



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí pozemních staveb

Analýza vlivu kotev s přerušným tepelným mostem  
na šíření tepla konstrukcí

Analysis of the influence of fixing elements with a  
thermal break on heat transfer through constructions

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Martin Let

Magisterský studijní program: (N3649) Budovy a prostředí

Studijní obor: (3608T006) Budovy a prostředí

Školitel: Zbyněk Svoboda

Praha, 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Let** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **495153**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra konstrukcí pozemních staveb**  
Studijní program: **Budovy a prostředí**  
Studijní obor: **Budovy a prostředí**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Analýza vlivu kotev s přerušným tepelným mostem na šíření tepla konstrukcí**

Název diplomové práce anglicky:

**Analysis of the influence of fixing elements with a thermal break on heat transfer through constructions**

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Zbyněk Svoboda, katedra konstrukcí pozemních staveb FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Dr. Ing. Zbyněk Svoboda  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Zbyňka Svobody a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Praze dne: .....

.....

Martin Let

## Poděkování

Děkuji společnosti Hilti ČR spol. s r.o. a zejména Janu Jaňourovi za poskytnutí podkladů pro vypracování této diplomové práce.

Děkuji mé rodině za možnosti dojít do tohoto bodu. Děkuji panu Svobodovi za konstruktivní debaty nad vývojem práce a za vedení.

*Název práce:* Analýza vlivu kotev s přerušným tepelným mostem na šíření tepla konstrukcí

*Autor:* Martin Let

*Obor:* Budovy a prostředí

*Druh práce:* Diplomová práce

*Vedoucí práce:* Zbyněk Svoboda

*Konzultant:* —

*Abstrakt:* Diplomová práce se zabývá odvozením přibližného výpočetního vztahu pro zahrnutí vlivu systému zavěšených fasád na součinitel prostupu tepla konstrukce pomocí modelování 3D výpočtů 3D konstrukcí a analýzy získaných dat bodového a lineárního činitele prostupu tepla.

*Klíčová slova:* Bodový činitel prostupu tepla, zavěšené fasády, provětrávané fasády, odvození výpočetního vztahu, přerušlení tepelného mostu

*Title:* Analysis of the influence of fixing elements with a thermal break on heat transfer through constructions

*Author:* Martin Let

*Abstract:* Thesis focuses on deriving approximate formula to include effect of ventilated facades on heat transmittance of construction by means of modeling 3D calculations of 3D constructions and analysing data of point and linear thermal transmittance.

*Key words:* Point thermal transmittance, ventilated facades, rainscreen system, derivation of approximate formula, thermal bridge elimination

# Obsah

Obsah .....	1
Úvod.....	4
Kapitola 1 Úvod do problematiky .....	6
1.1 Možnosti přerušení tepelného mostu.....	6
1.2 Vliv na energetickou náročnost budovy .....	9
Kapitola 2 Comsol Multiphysics® .....	12
2.1 Představení programu .....	12
2.2 Modelování v Comsolu.....	13
2.3 Modelování a import STL.....	14
2.4 Zjednodušení geometrie .....	15
2.5 Závěr vytváření geometrie – sjednocení.....	17
2.6 Přřazení materiálů a teplosměrné plochy .....	18
2.7 Tvorba výpočetní sítě .....	19
2.7.1 Možnosti a omezení.....	19
2.7.2 Dělení na menší úseky .....	20
2.7.3 Virtuální operace .....	21
2.7.4 Generování sítě po jednotlivých doménách a jejich pořadí..	22
2.7.5 Chybová hlášení .....	23
2.8 Výsledky: odečet hodnoty pro výpočet $\chi$ .....	24
Kapitola 3 Citlivostní analýza.....	26
3.1 Okrajové podmínky.....	26
3.2 Materiálové charakteristiky .....	26
3.3 Podrobnost výpočetní sítě .....	29
3.4 Vliv jednotlivých komponent na tepelnou propustnost stěny.....	31
3.4.1 Kotvení .....	33
3.4.2 Profil .....	34
3.4.3 Obklad.....	36

3.4.4	Podložka .....	38
3.4.5	Vliv podkladu .....	40
3.4.6	Vliv materiálu .....	41
3.4.7	Vliv pozice polyamidu .....	42
3.5	Odchylka iterační metody .....	43
3.6	Přímá metoda výpočtu .....	44
Kapitola 4	Výsledky .....	47
4.1	Zadávání .....	47
4.2	Referenční varianty .....	48
4.3	První fáze 3D výpočtů – částečná data .....	49
4.4	Doplnění dat kotev .....	51
4.5	Vliv podložky .....	53
4.6	Vliv profilu .....	55
Kapitola 5	Odvození zjednodušeného výpočetního vztahu .....	58
5.1	Výpočetní vztahy pro zpracování dat z 3D výpočtu .....	58
5.2	Požadovaná přesnost získaných dat .....	60
5.3	Koncept zjednodušeného vztahu pro kotvu .....	60
5.4	Regresní proces pro interval tloušťek zateplení 150 až 220 mm .....	63
5.5	Výsledky pro ostatní intervaly .....	67
5.6	Zahrnutí vlivu podložky .....	72
5.7	Zahrnutí vlivu profilu .....	73
5.8	Ověření výpočetních vztahů .....	77
5.9	Kompletní výpočetní vztahy .....	79
5.9.1	Interval tloušťky zateplení 100; 140 mm .....	81
5.9.2	Interval tloušťky zateplení 140; 220 mm .....	81
5.9.3	Interval tloušťky zateplení 220; 260 mm .....	82
5.9.4	Interval tloušťky zateplení 260; 300 mm .....	82
Závěr	.....	83
Citovaná literatura	.....	85
Seznam zkratk	.....	90
Příloha A	Referenční varianty 3D výpočtů – data	

- Příloha B Varianty 3D výpočtů – data
- Příloha C Varianty 3D výpočtů – řazený výběr dat
- Příloha D Výsledky a analýza vlivu podložky
- Příloha E Graf výsledků vlivu profilu
- Příloha F Protokol 3D výpočtu 3D konstrukce



# Úvod

Tato práce se zabývá odvozením zjednodušeného výpočetního vztahu pro stanovení vlivu kotev systému zavěšených fasád na součinitel prostupu tepla konstrukcí. Se zvyšujícím se důrazem na snižování energetické náročnosti budovy je kvalita obálky budovy z hlediska tepelně technických vlastností důležitým tématem při navrhování nových budov a změn stávajících budov. Jedním z možností zateplení fasády budovy je systém zavěšené fasády, kde jsou kotvy systematickým tepelným mostem ovlivňujícím průměrný součinitel prostupu tepla obálkou budovy. Jednou ze společností dodávající inovativní řešení v této oblasti je Hilti ČR spol. s r.o., jejíž kotvy FOX byly zvoleny jako předmět této práce.

Pomocí 3D výpočtů 3D konstrukcí výseku jednoho metru čtverečního, do kterého jsou umísťovány komponenty systému, jsou zde získávána data pro následnou analýzu a odvození zjednodušené výpočetní metodiky, která by umožňovala stanovení vlivu systému zavěšených fasád s kotvami FOX na součinitel prostupu tepla bez nutnosti provádění 3D výpočtů 3D konstrukcí. Provádění 3D výpočtů není z ekonomického ani časového hlediska v každodenní praxi u běžných objektů možné, a tak by mohl odvozený výpočetní vztah umožnit stanovení vlivu zjednodušeně, ale stále s dostatečnou přesností buď ručním výpočtem nebo pravděpodobněji pomocí výpočetního softwaru.

Protože jednotliví výrobci systémů zavěšených fasád mívají tuto problematiku v základních bodech pokrytou tak, aby vyhověli požadavkům norem regulujících tržní prostředí, klade si práce za cíl použitelnost výpočetního vztahu především z hlediska softwarů pro energetické hodnocení. Práce by tak měla být přínosem energetickým specialistům, kteří se zabývají energetickým hodnocením budov, i když je také možné, že největší využití práce bude nakonec v akademické sféře, jakožto podkladu pro další obdobné práce.

Kapitoly jsou řazeny podle toho, jak následovaly jednotlivé fáze práce za sebou. Začíná se obecným úvodem do tématu a končí konkrétními výpočetními vztahy. Vždy jsou probrány všechny aspekty problematiky z hlediska jedné fáze práce a následně se autor přesouvá k další fázi. Některé kapitoly se odkazují na jiné, protože jde o související obsah, ale z hlediska přehlednosti nelze vše uvést na jednom místě. Tato práce není manuálem ke zde použitému softwaru, ale snaží se o přiblížení povahy

práce a rozebírá klíčová témata, která jsou stěžejní pro úspěšné zopakování výsledků, ke kterým dospěl autor této práce.

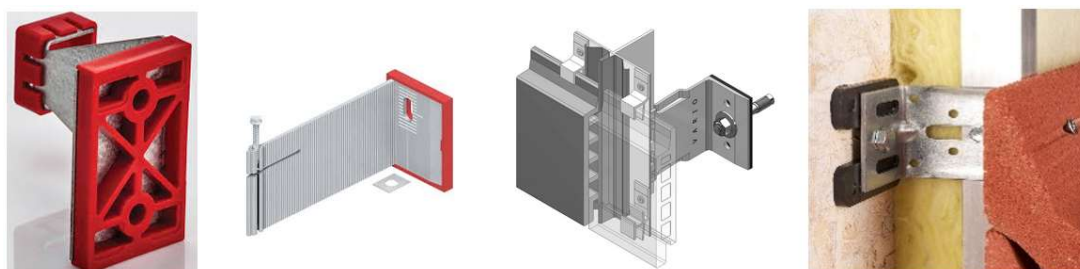
# Kapitola 1

## Úvod do problematiky

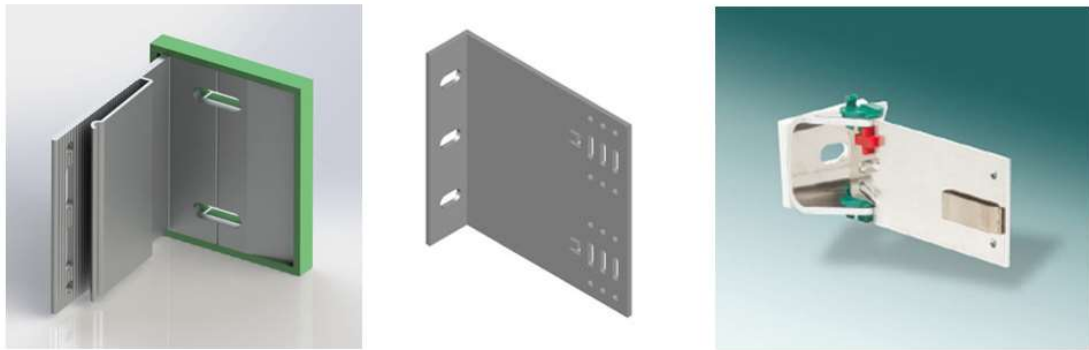
Tato kapitola je odrazovým můstkem pro čtenáře. Předpokládá se základní přehled v oblastech energetického hodnocení budov a stavebního inženýrství. Pro kontext je vhodné prostudovat uvedené zdroje, které se věnují konkrétním aspektům tématu více do hloubky (1) (2) (3). V případě dostatečné znalosti problematiky doporučuji na tomto místě pokračovat rovnou kapitolou 2 – Comsol Multiphysics®.

### 1.1 Možnosti přerušení tepelného mostu

Nejrozšířenějším způsobem je podložit konzolu v místě styku podložkou z materiálu s poměrně nízkým součinitelem prostupu tepla, a tak snížit tepelný tok skrz souvrství v místě přerušení tepelného izolantu bodovým tepelným mostem. Tento způsob můžeme vidět v různých tvarových a materiálových provedeních. (1 str. 32) Tloušťka podložky se pohybuje od 5 mm do 20 mm, může být plná nebo může být ponecháno jen staticky vyhovující množství žeber. Podložky bývají systémovou součástí provětrávané fasády konkrétního dodavatele. Součinitel prostupu tepla se pohybuje kolem hodnoty 0,1 (W/m·K), podle typu materiálu podložky. Pro srovnání, slitiny hliníku mají hodnoty součinitele prostupu tepla od 150 do 250 W/(m·K) a nerezové kotvy od 10 do 15 W/(m·K) obojí podle konkrétního typu slitiny a uvažované teploty. Podložky mívají předpřipravené otvory pro kotvení tak, aby pasovali na daný typ kotvy fasádního systému.



Obrázek 1 – Různá provedení kotev (4) (5) (6) (7)



Obrázek 2 – Různá provedení kotev (8) (9) (10)

Firma Swiss Facades zaujala k problému trochu jiný postoj. Přerušení tepelného mostu vkládá do konstrukce kotvy s tím, že kotva se skládá na stavbě. Na podklad se montuje první část a do ní se zasazuje samotná konzola přes klipy, které redukují tepelný most. Skladbu je možné vidět na obrázku níže.



Obrázek 3– Kotva firmy Swiss Facades (10)

Třetím způsobem je použití kotvy z nerezové oceli. Nejedná se o přerušení tepelného mostu ale spíše o jeho snížení použitím materiálu s menším součinitelem tepelné vodivosti. Ten se, jak už bylo uvedeno, u nerezové oceli pohybuje kolem hodnot 10 až 15 W/(m·K).

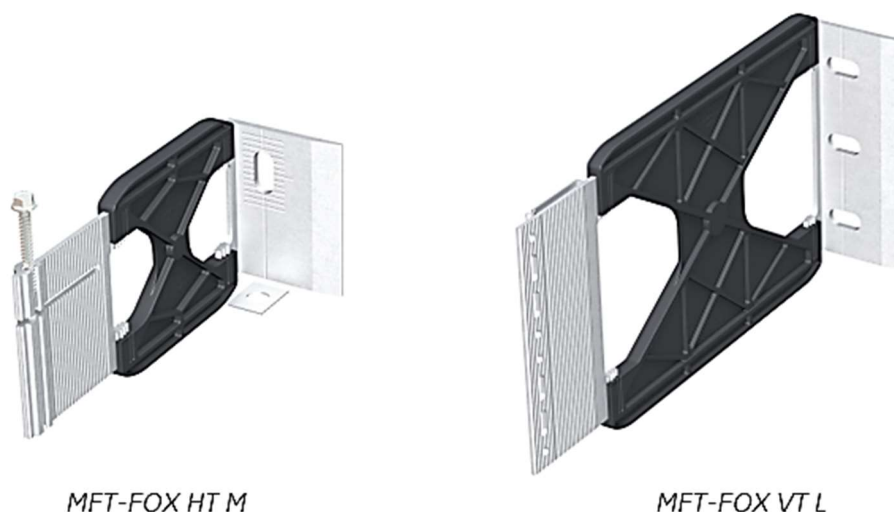


MFT-FOX VTR M SP

MFT-FOX VTR L

Obrázek 4 – Nerezové kotvy Hilti (11)

Čtvrtým způsobem je použití kotvy z jiného materiálu, než je kov. S tímto přístupem se můžeme setkat u firmy Hilti ČR spol. s r.o., která má ve své nabídce kotvu MFT-FOX, jejíž tělo je tvořeno plastem polyamidem.



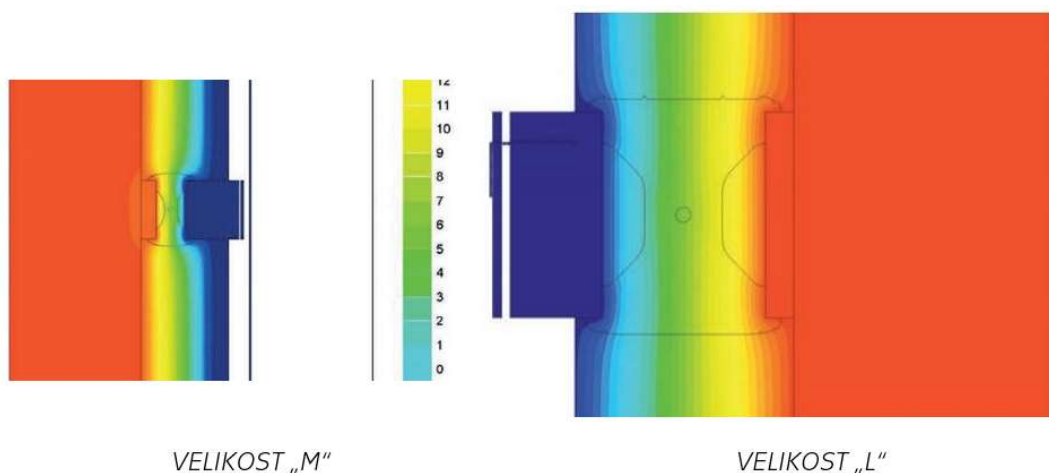
Obrázek 5 – Kotvy společnosti Hilti s polyamidovým středem (12)

N obrázku výše vidíme dvě varianty reprezentující jednak kotvu větší velikosti označovanou jako „L“ která je zde zároveň uzpůsobena pro vertikální rošt, a pro menší velikostní variantu označovanou jako „M“, která je uzpůsobena pro horizontální rošt. Jednotlivé tloušťky zateplení vyžadují různé délky kotev, proto jsou kotvy ve vícero velikostech od 140 mm do 320 mm. Podle instrukcí výrobce (13) musí být polyamidová část kotvy, která přerušuje tepelný most, překryta alespoň 10 mm tepelné izolace. Minimální tloušťka tepelné izolace například pro kotvu délky 140 mm je tak 80 mm a maximální tloušťka izolace je 120 mm.

Tento způsob přerušení tepelného mostu je podobný jako v případě nosných tepelně-izolačních prvků Schöck Isokorb® nebo šroubů s vloženým samořezným kuželem z vysokopevnostního plastu.

Jak tepelně-izolační podložka, tak plastová kotva tepelný most přerušují, ale plastová kotva je mnohem účinnější. Podle technického manuálu společnosti Hilti (12 str. 14) se bodový činitel prostupu tepla pohybuje kolem hodnoty 0,002 (W/K) na jednu kotvu při tloušťkách tepelné izolace nad 180 mm. V úvodní části věnující se tepelné technice ve stejném manuálu je ukázán také pozitivní vliv posunutí přerušení tepelného mostu směrem k vnějšímu okraji izolace na 2D teplotním poli v řezu kotvou. Dle průběhu izoterm je rozložení teplot v řezu kotvou velikosti „L“ velmi podobné jako v běžné ploše zateplené zdi neovlivněné kotvou. (obrázek 3) V případě velikosti „M“, která se používá pro menší tloušťky zateplení už je vychýlení izoterm znatelné. (obrázek 4) V obou případech se ale oblast

kondenzace posouvá blíže směrem do vnějšího prostředí než v případě použití podložek na styku s podkladem.



Obrázek 6 – Izotermy kotev MFT-FOX (12 stránky 122, 123)  
(poznámka: obrázky nejsou v měřítku)

## 1.2 Vliv na energetickou náročnost budovy

Bez přerušení tepelného mostu je vliv kotev na výsledný součinitel prostupu tepla konstrukcí značný. Níže uvádím výsledky analýzy pana Zbyňka Svobody z roku 2008 (14), kde prezentuje vliv kotev na snížení ekvivalentní tepelné vodivosti tepelné izolace.

Tep. odpor stěny	Tep. odpor podložky	Kotva	Bod. činitel	Počet kotev v 1 m <sup>2</sup>	Ekv. tep. vodivost	Zvýšení tep. vodivosti
R <sub>w</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	R <sub>p</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]		χ [W/K]		λ <sub>eqv</sub> [W/(m.K)]	
0,10	0,00	hliník	0,12	2	0,085	+ 113%
				3	0,112	+ 179 %
		ocel	0,05	2	0,058	+ 44 %
				3	0,067	+ 68 %
	0,17	hliník	0,06	2	0,061	+ 54 %
				3	0,073	+ 83 %
		ocel	0,03	2	0,050	+ 26 %
				3	0,056	+ 40 %

Obrázek 7 – Vliv kotev na tepelnou vodivost tepelné izolace tl. 140 mm (14)

Po dopočtení výsledného součinitele prostupu tepla prezentovaných konstrukcí není ani jedna z nich použitelná z hlediska plnění požadované hodnoty UN,20 součinitele prostupu tepla stěnou dle ČSN 73 0540-2. (15)

Tepelný odpor tepelné izolace:

$$R_{TI} = d_{TI} / \lambda_{ekv} \quad [(m^2 \cdot K) / W] \quad (1)$$

Kde je

$d_{TI}$  tloušťka tepelné izolace (140 mm) v mm;

$\lambda_{ekv}$  ekvivalentní tepelná vodivost tepelné izolace uvedená v tabulce výše ve  $W / (m \cdot K)$ .

Výsledný tepelný odpor celé konstrukce:

$$R = R_{TI} + R_{si} + R_{se} + R_w \quad [(m^2 \cdot K) / W] \quad (2)$$

Kde je

$R_{si}$  tepelný odpor na přestupu tepla v interiéru v  $m^2 \cdot K / W$ ;

$R_{se}$  tepelný odpor na přestupu tepla v exteriéru v  $m^2 \cdot K / W$ ;

$R_w$  tepelný odpor stěny (podkladní konstrukce) v  $m^2 \cdot K / W$ .

Součinitel prostupu tepla konstrukcí:

$$U = 1 / R \quad [W / (m^2 \cdot K)] \quad (3)$$

Výsledky

$\lambda$ (ekv) [W/m <sup>2</sup> K]	R(TI) [m <sup>2</sup> K/W]	R [m <sup>2</sup> K/W]	U [W/m <sup>2</sup> K]	U(N,20) [W/m <sup>2</sup> K]
0,085	1,65	1,92	0,52	0,3
0,112	1,25	1,52	0,66	
0,058	2,41	2,68	0,37	
0,067	2,09	2,36	0,42	
0,061	2,30	2,57	0,39	
0,073	1,92	2,19	0,46	
0,05	2,80	3,07	0,33	
0,056	2,50	2,77	0,36	

Obrázek 8– Výsledky zpětného výpočtu součinitele prostupu tepla

Tato studie prezentuje hodnoty pro zateplení tloušťkou 140 mm, takže je řešením zvýšení tloušťky tepelné izolace nebo zvýšení tepelného odporu podkladní konstrukce.

Pokud bychom vycházeli ze současných propagačních materiálů společnosti Hilti pro provětrávané fasády pak dojdeme ke stejnému závěru. Pro hliníkové kotvy s podložkou je hodnota  $U = 0,357 W / m^2 \cdot K$ , pro nerezové kotvy  $U = 0,197 W / m^2 \cdot K$  a pro kotvy s polyamidovým středem je  $U = 0,165 W / m^2 \cdot K$ . Hodnoty jsou uváděny pro reálný příklad betonové stěny tloušťky 150 mm zateplenou tepelnou izolací 200 mm ( $0,034 W / m \cdot K$ ). Původní součinitel prostupu tepla stěny bez vlivu konzol je  $U = 0,1609 W / m^2 \cdot K$ . Můžeme vidět, že výsledky odpovídají povahou výše citované analýze. Standardní řešení pomocí hliníkových kotev s podložkou je nedostačující, protože nelze navrhnout konstrukci nevyhovující

požadavkům ČSN 73 0540-2 a to zvyšuje náklady na stavbu například v podobě navýšení tloušťky tepelného izolantu.

Vliv prvků prostupujících tepelnou izolací nelze při hodnocení energetické náročnosti budovy zanedbávat. Ať už zjišťujeme tepelné ztráty objektu pro návrh zdroje tepla otopné soustavy nebo provádíme energetický audit, který má za úkol zjistit možná opatření pro snížení energetické náročnosti budovy, zanedbání vlivu kotev by bylo značně zkreslující, odtržené od reality, a ještě více zvyšující možnou odchylku mezi energetickým hodnocením na základě typických profilů užívání a výsledků spotřeb energií během reálného provozu.

Opakované modelování různých typů kotev a řešení není finančně možné, ale i přesto by bylo výhodné mít možnost jako energetický specialista optimalizovat obálku budovy bez nutnosti stanovení konkrétního systému zavěšené fasády. Jednotlivé společnosti mají v menší nebo větší míře vliv na tepelné vlastnosti dotčené konstrukce stanovený. Společnost Hilti je příkladem těch připravenějších a ve svém obsáhlém technickém manuálu uvádí hodnoty bodových činitelů prostupu tepla a výsledné součinitele prostupu tepla pro standardní rozsah tloušťky tepelného izolantu. Bez volby konkrétního řešení, ale nelze jednoduše informace použít, protože výsledné tepelné vlastnosti konstrukce jsou závislé v neposlední řadě například na počtu kotev na m<sup>2</sup>. Uvedené informace výrobců nelze jednoduše převzít i proto, že se může lišit podkladní konstrukce nebo součinitel prostupu tepla tepelného izolantu.

Řešením situace by mohl být zjednodušený výpočetní vztah na straně bezpečnosti, který energetickému specialistovi umožní vliv systému zavěšených fasád stanovit. Výpočetnímu vztahu pro standardní kotvy s nebo bez přerušného tepelného mostu se věnoval již pan Svoboda ve zmiňovaném článku (14). Kotvy od firmy Hilti s polyamidovým středem jsou jedinečné řešení a při své rešerši jsem se neseťkal s dalším podobným řešením. Proto se tento typ kotev stal konečnou volbou pro zpracování. Jak už bylo nastíněno tento typ kotvy má potenciál téměř eliminovat tepelné mosty způsobené systémem zavěšených fasád, ale stále zde jsou ještě další komponenty, které by mohli vliv tepelných vazeb umocňovat. Vliv jednotlivých komponent i samotné kotvy jsem se rozhodl znovu modelovat a pomocí 3D výpočtu 3D teplotního pole ověřit hodnoty tepelných vazeb a pokusit se na základě získaných výsledků stanovit přibližný výpočetní vztah. Pro modelování 3D teplotních polí byl zvolen program Comsol Multiphysics®. Motivace pro výběr a práce v tomto programu je popsána v následující kapitole.



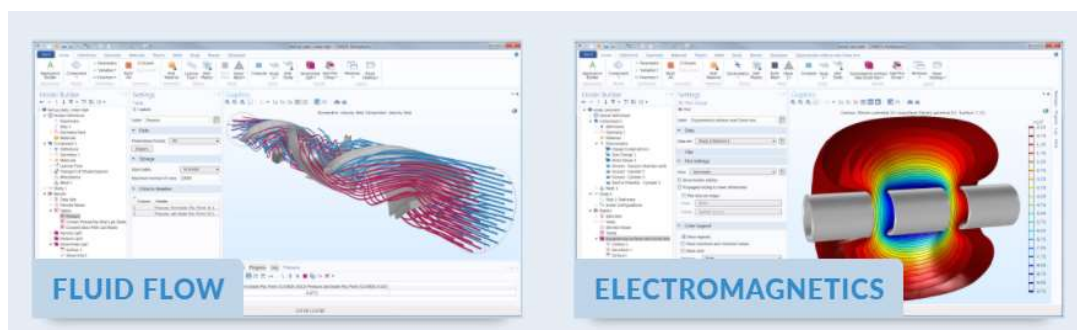
# Kapitola 2

## Comsol Multiphysics®

Tento software byl zvolen, protože umožňuje modelovat trojrozměrné šíření tepla a zároveň je jeho licence v držení ČVUT. V tomto konkrétním případě se jedná o verzi 4.2.0.150, přičemž aktuálně nejnovější verze je 5.5. Následující kapitola shrnuje základy práce s programem a řešení všech problémů se kterými se autor setkal. Přečtení této kapitoly by mělo poskytnout teoretickou základnu k co nejrychlejšímu znovudosažení výsledků interpretovaných autorem práce.

### 2.1 Představení programu

Comsol Multiphysics® je program fungující na vícero operačních systémech vyvinutý pro fyzikální modelování, analýzu a řešení fyzikálních dějů pomocí metody konečných prvků. Program se věnuje nejen modelování přenosu tepla v pevných látkách, ale i v kapalinách, protože obsahuje CFD simulátor. Dále působí na poli akustiky, statiky, elektromagnetismu, a chemie s možností výpočtu ve vícero kategoriích na jednom modelu. Program má vlastní grafické uživatelsky přívětivé rozhraní s grafickým editorem, umožňuje import částí modelu v různých formátech, které lze pořídit jako výstup z programů CAD. Zpracování programu umožňuje ovládání pomocí programu Matlab®, nebo pomocí programovacího jazyku Java.



Obrázek 9 – Některé možnosti využití programu Comsol (16)

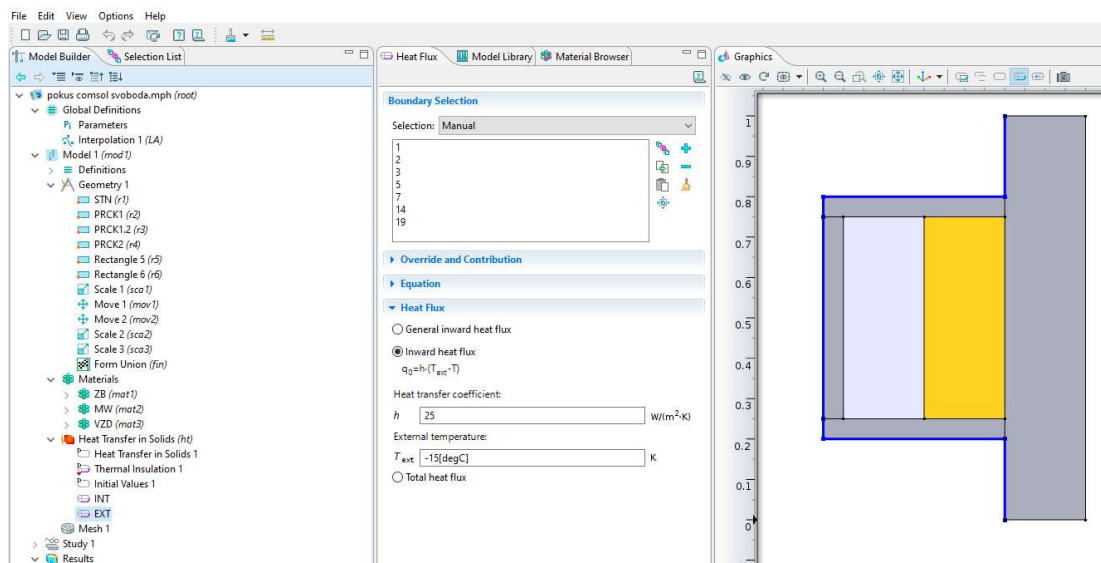
V programu lze pomocí rozšíření vytvářet aplikace pro třetí uživatele, které fungují ve zjednodušeném zobrazení, umožňují měnit určené vstupní

parametry a provádět přednastavené výpočty. Aplikace fungují jako rozhraní pro úpravu veličin a spouštění výpočtu na již hotovém modelu s definovaným zadáním a s odladěným procesem jeho pozměňování, tak aby výsledky byly spolehlivé. Program nedokáže sám vyhodnotit správnost výsledků, proto je nutné definovat rozsah vstupních parametrů a vědět jaká jsou omezení použitelnosti programu. Toto platí pro veškeré simulované procesy, ať už při vytváření zjednodušené aplikace nebo při vytváření samotného modelu a práce s ním.

Nakonec program poskytuje široké možnosti interpretace výstupních dat. Případně je možné propojení s tabulkovým editorem Excel®.

