



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra konstrukcí pozemních staveb**

Tepelný tok zeminou u budov s vytápěným suterénem ve svahu

**Heat transfer via the ground in buildings with a heated
basement in hillsides**

Diplomová práce

Studijní program: Budovy a prostředí
Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Zbyněk Svoboda

Renata Jandová

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jandová Jméno: Renata Osobní číslo: 458787

Zadávací katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: (N3649) Budovy a prostředí

Studijní obor: (3608T006) Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tepelný tok zeminou u budov s vytápěným suterénem ve svahu

Název diplomové práce anglicky: Heat transfer via the ground in buildings with a heated basement in hillsides

Pokyny pro vypracování:

Zpracování 3D modelů suterénů ve svahu (různá geometrie, různé materiály), výpočet tepelného toku z 3D šíření tepla vedením, srovnání výsledků s běžnými, v praxi používanými zjednodušenými metodami, doporučení pro praxi včetně případných modifikací dosud používaných postupů

Seznam doporučené literatury:

Manuál k programu Comsol, ČSN 730540, EN ISO 13370

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Zbyněk Svoboda

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.9.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

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

V Praze dne 3.1.2020

.....

podpis

Poděkování

Mé poděkování patří doc. Dr. Ing. Zbyňku Svobodovi za odborné vedení diplomové práce, cenné rady a vstřícnost při jejím zpracování.

Anotace

Cílem diplomové práce je stanovit přesnost různých výpočtů prostupu tepla obalovými konstrukcemi vytápěných suterénů ve svahu, tj. suterénů, které mají obvodové stěny často velmi rozdílně zasypané zeminou. V první části diplomové práce jsou představeny jednotlivé metody zjednodušených výpočtů a následně je popsán způsob stanovení ustálených měrných tepelných toků v softwaru Comsol Multiphysics. Měrné tepelné toky stanovené detailní 3D analýzou v programu Comsol Multiphysics jsou porovnány s měrnými tepelnými toky zeminou, stanovenými podle ČSN EN ISO 13370 a výpočtem s použitím činitelů teplotní redukce, které jsou definovány v normě ČSN 73 0540-3. Pro suterény obdélníkového půdorysu, které mají konstrukce navržené na požadované a lepší hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2 jsou definovány vztahy, které uživatelům (energetickým specialistům) upřesní, jak moc se liší zjednodušený výpočet od detailního, přesnějšího založeného na 3D modelu.

Klíčová slova

Zemina, svah, vytápěný suterén, měrný tepelný tok, činitel teplotní redukce

Annotation

The aim of the diploma thesis is to determine the accuracy of various calculations of heat transfer through the packaging structures of heated basements in the slope, basements that have perimeter walls often very differently covered with soil. The first part of the diploma thesis presents individual methods of simplified calculations and then describes the method of determining the steady specific heat fluxes in the software Comsol Multiphysics. The specific heat fluxes determined by detailed 3D analysis in the Comsol Multiphysics program are compared with the specific heat fluxes through the soil, determined according to ČSN EN ISO 13370 and calculated using temperature reduction factors, which are defined in the ČSN 73 0540-3 standard. Relationships that specify to users (energy specialists) how much the simplified calculation differs from a detailed, more accurate 3D model based are defined for basements with a rectangular floor plan, which have structures designed for the required and better values of heat transfer coefficient according to ČSN 73 0540-2.

Keywords

Soil, hillside, heated basement, heat transfer, factor of thermal reduction

Obsah

1. Obecné předpoklady pro modely	10
2. Výpočet pomocí zjednodušených postupů	12
2.1 Metoda „béček“	12
2.2 Metoda „béček“ a podlahy na zemině.....	15
2.3 Metoda „béček“, podlahy na zemině a suterénní stěny.....	18
2.4 Metoda „béček“, podlahy suterénu a suterénní stěny	20
2.5 Tepelné vazby	22
3. Postup a výpočet detailní 3D analýzy	23
3.1 Geometrie	23
3.2 Materiál	25
3.3 Okrajové podmínky.....	27
3.4 Analýza hustoty sítě	29
3.5 Vliv základových konstrukcí na prostup tepla zeminou	33
4. Výsledky analyzovaných modelů	36
4.1 Model čtverec.....	36
4.2 Model obdélník	40
4.2.1. Obdélník rovnoběžně se svahem	40
4.2.2. Obdélník kolmo ke svahu	52
4.3 Model L.....	64
5. Stanovení vztahu pro odhad chyby zvoleného zjednodušeného výpočtu ... 69	
5.1 Vztah pro obdélník rovnoběžně se svahem.....	69
5.1.1 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku 3D analýzou.....	69
5.1.2 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku zjednodušenými metodami	71
5.1.3 Výsledný vztah pro odhad chyby zjednodušených metod.....	76
5.2 Vztah pro obdélník kolmo ke svahu.....	77
5.2.1 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku 3D analýzou.....	77

5.2.2	Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku zjednodušenými metodami	78
5.2.3	Výsledný vztah pro odhad chyby zjednodušených metod.....	83
6	Ověření přibližného vztahu	84
7	Chování suterénu ve svahu s různými vlastnostmi konstrukcí.....	88
7.1	Vlastnosti konstrukcí pro stávající objekty	88
7.2	Vlastnosti konstrukcí pro rekonstruované objekty.....	89
7.3	Výsledky pro suterény s různými vlastnostmi konstrukcí	92
8	Závěr.....	95
9	Zdroje	97

Seznam příloh

- Příloha A – Protokol výpočtu čtvercového modelu vytápěného suterénu ve svahu se sklonem 60° v softwaru Comsol Multiphysics
- Příloha B – Stanovení měrných tepelných toků pro jednotlivé zjednodušené metody pro vytápěný suterén ve svahu se sklonem 60°

Úvod

Výpočet prostupu tepla zeminou (tj. přes konstrukce přilehlé k zemině) se používá např. pro stanovení potřebného tepelného výkonu zdroje tepla. Dále se užívá při zpracování průkazu energetické náročnosti budovy, který je nutné vyhotovit při výstavbě nové budovy, při větší změně dokončené budovy, ale i při prodeji a pronájmu celého objektu nebo jeho ucelené části. Jak vidíme, stanovení tepelného toku skrz konstrukce ve styku se zeminou je nedílnou součástí mnoha technických výpočtů a z tohoto důvodu je nutné této problematice věnovat dostatečnou pozornost.

Uživatel, ve většině případů energetický specialista, potýkající se s tímto výpočtem je odkazován na technickou normu ČSN EN ISO 13370 [1], která metodicky popisuje pouze a jen nejjednodušší umístění budovy na vodorovném terénu. Při složitějším umístění budovy v nakloněném terénu nezbyvá specialistům nic jiného, než chybějící výpočetní vztahy s různou mírou kreativity doplnit o zjednodušené vztahy a postupy. Pro tyto účely se ve velké míře používá výpočet měrných tepelných toků prostupem s použitím činitele teplotní redukce, který je definován v ČSN 730540 – 3 [2] nebo je vypočítán na základě odhadnuté teploty v zemině. Tento způsob výpočtu může specialista aplikovat na všechny nebo jen na některé suterénní konstrukce ve styku se zeminou.

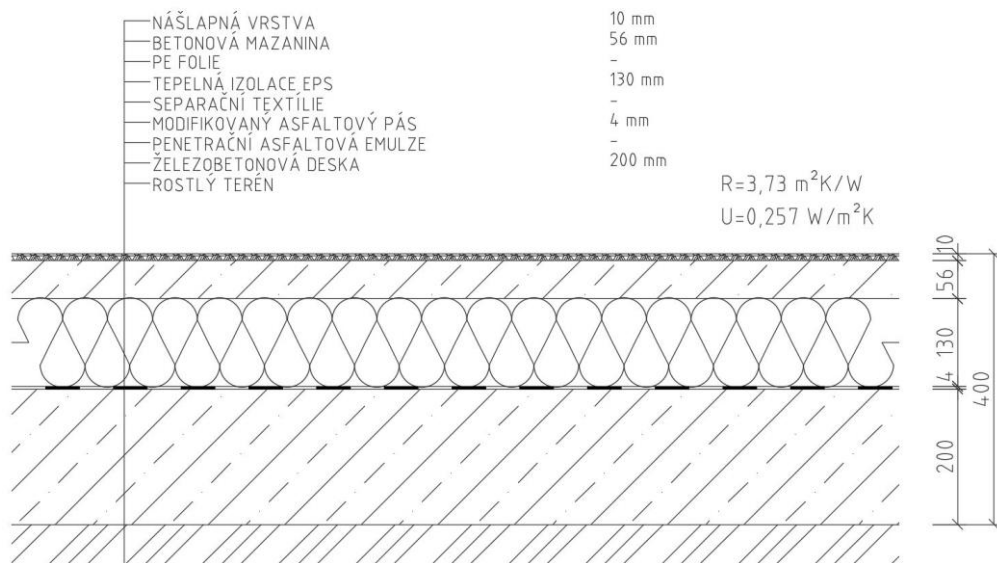
Lze tedy k danému zadání přistoupit zcela individuálně dle vlastního uvážení. Bohužel není k dispozici žádná zpětná vazba, zda stanovená hodnota odpovídá skutečnosti.

Z výše uvedených důvodů jsem si v této práci dala za cíl porovnat měrné tepelné toky stanovené detailním 3D výpočtem v softwaru s běžně používanými zjednodušenými výpočty. Tím bych mohla uživateli poskytnout informaci, jak se přibližně vypočtený měrný tepelný tok konstrukcemi ve styku se zeminou liší od detailního, přesnějšího výpočtu založeného na 3D modelu, který z časových důvodů většinou nelze v praxi provádět.

1. Obecné předpoklady pro modely

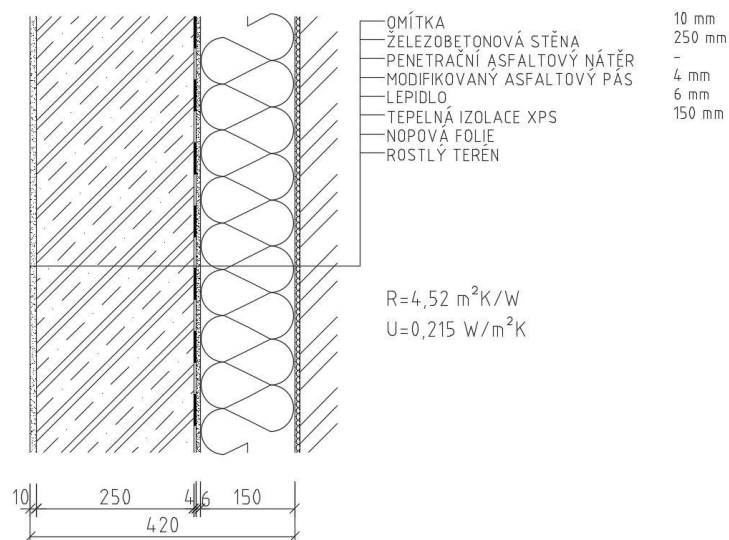
Všechny řešené modely svými tepelně-izolačními vlastnostmi konstrukcí odpovídají dnešním novostavbám. Vzhledem ke stále se zvyšujícím požadavkům se konstrukce doporučuje navrhovat na hodnoty součinitele prostupu tepla lepší, než doporučené dle ČSN 73 0540-2 [3]. A právě tyto hodnoty jsou pro tuto analýzu použity.

PODLAHA SUTERÉNU



Obr. 1: Skladba podlahy suterénu

STĚNA SUTERÉNU



Obr. 2: Skladba stěny suterénu

Podlaha suterénu má celkový tepelný odpor $3,73 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ a celkovou tloušťku 400 mm. Celková tloušťka stěny suterénu je 420 mm a má celkový tepelný odpor $4,52 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. Součinitel tepelné vodivosti zeminy je uvažován pro všechny případy $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Ve vnitřním prostředí je počítáno s $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a ve venkovním prostředí je uvažováno s $-15 \text{ }^\circ\text{C}$.

V celé práci je předmětem řešení ustálený tepelný tok, který je významnou vstupní hodnotou pro výpočet měsíčních tepelných toků přes zeminu a je základní vstupní hodnotou pro výpočet průměrného součinitele prostupu tepla.

2. Výpočet pomocí zjednodušených postupů

V běžné praxi se setkáváme s nejrůznějšími výpočetními postupy pro stanovení měrného tepelného toku skrz konstrukce ve styku se zeminou. V této diplomové práci se věnuji numerickým výpočtům s použitím činitelů teplotní redukce, které jsou uvedeny v normě ČSN 730540 – 3 Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin [2] a výpočtům, které jsou stanoveny v normě ČSN EN ISO 13370 Tepelné chování budov – Přenos tepla zeminou – Výpočtové metody [1].

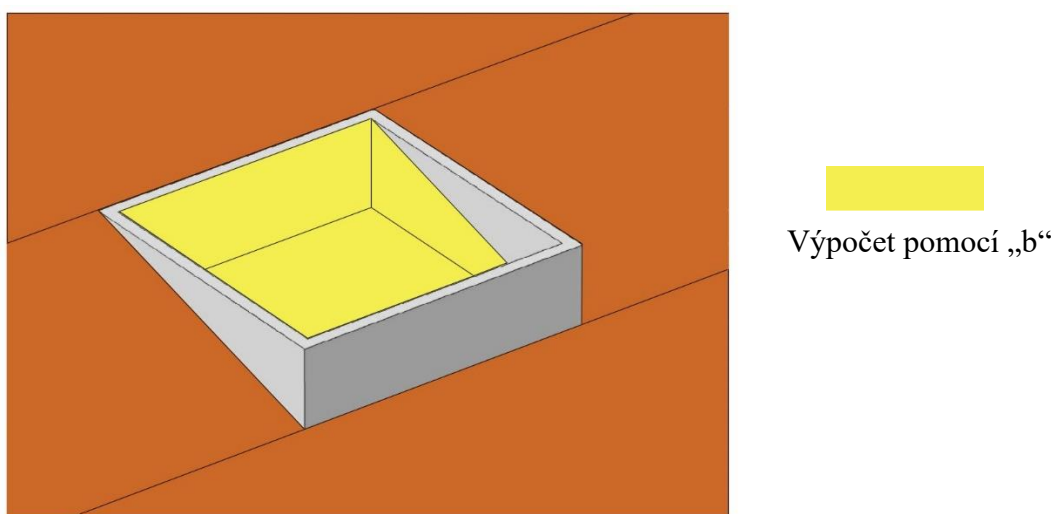
Norma ČSN EN ISO 13370 nám udává metody výpočtu tepelných toků stavebními konstrukcemi, které jsou v tepelném kontaktu se zeminou. Postup výpočtu je různý pro podlahy na zemině, zvýšené podlahy, vytápěné a nevytápěné suterény. Součástí tohoto dokumentu je jednak numerický výpočet za ustáleného stavu přenosu tepla (roční průměrný tepelný tok), ale i přenos tepla, který je ovlivněn ročním periodickým kolísáním teploty (sezónní kolísání tepelného toku okolo ročního průměru). Normou uvedené výpočetní metody uvažují s trojrozměrným charakterem tepelného toku v zemi pod budovami. V rámci celé diplomové práce se však věnuji pouze a jen ustálenému stavu.

Pro jednotlivé modely vytápěných suterénů ve svahu je ustálený měrný tepelný tok skrz konstrukce ve styku se zeminou spočítán čtyřmi různými způsoby. V následujících podkapitolách jsou uvedeny principy výpočtu.

2.1 Metoda „běček“

Jako nejjednodušší a nejméně časově náročný výpočet prostupu tepla konstrukcí ve styku se zeminou lze označit přibližný výpočet s pomocí činitele teplotní redukce. Činitel teplotní redukce „b“ je bezrozměrná hodnota, pomocí které se zohledňuje vyšší teplota za konstrukcí, než je v exteriéru, při výpočtu měrných tepelných ztrát prostupem tepla skrz tuto konstrukci [4]. Hodnota činitele teplotní redukce se tedy pohybuje v rozmezí hodnot 0 až 1, kdy právě číslo 1 vyjadřuje, že se jedná o konstrukci, která odděluje vytápěný prostor od venkovního. V případě konstrukce, která je v kontaktu se zeminou, je hodnota obvykle nižší než 1, protože teplota zeminy je většinou vyšší než teplota exteriéru.

Tento první způsob výpočtu, který je nazván metoda „béček“, počítá podlahu a stěny v kontaktu se zemínou právě pomocí činitele teplotní redukce (Obr 3.). Vzhledem k tomu, že k výpočtu jsou potřeba pouze nejzákladnější informace o vytápěném suterénu, jeví se tento vztah jako velmi jednoduchý a především rychlý. Z tohoto důvodu většina energetických specialistů pravděpodobně použije právě tento vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku konstrukcemi přiléhajícími k zemině.



Obr. 3: Schématické znázornění 1. způsobu výpočtu pro vytápěný suterén

Hodnoty činitele teplotní redukce lze vypočítat na základě odhadnuté teploty v zemině, nebo použít hodnoty, které jsou definovány v normě ČSN 73 0540 – 3 Tepelná ochrana budov – část 3: Návrhové hodnoty veličin v tab. F2 [2].

Tab. 1: Návrhové hodnoty činitele teplotní redukce [2]

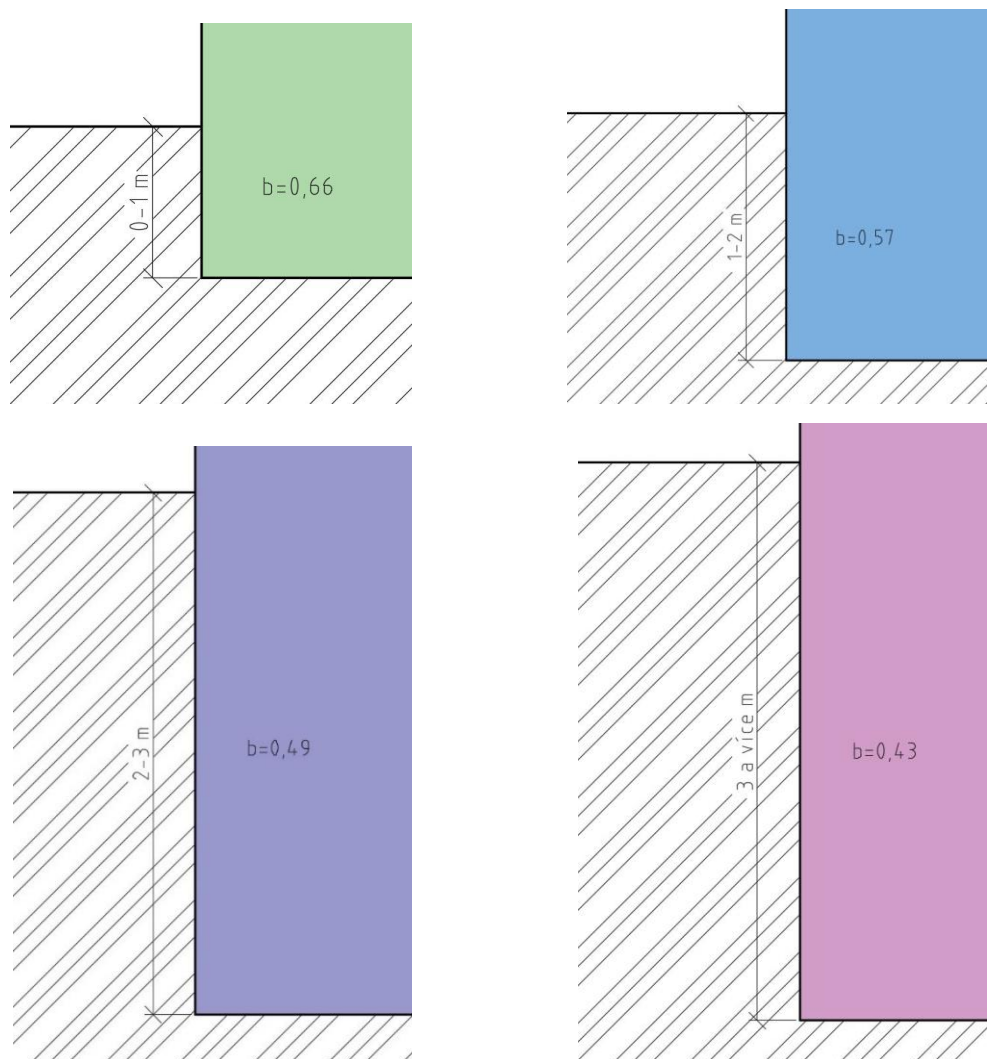
	Činitel teplotní redukce b (-)	
Typ konstrukce	Vnitřní vytápěné prostředí	
Konstrukce přilehlá k zemině		
Ve vzdálenosti od venkovního povrchu terénu u konstrukce	do 1 m včetně	0,66
	od 1 m do 2 m včetně	0,57
	od 2 m do 3 m včetně	0,49
	nad 3 m	0,43

Měrnou tepelnou ztrátu prostupem tepla zeminou H_g (W/K) lze následně stanovit z obecného vztahu:

$$H_g = A \cdot U \cdot b \quad (1)$$

- A plocha konstrukce v kontaktu se zeminou, v m²
U součinitel prostupu tepla konstrukce, ve W/(m²·K)
b činitel teplotní redukce, (-)

Ve vztahu (1) je počítáno se součinitelem prostupu tepla, který je bez vlivu zeminy, a právě činitel teplotní redukce zohledňuje rozdíl teplot působících na konstrukci.

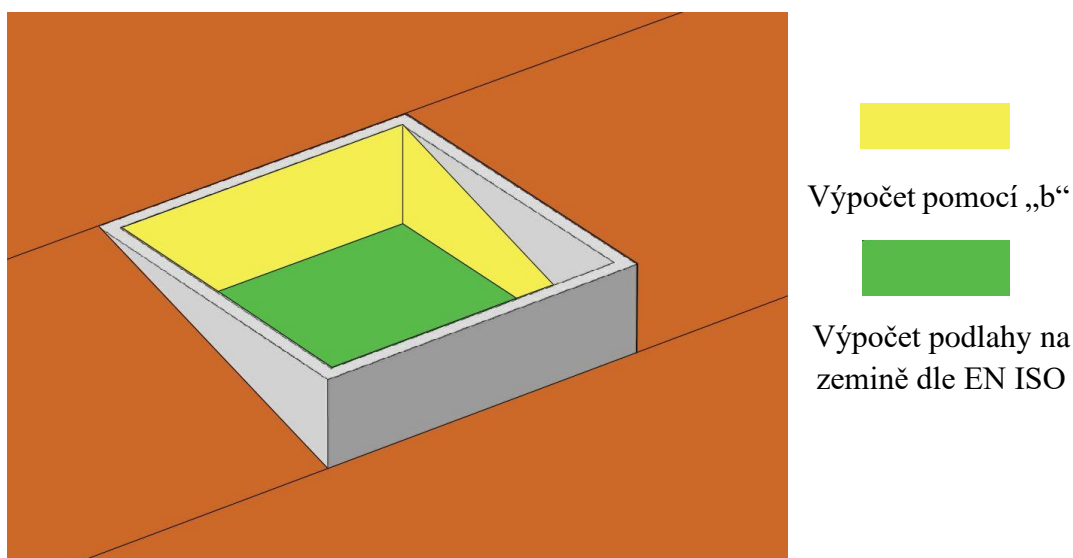


Obr. 4: Schématické znázornění stanovení činitele teplotní redukce

Vzhledem k řešeným modelům, které jsou ve svahu s různým sklonem, je potřeba určit výšku od venkovního povrchu terénu ke konstrukci podlahy. Ta je stanovena pro každý model zvlášť jako vážený průměr všech výšek a následně je přiřazena hodnota činitele teplotní redukce dle Tab. 1.

2.2 Metoda „bčcek“ a podlahy na zemině

Druhý způsob výpočtu pro vytápěný suterén (Obr. 5), který je částečně v kontaktu se zeminou, je prováděn dle ČSN EN ISO 13370 [1] jako pro podlahu na zemině a suterénní stěny, které jsou zjednodušeně počítány pomocí činitelů teplotní redukce dle ČSN 73 0540-3, kde jsou jednotlivé hodnoty definovány.



Obr. 5: Schématické znázornění 2. způsobu výpočtu pro vytápěný suterén

Stanovení měrného tepelného toku skrz konstrukce stěn suterénu se shoduje s postupem uvedeným v prvním způsobu výpočtu. U stěn, které jsou v kontaktu se zeminou, je počítáno se součinitelem prostupu tepla, který je bez vlivu zeminy. A právě tento vliv bude zahrnut pomocí činitele teplotní redukce. Zatímco u podlahy na zemině, která je spočtena dle ČSN 73 0540-3 [2], se počítá se součinitelem prostupu tepla, který už obsahuje vliv zeminy.

Níže popsané výpočtové metody pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku pro podlahu na zemině jsou převzaty z technické normy ČSN EN ISO 13370 [1].

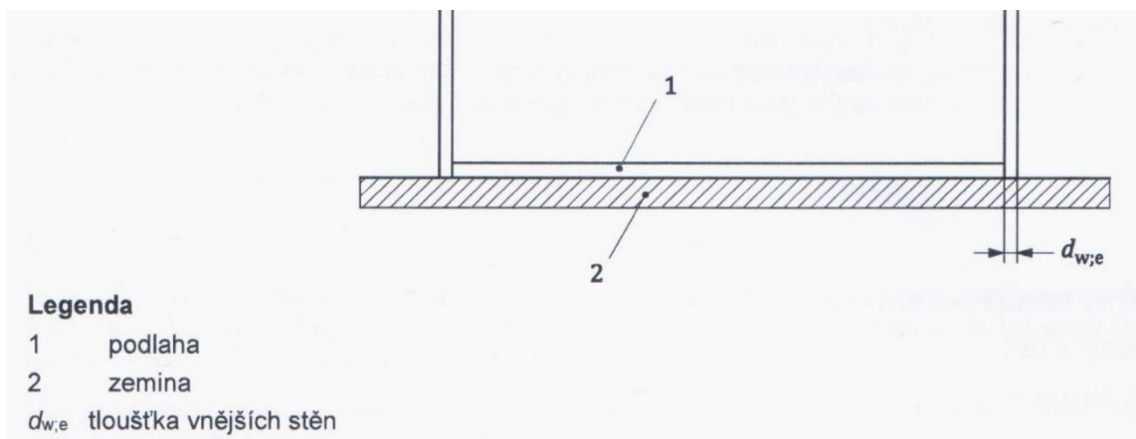
Podlaha na zemině je tvořena deskou, která je celá v kontaktu se zeminou. Pro stanovení součinitele prostupu tepla podlahou na zemině $U_{fg;so g}$ ($W/(m^2 \cdot K)$), je nutné si definovat charakteristický rozměr podlahy B dle vztahu (2) a celkovou ekvivalentní tloušťku d_f dle vztahu (3).

$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (2)$$

- B charakteristický rozměr podlahy, v m
 A plocha podlahy, v m^2
 P exponovaný obvod, v m.

$$d_f = d_{w,e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;b} + R_{se}) \quad (3)$$

- d_f celková ekvivalentní tloušťka, v m
 $d_{w,e}$ plná tloušťka stěn, včetně všech vrstev, v m
 λ_g tepelná vodivost zeminy, ve $W/m \cdot K$
 R_{si} součinitel přestupu tepla na vnitřní straně podlahové konstrukce, v $m^2 \cdot K/W$
 $R_{f;b}$ tepelný odpor podlahy, zahrnující všechny celoplošné izolační vrstvy umístěné nad nebo pod podlahovou deskou nebo uvnitř podlahového souvrství a jakoukoli nášlapnou vrstvou, v $m^2 \cdot K/W$
 R_{se} součinitel přestupu tepla na vnější straně podlahové konstrukce, v $m^2 \cdot K/W$.



Obr. 6: Schématické znázornění budovy s podlahou na zemině [1]

Pro $d_f < B$ (neizolované nebo mírně izolované podlahy suterénu) platí:

$$U_{fg;sog} = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_f} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right) \quad (4)$$

pro $d_f \geq B$ (dostatečně izolované podlahy suterénu) platí:

$$U_{fg;sog} = \frac{\lambda_g}{0,457 \times B + d_f} \quad (5)$$

λ_g tepelná vodivost zeminy, ve W/m·K
 B charakteristický rozměr podlahy, v m
 d_f celková ekvivalentní tloušťka, v m.

Pro dostatečně izolované podlahy na zemině se může také využít následující vztah:

$$U_{fg;sog} = \frac{1}{\left(R_{si} + R_f + R_{se} + \frac{d_{w,e}}{\lambda_g} \right) + R_{g;eff}} \quad (6)$$

kde efektivní tepelný odpor zeminy $R_{g;eff}$, v m²·K/W se vypočítá podle vztahu:

$$R_{g;eff} = \frac{0,457 \times B}{\lambda_g} \quad (7)$$

R_{si} součinitel přestupu tepla na vnitřní straně podlahové konstrukce, v m²·K/W
 R_f tepelný odpor podlahy, zahrnující všechny celoplošné izolační vrstvy umístěné nad nebo pod podlahovou deskou nebo uvnitř podlahového souvrství a jakoukoli nášlapnou vrstvou, v m²·K/W
 R_{se} součinitel přestupu tepla na vnější straně podlahové konstrukce, v m²·K/W
 $d_{w,e}$ plná tloušťka stěn, včetně všech vrstev, v m
 λ_g tepelná vodivost zeminy, ve W/m·K
 $R_{g;eff}$ efektivní tepelný odpor zeminy, v m²·K/W
 B charakteristický rozměr podlahy, v m.

Tento vztah však v rámci výpočtů nebyl použit a je zde uveden jen z důvodu, že je součástí technické normy.

Výsledný ustálený měrný tepelný tok zeminou H_g mezi vnitřním a vnějším prostředím se vypočítá ze vztahu:

$$H_g = A \cdot U_{fg;sog} \quad (8)$$

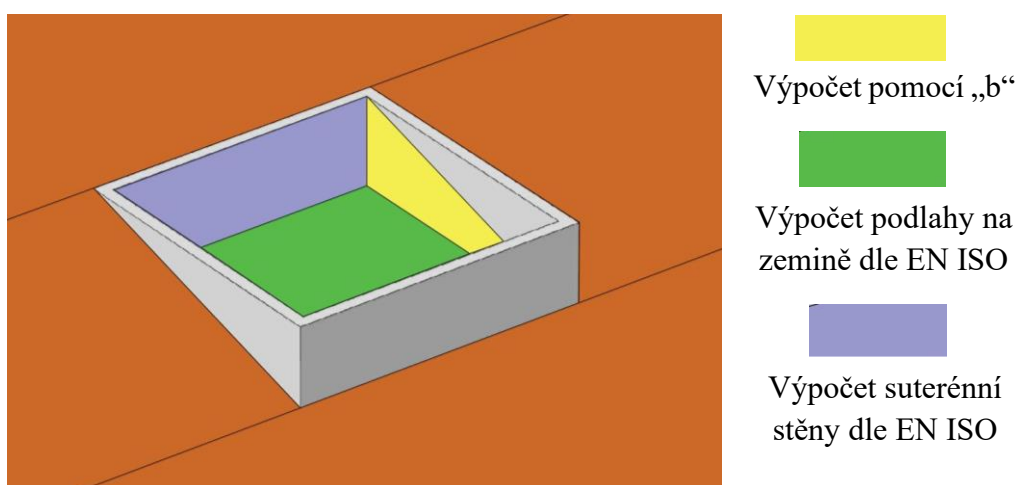
$U_{fg;sog}$ součinitel prostupu tepla podlahy na zemině, $W/m^2 \cdot K$

A plocha podlahy, v m^2 .

