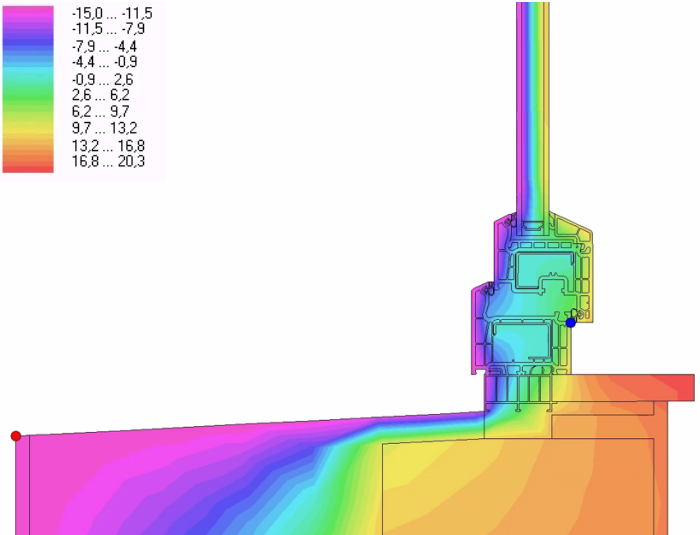
5.3.4. Porovnání povrchových teplot vybraných detailů

Výsledky výpočtů nejnižších povrchových teplot θ_{si} (°C) vybraných detailů a oken jsou uvedeny v tabulkách níže (viz Tabulka 19 až Tabulka 21) spolu se znázorněním rozložením teplot. Uvedeny jsou i nejnižší teplotní faktory f_{Rsi} a je vyhodnoceno, zda na povrchu okna dochází ke kondenzaci vodní páry či nikoli. V tabulkách jsou uvedeny také teploty rosného bodu θ_w (°C) a kritické teplotní faktory $f_{Rsi,cr}$ pro okrajové podmínky použité při výpočtu.

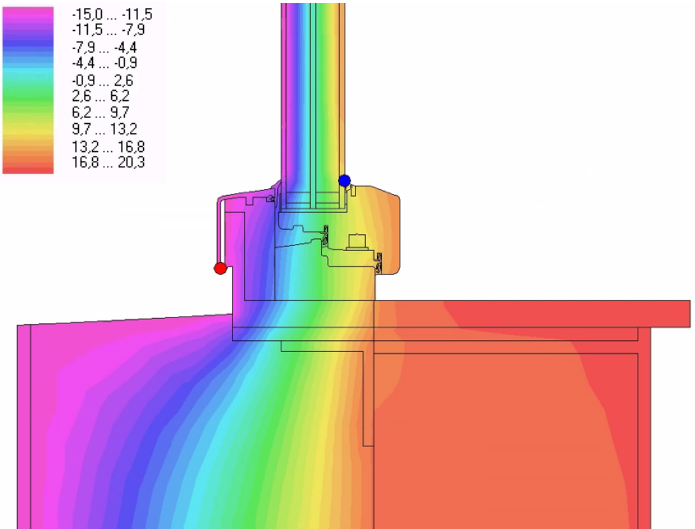
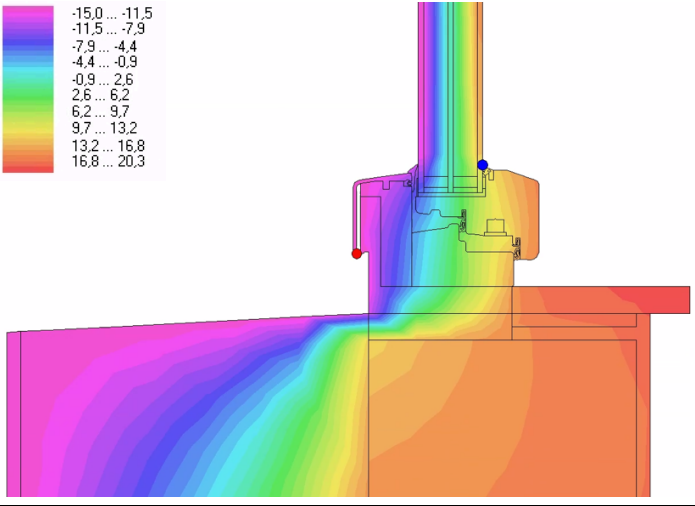
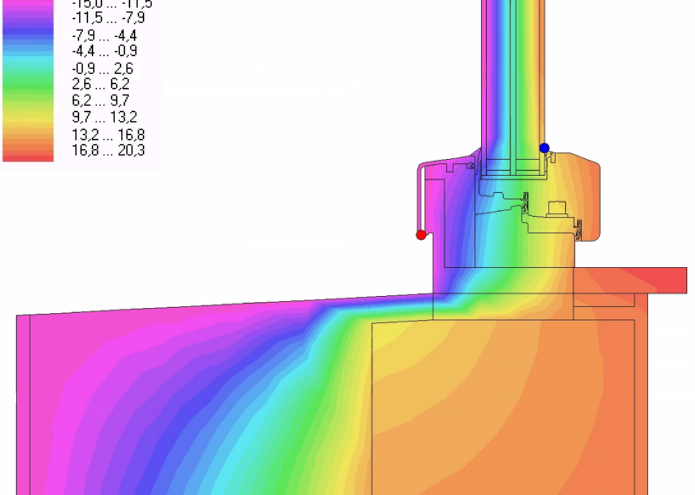
Tabulka 19 Výsledky výpočtů povrchových teplot det. 1 okno č. 1 a 2