## 2.2 Modelování v Comsolu

V Comsol Multiphysics® lze vytvářet modely přímo v grafickém rozhraní programu. Podokno pro náhled na 2D nebo 3D zobrazení je závislé na velikosti a rozlišení monitoru. Při nižších parametrech může být omezujícím faktorem při práci. V případě 2D modelů není s modelováním přímo v pracovním prostředí programu problém. 2D je přehledné a zadávání přes formuláře s udáním umístění a rozměrových údajů nových objektů je jednoduché. Ve 2D geometrii je vhodné uvažovat i o využití proměnných uvedených v polích zadávacího formuláře místo přímého vepisování hodnoty, které při správné úvaze dovolí ovládat vícero vložených objektů najednou přes jedinou proměnnou. Instruktažní manuál pro tento typ práce vytvořil pan Svoboda (17). Ke zobrazení manuálu jsou nutné přihlašovací údaje ČVUT.



Obrázek 10 – Příklad 2D geometrie v Comsolu

Vytváření geometrie přímo v grafickém rozhraní programu má ale svá omezení. I v případě 2D modelování by pro složitější geometrie bylo mnohem vhodnější požadovanou geometrii modelovat v externím programu, například v programech CAD, vytvořit export ve formátu DXF a nakonec geometrii vložit pomocí funkce import. Při jiných než jednoduchých zadáních je grafické rozhraní programu dostatečné pro orientaci v modelu a práci s ním, ale nikoli pro jeho vytváření. Ve 3D modelování platí výše uvedené také, a to s tím, že modelovat složitější geometrie přímo v modelu, je téměř nemožné.

Proces vytváření geometrie funguje následujícím způsobem. Každý příkaz nebo obecně každá akce provedená na modelu je zapsána do seznamu jako prvek (angl. feature) a v seznamu zůstává. Pokud tak budeme hledat například správnou pozici pomocí opakovaných přemístění nějakého objektu, zapíše se všechny pohyby do seznamu jako prvky procesu vytváření geometrie a zůstanou tam. Při jejich smazání ze seznamu jako nepotřebných dojde i k vrácení akce, kterou zastupovaly. Tímto způsobem přidáváme jak jednotlivé objekty (kvádry, válce, koule a další základní nabízené tvary), tak operace s nimi, stejně se vypisují i importované soubory. Mezi nejdůležitější operace patří tzv. „boolean operations“. Dále se později v procesu tvorby modelu využijí i tzv. „virtual operations“. V záložce „definitions“ je v některých případech vhodné vytvořit výběr „selection“, pro kroky přiřazování okrajových podmínek. V některých případech je nutné také věnovat pozornost položce „Form union“ v seznamu geometrických prvků. Všechna zmíněná témata jsou popsána dále.

## 2.3 Modelování a import STL

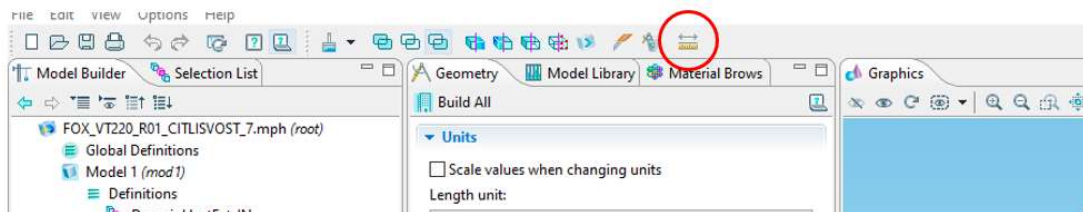
Nevýhodnější z hlediska vytváření modelu je importovat hotový objekt. Možné jsou formáty STL a VRML pro import povrchové sítě 3D modelu, DXF pro import 2D geometrie a NASTRAN pro import 3D sítě (18).

V případě této práce byl používán pro importy formát STL. Jedná se o triangulovanou povrchovou síť, která popisuje model. Importovaný model se potom chová jako jeden objekt. Je proto nutné modelovat každou materiálovou část zvlášť. Pro tvorbu modelu byl zvolen program SketchUp® (19). Před exportem do formátu STL je nutné provést triangulaci všech ploch, k tomu je nutné rozšíření jako například FredoTools (20). Triangulace ploch znemožňuje další rozumnou práci s 3D modelem a není vratná jinak než příkazem zpět nebo ručním odstraněním

vygenerovaných úseček, proto je nutné uchovat k pozdějším úpravám i původní verzi modelu.

Nutnost modelování komponentů jednotlivě po materiálech není na škodu. Z hlediska modelování většího množství variant, kde se střídají některé komponenty, ale jiné zůstávají stejné, je přehledné kotvu a každou další část systému rozdělit na dílčí komponenty. Kotva se tak po rozkladu na části skládala ve výsledku ze tří dílčích komponentů: hliníková část kotvená k podkladu, polyamidový střed a hliníková část pro uchycení profilů roštu. Dalšími modelovanými komponenty byly profil a podložka. Podklad, tepelná izolace a obklad nebyly importovány, ale byly vytvořeny jako bloky v samotném Comsolu.

Je nutné model už ve SketchUpu umístit na pozici, kterou bude zaujímat v Comsolu. Změna polohy v Comsolu je možná, ale není možné určit absolutní pozici, kam se má objekt přesunout. Posuny jsou vždy definovány relativně k stávající poloze. Během celého studia manuálu programu a instruktážních videí nebylo nalezeno úplně uspokojivé řešení tohoto problému. Z diskuzních fór programu bylo patrné, že se s ním potýkalo i několik dalších uživatelů programu. Toto omezení může být nevyřešenou oblastí starší verze a v novějších verzích mohlo být odstraněno. Ve verzi 4.2 je nejvýhodnější pomocí funkce „measure“ zjistit pozici jednoho z bodů objektu a následně ručně dopočítat požadovanou pozici a zadat přesun.



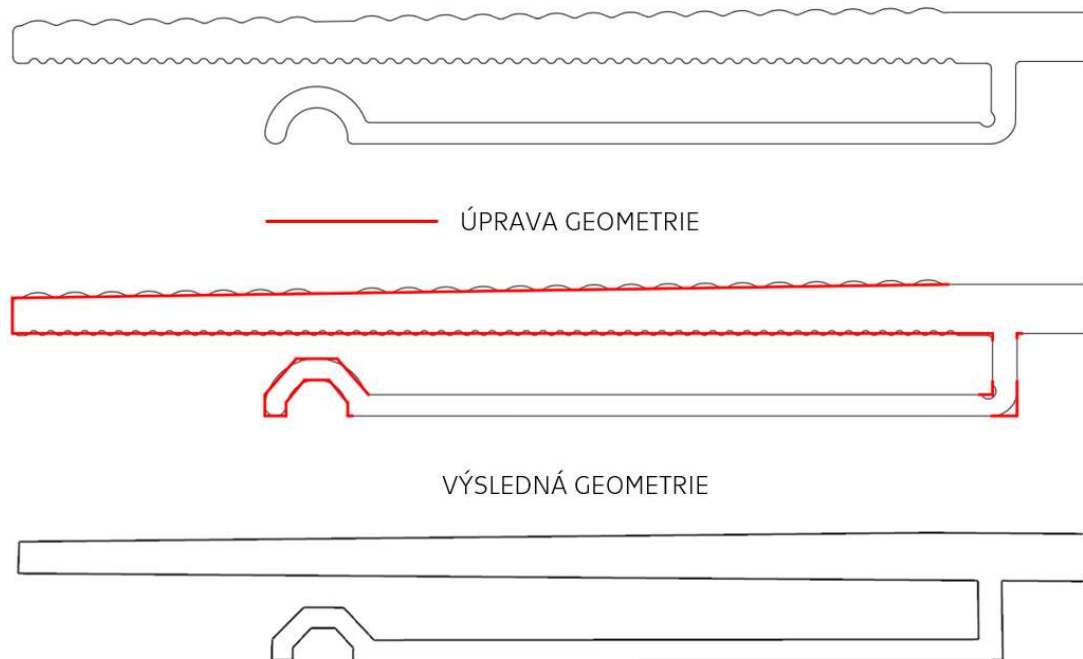
Obrázek 11 – Funkce „measure“ (21)

Toto ale není nutné, pokud nastavíme pozici hned ve SketchUpu, kde se umístění provádí poměrně dobře. Ani zde nelze sice nastavit absolutní pozici objektu, ale automatické funkce jako přichytávání ke středu úseček a trasování usnadní umístění do počátku a poté přesun na určenou pozici.

## 2.4 Zjednodušení geometrie

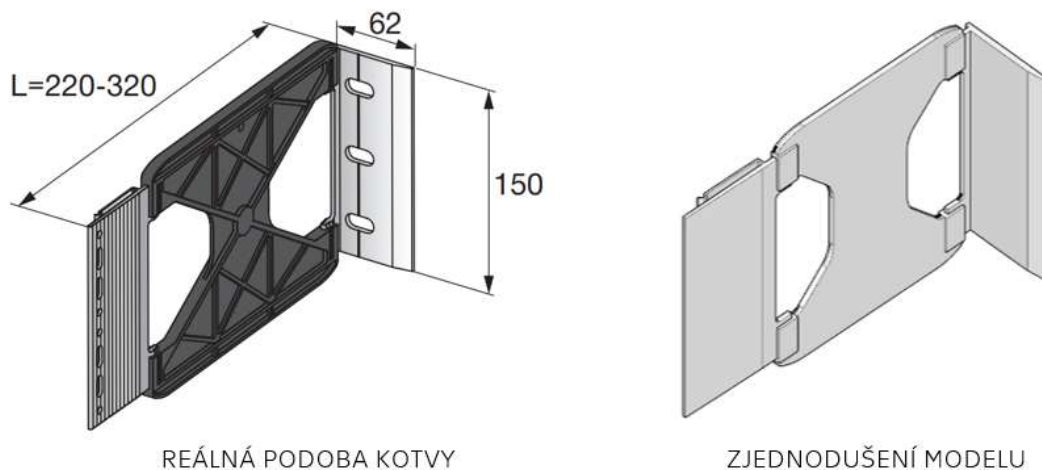
Pro tuto práci byly k dispozici interní podklady od společnosti Hilti, které umožňovaly modelovat kotvy s vysokou přesností. Bylo ale vhodné provést některá zjednodušení geometrie a zanedbat příliš drobné detaily. Všechny kotvy ze slitin hliníku od společnosti Hilti obsahují na části pro

kotvení profilů roštu profilování ve formě pravidelného vlnění a několik drážek jako vodící prvky pro usnadnění montáže, oba tyto geometrické rysy byly zanedbány včetně zaoblení při změnách směru (obrázek níže). Klip, který slouží k přidržení profilu roštu během montáže, je ve vyklenutí vzdálen 2 mm od hlavní části kotvy, různá míra jeho pootevření vlivem tloušťky vsunutého profilu byla zanedbána. Více v kapitole 3.4.2. Během procesu zjednodušení geometrie bylo přihlédnuto k normě ČSN 73 0551 (22).



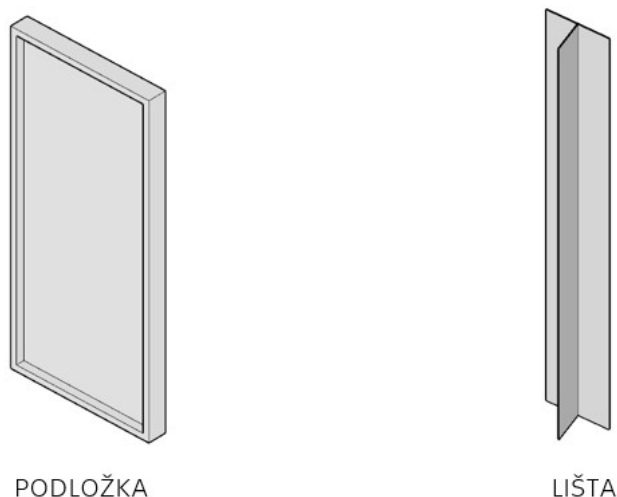
Obrázek 12 – Zjednodušení geometrie vnější části kotvy

Střední polyamidová část je také velmi profilovaná. Jde vidět, že tvůrci kotvy se snažili o co neměší objem a vylehčení kotvy, zřejmě z důvodu úspory materiálu ale také z důvodu snížení průřezu, který se bude podílet na přenosu tepla kotvou. Kotva tak obsahuje systém vzpěr, které zajišťují její statické vlastnosti. Jejich podíl na přenosu tepla byl započítán v podobě přírážky na tloušťku těla kotvy. Tyto vzpěry mají shodnou výšku nad rovinnou průběžné části kotvy, jejich plocha byla sečtena a byl zjištěn jejich objem, následně byl tento objem rozdělen rovnoměrně po celé ploše. Výjimku tvoří místo styku polyamidové části s hliníkovými částmi, kde je hliník obklopen polyamidem a ten má tak na části plochy výšku jako výztuhy. Tato místa byla zachována v plné tloušťce, rozsah byl stanoven podle odstupů od hliníkových částí, tak aby byly plně obklopeny. Obrys polyamidové kotvy byl modelován s přesností na milimetry. Srovnání předlohy a zjednodušení modelu je vidět na obrázku níže.



Obrázek 13– Srovnání předlohy a zjednodušeného modelu (12 str. 131)

Podobně jako kotva, byl profilován i profil roštu, i zde bylo provedeno zjednodušení. V případě podložky přerušující tepelný most došlo k vypuštění otvorů pro kotvení, jinak byla podložka namodelována přesně. Ukázky obou prvků níže.



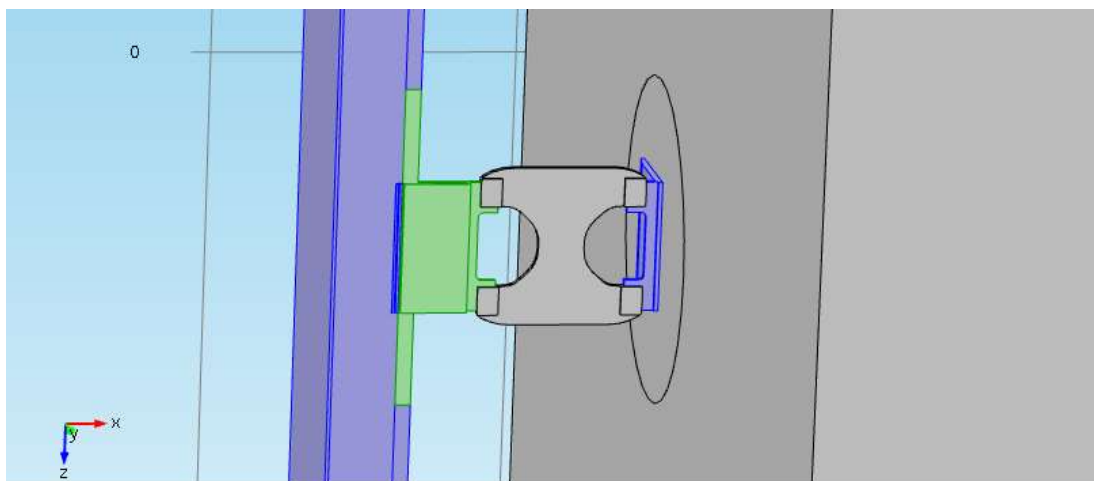
Obrázek 14– Ukázky dalších modelovaných částí systému  
Poznámka: obrázky nejsou ve stejném měřítku

## 2.5 Závěr vytváření geometrie – sjednocení

V některých případech může dojít k nepřesnému exportu nebo importu s nepřesností v řádech třeba jen E-14. I tyto nepřesnosti mohou působit problémy při sjednocení geometrie do výsledného počitatelného celku. Automaticky vykonávaný závěrečný bod geometrie „Form Union“ nebude tak možné provést. V takovém případě je nutné upravit hodnotu „Relative repair tolerance“, která řídí míru sjednocení jednotlivých objektů geometrie, na vyšší hodnotu, například 1E-5 až 1E-3. Pokud její zvýšení

problém se sjednocením nenapraví, stojí za vyzkoušení také pozměnit pořadí importovaných objektů v seznamu geometrie. I taková změna může programu pomoci se vypořádat se složitější geometrií. Nejedná se o banální problém, při průzkumu internetových diskuzních fór a stránek tvůrce programu zjistíme, že se jedná o známý problém, který nemá jednoznačné a naprosto spolehlivé řešení. (23) (24) I zde využijeme dělení na více částí, protože při postupném vyřazování jednotlivých objektů z modelu (funkce „disable“/„enable“) můžeme zjistit, který způsobuje potíže při sjednocování geometrie. Nakonec je vhodné zkontrolovat přesnost modelu už v 3D editoru, kde probíhal export. Ideální je, pokud už v 3D editoru neprobíhají při úpravách jiné posuny objektu než o celá čísla a pouze ve směrech os, tak aby se zaručilo, že pozice bude přesná.

Při sjednocení geometrie s nízkými hodnotami pro relativní opravnou toleranci může dojít ke sjednocení některých částí modelu, které byly importovány samostatně. V jednom z modelů došlo při pokusech o nalezení ideální relativní opravné tolerance ke sjednocení částí zeleně zvýrazněných na obrázku níže. Tyto dvě části byly ale ze stejného materiálu, a tak mohli být ponechány jako jedna doména. Nebylo třeba dále hledat vhodnější hodnotu relativní opravné tolerance a bylo možné přejít k přiřazování materiálů jednotlivým výsledným doménám. V obrázku jsou modře a zeleně zvýrazněny hliníkové komponenty.



Obrázek 15 – Příklad nezávadného sjednocení samostatně importovaných částí modelu

## 2.6 Přiřazení materiálů a teplosměrné plochy

Při vytváření materiálů pro výpočet šíření tepla v pevných látkách je nutné zadat součinitel prostupu tepla, měrnou tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost. Poslední dvě se na výpočtu neprojeví a je možné je zadat libovolnou hodnotou. Určující je pro výpočet součinitel prostupu tepla.

Po zadání materiálů je nutné je přiřadit k jednotlivým doménám modelu. Domén není v modelu obvykle mnoho a přiřazení lze provést i odkontrolovat ručně. Při změně geometrie, zejména při přidávání nových objektů do modelu nebo i jejich výměně je potřeba správné přiřazení materiálů znovu zkontrolovat, protože nové komponenty se samy většinou nepřidají a nahrazované se často přiřadí chybně.

Teplosměrné plochy se definují okrajovými podmínkami pomocí zadání formuláře „Inward heat flux“ kde se definuje součinitel přestupu tepla a teplota vně konstrukce. Přiřazení probíhá v úrovni jednotlivých ploch, nikoli domén, protože se jedná o podmínky na hranici modelovaných pevných těles. Ruční přiřazování může znamenat i několik desítek jednotlivých ploch, což vytváří potenciál pro vznik chyby, a i vizuální kontrola je v případě menších detailů obtížnější. Je tedy výhodné i jen pro tuto část vytvořit výběry ve větvi definice („definitions“), kde je možné vytvořit předdefinovaný výběr započítáním jednotlivých ploch na základě příslušnosti k určité doméně, a zároveň získané výběry odčítat, slučovat a jinak upravovat až do požadované podoby. Vnitřní plochy, styčné plochy mezi doménami, budou při přiřazování okrajové podmínky ignorovány, proto není nutné z výběrů odstraňovat. Je možné také nastavit počáteční teplotu modelu. Pokud tušíme, jaká teplota by mohla ve výsledném stavu převládat, můžeme nastavením blízké teploty této hodnotě výpočet méně urychlit.

## 2.7 Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť je rozčleněním prostoru počítaného objemu na konečný počet prvků. Pro výpočetní síť je v angličtině zavedený pojem „mesh“. Správně vytvořená výpočetní síť je nutnou podmínkou pro přesné výsledky (25).

### 2.7.1 Možnosti a omezení

Základním prvkem výpočetní sítě je čtyřstěn. Existují další možnosti tvarů, které se používají dle potřeby a možností modelu. Pokud to není vyloženo výhodné, je doporučeno používat základní volnou čtyřstěnnou síť (angl. Free Tetrahedral). Použití ostatních tvarů prvků je vhodné jen ve specifických případech, kdy to geometrie a záměr analýzy umožňují. (26)

Základním parametrem jakékoli výpočetní sítě je její podrobnost. Při vytvoření podrobnější sítě bude výpočet v tomto místě přesnější a zároveň delší. Proto se podrobnější síť volí nejlépe jen v těch místech, kde se očekává změna ve sledované veličině nebo kde to vyžaduje



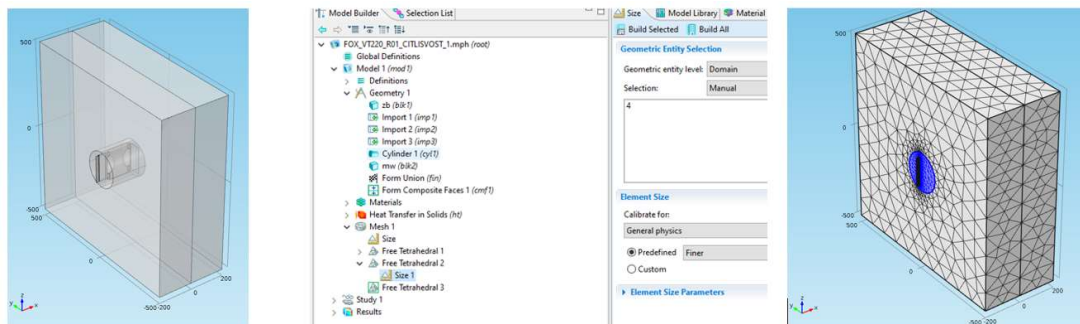
podrobnost geometrie. Program nabízí devět úrovní podrobnosti výpočetní sítě od extrémně hrubé (angl. Extremely Coarse) po extrémně přesnou (angl. Extremely Fine). Každá úroveň má specifikovány vlastnosti například maximální a minimální velikostí prvku nebo také maximálním tempem růstu prvku. Nelze aplikovat na podrobnost v řádu milimetrů extrémně hrubou ani normální výpočetní síť, a zároveň při aplikaci extrémně přesné sítě na prostou plochu zbytečně prodlužujeme dobu výpočtu a zatěžujeme výpočetní techniku. Je tedy vhodné nalézt kompromis mezi přesností výsledků a rychlostí výpočtu.

V některých případech se může stát, že program není schopen vytvořit výpočetní síť dle zadaných nastavení. Proces se buď sám neukončí nebo se uživateli nahlásí větší či menší množství chyb. Některé je možné ignorovat a ponechat bez řešení, protože nemají vliv na výsledek, jiné mění výpočet radikálně, a stejně jako neukončení generování výpočetní sítě, je potřeba je řešit. Zdá se, že některé problémy jsou způsobené starší verzí programu používanou pro modelování v této práci a v novějších vydáních mohly být odstraněny, a to zejména v případech, kdy není program sám síť schopen vytvořit vůbec. Praktické rady pro optimalizaci modelu a nejčastější příčiny problémů a jejich řešení uvádím dále v podkapitole 2.7.5.

## 2.7.2 Dělení na menší úseky

Pokud modelujeme geometrii, která obsahuje místa s mnohem vyšší podrobností, než je zbytek modelu, je vhodné tato místa obklopit přechodovou oblastí. (27) Na samotný detail se uplatní nejvyšší podrobnost výpočetní sítě podle toho, jak to místo vyžaduje. Přechodová oblast nebude průměrem mezi detailem a zbytkem modelu, ale spíše použijeme podrobnost jen o jednu nebo dvě úrovně nižší. Je i možné použít podrobnost stejnou. Na zbytek původní prosté plochy bude pak možné použít například nejhrubší podrobnost. Výpočetní síť jedné oblasti se vždy váže na okolní již existující síť, proto je nutné používat poměrně podobnou podrobnost i na přechodovou oblast, protože může sdílet s detailem stejně komplikovanou hranici jako obsahuje detail.

Kvůli vymezení přechodových oblastí je nutné se vrátit do fáze tvorby geometrie a pomocí vložených objektů vytvořit nové domény. Nejlepším tvarem je válec s dostatečným poloměrem tak, aby s rezervou obklopoval detail a tvořil další, co nejjednodušší hranici, na kterou se potom napojí hrubší výpočetní síť. Pro upřesnění, není potřeba provádět „boolean operace“, program při průniku dvou objektů vytvoří ve fázi sjednocení geometrie novou oblast sám.



Obrázek 16 – Přechodový válec a jeho vliv (21)

Na obrázku výše je zobrazen model s upřesňujícím válcem, který se stal nutnou součástí každého dalšího modelu. Vlevo je prostý model v zobrazení geometrie. Uprostřed kompletní výpis prvků geometrie se zvýrazněným přechodovým válcem a označenou položkou „size“ ve větvi vytváření výpočetní sítě pod položkou „Free Tetrahedral 2“, která definuje generování výpočetní sítě zvlášť pro přechodový válec. Můžeme si všimnout, že zvolená velikost prvku výpočetní sítě je „Finer“ tedy o dvě úrovně méně podrobná než velikost prvku výpočetní sítě kotvy, kterou obklopuje a která byla nastavena na maximální. Vpravo potom úspěšně vytvořená výpočetní síť, přesná kolem kotvy s pozvolným přechodem k hrubé v prosté ploše stěny.

### 2.7.3 Virtuální operace

Další důvod pro návrat a úpravu modelu mohou být virtuální operace. Jedná se o řešení chybových hlášení, ve většině případů není nutné chybová hlášení řešit, tedy pokud generování proběhlo na všech doménách. Chybová hlášení ale mohou v některých případech vést k neúspěšnému generování výpočetní sítě. Potom je nutné zasáhnout do původního modelu. Nejčastějším důvodem v průběhu této práce byl výskyt příliš úzkých oblastí, které program nedokázal pokrýt výpočetní sítí v návaznosti na okolní oblasti.



Obrázek 17 – Příklad vyžadující použití virtuální operace (21)

Například na stejném modelu jako v podkapitole 2.7.2 se nutnost takového zásahu vyskytla. Obrázek výše je zobrazení vystupující části kotvy z plochy stěny v pohledu shora. Šipka míří na místo s hranicí oblasti o šířce pouhých 0,05 mm (délka oblasti je naopak 150 mm, šířka vyklenuté části je pro srovnání 1,3 mm), která vznikla při slučování modelu do jednoho celku, fáze „Form Union“. Jak bylo uvedeno výše, program v této fázi dělí model do domén, kterým přiřazujeme materiálové charakteristiky. Vystupující části jsou každá jednotlivá doména, další doménou je zbytek vnější hliníkové části kotvy, na kterou se kotví profil a která zůstala skryta v tepelné izolaci. Rozhraní určené vnějším povrchem tepelné izolace se nachází právě 0,05 mm od jiného zalomení modelu vnější hliníkové části kotvy, která tvoří vyklenutou část. Kromě rozdělení na domény mohou vzniknout totiž ve fázi sjednocení modelu také nové plochy, které mohou být příliš úzké, a tak je nutné je odstranit. K tomu se používají virtuální operace, kterými definujeme, které hranice, plochy nebo body mají být ignorovány při tvorbě výpočetní sítě. V tomto prezentovaném příkladu byl použit příkaz „Form Composite Faces“, který sjednotil zeleně označenou část s modře označenou částí, tím došlo k vytvoření jedné nové plochy. V některých případech se tento příkaz nedá použít. Nelze sjednotit dvě sousedící plochy s důvody geometrických návazností. Další možností je potom použití příkazu „Ignore Faces“, který zajistí, aby program při vytváření výpočetní sítě určenou plochu ignoroval. V jiném zvláštním případě, který se během procesu modelování vyskytnul, nebylo možné použít ani řešení pomocí příkazu „Ignore Faces“. Po provedení příkazu nebylo možné najít vhodnou hodnotu relativní opravné tolerance, aniž by některá z částí kotvy nezmizela. Problém naštěstí vyřešil příkaz „Ignore Edge“. Upozorňuji, že tento příkaz by měl mít stejné důsledky jako první výše doporučený příkaz „Form Composite Faces“, který ale nebylo tentokrát možné použít.

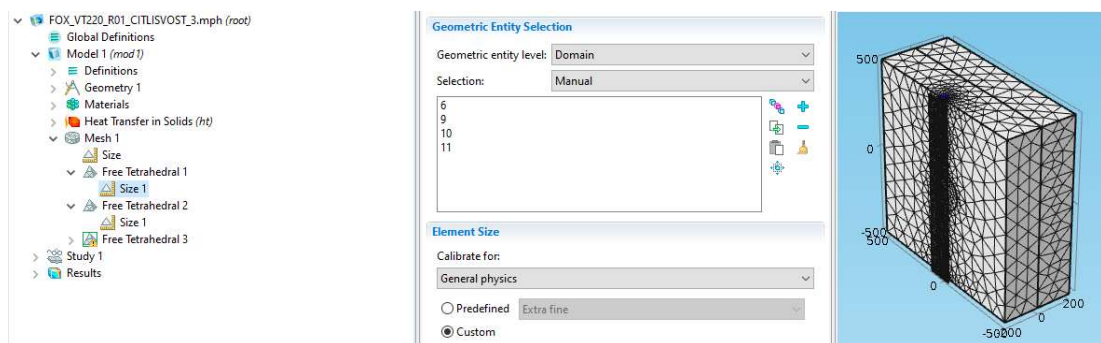
Ve všech uvedených řešeních se sice jedná o zkeslení modelu, ale vzhledem k míře zjednodušení modelu je toto zkeslení zanedbatelné. Více o těchto procesech je možné dozvědět se na blogu tvůrce programu, kde jsou uvedeny funkce jednotlivých příkazů a další doporučení (28).

## 2.7.4 Generování sítě po jednotlivých doménách a jejich pořadí

Výše bylo zmíněno několik důvodů pro dělení modelu na více komponentů. Další z důvodů, který z dělení modelu dělá nutnost, je neschopnost programu vypořádat se s generováním sítě pro složitější geometrie automaticky. V některých testovaných případech nebyl

program schopen generování dokončit. Až při rozdělení procesu generování na více fází s upřednostněním těch nejkomplicovanějších bylo vytvoření výpočetní sítě úspěšné.

Důvodem pro zařazení nejkomplicovanějších částí modelu na začátek generovacího procesu je skutečnost, že síť respektuje jednu vytvořené body. Použitá verze programu nedokáže bez pomoci spolehlivě určit v jakém směru generování sítě provádět. Pokud nejprve vytvoří hrubou síť, bude se na ni snažit navázat další body se zohledněním maximálního dovoleného faktoru růstu prvku (angl. „Maximum element growth rate“). Předchozí vygenerované body mohou tak výrazně zkomplikovat a ovlivnit výslednou podobu sítě v oblastech, na kterých nám ve skutečnosti záleží. Níže na obrázku je vidět příklad řazení a specifikace podrobnosti výpočetní sítě pro jednotlivé domény a výsledek procesu. Bez specifikace maximální velikosti prvku výpočetní síť pro jednotlivé domény by nebylo možné výpočetní síť vytvořit. Této problematice se věnuje další z článků na blogu tvůrce programu (29).



Obrázek 18 – Rozdělení procesu vytváření výpočetní sítě na kroky s určením požadavku podrobnosti výpočetní sítě a zobrazení výsledku

## 2.7.5 Chybová hlášení

Na tomto místě je uveden výpis některých chybových hlášení, která se během procesu modelování vyskytla, a jejich komentář. Některé bylo nutné řešit, jiné, jak se ukázalo, bylo možno považovat pouze za informativní. Jednotlivá hlášení jsou rozdělena do kategorií podle toho, které fáze práce s programem se týkala.