2.3 Metoda „béček“, podlahy na zemině a suterénní stěny

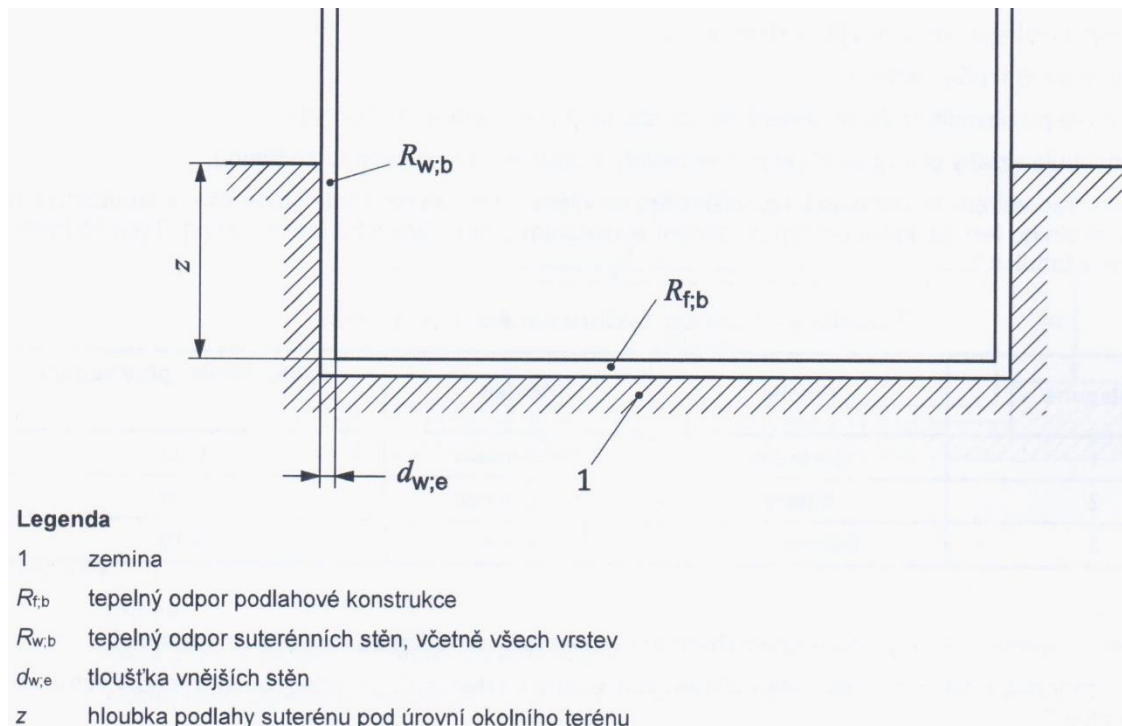
V pořadí třetí metoda výpočtu je časově náročnější z důvodu použití tří různých způsobů výpočtů pro vytápěný suterén (Obr. 7).

Obsahuje též výpočet stěn pomocí činitele teplotní redukce, ale pouze těch stěn, které jsou ve svahu v kontaktu se zeminou. Vzdálenost od venkovního povrchu terénu u těchto stěn je opět stanovena pro každý model zvlášť jako vážený průměr všech výšek a následně je přiřazena hodnota činitele teplotní redukce. Stěna, která je po celé své výšce v kontaktu se zeminou, je počítána jako suterénní stěna dle normy ČSN EN ISO 1370 [1] a podlaha suterénu je též počítána jako podlaha na zemině dle technické normy jako je tomu v předešlé kapitole.



Obr. 7: Schématické znázornění 3. způsobu výpočtu pro vytápěný suterén

Při numerickém výpočtu suterénních stěn vytápěného suterénu se zohledňuje tepelný odpor suterénních stěn a jejich tloušťka (Obr. 8).



Obr. 8: Schématické znázornění budovy s vytápěným suterénem [1]

Níže popsané výpočtové metody pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku pro suterénní stěnu jsou převzaty z technické normy ČSN EN ISO 13370 [1].

Pro stanovení hodnoty součinitele prostupu tepla pro stěny vytápěného suterénu U_{wg} ($W/m^2 \cdot K$) je potřeba vypočítat celkovou ekvivalentní tloušťku stěn suterénu $d_{w;b}$ (m) podle vztahu:

$$d_{w;b} = \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{w;b} + R_{se}) \quad (9)$$

λ_g tepelná vodivost zeminy, ve $W/m \cdot K$

R_{si} součinitel přestupu tepla na vnitřní straně stěny suterénu, v $m^2 \cdot K/W$

$R_{w;b}$ tepelný odpor suterénních stěn, v $m^2 \cdot K/W$

R_{se} součinitel přestupu tepla na vnější straně stěny suterénu, v $m^2 \cdot K/W$.

Pro $d_{w;b} \geq d_f$ platí:

$$U_{wg;b} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \times d_f}{d_f + z} \right) \cdot \ln \left(\frac{z}{d_{w;b}} + 1 \right) \quad (10)$$

pro $d_{w;b} < d_f$ platí:

$$U_{wg;b} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \times d_{w;b}}{d_{w;b} + z} \right) \cdot \ln \left(\frac{z}{d_{w;b}} + 1 \right) \quad (11)$$

- z hloubka podlahy suterénu pod úrovní terénu, v m
- λ tepelná vodivost zeminy, ve W/m·K
- d_f celková ekvivalentní tloušťka podlahy, v m
- $d_{w;b}$ celková ekvivalentní tloušťka stěn suterénu, v m.

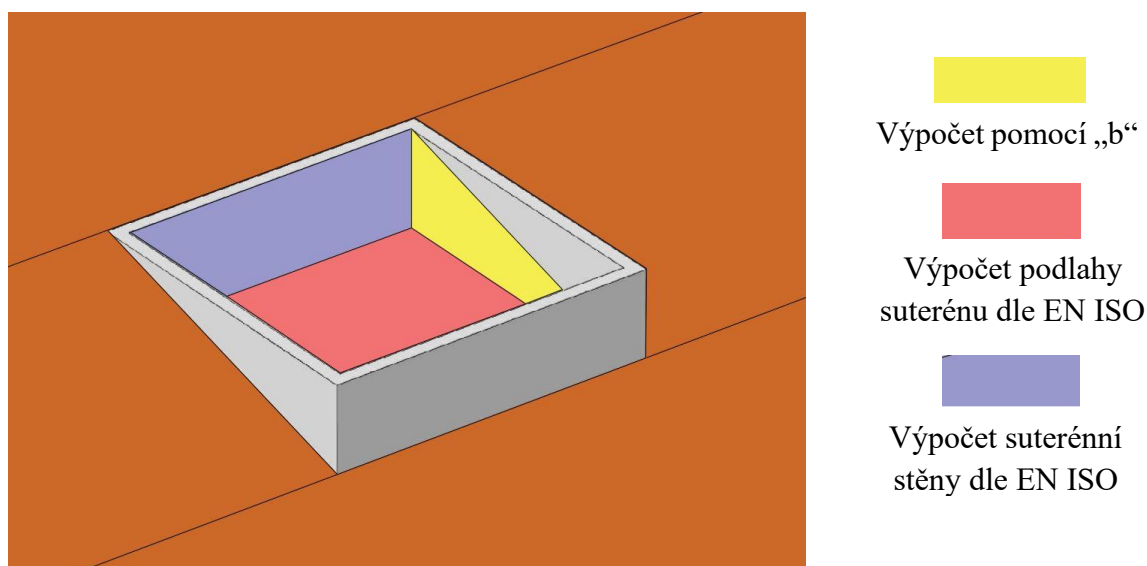
Ustálený měrný tepelný tok zeminou H_g mezi vnitřním a venkovním prostředím lze stanovit ze vztahu:

$$H_g = z \cdot P \cdot U_{wg;b} \quad (12)$$

- z hloubka podlahy suterénu pod úrovní terénu, v m
- $U_{wg;b}$ součinitel prostupu tepla suterénní stěny, W/m²·K
- P exponovaný obvod, v m.

2.4 Metoda „běček“, podlahy suterénu a suterénní stěny

Čtvrtý a poslední způsob výpočtu je obdobný předchozímu s tím rozdílem, že podlaha je počítána jako podlaha suterénu dle ČSN EN ISO1370 (Obr. 9). Hloubka podlahy suterénu pod úrovní okolního terénu byla opět stanovena váženým průměrem pro jednotlivé modely.



Obr. 9: Schématické znázornění 4. způsobu výpočtu pro vytápěný suterén

Při numerickém výpočtu podlahy vytápěného suterénu se zohledňuje tepelný odpor podlahové konstrukce a hloubka podlahy suterénu pod úrovní okolního terénu (Obr. 8).

Princip výpočtu součinitele prostupu tepla podlahy suterénu je obdobný s výpočtem výše zmíněné podlahy na zemině. Výpočtové vztahy pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku pro podlahu suterénu jsou opět převzaty z technické normy ČSN EN ISO 13370 [1].

Pro stanovení součinitele prostupu tepla podlahy $U_{fg;b}$ (W/m²·K) je potřeba vypočítat charakteristický rozměr podlahy podle vztahu (2) a ekvivalentní tloušťku podlahy podle vztahu (3).

Pro $(d_f + 0,5 \times z) < B$ (neizolované nebo mírně izolované podlahy suterénu) platí:

$$U_{fg;b} = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_f + 0,5 \times z} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f + 0,5 \times z} + 1 \right) \quad (13)$$

pro $(d_f + 0,5 \times z) \geq B$ (dostatečně izolované podlahy suterénu) platí:

$$U_{fg;b} = \frac{\lambda_g}{0,457 \times B + d_f + 0,5 \times z} \quad (14)$$

λ_g	tepelná vodivost zeminy, ve W/m·K
B	charakteristický rozměr podlahy, v m
d_f	celková ekvivalentní tloušťka podlahy, v m
z	hloubka podlahy suterénu pod úrovní terénu, v m.

Ustálený měrný tepelný tok zeminou H_g mezi vnitřním a venkovním prostředím lze stanovit ze vztahu:

$$H_g = A \cdot U_{fg;b} \quad (15)$$

$U_{fg;b}$	součinitel prostupu tepla podlahy suterénu, ve W/m ² ·K
A	plocha podlahy, v m ² .

2.5 Tepelné vazby

V rámci numerického výpočtu je připočtena přírážka na vliv tepelných vazeb dle ČSN 73 0540-4 [5], která je přenásobena plochou ve styku se zeminou. Výsledný ustálený měrný tepelný tok prostupem tepla lze pak stanovit ze vztahu:

$$H_T = H_g + \Delta U_{em} \cdot \Sigma A \quad (16)$$

H_T	měrný tepelný tok prostupem tepla konstrukce, v W/K
H_g	měrný tepelný tok prostupem tepla konstrukcemi ve styku se zeminou, v W/K
ΔU_{em}	přírážka na vliv tepelných vazeb, ve W/(m ² ·K)
A	plocha konstrukce přilehlá k zemině, v m ² .

Přírážka na vliv tepelných vazeb se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,02 do 0,1 W/(m²·K) v závislosti na kvalitě řešení teplených vazeb. Pro všechny výpočty byla stanovena hodnota vlivu tepelných vazeb 0,02 W/(m²·K). Předpokládají se tedy kvalitně řešené detaily.

3. Postup a výpočet detailní 3D analýzy

3D analýza je provedena v komerčním softwaru Comsol Multiphysics [6]. Jedná se o program, který je určen k modelování a simulaci různých fyzikálních jevů pomocí metody konečných prvků. Program obsahuje nástroje k vytvoření a analýze modelu – definování geometrie, nastavení materiálových vlastností, zadání okrajových podmínek, vytvoření sítě, nastavení řešičů a generování samotných výsledků, ať už v grafické nebo číselné podobě [7].

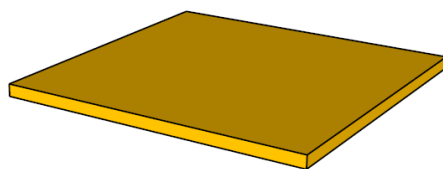
Pro snazší práci v toto softwaru jsem nastudovala „Manuál k programu Comsol“ [8] a pro lepší orientaci v tomto programu byla použita diplomová práce „Počítačové modelování v programu COMSOL Multiphysics“ [9].

3.1 Geometrie

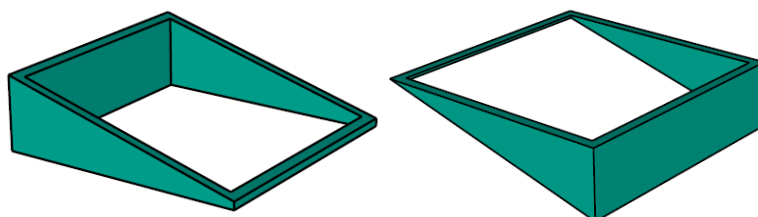
V programu Comsol Multiphysics lze geometrii vytvořit dvěma způsoby. První způsob představuje vytvoření geometrického tělesa z nabídky. V případě vytvoření modelu ve 3D lze použít krychli, kužel, válec, kouli, excentrický kužel, elipsoid, spirálu, šestihran, pyramidu, čtyřstěn a toroid. Druhým způsobem je import geometrie, která je vytvořena v jiném 3D programu.

Vzhledem k různorodosti řešených modelů, které se liší svým půdorysem a sklonem svahu není geometrie modelována přímo v programu Comsol Multiphysics, neboť by tvorba modelů byla časově a technicky náročná. Jednotlivé modely jsou nejprve vytvořeny v softwaru SketchUp [10], který umožňuje tvorbu 3D modelů a exportovat soubory ve formátu s koncovkou stl.

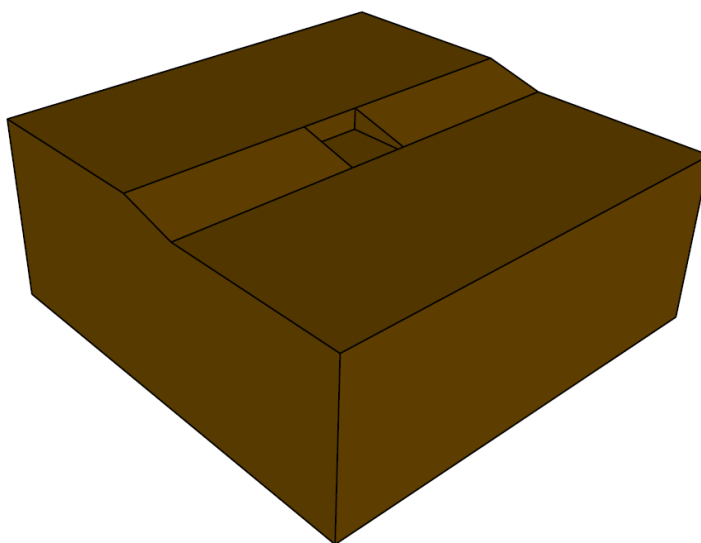
Při importování geometrie z programu SketchUp bohužel nelze vložit najednou celý model, neboť poté nelze k jednotlivým částem přiřadit materiál. Z tohoto důvodu byl daný model vytvářen a importován po jednotlivých částech. Model se skládá z podlahy suterénu (Obr. 10), stěny v kontaktu se zeminou a stěny v kontaktu s okolním vzduchem (Obr. 11) a charakteristického bloku zeminy (Obr. 12). Stěna musí být rozdělena na stěnu v kontaktu se zeminou a v kontaktu s okolním vzduchem z důvodu možnosti stanovení měrného tepelného toku pouze na ploše, která je ve styku se zeminou.



Obr. 10: Model podlahy vytvořený v programu SketchUp

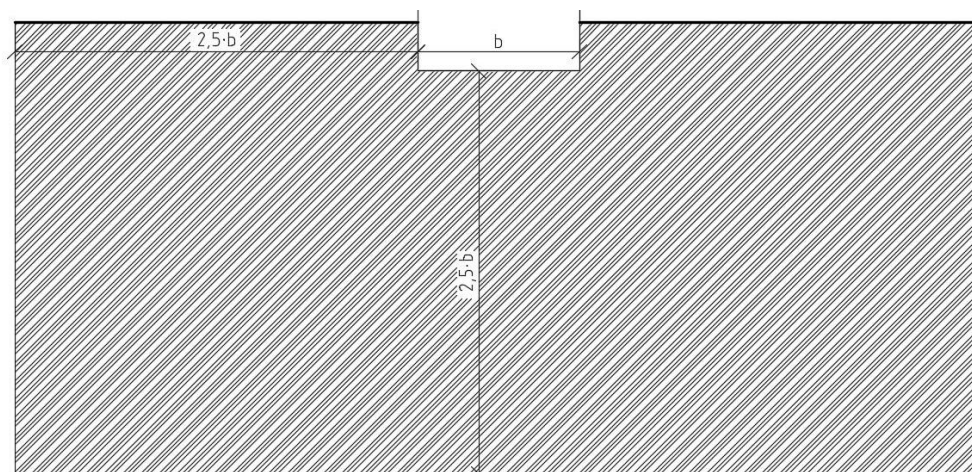


Obr. 11: Modely stěn vytvořené v programu SketchUp



Obr. 12: Modely charakteristického bloku zeminy vytvořeného v programu SketchUp

Při tvorbě geometrie představující zeminu je nutné pamatovat na dodržení rozměrů pro výpočet tepelných toků. Rozměry bloku zeminy jsou závislé na šířce hodnoceného objektu (Obr. 13).



Obr. 13: Rozměry zeminy pro výpočet tepelného toku

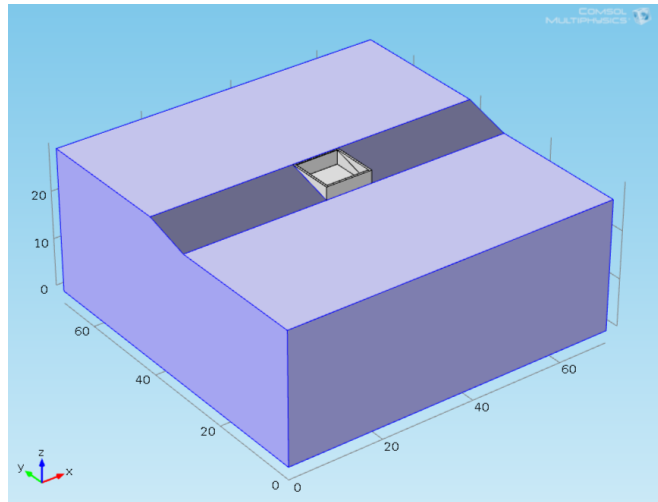
3.2 Materiál

Při vytváření modelu je nutným krokem definovat materiál jednotlivým importovaným geometriím. Program obsahuje knihovnu materiálů, které mají předdefinované fyzikální vlastnosti, ale lze také vytvořit vlastní materiál. V našem případě je lepší nadefinovat si vlastní materiály a ty následně přiřadit jednotlivým importovaným oblastem.

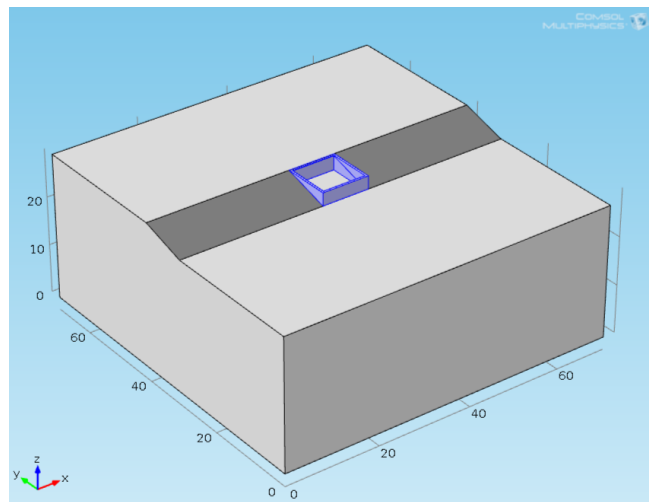
Zjednodušeně je podlaha a stěna vložena jako jeden materiál. Z tohoto důvodu je potřeba si nejdříve ze stanovených skladeb konstrukcí, které mají hodnoty součinitele prostupu tepla lepší než doporučené hodnoty podle ČSN 73 0540-2 [3], definovat měrnou tepelnou kapacitu, součinitel tepelné vodivosti a objemovou hmotnost pomocí váženého průměru (Tab. 2). Součinitel tepelné vodivosti zeminy je uvažován 2 W/(m·K). Podlaha suterénu má celkový tepelný odpor 3,73 m²·K/W a celkovou tloušťku 400 mm. Celková tloušťka stěny suterénu je 420 mm a má celkový tepelný odpor 4,52 W/m²·K.

Tab. 2: Definované hodnoty pro vytvoření materiálu

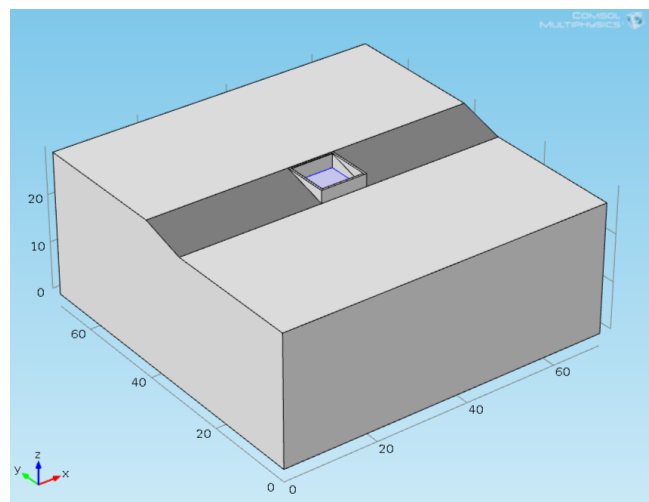
	Tepelná vodivost λ (W/(m·K))	Objemová hmotnost ρ (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita c (J/(kg·K))
Zemina	2	2000	920
Stěny	0,093	1431	1111
Podlaha	0,107	1513	1101



Obr. 14: Přiřazení materiálu – zeminy importované geometrii



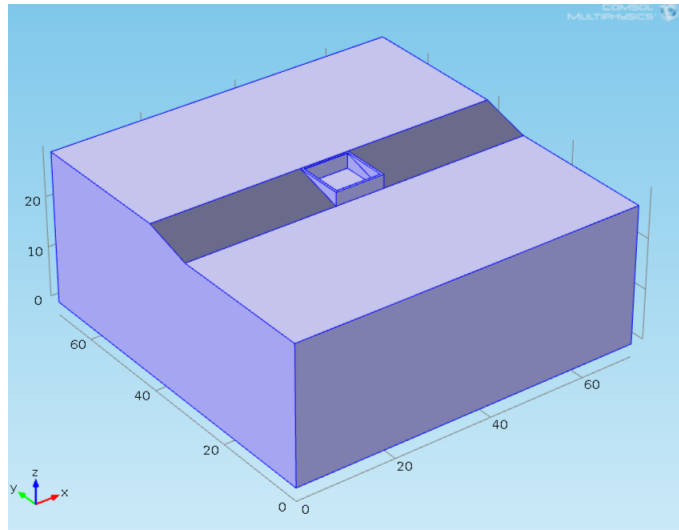
Obr. 15: Přiřazení materiálu – stěn importované geometrii



Obr. 16: Přiřazení materiálu – podlahy importované geometrii

3.3 Okrajové podmínky

Nejprve se pro všechny hranice detailu předpokládají adiabatické podmínky (Obr. 17), tedy přes hranici neprochází žádný tepelný tok.

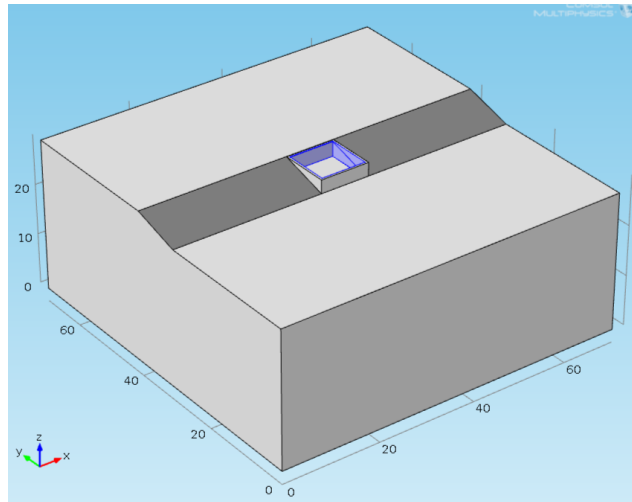


Obr. 17: Adiabatické okrajové podmínky

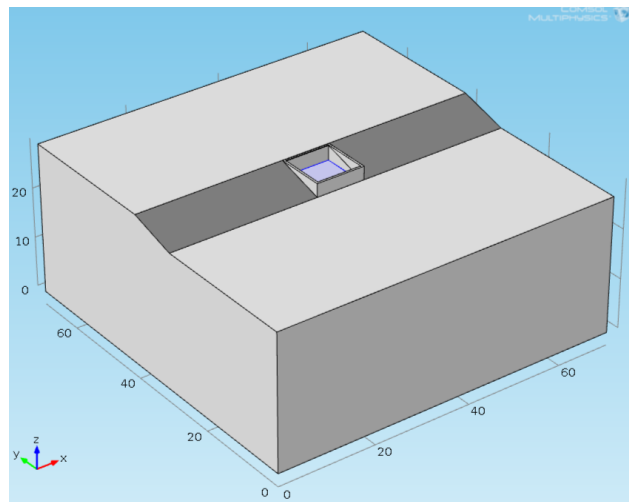
Následně jsou adiabatické podmínky změněny na hranicích, které jsou vystaveny působení známých okrajových podmínek. V tomto případě jsou vytvořeny tři Newtonovské okrajové podmínky (Tab. 3).

Tab. 3: Hodnoty pro okrajové podmínky

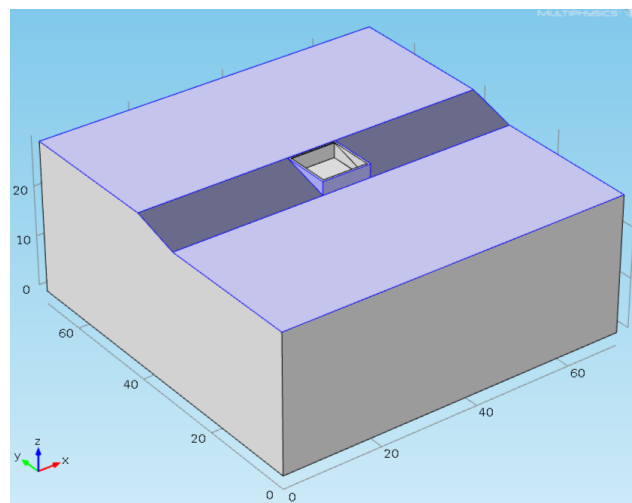
Typ okrajové podmínky	Teplota T ($^{\circ}\text{C}$)	Součinitel přestupu tepla h ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)
Venkovní prostředí	-15	25
Vnitřní prostředí – podlaha	20	5,9
Vnitřní prostředí – stěna	20	7,7



Obr. 17: Vnitřní okrajová podmínka pro stěny



Obr. 18: Vnitřní okrajová podmínka pro podlahu



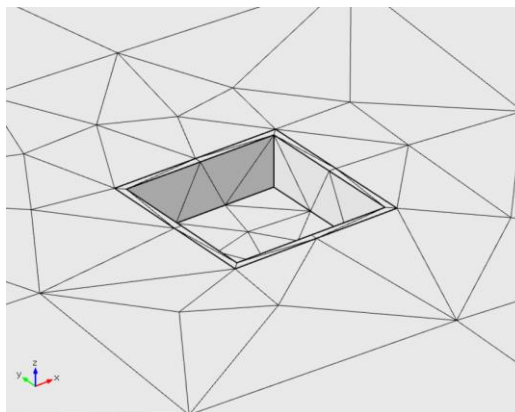
Obr. 19: Venkovní okrajová podmínka

3.4 Analýza hustoty sítě

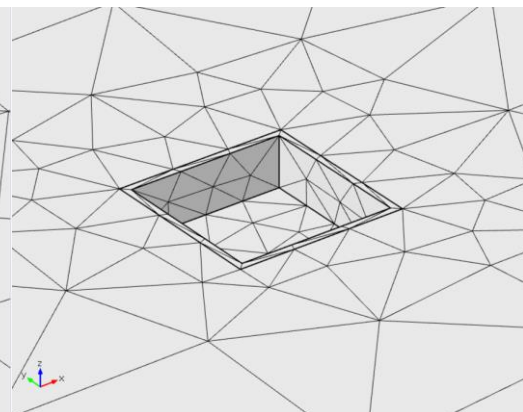
Součástí nastavení 3D modelu je generování sítě, která umožňuje rozložení částic v řešeném modelu. V rámci nabídky programu je možné nastavit 9 různých typů sítě. Lze nastavit velmi hrubou síť, která má minimální počet ok až po nejjemnější možnou síť, která má velkou koncentraci částic. Podle zvolené hustoty sítě se mění i délka výpočtu. Je tedy potřeba zvážit jaké zvolit nastavení, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků a zároveň, aby délka výpočtu byla přijatelná z důvodu velkého množství analyzovaných modelů.

Pro model vytápěného suterénu čtvercového půdorysu o rozměrech 10 x 10 m, který má všechny stěny v kontaktu se zeminou, je zpracována analýzy hustoty sítě a na základě výsledku jsou nastaveny všechny analyzované modely.

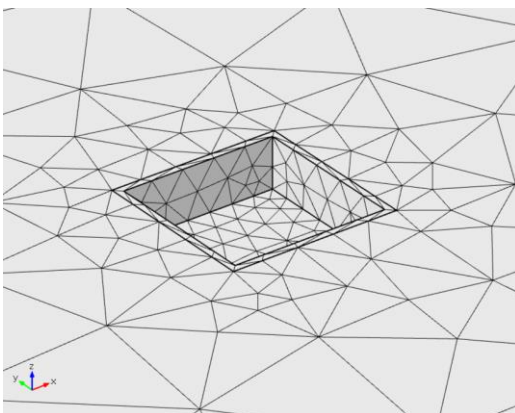
Pro představu rozdílu hustoty sítě uvádím jednotlivé typy nastavení na konkrétním modelu na následujících obrázcích.