	DET. 1 / OKNO Č. 1	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	-1,79	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,367	0,656
	kondenzace	ANO
	DET. 1 / OKNO Č. 2	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	8,48	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,652	0,656
	kondenzace	ANO

Tabulka 20 Výsledky výpočtů povrchových teplot det. 5 okno č. 3

	DET. 5_1 / OKNO Č. 3	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	6,78	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,605	0,656
kondenzace	ANO	
	DET. 5_2 / OKNO Č. 3	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	6,45	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,596	0,656
kondenzace	ANO	
	DET. 5_3 / OKNO Č. 3	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	6,83	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,606	0,656
kondenzace	ANO	

Tabulka 21 Výsledky výpočtů povrchových teplot det. 5 okno č. 4

	DET. 5_1 / OKNO Č. 4	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	12,00	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,750	0,656
kondenzace	NE	
	DET. 5_2 / OKNO Č. 4	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	11,97	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,749	0,656
kondenzace	NE	
	DET. 5_3 / OKNO Č. 4	
	θ_{si} (°C)	θ_w (°C)
	12,14	10,18
	f_{Rsi}	$f_{Rsi,cr}$
	0,754	0,656
kondenzace	NE	

5.4. Diskuse výsledků

V historické zástavbě (det.1) je pro vybraný detail hodnota lineárního činitele prostupu tepla vyšší, než je požadovaná hodnota podle ČSN 73 0540-2 (viz Tabulka 16). U historických budov však vlivem nízkých tepelných odporů stěn a oken tvoří tepelná ztráta touto tepelnou vazbou jen malý podíl z celkových tepelných ztrát (viz Graf 40). Pro posuzovaný výřez fasády 1 má výměna oken (det.2) a zateplení fasády (det.3) přibližně stejný efekt na snížení tepelné ztráty prostupem, a to o cca 35 %. Hodnoty lineárních činitelů prostupu tepla jsou mírně vyšší než v původním stavu (det.1).

V případě det.2 a 3 tvoří tepelná ztráta tepelnou vazbou větší podíl celkové tepelné ztráty proti det.1. U jednovrstvého zdiva (det.4) se potvrdila ideální poloha okna ve středu stěny, kdy je hodnota lineárního činitele prostupu tepla nejnižší a splňuje požadované hodnoty (viz Tabulka 16). U detailu 4 vykazují varianty s vnitřní a vnější polohou okna podobné hodnoty lineárního činitele prostupu tepla, velké rozdíly u těchto variant však lze očekávat v povrchových teplotách.

Nejvhodnější variantou polohy okna det.5 z pohledu lineárního činitele prostupu tepla je předsazení okna před železobetonovou stěnu do úrovně tepelné izolace. V tomto případě je lineární činitel prostupu tepla výrazně nejnižší. U fasády a detailu s nízkými hodnotami součinitele prostupu tepla okna a stěny (det.5) má nevhodné osazení okna výrazný vliv. Tepelné ztráty vlivem tepelné vazby okno a stěna mohou v takovém případě (det.5_3) tvořit až čtvrtinu celkové tepelné ztráty prostupem (viz Graf 40).

Při rozhodování o vhodnosti použití detailů s různou polohou osazení okna nemusí být vždy rozhodující nejnižší hodnota lineárního činitele prostupu tepla, směrodatná však může být povrchová teplota pro různé polohy osazení.