### Import

Face cannot be parameterized.

- importovaný model není uceleným objektem, jinak také řečeno není „solid“

### Union

Unsupported operation on this type of object.

- vyskytlo se jednak při kolizi hran importu a bloků vytvořených v programu a jednak při nevhodně zvolené relativní opravné toleranci.

Could not trace curve

- obdobné důvody jako v předchozím hlášení,
- řešením bylo v tomto případě nastavit relativní opravnou toleranci na  $1,4e-3$ .

Vertex too close to edge in 2D domain

- obdobné důvody jako v předchozím, přesnost relativní opravné tolerance nastavena  $2e-4$

### Výpočetní síť

Edge is much shorter than the specified minimum element size.

- a související specifikace hlášení: „Face is (or has a narrow region that is) much smaller than the specified minimum element size.“,
- může a nemusí být na překážku, jen pokud je v dalších úrovních chybového hlášení uvedeno, že oblast nebyla pokryta výpočetní sítí, je vhodné problém řešit.

### Během výpočtu

Low minimum element quality

- souvisí s podrobností výpočetní sítě a složitostí geomterie, lze ignorovat.

Inverted mesh element near coordinates (-0.0590936, -0.00214, 0.0298324).

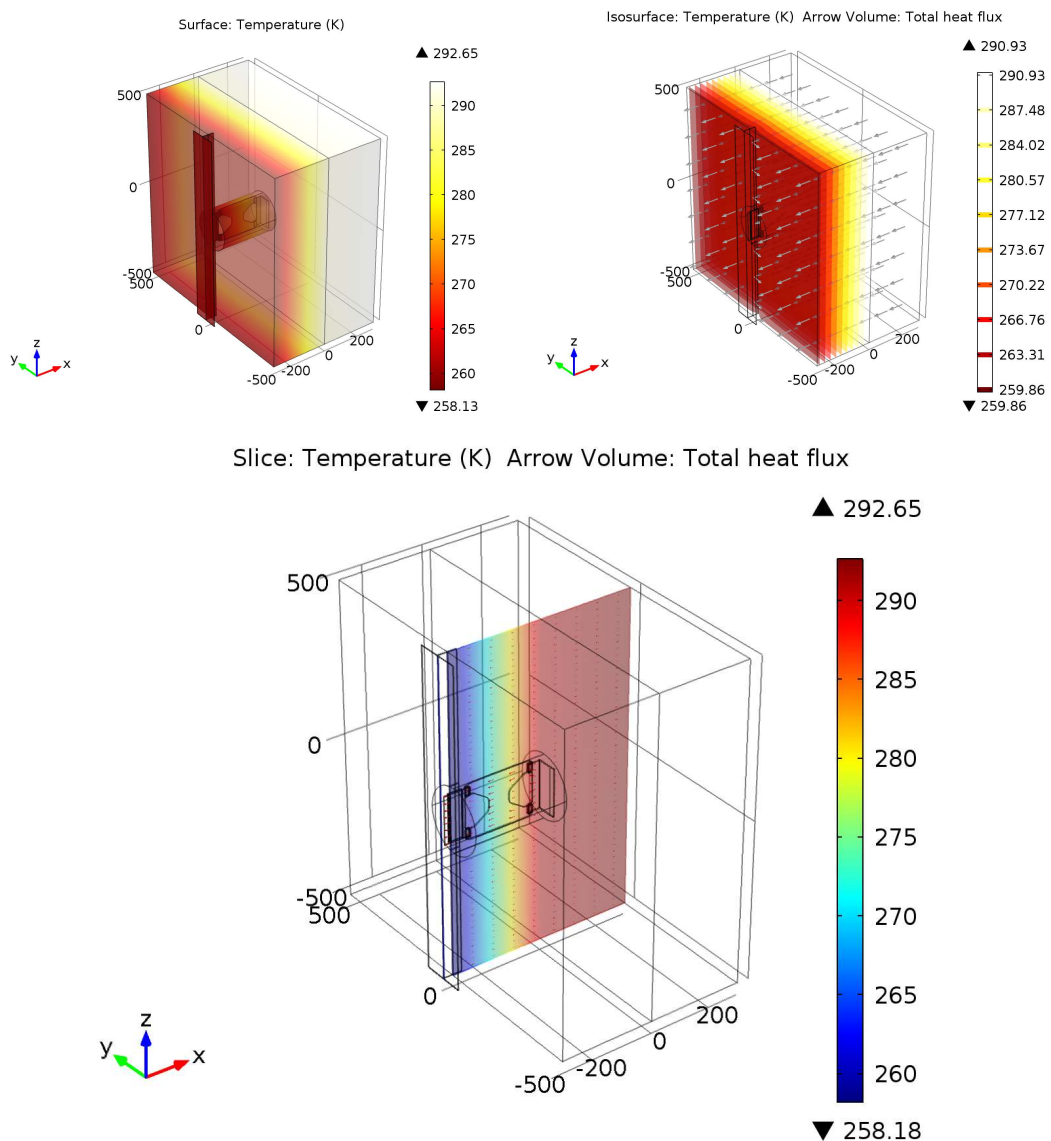
- Vyřešeno po opravě přiřazení doméně požadavek na velikost sítě,
- Chyba neměla vliv na výsledek  $\chi$  na 4 desetinná místa  $0,2736 \text{ W/K}$  ( $9,576530417 \text{ W} \rightarrow 9,577536907 \text{ W}$ ).

## 2.8 Výsledky: odečet hodnoty pro výpočet $\chi$

Nejedná se přímo o odečítání bodového činitele, ten se dopočítává až ručně, ale o tepelný tok na ploše modelované konstrukce. Výsledná odečítaná hodnota se musí nastavit. Výpočet bodového činitele prostupu tepla by se dal v programu nastavit jako v závěru automaticky dopočítávaná rovnice, ale z hlediska analýzy dat je užitečné mít k dispozici také hodnotu tepelného toku. Ostatní veličiny je možné dopočítávat a analyzovat samostatně v dalším kroku.

Pod větví výsledky (angl. „Results“) se pod derivovanými hodnotami (angl. „Derived Values“) vytvoří funkce integrace přes povrch (angl. „Surface Integration“), kde se zvolí v rozevíracích seznamech vnitřní tepelný tok (angl. „Inward heat flux“) se zkratkou „ht.q0“ [W]. K veličině se přiřazují plochy, na které se integrace vztahuje. Přiřazení je možné provést ručně v případě interiéru, v případě exteriéru je vhodnější znovu použít výběr oblastí zmíněný v podkapitole 2.5. Pro citlivostní analýzu byly odečítány hodnoty z obou stran, ale hodnoty pro odvození zjednodušeného výpočetního vztahu byly už pouze z interiérové strany. Důvod je uveden v následující kapitole („3.5 Odchylka iterační metody“)

Program dává možnost různých grafických zobrazení výsledků. Některá zobrazení jsou vhodná pro kontrolu správného výsledku výpočtu. Při vykreslení teplotního pole v řezu v místě kotvy lze například zjistit, jestli a jak se všechny dílčí části kotvy podílejí na přenosu tepla.



Obrázek 19 –Příklady zobrazení výsledků z Comsol Multiphysics®

# Kapitola 3

## Citlivostní analýza

Před samotným modelováním výsledků pro odvození zjednodušeného vztahu bylo potřeba ověřit, které komponenty systému zavěšených fasád mají na výsledný prostup tepla stěnou vliv a které nemají. Pokud by bylo možné některé komponenty zanedbat, bylo by to výhodné z hlediska množství modelovaných případů nutných pro postižení všech vlivů.

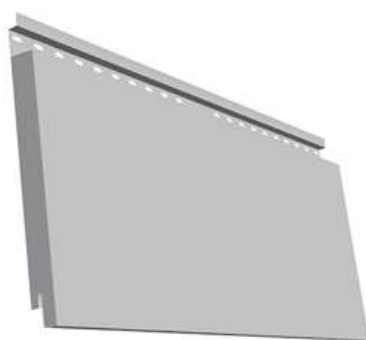
### 3.1 Okrajové podmínky

Jedná se o výpočet ustáleného šíření tepla pevnými látkami. Vnější okrajové podmínky výpočtu byly nastaveny na teplotní rozdíl  $35^{\circ}\text{C}$  s tím, že teplota na povrchu charakterizujícím interiér byla stanovena na  $20^{\circ}\text{C}$  a teplota na povrchu charakterizujícím exteriér  $-15^{\circ}\text{C}$ . Součinitel přestupu tepla na interiérové straně  $7,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a na exteriérové  $25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Snížení přestupu tepla do exteriéru vlivem vzduchové mezery nebylo zohledněno s tím, že použité hodnoty jsou na straně bezpečnosti. Počáteční teplota výpočtu byla stanovena na  $13^{\circ}\text{C}$ . Interiérové okrajové podmínky byly umístěny na vnější stranu podkladu a exteriérové na vnější stranu minerální vaty, kde bude později kotva a další součásti systému zavěšených fasád. Ostatní strany byly označeny adiabatickou okrajovou podmínkou a výměna tepla tudy neprobíhá.

### 3.2 Materiálové charakteristiky

Jako reprezentativní kotva byla zvolena kotva FOX VT 220, která je přibližně ve středu rozsahu délek. Bylo nutné zvolit materiálové charakteristiky jednotlivých částí kotvy a dalších komponent systému. Samotná kotva se skládá ze dvou materiálů, prvním je slitina hliníku, druhým plastová střední část, která přerušuje tepelný most. Při stanovení materiálových charakteristik se vycházelo z podkladů výrobce s dohledáním uvedeného typu slitiny hliníku na základě technického listu. Hodnota tepelné vodivosti uvedené ve  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  materiálu se v těchto dvou zdrojích neshodovala. Výrobce kotev uvádí hodnotu nižší o  $30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Hodnota je závislá na teplotě, proto má v technickém listu slitiny rozsah  $193 - 218 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Výrobce kotev uvádí hodnotu bez rozsahu, hodnotu, kterou uvažoval ve výpočtu. I přestože hodnota není v intervalu hodnot typických pro slitinu, jsem se rozhodl pokračovat s hodnotami uváděnými výrobcem kotev, zejména kvůli porovnatelnosti výsledků. V programu pro fyzikální modelování se dále zadávají i objemová hmotnost a měrná tepelná kapacita, které ale neovlivňují výpočet. I přesto jsou tyto hodnoty uvedeny níže kvůli kontextu (30). Střední plastová část je z materiálu pod názvem Polyamid Ultramid A3WG10, jeho tepelná vodivost je udána výrobcem. Hodnoty jsou zde uváděny jako konstantní a jak výrobce materiálu, tak kotev se v uváděné hodnotě shodují (31).



DEKCASSETTE IDEAL



EXPANZNÍ KOTVA

Obrázek 20 – Ukázka testovaných součástí systému (32) (33)

Profily tvořící podkladní konstrukci obkladu zavěšených fasád jsou ze stejné hliníkové slitiny, která se používá u kotev. Obklad se potom může různit a ani nemusí být od výrobce kotev, proto byly jeho materiálové charakteristiky zvoleny přibližně, aby odpovídali v jednom případě plechovému obkladu Deccassette ideal a v druhém cementotřískovým deskám. Pro podložku, u které se zkoumá vliv na snížení bodového činitele prostupu tepla na případu kotvy, které má již přerušeni tepelného mostu integrováno, byly uvažovány hodnoty tepelné vodivosti dle výrobce. Kotvení bylo zvoleno pomocí ocelových expanzních kotev. Přehledný výpis materiálových charakteristik uvádím níže.

Tabulka 1 – Materiálové charakteristiky testovaných součástí systému zavěšených fasád

Část systému zavěšených fasád	Tepelná vodivost $\lambda$ [W/(m·K)]	Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J/(kg·K)]
Kotva (12 str. 110) EN-AW-6063 T66	160	2700	887



Kotva (12 str. 110) Ultramid A3WG10	0,37	1560	1300
Profil (12 str. 113)	160	2700	887
Podložka (12 str. 102) Polypropylen	0,117	1000	1920
Kotvení (34) (33) 304 SS, d = 6 mm	16,2	8000	500
Obklad (32) DEKCASSETTE IDEAL - AI	136	2690	900
Obklad (35) (36) Cementotřískové desky	0,5	1550	1580

Kromě součástí systému zavěšených fasád bylo nutné určit také materiálové charakteristiky podkladu a tepelné izolace, které budou součástí výpočtu. Pro tepelnou izolaci, kterou je minerální vata, byla zvolena tepelná vodivost 0,035 W/m·K odpovídající například výrobku Isover UNI (37). Pro podklad byly zvoleny varianty na základě hodnoty tepelného odporu. Bylo zvoleno pět kategorií, které se dají reprezentovat reálnými podkladními konstrukcemi, tak aby pokryly celé rozpětí možných podkladů z hlediska tepelně technických vlastností.

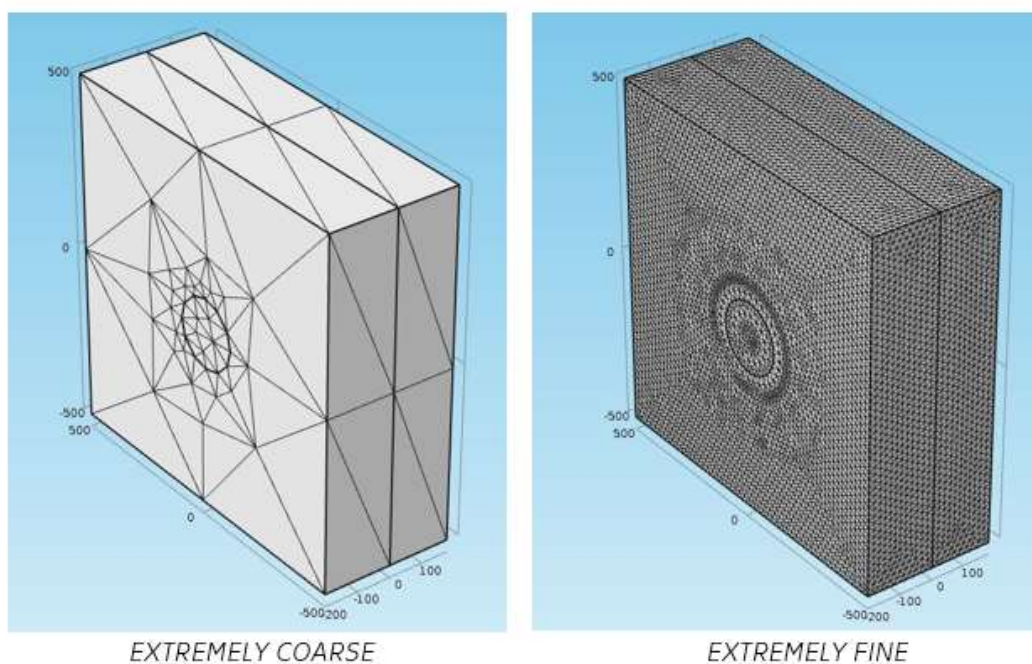
*Tabulka 2 – Testované varianty podkladního materiálu*

Tepelný odpor [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	Tepelná vodivost [W/(m·K)]	Tloušťka podkladu [m]	Zástupná konstrukce
0,1	1,8	0,18	Železobeton
0,4	0,75	0,3	Plná pálená cihla
1,0	0,3	0,3	Starší děrované zdivo, akustické děrované cihelné bloky
2,0	0,15	0,3	Zdivo YTONG
4,0	0,075	0,3	Tepelněizolační děrované cihelné bloky

### 3.3 Podrobnost výpočetní sítě

Nejprve byla provedena analýza vlivu přesnosti výpočetní sítě. Jak už bylo řečeno v kapitole 2.7, výpočetní síť má 9 možností přesnosti. Ověření mělo za úkol postihnout, jestli je nutné dbát na podrobnost výpočetní sítě z hlediska přesnosti výpočtu nebo jestli stačí nastavovat výpočetní síť jen tak podrobnou, aby byl program schopen geometrii na výpočetní síť převést. Dalším okrajovým důvodem pro podrobnější síť by mohla být úroveň grafických výstupů z programu.

Rozdíl mezi extrémními případy, jak je vidět na obrázku níže, je zjevný. Je nutné dodat, že podrobnost sítě, která reprezentuje maximální podrobnost, není maximální možná. Podrobnost je v tomto případě určena omezením maximální velikosti prvku, která je přednastavena na 35 mm. V pozdějších fázích práce byly modelovány oblasti s mnohem menšími detaily, než je 35 mm. Obrázek by byl ale při tomto zvětšení a rozlišení kompletně černý. Za pozornost také stojí, jakým způsobem válec uprostřed způsobí zpřesnění sítě i při extrému nejnižší podrobnosti.



Obrázek 21 – Extrémy podrobnosti výpočetní sítě

Analýza byla prováděna na modelu s tloušťkou tepelné izolace 200 mm, podkladním materiálem s tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ , zpřesňující válec byl poloměru 100 mm. Výsledky byly následující.

Tabulka 3 – Vliv podrobnosti výpočetní sítě na výsledky 3D výpočtu

varianta	popis COMSOL	Ht,q0 int [W]	Rozdíl k var 5 "Normal"
1	Extremely coarse	5,84881	0,00002
2	Extra coarse	5,84881	0,00002
3	Coarser	5,84878	-0,00001
4	Coarse	5,84879	0,00000
5	Normal	5,84879	0,00000
6	Fine	5,84871	-0,00008
7	Finer	5,84871	-0,00008
8	Extra fine	5,84874	-0,00005
9	Extremely fine	5,84875	-0,00004

Sloupec označený „Ht,q0 int [W]“ obsahuje tepelný tok měřený integrací na interiérové straně stěny. Vidíme, že hodnoty se mění na pátém místě, výjimečně na čtvrtém. Abychom mohli udělat závěr a stanovit, jestli změna číslice na pátém desetinném místě je pro výsledek významná a jestli je potřeba tomuto faktoru přizpůsobit další modelování musíme znát několik výsledků, které prezentují dopočítávané veličiny.

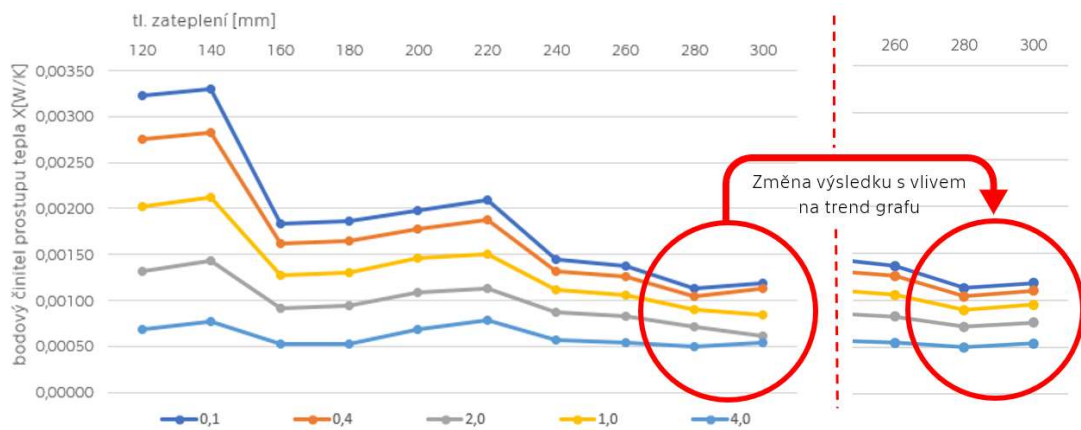
Tabulka 4 – Ukázka z výsledků následující podkapitoly pro kontext

varianta	popis, účel porovnání	Ht,q0 int [W]	$\chi$ [W/K]	U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
0	bez kotvy	5,84877	0,0000	0,167
1	referenční varianta	5,90641	0,0016	0,169
2	1+ kotvení	5,90646	0,0016	0,169

Tabulka 4 ukazuje první dva výsledky následující části citlivostní analýzy společně s referenční variantou pro porovnání. Shodou okolností se zde nachází také změna hodnoty tepelného toku na pátém desetinném místě. Zároveň byl zde dopočítán bodový činitel prostupu tepla na základě referenční varianty. Vidíme, že páté desetinné místo nemá na výsledky žádný vliv. Pokud bychom zobrazili další desetinný rozvoj těchto čísel zaznamenali bychom změnu až na 6. pozici u bodového činitele prostupu tepla a na 5. pozici u součinitele prostupu tepla. Vzhledem k přesnosti stanovování obou veličin je rozdíl zanedbatelný.

V tomto bodě by se dalo říci, že podrobnost výpočetní sítě nemá na výsledky vliv. Nicméně v další fázi modelování nastal případ, který vliv

podrobnosti naopak potvrdil. Při modelování pro zjištění tepelných toků pro jednotlivé kotvy šlo o větší počet výsledků. Během procesu zadávání došlo k opomenutí kontroly pořadí domén a podrobnosti výpočetní sítě. Nové importované části zůstaly ve skupině, která byl procesována výchozí podrobností – Element size: Normal (z angl.: „velikost prvku: normální“). Později při analýze získaných dat byla objevena odchylka a zjevná nepravidelnost dat. Ukázalo se pak tedy, že většina komponentů kotvy nemá přiřazenou vyšší podrobnost výpočetní sítě. V hodnotě tepelného toku došlo k nepravidelnosti na třetím desetinném místě. Odchylka byla natolik výrazná, že ovlivnila trend grafu. Změna je prezentována v obrázku níže.



Obrázek 22 – Vliv přesnosti výpočetní sítě detailnější geometrie na výsledky 3D výpočtu

Zpětně tedy bylo zjištěno, že ve větší ploše sice podrobnost výpočetní sítě vliv nemá, ale při modelování detailnější geometrie, která sestává i z vícero materiálů, je nutné míru podrobnosti výpočetní sítě věnovat pozornost. Automatický proces vytváření sítě není dostatečný. I přestože si program s geometrií může poradit, sám od sebe zvolí jen takovou podrobnost, která je nutná k výpočtu a nikoli k přesným výsledkům. Je možné, že v pozdějších verzích modelovacího programu by k tomuto nedošlo, protože s každou další verzí dokáže program řešit další záležitosti automaticky a také přibývají nástroje pro detekování, řešení a obcházení mnoha problémů (38).

### 3.4 Vliv jednotlivých komponent na tepelnou propustnost stěny

Hlavní část citlivostní analýzy se zabývala otázkou nutnosti brát v úvahu jednotlivé komponenty. Bylo vytvořeno devět základních variant testujících kotvení, profil a jeho pozici vzhledem k minerální vatě, velikost

profilu, obklad a podložku. Citlivostní analýza byla provedena na podkladu s nejnižším tepelným odporem na základě předpokladu, že čím vyšší tepelný odpor podkladní konstrukce, tím menší potřeba konstrukci dodatečně izolovat a tím menší vliv možných tepelných mostů v dodatečné izolaci. Konstrukce s nejmenším tepelným odporem podkladu by měla vykazovat největší citlivost na změny tepelných vlastností zateplení. Byla zvolena tloušťka zateplení 200 mm, jakožto přibližně střední hodnota mezi možnými tloušťkami zateplení.

Výchozí variantou byla varianta označená číslem 0, která reprezentuje zateplenou stěnu bez kotvy. I zateplení této stěny obsahuje zpřesňující válec, který je součástí každého modelu. Referenční hodnota tepelného toku na straně interiéru bude v dalších variantách odčítána od zjištěných hodnot tepelného toku pro stanovení potřebných veličin.

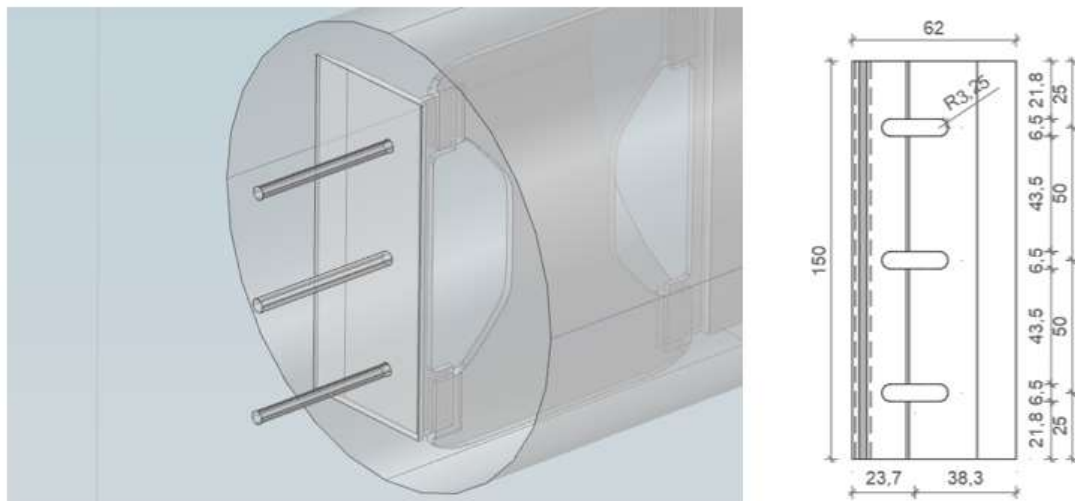
Varianta s číslem 1, která je v souhrnné tabulce výsledků nazývána jako referenční, je souvrstvím stejná jako výchozí varianta jen je s kotvou a bez jakýchkoli dalších komponent. Je nazývána referenční, protože vliv jednotlivých testovaných komponent na bodový činitel prostupu tepla je stanovován vzhledem k této variantě. Z výchozí varianty se určuje hodnota bodového činitele prostupu tepla, ale každý další výsledek se porovnává s referenční variantou. Výsledky základní části shrnuje následující tabulka.

*Tabulka 5 – Souhrnná tabulka výsledků základní citlivostní analýzy*

varianta	popis, účel porovnání	Ht,q0 int [W]	x [W/K]	U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
0	výchozí stav bez kotvy	5,84877	0,0000	0,167
1	referenční varianta	5,90641	0,0016	0,169
2	1+ kotvení	5,90646	0,0016	0,169
3	1+ profil 60x140x2, 40 mm v izolaci	5,97455	0,0036	0,171
4	1+ profil 60x140x2, 30 mm v izolaci	5,94770	0,0028	0,170
5	1+ profil 60x120x2, 30 mm v izolaci	5,94764	0,0028	0,170
6	5+ profil 60x120x1,8, 30 mm v izolaci	5,94695	0,0028	0,170
7	6+ obklad (hliník)	5,93415	0,0024	0,170
8	7+ podložka z PP	5,91740	0,0020	0,169
9	8+ kotvení	5,91803	0,0020	0,169

### 3.4.1 Kotvení

Varianta 2 zahrnuje navíc ke kotvě také kotvení expanzními ocelovými kotvami. Tyto kotvy jsou modelovány jako válce s průměrem 6 mm a délkou 80 mm. Jsou umístěny tak, aby jejich pozice odpovídala otvorům pro kotvení podle reálných rozměrů kotev.



Obrázek 23 – Geometrie v Comsolu podle reálných rozměrů

Kotvení bylo modelováno jako tři válce, které procházely hmotou kotvy, vstupem kotev hmotou kotvy byl simulován i styk kotvení s tepelnou izolací. V přiřazování materiálů bylo nutné označit i domény, které byly vytvořeny automaticky na základě průniku válců s hmotou kotvy. Kotvení bylo nakonec vytvořeno jako 3D objekt v externím 3D programu, protože jinak nebylo možné sjednotit geometrii pro vytvoření domén a přiřazení materiálů. Program nebyl tento závěrečný krok geometrie schopen provést, pokud bylo kotvení vytvořeno jako jednotlivé válce a umístěné na příslušné souřadnice přímo v programu. Zdá se, že problematickým byl právě průnik válců symbolizujících kotvení a části kotvy, kterou prostupovaly. Průnik importované geometrie a podkladu nedělal žádné problémy.

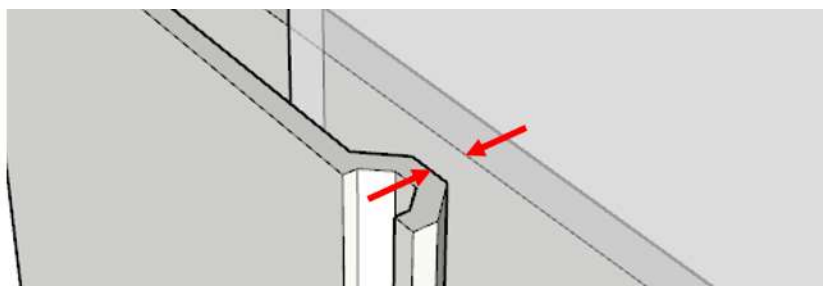
Rozdíl v tepelném toku na vnitřní straně konstrukce byl pouhých 5 statisícin wattu, tedy zanedbatelný. Kotvení profilu nemělo v tomto případě vliv na výsledek. Výsledek byl dle očekávání vyšší než v referenční variantě, a tak odpovídal předpokladu zvýšení tepelného toku po této úpravě. Na konci základní analýzy bylo testováno také kotvení při použití podložky, jako dodatečného přerušování tepelného mostu, jedná se o variantu 9. V případě kotvení ve variantě 9 došlo k vyššímu nárůstu tepelného toku vlivem kotvení. Změna tepelného toku byla o 63 desetitisícin wattu vzhledem k předchozí variantě č. 8, i tak ale

nezpůsobila nárůst bodového činitele prostupu tepla. Kotvení bude na základě těchto výsledků v dalším modelování zanedbáno.

### 3.4.2 Profil

Ve třetí variantě byl přidán k referenční variantě profil o rozměrech 60x140x2 mm, který byl ze 40 mm zanořený v minerální izolaci. Tato varianta měla sloužit pro základní ověření vlivu profilu. V reálných podmínkách není přípustné profil roštu zanořit takto hluboko, protože při hloubce profilu 60 mm, který je v nabídce výrobce a používá se, by došlo k zmenšení provětrávané mezery mezi obkladem a tepelnou izolací na 20 mm, zatímco nejmenší přípustná šířka provětrávané mezery je 30 mm.

Při vkládání profilu do kotvy dochází v případě vertikálních profilů k jejímu vsunutí do klipu kotvy, který ji přidržuje na místě pro montáž. Šířka pootevření klipu kotvy se bude lišit v závislosti na tloušťce profilu, který je do klipu vsunutý. Výchozí pootevření klipu je přibližně 1,5 mm, přičemž se používají profily tloušťky 1,8 mm a 2 mm. Pootevření klipu se může tedy lišit v závislosti na uvedených okolnostech.



Obrázek 24 – Šířka mezery u vyklenutí se řídí podle tloušťky profilu

V rámci modelování citlivostní analýzy byla práce započata ve výchozí rovnoběžné poloze klipu vzhledem k hlavní části kotvy, ale následně bylo kvůli potřebě napojit spolehlivě kotvu na profil vytvořeno větší pootevření. Byla zachována rovnoběžnost ve vyklenuté části, aby vyklenutí přesně přiléhalo na profil. Pokud by nebyla dodržena rovnoběžnost styku těchto ploch, ztěžovali bychom program podmínky pro úspěšné sjednocení modelu v závěrečné části tvorby geometrie. Změnil se tedy pouze úhel mezi plochými částmi kotvy. Jednalo se o rozšíření mezery u vyklenutí o 0,5 mm. Pro tloušťku profilu 1,8 mm se jednalo jen o 0,3 mm.