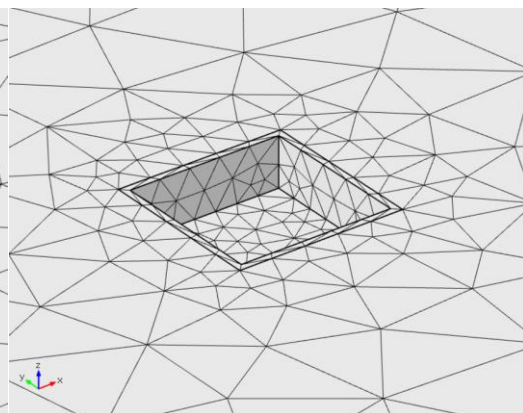
Obr. 21: Extremely coarse



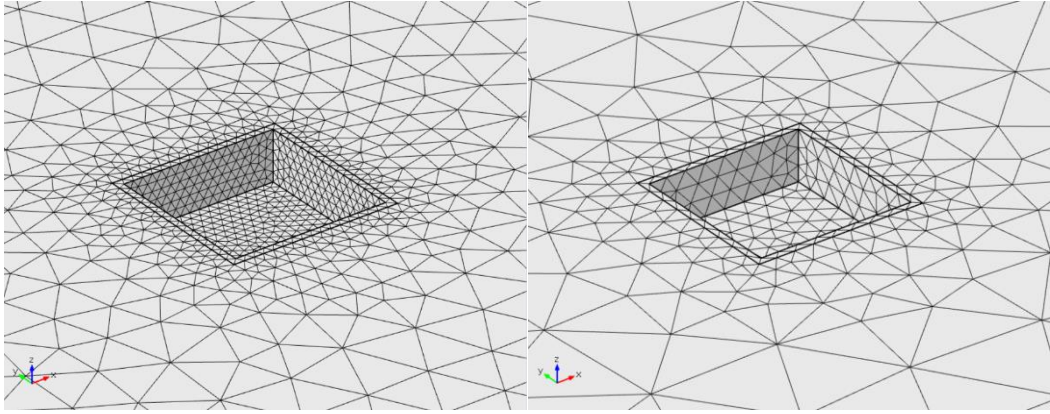
Obr. 22: Extra coarse



Obr. 23: Coarser

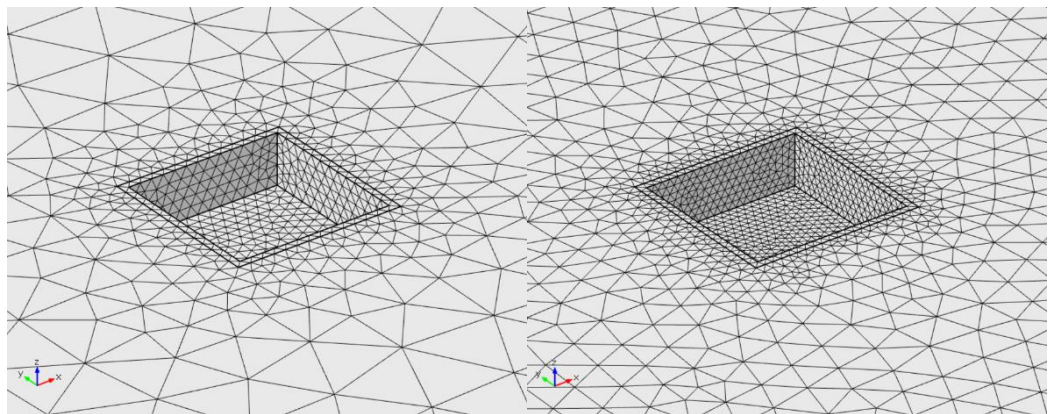


Obr. 24 Coarse



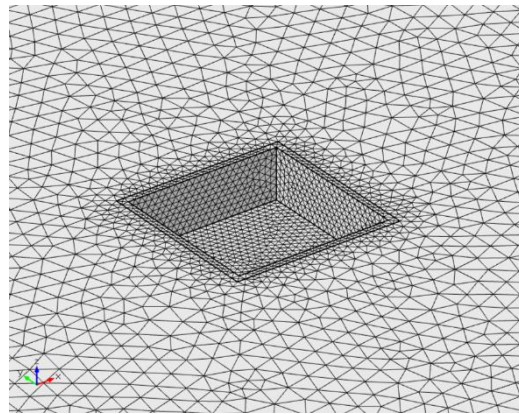
Obr. 25: *Normal*

Obr. 26: *Fine*



Obr. 27: *Finer*

Obr. 28: *Extra fine*



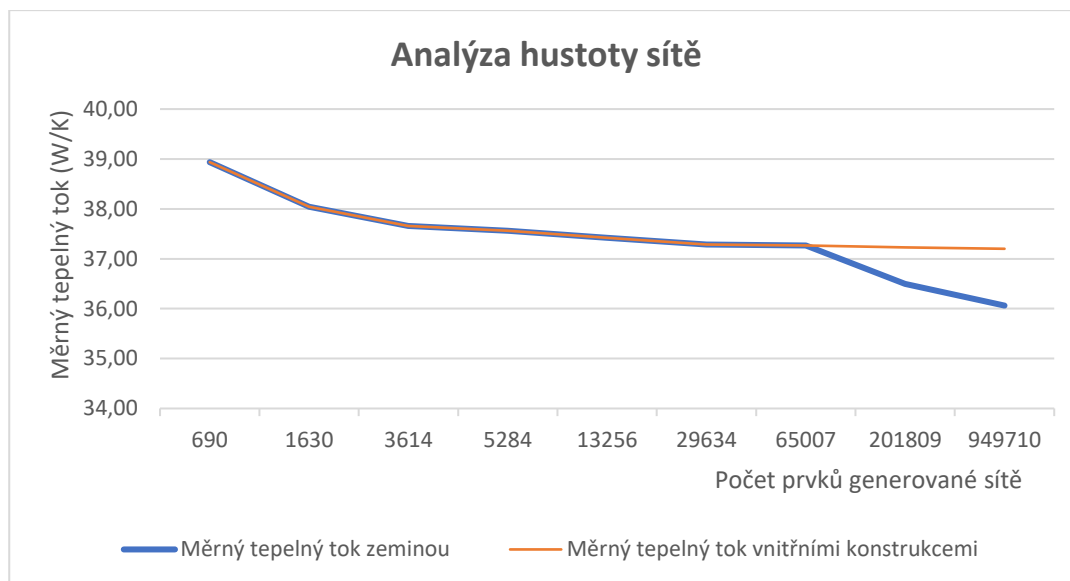
Obr. 29: *Extremely fine*

Hodnoty ustálených měrných tepelných toků ze softwaru Comsol Multiphysics pro hodnocený model s rozdílným nastavením hustoty sítě jsou shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4: Výsledky analýzy hustoty sítě

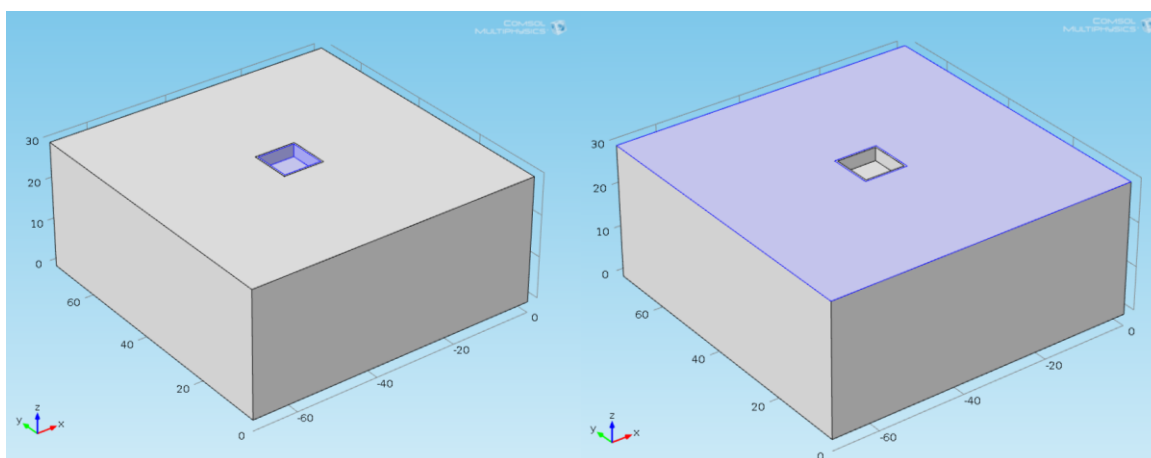
Analýza hustoty sítě – Ustálený měrný tepelný tok (W/K) z programu Comsol Multiphysics							
		Extremely coarse		Extra coarse		Coarser	
		Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)
Model 0° čtverec	Podlaha	15,40	38,94	15,55	38,04	15,28	37,66
	Stěny	23,53		22,49		22,38	
	Celkem	38,94		38,04		37,66	
Počet prvků generované sítě		690		1630		3614	
Procentuální pokles tepelného toku				2,35 %		1,01 %	
		Coarse		Normal		Fine	
		Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)
Model 0° čtverec	Podlaha	15,34	37,56	15,33	37,42	15,37	37,29
	Stěny	22,22		22,09		21,92	
	Celkem	37,56		37,42		37,29	
Počet prvků generované sítě		5284		13256		29634	
Procentuální pokles tepelného toku		0,26 %		0,38 %		0,35 %	
		Finer		Extra fine		Extremely fine	
		Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)
Model 0° čtverec	Podlaha	15,39	37,26	15,39	36,50	15,40	36,06
	Stěny	21,87		21,84		21,80	
	Celkem	37,26		37,23		37,20	
Počet prvků generované sítě		65007		201809		949710	
Procentuální pokles tepelného toku		0,07 %		0,09 %		0,08 %	

Získané ustálené měrné tepelné toky v závislosti na počtu prvků generované sítě jsou znázorněny v Obr. 30.



Obr. 30: Graf analýzy hustoty sítě

Měrný tepelný tok je zjišťován dvěma způsoby. V prvním případě je tepelný tok zjišťován přes vnitřní povrch konstrukcí ve styku se zeminou (Obr. 31). V druhém případě přes povrch zeminou (Obr. 32).



Obr. 31: Měrný tepelný tok skrz vnitřní konstrukce ve styku se zeminou

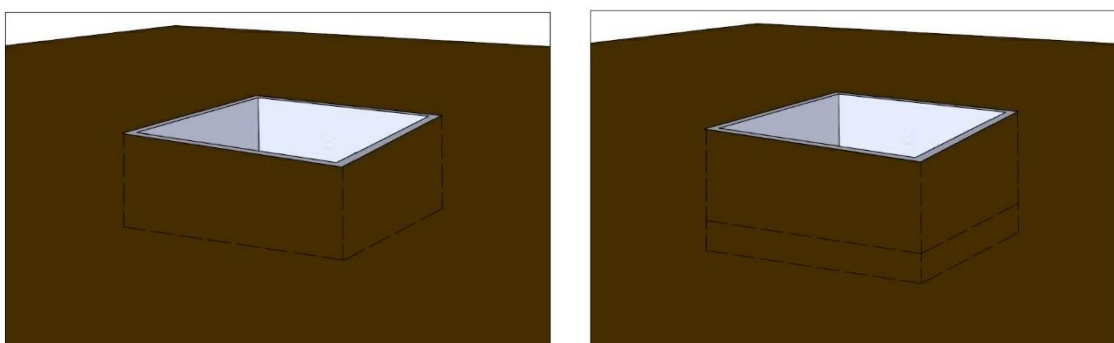
Obr. 32: Měrný tepelný tok skrz zeminou

V obou případech by zjištěný tepelný tok měl být stejný, což odpovídá u všech řešených modelů s výjimkou dvou posledních. V případě nastavení hustoty na extra fine a extremely fine vycházejí nestandardní výsledky, které by do řešených úloh vnášely chybu. Z tohoto důvodu jsou tyto dvě varianty vyřazeny.

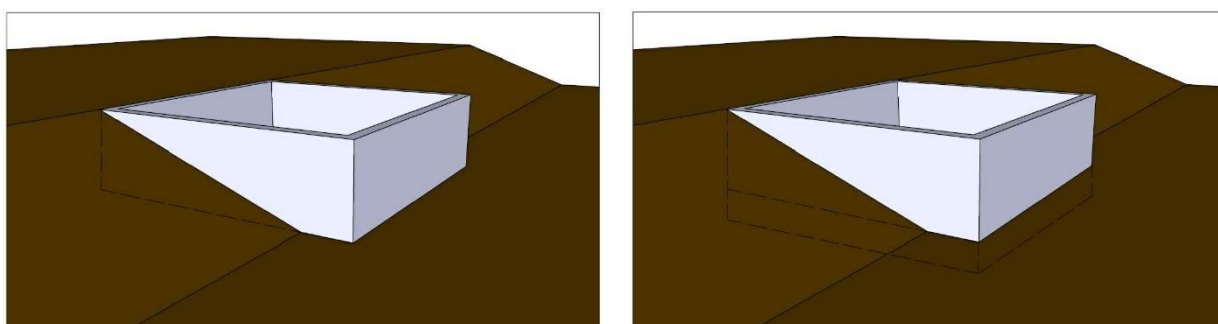
Z výše uvedené analýzy lze konstatovat, že s rostoucí hustotou sítě se tepelný tok snižuje. Při volbě hustějších sítí se rozdíl ve vypočítaném měrném tepelném toku skrz zeminu výrazně nemění, ale délka výpočtu se výrazně prodlužuje. Tento fakt je vzhledem k velkému množství analyzovaných modelů důležitým faktorem, proto je pro všechny hodnocené modely nastavena hustota sítě na normal. Výpočet v tomto směru nebude trvat dlouho a výsledky budou dostatečně přesné.

3.5 Vliv základových konstrukcí na prostup tepla zeminou

Vzhledem k charakteru úlohy není třeba jen správně nastavit hustotu sítě, ale je potřeba vytvořit takový 3D model, který bude co nejvíce odpovídat skutečnosti. Jsou tedy vytvořeny dva různé modely. Jeden model představuje vytápěný suterén, který je po celém obvodu ve styku se zeminou (Obr. 33), a druhý, který je ve svahu se sklonem 20° od vodorovné roviny (Obr. 34). Oba řešené modely budovy jsou nejprve počítány bez základových konstrukcí a následně se základy.



Obr. 33: Schématické znázornění modelu kompletně zasypaného suterénu bez základů a se základy



Obr. 34: Schématické znázornění modelu suterénu ve svahu se sklonem 20° bez základů a se základy

Všechny posuzované modely mají stejné výchozí nastavení a materiálové charakteristiky (Tab. 2). Betonové základové konstrukce jsou pro oba případy vysoké 800 mm a široké 600 mm.

Tab. 5: Definované hodnoty pro vytvoření základových konstrukcí

	Tepelná vodivost λ (W/(m·K))	Objemová hmotnost ρ (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita c (J/(kg·K))
Základy	1,23	2100	1020

Díky 3D analýze v programu Comsol Multiphysics můžeme zjistit, jaký vliv mají základové konstrukce na celkový měrný tepelný tok zeminou.

Tab. 6: Tabulka výsledků pro vytápěný suterén ve svahu bez základů a se základy

Vliv základových konstrukcí – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)						
Typ modelu		Tepelný tok vnitřními konstrukcemi (W/K)	Tepelný tok zeminou (W/K)	Typ modelu		Tepelný tok zeminou (W/K)
Model 0°	Podlaha	15,33	37,42	Model 20°	Podlaha	16,20
	Stěny	22,09			Stěny	10,47
	Celkem	37,42			Celkem	26,67
Model 0° + základy	Podlaha	15,21	37,22	Model 20° + základy	Podlaha	16,03
	Stěny	22,02			Stěny	10,42
	Celkem	37,22			Celkem	26,45

Je nutné upozornit na skutečnost, která nastává při zjišťování ustáleného měrného tepelného toku v softwaru Comsol Multiphysics. Tepelný tok je stanoven v programu dvěma způsoby – přes vnitřní konstrukce (Obr. 31) a přes zeminu (Obr. 32). Oba takto zjištěné tepelné toky by se měly rovnat. Pro první případ, kdy jsou suterénní stěny kompletně ve styku se zeminou, je tento předpoklad splněn. V druhém případě, kdy jsou stěny v kontaktu se vzduchem i s exteriérem, tomu tak není, protože část tepelného toku prochází skrz stěnu, která je v kontaktu s exteriérem. Z tohoto důvodu je pro všechny hodnocené modely rozhodující ustálený měrný tepelný tok stanovený skrz zeminu.

Z Tab. 6 si lze povšimnout, že porovnávané hodnoty obou modelů vytápěného suterénu bez základu a se základy se výrazně neliší. V případě modelu bez základových konstrukcí je ustálený měrný tepelný tok vytápěného suterénu nepatrně větší. V případě modelu s betonovými základy mají tyto konstrukce nižší tepelnou vodivost než okolní zemina, a tak představují nepatrnou tepelnou izolaci, která má vliv na snížení měrného tepelného toku.

Na základě této analýzy lze konstatovat, že vliv základových konstrukcí má na měrný tepelný tok vytápěného suterénu, který je kompletně zasypaný zeminou, ale i ve svahu se sklonem 20° zcela minimální vliv, a tak v dalších řešených modelech lze základové konstrukce zanedbat.

4. Výsledky analyzovaných modelů

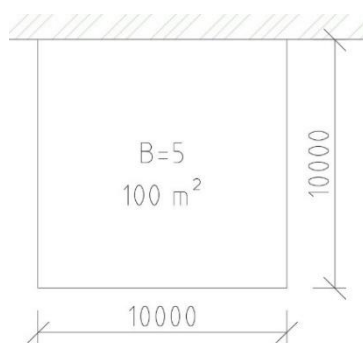
Analyzované vytápěné suterény jsou čtvercového, obdélníkového a půdorysu ve tvaru L. Obdélníkové půdorysy jsou též řešeny ve směru rovnoběžně se svahem i kolmo na svah s různým charakteristickým rozměrem podlahy.

Všechny půdorysy jsou zkoumány v různém sklonu svahu od vodorovné roviny (0° - 90°). Model se sklonem 0° představuje kompletně zasypaný suterén a v případě 90° je zasypana pouze jedna stěna.

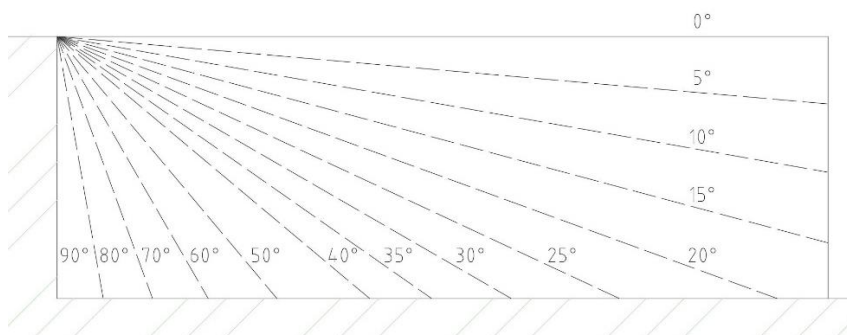
Všechny hodnoty tepelných toků, ať už získané ze softwaru Comsol Multiphysics, nebo pomocí zjednodušených výpočtů, jsou zaznamenávány do tabulek a následně znázorněny v grafech.

4.1 Model čtverec

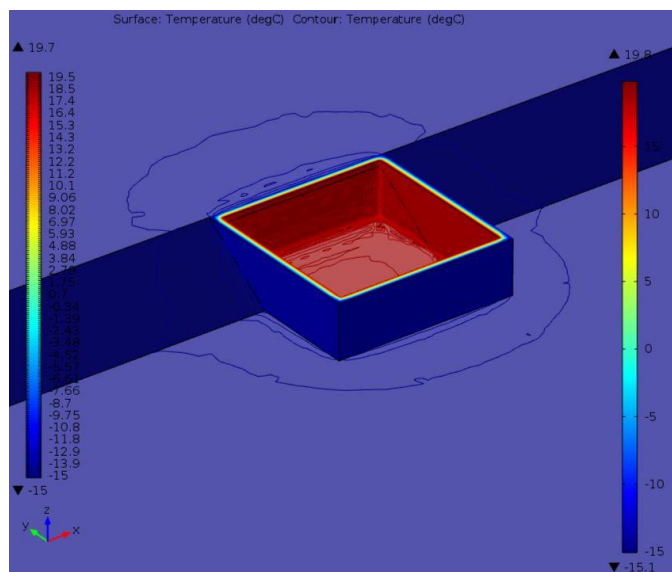
Pro model suterénu ve tvaru čtverce o půdorysných rozměrech 10×10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 5 m (Obr. 35) jsou zkoumány různé sklony svahu, přičemž jedna stěna je kompletně zasypaná (Obr. 36). Výsledky pro jednotlivé sklony svahu jsou uvedeny v Tab. 7.



Obr. 35: Půdorys modelu čtverce



Obr. 36: Boční pohled modelu čtverce



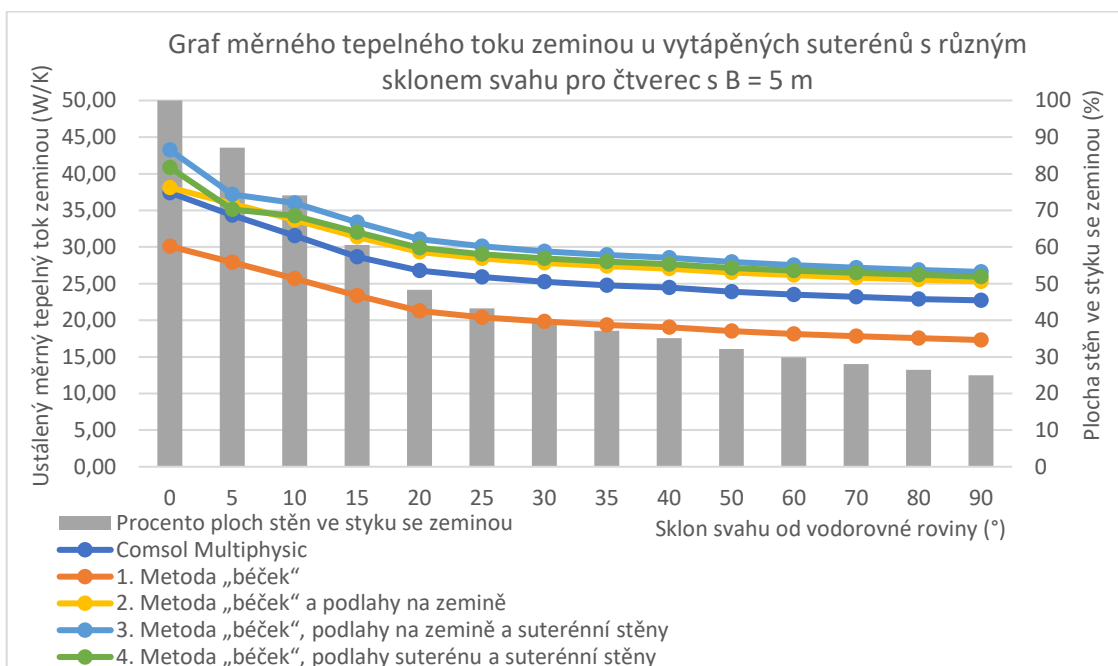
Obr. 37: Teplotní pole z programu Comsol pro čtverec se sklonem 35°

Tab. 7: Tabulka výsledků pro model čtverce s B=5 m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Čtverec B=5 m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	15,33	37,42	11,03	19,05	19,05	16,67	4,72
	Stěny	22,09		14,34	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	37,42		25,38	33,39	38,53	36,15	
Model 5°	Podlaha	15,50	34,33	11,03	19,05	19,05	16,98	4,37
	Stěny	19,37		12,50	12,50	13,78	13,78	
	Celkem	34,88		23,53	31,54	32,83	30,76	
Model 10°	Podlaha	15,72	31,56	11,15	19,05	19,05	17,30	4,02
	Stěny	16,48		10,63	10,63	12,92	12,92	
	Celkem	32,20		21,78	29,68	31,97	30,22	
Model 15°	Podlaha	16,03	28,66	11,15	19,05	19,05	17,65	3,65
	Stěny	13,25		8,69	8,69	10,70	10,70	
	Celkem	29,28		19,84	27,74	29,75	28,36	
Model 20°	Podlaha	16,20	26,77	11,15	19,05	19,05	17,88	3,32
	Stěny	10,47		6,93	6,93	8,70	8,70	
	Celkem	26,67		18,08	25,98	27,74	26,58	
Model 25°	Podlaha	16,26	25,89	11,15	19,05	19,05	17,99	3,18
	Stěny	9,35		6,20	6,20	7,86	7,86	
	Celkem	25,62		17,35	25,25	26,91	25,85	
Model 30°	Podlaha	16,31	25,25	11,15	19,05	19,05	18,07	3,08
	Stěny	8,60		5,70	5,70	7,28	7,28	
	Celkem	24,91		16,84	24,74	26,33	25,35	

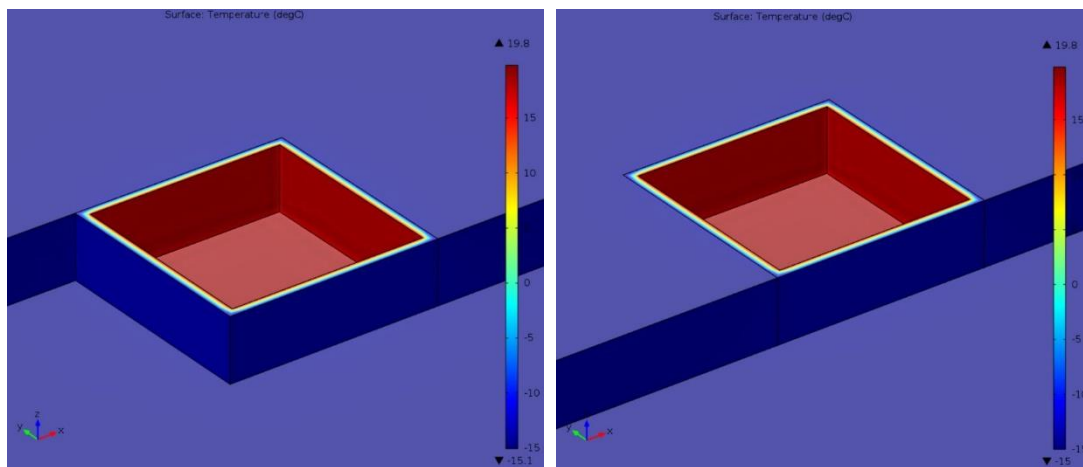
Tab. 7 pokračování: Tabulka výsledků pro model čtverce s $B=5\text{ m}$

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Čtverec $B=5\text{ m}$		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 35°	Podlaha	16,34	24,79	11,15	19,05	19,05	18,12	3,01
	Stěny	8,04		5,33	5,33	6,86	6,86	
	Celkem	24,38		16,47	24,37	25,91	24,98	
Model 40°	Podlaha	16,42	24,47	11,15	19,05	19,05	18,17	2,96
	Stěny	7,56		5,04	5,04	6,53	6,53	
	Celkem	23,99		16,19	24,09	25,58	24,70	
Model 50°	Podlaha	16,43	23,92	11,15	19,05	19,05	18,23	2,87
	Stěny	6,90		4,61	4,61	6,04	6,04	
	Celkem	23,33		15,76	23,66	25,09	24,27	
Model 60°	Podlaha	16,45	23,50	11,15	19,05	19,05	18,28	2,81
	Stěny	6,39		4,29	4,29	5,67	5,67	
	Celkem	22,84		15,44	23,34	24,72	23,95	
Model 70°	Podlaha	16,49	23,19	11,15	19,05	19,05	18,32	2,76
	Stěny	5,98		4,03	4,03	5,37	5,37	
	Celkem	22,47		15,17	23,07	24,42	23,70	
Model 80°	Podlaha	16,52	22,91	11,15	19,05	19,05	18,36	2,72
	Stěny	5,61		3,80	3,80	5,11	5,11	
	Celkem	22,14		14,95	22,85	24,16	23,47	
Model 90°	Podlaha	16,50	22,72	11,15	19,05	19,05	18,39	2,68
	Stěny	5,64		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	22,14		14,73	22,63	23,92	23,26	



Obr. 38: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na sklonu svahu pro čtverec s $B=5\text{ m}$

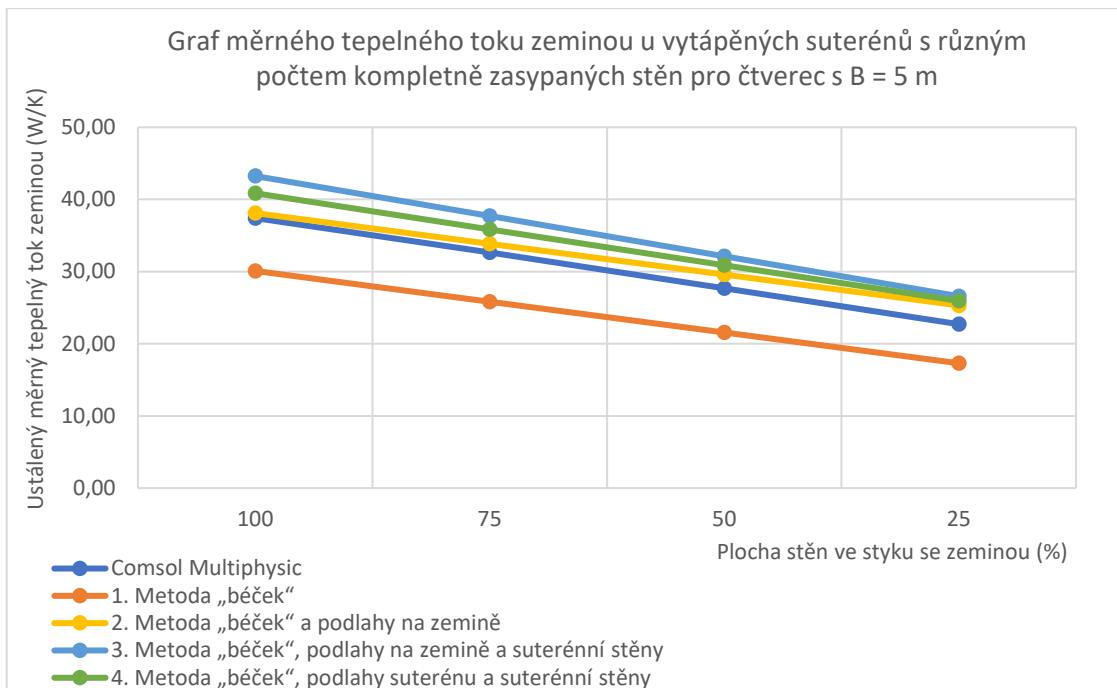
Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou kompletně zasypány 2 či 3 stěny (Obr. 39).



Obr. 39: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro čtverce s rozdílně zasypávanými stěnami

Tab. 8: Tabulka výsledků pro model čtverce s $B=5\text{ m}$

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Čtverec $B=5\text{ m}$		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	16,50	22,72	11,15	19,05	19,05	18,39	2,68
	Stěny	5,64		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	22,14		14,73	22,63	23,92	23,26	
Kompletně zasypány 2 stěny	Podlaha	16,16	27,70	11,03	19,05	19,05	17,78	3,36
	Stěny	11,20		7,17	7,17	9,74	9,74	
	Celkem	27,37		18,20	26,22	28,79	27,52	
Kompletně zasypány 3 stěny	Podlaha	15,81	32,68	11,03	19,05	19,05	17,20	4,04
	Stěny	16,74		10,76	10,76	14,61	14,61	
	Celkem	32,55		21,79	29,80	33,66	31,81	
Model 0°	Podlaha	15,33	37,42	11,03	19,05	19,05	16,67	4,72
	Stěny	22,09		14,34	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	37,42		25,38	33,39	38,53	36,15	



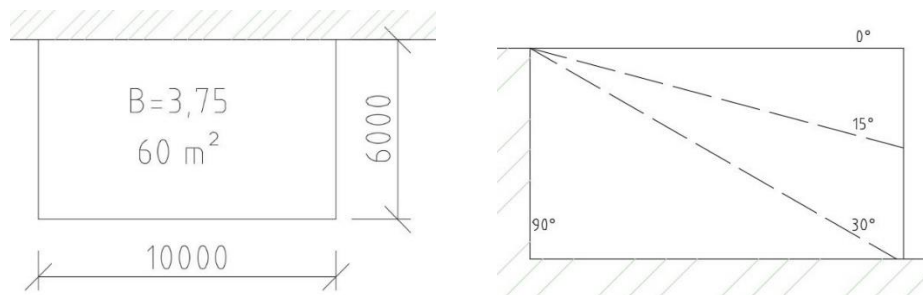
Obr. 40: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro čtverec s B=5 m

4.2 Model obdélník

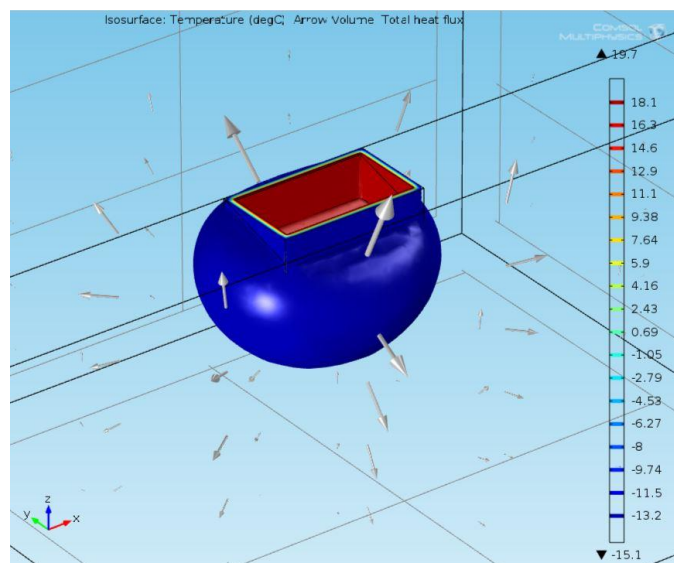
Suterény ve tvaru obdélníku jsou řešeny ve dvou různých situacích. První situace představuje obdélníky rovnoběžně ke svahu, kde delší stěna je úplně zasypana zeminou. V opačném případě suterény kolmo ke svahu mají úplně zasypanou kratší stěnu.