Z porovnání výpočtů povrchových teplot detailu 1 s původním špaletovým oknem a špaletovým oknem s izolačním dvojsklem v Tabulka 19 je patrný výrazný efekt použití izolačního dvojskla na vnější straně špaletového okna. Vlivem záměny jednoduchého zasklení za izolační dvojsklo dochází k výraznému navýšení povrchových teplot na vnitřní straně okna.

Z porovnání výsledků v Tabulka 20 a Tabulka 21 nebyl odhalen zásadní vliv polohy osazení okna na nejnižší povrchové teploty vnitřní strany okna. Při porovnání variant s použitím okna č.3 a okna č.4 jsou výsledky výrazně odlišné. Okenní profil č.4 vykazuje

nejnižší povrchové teploty vnitřní strany okna o přibližně 5 °C vyšší, než je tomu u okenního profilu č.3.

U všech čtyř okenních profilů byla poloha bodu s nejnižší povrchovou teplotou v různých místech. U špaletových oken byla nejnižší teplota vypočtena na skle, což napovídá, že nejslabším článkem z hlediska tepelného odporu těchto profilů je samotné zasklení. Okenní profil č.3 vykazoval nejnižší povrchové teploty v místě těsnění funkční spáry mezi křídlem okna a okenním rámem. Ve srovnání s profilem č.4, kde je funkční spára menší a je ve střední části přerušena těsněním, tvoří tuto funkční spáru u profilu č.3 jen jedna vzduchová mezera. U profilu č.4 je nejslabším článkem patrně distanční rámeček, neboť právě v jeho místě, v místě napojení okna a rámu, byla vypočtena nejnižší povrchová teplota.

Závěr

Experimentální měření součinitele prostupu tepla

Na vybraných 17 vzorcích zasklívacích jednotek bylo provedeno experimentální měření součinitele prostupu tepla. Součinitele prostupu tepla zasklením byly stanovovány na základě měření hustoty tepelného toku a povrchových teplot na obou stranách zasklení. Měření byla prováděna v šesti různých teplotních spádech od 5 °C do -20 °C na vnější straně zasklení. Teploty byly simulovány v malých klimatických komorách a byl sledován vývoj součinitele prostupu tepla s klesající teplotou na exteriérové straně. Bylo prokázáno, že vlivem zvyšujícím se rozdílu teplot na vnitřní a vnější straně zasklívacích jednotek dochází ke zvýšení vlivu konvekce v plynové dutině mezi skly, a to způsobuje snadnější přestup tepla. Tímto jevem dochází ke zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla s klesající teplotou na vnější straně zasklení. Jev se neprokázal jen u dvou vzorků zasklení bez nízkoemisního pokovení a se vzduchem jako plnicím plynem. U těchto vzorků byla míra konvekce vysoká již při nízkých teplotách a se snižující se teplotou na vnější straně převládl efekt nižší tepelné vodivosti plynu s klesající teplotou. Tyto vzorky pak s klesající teplotou vykazovaly nižší součinitel tepelné vodivosti.

U dvou vybraných vzorků bylo měřeno rozložení povrchových teplot po výšce vzorku pomocí IR kamery. Výsledky ukázali značný rozdíl v povrchových teplotách na vnitřní straně zasklení u spodní a horní hrany, a to o více než 5 °C při teplotním spádu 20/-20 °C. Tento jev opět dokládá cirkulaci plynu v dutině mezi skly. Dochází k ochlazení dolní hrany zasklení vlivem plynu ochlazeného vnějším sklem, tento plyn se po výšce vzorku postupně ohřívá a stoupá vzhůru k horní hraně, kde má svou maximální teplotu. Při horní hraně se plyn v dutině opět ochladí o vnější sklo a klesá opět ke spodní hraně zasklení. To lze v praxi často pozorovat díky kondenzaci vodní páry u spodní hrany zasklení. Rychlost proudění plynu v dutině pak ovlivňuje tepelnou propustnost zasklení a závisí na mnoha faktorech, mezi které patří teplotní rozdíl na vnější a vnitřní straně zasklení, ale i šířka plynové dutiny, vlastnosti plnicího plynu nebo i výška zasklívacího vzorku.