Při vložení profilu bylo nutné zvýšit podrobnost výpočetní sítě profilu a zároveň zvýšit podrobnost minerální vaty v běžné ploše, protože se profilu dotýkala. Podrobnost minerální vaty byla stanovena na úroveň podrobnosti zpřesňujícího válce „Finer“ a samotný zpřesňující válec byl přesunut do kategorie „Extra Fine“, tedy předposlední nejpřesnější možné.

Při modelování profilu vznikly další problémy. Jednoduše řečeno, nebylo ho nějakou dobu možné vytvořit v programu ani do programu importovat. Příčina toho problému spočívala v geometrii. Po zkrácení lišty tak, aby nikoli nepřesahovala, ale ani nedosahovala celkové délky 1 m, tedy aby končila před hranou posuzovaného výseku zdi, program geometrii bez problému přijal a sjednotil. Nebylo tedy možné lištu uvažovat metr dlouhou, ani s přesahem. Nicméně toto omezení není ve výsledku na škodu. Teplotní dilatace komponentů zavěšených fasád je jedna z obecně řešených problematik při jejich návrhu, není tedy ani na škodu uvažovat tento vliv při tepelně technických výpočtech cílících na prostup tepla a zahrnout zkrácení profilu vlivem dilatačních mezer do geometrie. Byl proveden následující výpočet pro ověření teplotního dilatování profilu.

Koeficient teplotní roztažnosti slitiny hliníku:  $\alpha = 0,0000234 \text{ m}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Délka profilu:  $l_0 = 1 \text{ m}$

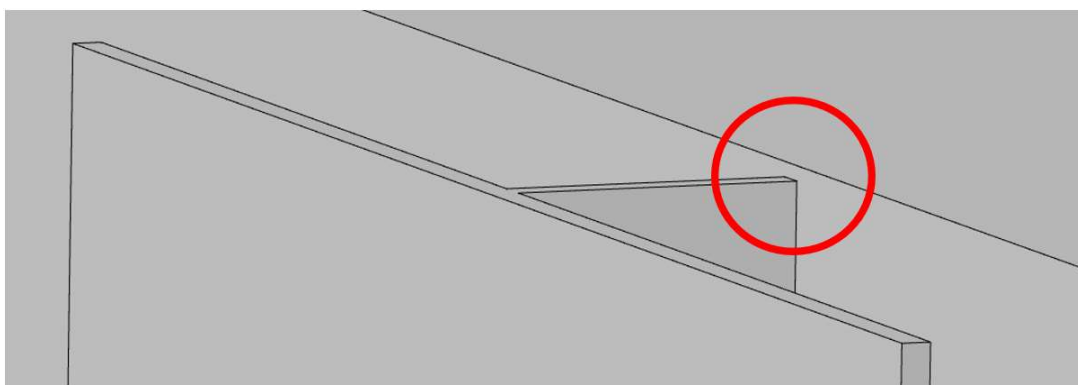
Uvažovaný rozdíl teplot:  $\Delta t = 60 \text{ K}$

Podle vzorce:  $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \text{ [m]}$  (1)

Protážení:  $\Delta l = 0,00140 \text{ m}$

Dilatační mezera stanovena na 0,002 m

Délka profilu po zahrnutí dilatační mezery: 0,998 m



Obrázek 25 – Odstup profilu od hrany modelu

Výsledek výpočtu teplotní roztažnosti vyhovoval požadavku na zkrácení profilu vycházejícímu z neznámého omezení při tvorbě geometrie a zároveň byl velmi dobře modelovatelný a kontrolovatelný co do požadavku odstupu 1 mm od hrany modelu.

Výsledek 3D konstrukce s profilem byl násobě odlišný než referenční varianta, a tak bylo ve variantě č. 4 posouzeno jaký vliv a jestli má konkrétní hloubka zanoření profilu v minerální vatě. Bylo zvoleno zmenšit zanoření, protože už hloubka zanoření testovaná v předchozím kroku byla nereálná. Profil byl tedy povysunut o 10 mm ven, byla provedena zběžná kontrola přiřazení materiálů, opětovně úspěšně provedeno generování výpočetní



sítě podle stejných podmínek a byl znovu proveden výpočet. Tentokrát došlo opět k výrazné změně výsledku.

Varianta č. 5 měla za cíl ověřit, jestli má na výsledek vliv nejen míra zanoření profilu do minerální vaty, ale i rozměry profilu, a to rozměry částí bez dotyku s minerální vatou. Profil byl upraven tak, že část rovnoběžná s rovinou zdi byla zúžena ve vodorovném směru. Je to ta část, na kterou se později kotví obklad. Výsledné rozměry profilu byly tak 60x120x2 mm namísto 60x140x2 mm. Zanoření profilu v minerální vatě zůstalo stejné a stejně tak i mezera mezi rovnoběžnou částí profilu a zdí. Výsledky se tentokrát lišily o pouhých 6 statisícin wattu. Na součinitel prostupu tepla ani na bodový činitel prostupu tepla posuzovaným detailem neměla změna vliv. Změna měla příznivý trend a tepelný tok zmírňovala, výsledek byl tedy v očekávaném smyslu.

Ve variantě č. 6 došlo k zúžení tloušťky celého profilu na 1,8 mm. Výsledné rozměry byly tak 60x120x1,8 mm namísto výchozích 160x140x2 mm. Zanoření profilu zůstalo stejné jako v předchozí variantě. Výsledek byl opět obdobný. I přes snížení tepelného toku na straně interiéru o 69 desetitisícin neměla změna na výsledek součinitele prostupu tepla ani bodový činitel prostupu tepla žádný vliv. Trend byl i v tomto případě dle očekávání a zmenšením objemu materiálu profilu se tepelný tok snížil. Prozatím se zdálo, že výsledky získané na základě simulace v tomto programu jsou spolehlivé a dávají smysl. Nejistotu ohledně spolehlivosti výsledků přinesla až analýza vlivu obkladu.

### 3.4.3 Obklad

Obklad byl modelován jako souvislý kvádr o tloušťce 1 mm objektem přímo v programu. V další fázi citlivostní analýzy bylo ale nutné modelovat obklad v dalších tvarových variantách, při kterých se objevily omezení obdobná těm zmiňovaným v souvislosti s profilem. Pokud pokrýval obklad celou plochu 1 m<sup>2</sup> a byl umístěn v zákrytu se zbytkem modelu nedělala geometrie žádné problémy a program byl schopen ji sjednotit, ale pokud ji na horní nebo dolní straně překračoval, sjednocení nebylo možné. Důvodem pro modelování dalších tvarových variant byla rozporuplnost výsledků s fyzikálními předpoklady a očekávanými trendy hodnot. Po přidání obkladu ve variantě č. 7 došlo totiž ke snížení bodového činitele prostupu tepla o 4 desetitisíciny W/K namísto jeho zvýšení.

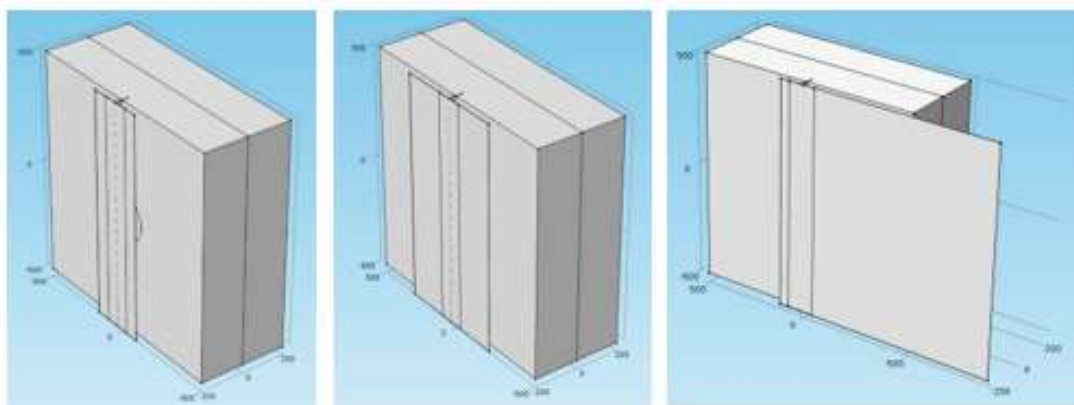
Předpoklad, že by se mělo jednat o zvýšení tepelného toku a nikoli snížení se zakládá na úvaze, že přidaný kovový obklad by mohl fungovat jako přídatný výměník tepla, který zvyšuje plochu, na které výměna tepla probíhá. Výsledky byly ale opačné, a proto bylo rozhodnuto rozpracovat

tento bod, aby byla výše popsaná hypotéza buď vyvrácena nebo potvrzena. Bylo provedeno dalších devět variant, které testovaly chování programu. Nejprve byl testován vliv velikosti obkladu, poté jeho umístění posouváním horizontálně vodorovně s plochou zdi (po ose y, výchozí pozice desky je -500) a nakonec byl zkoušen alternativní materiál a jiná tloušťka plechu. Následující tabulka shrnuje výsledky této části.

Tabulka 6 – Dodatečná analýza vlivu obkladu

varianta	popis, účel porovnání	Ht,q0 int [W]	x [W/K]	U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
7.1	čtvrtina obkladu	5,93866	0,0026	0,170
7.2	poloviční plocha obkladu	5,93654	0,0025	0,170
7.3	polovina s pozicí y= -100	5,93522	0,0025	0,170
7.4	celá s pozicí y= -100	5,95064	0,0029	0,170
7.5	celá s pozicí y= -300	5,93264	0,0024	0,170
7.6	celá s pozicí y= -700	5,93168	0,0024	0,169
7.7	celá s pozicí y= -900	5,95064	0,0029	0,170
7.8	tl. 2 mm	5,94551	0,0028	0,170
7.9	cementotřískový tl. 8 mm	5,94678	0,0028	0,170

Jak bylo řečeno, nebylo možné obklad posouvat po ose z, tedy vertikálně vodorovně s plochou zdi. Nebylo také možné posouvat obklad tak, aby byl jeho styk s profilem pouze částečný. Nebylo ani možné dát hrany profilu a obkladu do zákrytu. Obklad musel přesahovat profil na všech stranách alespoň o minimální vzdálenost. Čtvrtina obkladu byla tedy umístěna přímo na střed a stejně tak polovina (viz následující obrázek). Na obrázku se prokreslují obrysy profilu skrz obklad, i přestože profil obkladem neprostopuje. Zkreslení je výsledkem grafického zobrazení programu. Je zde uveden i jeden z případů posunu celé desky.



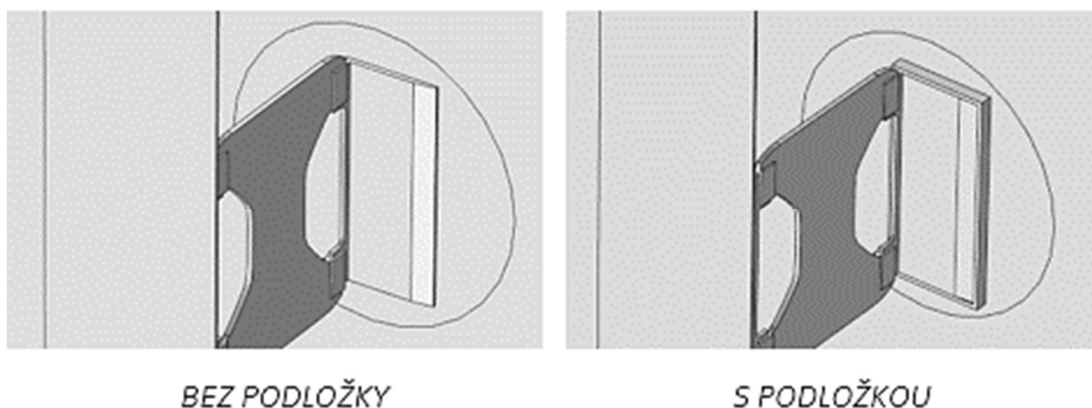
Obrázek 26 – Zleva: čtvrtina obkladu, polovina obkladu a celý obklad s posunem y = - 900

Jak je vidět z výsledků uvedených v tabulce výše, jsou značně rozporuplné. Dochází zde k zvýšení tepelného toku, pokud je vychýlení obkladu velké, a na druhou stranu, pokud snížíme plochu obkladu, dojde také ke zvýšení tepelného toku. Alespoň změna materiálu poskytuje vysvětlitelné výsledky. Nicméně nemůžeme na základě nich udělat žádný obecně platný závěr, vliv obkladu vyloučit nebo potvrdit.

Nakonec bylo přistoupeno k pokusu použít pro výpočet nikoli iterační metodu výpočtu, ale přímou metodu výpočtu. Až tak bylo prokázáno, že obklad na výpočet bodového činitele prostupu tepla nemá vliv, protože hodnoty pro všechny varianty dodatečně testované pomocí přímé metody byly totožné. Bylo rozhodnuto obklad vyřadit z dalšího modelování. Více o přímé metodě a o rozboru výsledků získaných touto metodou v podkapitole „3.6 Přímá metoda výpočtu“. Dále pokračuje základní analýza vlivu jednotlivých komponent.

### 3.4.4 Podložka

Podložka jako varianta č. 8 byla testována ještě před prováděním dodatečné analýzy vlivu obkladu, a tak byla přidána do předchozí varianty č. 7 s obkladem. Podložka jako taková je importovaná 3D geometrie vytvořená v externím programu. Podložka má tloušťku 5 mm, její geometrie je jednoduchá. Podložka je systémovou součástí zavěšených fasád od společnosti Hilti, při podložení kotvy ji lemují navíc rámečkem o výšce 4 mm. Hliníková část kotvy kotvená k podkladu je tedy ohraničená podložkou nejen směrem k podkladu ale i do stran.



Obrázek 27 – Podložka ohraničující kotvu

Při přidávání tohoto importu bylo nutné geometrii upravit, protože podložka, která má tloušťku 5 mm, odsunuje kotvu od podkladu. Je tedy nutné posunout buď podklad a tepelný izolant a tím odsunout styk těchto

materiálů z počátku nebo upravit pozici ostatních importovaných komponent systému zavěšených fasád. Byl zvolen druhý přístup.

Jediné zjednodušení, které bylo v případě podložky zavedeno, je vynechání otvorů pro kotvení. Důvodem je problematické simulování vzduchu nebo dodatečného styku kotvy a podkladu skrze tyto otvory. Vliv těchto otvorů byl otestován ve variantě č. 9, kdy byla podložka testována s kotvením pomocí expanzních ocelových kotev, které simulují jak otvory, tak jejich vyplnění materiálem s vyšší tepelnou vodivostí, než má podložka i než by měl vzduch. Byl přijat závěr, že pokud je zanedbatelné kotvení je možné zanedbat i otvory, které jsou pro kotvení připraveny (viz podkapitola „3.4.1 Kotvení“).

Výsledný tepelný tok měřený na interiérové straně byl podle očekávání nižší. Došlo ke změně o pouhé 4 desetitisíciny W/K. Pro další potvrzení vlivu podložky byla provedena další dodatečná analýza vlivu podložky. Podložka byla přidána do modelu kde je pouze kotva (varianta č. 1) a dále do modelu s profilem bez obkladu (varianta č. 6). Vzhledem k těmto variantám byly pak porovnávány výsledky nově testovaných 3D konstrukcí. Výsledky jsou v tabulce níže včetně variant k porovnání.

Tabulka 7 – Ukázka vlivu podložky

varianta	popis, účel porovnání	Ht,q0 int [W]	$\chi$ [W/K]	U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
1	referenční varianta	5,90641	0,0016	0,169
1a	kotva s podložkou	5,90323	0,0016	0,169
6	5+ profil 60x120x1,8, 30 v izolaci	5,94695	0,0028	0,170
6a	lišta s podložkou	5,93192	0,0024	0,169

Výsledky nejsou úplně konzistentní. Výsledek pro samotnou kotvu s podložkou je velice podobný jako výsledek pro samotnou kotvu. Rozdíl mezi bodovými činiteli prostupu tepla pro varianty 6 a 6a je velice podobný jako byl rozdíl variant 7 a 8 v souhrnné tabulce 5. Je otázka, jaký vliv podložka skutečně má, ale zdá se, že není možné ji zanedbat, proto bude do dalšího modelování zahrnuta.

### 3.4.5 Vliv podkladu

Následně byl ověřen vliv podkladu na změnu hodnot bodového činitele prostupu tepla. Vliv podkladu byl považován spíše za výchozí předpoklad, protože například už v práci (14) uvedené dříve, se vliv podkladu uvažuje jakožto jedna z proměnných při stanovení zhoršujícího vlivu součinitele prostupu tepla kotvou. Nicméně, vliv podkladu byl takto ověřen.

Vliv byl otestován pro pět uvažovaných podkladních typů konstrukcí s materiálovými charakteristikami podkladu odpovídajícího hodnotám uvedeným již v tabulce 2. A to za stejných podmínek jako dosavadní varianty citlivostní analýzy, tedy při neměnném zateplení tepelným izolantem tloušťky 200 mm s tepelnou vodivostí 0,035 W/(m·K). V následující tabulce jsou shrnuty hodnoty tepelného toku na vnitřní straně konstrukce ( $H_t, q_0 \text{ int}$ ) ze kterých se dopočítává součinitel prostupu tepla stěny s kotvou ( $U_{(s \text{ kotvou})}$ ). Součinitel původní stěny bez kotvy pro každou variantu ( $U_{(\text{stěny})}$ ) je uveden pro dopočítání bodového činitele prostupu tepla ( $\chi$ ).

*Tabulka 8 – Vliv tepelného odporu podkladu na bodový činitel prostupu tepla při neměnném zateplení*

varianta	specifikace podkladu	$H_t, q_0 \text{ int}$ [W]	$\chi$ [W]	$U_{(s \text{ kotvou})}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	$U_{(\text{stěny})}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
R-0,1	$\lambda = 1,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , $d = 0,18 \text{ m}$	5,91755	0,0020	0,169	0,167
R-0,4	$\lambda = 0,75 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , $d = 0,3 \text{ m}$	5,63133	0,0018	0,161	0,159
R-1,0	$\lambda = 0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , $d = 0,3 \text{ m}$	5,13490	0,0015	0,147	0,145
R-2,0	$\lambda = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , $d = 0,3 \text{ m}$	4,47728	0,0011	0,128	0,127
R-4,0	$\lambda = 0,075 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , $d = 0,3 \text{ m}$	3,56490	0,0007	0,102	0,101

### 3.4.6 Vliv materiálu

Dále byl ověřen vliv tepelné vodivosti minerální vaty na bodový činitel prostupu tepla. V následující tabulce jsou shrnuty hodnoty tepelného toku na vnitřní straně konstrukce ( $H_t, q_0 \text{ int}$ ) ze kterých se dopočítává součinitel prostupu tepla stěny s kotvou ( $U_{(s \text{ kotvou})}$ ). Součinitel původní stěny bez kotvy pro každou variantu ( $U_{(stěny)}$ ) je uveden pro dopočítání bodového činitele prostupu tepla ( $\chi$ ).

Je vidět, že tepelná vodivost minerální vaty nemá až takový vliv na výsledný bodový činitel prostupu tepla. Jen minerální vaty s horší tepelnou vodivostí než  $0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , které jsou dnes spíše výjimkou, vykazují zhoršení. Z uvedených výsledků vyplývá, že vliv změny tepelné vodivosti minerální vaty lze zanedbat nebo nahradit přírážkou pro mezní případy.

*Tabulka 9 – Vliv tepelné vodivosti minerální vaty na bodový činitel prostupu tepla při neměnném podkladu*

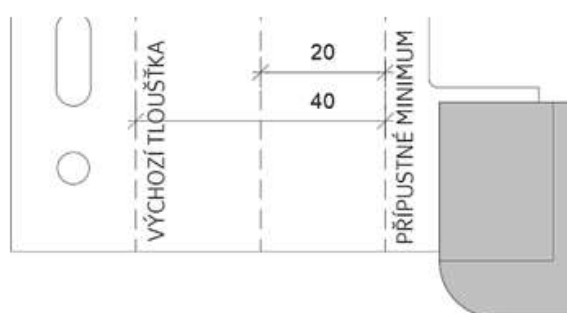
varianta	specifikace zateplení	$H_t, q_0 \text{ int}$ [W]	$\chi$ [W]	$U_{(s \text{ kotvou})}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	$U_{(stěny)}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
MV35	$\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , $d = 0,2 \text{ m}$	5,91755	0,0020	0,169	0,167
MV37	$\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , $d = 0,2 \text{ m}$	6,23721	0,0020	0,178	0,176
MV39	$\lambda = 0,039 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , $d = 0,2 \text{ m}$	6,55520	0,0020	0,187	0,185
MV41	$\lambda = 0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , $d = 0,2 \text{ m}$	6,87155	0,0021	0,196	0,194
MV43	$\lambda = 0,043 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , $d = 0,2 \text{ m}$	7,18627	0,0021	0,205	0,203

### 3.4.7 Vliv pozice polyamidu

Dále byl ověřen vliv různé tloušťky zateplení na stejné kotvě. Návrh zavěšené fasády začíná stanovením tloušťky zateplení, ostatní skutečnosti se jím řídí. Při realizaci je potřeba dodržet také minimální šířku provětrávané mezery 30 mm. Nerovnost podkladu vystupující nad rovinu může způsobit zúžení této mezery. Navrhuje se proto spíše širší, aby byla rezerva v případě potřeby. Pokud to není možné volí se minerální vata s lepší tepelnou vodivostí, která dovolí snížit tloušťku požadovaného zateplení a zachová požadovanou šířku provětrávané mezery.



UKÁZKA DLE HILTI



UKÁZKA ROZMĚROVÝCH POMĚRŮ

Obrázek 28 – Míra zanoření kotvy do minerální vaty

V rámci této analýzy bylo zjištěno, že vliv překrytí polyamidu tepelnou izolací je značný. Lépe řečeno, míra zanoření hliníkové části na vnější straně kotvy je značná. Čím hlouběji hliníková část vstupuje do minerální vaty, tím vyšší tepelný tok na vnitřní straně konstrukce. Ale vzhledem k výše řečenému, totiž že realizace se řídí požadavky na provětrávanou mezeru a tloušťku zateplení a snaží se tyto požadavky splnit za reálných nepředvídatelných podmínek na stavbě, není možné s tímto vlivem uvažovat. Pro další modelování je vhodné pokračovat v posuzování výchozí tloušťky zateplení, která je stanovena na přesah přípustného minima o 40 mm.

Tabulka 10 – Vliv míry zanoření kotvy do minerální vaty

varianta	Tloušťka zateplení	Ht,q0 int [W]	$\chi$ [W]	$U_{(s \text{ kotvou})}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	$U_{(stěny)}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
1	MV 200 mm (výchozí tloušťka)	5,90641	0,0016	0,169	0,167
1b	MV 180 mm	6,50806	0,0009	0,186	0,185
1b - 2	MV 160 mm (přípustné min)	7,25716	0,0003	0,207	0,207

### 3.5 Odchylka iterační metody

Od začátku práce v programu byly všechny výpočty prováděny pomocí iterační metody výpočtu. Iterační metoda výpočtu má tu výhodu, že je rychlejší. Druhou její stránkou je, že není vždy tak přesná, a jak se ukázalo v průběhu dodatečné analýzy vlivu obkladu na hodnoty tepelného toku, ani tak spolehlivá. Všechny hodnoty tepelného toku doposud prezentované byly odečítány na vnitřní straně konstrukce, i když při každém výpočtu během citlivostní analýzy byly zaznamenávány také hodnoty tepelného toku na vnější straně konstrukce. Zpočátku práce sloužilo porovnání obou hodnot, uvnitř a vně, jako kontrola správnosti zadání, protože se předpokládalo, že tepelný tok na obou stranách konstrukce musí být shodný. Nicméně už při citlivostní analýze vlivu podrobnosti výpočetní sítě byly hodnoty odlišné, aniž by byla plocha, na které se tepelný tok zaznamenával, odlišná. Už v této první fázi byly hodnoty odečítané na vnitřním povrchu konzistentnější, a tak jim byla přikládána vyšší důležitost.

Rozdíl mezi hodnotami uvnitř a vně byl zpočátku v řádech tisícín a desetitísícín, ale po přidávání jednotlivých komponentů systému zavěšených fasád se zvyšoval až na rozdíly v řádech desetin. To už je významný rozdíl poskytující výsledky docela jiné povahy. Příklad rozdílů v následující tabulce.

Tabulka 11 – Rozdíl tepelných toků na vnější a vnitřní straně konstrukce

varianta	interiér		exteriér		rozdíl tepelných toků [W]
	Ht,q0 int [W]	$\chi$ [W/K]	Ht,q0 ext [W]	$\chi$ [W/K]	
0	5,84877		-5,85105		-0,0023
1	5,90641	0,0016	-5,90794	-0,0016	-0,0015
2	5,90646	0,0016	-5,90751	-0,0016	-0,0011
3	5,97455	0,0036	-5,96362	-0,0032	0,0109
4	5,94770	0,0028	-5,94702	-0,0027	0,0007
5	5,94764	0,0028	-5,94707	-0,0027	0,0006
6	5,94695	0,0028	-5,94646	-0,0027	0,0005
7	5,93415	0,0024	-5,82230	-0,0008	0,1119
8	5,91740	0,0020	-5,79868	-0,0015	0,1187
9	5,91803	0,0020	-5,79524	-0,0016	0,1228

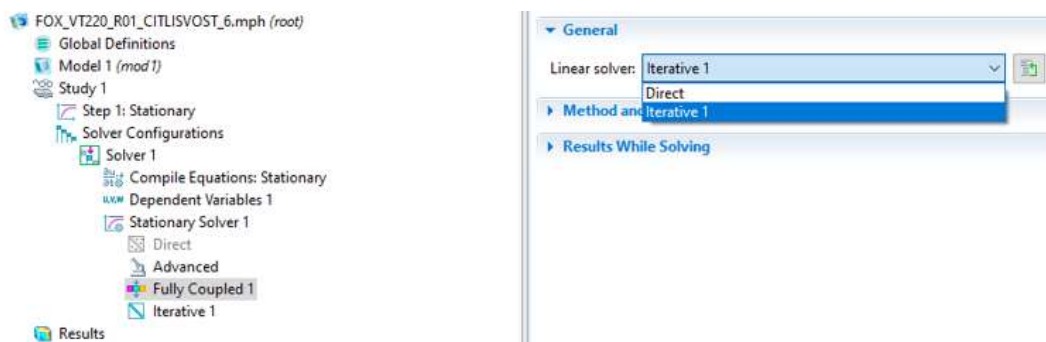


Můžeme si všimnout, že odchylka není konzistentní, i když při modelování obkladu roste významně, jedná se o velmi odlišné hodnoty. Podle hodnot odečítaných na vnější straně konstrukce nelze postupovat, protože neposkytují konzistentní obraz přenosu tepla modelem. Tento jev si lze snad vysvětlit odečítáním tepelného toku na všech vysunutých tenkých částech do prostoru, které mají teplotu exteriéru, nepodílí se na prostupu tepla stěnou, ale protože je přes jejich plochu odečítána hodnota tepelného toku, zkreslují výsledky. Tento odhad příčiny rozdílu hodnot je nepodložený.

Nekonzistentní výsledky byly problémem zejména při dodatečné analýze vlivu obkladu. Po další úvaze bylo přistoupeno k pokusu provést výpočet na těchto modelech znovu a tentokrát pomocí přímé metody výpočtu.

### 3.6 Přímá metoda výpočtu

Přímá metoda výpočtu je přesnější, ale doba výpočtu je poměrně značně delší. Například model, který má po vygenerování výpočetní síť 729 864 stupňů volnosti, program spočítal přímou metodou za 93 sekund, zatímco iterační metodou za 27 sekund. Platí, že čím vyšší počet stupňů volnosti modelu, tím delší doba výpočtu. Ukázkové srovnání bylo provedeno na variantě č. 6 ze základní citlivostní analýzy. Místo v programu, kde se dá vybrat metoda výpočtu je ukázáno na obrázku níže.



Obrázek 29 – Místo ovládání metody výpočtu

Protože je tato metoda časově náročnější byla nejprve přepočítána jen dodatečná analýza vlivu obkladu. V modelu nebyly kromě změny metody výpočtu provedeny žádné změny. Výsledky umožňující srovnání s iterační metodou výpočtu jsou vidět v tabulce níže.

Tabulka 12 – Srovnání výsledků iterační a přímé metody výpočtu citlivostní analýzy vlivu obkladu

varianta	iterační metoda		přímá metoda	
	Ht,q0 int [W]	x [W/K]	Ht,q0 int [W]	x [W/K]
7.1	5,93866	0,0026	5,94749	0,0028
7.2	5,93654	0,0025	5,94751	0,0028
7.3	5,93522	0,0025	5,94750	0,0028
7.4	5,95064	0,0029	5,94750	0,0028
7.5	5,93264	0,0024	5,94754	0,0028
7.6	5,93168	0,0024	5,94753	0,0028
7.7	5,95064	0,0029	5,94750	0,0028
7.8	5,94551	0,0028	5,94758	0,0028
7.9	5,94678	0,0028	5,94724	0,0028

Dále bylo pro jistotu zopakováno ještě deset variant základní citlivostní analýzy, kdy výsledky byly téměř totožné s výjimkou tří posledních variant, kde byl součástí modelu obklad.

Tabulka 13 – Srovnání výsledků iterační a přímé metody výpočtu základní citlivostní analýzy

varianta	iterační metoda		přímá metoda	
	Ht,q0 int [W]	x [W/K]	Ht,q0 int [W]	x [W/K]
0	5,84877	0,0000	5,84878	0,0000
1	5,90641	0,0016	5,90653	0,0017
2	5,90646	0,0016	5,90658	0,0017
3	5,97455	0,0036	5,97607	0,0036
4	5,94770	0,0028	5,94798	0,0028
5	5,94764	0,0028	5,94789	0,0028
6	5,94695	0,0028	5,94723	0,0028
7	5,93415	0,0024	5,94751	0,0028
8	5,91740	0,0020	5,93212	0,0024
9	5,91803	0,0020	5,93283	0,0024

Jak můžeme vidět výsledky přímé iterační metody byly konzistentní. Veškeré varianty, kde figuroval v modelu obklad, vyšly co do bodového

činitele prostupu tepla stejně. Tím byl vyloučen vliv tohoto komponentu a obklad nebude v dalším modelování uvažován. Vliv podložky byl stejný jako v případě iterační metody, hodnota bodového činitele prostupu tepla byla o 4 deseti tisícin wattu nižším než srovnatelné varianty bez podložky. Zároveň byly potvrzeny výsledky kotvení a závěr, že kotvení, ať už bez podložky nebo skrze podložku, nemá na výsledné hodnoty vliv.

V části modelování většího množství výsledků pro získání dostatečného množství dat k odvození zjednodušeného výpočetního vztahu bude uvažováno s kotvou, lištou a podložkou jako komponenty systému zavěšených fasád, které mají na výslednou hodnotu bodového činitele prostupu tepla vliv.