4.2.1. Obdélník rovnoběžně se svahem

Hodnocen je obdélník o rozměrech 6 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 3,75 m (Obr. 41). Je řešen model, který má všechny stěny v kontaktu se zeminou, a ostatní případy mají jednu ze stěn úplně zasypanou zeminou a stěny ve svahu jsou ve sklonu 15°, 30° a 90° (Obr. 41).



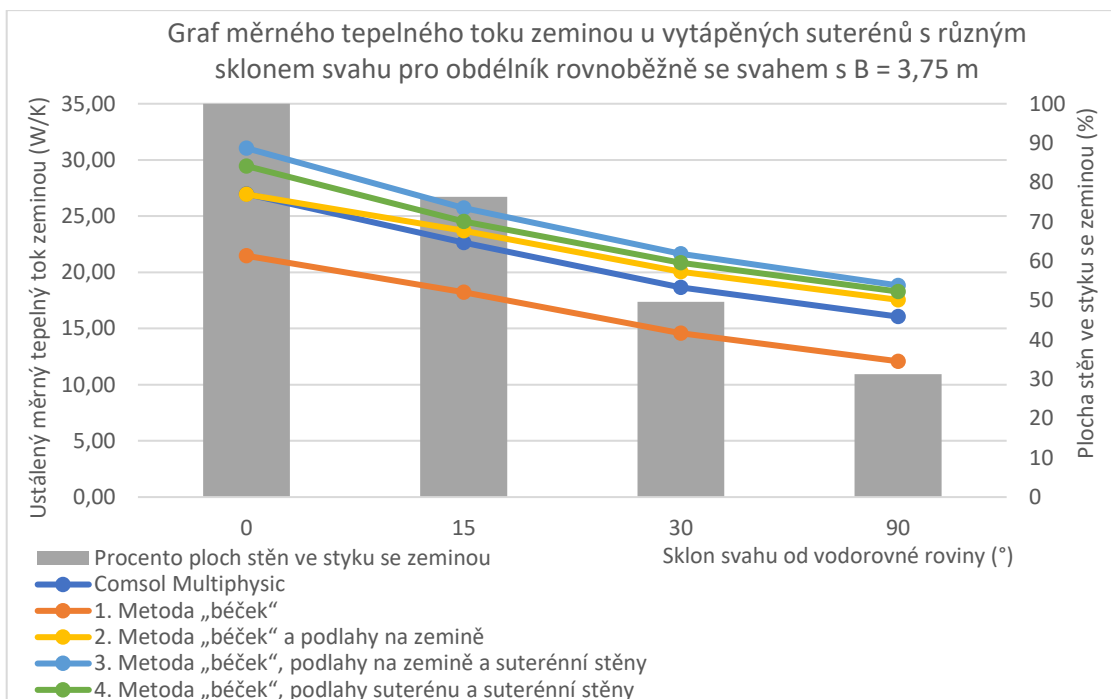
Obr. 41: Půdorys a boční pohled modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



Obr. 42: Tepelné toky z programu Comsol Multiphysics pro model obdélníku se sklonem svahu 15° a B=3,75 m

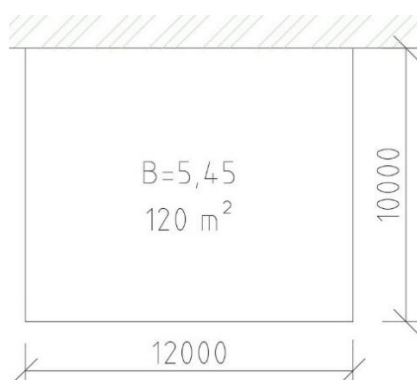
Tab. 9: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s B=3,75 m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem B=3,75 m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	9,37	26,97	6,62	12,09	12,09	10,50	3,376
	Stěny	17,60		11,48	11,48	15,58	15,58	
	Celkem	26,97		18,09	23,56	27,67	26,08	
Model 15°	Podlaha	9,61	22,63	6,62	12,09	12,09	10,88	2,86
	Stěny	13,60		8,76	8,76	10,79	10,79	
	Celkem	23,21		15,38	20,85	22,87	21,67	
Model 30°	Podlaha	9,88	18,66	6,62	12,09	12,09	11,28	2,28
	Stěny	8,63		5,70	5,70	7,28	7,28	
	Celkem	18,51		12,32	17,78	19,37	18,56	
Model 90°	Podlaha	9,97	16,06	6,62	12,09	12,09	11,54	1,88
	Stěny	5,66		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	15,63		10,21	15,67	16,96	16,41	

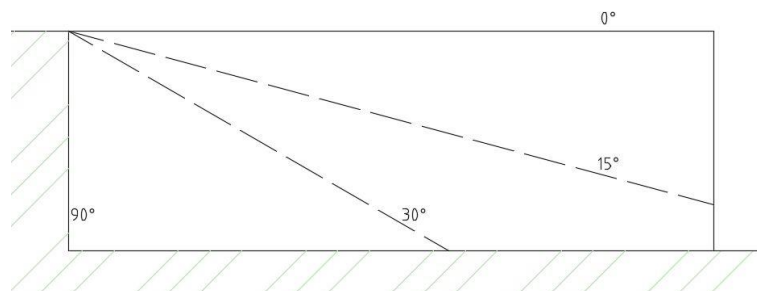


Obr. 43: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník rovnoběžně se svahem s $B=3,75$ m

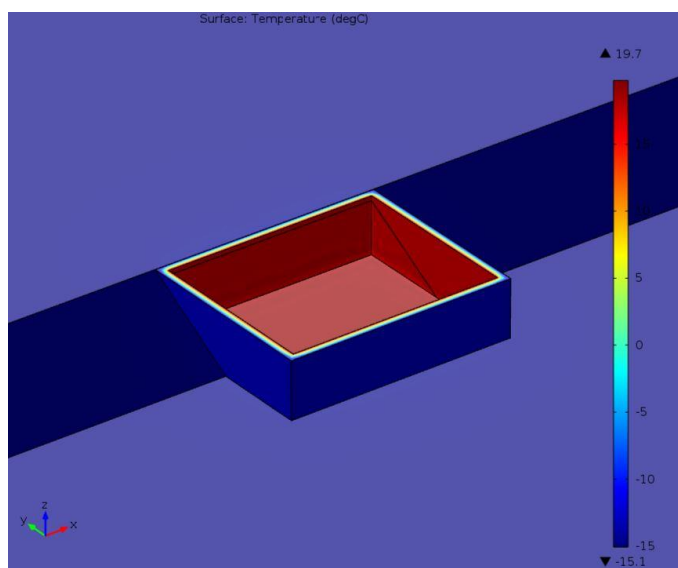
Obdélníkový suterén o rozměrech 12 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 5,45 m (Obr. 44). Opět je řešen model, který má všechny stěny v kontaktu se zeminou, a ostatní případy mají jednu ze stěn kompletně zasypanou zeminou a stěny ve svahu jsou ve sklonu 15°, 30° a 90° (Obr. 45).



Obr. 44: Půdorys modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



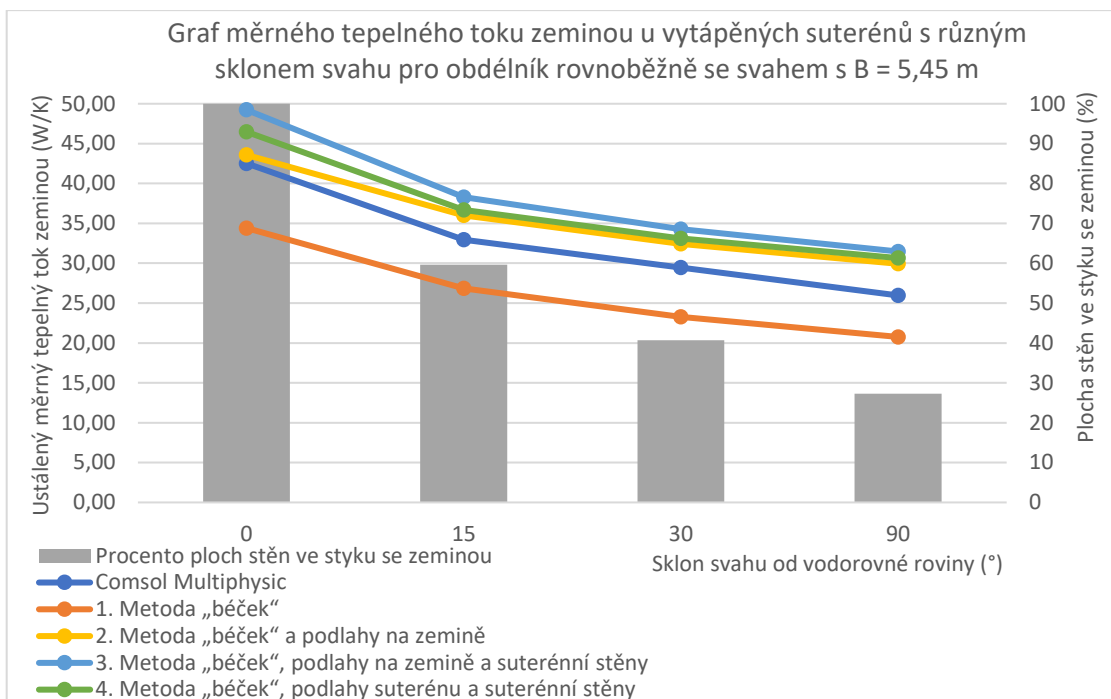
Obr. 45: Boční pohled modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



Obr. 46: Tepelné toky z programu Comsol Multiphysics pro model obdélníku se sklonem svahu 15° a $B=5,45$ m

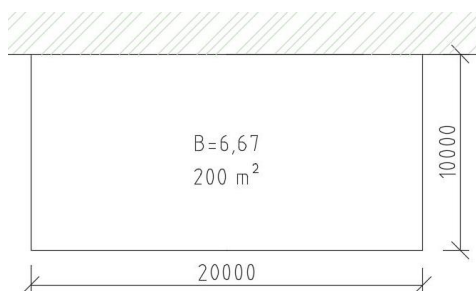
Tab. 10: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s $B=5,45$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu	Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů					
Obdélník rovnoběžně se svahem $B=5,45$ m	Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby	
Model 0°	Podlaha	18,20	42,52	13,24	22,41	22,41	19,66	5,39
	Stěny	24,32		15,78	15,78	21,43	21,43	
	Celkem	42,52		29,02	38,19	43,84	41,09	
Model 15°	Podlaha	19,08	32,95	13,24	22,41	22,41	20,81	4,18
	Stěny	14,58		9,41	9,41	11,68	11,68	
	Celkem	33,66		22,65	31,82	34,09	32,49	
Model 30°	Podlaha	19,33	29,46	13,24	22,41	22,41	21,25	3,62
	Stěny	9,73		6,41	6,41	8,26	8,26	
	Celkem	29,06		19,65	28,83	30,67	29,51	
Model 90°	Podlaha	19,69	25,96	13,24	22,41	22,41	21,59	3,22
	Stěny	5,61		4,30	4,30	5,84	5,84	
	Celkem	25,30		17,54	26,72	28,26	27,43	

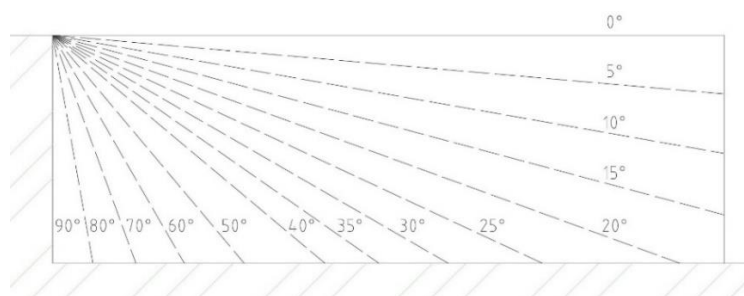


Obrázek 47: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník rovnoběžně se svahem s B=5,45 m

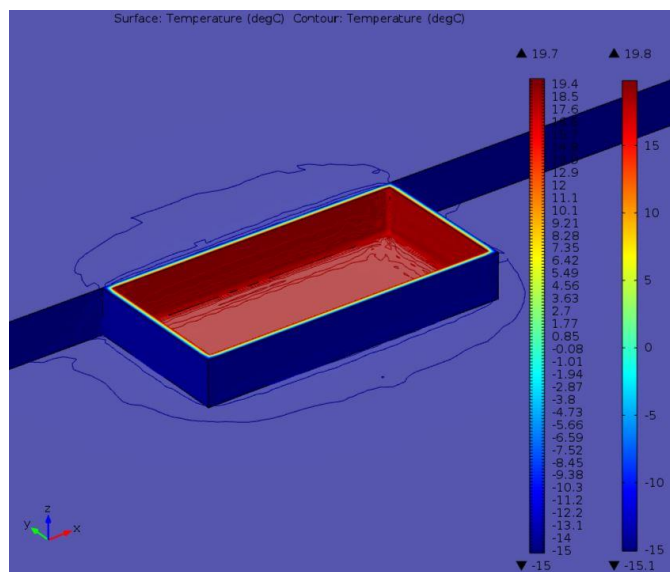
Další hodnocený obdélníkový suterén rovnoběžně se svahem má rozměry 20 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 6,67 m (Obr. 48). Pro tento případ je zkoumána celá řada sklonů svahu od 0° do 90° (Obr. 49).



Obr. 48: Půdorys modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



Obr. 49: Boční pohled modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



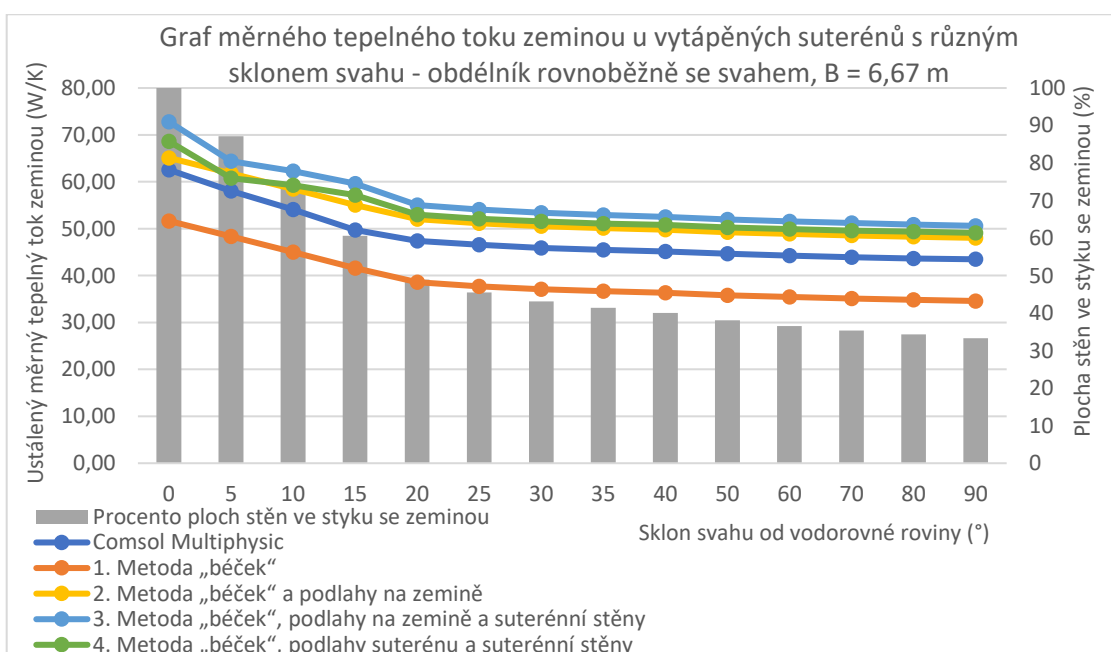
Obr. 50: Teplotní pole z programu Comsol pro obdélník rovnoběžně se svahem se sklonem 90°

Tab. 11: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s B=6,67 m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem B = 6,67 m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	29,26	62,57	22,06	35,52	35,52	31,34	8,08
	Stěny	33,31		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	62,57		43,58	57,03	64,74	60,56	
Model 5°	Podlaha	29,61	58,04	22,06	35,52	35,52	31,89	7,56
	Stěny	29,30		18,75	18,75	21,32	21,32	
	Celkem	58,92		40,81	54,26	56,83	53,20	
Model 10°	Podlaha	30,13	54,06	22,06	35,52	35,52	32,46	7,02
	Stěny	24,98		15,94	15,94	19,76	19,76	
	Celkem	55,11		38,01	51,46	55,28	52,23	
Model 15°	Podlaha	30,88	49,74	22,06	35,52	35,52	33,08	6,47
	Stěny	20,00		13,04	13,04	17,64	17,64	
	Celkem	50,88		35,10	48,55	53,16	50,72	
Model 20°	Podlaha	31,11	47,41	22,06	35,52	35,52	33,42	6,00
	Stěny	16,10		10,52	10,52	13,57	13,57	
	Celkem	47,22		32,58	46,04	49,08	46,99	
Model 25°	Podlaha	31,19	46,56	22,06	35,52	35,52	33,55	5,86
	Stěny	14,98		9,79	9,79	12,73	12,73	
	Celkem	46,17		31,85	45,30	48,25	46,28	
Model 30°	Podlaha	31,25	45,93	22,06	35,52	35,52	33,64	5,76
	Stěny	14,22		9,28	9,28	12,15	12,15	
	Celkem	45,46		31,35	44,80	47,67	45,79	

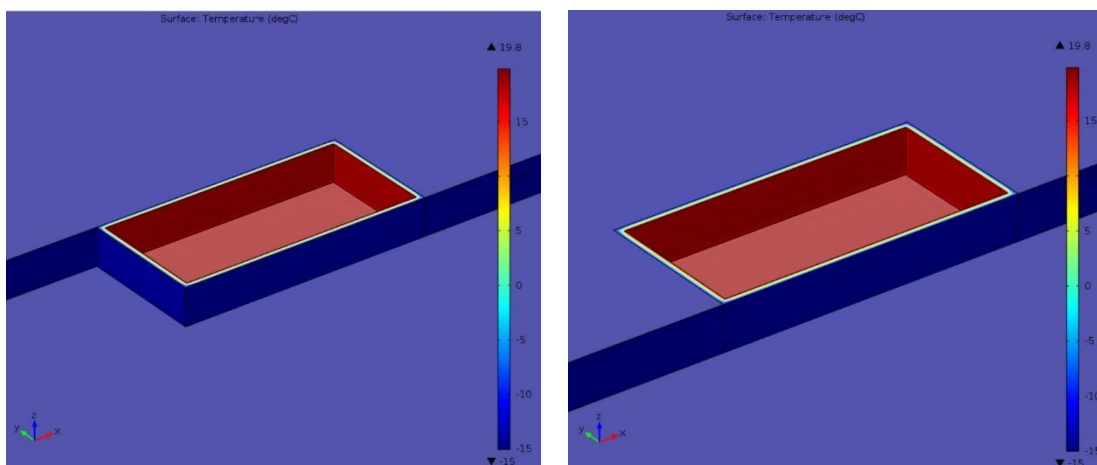
Tab. 11 pokračování: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s $B=6,67\text{ m}$

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem $B = 6,67\text{ m}$		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 35°	Podlaha	31,29	45,49	22,06	35,52	35,52	33,70	5,69
	Stěny	13,68		8,91	8,91	11,73	11,73	
	Celkem	44,97		30,98	44,43	47,25	45,43	
Model 40°	Podlaha	31,30	45,17	22,06	35,52	35,52	33,75	5,64
	Stěny	13,26		8,63	8,63	11,40	11,40	
	Celkem	44,56		30,69	44,14	46,92	45,15	
Model 50°	Podlaha	31,36	44,66	22,06	35,52	35,52	33,83	5,55
	Stěny	12,63		8,20	8,20	10,91	10,91	
	Celkem	43,99		30,26	43,71	46,43	44,74	
Model 60°	Podlaha	31,39	44,24	22,06	35,52	35,52	33,88	5,49
	Stěny	12,09		7,88	7,88	10,54	10,54	
	Celkem	43,48		29,94	43,39	46,06	44,43	
Model 70°	Podlaha	31,47	43,94	22,06	35,52	35,52	33,93	5,44
	Stěny	11,65		7,61	7,61	10,24	10,24	
	Celkem	43,12		29,68	43,13	45,76	44,17	
Model 80°	Podlaha	31,54	43,64	22,06	35,52	35,52	33,97	5,40
	Stěny	11,21		7,39	7,39	9,98	9,98	
	Celkem	42,75		29,45	42,90	45,50	43,95	
Model 90°	Podlaha	31,47	43,48	22,06	35,52	35,52	34,01	5,36
	Stěny	11,33		7,17	7,17	9,74	9,74	
	Celkem	42,81		29,24	42,69	45,26	43,75	



Obr. 51: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník rovnoběžně se svahem s $B=6,67\text{ m}$

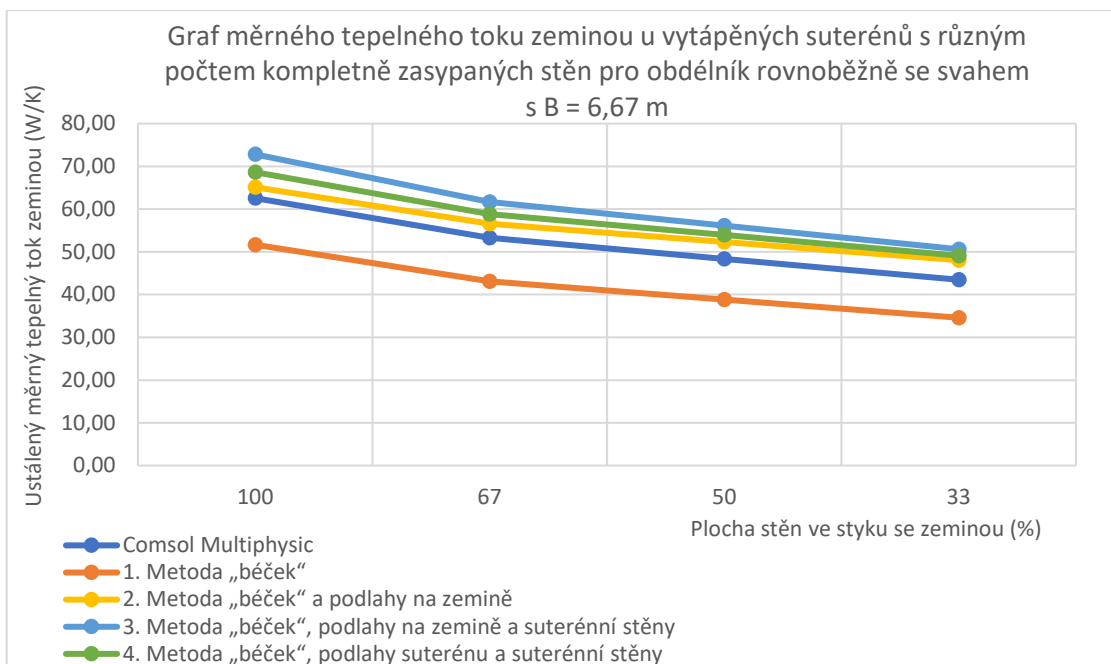
Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou kompletně zasypány 2 či 3 stěny (Obr. 52).



Obr. 52: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro obdélníky rovnoběžně se svahem s rozdílně zasypávanými stěnami

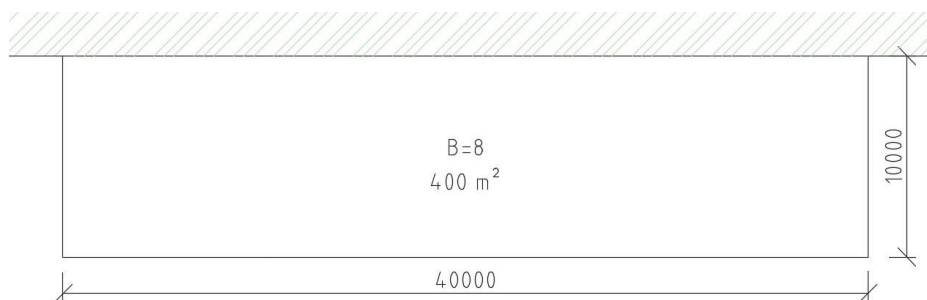
Tab. 12: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s $B=6,67$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem $B = 6,67$ m		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	31,47	43,48	22,06	35,52	35,52	34,01	5,36
	Stěny	11,33		7,17	7,17	9,74	9,74	
	Celkem	42,81		29,24	42,69	45,26	43,75	
Kompletně zasypány 2 stěny	Podlaha	31,08	48,38	22,06	35,52	35,52	33,30	6,04
	Stěny	16,83		10,76	10,76	14,61	14,61	
	Celkem	47,91		32,82	46,27	50,13	47,91	
Kompletně zasypány 3 stěny	Podlaha	30,67	53,30	22,06	35,52	35,52	32,62	6,72
	Stěny	22,36		14,36	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	53,03		36,41	49,86	55,00	52,10	
Model 0°	Podlaha	29,26	62,57	22,06	35,52	35,52	31,34	8,08
	Stěny	33,31		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	62,57		43,58	57,03	64,74	60,56	

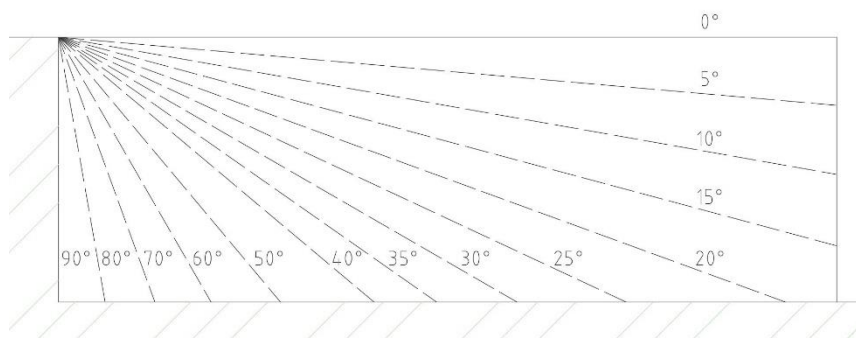


Obr. 53: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro obdélník rovnoběžně se svahem s $B=6,67$ m

Obdélníkový suterén o rozměrech 40 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 8 m (Obr. 54) je řešen pro stejné případy sklonů svahu jako předchozí obdélník s charakteristickým rozměrem 6,67 m.