Stanovení součinitele prostupu tepla výpočetními metodami

Součinitele prostupu tepla vybraných vzorků zasklení byl stanoven i pomocí výpočetních metod. V první řadě byl výpočet proveden pomocí softwaru WINDOW 7 vyvinutém v národní laboratoři v Berkley v Kalifornii. Pomocí softwaru byla provedena také analýza

závislosti šířky plynové dutiny na součinitele prostupu tepla zasklením. Ukázalo se, že širší dutiny mezi skly vykazují při vyšších teplotách (5 °C) nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti, nicméně lze pozorovat jejich strmější nárůst s klesající teplotou (-20 °C). To má za následek to, že výhoda širší dutiny (18 mm) se při nižších teplotách postupně smazává a při teplotách -15 °C a níže vykazují nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti naopak okna s menší šířkou dutiny (12 mm). Této skutečnosti je vhodné věnovat pozornost například při výběru zasklení a uvážit místní klimatické podmínky v průběhu roku a nerozhodovat se jen na základě deklarované hodnoty součinitele prostupu tepla udávané výrobcem pro teplotní spád 20/0 °C. Například při volbě zasklení pro horské oblasti, kde jsou teploty hluboko pod bodem mrazu více časté je vhodné volit zasklení s menší šířkou plynové dutiny. Naopak v oblastech, kde se teploty jen zřídka kdy objevují pod bodem mrazu, je vhodné zvolit zasklení s větší šířkou plynové dutiny (viz Graf 7 až Graf 9).

Pro výpočet součinitele prostupu tepla zasklením byl v softwaru Matlab Simulink vyvinut i vlastní výpočetní model, jehož vývoj napomohl k hlubšímu poznání problematiky a odhalil vlivy a parametry, které přestup tepla skrze zasklení ovlivňují. Výpočet byl prováděn dynamicky na základě povrchových teplot na obou stranách zasklení měřených v klima komoře. Výsledky výpočtů pomocí vlastního výpočetního nástroje se ve většině případů příliš neliší od výsledků získaných pomocí softwaru WINDOW 7.

Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden také podle ČSN EN 673, což je metoda používaná pro stanovení hodnot součinitele prostupu tepla zasklením udávaných výrobcem. Tato metoda se ukázala jako nejvíce optimistická a výpočty na základě normového postupu výpočtu vykazovaly oproti ostatním metodám ve většině případů výrazně nižší hodnoty. Porovnání všech metod stanovení součinitele prostupu tepla zasklením pro vybrané vzorky zasklení je patrné z grafů viz Graf 14 až Graf 30.

Součástí zkoumání způsobů výpočtů součinitele prostupu tepla zasklením byla i analýza způsobů stanovení Nusseltova čísla, které slouží k výpočtu přestupu tepla vedením a prouděním v plynové dutině. Analýza prokázala značné rozdíly ve způsobech stanovení Nusseltova čísla dle různých autorů. Nejnižší hodnoty Nusseltova čísla vykazovala metoda dle ČSN EN 673. Stanovení Nusseltova čísla podle Wrighta, použito jak v softwaru WINDOW 7, tak ve vlastním výpočetním modelu, je mezi ostatními testovanými způsoby stanovení nejvíce rostoucí s klesající teplotou na povrchu vnějšího skla. Tato skutečnost může být jedním z vysvětlení zvětšující se odchylky mezi měřeními

a výpočtem sledovaným při porovnání různých metod stanovení součinitele prostupu tepla zasklením. Znamenalo by to, že výpočetní modely předpokládají větší míru proudění výplňového plynu, než je tomu ve skutečnosti. Rozdílnost způsobů však může být důsledkem i jiných vlivů, jako je například chyba při měření povrchových teplot skla.

Testování přídržnosti okenních pásek

Úkolem práce bylo i porovnání přídržnosti vybraných okenních pásek. Pro porovnání byly vybrány tři okenní pásy, z toho dvě exteriérové a jedna interiérová. K testování pásek byla vyvinuta metoda odtrhové zkoušky, která srovnává časy odtržení okenních pásek od materiálu při zátěži 1,5 kg pod úhlem 90°. Přídržnost pásek byla sledována pro pět různých materiálů obvyklých pro ostění okna, ke kterému je v praxi připevňována. Jedna z pásek (černá) předčila v přídržnosti ostatní pásy a vykazovala doby přídržnosti mnohonásobně větší než ostatní pásy. U většiny pásek se prokázala závislost přídržnosti na hrubosti materiálu. Zatímco u materiálů s hladkým povrchem, jako např. hoblované dřevo nebo purenit, byla naměřena delší doba přídržnosti, materiály hrubší, jako například cementová stěrka nebo cihla, se ukázali ve většině případů z hlediska přídržnosti jako nevýhodné.