# Kapitola 4

## Výsledky

Po provedení citlivostní analýzy bylo možné postupovat vytyčeným směrem a pomocí 3D výpočtů 3D konstrukcí získat dostatečné množství dat pro vytvoření přibližného výpočetní vztahu. Komponenty systému zavěšených fasád, které je nutné zahrnout pro jejich vliv na výsledný bodový činitel prostupu tepla v požadované přesnosti, jsou kotva, profil a podložka. Dále bude popsán celý proces získávání dat, jejich rozbor a další zjištěné skutečnosti. Celkem bylo v této části práce namodelováno 230 modelů.

### 4.1 Zadávání

Okrajové podmínky zůstávají stejné jako při zadávání citlivostní analýzy, viz. podkapitola „3.1 Okrajové podmínky“. Materiálové charakteristiky se také nemění a byly zadávány podle tabulek uvedených v podkapitole „3.2 Materiálové charakteristiky.“ Podrobnost výpočetní sítě byla zvolena obdobně citlivostní analýze, bez dostatečné podrobnosti nelze výpočetní síť vytvořit a zároveň, jak se ukázalo v podkapitole „3.3 Podrobnost výpočetní sítě“, má vliv na přesnost výsledků, pokud se týká kritických míst posuzované 3D konstrukce. Pro všechny komponenty kotvy byla proto volena podrobnost v druhé nejvyšší úrovni. Podrobnost pro zpřesňující válec, minerální vatu a podkladní konstrukci se pro jednotlivé případy různila, protože se řídila požadavky způsobenými importovanými komponenty. Opakovaný import komponentů byl prováděn pokaždé při změně kotvy. Výsledky byly odečítány stejným způsobem, jak je popsáno v podkapitole „2.8 Výsledky: odečet hodnoty pro výpočet  $\chi$ “. Získaná data byla vždy zaznamenávána, posouzena, případně opravena. Výpočet bodového činitele prostupu tepla, referenčních hodnot součinitele prostupu tepla a součinitele prostupu tepla byly počítány podle vzorců uvedených v podkapitole „5.1 Výpočetní vztahy pro zpracování dat z 3D výpočtu“.

## 4.2 Referenční varianty

Smysl výrazu „referenční varianta“ není totožný s přístupem v citlivostní analýze, kde byla za referenční variantu považována 3D konstrukce s kotvou. Důvodem bylo dopočítávání rozdílu mezi 3D konstrukcí s kotvou a 3D konstrukcemi s dalšími komponenty, aby byl zjištěn jejich vliv. Pokud není výslovně uvedeno jinak, je v této podkapitole a všech dalších myšlena referenčními variantami 3D konstrukce bez kotvy nebo jakýchkoli jiných komponentů systému zavěšených fasád. Jedná se pouze o podkladní konstrukci, která je zateplená minerální vatou. Zpřesňující válec je zachován ve všech případech, i přestože není nutný, aby se minimalizovalo riziko nechtěného zkreslení dat. I přestože citlivostní analýza byla poměrně podrobná, je třeba eliminovat riziko vzniku chyby tedy množství odlišnosti mezi posuzovanými variantami, pokud je to možné.

Referenční varianty sloužili pro stanovení hodnoty součinitele prostupu tepla, který se používá později pro výpočet bodového činitele prostupu tepla u variant s jednotlivými komponenty systému zavěšených fasád. Bodový činitel prostupu tepla se pro referenční variantu nestanovuje, respektive je roven nule.

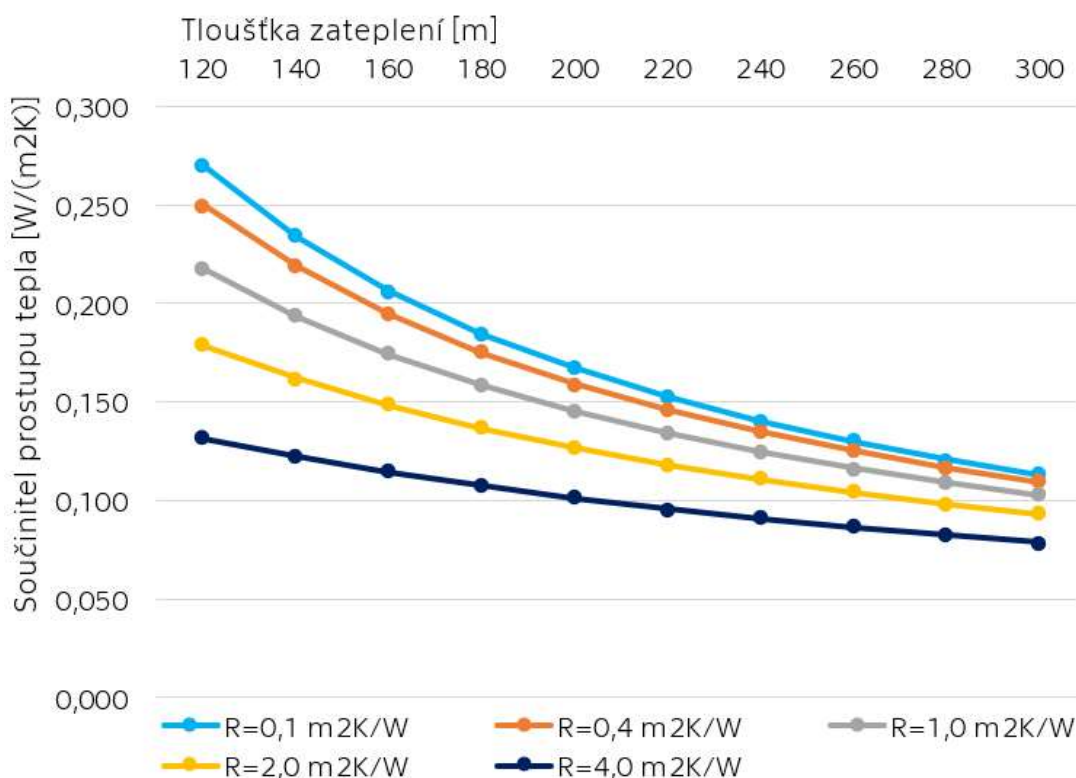
Data byla uspořádávána do tabulky s přiřazeným ID dle pořadí zpracování, byly zaznamenávány hodnoty tepelného toku na vnitřní straně 3D konstrukce a z nich byl vypočten součinitel prostupu tepla. Dalšími určujícími hodnotami pro přiřazování referenčních variant k variantám s komponenty systému zavěšených fasád byly tepelný odpor podkladu, tepelná vodivost minerální vaty a tloušťka minerální vaty.

ID	Ht,q0 int [W]	U ref [W/m2K]	PODKLAD R [m2K/W]	λ VATY [W/mK]	tI, VATY [mm]
Ur01	9,463473	0,270	0,1	0,035	120
Ur02	5,848670	0,167	0,1	0,035	200

Obrázek 30 – Ukázka z tabulky pro zaznamenávání referenčních variant

Nejprve byly ale modelovány jen tři vybrané tloušťky zateplení. Zpočátku nebylo jasné, kolik bude potřeba hodnot k vytvoření přibližného výpočetního vztahu. Jak bude dále popsáno, později byly přidány další varianty, pro každou kotvu a každý podklad jedna referenční varianta. Pořadí modelování jednotlivých variant se řídilo získanými výsledky a nutností jejich doplnění. Kotvy jsou odstupňovány po 20 mm, výchozí tloušťka zateplení je o 20 mm menší, než je délka kotvy. Pro kotvu s označením FOX-VT 140, která je dlouhá 140 mm je výchozí tloušťkou zateplení 120 mm, jak je popsáno v podkapitole „3.4.7 Vliv pozice

polyamidu“. Později při tvorbě výpočetního vztahu bylo rozhodnuto dopočítat ještě mezilehlou variantu pro tloušťku zateplení 150 mm, kterou v grafu níže neuvádím. Celá tabulka všech referenčních variant je přílohou této práce. Celkem bylo modelováno 55 referenčních variant (včetně mezilehlých, neuvedených v grafu). Graf zobrazuje hodnoty součinitele prostupu tepla referenční 3D konstrukce v závislosti na tloušťce zateplení pro každý posuzovaný tepelný odpor podkladní konstrukce.



Obrázek 31 – Hodnoty referenčního součinitele prostupu tepla pro jednotlivé podkladní konstrukce z 3D výpočtu 3D konstrukce

### 4.3 První fáze 3D výpočtů – částečná data

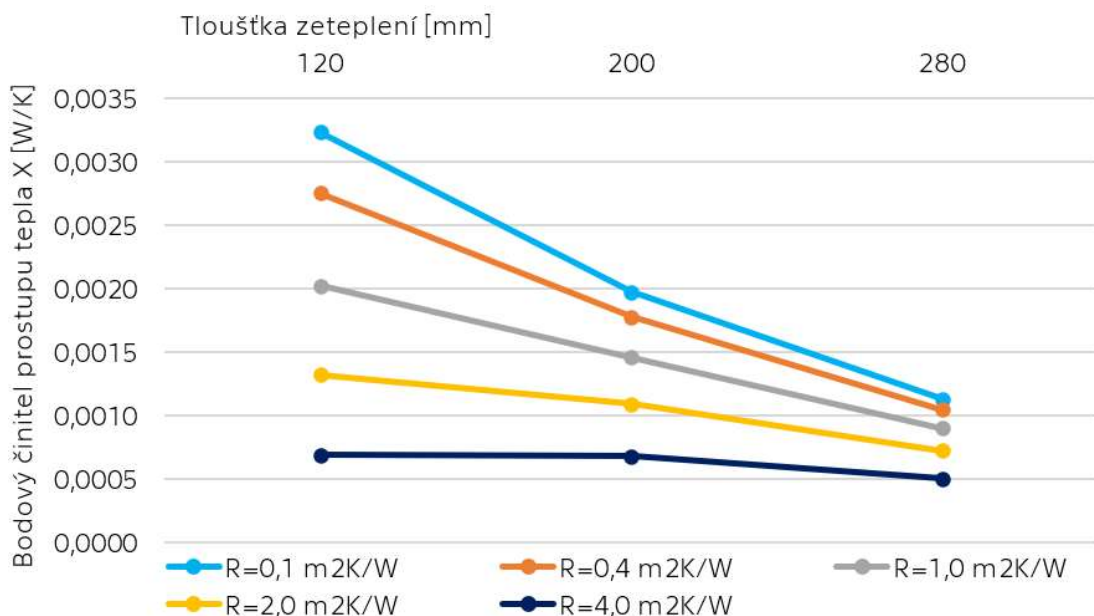
Pro zaznamenávání výsledků 3D výpočtů 3D konstrukcí byla vytvořena obdobná tabulka jako pro referenční varianty. Sledovaných parametrů bylo více i s ohledem na nemožnost stoprocentně předpovědět směr budoucího vývoje práce. Byly tedy zaznamenávány údaje, které nebyly v dalších fázích práce potřebné. Ukázkou z tabulky uvádím níže jako obrázek. Bylo zaznamenáváno třídící ID podle pořadí vypracování 3D výpočtu, tepelný tok z 3D výpočtu zaznamenávaný na vnitřní straně 3D konstrukce, z něho byl dopočítán bodový činitel prostupu tepla pomocí stanoveného součinitele prostupu tepla a přiřazeného referenčního součinitele prostupu tepla na základě určujících parametrů, kterými byly tepelný odpor podkladu, tepelná vodivost minerální vaty a tloušťka

minerální vaty, které byly zaznamenávány pro každou variantu. Dále se zaznamenával typ kotvy, příznak, zda se jedná o variantu s podložkou nebo ne, příznak, zda byl použit profil, nakolik byl zanořen do minerální vaty a přesah minerální vaty přes minimální požadavek na překrytí polyamidové části vzhledem ke konkrétní modelované kotvě. Jako poslední byl zaznamenáván název souboru v úložišti autora práce a poznámka, která se ukázala jako nutná v pozdějších fázích práce, když chyběl sloupec pro zaznamenání způsobu výpočtu, který nebyl na počátku predikován.

VÝSLEDKY													
ID	Ht,q0 int [W]	χ [W/K]	U [W/m2K]	U ref [W/m2K]	KOTVA Typ	PODKLAD R [m2K/W]	PODLOŽKA ano/ne	LIŠTA ZANOŘENÍ [mm]	λ VATY [W/mK]	tl, VATY [mm]	přesah vaty přes min požadavek [mm]	soubor COMSOLU	metoda / poznámka
1	5,91773	0,0020	0,169	0,167	220	0,1	ne	ne	0,035	200	40	VT220_R-0,1_ti200	
2	5,63141	0,0018	0,161	0,159	220	0,4	ne	ne	0,035	200	40	VT220_R-0,4_ti200	

Obrázek 32 – Ukázka tabulky pro zaznamenávání dat

V první části práce byly tedy modelovány pouze výsledky pro kotvy FOX-VT 140, FOX-VT 220 a FOX-VT 300 pro všech pět uvažovaných podkladů. Jednalo se o první výsledky k získání náhledu na trend dat, aby bylo možné rozhodnout, jak postupovat dále. Bylo možné, že nebude potřeba modelovat všechny kotvy, protože hodnoty budou odpovídat spojitě funkci s jasným průběhem. Takové zjištění by ušetřilo mnoho práce, bylo ale nutné tuto hypotézu ověřit. Výsledky bodového činitele prostupu tepla dopočítaného na základě 3D výpočtu pro tyto tloušťky a všechny uvažované tepelné odpory podkladní konstrukce shrnuje následující graf. Celkem bylo v této fázi ve spojitosti s hodnotami pro 3D konstrukce s kotvami modelováno pouze 15 variant.

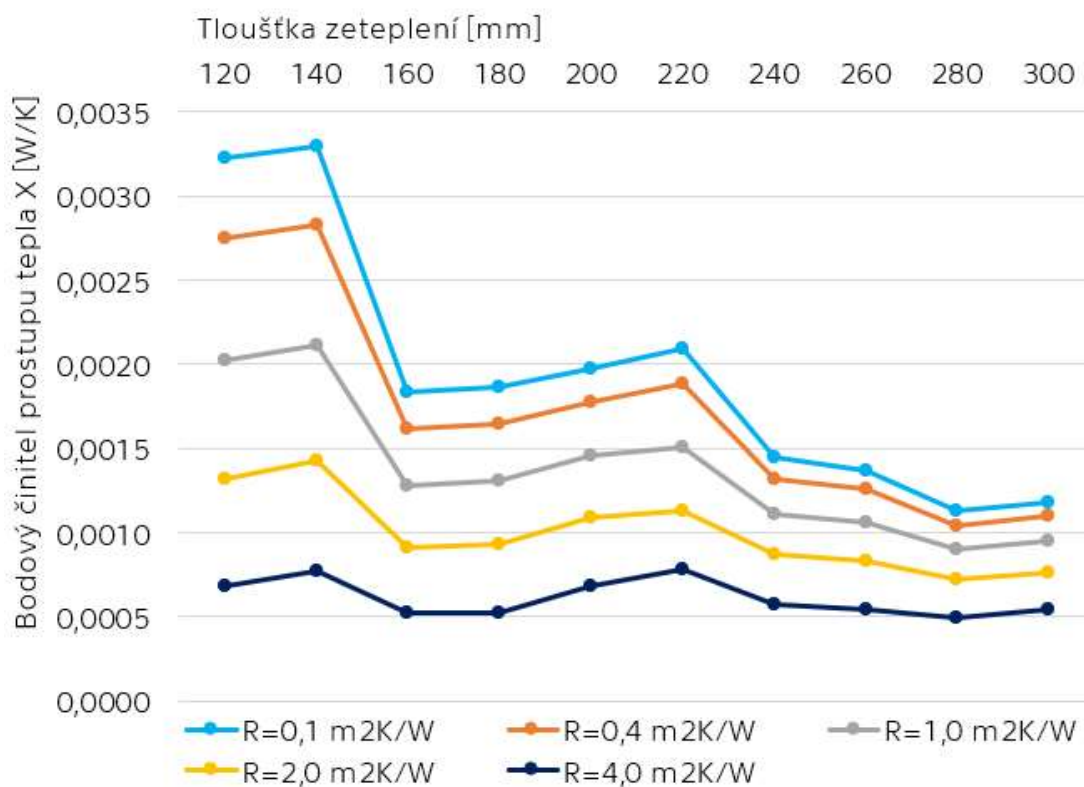


Obrázek 33 – Hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro jednotlivé podklady v první fázi modelování

Jak je z průběhu hodnot vidět pouhým okem vykazují odlišný nárůst hodnot bodového činitele prostupu tepla v jednotlivých tloušťkách zateplení. Také pro podklad s tepelným odporem  $4,0 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  hodnoty ani neklesají ani nerostou, zatímco pro podklad s nejnižším tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  jsou hodnoty výrazně klesající. Tento trend se ale následně neopakuje mezi hodnotami tloušťky zateplení 200 až 280, kde je funkce všude klesající s tím rozdílem, že pokles hodnot podkladu s nejnižším tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  je mírnější než v intervalu 120 až 200. Bylo tedy rozhodnuto modelovat hodnoty i pro další kotvy, aby byl průběh hodnot objasněn.

## 4.4 Doplnění dat kotev

V této fázi práce byly modelovány 3D konstrukce pro všechny zbývající kotvy. Nutnost tohoto zevrubného postupu získal na opodstatnění, když byly namodelovány výsledky pro jeden zvolený podklad, a ukázal se přibližný charakter dat. Souhrnná data pro bodový činitel prostupu tepla podle tloušťky zateplení pro všech pět variant podkladní konstrukce ukazuje graf níže. Pro tuto analýzu bylo namodelováno dalších 35 variant (není započítán stejný počet referenčních variant).

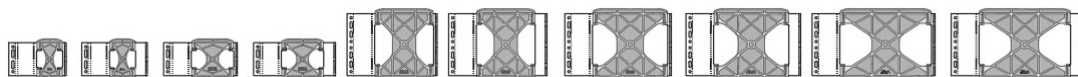


Obrázek 34 – Hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro jednotlivé podklady po doplnění dat



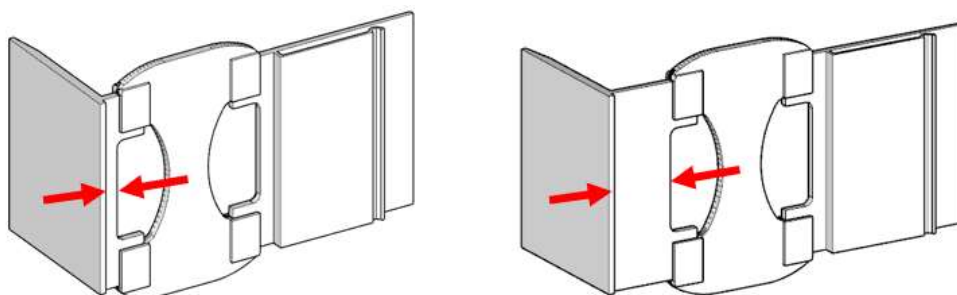
Je jasně vidět, že získaná data jsou značně nespojitá. Tyto výsledky jsou vysvětlitelné. Vidíme, že při postupu zleva doprava hodnoty bodového činitele prostupu tepla převážně klesají, což je způsobeno vyšší tloušťkou minerální vaty. Dále stejně jako u referenčních hodnot součinitele prostupu tepla dochází ke snižování hodnoty bodového činitele prostupu tepla se zvyšujícím se odporem podkladní konstrukce. Zároveň se snižuje rozdíl mezi extrémními hodnotami s rostoucím tepelným odporem podkladní konstrukce.

I změny trendu v závislosti na tloušťce zateplení jsou vysvětlitelné. Můžeme si všimnout, že ve všech variantách podkladní konstrukce jsou hodnoty bodového činitele prostupu tepla vyšší než pro další tloušťky minerální vaty. Následují potom čtyři postupně stoupající hodnoty a dále čtyři postupně klesající hodnoty. Pro pochopení průběhu hodnot je vhodné ukázat si tvarové řešení jednotlivých posuzovaných kotev a jak se liší podle délky. Kotvy jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Obrázek 35 – Všechny kotvy typu FOX seřazené podle velikosti (podklady z archivu autora práce poskytnuté společností Hilti)

Pro tloušťky zateplení 120 a 140 mm jsou určeny první dvě kotvy zleva. Vidíme, že se jedná o dvě kotvy, které mají stejnou polyamidovou část přerušující tepelný most. Jedná se tedy o přerušení tepelného mostu stejným tvarovým řešením polyamidové části. Rozdíl délek je způsobem odlišnou délkou hliníkové části kotvy, která je kotvená k podkladu.



Obrázek 36 – Prodloužení hliníkové části na straně od polyamidu směrem k interiéru mění délku kotvy

Vidíme, že hodnoty celého grafu pro každý podklad, můžeme rozdělit do dvojic. Vždy hodnoty pro tloušťky zateplení 120 a 140 mm, 160 a 180 mm, 200 a 220 mm, 240 a 260 mm a 280 a 300 mm tvoří dvojici hodnot, kdy nižší tloušťka zateplení vykazuje menší hodnotu bodového činitele prostupu tepla a vyšší hodnota zateplení větší hodnotu. Můžeme si všimnout, že tyto dvojice hodnot se vždy týkají jednoho a toho samého tvarového

zpracování polyamidové části kotvy. Tento trend je pravděpodobně způsoben právě delší hliníkovou částí blíže k interiéru. Toto prodloužení vždy způsobuje navýšení tepelného toku konstrukcí, protože dochází k navýšení teplosměrné plochy s vyšší tepelnou vodivostí. Toto prodloužení je správně umístěno na straně od polyamidové části směrem k interiéru, protože podle analýzy v podkapitole „3.4.7 Pozice polyamidu“ by umístění prodloužení směrem od polyamidové části k exteriéru způsobilo výrazné navýšení tepelného toku 3D konstrukcí.

Výjimkou z tohoto pravidla je dvojice hodnot 240 mm a 260 mm, kdy je trend hodnot bodového činitele prostupu tepla spíše klesající. Tyto hodnoty porušující jinak opakující se trend hodnot byly ověřeny, ale nebyla nalezena chyba v zadání 3D výpočtu 3D konstrukce. Rozdíl je nicméně maximálně jedna desetitisícina, ve třech z pěti případů jsou při zaokrouhlení na desetitisíciny hodnoty stejné, a navíc průběh hodnot součinitele prostupu tepla konstrukcí s kotvou je ve všech případech spojitý. Platnost souvislosti mezi délkou hliníkové části a zvýšením bodového činitele prostupu tepla není tedy vyloučena.

## 4.5 Vliv podložky

Už v první fázi 3D výpočtů byly modelovány varianty pro zjištění vlivu podložky, při doplňování dalších dat byl pak domodelován i zbytek variant. Celkem se jedná o dalších 50 variant zohledňujících vliv podložky. Vliv podložky byl prokázán jen pro nižší tloušťky zateplení, při tloušťkách nad 200 mm ztrácí aplikace podložky z hlediska tepelné techniky svůj význam. V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro variantu s podložkou a bez podložky pro všech pět variant podkladní konstrukce a tři tloušťky zateplení. Stěžejní jsou zde hodnoty v posledním sloupci demonstrující snížení bodového činitele prostupu tepla podložkou získaných jako rozdíl dvou přechozích hodnot.

Tabulka 14 – Vliv podložky na snížení bodového činitele prostupu tepla

tloušťka zateplení [mm]	podklad R [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	podložka		snížení $\chi$ [W/K] podložkou
		ano	ne	
		$\chi$ [W/K]		
120	0,1	0,0031	0,0032	0,0002
	0,4	0,0026	0,0028	0,0002
	1,0	0,0019	0,0020	0,0001
	2,0	0,0012	0,0013	0,0001
	4,0	0,0006	0,0007	0,0000

200	0,1	0,0019	0,0020	0,0001
	0,4	0,0017	0,0018	0,0001
	1,0	0,0014	0,0015	0,0001
	2,0	0,0010	0,0011	0,0001
	4,0	0,0006	0,0007	0,0000
280	0,1	0,0011	0,0011	0,0001
	0,4	0,0010	0,0010	0,0000
	1,0	0,0009	0,0009	0,0000
	2,0	0,0007	0,0007	0,0000
	4,0	0,0005	0,0005	0,0000

Hodnoty jsou zaokrouhlené, plný číselný rozvoj až do sedmého desetinného místa uvádím v příloze této práce, kde jsou uvedeny všechny hodnoty získané pomocí 3D výpočtů týkající se vlivu podložky. Žádná z hodnot „snížení  $\chi$  [W/K] podložkou“ nepřekračuje hodnotu 0,0002 W/K.

Je na místě podotknout, že hodnoty získané v této fázi práce neodpovídají hodnotám získaným během citlivostní analýzy. Během citlivostní analýzy byly získány dvě hodnoty snížení bodového činitele prostupu tepla a to 0 W/K a 0,0004 W/K, ale žádná z nových hodnot druhé uvedené hodnotě neodpovídá ani se jí neblíží. Touto nesrovnalostí vznikla určitá nejistota ohledně správnosti dat. Vždy je možné, že je během procesu zadávání do modelu vnesena systémová chyba, která se potom může opakovat ve všech navazujících modelech, které z původního vycházely, a tak se data z nich mohou zdát odpovídající. Nicméně s každým dalším modelem, který původní upravuje musí být provedena kontrola zadání a šance na to, že chyba zůstane neodhalena se snižuje.

Bylo rozhodnuto provést dodatečný 3D výpočet varianty s lištou i podložkou pro ověření správnosti zadání. Kromě citlivostní analýzy, nebyly doposud podložka a lišta modelovány společně v jednom modelu. Byl tedy opět namodelován případ odpovídající citlivostní analýze, variantě č. 6a. Nebyl použit model z citlivostní analýzy, ale byl vytvořen nový. Výsledky jsou shrnuty v tabulce níže.

Tabulka 15 – Ověření vlivu podložky

ID	Ht,q0 int [W]	$\chi$ [W/K]	U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	U ref [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	PODLOŽKA ano/ne
98	5,95780	0,0031	0,170	0,167	ne
176	5,95341	0,0030	0,170	0,167	ano

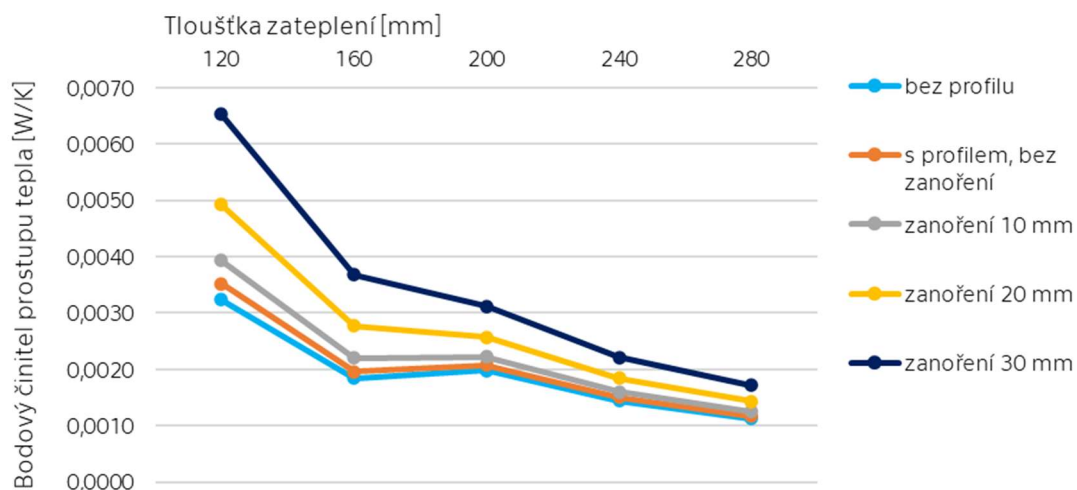
Vliv podložky v modelu s lištou i v modelu bez lišty je totožný a liší se od výsledků získaných v průběhu citlivostní analýzy. V obou případech je vliv

podložky roven 0,0001 W/K. Tato hodnota není výrazně zkreslená zaokrouhlením, plný desetinný rozvoj porovnávaných hodnot je pro ID98 = 0,00311806046757458 W/K a pro ID176 = 0,00299260994093457 W/K. Zjištěné hodnoty odpovídají také výsledkům zjištěných v ostatních částech této práce, které zde nejsou uvedeny. Je tedy mnohem pravděpodobnější, že došlo k chybě v zadání při provádění citlivostní analýzy. Byla tedy provedena zpětná kontrola zadání, při které bylo zjištěno, že se jedná o rozpor v hloubce zanoření profilu o 5 milimetrů. Tato nepřesnost vznikla pravděpodobně při přidávání podložky do modelu s profilem, kdy podložením kotvy dojde k jejímu povysunutí z tepelné izolace o dotčených 5 mm. Pozice profilu nebyla potom opravena, aby se hloubka zanoření do zateplení nezměnila. Citlivostní analýza tedy přecenila vliv podložky, který je ve skutečnosti menší.

## 4.6 Vliv profilu

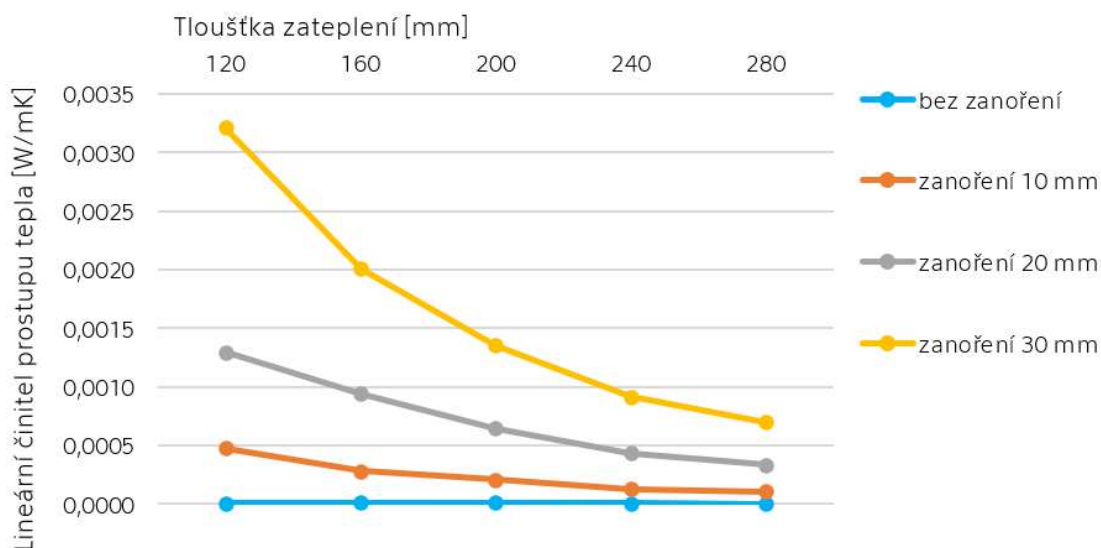
3D výpočty s profilem byly modelovány pro každou druhou kotvu počínaje kotvou VT-140, jejíž výchozí tloušťka zateplení je 120 mm, a konče kotvou VT-300, jejíž výchozí tloušťkou zateplení je 280 mm. Veškeré 3D výpočty byly prováděny na modelu s podkladním materiálem s tepelným odporem 0,1 (m<sup>2</sup>·K)/W. Měnila se pouze tloušťka tepelné izolace, příslušná kotva a míra zanoření profilu do tepelné izolace. Tepelná vodivost tepelné izolace byla i zde stále uvažována 0,035 W/(m·K), podložka nebyla zahrnuta. Byly modelovány tři hloubky zanoření profilu do tepelné izolace a navíc varianta s profilem, který se tepelné izolace jen dotýkal a hloubka zanoření byla nulová. Kromě toho byly modelovány také varianty, kdy byl profil jediným komponentem systému zavěšených fasád, který tvořil tepelný most v konstrukci. Celkem bylo v této části práce modelováno dalších 45 3D výpočtů.