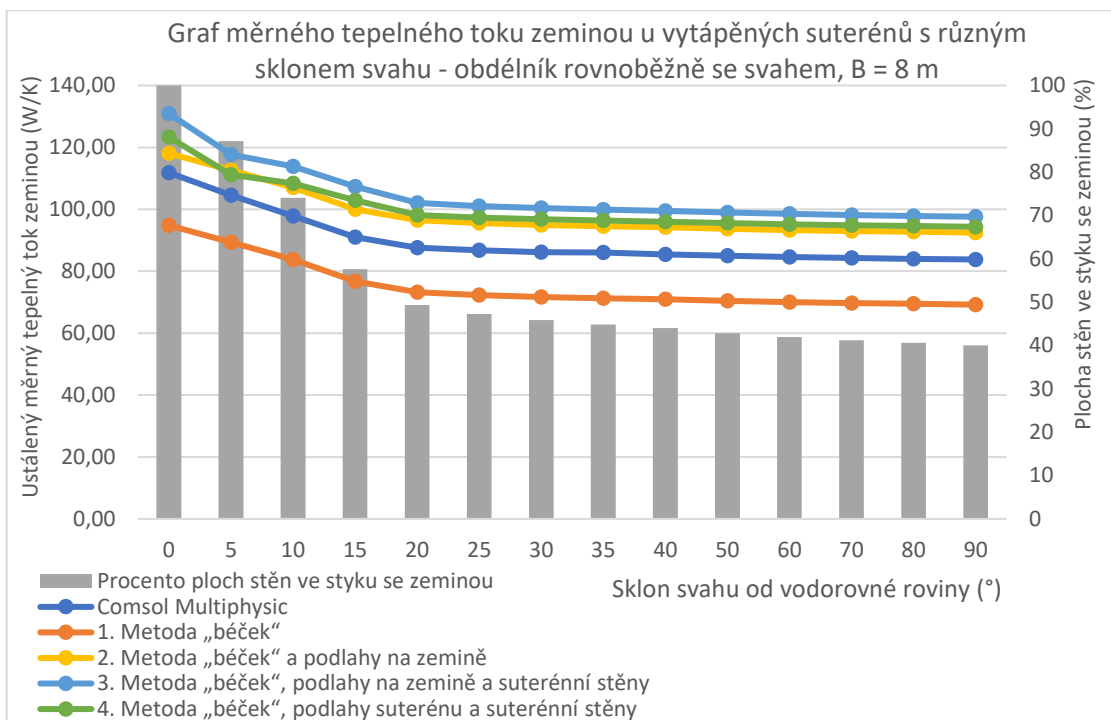
Obr. 54: Půdorys modelu obdélníku rovnoběžně se svahem



Obr. 55: Boční pohled modelu obdélníku rovnoběžně se svahem

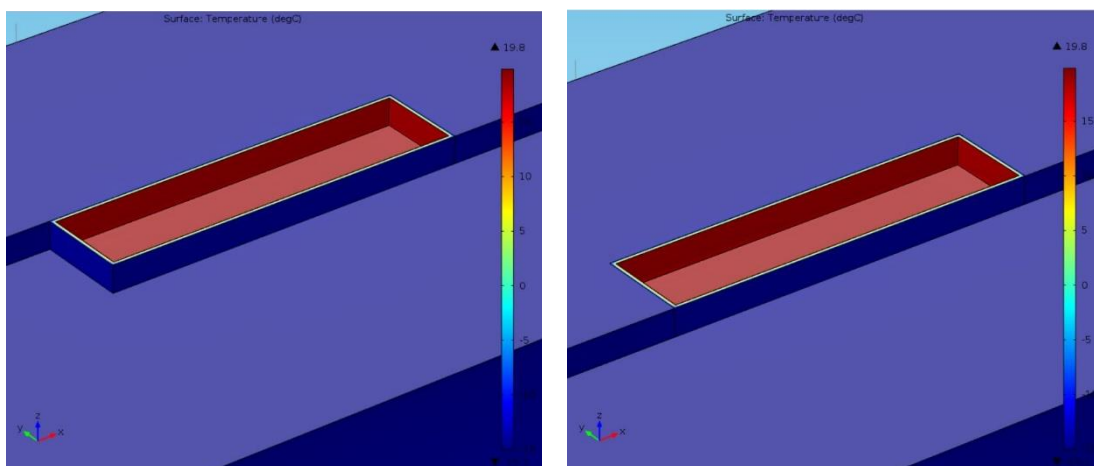
Tab. 13: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s $B=8\text{ m}$

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem $B = 8\text{ m}$		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	55,86	111,81	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,96		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	111,81		79,99	103,25	116,09	108,53	
Model 5°	Podlaha	56,88	104,51	44,13	67,39	67,39	60,82	13,93
	Stěny	49,15		31,25	31,25	36,38	36,38	
	Celkem	106,03		75,37	98,63	103,77	97,21	
Model 10°	Podlaha	57,82	97,82	44,13	67,39	67,39	61,86	13,04
	Stěny	41,95		26,58	26,58	33,46	33,46	
	Celkem	99,77		70,71	93,97	100,85	95,33	
Model 15°	Podlaha	59,71	91,01	44,13	67,39	67,39	62,98	11,92
	Stěny	33,46		20,67	20,67	28,00	28,00	
	Celkem	93,17		64,80	88,06	95,39	90,99	
Model 20°	Podlaha	59,90	87,57	44,13	67,39	67,39	63,52	11,36
	Stěny	27,41		17,69	17,69	23,31	23,31	
	Celkem	87,31		61,82	85,08	90,69	86,82	
Model 25°	Podlaha	59,97	86,74	44,13	67,39	67,39	63,65	11,22
	Stěny	26,31		16,96	16,96	22,47	22,47	
	Celkem	86,27		61,09	84,35	89,86	86,12	
Model 30°	Podlaha	60,16	86,13	44,13	67,39	67,39	63,75	11,12
	Stěny	25,49		16,46	16,46	21,89	21,89	
	Celkem	85,65		60,58	83,84	89,28	85,64	
Model 35°	Podlaha	60,35	85,99	44,13	67,39	67,39	63,82	11,05
	Stěny	25,10		16,09	16,09	21,47	21,47	
	Celkem	85,45		60,21	83,47	88,86	85,29	
Model 40°	Podlaha	60,25	85,42	44,13	67,39	67,39	63,87	11,00
	Stěny	24,56		15,80	15,80	21,14	21,14	
	Celkem	84,80		59,92	83,18	88,53	85,01	
Model 50°	Podlaha	60,29	84,97	44,13	67,39	67,39	63,95	10,91
	Stěny	23,93		15,37	15,37	20,65	20,65	
	Celkem	84,22		59,50	82,76	88,04	84,60	
Model 60°	Podlaha	60,34	84,62	44,13	67,39	67,39	64,01	10,85
	Stěny	23,33		15,05	15,05	20,28	20,28	
	Celkem	83,68		59,17	82,43	87,67	84,30	
Model 70°	Podlaha	60,20	84,29	44,13	67,39	67,39	64,06	10,80
	Stěny	23,24		14,79	14,79	19,98	19,98	
	Celkem	83,43		58,91	82,17	87,37	84,05	
Model 80°	Podlaha	60,67	83,98	44,13	67,39	67,39	64,10	10,76
	Stěny	22,28		14,56	14,56	19,72	19,72	
	Celkem	82,95		58,68	81,94	87,11	83,83	
Model 90°	Podlaha	60,33	83,80	44,13	67,39	67,39	64,15	10,72
	Stěny	22,68		14,34	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	83,01		58,47	81,73	86,87	83,63	



Obr. 55: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník rovnoběžně se svahem s $B=8\text{ m}$

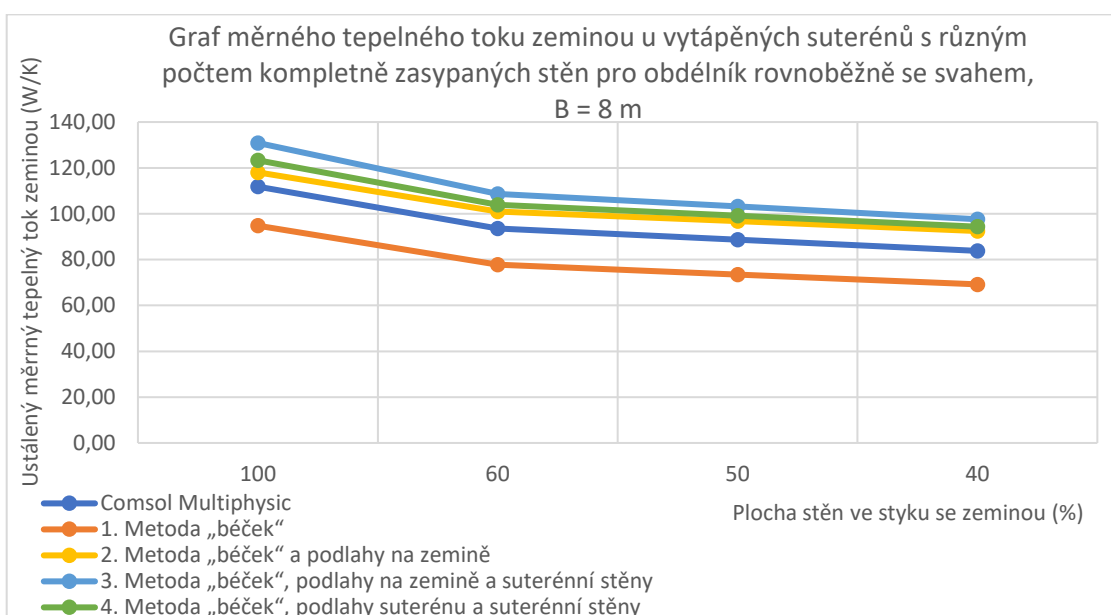
Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou kompletně zasypány 2 či 3 stěny (Obr. 56).



Obr. 56: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro obdélníky rovnoběžně se svahem s rozdílně zasypávanými stěnami

Tab. 14: Tabulka výsledků pro model obdélníku rovnoběžně se svahem s $B=8\text{ m}$

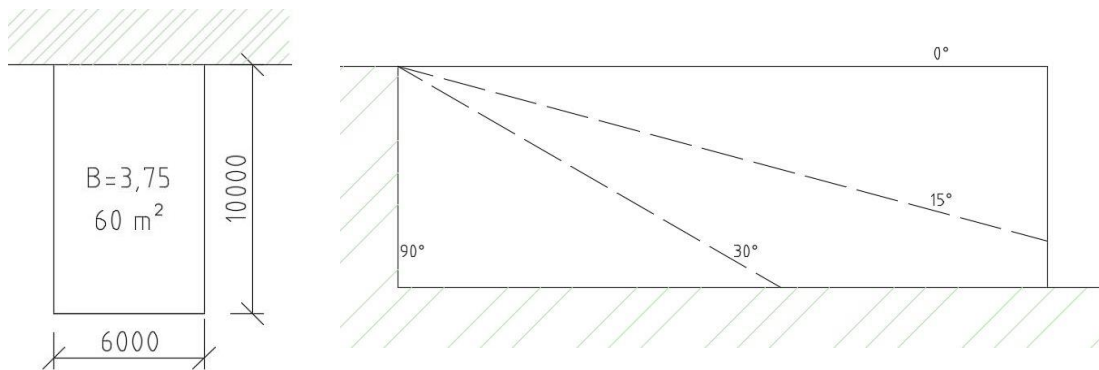
Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Cmsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník rovnoběžně se svahem $B = 8\text{ m}$		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	60,33	83,80	44,13	67,39	67,39	64,15	10,72
	Stěny	22,68		14,34	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	83,01		58,47	81,73	86,87	83,63	
Kompletně zasypaný 2 stěny	Podlaha	59,90	88,66	44,13	67,39	67,39	63,38	11,40
	Stěny	28,20		17,93	17,93	24,35	24,35	
	Celkem	88,09		62,06	85,32	91,74	87,73	
Kompletně zasypaný 3 stěny	Podlaha	59,45	93,54	44,13	67,39	67,39	62,64	12,08
	Stěny	33,72		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	93,17		65,64	88,90	96,61	91,86	
Model 0°	Podlaha	55,86	111,81	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,96		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	111,81		79,99	103,25	116,09	108,53	



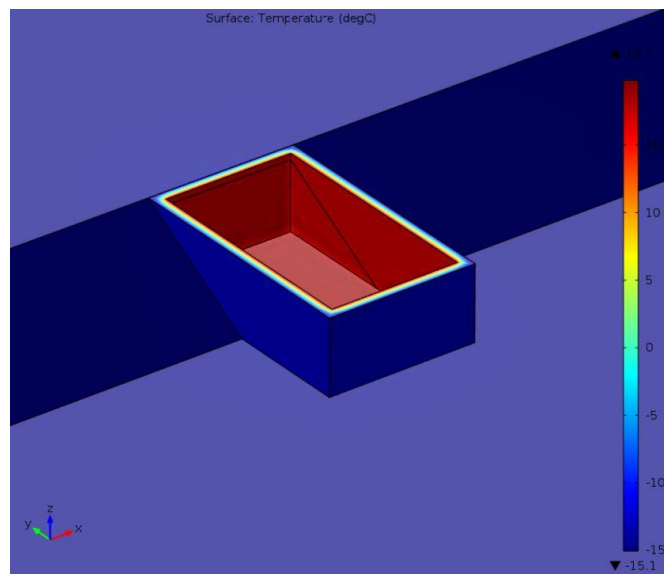
Obr. 57: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro obdélník rovnoběžně se svahem s $B=8\text{ m}$

4.2.2. Obdélník kolmo ke svahu

Obdélníkový suterén umístěn kolmo ke svahu o rozměrech 6 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 3,75 m (Obr. 58). Je řešen model, který má všechny stěny v kontaktu se zeminou, a ostatní případy mají jednu ze stěn kompletně zasypanou zeminou a stěny ve svahu jsou ve sklonu 15°, 30° a 90° (Obr. 58).



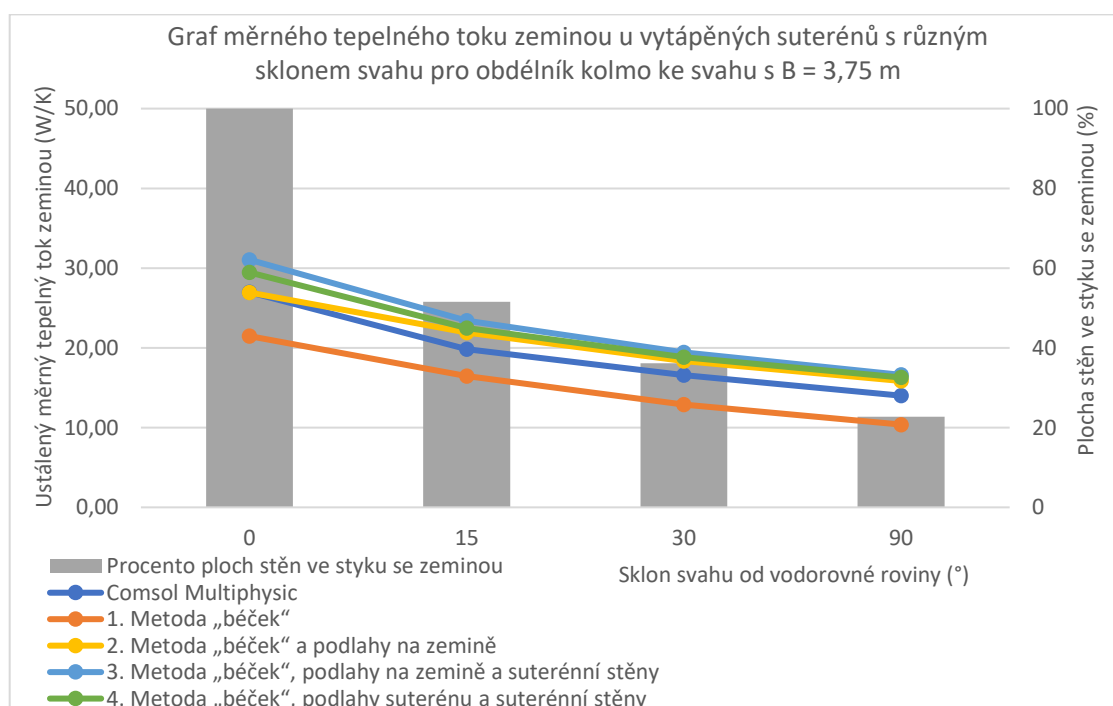
Obr. 58: Půdorys a boční pohled modelu obdélníku kolmo ke svahu



Obr. 59: Teplotní pole z programu Comsol pro obdélník kolmo ke svahu se sklonem 30°

Tab. 15: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=3,75$ m

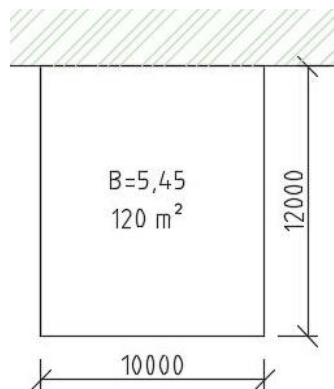
Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Cmsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu $B=3,75$ m		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	9,37	26,98	6,62	12,09	12,09	10,50	3,38
	Stěny	17,61		11,48	11,48	15,58	15,58	
	Celkem	26,98		18,09	23,56	27,67	26,08	
Model 15°	Podlaha	9,76	19,82	6,62	12,09	12,09	11,13	2,58
	Stěny	10,54		7,26	7,26	8,76	8,76	
	Celkem	20,31		13,88	19,34	20,84	19,89	
Model 30°	Podlaha	10,02	16,59	6,62	12,09	12,09	11,48	2,01
	Stěny	6,29		4,26	4,26	5,33	5,33	
	Celkem	16,31		10,88	16,35	17,42	16,81	
Model 90°	Podlaha	10,12	14,00	6,62	12,09	12,09	11,75	1,61
	Stěny	3,33		2,15	2,15	2,92	2,92	
	Celkem	13,45		8,77	14,24	15,01	14,67	



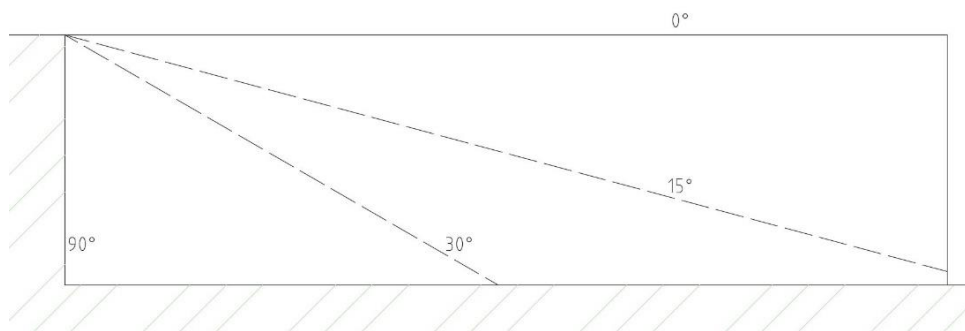
Obr. 60: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník kolmo ke svahu s $B=3,75$ m

Další obdélníkový suterén má rozměry 10 x 12 m a charakteristický rozměr podlahy 5,45 m (Obr. 61). Opět je řešen model, který má všechny stěny v kontaktu

se zeminou, a ostatní případy mají jednu ze stěn kompletně zasypanou zeminou a stěny ve svahu jsou ve sklonu 15°, 30° a 90° (Obr. 62).



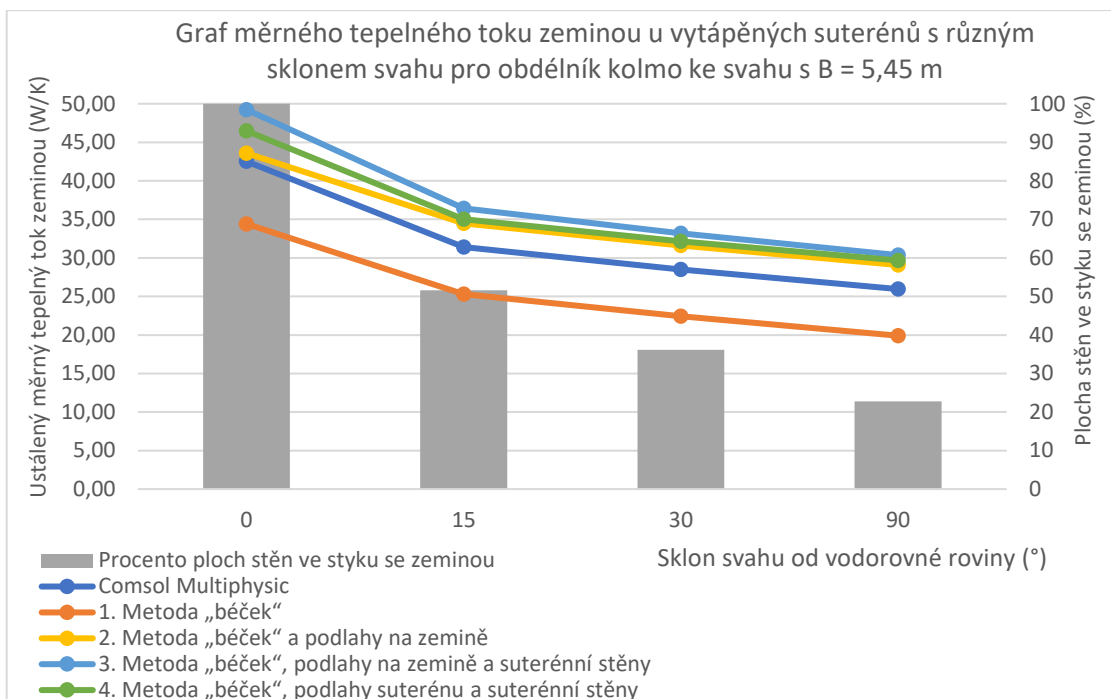
Obr. 61: Půdorys modelu obdélníku kolmo ke svahu



Obr. 62: Boční pohled modelu obdélníku kolmo ke svahu

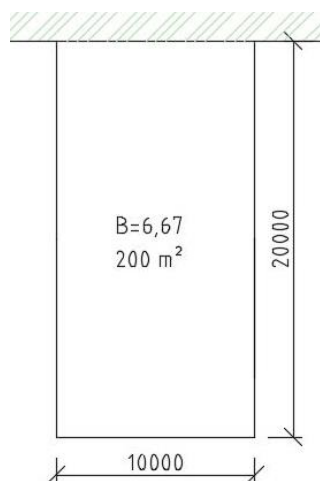
Tab. 16: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=5,45$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu $B=5,45$ m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	18,18	42,52	13,24	22,41	22,41	19,66	5,39
	Stěny	24,34		15,78	15,78	21,43	21,43	
	Celkem	42,52		29,02	38,19	43,84	41,09	
Model 15°	Podlaha	19,18	31,42	13,24	22,41	22,41	21,00	3,94
	Stěny	12,32		8,14	8,14	10,07	10,07	
	Celkem	31,50		21,37	30,55	32,48	31,07	
Model 30°	Podlaha	19,55	28,50	13,24	22,41	22,41	21,38	3,48
	Stěny	8,56		5,70	5,70	7,28	7,28	
	Celkem	28,11		18,94	28,11	29,70	28,66	
Model 90°	Podlaha	19,69	25,96	13,24	22,41	22,41	21,72	3,08
	Stěny	5,61		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	25,30		16,82	26,00	27,28	26,59	

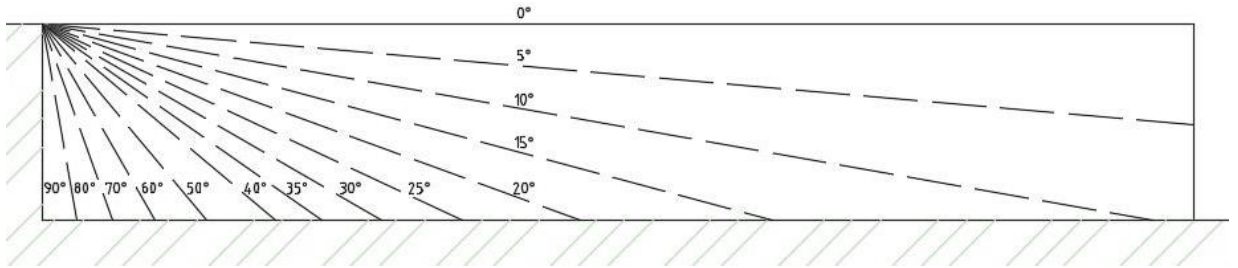


Obr. 63: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník kolmo ke svahu s $B=5,45$ m

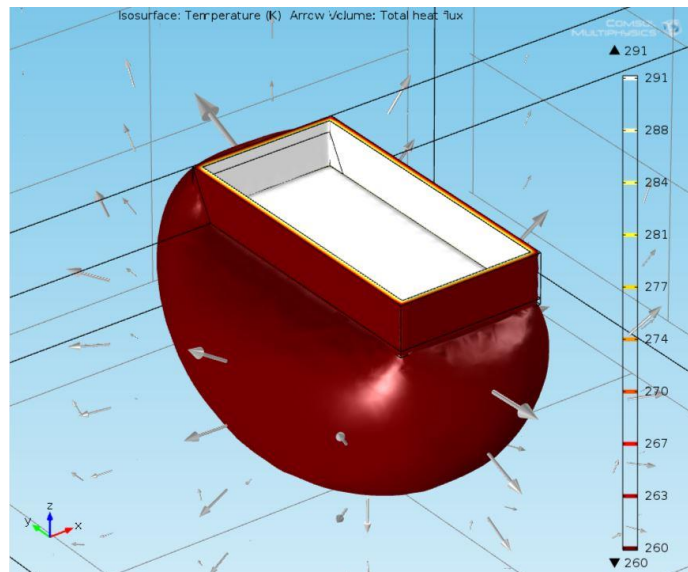
Další hodnocený obdélníkový suterén kolmo ke svahu má rozměry 10 x 20 m s charakteristickým rozměrem podlahy 6,67 m (Obr. 64). Pro tento případ je zkoumána celá řada sklonů svahu od 0° do 90° (Obr. 65).



Obrázek 64: Půdorys modelu obdélníku kolmo ke svahu



Obrázek 65: Boční pohled modelu obdélníku kolmo ke svahu



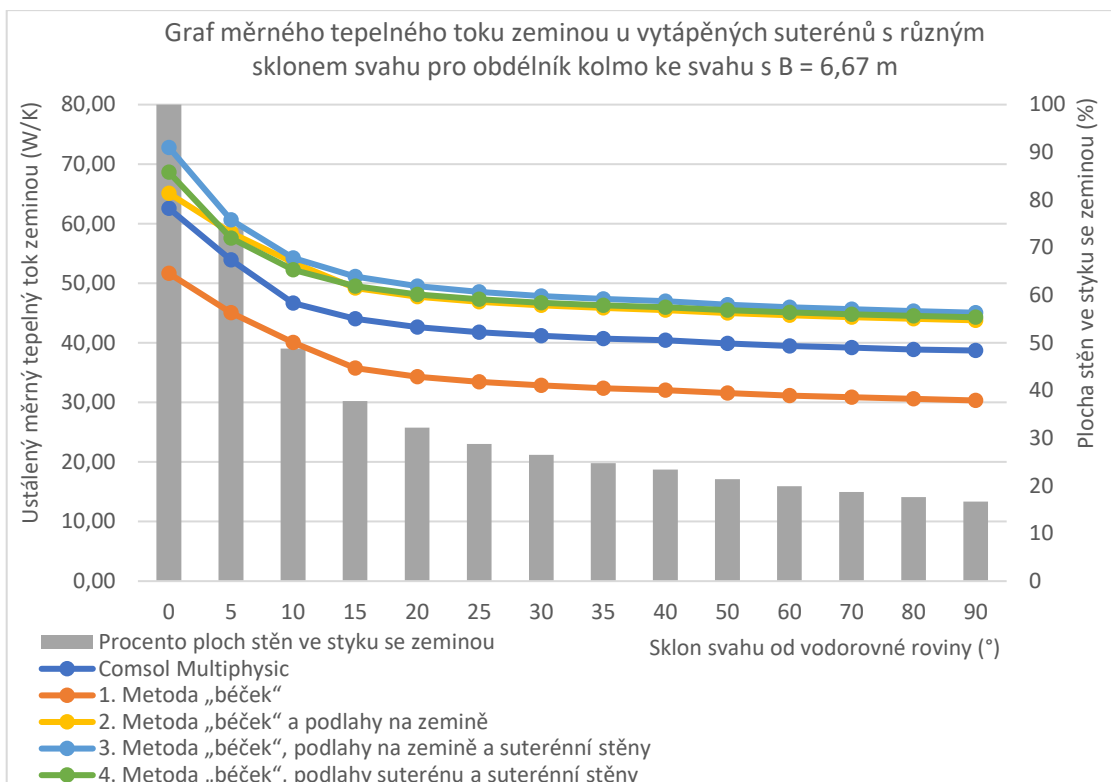
Obr. 66: Tepelné toky z programu Comsol Multiphysics pro model obdélníku se sklonem svahu 60° a $B=6,67$ m

Tab. 17: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=6,67$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu $B = 6,67$ m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	29,26	62,57	22,06	35,52	35,52	31,34	8,08
	Stěny	33,31		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	62,57		43,58	57,03	64,74	60,56	
Model 5°	Podlaha	30,10	53,93	22,06	35,52	35,52	32,45	7,03
	Stěny	24,85		15,98	15,98	18,10	18,10	
	Celkem	54,95		38,04	51,50	53,62	50,55	
Model 10°	Podlaha	31,07	46,68	22,06	35,52	35,52	33,51	5,99
	Stěny	15,86		12,00	12,00	12,77	12,77	
	Celkem	46,93		34,07	47,52	48,29	46,28	

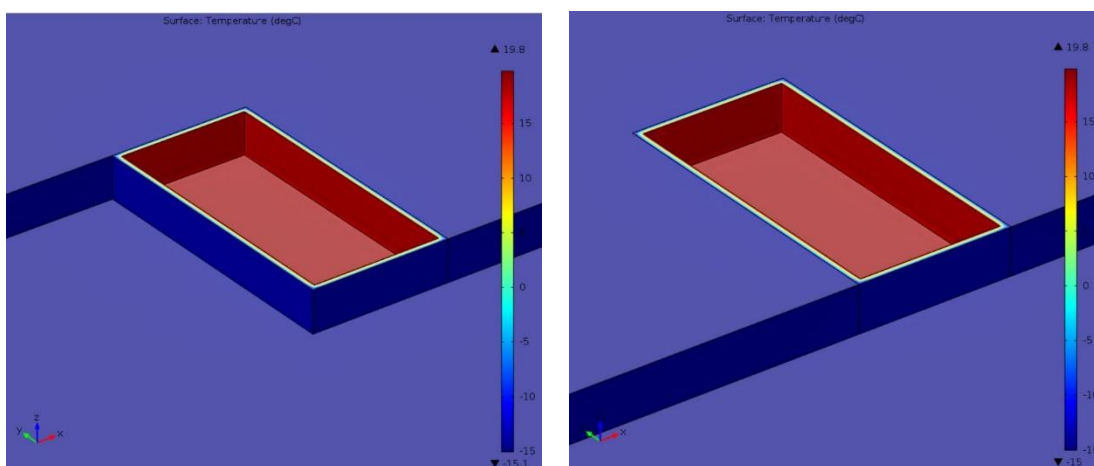
Tab. 17 pokračování: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=6,67$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu B = 6,67 m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 15°	Podlaha	31,59	44,04	22,06	35,52	35,52	33,92	5,54
	Stěny	12,24		8,14	8,14	10,07	10,07	
	Celkem	43,84		30,20	43,65	45,59	43,99	
Model 20°	Podlaha	31,79	42,67	22,06	35,52	35,52	34,13	5,32
	Stěny	10,42		6,93	6,93	8,70	8,70	
	Celkem	42,21		29,00	42,45	44,21	42,83	
Model 25°	Podlaha	31,89	41,78	22,06	35,52	35,52	34,27	5,18
	Stěny	9,34		6,20	6,20	7,86	7,86	
	Celkem	41,23		28,26	41,72	43,37	42,12	
Model 30°	Podlaha	31,97	41,18	22,06	35,52	35,52	34,36	5,08
	Stěny	8,54		5,70	5,70	7,28	7,28	
	Celkem	40,51		27,76	41,21	42,80	41,64	
Model 35°	Podlaha	32,04	40,73	22,06	35,52	35,52	34,42	5,01
	Stěny	7,99		5,33	5,33	6,86	6,86	
	Celkem	40,03		27,39	40,84	42,38	41,29	
Model 40°	Podlaha	32,07	40,42	22,06	35,52	35,52	34,48	4,96
	Stěny	7,54		5,04	5,04	6,53	6,53	
	Celkem	39,61		27,10	40,56	42,05	41,01	
Model 50°	Podlaha	32,12	39,91	22,06	35,52	35,52	34,56	4,87
	Stěny	6,89		4,61	4,61	6,04	6,04	
	Celkem	39,01		26,67	40,13	41,56	40,60	
Model 60°	Podlaha	32,14	39,50	22,06	35,52	35,52	34,62	4,81
	Stěny	6,40		4,29	4,29	5,67	5,67	
	Celkem	38,53		26,35	39,81	41,19	40,29	
Model 70°	Podlaha	32,20	39,19	22,06	35,52	35,52	34,66	4,76
	Stěny	5,97		4,03	4,03	5,37	5,37	
	Celkem	38,16		26,09	39,54	40,89	40,04	
Model 80°	Podlaha	32,24	38,88	22,06	35,52	35,52	34,71	4,72
	Stěny	5,59		3,80	3,80	5,11	5,11	
	Celkem	37,82		25,86	39,32	40,63	39,82	
Model 90°	Podlaha	32,25	38,71	22,06	35,52	35,52	34,75	4,68
	Stěny	5,62		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	37,87		25,65	39,10	40,39	39,62	



Obr. 67: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník kolmo ke svahu s $B=6,67 \text{ m}$

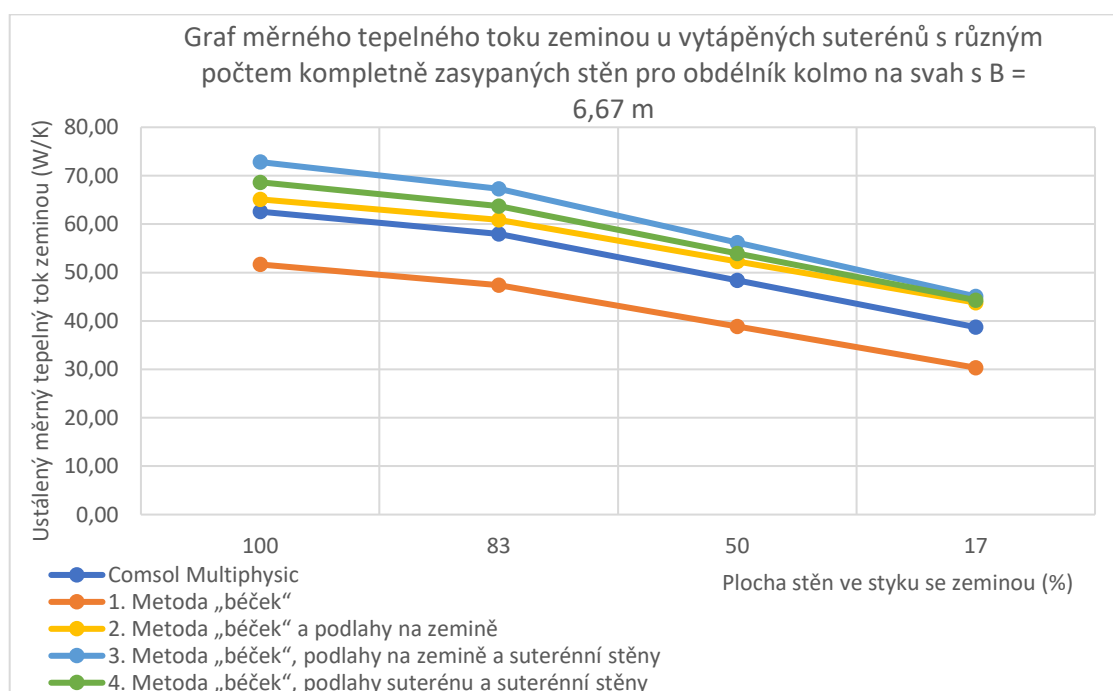
Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou kompletně zasypány 2 či 3 stěny (Obr. 68).