Testované byly i další vlivy, které mohou přídržnost pásek ovlivňovat. Přídržnost pásek byly proto testovány za použití penetrace i bez ní, kde se ukázalo, že zatímco u některých pásek aplikace penetračního nástřiku napomáhá přídržnosti (červená a bílá), u jiných adhezi snižuje (černá). Dále byl testován vývoj přídržnosti v čase tak, že byly porovnávány doby odtržení po 1 hodině a po 24 hodinách od aplikace pásky. Zde se ve většině případů ukázal nárůst přídržnosti. Zajištění okenních pásek finálními vrstvami ostění jako jsou například omítky je proto vhodné provádět s určitým časovým odstupem například 24 hodin. Delší časový odstup fixace pásky v řádu měsíců může být naopak nežádoucí, to však z časových důvodů nebylo možné prověřit. Testované byly také vlivy zvýšené vlhkosti a zvýšené teploty. Vliv zvýšené vlhkosti na přídržnost pásek nebyl vzhledem k malému počtu testovaných vzorků a velkým rozdílům při jednotlivých měřeních prokázán. K prokázání tohoto vlivu by bylo zapotřebí většího počtu měření, což vzhledem k časové náročnosti zkoušky nebylo možné provést. Vliv zvýšené teploty se prokázal pouze u exteriérové pásky 2 (bílá), u níž se čas odtržení výrazně zkrátil.

Studie prostupu tepla detailem okenního ostění

Posledním cílem práce bylo provést studii prostupu tepla detailem okenního ostění. Pro porovnání bylo vybráno pět různých detailů okenního ostění, představujících jak historickou, tak i moderní výstavbu. Sledovaný byl prostup tepla tepelnou vazbou napojení okna a obvodové stěny. U vybraných detailů byla vypočtena tepelná propustnost a následně lineární činitel prostupu tepla. U detailů č.4 a 5 byla pomocí lineárního činitele prostupu tepla testována i nevhodnější poloha osazení okna v rámci okenního ostění. Výsledky ukázali vhodnost středového osazení okna u jednovrstvých obvodových stěn a nejnižší hodnoty lineárního činitele prostupu tepla byly prokázány u varianty předsazené montáže okna se zateplenou obvodovou stěnou.

Také byl proveden výpočet tepelných ztrát prostupem 100 m² fasády, která svým rozložením a velikostí oken odpovídá daným detailům. Ukázalo se, že u historických objektů tvoří tepelná ztráta vlivem tepelné vazby napojení okna a stěny jen malé procento z celkových tepelných ztrát prostupem (cca 6 %). Naopak v případě aktuální výstavby může vlivem nevhodného osazení okna tvořit tepelná ztráta vlivem této tepelné vazby i 25 % celkových tepelných ztrát prostupem (viz Graf 40).

U vybraných detailů a oken byla posouzena také nejnižší vnitřní povrchová teplota a nejnižší vnitřní teplotní faktor. Byly porovnány různé okenní profily a polohy osazení okna. Poloha okna neměla velký vliv na nejnižší vnitřní povrchové teploty okna, nicméně byl odhalen velký rozdíl povrchových teplot v závislosti na použitém okenním profilu a zasklení. Z výsledků je patrné, že záměna vnějšího skla u špaletového okna za tepelně izolační dvojsklo výrazně zvyšuje povrchové teploty vnitřní strany okna. Výpočty nejnižších vnitřních povrchových teplot a jejich polohy také odhalily rozdíly ve sledovaných okenních profilech a jejich nejslabší části.

Možnosti pro dalšího zkoumání

Práce neporovnává energetický dopad rozdílností v hodnotách součinitele prostupu tepla zasklením u různých typů budov. U bytových domů s velkým procentem prosklení a u administrativních budov, kde zasklení tvoří většinu plochy fasády, mohou i malé rozdíly součinitele prostupu tepla zasklením vytvářet velké rozdíly v energetické náročnosti budovy. U tohoto hodnocení je třeba zohlednit i další stavebně fyzikální vlastnosti zasklení, jako je například světelná propustnost nebo propustnost pro sluneční záření, které tato práce nepostihuje.