Pokud je profil modelován jako součást 3D konstrukce, kde figuruje kotva, z tepelného toku odečítaného přes 1 m<sup>2</sup> je možné dopočítat bodový činitel, který lze uvažovat s jednotkou W/K, respektive součinitel prostupu tepla ve W/(m<sup>2</sup>·K). Nicméně pokud modelujeme pouze profil bez kotvy, je vhodné vzhledem k tomu, že se jedná o liniový prvek, uvádět výsledky v jednotkách W/(m·K), protože se jedná o lineární činitel prostupu tepla. Profil je nicméně modelován na jeden metr délky, a tak nemá tato formální úprava vliv na hodnoty výsledků dopočítávaných veličin a lze ji porovnávat s bodovým činitelem prostupu tepla. Délka profilu je v modelu sice 0,998 m, ale ve výpočtech není toto zkrácení zohledněno. Jedná se tedy o vědomé zkreslení výsledků, které je ale zanedbatelné.



Obrázek 37 – Vliv míry zanoření profilu do zateplení, s kotvou

Z uvedených grafů je možné vidět, že data pro vliv profilu bez kotvy jsou plynule klesající, zatímco data od vlivu kotvy a profilu nejsou. Když srovnáme graf vlivu kotvy a profilu s grafem zobrazující vliv pouze kotvy v předchozích podkapitolách, je vidět, že je to právě kotva, která vnáší do dat nepravidelnost, vliv ostatních komponentů systému zavěšených fasád je pravidelný. Navíc z předchozích podkapitol víme, že průběh bodového činitele prostupu tepla kolísá ještě mnohem více, než ukazují částečná data grafu výše.



Obrázek 38 – Vliv míry zanoření profilu do zateplení, bez kotvy

Protože je vliv samotného profilu takto plynule rostoucí, je možné, že by ho bylo možné uvažovat jako samostatný vliv nezávislý na kotvě, který je možné dodatečně k výsledku bodového činitele prostupu tepla přičíst. Následující tabulka demonstruje vliv profilu na příkladu výsledků kotvy délky 220 mm (tedy VT-220) a tloušťky zateplení 200 mm. V tabulce je zobrazen vliv samotného profilu na lineární činitel prostupu tepla (model

bez kotvy) a z něj vycházející součinitel prostupu tepla takové konstrukce. Dále je zde referenční součinitel prostupu tepla konstrukce bez zhoršujících vlivů komponentů zavěšených fasád a hloubka zanoření profilu. V předposledním sloupci jsou hodnoty bodových činitelů prostupu tepla z 3D výpočtů s profilem i kotvou, od kterých je v posledním sloupci odečten lineární činitel prostupu tepla profilu, aby bylo zjištěno, zda se hodnoty z rozdílu rovnají hodnotám samotné kotvy (kotvy bez profilu). Pokud by hodnoty bodového činitele prostupu tepla byly obdobné, bylo by možné uvažovat vliv profilu samostatně.

Tabulka 16 – Vliv profilu

ID	Profil $\psi$ [W/m·K]	U [W/m <sup>2</sup> ·K]	U <sub>ref</sub> [W/m <sup>2</sup> ·K]	Profil zanoření [mm]	kotva a profil $\chi$ [W/K]	rozdíl $\chi$ [W/K]
124	0,0000	0,167	0,167	0	0,0021	0,0021
125	0,0002	0,167	0,167	10	0,0022	0,0020
126	0,0006	0,168	0,167	20	0,0026	0,0019
127	0,0013	0,168	0,167	30	0,0031	0,0018
Samotná kotva VT-220					průměr z rozdílu	
1	0,0020 W/K	0,169	0,167	ne	0,0019	

Vidíme, že hodnoty rozdílu se různí o jednu až dvě desetitisíciny W/K, což je dostatečná přesnost nebo jinak řečeno odchylka není příliš velká. Pokud spočítáme průměr z hodnot rozdílu je rozdíl jedna desetitisícina. Veškeré hodnoty jsou zaokrouhlené, ale výpočty jsou i zde prováděny s maximálním desetinným rozvojem na 17 desetinných míst.

Z uvedeného vyplývá, že vliv profilu na zvýšení součinitele prostupu tepla konstrukce by bylo možné zahrnout jako samostatný vliv, pokud by měl výsledný výpočetní vztah rezervu na straně bezpečnosti, protože hodnoty rozdílu se pohybují na obě strany kolem hodnot pro vliv samotné kotvy.

V tabulce výše navíc vidíme, že i při nulovém zanoření profilu do minerální izolace dochází k nárůstu lineárního činitele prostupu tepla. Z grafu, který prezentuje hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro modely kotvy s profilem vidíme, že vliv přítomnosti profilu bez zanoření se zvyšuje s menší tloušťkou zateplení. Tento jev bude nutné v odvozených výpočetních vztazích také zohlednit.

# Kapitola 5

## Odvození zjednodušeného výpočetního vztahu

Už proces modelování 3D výpočtů byl přizpůsoben tomu, aby bylo možné ze získaných dat odvodit přibližný výpočetní vztah. V této kapitole jsou uvedeny závěry z kapitoly předchozí a jsou dále rozvinuty v konkrétní číselné aplikace až do odvození kompletního zjednodušeného výpočetního vztahu.

### 5.1 Výpočetní vztahy pro zpracování dat z 3D výpočtu

Při stanovení bodového činitele prostupu tepla lze vyjít z normy ČSN 73 0551 (22 str. 34) Bodový činitel prostupu tepla se označuje řeckým písmenem „ $\chi$ “ a uvádí se v jednotkách W/K. Hodnota  $\chi$  se určí ze vztahu č. 14 uvedeném v této normě. Všechny vztahy jsou pro úplnost uváděny s jednotkami.

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j \cdot l_j \quad [W/K] \quad (2)$$

Kde je

- $L_{3D}$  tepelná propustnost získaná z 3-D výpočtu 3-D konstrukce oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/K;
- $U_j$  součinitel prostupu tepla i-té 1-D konstrukce oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/(m<sup>2</sup>·K);
- $A_i$  plocha, na kterou se vztahuje  $U_i$  v m<sup>2</sup>;
- $\psi_j$  lineární činitel prostupu tepla vypočítaný použitím vztahu (18) ve W/(m·K); (pozn. autora: vztah 18 je vztah v citované normě)
- $l_j$  délka, na kterou se vztahuje  $\psi_j$  v m;
- $N_j$  počet 2-D konstrukčních částí;
- $N_i$  počet 1-D konstrukčních částí.

Pro naše potřeby bude stačit zjednodušený vztah

$$\chi = L_{3D} - U \cdot A \quad [W] \quad (3)$$

Kde je

$L_{3D}$  tepelná propustnost získaná z 3-D výpočtu 3-D konstrukce oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/K;

U součinitel prostupu tepla konstrukce oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/(m<sup>2</sup> K);

A plocha na kterou se vztahuje v m<sup>2</sup>.

S tím rozdílem, že místo součinitele prostupu tepla je od tepelné propustnosti získané z 3D výpočtu 3D konstrukce s kotvou a dalšími případnými komponenty systému zavěšených fasád odečítána výsledná tepelná propustnost získaná z 3D výpočtu výchozí varianty, která zastupuje stěnu nenarušenou tepelným mostem. Výsledný vztah pak vypadá následujícím způsobem.

$$\chi = L_{3D} - L_{3D,V} \quad [W] \quad (4)$$

Kde je

$L_{3D}$  tepelná propustnost získaná z 3-D výpočtu 3-D konstrukce s komponenty systému zavěšených fasád oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/K;

$L_{3D}$  tepelná propustnost získaná z 3-D výpočtu 3-D konstrukce bez komponentů systému zavěšených fasád oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W/K;

Z výpočetního programu se získává tepelný tok ve wattech a tepelnou propustnost je nutné nejprve dopočítat následujícím vztahem.

$$L_{3D} = (htq.0 \cdot A) / \Delta T \quad [W/K] \quad (5)$$

Kde je

htq.0 tepelný tok odečítaný na vnitřní straně konstrukce s komponenty systému zavěšených fasád oddělující dvě uvažovaná prostředí ve [W];

A plocha, na kterou se vztahuje v m<sup>2</sup>;

$\Delta T$  rozdíl teplot dvou uvažovaných prostředí v K.

Stejně tak tepelná propustnost výchozí varianty podle obdobného vztahu.

$$L_{3D,V} = htq.0 / \Delta T \quad [W/K] \quad (6)$$

Kde je

htq.0 tepelný tok odečítaný na vnitřní straně konstrukce bez komponentů zavěšených fasád oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W;

A plocha, na kterou se vztahuje v m<sup>2</sup>;

$\Delta T$  rozdíl teplot dvou uvažovaných prostředí v K.



Tímto způsobem jsou získávány hodnoty bodového činitele prostupu tepla. Rozdíl teplot je na základě zvolených okrajových podmínek ve všech případech 35 K a plocha je 1 m<sup>2</sup>.

Pro vyhodnocování získaných výsledků z 3D výpočtů jsou dále dopočítávány hodnoty součinitele prostupu tepla podle následujícího vztahu.

$$U = \frac{htq.0}{A \cdot \Delta T} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (7)$$

Kde je

$htq.0$  tepelný tok odečítaný na vnitřní straně konstrukce s komponenty systému zavěšených fasád oddělující dvě uvažovaná prostředí ve W;

A plocha na kterou se vztahuje v m<sup>2</sup>;

$\Delta T$  rozdíl teplot dvou uvažovaných prostředí v K.

## 5.2 Požadovaná přesnost získaných dat

Hlavní posuzovanou veličinou je bodový činitel prostupu tepla, který je dopočítávaný na základě vztahů uvedených v předchozí podkapitole. Pro výstupy z programu pro 3D výpočty platí, že všechny výstupní údaje se musí uvádět alespoň na tři platné číslice (22 str. 41). Podle dalších norem vztahujících se na výpočty veličin spojených s tepelně technickými výpočty se vyžaduje zaokrouhlení na dvě nebo na tři desetinná místa (39) (40).

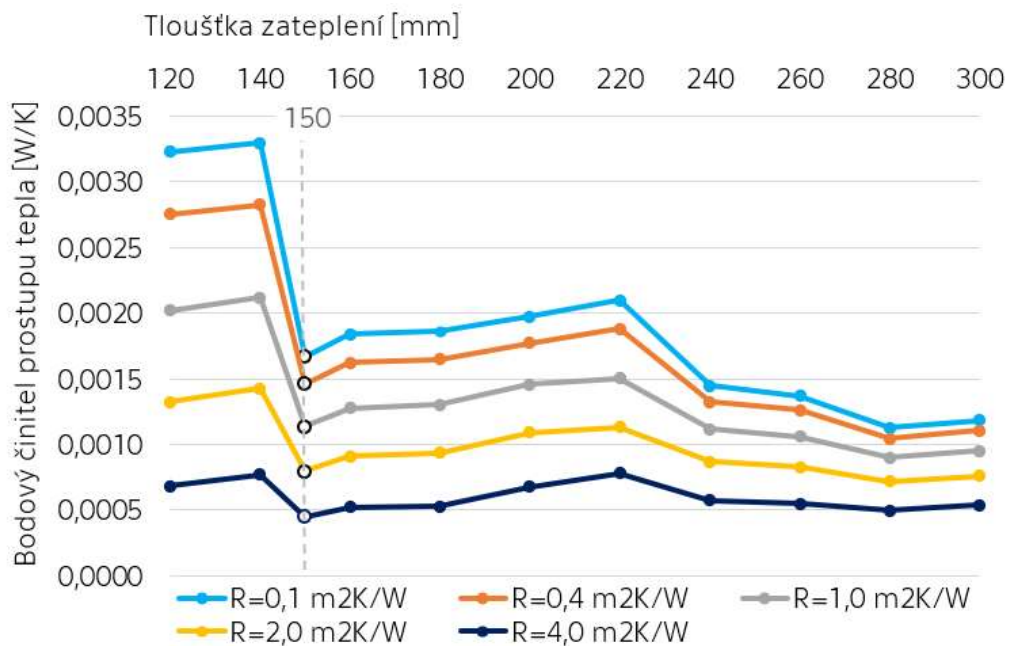
Tato práce se nezabývá splněním požadavků na bodový činitel prostupu tepla ani lineární činitel prostupu tepla. Hodnoty, které jsou výsledky 3D výpočtů, jsou řádově o dvě desetinná místa menší. Pro přesné výsledky se hodnoty výstupů z 3D výpočtů uvažují na pět desetinných míst, protože to vyžaduje povaha práce. Výsledky bodového činitele prostupu tepla se v této práci uvažují na čtyři desetinná místa. Výsledky součinitele prostupu tepla se uvažují na tři desetinná místa. Veškeré uvedené přesnosti výsledných veličin odpovídají požadavkům norem nebo jsou uváděny přesněji.

## 5.3 Koncept zjednodušeného vztahu pro kotvu

Základem pro vytvoření zjednodušeného výpočetního vztahu je nalezení funkce, která by s dostatečnou přesností a rezervou nahrazovala hodnoty získané modelováním 3D výpočtů. Jedná se o proložení získaných hodnot matematickou rovnicí s vhodným průběhem na požadovaném intervalu.

Toho je možné dosáhnout takzvanou regresní funkcí, která používá ke stanovení přesného tvaru funkce metodu nejmenších čtverců. Na základě odhadu regresních parametrů lze po zadání nezávislé proměnné do stanovené rovnice získat hodnoty závislé proměnné nejlépe reprezentující data kolísající kolem neznámé střední hodnoty. Výraz regresní funkce znamená pouze, že se jedná o funkci nahrazující data. Samotná podoba rovnice není tímto výrazem stanovena. Může se jednat o lineární, logaritmickou, exponenciální, mocninou, polynomickou nebo další rovnice. Volba typu použité rovnice je volitelná a musí být vybrána ta, která nejlépe reprezentuje data nebo jinak splňuje stanovené požadavky.

Regrese v této práci byla provedena pomocí softwaru Excel. V tomto základním tabulkovém programu je možné nejen jednoduše získat náhled na průběh regresní funkce zvoleného typu, ale i zjistit regresní parametry a dále s nimi pracovat. Proces regrese bude popsán v dalších podkapitolách v rozsahu, jak se týkal zpracovávaných dat. Obecný proces regresní techniky v Excelu je k nastudování například v tomto článku (41) a není v této práci rozebírán.

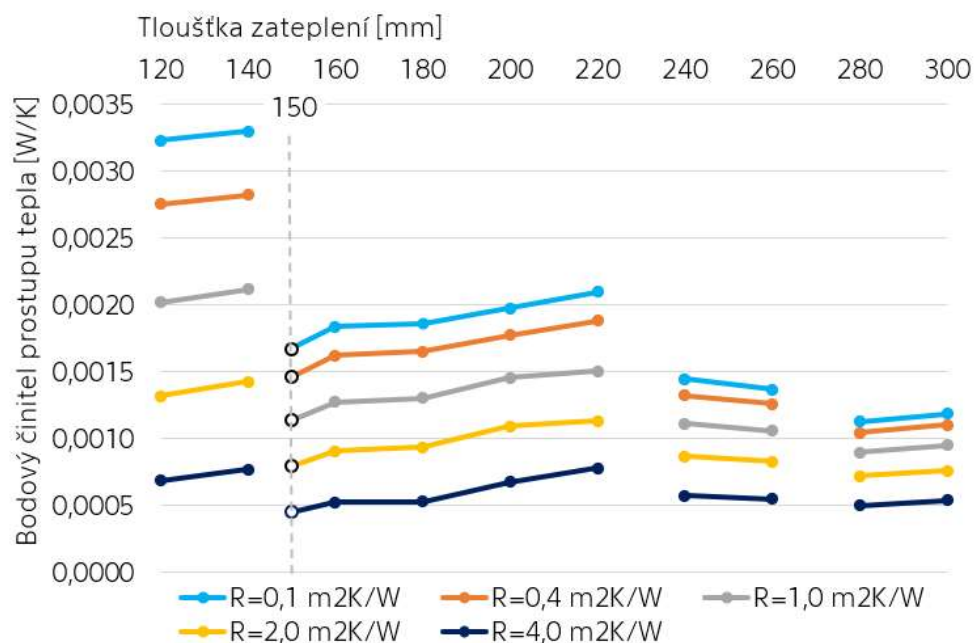


Obrázek 39 – Hodnoty bodového činitele prostupu tepla z 3D výpočtů

Pro optimální provedení regresní techniky bylo nutné dále analyzovat získaná data. Jak bylo už dříve naznačeno, získaná data nelze považovat za spojitá. Chování každého tvarového řešení polyamidové části pro různé délky kotvy se liší a se změnou délky kotvy hodnoty bodového činitele prostupu tepla značně kolísají. Zejména tvarové řešení pro tloušťky zateplení 120 až 140 mm je výrazně odlišné. Pokles hodnoty bodového činitele prostupu tepla mezi 140 a 160 mm zateplení je razantní. Bylo

rozhodnuto zjistit jaké výsledky budou získány pro tloušťku zateplení 150 mm. Tato tloušťka je mezilehlá, pro realizaci této tloušťky by se použila stejná kotva jako pro tloušťku 160 mm, tedy kotva VT-180, délky 180 mm. Došlo by tak k menšímu přesahu tepelné izolace přes přípustné minimum o deset milimetrů. Jak už bylo řečeno v podkapitole „3.4.7 Vliv pozice polyamidu“, menší překrytí polyamidové části, respektive menší hloubka zanoření hliníkové části kotvy směrem od polyamidu k exteriéru, snižuje hodnotu bodového činitele prostupu tepla působenou kotvou. Byly tedy očekávány poněkud nižší hodnoty než pro tloušťku 160 mm. Průběh hodnot doplněných o tloušťku zateplení 150 mm je vidět v grafu níže a odpovídá předpokladu. Pokud bychom dopočítali také hodnotu bodového činitele prostupu tepla pro tloušťku zateplení 140 mm s použitím kotvy délky 180 mm, byly by hodnoty ještě nižší. Tato tloušťka zateplení se ale z důvodů popsaných ve zmíněné podkapitole „3.4.7“ neuvažuje.

Dále bylo nutné rozdělit graf na jednotlivé úseky podle toho, jestli je možné data v takovém úseku nahradit nějakou regresní funkcí s ohledem na co nejmenší míru zkreslení. V každém případě bylo rozhodnuto oddělit interval 120 až 140 mm zateplení od zbytku hodnot. Další úsek byl vytvořen pro tloušťky nad 140 mm až po 220 mm zateplení. Stejně tak intervaly 220 až 260 mm a 260 až 300 mm, i přestože v této fázi nebylo ještě zcela zřejmé, jestli zbývající tloušťky zateplení nahradit jednou funkcí nebo je rozdělit podle tvarového řešení polyamidové části na dva úseky. Níže je upravený graf doposud prezentovaných hodnot bodového činitele prostupu tepla rozdělený na jednotlivé výše popsané úseky.

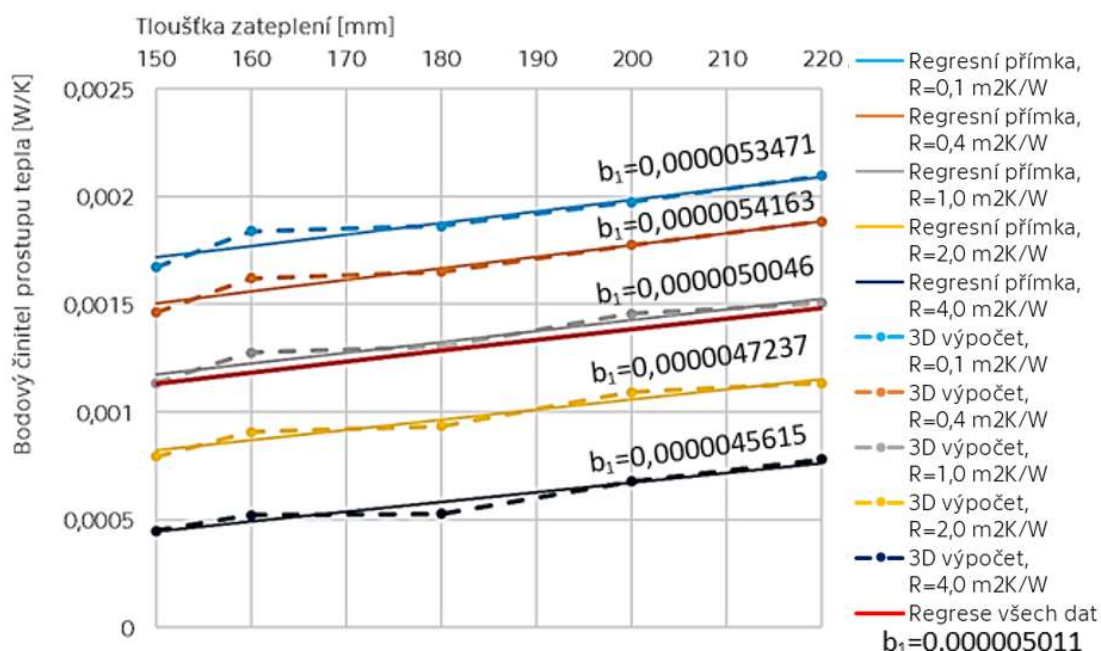


Obrázek 40 –Předběžné rozdělení dat 3D výpočtů na úseky pro určení regresních funkcí

## 5.4 Regresní proces pro interval tloušťek zateplení 150 až 220 mm

Nejprve byla vytvořena regresní funkce pro úsek od 150 mm do 220 mm zateplení včetně. Prvním krokem bylo určení regresní funkce popisující data pro všechny podklady. Jako typ rovnice byla zvolena lineární funkce, obecně  $y=b_1x+b_0$ , tedy regresní přímka, která by v určitém odstupu od posuzovaných dat mohla s dostatečnou rezervou a zároveň dostatečně přesně reprezentovat hodnoty na intervalu 150 až 220 mm. Rovnice přímky je určena sklonem přímky (člen  $b_1$ ) a posunem po ose y (člen  $b_0$ ), v našem případě se jedná o hodnoty bodového činitele prostupu tepla. Proměnná „x“ reprezentuje v tomto případě tloušťku zateplení zadávanou v milimetrech.

Následující graf ukazuje čárkovaně křivky původních hodnot bodového činitele prostupu tepla pro jednotlivé podklady, stejnou barvou je vždy znázorněna pomocí tenké plné čáry regresní přímka pro původní hodnoty a červeně plně tlustě je znázorněna regresní přímka ze všech dat. Regresní přímku pro všechna data můžeme dostat i jako průměr z regresních parametrů  $b_1$  regresních přímek pro jednotlivé podklady. Regresní parametr pro každou přímku je vypsán nad ní, jen pro regresní přímku všech dat je parametr  $b_1$  uveden pro přehlednost v legendě.



Obrázek 41 – Regresní přímky pro testované tepelné odpory podkladu a data z 3D výpočtů

Sklon regresní přímky pro data každého podkladu je různý, i když velmi podobný. Z hlediska pozdějšího využívání sestavených výpočetních

vztahů by bylo výhodné, pokud by bylo možné nahradit data všech podkladů jednou přímkou s jednotným sklonem. Sklon všech regresních přímk je velice podobný, a tak by to mělo být možné. Při použití průměrné regresní přímky můžeme rovnici zapsat následovně.

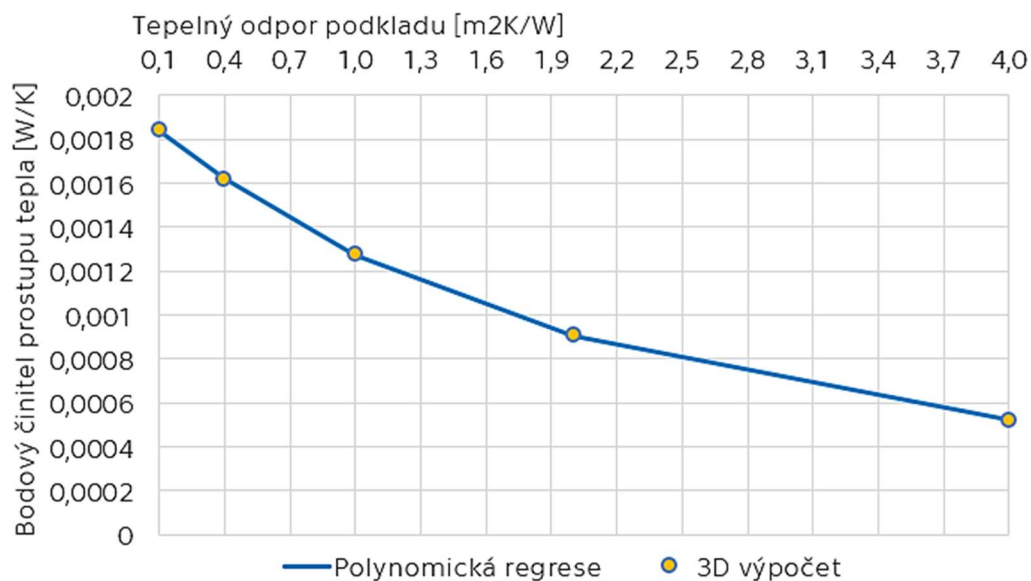
$$y = 0,000\ 005\ 011\ x + b_0 \quad [W/K] \quad (8)$$

Regresní parametr  $b_0$  stále není známý. V grafu výše sice vidíme regresní přímky pro každý podklad umístěné odpovídajícím způsobem podle regresního parametru  $b_0$  pro každý podklad, ale když byly tyto hodnoty použity pro průměrnou regresní přímku, bylo zjevné, že umístění je chybné. Nelze kombinovat individuální regresní parametry  $b_0$  se zprůměrovaným regresním parametrem  $b_1$ .

Regresní parametr  $b_0$  bylo nutné dopočítat s tím, že se nejedná o konstantu. Cílem je, aby bylo možné určovat hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro různé tepelné odpory podkladů včetně těch, které nebyly modelovány. Proto bylo nutné stanovit další funkci, aby bylo možné určit posun získané nakloněné přímky po ose  $y$ , tedy po ose bodového činitele prostupu tepla, v závislosti na tepelném odporu podkladu. Na hodnotách zobrazených v grafech reprezentujících data bodového činitele prostupu tepla vidíme, že rozestupy hodnot jednotlivých podkladů jsou sice různé, ale že se zdají být odstupňované pravidelně. Na základě tohoto odhadu bylo tedy rozhodnuto pokusit se nalézt regresní funkci, která by změnu v odstupech jednotlivých křivek popisovala. Jako data pro její vytvoření byly zvoleny hodnoty bodového činitele prostupu tepla v tloušťce zateplení 160 mm, výhoda této volby bude popsána dále. Hodnoty v této tloušťce byly vyneseny do grafu a byla hledána vhodná funkce, která by je dokázala nahradit. Lineární ani logaritmická funkce neodpovídala charakteru dat, naopak polynomická funkce se blížila původním datům nejlépe. Po zvolení čtvrtého řádu polynomické funkce došlo k téměř absolutnímu překrytí regresní funkce a výsledků 3D výpočtů.

Polynomická rovnice má obecný tvar  $y = b_4 \cdot x_4 + b_3 \cdot x_3 + b_2 \cdot x_2 + b_1 \cdot x + b_0$ , kdy je třeba dohledat regresní parametry  $b_i$ , kde  $i$  je 0 až 4. Tyto parametry byly stanoveny příslušnými příkazy v Excelu. Proměnná „ $x$ “ v této rovnici reprezentuje tepelný odpor podkladní konstrukce zadávaný v  $(m^2 \cdot K)/W$ . Regresní funkce s konkrétními regresními parametry má při částečném desetinném rozvoji následující tvar.

$$y = 0,000\ 000\ 918\ 792\ x^4 - 0,000\ 026\ 482\ 143\ x^3 + 0,000\ 211\ 800\ 039\ x^2 - 0,000\ 832\ 241\ 559\ x + 0,001\ 920\ 758\ 750 \quad [W/K] \quad (9)$$



Obrázek 42 – Polynomická regrese výsledky z 3D výpočtů

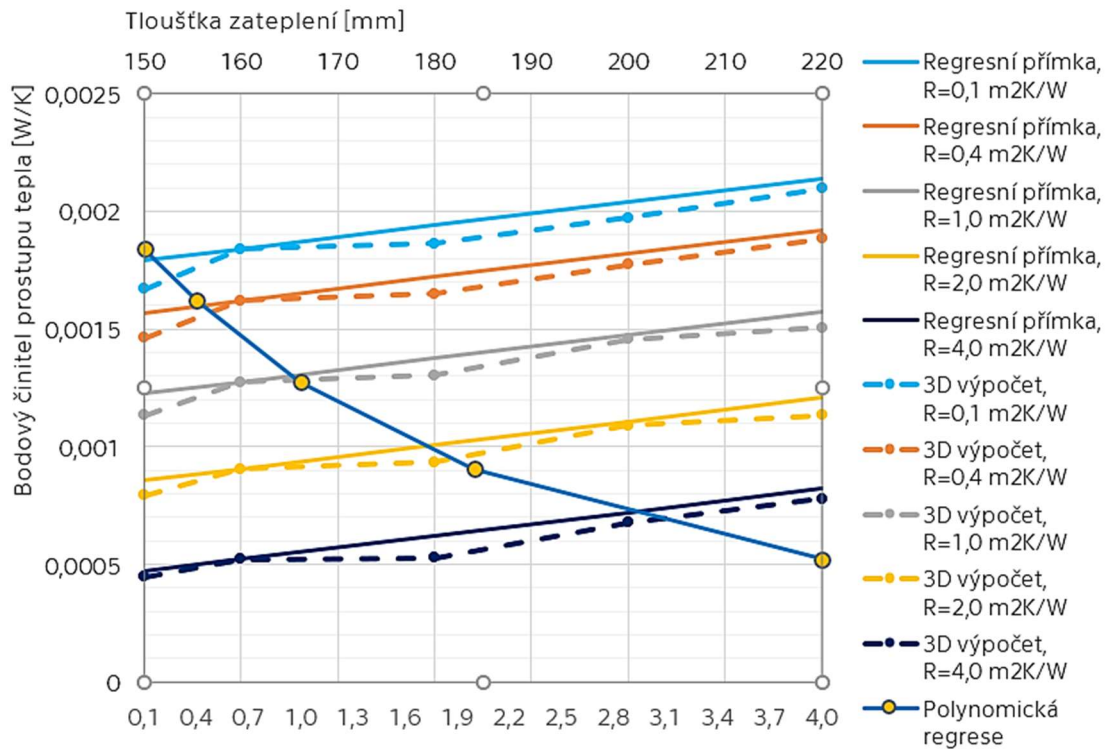
Použití hodnot bodového činitele prostupu tepla v tloušťce zateplení 160 mm pro stanovení polynomické regrese nebylo náhodné. Při pohledu na prezentovaná data bodového činitele prostupu tepla na tomto intervalu je zjevné, že hodnota zjištěná v této tloušťce zateplení se nachází vždy mírně nad každou jednotlivou regresní přímkou pro každý podklad. Pokud umístíme průměrnou regresní přímkou do hodnoty bodového činitele prostupu tepla v tloušťce zateplení 160 mm plníme tím požadavek na rezervu na straně bezpečnosti. Aby výpočetní vztah (7) toto umožňoval pouhým dosazením hodnoty z polynomické regresní rovnice (8), musíme ho upravit do následujícího tvaru.

$$y = 0,000\ 005\ 011x + (b_0 - 0,000\ 005\ 011 \cdot 160) \quad [\text{W/K}] \quad (10)$$

Dosazením této do této rovnice získáme hodnotu bodového činitele prostupu tepla vlivem hodnocených kotev od společnosti Hilti pro tloušťky zateplení od 150 mm do 220 mm. Proměnná „x“ se zadává v milimetrech. Pro zadávání v metrech by vztah měl následující podobu.

$$y = 0,005\ 011\ x + (b_0 - 0,005\ 011 \cdot 0,16) \quad [\text{W/K}] \quad (11)$$

Průběhy funkce (9), respektive (10), která určuje hodnoty bodového činitele prostupu tepla pro modelované případy tepelného odporu podkladní konstrukce je vidět v grafu níže. Z grafu je vidět jednak, že odvozené výpočetní vztahy jsou na straně bezpečnosti a zároveň, že sklon regresní přímkou je vyhovující pro všechny modelované případy. Můžeme si všimnout, že každá z hodnot polynomické regrese je ve stejné úrovni na ose bodového činitele prostupu tepla jako některá z hodnot pro zateplení v tloušťce 160 mm, jak už bylo řečeno, jedná se o totožné hodnoty.