Obr. 68: Teplotní pole z programu Cmsol Multiphysics pro obdélníky kolmo ke svahu s rozdílně zasypávanými stěnami

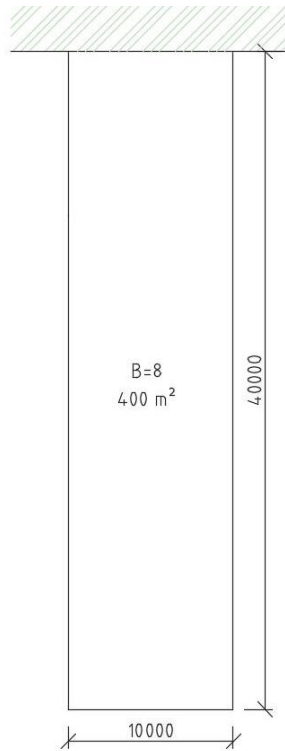
Tab. 18: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=6,67$ m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Cmsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu $B = 6,67$ m		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	32,25	38,71	22,06	35,52	35,52	34,75	5,36
	Stěny	5,62		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	37,87		25,65	39,10	40,39	39,62	
Kompletně zasypaný 2 stěny	Podlaha	31,10	48,38	22,06	35,52	35,52	33,30	6,04
	Stěny	16,82		10,76	10,76	14,61	14,61	
	Celkem	47,92		32,82	46,27	50,13	47,91	
Kompletně zasypaný 3 stěny	Podlaha	29,90	57,98	22,06	35,52	35,52	31,97	7,40
	Stěny	27,98		17,93	17,93	24,35	24,35	
	Celkem	57,88		39,99	53,45	59,87	56,32	
Model 0°	Podlaha	29,26	62,57	22,06	35,52	35,52	31,34	8,08
	Stěny	33,31		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	62,57		43,58	57,03	64,74	60,56	

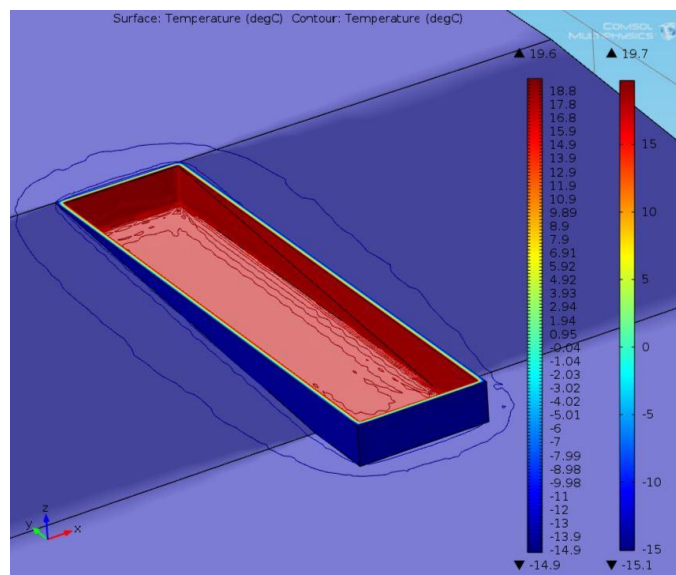


Obr. 69: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro obdélník kolmo ke svahu s $B=6,67$ m

Obdélníkový suterén o rozměrech 10 x 40 m s charakteristickým rozměrem podlahy 8 m (Obr. 70) je řešen pro stejné případy sklonů svahu jako předchozí obdélník s charakteristickým rozměrem 6,67 m.



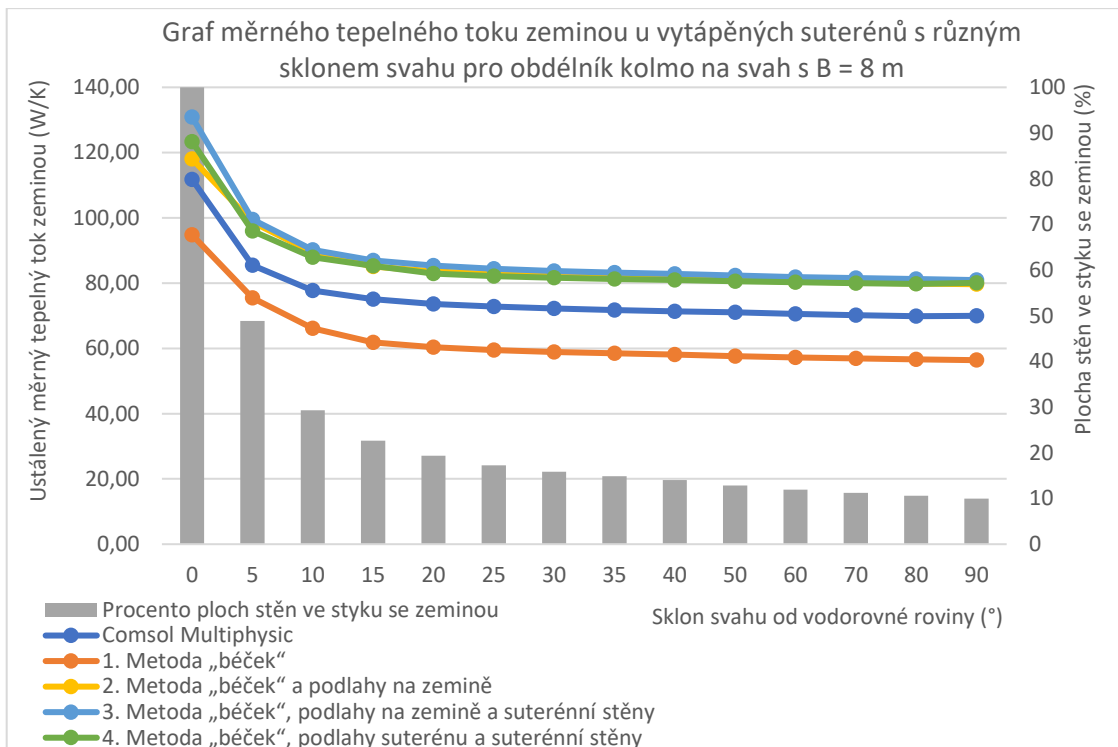
Obr. 70: Půdorys modelu obdélníku kolmo ke svahu



Obr. 71: Teplotní pole z programu Comsol pro obdélník kolmo ke svahu se sklonem 5°

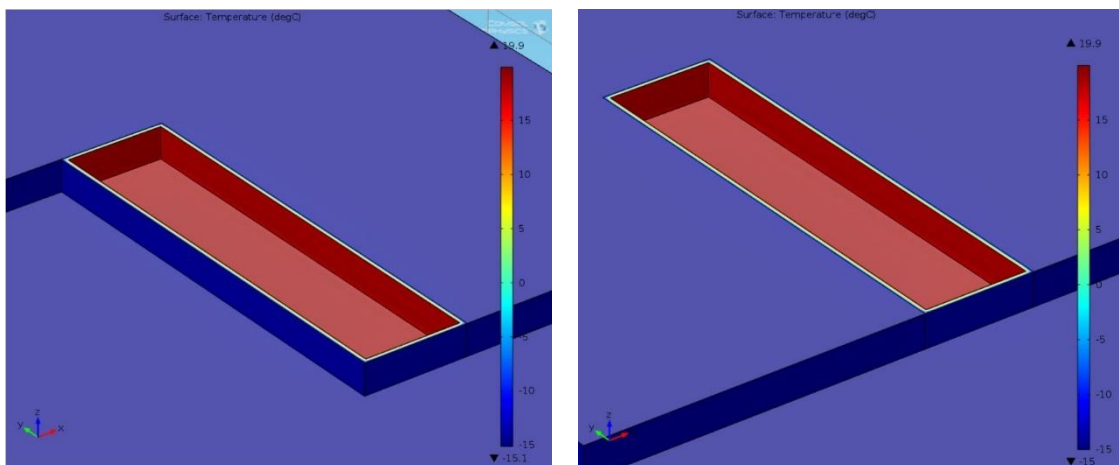
Tab. 19: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s $B=8\text{ m}$

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu $B = 8\text{ m}$		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	55,86	111,77	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,92		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	111,77		79,99	103,25	116,09	108,53	
Model 5°	Podlaha	60,14	85,52	44,13	67,39	67,39	63,82	11,32
	Stěny	26,35		20,02	20,02	20,80	20,80	
	Celkem	86,49		64,15	87,41	88,18	84,61	
Model 10°	Podlaha	61,73	77,73	44,13	67,39	67,39	65,16	9,99
	Stěny	15,69		12,00	12,00	12,77	12,77	
	Celkem	77,42		56,13	79,39	80,16	77,94	
Model 15°	Podlaha	62,30	75,07	44,13	67,39	67,39	65,63	9,54
	Stěny	12,30		8,14	8,14	10,07	10,07	
	Celkem	74,60		52,26	75,52	77,46	75,70	
Model 20°	Podlaha	62,57	73,65	44,13	67,39	67,39	64,89	9,32
	Stěny	10,45		6,93	6,93	8,70	8,70	
	Celkem	73,02		51,06	74,32	76,08	73,59	
Model 25°	Podlaha	62,72	72,86	44,13	67,39	67,39	65,13	9,18
	Stěny	9,35		6,20	6,20	7,86	7,86	
	Celkem	72,07		50,33	73,59	75,25	72,99	
Model 30°	Podlaha	62,65	72,28	44,13	67,39	67,39	65,30	9,08
	Stěny	8,57		5,70	5,70	7,28	7,28	
	Celkem	71,22		49,82	73,08	74,67	72,58	
Model 35°	Podlaha	62,81	71,76	44,13	67,39	67,39	65,42	9,01
	Stěny	7,99		5,33	5,33	6,86	6,86	
	Celkem	70,81		49,45	72,71	74,25	72,28	
Model 40°	Podlaha	62,85	71,33	44,13	67,39	67,39	65,51	8,96
	Stěny	7,56		5,04	5,04	6,53	6,53	
	Celkem	70,41		49,17	72,43	73,92	72,04	
Model 50°	Podlaha	62,93	71,09	44,13	67,39	67,39	65,66	8,87
	Stěny	6,90		4,61	4,61	6,04	6,04	
	Celkem	69,83		48,74	72,00	73,43	71,70	
Model 60°	Podlaha	62,92	70,53	44,13	67,39	67,39	65,76	8,81
	Stěny	6,39		4,29	4,29	5,67	5,67	
	Celkem	69,31		48,42	71,68	73,06	71,44	
Model 70°	Podlaha	63,05	70,16	44,13	67,39	67,39	65,85	8,76
	Stěny	5,98		4,03	4,03	5,37	5,37	
	Celkem	69,03		48,15	71,41	72,76	71,22	
Model 80°	Podlaha	63,00	69,87	44,13	67,39	67,39	65,93	8,72
	Stěny	5,58		3,80	3,80	5,11	5,11	
	Celkem	68,58		47,93	71,19	72,50	71,04	
Model 90°	Podlaha	62,98	69,97	44,13	67,39	67,39	66,55	8,68
	Stěny	5,61		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	68,60		47,71	70,97	72,26	71,42	



Obr. 72: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro obdélník kolmo ke svahu s $B=8\text{ m}$

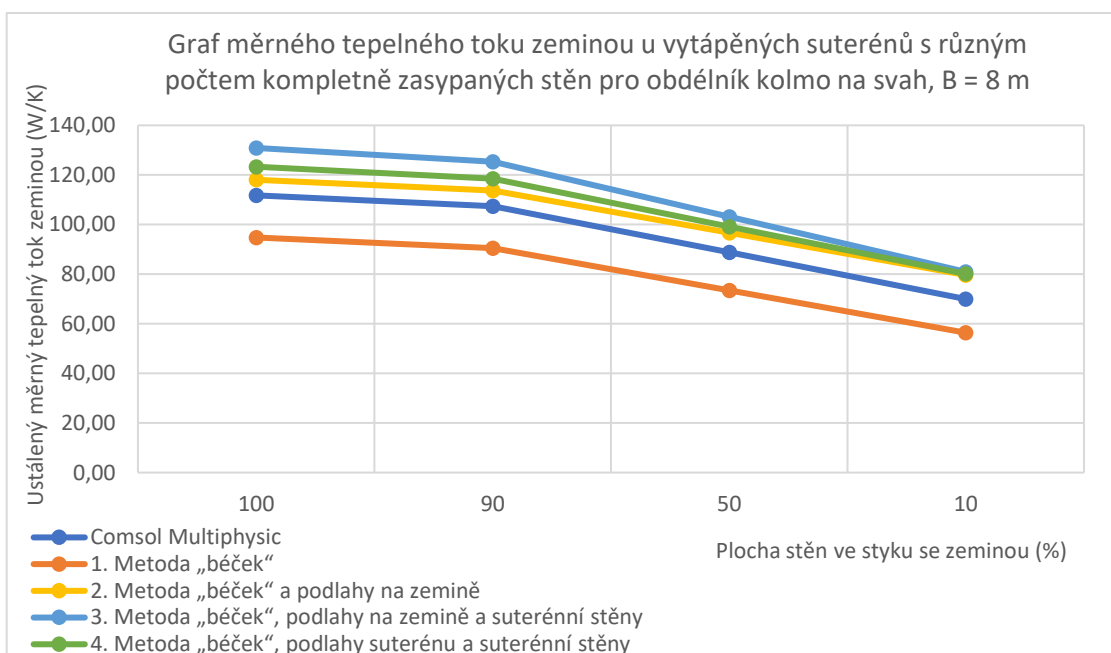
Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou kompletně zasypány 2 či 3 stěny (Obr. 73).



Obr. 73: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro obdélníky s rozdílně zasypávanými stěnami

Tab. 20: Tabulka výsledků pro model obdélníku kolmo ke svahu s B=8 m

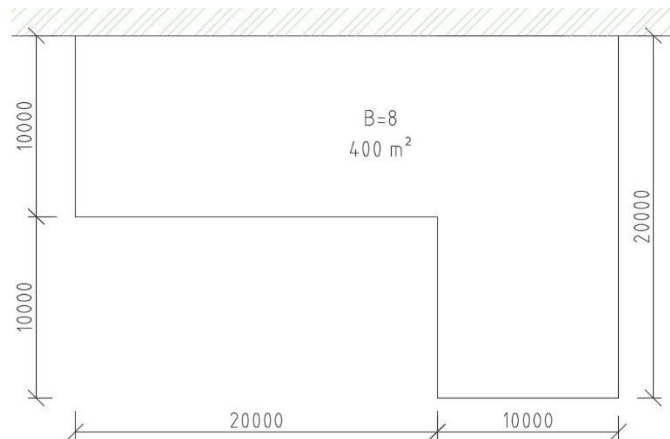
Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Obdélník kolmo ke svahu B = 8 m		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	62,98	69,97	44,13	67,39	67,39	66,55	8,68
	Stěny	5,61		3,59	3,59	4,87	4,87	
	Celkem	68,60		47,71	70,97	72,26	71,42	
Kompletně zasypány 2 stěny	Podlaha	59,89	88,78	44,13	67,39	67,39	63,38	11,40
	Stěny	28,28		17,93	17,93	24,35	24,35	
	Celkem	88,17		62,06	85,32	91,74	87,73	
Kompletně zasypány 3 stěny	Podlaha	56,53	107,35	44,13	67,39	67,39	60,51	14,12
	Stěny	50,74		32,27	32,27	48,83	43,83	
	Celkem	107,27		76,40	99,66	111,22	104,34+	
Model 0°	Podlaha	55,86	111,77	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,92		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	111,77		79,99	103,25	116,09	108,53	



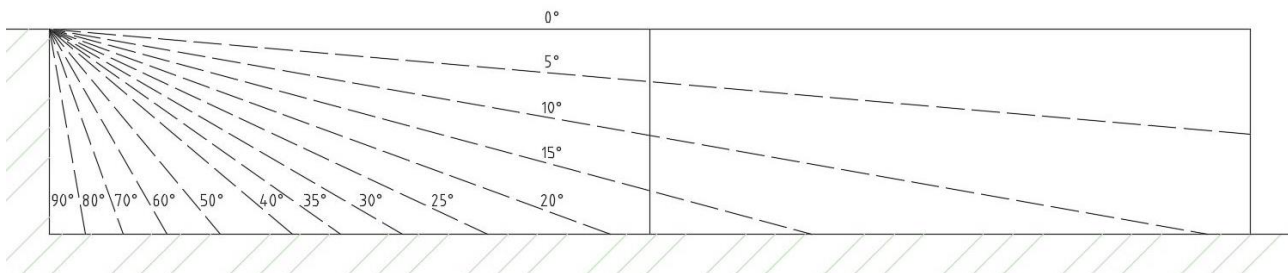
Obr. 74: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro obdélník kolmo ke svahu s B=8 m

4.3 Model L

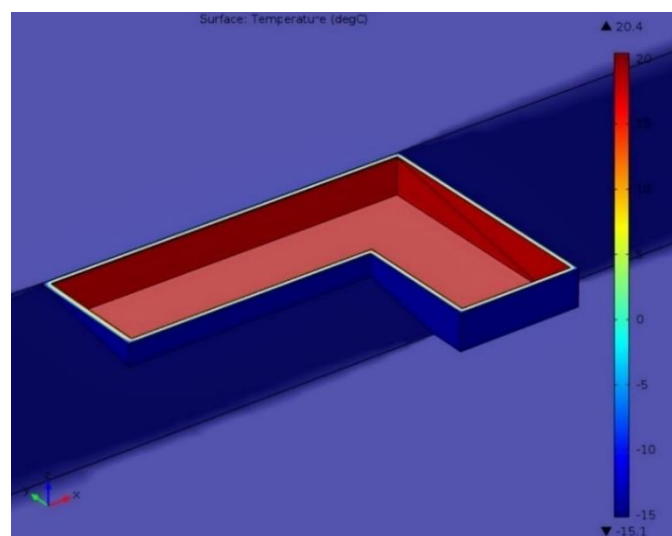
Půdorys suterénu ve tvaru „L“ s charakteristickým rozměrem podlahy 8 m (Obr. 75) má delší ze stěn kompletně zasypanou zeminou a zbylé stěny jsou ve svahu s různým sklonem (Obr. 76).



Obr. 75: Půdorys modelu L



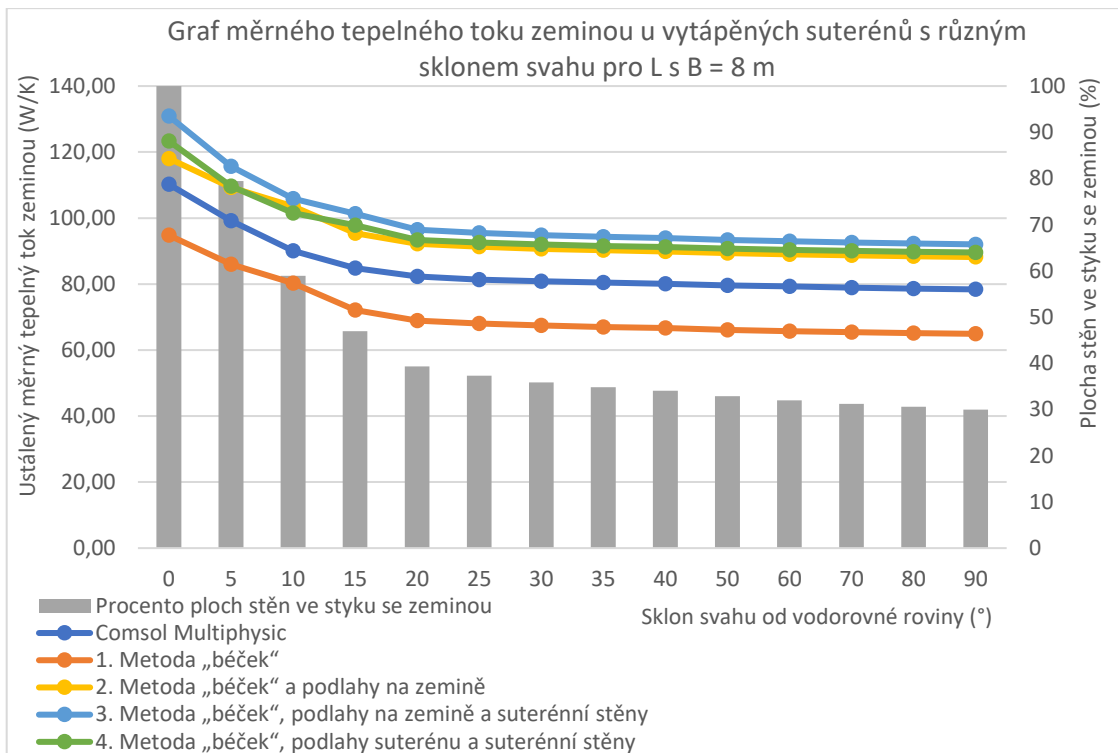
Obr. 76: Boční pohled modelu L



Obr. 77: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro model L se sklonem 10°

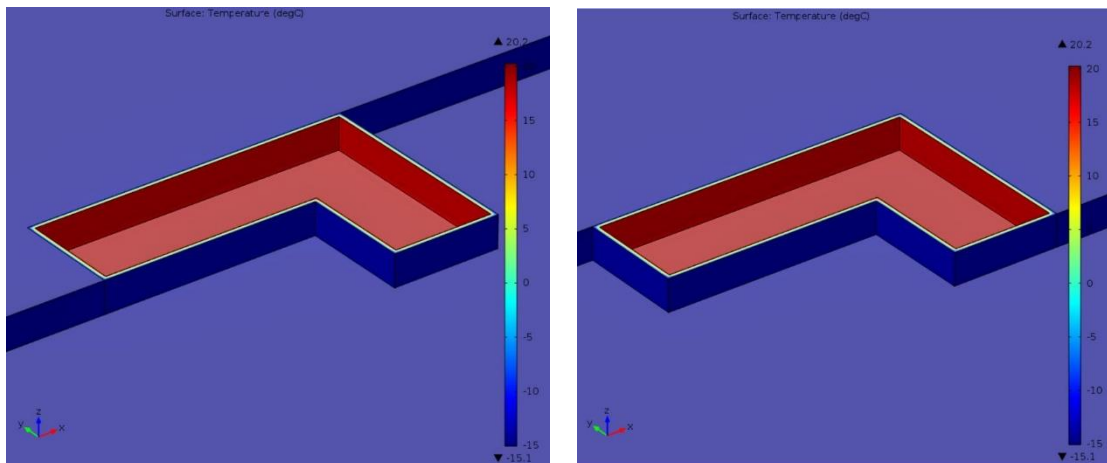
Tab. 21: Tabulka výsledků pro model L s B=8 m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
L B=8 m		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 0°	Podlaha	55,02	110,22	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,20		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	110,22		77,99	103,25	116,09	108,53	
Model 5°	Podlaha	56,54	99,23	44,13	67,39	67,39	61,44	13,40
	Stěny	44,41		28,48	28,48	34,86	34,86	
	Celkem	100,95		72,60	95,86	102,25	96,30	
Model 10°	Podlaha	58,29	90,12	44,13	67,39	67,39	62,99	12,01
	Stěny	32,29		24,17	24,17	26,48	26,48	
	Celkem	90,58		68,29	91,55	93,87	89,47	
Model 15°	Podlaha	59,78	84,88	44,13	67,39	67,39	63,89	11,19
	Stěny	25,80		16,83	16,83	22,78	22,78	
	Celkem	85,58		60,95	84,21	90,17	86,67	
Model 20°	Podlaha	60,03	82,27	44,13	67,39	67,39	64,28	10,68
	Stěny	20,78		14,11	14,11	18,44	18,44	
	Celkem	80,82		58,23	81,49	85,82	82,72	
Model 25°	Podlaha	60,18	81,38	44,13	67,39	67,39	64,42	10,54
	Stěny	20,57		13,37	13,37	17,60	17,60	
	Celkem	80,75		57,50	80,76	84,99	82,02	
Model 30°	Podlaha	60,21	80,90	44,13	67,39	67,39	64,52	10,44
	Stěny	19,88		12,87	12,87	17,02	17,02	
	Celkem	80,09		57,00	80,26	84,41	81,54	
Model 35°	Podlaha	60,24	80,44	44,13	67,39	67,39	64,59	10,37
	Stěny	19,35		12,50	12,50	16,60	16,60	
	Celkem	79,59		56,63	79,89	83,99	81,19	
Model 40°	Podlaha	60,28	80,09	44,13	67,39	67,39	64,64	10,32
	Stěny	18,91		12,21	12,21	16,27	16,27	
	Celkem	79,19		56,34	79,60	83,66	80,92	
Model 50°	Podlaha	60,44	79,59	44,13	67,39	67,39	64,73	10,23
	Stěny	18,22		11,78	11,78	15,78	15,78	
	Celkem	78,66		55,91	79,17	83,17	80,51	
Model 60°	Podlaha	60,50	79,27	44,13	67,39	67,39	64,79	10,17
	Stěny	17,68		11,46	11,46	15,41	15,41	
	Celkem	78,18		55,59	78,85	82,80	80,20	
Model 70°	Podlaha	60,44	78,94	44,13	67,39	67,39	64,84	10,12
	Stěny	17,31		11,20	11,20	15,11	15,11	
	Celkem	77,75		55,33	78,59	82,50	79,95	
Model 80°	Podlaha	60,69	78,60	44,13	67,39	67,39	64,88	10,08
	Stěny	17,31		10,97	10,97	14,85	14,85	
	Celkem	78,00		55,10	78,36	82,24	79,74	
Model 90°	Podlaha	60,52	78,39	44,13	67,39	67,39	64,93	10,04
	Stěny	16,95		10,76	10,76	14,61	14,61	
	Celkem	77,47		54,89	78,15	82,00	79,54	

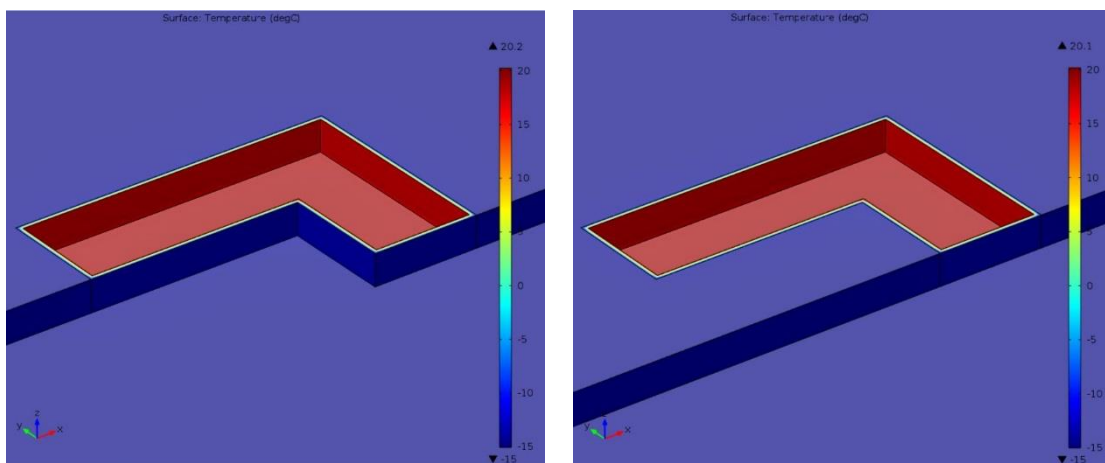


Obr. 78: Graf ustáleného měrného tepelného toku pro L s $B=8$ m

Pro tento model jsou navíc řešeny případy, kdy jsou postupně kompletně zasypány všechny stěny (Obr. 79).



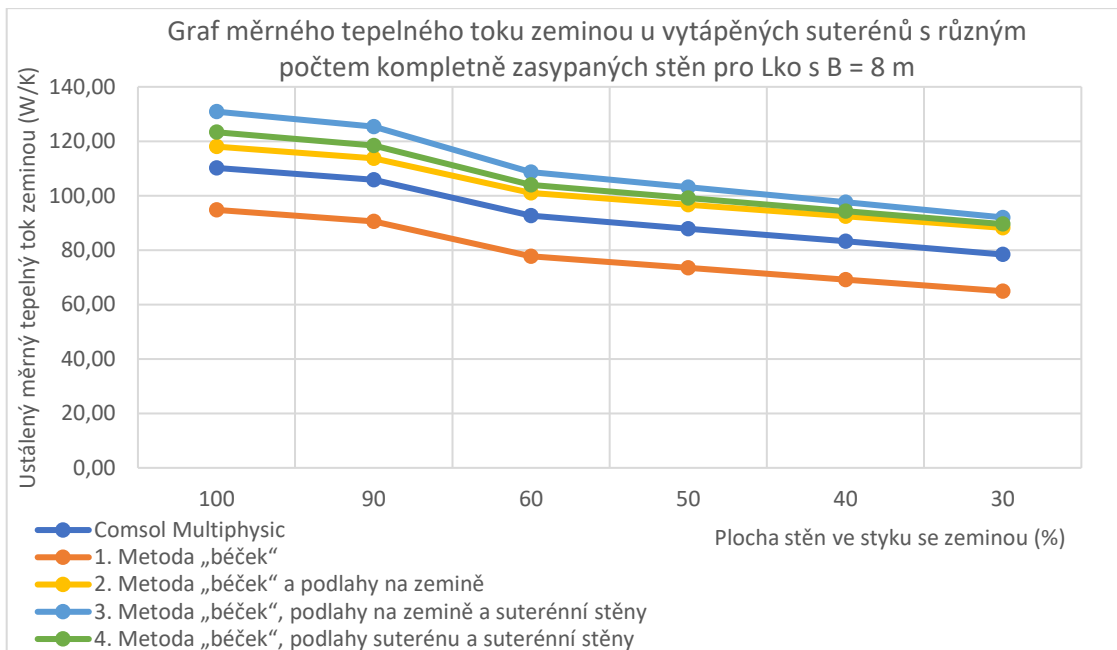
Obr. 79: Teplotní pole z programu Cmsol Multiphysics pro půdorys ve tvaru L s rozdílně zasypávanými stěnami



Obr. 79 pokračování: Teplotní pole z programu Comsol Multiphysics pro půdorys ve tvaru L s rozdílně zasypanými stěnami

Tab. 22: Tabulka výsledků pro model L s B=8 m

Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
L B = 8 m		Cmsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Cmsol - tepelný tok zeminou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
Model 90°	Podlaha	60,52	78,39	44,13	67,39	67,39	64,93	10,04
	Stěny	16,95		10,76	10,76	14,61	14,61	
	Celkem	77,47		54,89	78,15	82,00	79,54	
Kompletně zasypaný 2 stěny	Podlaha	60,08	83,27	44,13	67,39	67,39	64,15	10,72
	Stěny	16,95		14,34	14,34	19,48	19,48	
	Celkem	77,03		58,47	81,73	86,87	83,63	
Kompletně zasypaný 2 stěny	Podlaha	59,16	87,85	44,13	67,39	67,39	64,15	11,40
	Stěny	28,09		17,93	17,93	24,35	24,35	
	Celkem	87,25		62,06	85,32	91,74	87,73	
Kompletně zasypaný 3 stěny	Podlaha	58,71	92,71	44,13	67,39	67,39	64,15	12,08
	Stěny	33,57		21,52	21,52	29,22	29,22	
	Celkem	92,29		65,64	88,90	96,61	91,86	
Kompletně zasypaný 5 stěny	Podlaha	55,87	105,86	44,13	67,39	67,39	64,15	14,12
	Stěny	49,92		32,27	32,27	43,83	43,83	
	Celkem	105,78		76,40	99,66	111,22	104,34	
Model 0°	Podlaha	55,02	110,22	44,13	67,39	67,39	59,83	14,8
	Stěny	55,20		35,86	35,86	48,70	48,70	
	Celkem	110,22		77,99	103,25	116,09	108,53	



Obr. 80: Graf ustáleného měrného tepelného toku v závislosti na ploše stěn ve styku se zeminou pro půdorys ve tvaru L s B=8 m

Z výsledků jasně vyplývá, že chování všech modelů lišících se tvarem, charakteristickým rozměrem podlahy a plochou stěn ve styku se zeminou je obdobné.