Pro další testování přídržnosti pásek by bylo vhodné zjistit vliv síly přitlačení okenních pásek při jejich aplikaci. Různá síla přitlačení pásek je i pravděpodobná příčina tak velkých nejistot měření. Pro další testování popsanou metodou bych doporučil vyvinout mechanismus, který by zajišťoval naprosto stejnou míru přitlačení ve všech testovaných případech. Z časových důvodů nebylo možné toto otestovat v rámci této práce.

Další možností pro rozvoj práce by byla podrobnější studie osazení okna v rámci okenního ostění. Měla by být zvažena zvýšená ekonomická náročnost i pracnost provedení předsazené montáže a určena návratnost tohoto provedení osazení okna.

Použitá literatura

- [1] Rada EU. Balíček „Fit for 55“: Rada se dohodla na přísnějších pravidlech pro energetickou náročnost budov [online]. 2022-10-25, [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/press/press-releases/2022/10/25/fit-for-55-council-agrees-on-stricter-rules-for-energy-performance-of-buildings/>
- [2] STAŇKOVÁ, Lucie. Povinné bezemisní domy od roku 2030. Evropský návrh by v českém stavebnictví spolykal miliardy. *E15.cz* [online]. 2022-11-01, [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/reality-a-stavebnictvi/povinne-bezemisni-domy-od-roku-2030-evropsky-navrh-by-v-ceskem-stavebnictvi-spolykal-miliardy-1394302>
- [3] ČSN EN 675. *Sklo ve stavebnictví – Stanovení součinitele prostupu tepla (hodnota U) – Metoda měřidla tepelného toku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak: 70 1026
- [4] ČSN EN 673. *Sklo ve stavebnictví – Stanovení součinitele prostupu tepla (hodnota U) – Výpočtová metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak: 70 1024
- [5] TAYLOR, John R. *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. 2nd ed. Sausalito, Calif.: University Science Books, c1997. ISBN isbn0-935702-75-x.
- [6] PEŠTA, Jan, David TESAŘ a Viktor ZWIENER. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. [Praha]: DEKTRADE, 2011. ISBN 978-80-87215-09-8.
- [7] BERKLEY LAB WINDOW v7.7.16.0. *Berkley lab* [software]. 2022-06-23, [přístup 2022-06-20]. Dostupné z: <https://windows.lbl.gov/software/window>
- [8] BERKLEY LAB WINDOW TEAM, *WINDOW Technical Documentaion* [online]. 2018. Dostupné z: <https://windows.lbl.gov/tools/window/documentation>
- [9] ISO 15099. *Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations*. Technical Committee ISO/TC 163, 2003.

- [10] MATLAB R2022a, *The MathWorks, Inc.* [software] 2022, [přístup 2022-08-13]. Dostupné z: https://uk.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab
- [11] Simulink, *The MathWorks, Inc.* [software] 2022, [přístup 2022-08-13]. Dostupné z: https://uk.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_products_simulink
- [12] MUNEER, T. *Windows in buildings: thermal, acoustic, visual, and solar performance*. Oxford: Architectural Press, 2000. ISBN 0-7506-4209-2.
- [13] DUFFIE, John A. a William A. BACKMAN, *Solar Engineering of Thermal Processes*. University of Wisconsin – Madison, 2013, [cit. 2022-12-18]. ISBN 978-0-470-87366-3
- [14] ČSN 74 6077. *Okna a vnější dveře – Požadavky na zabudování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak: 74 6077
- [15] ŠUBRT, Roman a Zdeněk PETRÝL. *Provedení připojovací spáry*. tzb-info.cz [online]. [cit. 2022-12-05] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/okna-dvere/293-provedeni-pripojovaci-spary>
- [16] ČSN EN ISO 29862, *Samolepicí pásy – Stanovení pevnostních vlastností při odlupování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. Třídící znak: 77 0883
- [17] ČSN 73 0540-2, *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak: 73 0540
- [18] KAŇKA, Jan a Zbyněk SVOBODA. *Stavební fyzika 31*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, [cit. 2022-12-28]. ISBN 80-01-02861-5.
- [19] Meshgen Area, *K-CAD, spol. s r.o.* [software]
- [20] Area 2017, *K-CAD, spol. s r.o.* [software]
- [21] SVOBODA, Zbyněk. *Nejnižší vnitřní povrchová teplota a teplotní faktor*. [online] Praha: ČVUT FSv, 2014, [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://kps.fsv.cvut.cz>

Přílohy

Příloha A – Stanovení nejistoty měření

Příloha B – Seznam technických listů zasklení

Příloha C – Protokoly výpočtů povrchové teploty detailů