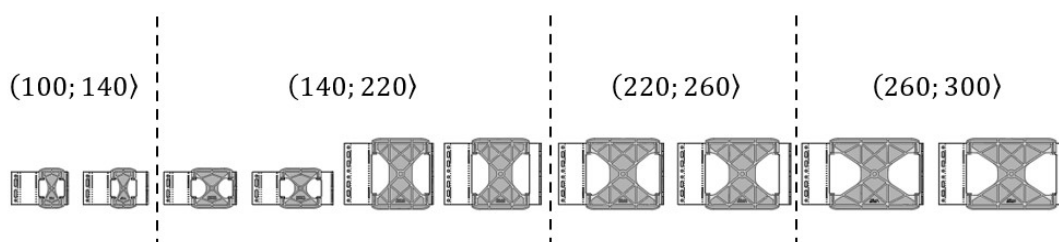


Obrázek 43 – Srovnání regresních přímek reprezentujících výsledky sestavených výpočetních vztahů s daty z 3D výpočtů

Během odvozování vztahu byly ověřeny výsledky pro další hodnoty, které nebyly modelovány pomocí 3D výpočtů a výsledky se jeví jako odpovídající. Zároveň bylo provedeno ověření přesnosti výsledků ze sestavených výpočetních vztahů po zaokrouhlení regresního parametru  $b_1$  z rovnice regresní přímky na 9, respektive 6, desetinných míst, tedy na hodnotu 0,000 005 011, respektive 0,005 011, a výsledky se nezměnily.

## 5.5 Výsledky pro ostatní intervaly

V případě ostatních intervalů byl uplatněn obdobný postup odvození výpočetních vztahů jako v předchozí podkapitole s dílčími odlišnostmi. Data byla rozdělena na intervaly způsobem, jak je vidět v grafu na konci podkapitoly 5.5. Intervaly jsou pro testované tloušťky zateplení 120 až 140 mm, 240 až 260 mm a 280 až 300 mm. Podle poznatků z podkapitoly „3.4.7 Vliv pozice polyamidu“ uvažujeme, že tloušťky zateplení mezi testovanými tloušťkami přísluší vždy delší kotvě. Intervaly bychom pak mohli matematicky zapsat jako (100; 140), (220; 260) a (260; 300).



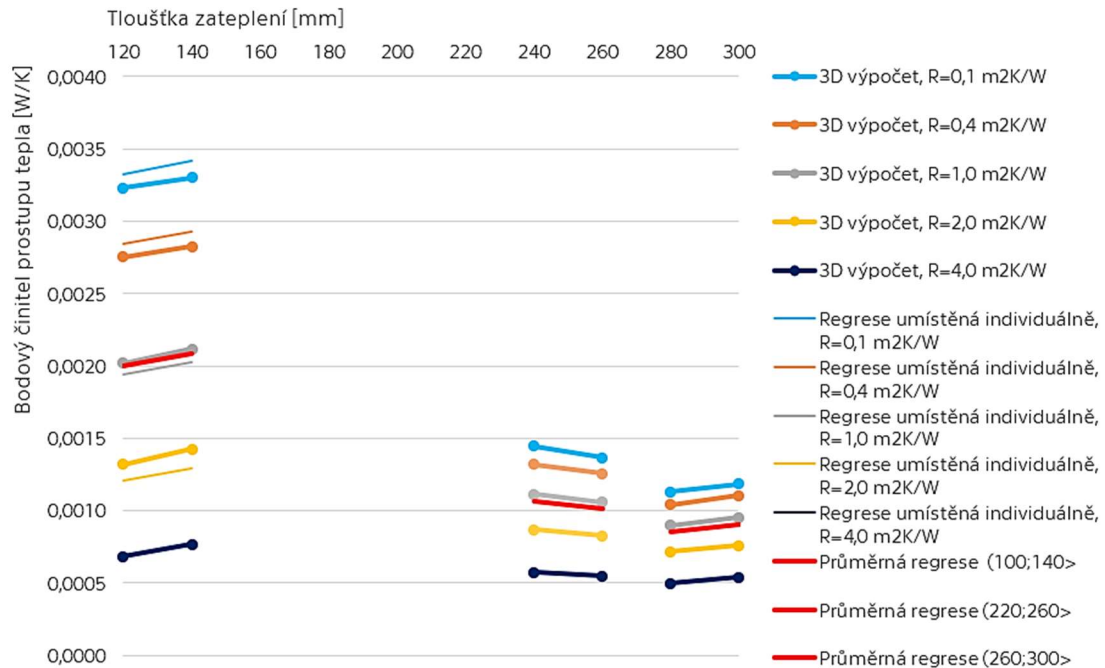
Obrázek 44 – Příslušnost kotev k jednotlivým intervalům tlouštěk zateplení

Pro každý interval byla stanovena průměrná regresní přímka v závislosti na tloušťce zateplení. Postup tohoto kroku byl velice jednoduchý. Dalším krokem bylo jednak určit posun této průměrné regresní přímky a jednak stanovit rezervu na straně bezpečnosti. Stejně jako byla stanovena regresní přímka pro každý interval zvlášť, tak bylo nutné stanovit i regresní funkci závislou na proměnné hodnotě tepelného odporu podkladní konstrukce pro každý interval tloušťky zateplení zvlášť. Rozdíly v nárůstu hodnot se pro různé tloušťky zateplení výrazně liší. V předchozí podkapitole byla polynomická funkce stanovena pro všechny tloušťky zateplení jednotně, protože to umožňovala data vzhledem k dostatečné rezervě na straně bezpečnosti.

V následujícím grafu jsou zobrazena pouze data, pro která sestavujeme výpočetní vztahy. Jedná se o typické zobrazení závislosti bodového činitele prostupu tepla na tloušťce zateplení pro každý modelovaný tepelný odpor podkladní konstrukce. Zároveň jsou zde zobrazeny červeně silně průměrné regresní přímky, které se vždy nachází poblíž dat pro tepelný odpor podkladu 0,1 (m<sup>2</sup>·K)/W symbolizovaných šedou úsečkou s body na koncích. Pro kontext a zajímavost jsou uvedeny i úsečky bez zakončení body (například „Regrese 0,1, umístěna individuálně“) symbolizující průměrnou regresi umístěnou pomocí hodnot  $b_0$  pro individuální regresní přímky (viz. přechozí podkapitola). Vidíme, že tyto úsečky se nacházejí jednou pod a jindy nad původními daty. V případě



podkladu s tepelným odporem 4,0 (m<sup>2</sup>·K)/W je úsečka v zákrytu s původními daty. Je vidět, že umístění pomocí koeficientů  $b_0$  pro individuální regresní přímky není možné a je potřeba stanovit další funkci jako v předešlé podkapitole.



Obrázek 45 – Data 3D výpočtů ostatních intervalů, pro které je potřeba sestavit přibližné výpočetní vztahy, a některé regresní přímky

Získané regresní parametry je možné zapsat do rovnic regresních přímek prozatím s neznámými parametry  $b_0$ . Uvedený desetinný rozvoj je částečný. Za proměnnou „x“ se dosazuje tloušťka zateplení v mm. Výsledkem je bodový číselník prostupu tepla ve W/K.

Pro interval 120 až 140 mm zateplení platí:

$$y = 0,000\ 004\ 279\ x + b_0 \quad [\text{W/K}] \quad (12)$$

Pro interval 240 až 260 mm zateplení platí:

$$y = -0,000\ 002\ 636\ x + b_0 \quad [\text{W/K}] \quad (13)$$

Pro interval 280 až 300 mm zateplení platí:

$$y = 0,000\ 002\ 567\ x + b_0 \quad [\text{W/K}] \quad (14)$$

Při úpravě rovnice tak, aby umožňovala konečné stanovení pozice regresní přímky pomocí dosažení výsledku z polynomické rovnice níže, a pro dosazování tloušťky zateplení za „x“ v metrech se použijí rovnice (14) – (16).

Pro interval 120 až 140 mm zateplení platí:

$$y = 0,004\ 279\ x + (b_0 - 0,004\ 279 \cdot 0,14) \quad [\text{W/K}] \quad (15)$$

Pro interval 240 až 260 mm zateplení platí:

$$y = -0,002\ 636\ x + (b_0 - 0,002\ 636 \cdot 0,26) \quad [\text{W/K}] \quad (16)$$

Pro interval 280 až 300 mm zateplení platí:

$$y = 0,002\,567\,x + (b_0 - 0,002\,567 \cdot 0,28) \quad [\text{W/K}] \quad (17)$$

V každém intervalu byla zvolena jedna tloušťka zateplení, konkrétně tloušťky 0,14 m, 0,26 m a 0,28 m. Hodnoty bodového činitele prostupu tepla v této tloušťce zateplení byla použita jako výchozí data pro stanovení regresní funkce. Zvolení tloušťky pro výchozí data bylo libovolné. Stejně jako v minulé podkapitole se i v těchto případech jevila jako nejvhodnější polynomická funkce čtvrtého řádu.

Regresní funkce s konkrétními regresními parametry mají při částečném desetinném rozvoji následující tvary.

Pro interval 120 až 140 mm zateplení platí:

$$y = 0,000\,007\,097\,583\,x^4 - 0,000\,102\,501\,471\,x^3 + 0,000\,591\,324\,573\,x^2 - 0,001\,857\,254\,450\,x + 0,003\,479\,509 \quad [\text{W/K}] \quad (18)$$

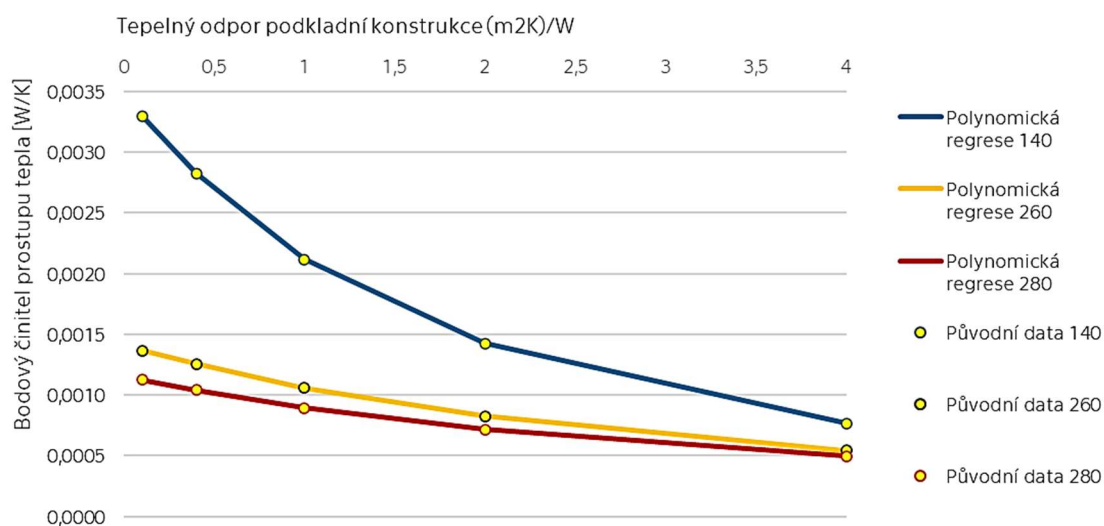
Pro interval 240 až 260 mm zateplení platí:

$$y = -0,000\,006\,553\,958\,x^4 + 0,000\,038\,968\,029\,x^3 - 0,000\,013\,415\,425\,x^2 - 0,000\,364\,712\,256\,x + 0,001\,403\,554\,086 \quad [\text{W/K}] \quad (19)$$

Pro interval 280 až 300 mm zateplení platí:

$$y = -0,000\,001\,298\,811\,x^4 + 0,000\,004\,050\,309\,x^3 + 0,000\,039\,356\,501\,x^2 - 0,000\,304\,597\,338\,x + 0,001\,158\,405\,725 \quad [\text{W/K}] \quad (20)$$

Jak ukazuje následující graf, původní data jsou reprezentována s téměř absolutní přesností.



Obrázek 46 – Zobrazení regresních funkcí proložených daty 3D výpočtů pro zvolené tloušťky zateplení

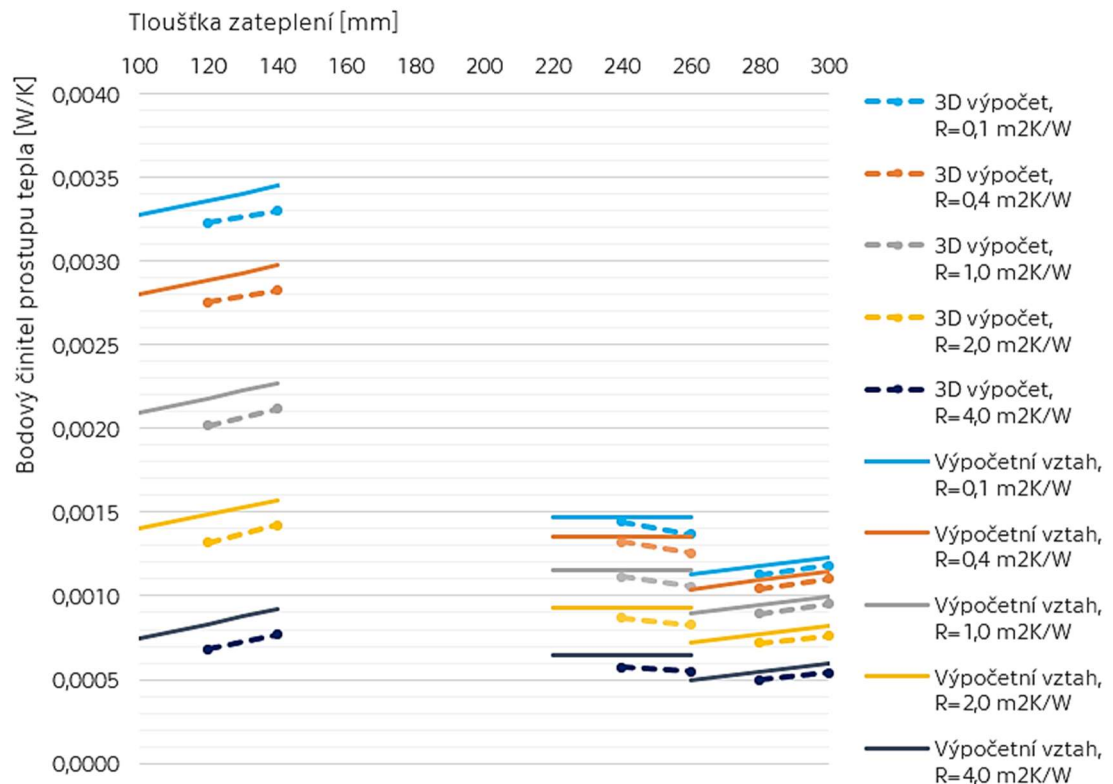
Veškeré hodnoty získané z doposud vytvořených vzorců byly mírně nižší, než bylo očekáváno. Jak bylo popsáno v podkapitole „4.6“, i bez zanoření má profil na výsledek vliv. Byla tedy připočtena přírážka na vliv profilu,

a tím došlo k navýšení výsledného bodového činitele prostupu tepla pro všechny případy. Výše přírážky je 0,00015 W/K pro nejmenší tloušťky zateplení a klesá s narůstající tloušťkou zateplení. Blíže je popsána v podkapitole 5.7.

Při bližším pohledu na získané výsledky a po dopočítání hodnot i pro mezilehlé tloušťky zateplení bylo rozhodnuto nepoužít vypočtený regresní parametr  $b_7$ , regresní přímky pro interval 240 až 260 mm (respektive interval (220; 260)) a namísto toho uvažovat s konstantní hodnotou zvolenou pouze na základě tepelného odporu podkladní konstrukce. Upravená rovnice by tak měla následující tvar.

$$y = b_0 \quad [W/K] \quad (21)$$

Kde  $b_0$  je výsledek z rovnice (18). Důvodem je jednak výjimečný pokles hodnot pro kotvu VT-280 pro tloušťku zateplení 260 mm, který jinde nenastává, ale především přiblížení se realitě z hlediska vlivu pozice polyamidu v tepelném izolantu z hlediska tepelně technických vlastností, jak je popsáno v podkapitole „3.4.7 Vliv pozice polyamidu“. Pro získání dostatečné rezervy na straně bezpečnosti byla přírážka zvýšena na 0,0001 W/K. Výsledné hodnoty získané na základě výpočetních vztahů odvozených v této kapitole ukazuje graf níže.



Obrázek 47 – Srovnání dat bodového činitele prostupu tepla 3D výpočtů a odvozených výpočetních vztahů

Na hranici intervalů by se mohlo zdát, že je možné libovolně zvolit interval, jehož hodnoty bodového činitele prostupu tepla budou použity. Výběr kotvy pro uplatnění konkrétního výpočetního vztahu je ale pevně dán. Ve skutečnosti se může sice tloušťka zateplení pohybovat v určitém rozmezí. Při respektování požadavku na minimální přípustnou tloušťku zateplení, která odpovídá délce kotvy bez 60 milimetrů, a maximální možnou tloušťku zateplení, která je z hlediska montáže délka kotvy bez 20 milimetrů, dostáváme rozmezí 40 milimetrů. To jsou celkem tři délkové varianty kotev, které můžeme zvolit pro všechny tloušťky zateplení kromě krajních případů. Jak bylo popsáno již ve zmíněné podkapitole „3.4.7“, volba kotvy vyplývá z dalších souvislostí návrhu a realizace systému zavěšených fasád. Energetický specialista bez podrobných znalostí návrhu tohoto systému a bez příslušného softwarového vybavení není schopen správně určit, jaký typ kotev bude zvolen. Pro potřeby energetického hodnocení budovy je uvažováno s nejméně příznivou možností, tedy s nejkratší možnou kotvou pro danou tloušťku tepelné izolace.

## 5.6 Zahrnutí vlivu podložky

V předchozí kapitole v části zabývající se podložkou byly analyzována data získaná modelováním 3D výpočtů 3D konstrukcí. Ohledně podložky byl nakonec učiněn závěr, že její vliv není tak významný, jak bylo předpokládáno na základě citlivostní analýzy provedené v začátku této práce. Podložka ovlivňuje 3D konstrukci nárůstem bodového činitele prostupu tepla o jednu, v nejméně příznivých případech o dvě, desetitisíciny W/K. I při uvažování více kotev na jeden metr čtvereční není vliv významný. V nejméně příznivé variantě, kterou je podkladní materiál s tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  v kombinaci se zateplením 120 mm tepelného izolantu, by při počtu 4 kotvy na metr čtvereční bylo zhoršení součinitele prostupu tepla o  $0,00064 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ . Kompletní data vlivu podložky jsou přílohou D této práce. Součinitel prostupu tepla se uvádí na tři desetinná místa a normové požadavky na dvě desetinná místa. I tato nejméně příznivá kombinace má potenciál změnit jeho hodnotu pouze v řádech tisícín. Jedná se tedy o minimální zlepšení, které je možné zanedbat.

Hypoteticky, pokud bychom se rozhodli vliv podložky i přesto zahrnout, byla by otázka, od jaké tloušťky zateplení a pro jaký podklad má smysl. Vzhledem k tomu, o jak nízké hodnoty se jedná, je tato hranice nejasná. Příklad 120 mm zateplení v kombinaci s podkladem s tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  není ve skutečnosti nejhorší. Podle získaných dat je horší varianta 140 mm zateplení na stejném podkladu. Je zřejmé, že se zde pohybujeme na hranici přesnosti modelování 3D výpočtů. Pokud bychom se rozhodli tedy i přesto tento vliv zahrnout, bylo by jednou z možností zohlednit ty varianty, kde se pohybuje zlepšení bodového činitele prostupu tepla v hodnotách nad  $0,0001 \text{ W/K}$ . Pro zjednodušení by bylo možné se orientovat jen podle tloušťky zateplení a rozdělit podle tohoto příznaku data do skupin a uvažovat průměrnou hodnotu této skupiny. Zohlednění podložky by podle získaných dat bylo takto možné v intervalu 120 až 160 mm tloušťky zateplení. Pro další tloušťky zateplení by byl vliv stále zanedbatelný.

## 5.7 Zahrnutí vlivu profilu

V předchozí kapitole v části zabývající se vlivem profilu na bodový činitel prostupu tepla bylo rozhodnuto zohlednit jeho vliv samostatně. Argumentace pro toto rozhodnutí je rozvedena v příslušné podkapitole „4.6 Vliv profilu“. Otázkou zůstává, jakým způsobem profil zohledňovat. Ze získaných dat je zřejmé, že data vlivu profilu na lineární činitel prostupu tepla by bylo možné proložit vhodně zvolenou funkcí. Data tvoří monotónní funkci s plynulým růstem. Graf zobrazující průběh hodnot byl uveden ve výše zmíněné podkapitole, dále uvádím tabulku s totožnými daty pro představu o konkrétních hodnotách lineárního činitele prostupu tepla vlivem samotného profilu. Data jsou pro podklad s tepelným odporem  $0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  a tepelnou vodivostí zateplení  $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Tabulka 17 – Vliv samotného profilu  
na hodnoty lineárního činitele prostupu tepla ve  $[W/(m^2\cdot K)]$

míra zanoření profilu [mm]	tloušťka zateplení [mm]				
	120	160	200	240	280
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0005	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
20	0,0013	0,0009	0,0006	0,0004	0,0003
30	0,0032	0,0020	0,0013	0,0009	0,0007

I přestože by se dala data interpretovat vhodnou funkcí, je pro rozhodnutí ohledně způsobu zahrnutí vlivu profilu důležitější zavedená praxe při realizacích systému zavěšených fasád. Není možné předem stanovit míru zanoření profilu do tepelné izolace, protože ta je určena nejen projekčním předpokladem závislým na šířce větrané vzduchové mezery ale také zejména nerovností podkladu. Nerovnost podkladu je vyrovnávána právě pomocí upravování šířky větrané vzduchové mezery, tedy posunem profilu do tepelné izolace nebo směrem od ní. Pokud okolnosti na stavbě vyústí v situaci, že profil musí být zanořený, pak je tepelná izolace nařezávána. Není proto možné přepokládat míru zanoření, ani není možné přesně stanovit jeho průměrnou hodnotu před samotnou realizací. S určitostí můžeme pouze říci, zda tepelná izolace nařezávána bude nebo nikoli, na kolik bude nařezávána není možné s jistotou určit.

Z dat uvedených v tabulce je vidět, že vliv od profilu je významný pouze při zanoření 20 až 30 mm v závislosti na tloušťce zateplení. Hodnoty  $0,0006 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  a nižší jsou z hlediska součinitele prostupu tepla zanedbatelné. Zjednodušeně řečeno je nutné zohlednit zanoření profilu

30 mm ve všech tloušťkách zateplení. Z výše uvedených úvah se pak jeví jako vhodné zahrnout vliv profilu jako koeficient, který bude možné uvažovat podle tloušťky zateplení. Získaná data pro hloubku zanoření 30 mm budou proložena vhodnou funkcí, která v případě uplatnění příznaku pro zohlednění vlivu profilu stanoví konkrétní výši lineárního činitele prostupu tepla, který bude přičten k výslednému bodovému činiteli prostupu tepla získaného ze vzorců popsaných v předchozích podkapitolách.

Výpočetní vztah byl odvozen a odladěn až do výsledné obecné podoby, která by se dala zapsat následujícím způsobem.

$$y = \text{regrese } R_{120} \cdot \frac{\text{regrese } MV_{0,1}}{\text{regrese } 120_{0,1}} - \text{regrese } R_{120} \cdot 0,2156 + \text{regrese } R_{280} \cdot 1,2 \quad (22)$$

Kde jsou veškeré regresní funkce funkcemi z hodnot bodového činitele prostupu tepla modelovaných pomocí 3D výpočtu 3D konstrukce. Funkce budou rozepsány dále. Funkce poskytují hodnoty, které jsou závislé na následujících veličinách.

Regrese  $R_{120}$  je hodnota funkce pro volený tepelný odpor podkladní konstrukce při dané tloušťce zateplení 120 mm;

regrese  $MV_{0,1}$  je hodnota funkce pro volenou tloušťku zateplení s daným tepelným odporem podkladní konstrukce  $R = 0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ ;

regrese  $120_{0,1}$  je hodnota funkce pro danou tloušťku zateplení 120 mm a daný tepelný odpor podkladní konstrukce  $R = 0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ , tedy konstanta;

regrese  $R_{280}$  je hodnota funkce pro volený tepelný odpor podkladní konstrukce při dané tloušťce zateplení 280 mm.

Jednoduše řečeno, hodnotu dopočtenou na základě zvoleného podkladu pro tloušťku 120 mm přenásobíme poměrem hodnot, které jsou obě závislé na funkci pro podkladní konstrukci s tepelným odporem  $R = 0,1 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ . Takto by hodnota odpovídala pro tloušťky zateplení přibližně 200 mm a méně, pro přesnost a rezervu v oblasti vyšších tlouštěk zateplení je nutné funkci posunout. Posun je regulován dvěma posledními regresními funkcemi, které proměnlivě v kombinaci se zvolenými koeficienty posouvají funkci poměrně vhodně v závislosti na tepelném odporu podkladu.

Veškeré použité polynomické funkce použité ve vztahu (22) jsou třetího řádu. Polynom třetího řádu nereprezentoval lépe data co do průběhu

hodnot ve všech modelovaných tloušťkách zateplení, ale zachoval klesající trend pro tloušťky zateplení nad 300 mm, což polynom čtvrtého řádu neposkytnul. Dále uvádím jednotlivé regresní funkce rozepsané v jejich obecném tvaru pro částečný desetinný rozvoj regresních parametrů.

regrese  $R_{120}$ :

$$y = -0,000\,000\,087\,921 x^3 + 0,000\,152\,798\,537 x^2 - 0,001\,254\,099\,144 x + 0,003\,374\,750\,530 \quad [W/(m \cdot K)] \quad (23)$$

regrese  $MV_{0,1}$

$$y = -0,000\,000\,000\,435 x^3 + 0,000\,000\,359\,430 x^2 - 0,000\,104\,485\,048 x + 0,011\,322\,156\,593 \quad [W/(m \cdot K)] \quad (24)$$

regrese  $120_{0,1}$

$$y = -0,000\,000\,000\,435 \cdot 120 + 0,000\,000\,359\,430 \cdot 120 - 0,000\,104\,485\,048 \cdot 120 + 0,011\,322\,156\,593 = \underline{0,003\,207\,679\, W/K} \quad (25)$$

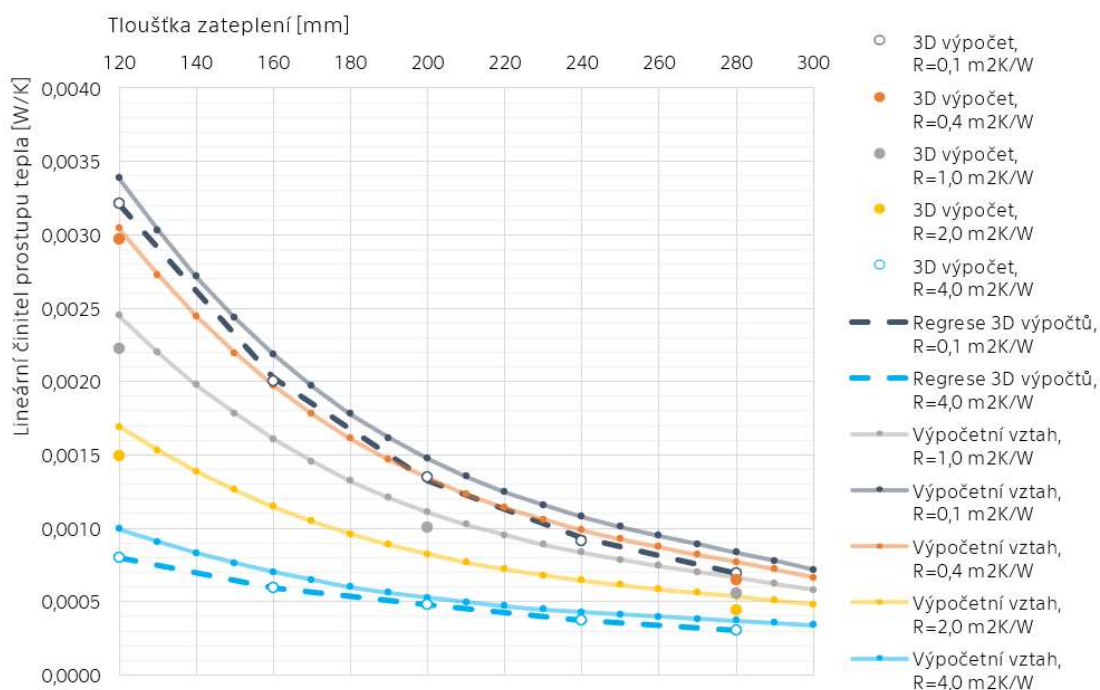
regrese  $R_{280}$

$$y = -0,000\,003\,494\,636 x^3 + 0,000\,037\,608\,092 x^2 - 0,000\,196\,660\,512 x + 0,000\,715\,961\,711 \quad [W/(m \cdot K)] \quad (26)$$

Na základě těchto rovnic dosazených do výpočetního vztahu (22) získáme přibližný vliv profilu na hodnotu lineárního činitele prostupu tepla. Jak je vidět v grafu níže vypočtené hodnoty mají oproti původním datům získaným modelováním 3D výpočtů 3D konstrukcí rezervu. Jako výchozí data pro sestavení přibližného výpočetního vztahu byly k dispozici všechny hodnoty lineárního činitele prostupu tepla pro tepelné odpory podkladu 0,1 (m<sup>2</sup>·K)/W a 4,0 (m<sup>2</sup>·K)/W pro výchozí tloušťku zateplení každé kotvy. Dále byly k dispozici také hodnoty pro tloušťky zateplení 120 mm a 280 mm pro všech pět modelovaných variant tepelných odporů podkladní konstrukce. Po sestavení výpočetních vztahů byla namodelována jedna další varianta, a to pro 200 mm zateplení a tepelný odpor podkladu 1,0 (m<sup>2</sup>·K)/W, aby bylo ověřeno, že vypočtené hodnoty mají rezervu pro mezilehlé podklady. I přestože se vycházelo z předpokladu, že pokud bude výpočetní vztah poskytovat hodnoty přijatelné jak pro tepelný odpor podkladu 0,1 (m<sup>2</sup>·K)/W tak 4,0 (m<sup>2</sup>·K)/W, bude vyhovující i pro mezilehlé tepelné odpory, byla domodelovaná hodnota cenným potvrzením správnosti sestavených vztahů. Jak můžeme vidět v grafu níže, regresní funkce třetího řádu nahrazující původní data zejména pro tepelný odpor podkladu 0,1 (m<sup>2</sup>·K)/W, nereprezentuje původní data s absolutní přesností. Při bližším pohledu je vidět, že linie přerušované čáry prochází jednou horní částí a jindy spodní částí bodu původních dat. Dále si



můžeme všimnout, jak jsou vypočtené hodnoty nadsazeny oproti původním datům z důvodu potřeby rezervy na straně bezpečnosti. V případě některých míst se jedná o hodnoty kolem 0,0002 W/K, což je ve srovnání s ostatními přírážkami uplatňovanými v této práci výrazná hodnota.