Z grafů je zřejmé, že měrné tepelné toky stanovené uvažovanými zjednodušenými postupy jsou - s jedinou výjimkou - vždy na straně bezpečnosti ve srovnání s detailním 3D výpočtem. Zmíněnou výjimkou je nejjednodušší zjednodušená metoda - tedy metoda 1, která používá pro výpočet měrných toků přes všechny konstrukce činitele teplotní redukce. Druhý způsob výpočtu, který zpřesňuje první metodu – počítá s podlahou na zemině dle EN ISO, lze považovat za výpočet na straně bezpečnosti, který se v drtivé většině nejvíce přibližuje detailnímu 3D výpočtu, a je tedy považován za nejpřesnější.

5. Stanovení vztahu pro odhad chyby zvoleného zjednodušeného výpočtu

Pro vytápěné suterény obdélníkového tvaru je vytvořen vztah, který definuje o kolik procent se liší jednotlivé zjednodušené numerické výpočty vůči detailní 3D analýze.

Aby bylo možné odvodit dostatečně spolehlivý vztah pro odhad chyby všech uvažovaných typů zjednodušeného výpočtu, je analyzováno celkem osmdesát modelů suterénu, přičemž je hodnocen půdorysný obdélník orientovaný jak rovnoběžně, tak kolmo ke svahu.

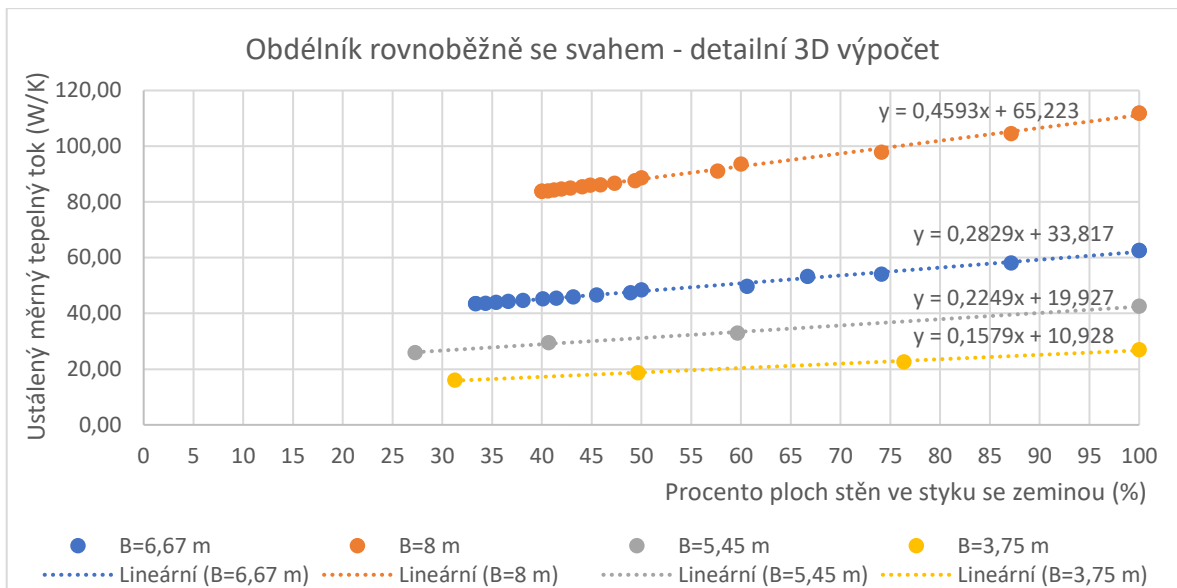
Vztah je koncipován tak, aby ho bylo možné použít co nejsnadněji (bez detailních výpočtů) při dosazení jen těch nejzákladnějších údajů, tj. charakteristického rozměru podlahy a procenta suterénních stěn v kontaktu se zeminou. Kvůli tomu je nejprve třeba odvodit přibližné vztahy pro výpočet ustáleného měrného toku zeminou jak pro detailní 3D výpočet, tak pro jednotlivé uvažované zjednodušené postupy.

5.1 Vztah pro obdélník rovnoběžně se svahem

V této podkapitole je vysvětlen postup při tvorbě vztahu, který je určen pro odhad chyby zjednodušených metod pro obdélníkové suterény orientované rovnoběžně se svahem.

5.1.1 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku 3D analýzou

Nejprve jsou vyneseny vypočtené ustálené měrné tepelné toky detailním 3D výpočtem v závislosti na procentu ploch stěn ve styku se zeminou pro obdélník rovnoběžně se svahem. Měrné toky pro suterény s určitým charakteristickým rozměrem podlahy jsou proloženy spojnicemi trendu, které jsou v tomto případě jednoznačně lineární. Lze tedy konstatovat, že s rostoucí plochou suterénních konstrukcí ve styku se zeminou roste ustálený měrný tepelný tok lineárně.



Obr. 81: Ustálený tepelný tok stanovený výpočtem 3D teplotního pole pro různě velké a různě zasypány suterén rovnoběžně se svahem

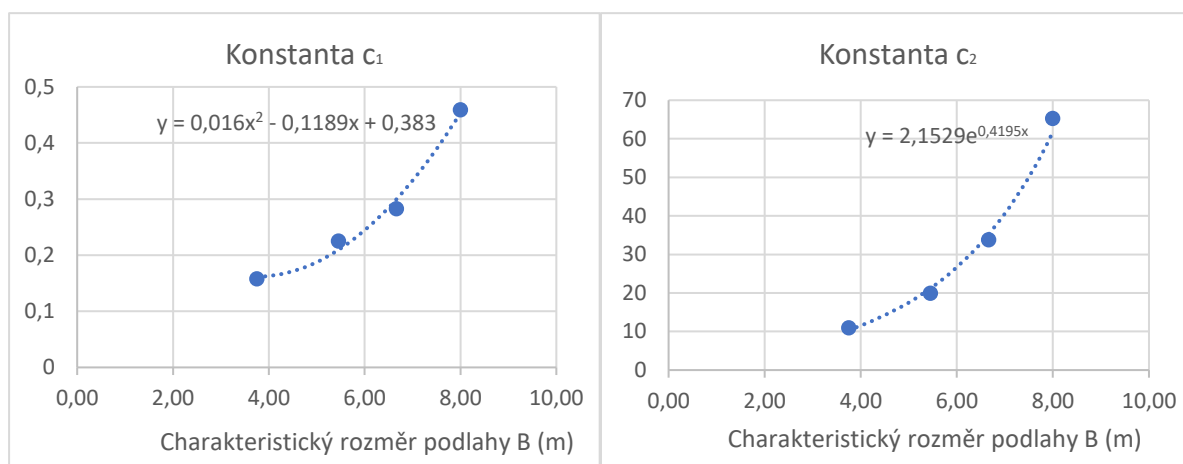
Ustálený měrný tepelný tok lze proto stanovit z lineární rovnice obecně formulované jako:

$$H_T = c_1 \cdot x + c_2 \tag{17}$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

c_1, c_2 bezrozměrné konstanty a pro jejich určení jsou využity hodnoty z grafu na Obr. 81

Pro definování obou konstant jsou využity hodnoty z předešlého grafu (Obr. 81). Tentokrát ale vynesené v závislosti na charakteristickém rozměru podlahy. Získanými křivkami (Obr. 82) je opět proložena spojnice trendu. V případě konstanty c_1 se jedná o polynomickou křivku 2. stupně a u konstanty c_2 o exponenciální závislost.



Obr. 82: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku detailním 3D výpočtem ve tvaru:

$$H_T = (0,016 \cdot B^2 - 0,1189 \cdot B + 0,383) \cdot x + 2,1529 \cdot e^{0,4195 \cdot B} \quad (18)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

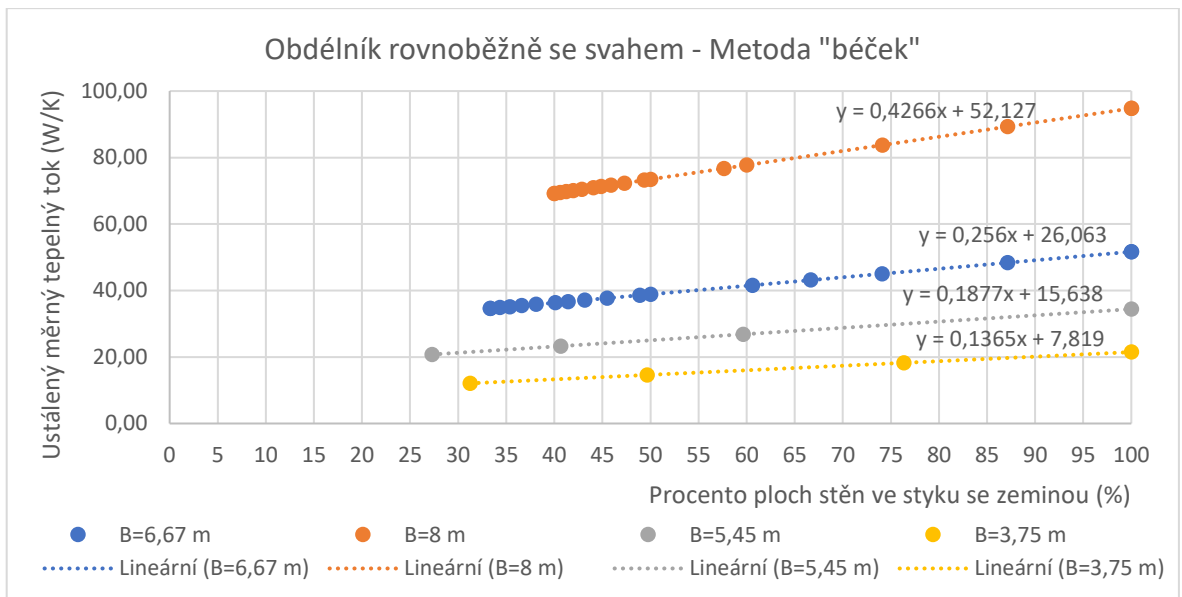
B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví ze vztahu:

$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (19)$$

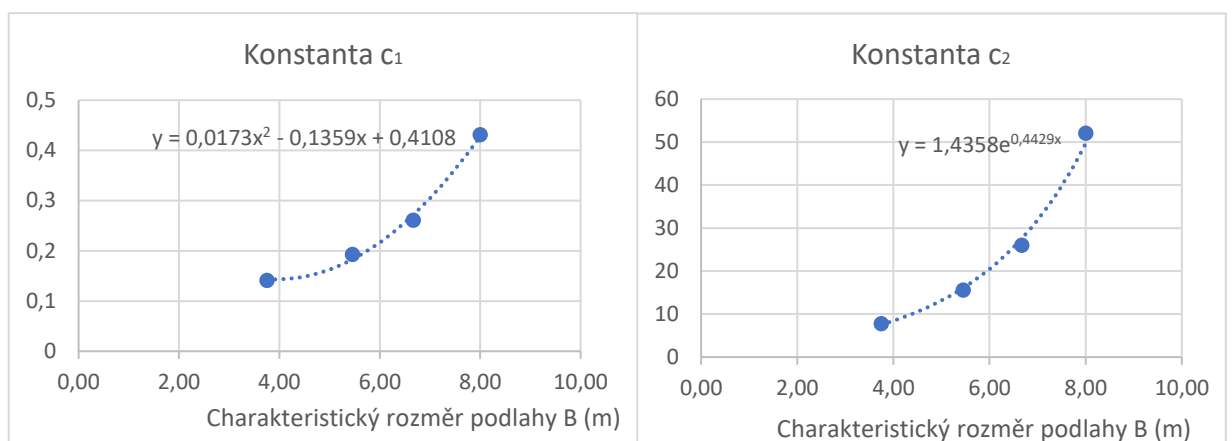
kde A je plocha podlahy v m^2 a P je exponovaný obvod podlahy v m.

5.1.2 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku zjednodušenými metodami

Stejným způsobem jako vztah (18), který platí pro detailní 3D výpočet, jsou stanoveny i vztahy pro přibližný výpočet tepelných toků všemi uvažovanými zjednodušenými metodami. Aby bylo dosaženo vztahu pro odhad chyby zjednodušených metod, který bude vždy na straně bezpečnosti, jsou spojnice trendu konstanty c_1 posunuty, tak aby vycházela vypočtená odchylka nižší než skutečná odchylka.



Obr. 83: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „běček“ pro různě velké a různě zasypány suterén rovnoběžně se svahem



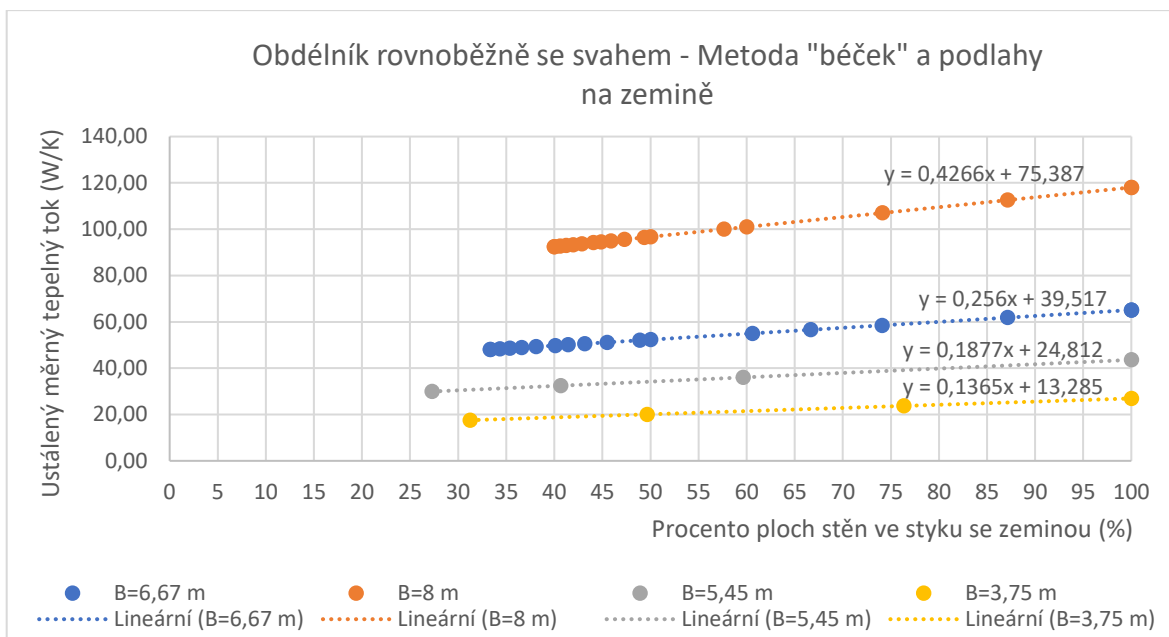
Obr. 84: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „běček“ ve tvaru:

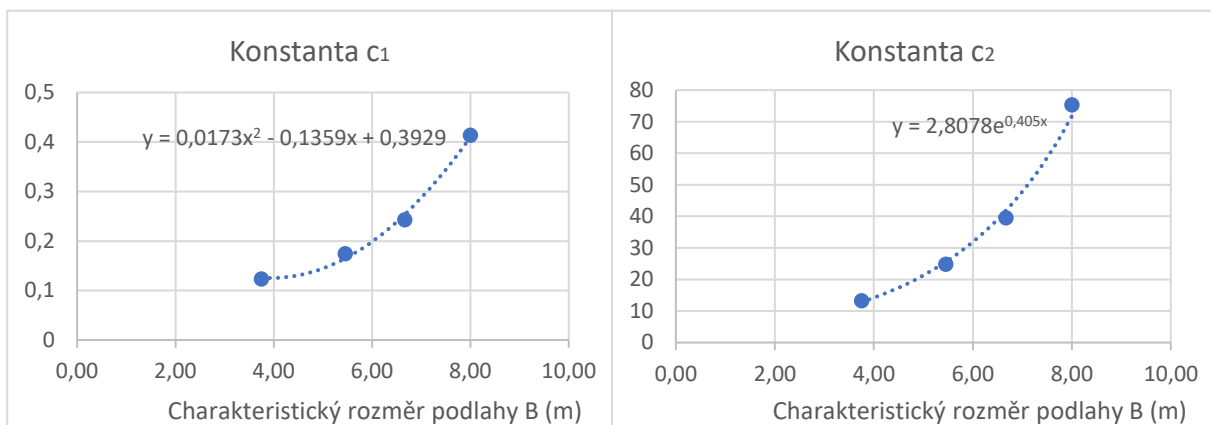
$$H_T = (0,0173 \cdot B^2 - 0,1359 \cdot B + 0,4108) \cdot x + 1,4358 \cdot e^{0,4429 \cdot B} \quad (20)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (19)



Obr. 85: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „béček“ a podlahy na zemině pro různě velký a různě zasypaný suterén rovnoběžně se svahem



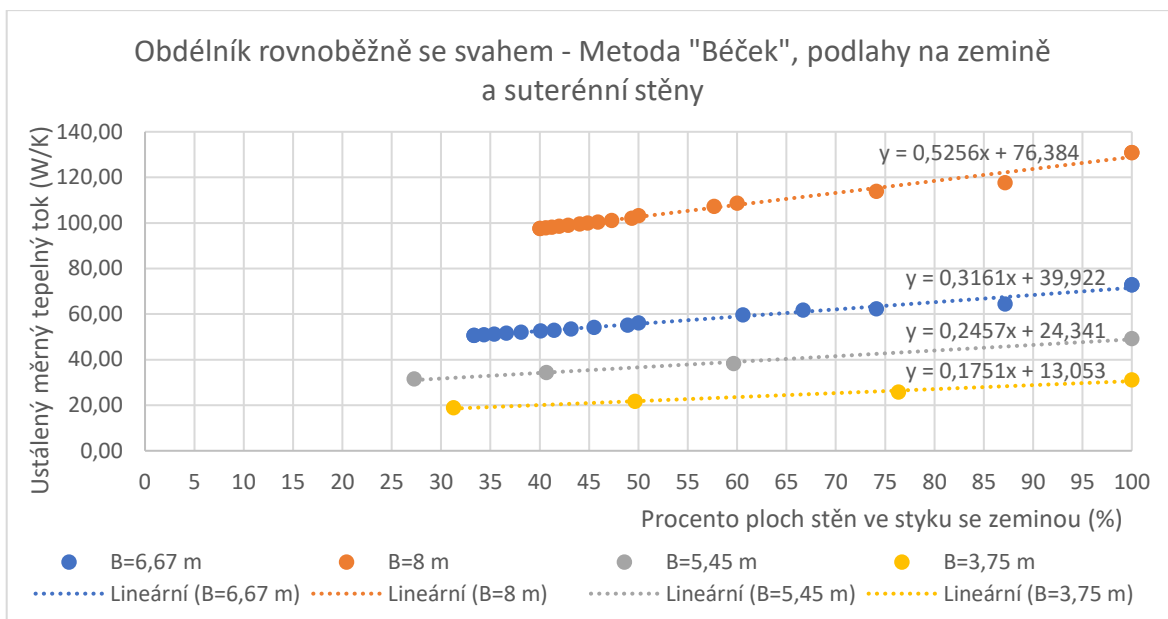
Obr. 86: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „béček“ a podlahy na zemině ve tvaru:

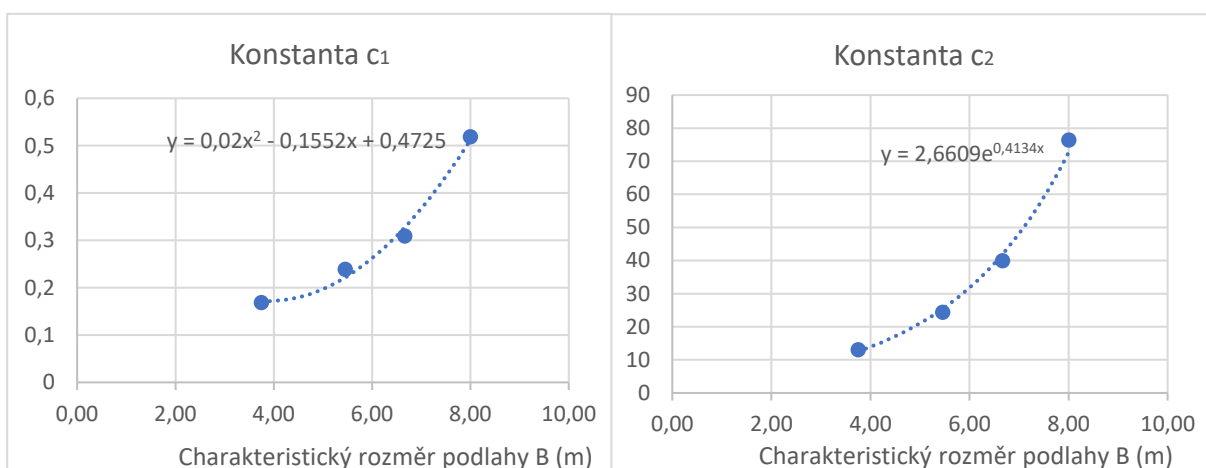
$$H_T = (0,0173 \cdot B^2 - 0,1359 \cdot B + 0,3929) \cdot x + 2,8078 \cdot e^{0,405 \cdot B} \quad (21)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (19)



Obr. 87: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „běček“ a podlahy na zemině a suterénní stěny pro různé veliký a různě zasypány suterén rovnoběžně se svahem



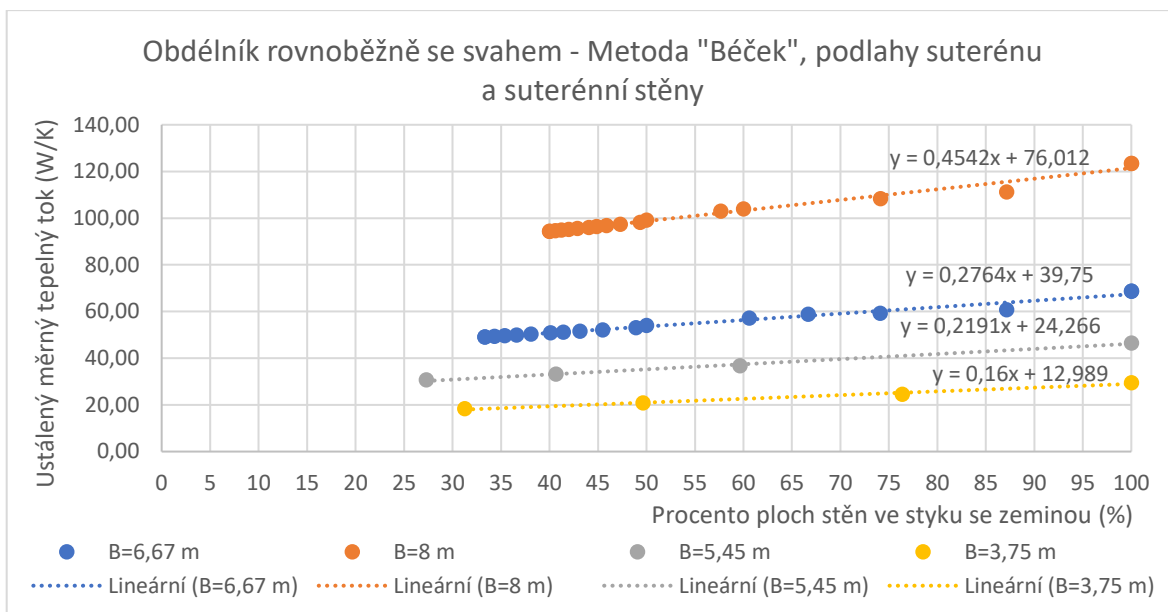
Obr. 88: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „běček“, podlahy na zemině a suterénní stěny ve tvaru:

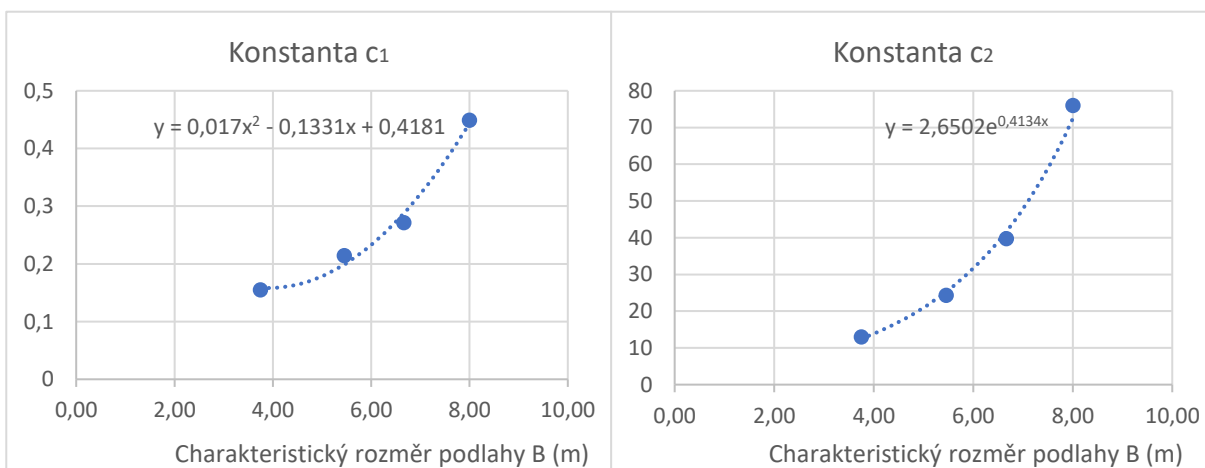
$$H_T = (0,02 \cdot B^2 - 0,1552 \cdot B + 0,4725) \cdot x + 2,6609 \cdot e^{0,4134 \cdot B} \quad (22)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (19)



Obr. 89: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „béček“, podlahy suterénu a suterénní stěny pro různě velké a různě zasypaný suterén rovnoběžně se svahem



Obr. 90: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „béček“, podlahy suterénu a suterénní stěny ve tvaru:

$$H_T = (0,017 \cdot B^2 - 0,1331 \cdot B + 0,4181) \cdot x + 2,6502 \cdot e^{0,4134 \cdot B} \quad (23)$$

x procento ploch stěn ve styku se zemínou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (19)

5.1.3 Výsledný vztah pro odhad chyby zjednodušených metod

Tento vztah je určen pro vytápěné suterény obdélníkového tvaru, které jsou rovnoběžně se svahem a suterénní konstrukce jsou navrženy na doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle [3].

Na základě výše definovaných přibližných vztahů pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku 3D výpočtem i zjednodušenými metodami je odvozen finální vztah pro odhad chyby:

$$i = \left(100 \cdot \frac{(\alpha \cdot B^2 - \beta \cdot B + \gamma) \cdot x + \delta \cdot e^{\eta \cdot B}}{(0,016 \cdot B^2 - 0,1189 \cdot B + 0,383) \cdot x + 2,1529 \cdot e^{0,4195 \cdot B}} \right) - 100 \quad (24)$$

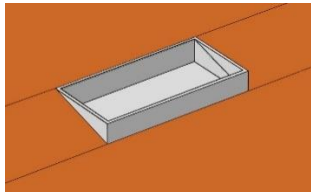
x procento ploch stěn ve styku se zemínou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví ze vztahu

$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (25)$$

kde A je plocha podlahy v m² a P je exponovaný obvod podlahy v m.

Tab. 23: Hodnoty určené pro dosazení do vztahu pro odhad chyby (24)

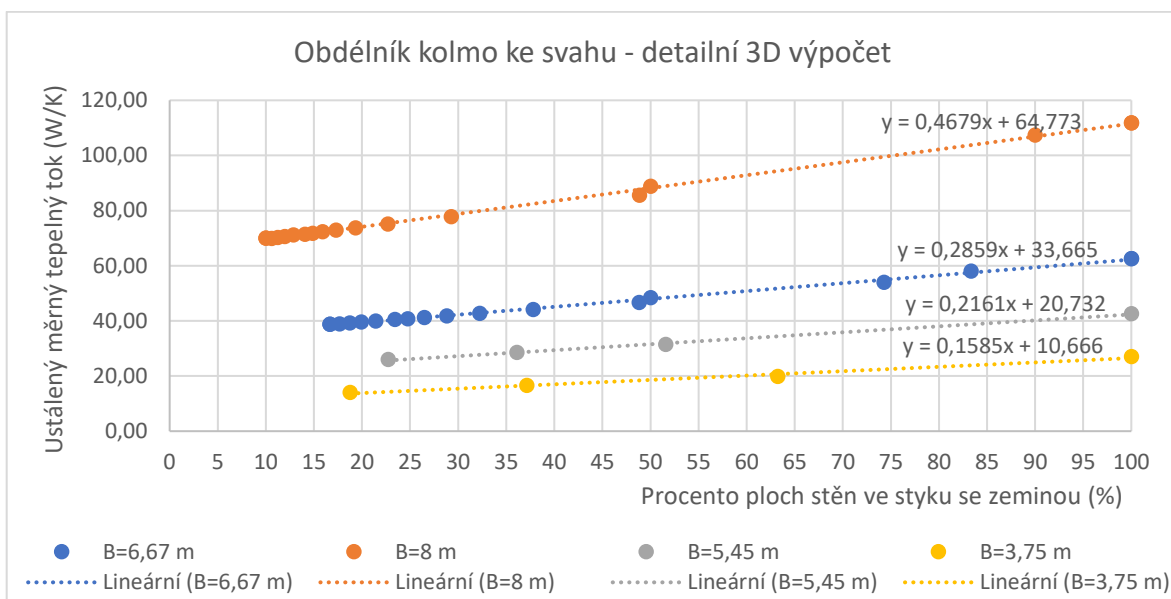
Typ obdélníku	Metoda výpočtu	α	β	γ	δ	η
Obdélník rovnoběžně se svahem 	Metoda „béček“	0,0173	0,1359	0,4108	1,4358	0,4429
	Metoda „béček“ a podlahy na zemině	0,0173	0,1359	0,3929	2,8078	0,4050
	Metoda „béček“, podlahy na zemině a suterénní stěny	0,0200	0,1552	0,4725	2,6609	0,4134
	Metoda „béček“, podlahy suterénu a suterénní stěny	0,0170	0,1331	0,4181	2,6502	0,4134

Pokud přibližný vztah pro vyjádření chyby nabývá hodnot kladných, jde o odchylku na straně bezpečnosti (tj. zjednodušenou metodou se stanoví vyšší tepelný tok než 3D výpočtem). V opačném případě vede použití zjednodušené metody k podcenění měrných tepelných toků (vycházejí nižší než z 3D modelu).