Obrázek 48 – Srovnání dat lineárního činitele prostupu tepla 3D výpočtů a odvozených výpočetních vztahů (graf je ve větším zvětšení také součástí přílohy D této práce)

Odvozený výpočetní vztah se uplatní jen při zanoření profilu. Pokud není profil zanořený, výpočetní vztah pro vliv profilu se nezahrnuje. Naopak je uplatněna přírážka na přítomnost profilu, která se uplatňuje různou výší podle tloušťky tepelné izolace. Nutnost této přírážky je popsána v závěru podkapitoly „4.6 Vliv profilu“ Hodnoty přírážek jsou následující.

Tabulka 18 – Přírážky na vliv profilu bez zanoření

Interval tloušťky zateplení	Přírážka
120-140	0,00015
160-220	0,00005
240-260	0,00010
280-300	0,00005

## 5.8 Ověření výpočetních vztahů

Po sestavení přibližných výpočetních vztahů pro zahrnutí vlivu všech komponentů systému zavěšených fasád, které to vyžadují, zbývá tyto vztahy ověřit. Pro ověření dat bylo namodelováno několik variant konstrukcí s mezilehlými hodnotami tepelného odporu podkladní konstrukce, které nebyly modelovány při vytváření databáze výchozích dat, a jedna varianta pro mezilehlou tloušťku zateplení, která také nebyla modelována. Ověření se provádí především pro mezilehlé tepelné odpory podkladu, protože mezilehlé tloušťky zateplení (tedy nižší tloušťky zateplení na stejné kotvě) snižují výslednou hodnotu bodového činitele prostupu tepla, jak bylo uvedeno v mnohokrát citované podkapitole „3.4.7. Vliv pozice polyamidu“. Následují varianty ověřující přesnost a dostatečnou rezervu na straně bezpečnosti, kde je profil pouze přítomen, ale není zanořen.

Tabulka 19 – Ověření výsledků při profilu bez zanoření

ID	specifikace		COMSOL® x [W/K]	Odvozené vztahy x [W/K]	Rezerva na straně bezpečnosti [W/K]
	R (m <sup>2</sup> ·K)/W	tl. zateplení [mm]			
189	0,78	120	0,0024	0,0024	0,0000
190	0,78	100	0,0018	0,0023	0,0005
191	1,4	200	0,0014	0,0014	0,0000
192	3,1	260	0,0007	0,0008	0,0001
193	0,5	300	0,0011	0,0011	0,0000

Vidíme, že výsledky jsou poměrně přesné a poskytují přiměřenou rezervu. Dále můžeme v datech vidět následující. Varianta ID-189 ukazuje, že přírážka ve výši 0,00015 W/K je nutná. Důvodem je zhoršující vliv profilu, i přestože profil není zanořen. ID-190 znovu dokazuje, že při menší tloušťce tepelné izolace dochází k výraznému snížení bodového činitele prostupu tepla. Varianta ID-191 byla zvolena, protože hodnoty pro tuto tloušťku zateplení jsou druhé nejbližší k regresní přímce na tomto intervalu. Varianta ID-192 má zjevnou rezervu z důvodu nulového sklonu regresní přímky v tomto intervalu. Varianta ID-193 byl první případ, kdy byla modelována tato tloušťka zateplení v kombinaci s profilem.

V další tabulce následují varianty, kde je profil přítomen a navíc zanořen 30 mm v tepelné izolaci. Pro porovnatelnost jsou modelovány stejné varianty jako v předchozí tabulce, jen s jinou pozicí profilu. Vidíme, že odvozený výpočetní vztah poskytuje rezervu.

*Tabulka 20 – Ověření výsledků při profilu se zanořením*

ID	specifikace		COMSOL® $\chi$ [W/K]	Odvozené vztahy $\chi$ [W/K]	Rezerva na straně bezpečnosti [W/K]
	R (m <sup>2</sup> ·K)/W	tl. zateplení [mm]			
194	0,78	120	0,0045	0,0049	0,0004
195	0,5	300	0,0015	0,0017	0,0003

## 5.9 Kompletní výpočetní vztahy

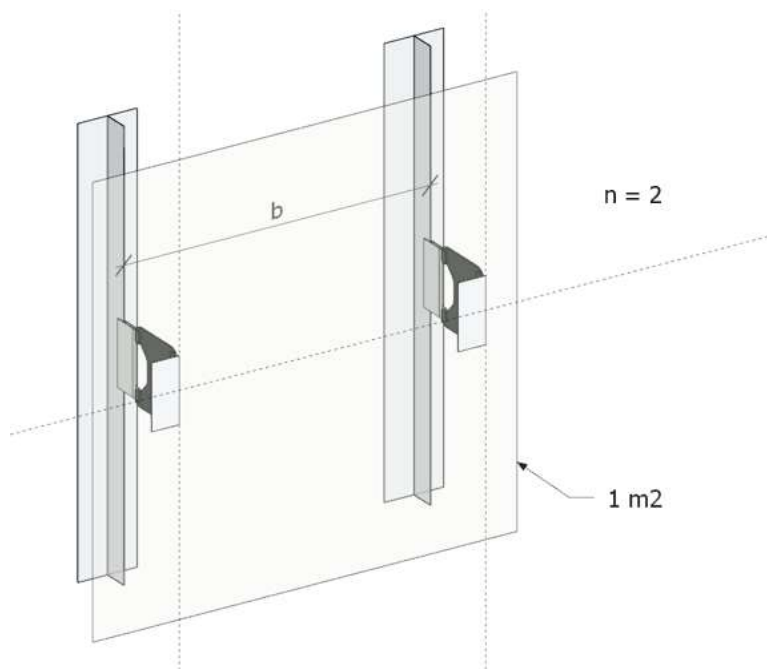
Zde jsou uvedeny kompletní výpočetní vztahy odvozené v rámci této práce. Veškeré vztahy byly upraveny tak, aby se dosazovaly veličiny v základních jednotkách. Obecné matematické proměnné byly nahrazeny zkratkami s fyzikálním významem. Jednotlivé dílčí rovnice a funkce odvozené v předchozích podkapitolách byly sloučeny do jednoho vztahu. Význam zvolených písmen je vysvětlen níže. Rozsah zadávaných tepelných odporů je od 0 do 5 (m<sup>2</sup>·K)/W, rozsah tloušťek tepelné izolace od 0,08 do 0,3 m.

Výsledné navýšení součinitele prostupu tepla se pro všechny intervaly tloušťky zateplení spočte ze vztahu (27).

$$\Delta U = n \cdot \chi + \psi / b \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (27)$$

Kde je

- $n$  počet kotev na metr čtvereční, v 1/m<sup>2</sup>;
- $\chi$  hodnota bodového činitele prostupu tepla kotvy ve W/K;
- $\psi$  hodnota lineárního činitele prostupu tepla vlivem profilu i v případě, kdy není profil zanořen do tepelné izolace, hodnota lineárního činitele prostupu tepla je vztažena na jeden metr délky ve W/(m·K);
- $b$  osová vzdálenost profilů v m.



Obrázek 49 – Příklad uspořádání, kde jsou na 1 m<sup>2</sup> dvě kotvy

Konkrétní dosazované funkce a hodnoty do rovnice (27) se určují na základě příslušného intervalu tloušťky zateplení a příznaku zanoření profilu. Pro každou tloušťku zateplení je odpovídající pouze jeden interval.

Veškeré vztahy jsou maximálně zjednodušeny, součty a součiny spočteny a uvedený desetinný rozvoj je dán požadavkem přesnosti výpočtu.

Konkrétní hodnoty zohledňující vliv profilu bez uplatnění příznaku zanoření jsou individuální pro každý interval tloušťky zateplení. Při uplatnění příznaku zanoření profilu se použije funkce (28), která je společná pro všechny intervaly. Pro úsporu místa je uvedena vědeckou notací, aby mohla být každá regresní funkce tvořící rovnici na jednom řádku a zápis byl přehledný. Funkce má následující tvar.

$$\psi = (8 \cdot 10^{-8} \cdot R^3 + 1,5279 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 1,25409 \cdot 10^{-3} \cdot R + 3,37475 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{4,35 \cdot 10^{-10} \cdot d^3 + 3,5943 \cdot 10^{-7} \cdot d^2 - 1,04485048 \cdot 10^{-4} \cdot d + 1,1322156593 \cdot 10^{-2}}{0,003208} - 0,2156 \right) + (3,494636 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 3,76 \cdot 10^{-5} \cdot R^2 + 1,96660512 \cdot 10^{-3} \cdot R + 7,15961711 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,2$$

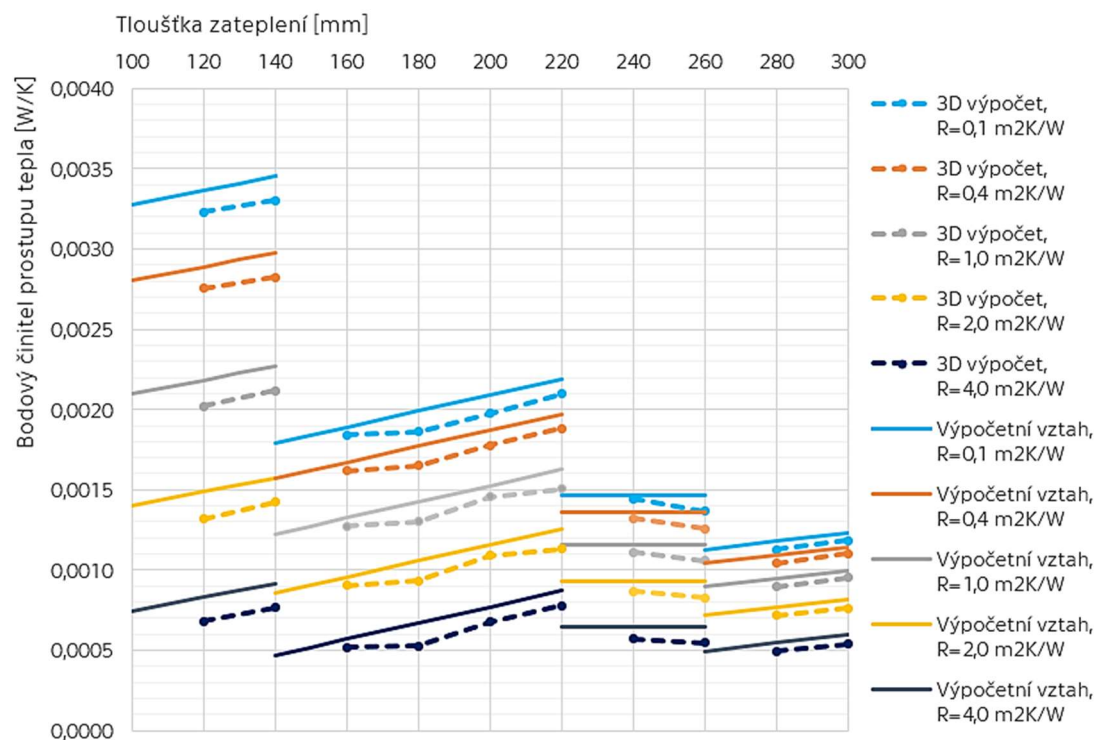
[W/(m·K)] (28)

Kde je

$R$  tepelný odpor podkladní konstrukce v (m<sup>2</sup>·K)/W;

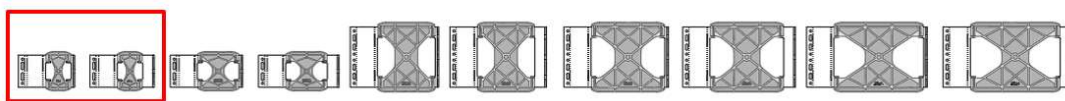
$d$  tloušťka tepelné izolace v m.

Následující graf zobrazuje výsledky výpočtů bodového činitele prostupu tepla pro samostatné kotvy a původní data, která reprezentuje. Je zobrazena varianta s přírážkou na vliv profilu bez zanoření. Vypočtené hodnoty jsou protaženy dle příslušností tlouštěk zateplení ke stanoveným rozsahům intervalů pro jednotlivé výpočetní vztahy.



Obrázek 50 – Srovnání dat bodového činitele prostupu tepla 3D výpočtů a odvozených výpočetních vztahů na všech intervalech

### 5.9.1 Interval tloušťky zateplení (100; 140) mm



Obrázek 51 – Kotvy, ke kterým se interval tloušťky zateplení vztahuje

Pro tloušťku zateplení v intervalu (100; 140) se použije vztah (29).

$$\chi = 0,000\ 007\ 097\ 583 \cdot R^4 - 0,000\ 102\ 501\ 471 \cdot R^3 + 0,000\ 591\ 324\ 573 \cdot R^2 - 0,001\ 857\ 254\ 450 \cdot R + 0,002\ 880\ 449 + 0,004\ 279 \cdot d \quad [\text{W/K}] \quad (29)$$

Kde je

$R$  tepelný odpor podkladní konstrukce v  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

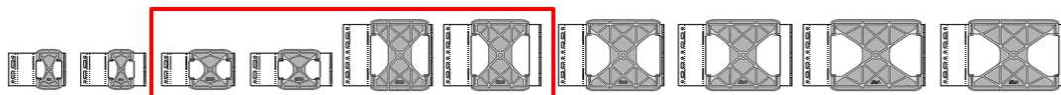
$d$  tloušťka tepelné izolace v m.

Pokud není profil zanořen do tepelné izolace, použije se přírážka (30).

$$\psi = 0,00015 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (30)$$

Pokud je profil zanořen do tepelné izolace, použije se funkce (28), která je společná pro všechny intervaly, žádná přírážka se v tom případě neuplatňuje.

### 5.9.2 Interval tloušťky zateplení (140; 220) mm



Obrázek 52 – Kotvy, ke kterým se interval tloušťky zateplení vztahuje

Pro tloušťku zateplení v intervalu (140; 220) se použije vztah (31).

$$\chi = 0,000\ 000\ 918\ 792 \cdot R^4 - 0,000\ 026\ 482\ 143 \cdot R^3 + 0,000\ 211\ 800\ 039 \cdot R^2 - 0,000\ 832\ 241\ 559 \cdot R + 0,001\ 118\ 998\ 750 + 0,005\ 011 \cdot d \quad [\text{W/K}] \quad (31)$$

Kde je

$R$  tepelný odpor podkladní konstrukce v  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

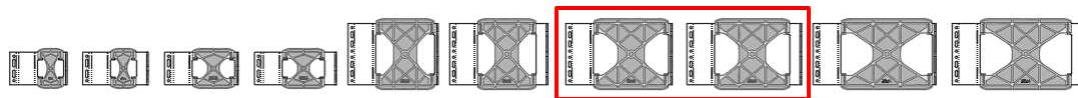
$d$  tloušťka tepelné izolace v m.

Pokud není profil zanořen do tepelné izolace, použije se přírážka (32).

$$\psi = 0,00005 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (32)$$

Pokud je profil zanořen do tepelné izolace, použije se funkce (28), která je společná pro všechny intervaly, žádná přírážka se v tom případě neuplatňuje.

### 5.9.3 Interval tloušťky zateplení (220; 260) mm



Obrázek 53 – Kotvy, ke kterým se interval tloušťky zateplení vztahuje

Pro tloušťku zateplení v intervalu (220; 260) se použije vztah (33).

$$\chi = -0,000\,006\,553\,958 \cdot R^4 + 0,000\,038\,968\,029 \cdot R^3 - 0,000\,013\,415\,425 \cdot R^2 - 0,000\,364\,712\,256 \cdot R + 0,001\,403\,554\,086 \quad [\text{W/K}] \quad (33)$$

Kde je

$R$  tepelný odpor podkladní konstrukce v  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ .

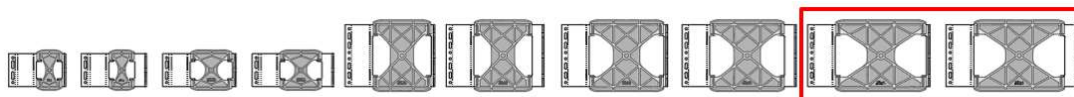
Tloušťka tepelné izolace se v tomto intervalu nezohledňuje.

Pokud není profil zanořen do tepelné izolace, použije se přírážka (34).

$$\psi = 0,00010 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (34)$$

Pokud je profil zanořen do tepelné izolace, použije se funkce (28), která je společná pro všechny intervaly, žádná přírážka se v tom případě neuplatňuje.

### 5.9.4 Interval tloušťky zateplení (260; 300) mm



Obrázek 54 – Kotvy, ke kterým se interval tloušťky zateplení vztahuje

Pro tloušťku zateplení v intervalu (260; 300) se použije vztah (35).

$$\chi = -0,000\,001\,298\,811 \cdot R^4 + 0,000\,004\,050\,309 \cdot R^3 + 0,000\,039\,356\,501 \cdot R^2 - 0,000\,304\,597\,338 \cdot R + 0,000\,439\,645\,725 + 0,002\,567 \cdot d \quad [\text{W/K}] \quad (35)$$

Kde je

$R$  tepelný odpor podkladní konstrukce v  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

$d$  tloušťka tepelné izolace v m.

Pokud není profil zanořen do tepelné izolace, použije se přírážka (36).

$$\psi = 0,00005 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (36)$$

Pokud je profil zanořen do tepelné izolace, použije se funkce (28), která je společná pro všechny intervaly, žádná přírážka se v tom případě neuplatňuje.

# Závěr

Byly stanoveny zjednodušené výpočetní vztahy pro určení hodnot bodového a lineárního činitele prostupu tepla pro kotvy a profily systému zavěšených fasád, které odpovídají získaným datům z modelování 3D výpočtů 3D konstrukcí. Data získaná modelováním odpovídají svou povahou hodnotám, které ve svých materiálech uvádí výrobce kotev, společnost Hilti. Výsledky výpočetních vztahů reprezentují data s dostatečnou přesností a na straně bezpečnosti. Výpočetní vztahy jsou vhodné k použití spíše ve výpočetním softwaru než pro ruční výpočet. Vzorce jsou použitelné pouze pro kotvy modelované v této práci s výjimkou části určující vliv zanořeného profilu, která je použitelná nezávisle na zvolených kotvách.

Průběh práce se odvíjel podle očekávání, nebylo nutné přehodnocovat zvolenou strategii. Program Comsol Multiphysics® se ukázal být vhodným nástrojem pro tento typ práce. Některé komponenty systému zavěšených fasád testované ve fázi citlivostní analýzy nebyly do výpočetního vztahu zahrnuty, protože bylo prokázáno, že je možné je zanedbat. Bylo nutné modelovat více variant 3D konstrukcí, než bylo na počátku předvídáno. I přestože byla data získávána postupně, ve fázích a jen v případě potřeby, vyšplhal se celkový počet modelů na 320 včetně modelů citlivostní analýzy.

Dalšími navazujícími tématy na tuto práci by mohlo být například ověření odchylky výsledků výpočetních vztahů a původních dat ve všech variantách modelovaných pro původní data a následné matematické vyjádření odchylky. Další možností by bylo sestavení odlišných vzorců, které by lépe nahrazovaly původní data. Bylo by vhodné sestavit takovýto výpočetní vztah také pro nerezové kotvy. Bylo by možné naprogramovat aplikaci pro počítání vazeb zavěšených fasád s grafickým uživatelským prostředím. A nakonec především objasnění chování provětrávané mezery a role obkladu v kontextu tepelné techniky a také vliv difúzní fólie.





# Citovaná literatura

1. HEJLÍČKOVÁ, Lenka. *Rozbor a porovnání předvěšených provětrávaných fasádních systémů*. Plzeň : Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky. Vedoucí práce Ing. Miloslav Mašek, Csc., 2019.
2. HŮLKA, Ctibor a MAŘÍK, Radim a ODEHNAL, Lubomír a ŠTAJNRT, Pavel a ZWIENER, Viktor. *Fasády*. Opava : Střední průmyslová škol stavební, 2014.
3. SLAĎÁK, Richard. *Požární rizika provětrávaných fasádních systémů*. Praha : České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb. Vedoucí práce Ing. Marek Pokorný, Ph.D., 2019.
4. BNP Media. *Conforming to Code. Continuing education center, architecture + construction*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://continuingeducation.bnpmmedia.com/courses/knight-wall-systems/conforming-to-code/4/>.
5. Eurofox GmbH, Společnost skupiny Hilti. MFT-FOX HI. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] [https://www.hilti.co.uk/c/CLS\\_FACADE\\_MOUNTING\\_SYSTEMS/CLS\\_BRACKETS/r1790479](https://www.hilti.co.uk/c/CLS_FACADE_MOUNTING_SYSTEMS/CLS_BRACKETS/r1790479).
6. Iltegro. Hliníkové konstrukce pro provětrané zavěšené fasády. *Iltegro - fasádní systémy*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <http://www.iltegro.cz/hlinikove-konstrukce-pro-provetrane-zavesene-fasady>.
7. Lifebrick®. Fasádní obklad LIFEBRICK® THERM. *life-brick*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://www.lifebrick.eu/lifebrick-cesky/>.
8. NVELOPE. Brackets - Vertical Cladding Systems. *NVELOPE*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] [https://www.nvelope.com/data20/images/5\\_vertical\\_slider\\_714.png](https://www.nvelope.com/data20/images/5_vertical_slider_714.png).
9. GIP. Unterkonstruktionstypen VECO®. *GIP Fassade*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://www.gip-fassade.com/de/produkte/wandbesfetzungen#veco-a-ls>.
10. Swiss Facades, Swisspearl® Fibre Cement Rainscreen Cladding. Swiss Façades provides innovative way to reduce thermal bridging. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://swissfacades.com/swiss-facades-provides-innovative-ways-to-reduce-thermal-bridging/>.

11. Eurofox GmbH, Společnost skupiny Hilti. MFT-FOX VTR L. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] [https://www.hilti.cz/c/CLS\\_FACADE\\_MOUNTING\\_SYSTEMS/CLS\\_BRACKETETS/r7699795](https://www.hilti.cz/c/CLS_FACADE_MOUNTING_SYSTEMS/CLS_BRACKETETS/r7699795).
12. —. MFT\_Technical Manual PRINTING V1.0 low.pdf. [Online] 2019. [https://www.hilti.it/content/dam/documents/pdf/e4/engineering/manuals/MFT\\_Technical%20Manual%20PRINTING%20V1.0%20low.pdf](https://www.hilti.it/content/dam/documents/pdf/e4/engineering/manuals/MFT_Technical%20Manual%20PRINTING%20V1.0%20low.pdf).
13. —. Návod na použití MFT-FOX VT. [Online] 2014. [https://www.hilti.cz/media-canonical/PUB\\_5201456\\_000\\_APC\\_RAW/N%C3%A1vod%20na%20pou%C5%BEit%C3%AD%20MFT-FOX%20VT](https://www.hilti.cz/media-canonical/PUB_5201456_000_APC_RAW/N%C3%A1vod%20na%20pou%C5%BEit%C3%AD%20MFT-FOX%20VT).
14. Svoboda, Zbyněk. Tepelné efekty bodových kotev zavěšených fasádních obkladů. *TZB-INFO*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/140-prostup-tepla-vicevrstvou-konstrukci-a-prubeh-teplot-v-konstrukci>.
15. ČSN 73 0540-2, Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Český normalizační institut : TNK 43 Stavební tepelná technika, 2011.
16. COMSOL. Platform Product: COMSOL MULTIPHYSICS®. [Online] COMSOL INC., 2020. [Citace: 11. 16 2020.] <https://www.comsol.eu/comsol-multiphysics>.
17. Svoboda, Zbyněk. Ke stažení II (manuály k programům)... *Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze*. [Online] Copyright © 2008 - 2020, Katedra konstrukcí pozemních staveb. [Citace: 11. 11 2020.] <https://kps.fsv.cvut.cz/?Tok=6a7e8e8732e465a47446145aec4751f&Sign=bd51b501a2eaa952612e13dfe2a95af3>.
18. HUMUSOFT. COMSOL Multiphysics®. *HUMUSOFT*. [Online] © HUMUSOFT 1991 - 2020. [Citace: 11. 11 2020.] <https://www.humusoft.cz/comsol/details/>.
19. Trimble. *SketchUp*. [Online] © 2020, Trimble Inc. [Citace: 11. 11 2020.] <https://www.sketchup.com/>.
20. Fredo6. FredoTools. *Extension warehouse*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://extensions.sketchup.com/extension/85a09be6-f2b9-4a73-b61e-04a87ecc269b/fredo-tools>.
21. COMSOL, Multiphysics® v. 4.2. *www.comsol.com*. Stockholm, Švédsko : COMSOL AB, 2011.

22. ČSN EN ISO 10211, Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Tepelné toky a povrchové teploty – Podrobné výpočty. *Česká agentura pro standardizaci*. Technická normalizační komise : TNK 43 Stavební tepelná technika, 2020.
23. Error: Internal Error in Geometry Decomposition. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 11. 11 2020.] <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/983>.
24. Discussion Forum. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 27. 10 2020.] <https://www.comsol.com/forum/thread/29023/problem-with-form-union-in-building-geometry>.
25. Caty Fairclough. COMSOL Blog - Efficiently Mesh Your Model Geometry with Meshing Sequences. *www.comsol.com*. [Online] [Citace: 28. 10 2020.] <https://www.comsol.com/blogs/efficiently-mesh-your-model-geometry-with-meshing-sequences/>.
26. Walter Frei. COMSOL Blog - meshing-your-geometry-various-element-types. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 27. 10 2020.] <https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types/>.
27. —. COMSOL Blog - improving-your-meshing-with-partitioning. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 28. 10 2020.] <https://www.comsol.com/blogs/improving-your-meshing-with-partitioning/>.
28. —. COMSOL Blog - Using Virtual Operations to Simplify Your Geometry. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 27. 10 2020.] <https://www.comsol.com/blogs/using-virtual-operations-simplify-geometry/>.
29. Ellen Krusell. COMSOL Blog - Best Practices for Meshing Domains with Different Size Settings. *www.comsol.com*. [Online] COMSOL INC. [Citace: 27. 10 2020.] <https://www.comsol.com/blogs/best-practices-for-meshing-domains-with-different-size-settings/>.
30. Mathmatch. EN 573-3 Grade AW-6063 T66. [Online] © 2020 Matmatch GmbH, 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <https://matmatch.com/materials/alky1863-en-573-3-grade-aw-6063-t66>.
31. BASF. Product Range. *Ultramid (PA)*. [Online] 2020. [Citace: 13. 11 2020.] [https://www.basf.com/cn/documents/en/chinaplas/Ultramid\\_\\_brochure.pdf](https://www.basf.com/cn/documents/en/chinaplas/Ultramid__brochure.pdf).

32. DEKMETAL. Hliníkové plechy. [Online] DEKMETAL, 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <https://dekmetal.cz/fasadni-systemy/materialy/hlinikove-plechy>.
33. TANNER. 1/4" x 3" Powers Power-Bolt Heavy Duty Sleeve Anchors, Hex Head, 304 Stainless Steel. [Online] TANNER, 2018. [Citace: 13. 11 2020.] <https://www.tannerbolt.com/default.aspx?page=item%20detail&itemcode=POW+05906>.
34. ASM. AISI Type 304 Stainless Steel. [Online] ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A>.
35. ČSN 73 0540-3, Tepelná ochrana budov. Část 3: Výpočtové hodnoty veličin pro navrhování a ověřování. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Technická normalizační komise : TNK 43 Stavební tepelná technika, 2005.
36. Cembrit. Cembrit Transparent. [Online] 2017. [Citace: 13. 11 2020.] <https://www.cembrit.cz/media/3242/technick%C3%BD-list-transparent-2017.pdf>.
37. Isover. Isover UNI. [Online] SAINT-GOBAIN, 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <https://www.isover.cz/en/products/isover-uni>.
38. COMSOL. COMSOL Multiphysics® 5.3 Release Highlights. [Online] COMSOL INC. , 2020. [Citace: 13. 11 2020.] <https://www.comsol.com/release/5.3/mesh>.
39. ČSN EN ISO 6946, Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtové metody. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Český normalizační institut : TNK 43 Stavební tepelná technika, 2020.
40. ČSN EN ISO 13789, Tepelné chování budov – Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním – Výpočtová metoda. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Česká agentura pro standardizaci : TNK 43: Stavební tepelná technika, 2019.
41. Jiří Makovička. Regresní techniky v Excelu. [Online] Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2020. [Citace: 25. 11 2020.] <http://web.natur.cuni.cz/~jmakov/ExcelStranky/Regrese.html>.
42. 264/2020:, Vyhláška. *o energetické náročnosti budov*. Ministerstvo průmyslu a obchodu : odbor 41300, 2020.
43. odst. 4, příloha č. 5 k vyhlášce č. 264/2020 Sb. *o energetické náročnosti budov*. Ministerstvo průmyslu a obchodu : odbor 41300, 2020.

44. ČSN 73 0540-4, Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. Technická normalizační komise : TNK 43 Stavební tepelná technika, 2005.

45. Eurofox GmbH, Společnost skupiny Hilti. [Online]  
[https://www.hilti.cz/medias/sys\\_\\_master/images/h7d/h59/9533782589470.jpg](https://www.hilti.cz/medias/sys__master/images/h7d/h59/9533782589470.jpg).

46. —. [Online]  
[https://www.hilti.co.uk/medias/sys\\_\\_master/images/hee/hcc/9533781671966.jpg](https://www.hilti.co.uk/medias/sys__master/images/hee/hcc/9533781671966.jpg).

# Seznam zkratek

angl.	anglicky
ČVUT	České vysoké učení technické
CFD	Computational fluid dynamics, anglické synonymum pro výpočetní dynamiku tekutin
CAD	Computer-aided design, anglické synonymum pro počítačem podporované projektování
DXF	Drawing Interchange Format
ETICS	External Thermal Isulation Composite Systems, anglické synonymum pro vnější kontaktní zateplovací systém
tzv.	takzvané