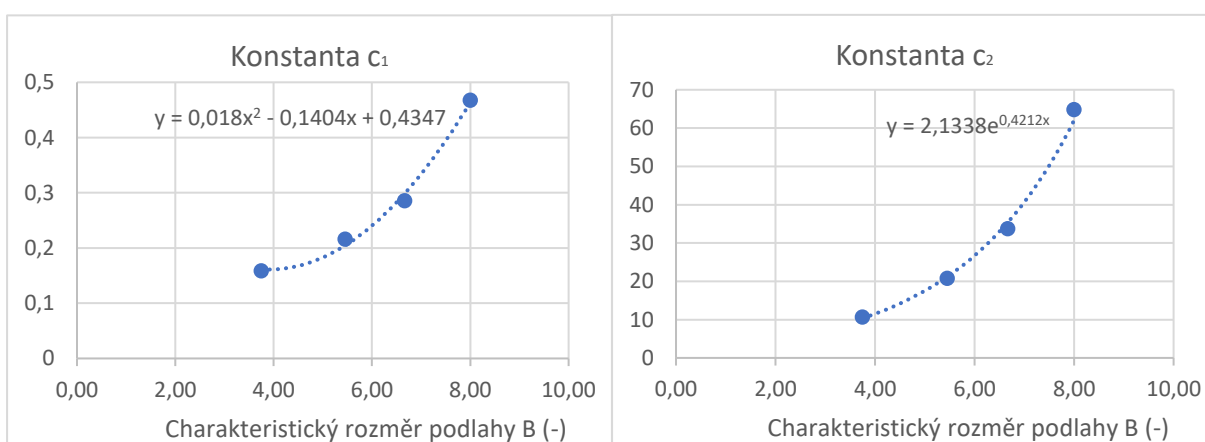
5.2 Vztah pro obdélník kolmo ke svahu

Postup odvození vztahu pro odhad chyby zjednodušených metod pro obdélník, který je orientován kolmo na svah je obdobný s výše uvedeným postupem pro obdélník rovnoběžně se svahem. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny grafy a jednotlivé vztahy bez detailnějšího popsání jednotlivých kroků.

5.2.1 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku 3D analýzou



Obr. 91: Ustálený tepelný tok stanovený výpočtem 3D teplotního pole pro různé veliký a různě zasypaný suterén kolmo ke svahu



Obr. 92: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku detailním 3D výpočtem ve tvaru

$$H_T = (0,018 \cdot B^2 - 0,1404 \cdot B + 0,4347) \cdot x + 2,1338 \cdot e^{0,4212 \cdot B} \quad (26)$$

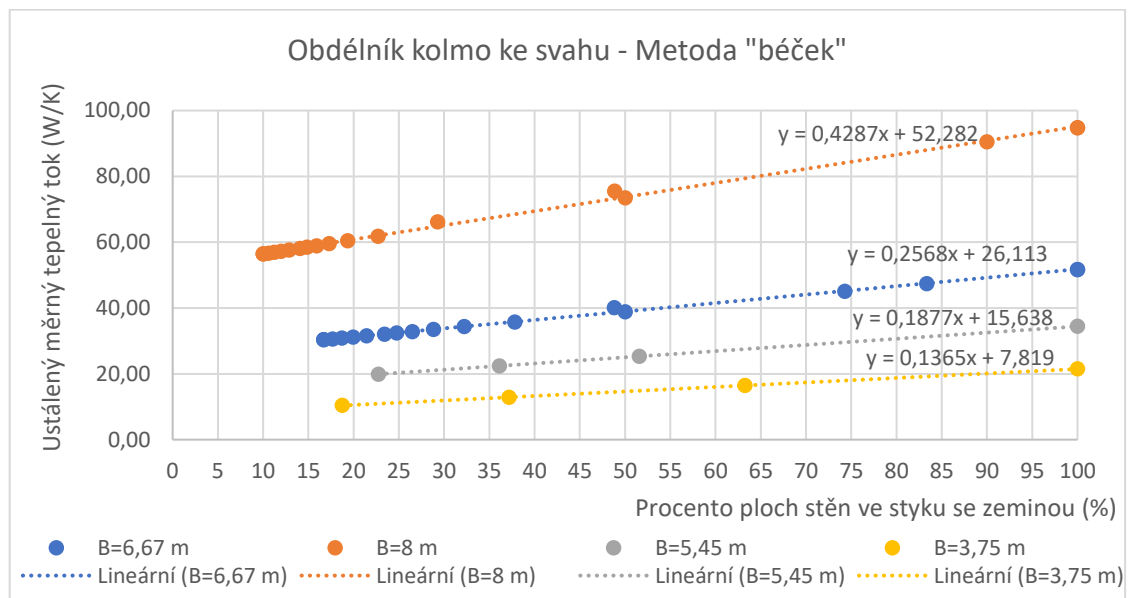
x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví ze vztahu

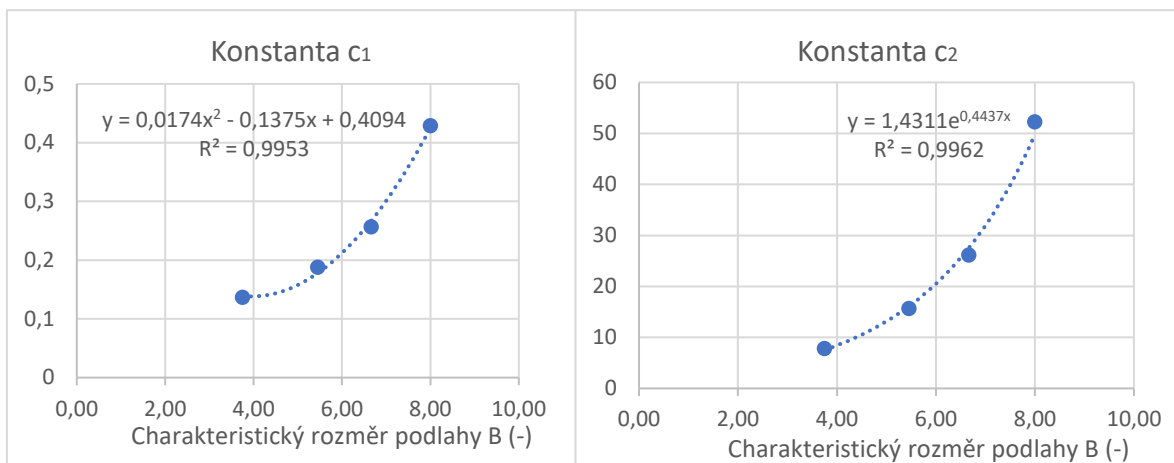
$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (27)$$

kde A je plocha podlahy v m^2 a P je exponovaný obvod podlahy v m.

5.2.2 Dílčí vztah pro přibližný výpočet měrného toku zjednodušenými metodami



Obr. 93: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „béček“ pro různě velký a různě zasypaný suterén kolmo ke svahu



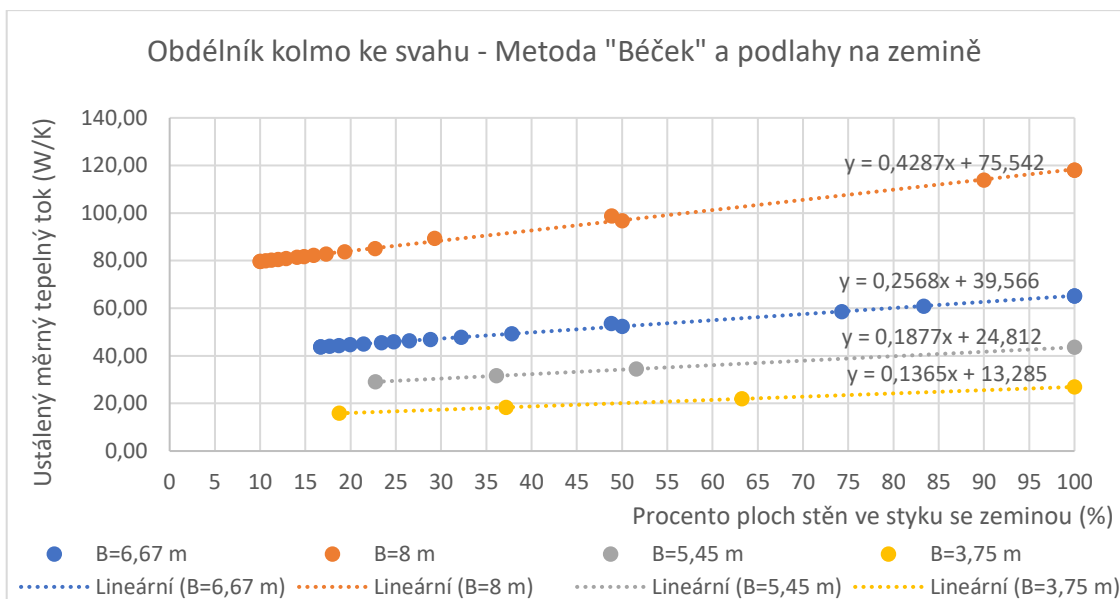
Obr. 94: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „běček“ ve tvaru:

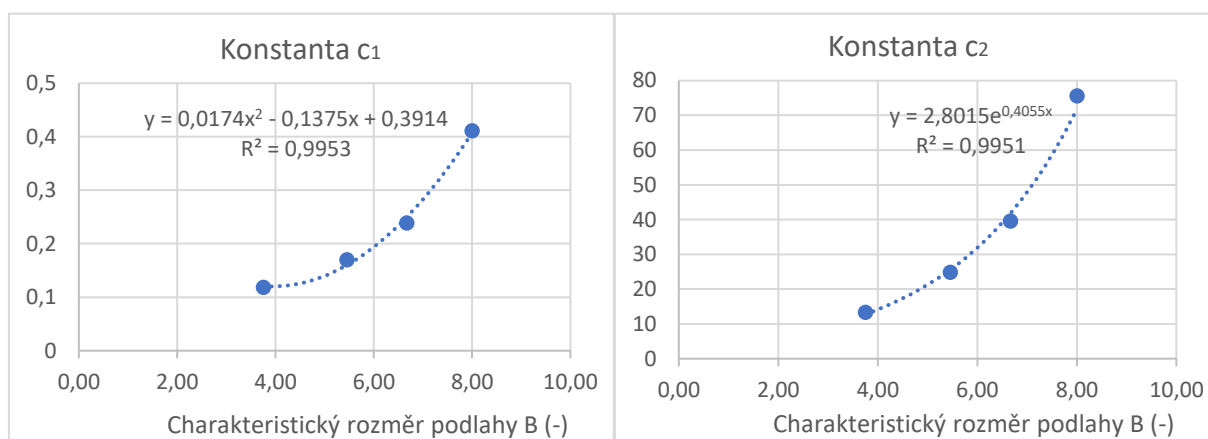
$$H_T = (0,0174 \cdot B^2 - 0,1375 \cdot B + 0,4094) \cdot x + 1,4311 \cdot e^{0,4437 \cdot B} \quad (28)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (27)



Obr. 95: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „běček“ a podlahy na zemině pro různé veliký a různě zasypány suterén kolmo ke svahu



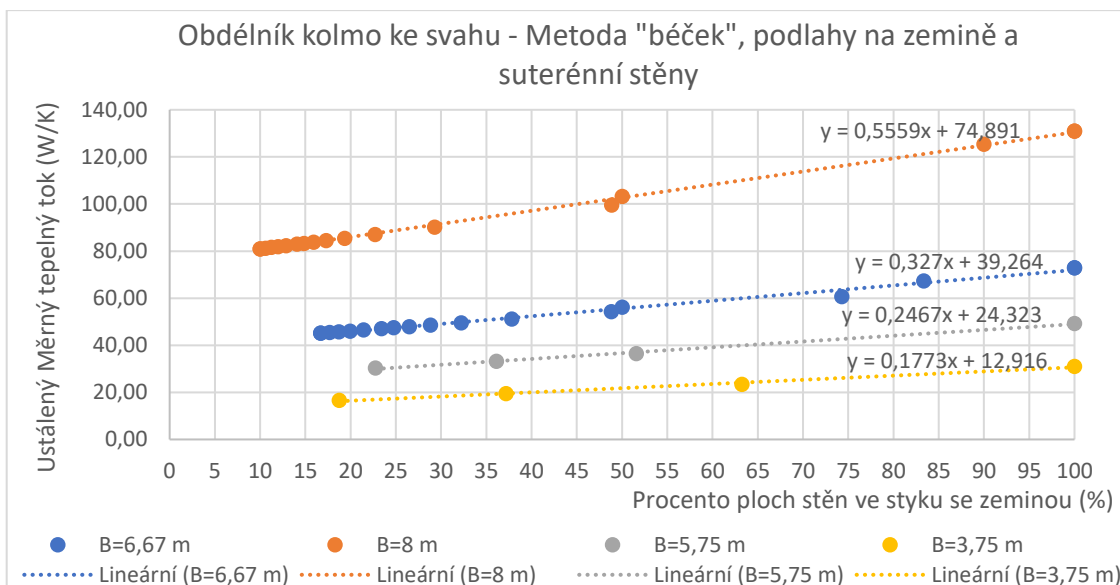
Obr. 96: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „běček“, podlahy na zemině ve tvaru:

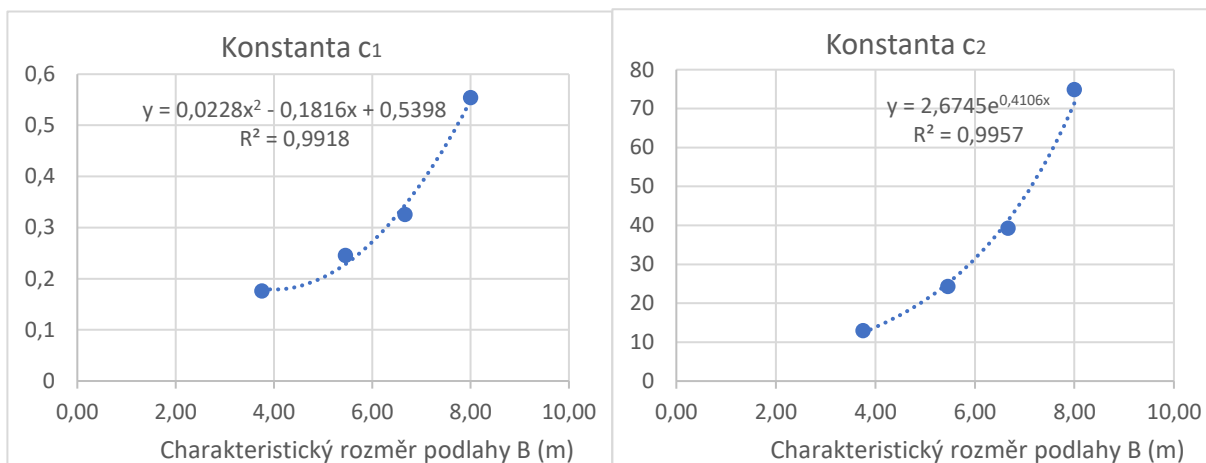
$$H_T = (0,0174 \cdot B^2 - 0,1375 \cdot B + 0,3914) \cdot x + 2,8015 \cdot e^{0,4055 \cdot B} \quad (29)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (27)



Obr. 97: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „béček“ a podlahy na zemině a suterénní stěny pro různě velký a různě zasypány suterén kolmo ke svahu



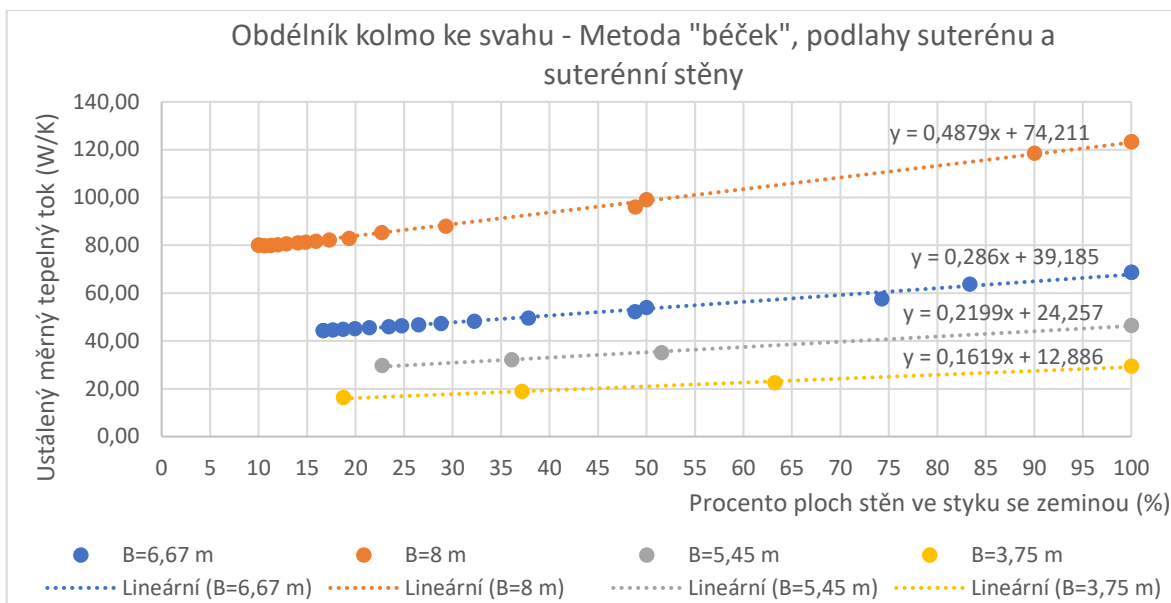
Obr. 98: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „béček“, podlahy na zemině a suterénní stěny ve tvaru:

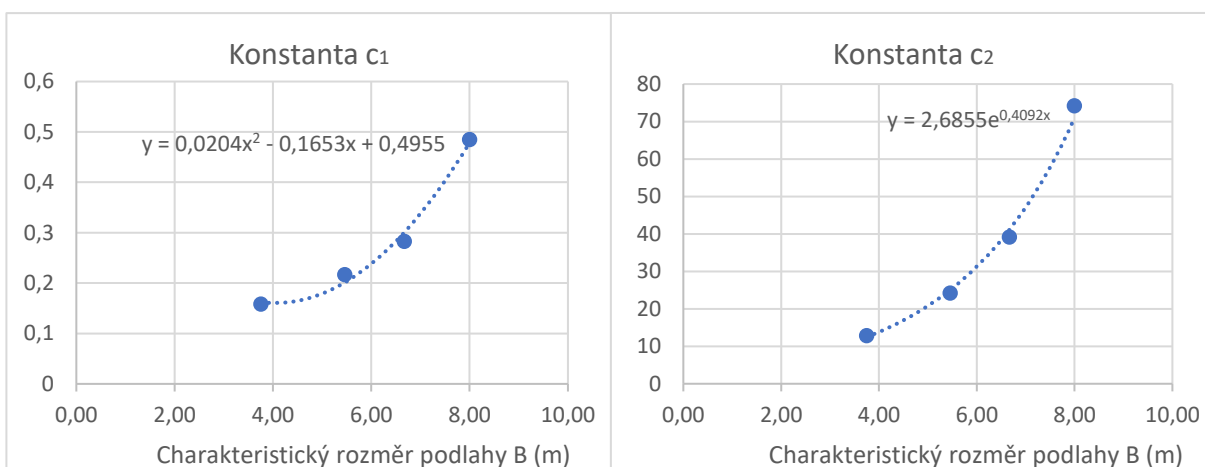
$$H_T = (0,0228 \cdot B^2 - 0,1816 \cdot B + 0,5398) \cdot x + 2,6745 \cdot e^{0,4106 \cdot B} \quad (30)$$

x procento ploch stěn ve styku se zeminou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (27)



Obr. 99: Ustálený tepelný tok stanovený zjednodušeným výpočtem pomocí metody „béček“ a podlahy suterénu a suterénní stěny pro různě velký a různě zasypaný suterén kolmo ke svahu



Obr. 100: Odvození rovnic pro konstanty c_1 a c_2

Dosazením rovnic odvozených pro konstanty c_1 a c_2 do vztahu (17) lze získat přibližný vztah pro výpočet ustáleného měrného tepelného toku zjednodušeným výpočtem pro metodu „béček“, podlahy na zemině a suterénní stěny ve tvaru:

$$H_T = (0,0204 \cdot B^2 - 0,1653 \cdot B + 0,4955) \cdot x + 2,6855 \cdot e^{0,4092 \cdot B} \quad (31)$$

x procento ploch stěn ve styku se zemínou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví dle vztahu (27)

5.2.3 Výsledný vztah pro odhad chyby zjednodušených metod

Tento vztah je určen pro vytápěné suterény obdélníkového tvaru, které jsou kolmo ke svahu a suterénní konstrukce jsou navrženy na doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle [3].

Na základě výše definovaných přibližných vztahů pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku 3D výpočtem i zjednodušenými metodami je odvozen finální vztah pro odhad chyby:

$$i = \left(100 \cdot \frac{(\alpha \cdot B^2 - \beta \cdot B + \gamma) \cdot x + \delta \cdot e^{\eta \cdot B}}{(0,018 \cdot B^2 - 0,1404 \cdot B + 0,4347) \cdot x + 2,1338 \cdot e^{0,4212 \cdot B}} \right) - 100 \quad (32)$$

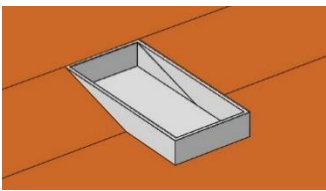
x procento ploch stěn ve styku se zemínou, v %

B charakteristický rozměr podlahy, v m, který se stanoví ze vztahu

$$B = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (33)$$

kde A je plocha podlahy v m² a P je exponovaný obvod podlahy v m.

Tab. 24: Hodnoty určené pro dosazení do výpočetního vztahu (32)

Typ obdélníku	Metoda výpočtu	α	β	γ	δ	η
	Metoda „bčček“	0,0174	0,1375	0,4094	1,4311	0,4437
	Metoda „bčček“ a podlahy na zemině	0,0174	0,1375	0,3914	2,8015	0,4055
	Metoda „bčček“, podlahy na zemině a suterénní stěny	0,0228	0,1816	0,5398	2,6745	0,4106
	Metoda „bčček“, podlahy suterénu a suterénní stěny	0,0204	0,1653	0,4955	2,6855	0,4092

Pokud přibližný vztah pro vyjádření chyby nabývá hodnot kladných, jde o odchylku na straně bezpečnosti (tj. zjednodušenou metodou se stanoví vyšší tepelný tok než 3D výpočtem). V opačném případě vede použití zjednodušené metody k podcenění měrných tepelných toků (vycházejí nižší než z 3D modelu).

6 Ověření přibližného vztahu

Ověření obou vztahů (24) a (32) je provedeno pro další varianty suterénů. Uvažovány jsou jiné charakteristické rozměry podlahy a odlišné plochy stěn ve styku se zeminou oproti modelům, které jsou použity při odvození těchto vztahů. Odchylka stanovená přibližným vztahem je následně porovnávána se skutečnou odchylkou.

Pro kontrolu vzorce jsou vytvořeny další tři odlišné modely obdélníkového tvaru rovnoběžně se svahem. První suterén o rozměrech 15 x 10 m s charakteristickým rozměrem podlahy 6 m má kompletně zasypán tři stěny. Druhý obdélníkový suterén mající rozměry 10 x 8 m má tentokrát kompletně zasypán pouze dvě stěny a poslední suterén s rozměry 18 x 12 m je uvažován ve svahu se sklonem 30°.

V Tab. 25 jsou zaznamenány všechny zjištěné hodnoty pro výše uvedené suterény.

Tab. 25: Tabulka hodnot pro ověření funkčnosti vzorce pro obdélník rovnoběžně se svahem

Ověření funkčnosti vzorce pro obdélník rovnoběžně se svahem						
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza	Výpočet dle zjednodušených postupů			
Charakteristický rozměr podlahy (m)	Procento ploch stěn ve styku se zeminou (%)	Comsol - Tepelný tok zeminou (W/K)	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob
			Ustálený měrný tepelný tok (W/K)			
6	70,00	43,03	34,48	45,31	49,80	47,41
			Skutečná odchylka (%)			
			-19,9	5,3	15,7	10,2
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)			
			-18,5	4,7	14,2	9,1
4,44	50,00	23,44	Ustálený měrný tepelný tok (W/K)			
			18,1	24,9	27,2	26,1
			Skutečná odchylka (%)			
			-22,76	6,2	16,1	11,5
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)			
			-21,03	4,9	14,2	10,4
7,20	39,81	46,92	Ustálený měrný tepelný tok (W/K)			
			38,3	52,1	54,7	52,9
			Skutečná odchylka (%)			
			-18,4	11,0	16,6	12,7
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)			
			-17,8	10,2	16,3	12,4

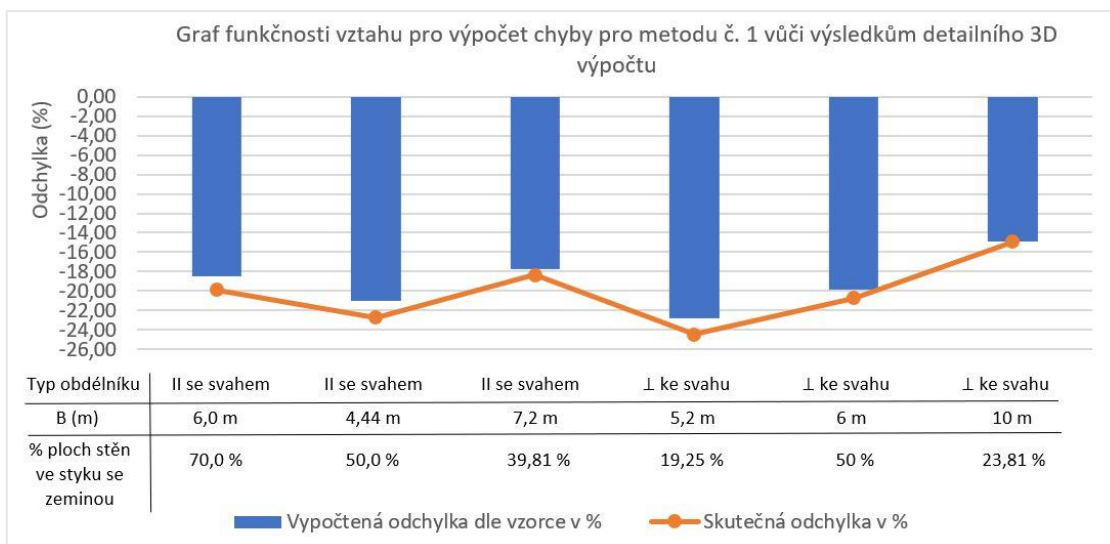
Pro kontrolu vzorce pro obdélník kolmo ke svahu jsou vytvořeny také tři odlišné modely. První obdélníkový suterén má rozměry 6 x 17 m a je uvažován ve svahu se sklonem 50°. Druhý suterén o rozměrech 8 x 10 m má kompletně zasypané dvě stěny a poslední suterén s rozměry 14 x 35 m je uvažován ve svahu se sklonem 20°.

Stejně jako pro předchozí případ jsou v Tab. 26 zaznamenány všechny zjištěné hodnoty.

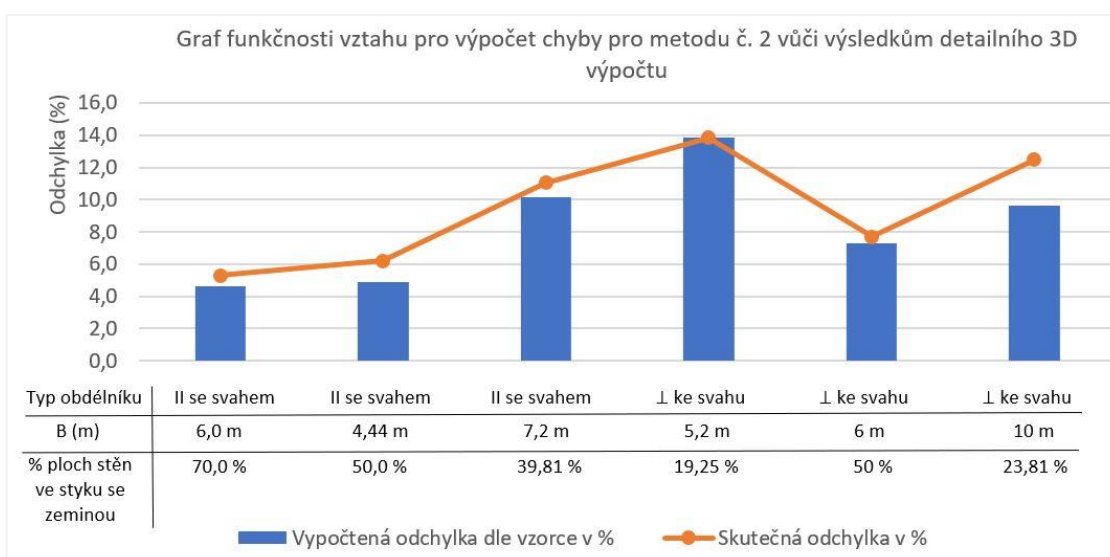
Tab. 26: Tabulka hodnot pro ověření funkčnosti vzorce pro obdélník kolmo ke svahu

Ověření funkčnosti vzorce pro obdélník kolmo ke svahu							
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza	Výpočet dle zjednodušených postupů				
Charakteristický rozměr podlahy (m)	Procento ploch stěn ve styku se zeminou (%)	Comsol - Tepelný tok zeminou (W/K)	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	
			Ustálený měrný tepelný tok (W/K)				17,07
5,2	19,25	22,61	Skutečná odchylka (%)				
			-24,5	13,8	18,3	15,9	
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)				
			-22,8	13,8	17,3	15,0	
Ustálený měrný tepelný tok (W/K)				30,21	41,04	44,25	42,50
6	50,00	38,11	Skutečná odchylka (%)				
			-20,7	7,7	16,1	11,5	
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)				
			-19,8	7,3	16,1	11,5	
Ustálený měrný tepelný tok (W/K)				73,81	97,59	99,87	97,63
10,0	23,81	86,78	Skutečná odchylka (%)				
			-14,9	12,5	15,1	12,5	
			Výpočet odchylky dle vzorce (%)				
			-14,9	9,7	13,7	10,9	

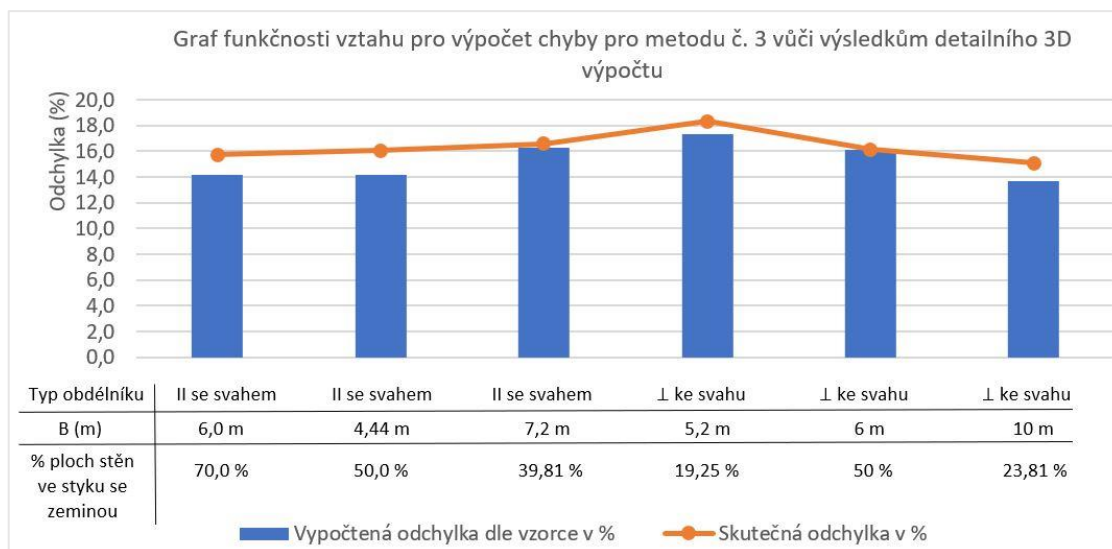
V následujících grafech (Obr. 101, 102, 103 a 104) jsou znázorněny skutečné a vypočítané odchylky výsledků výpočtu měrného tepelného toku jednotlivými zjednodušenými metodami vůči výsledkům detailního 3D výpočtu.



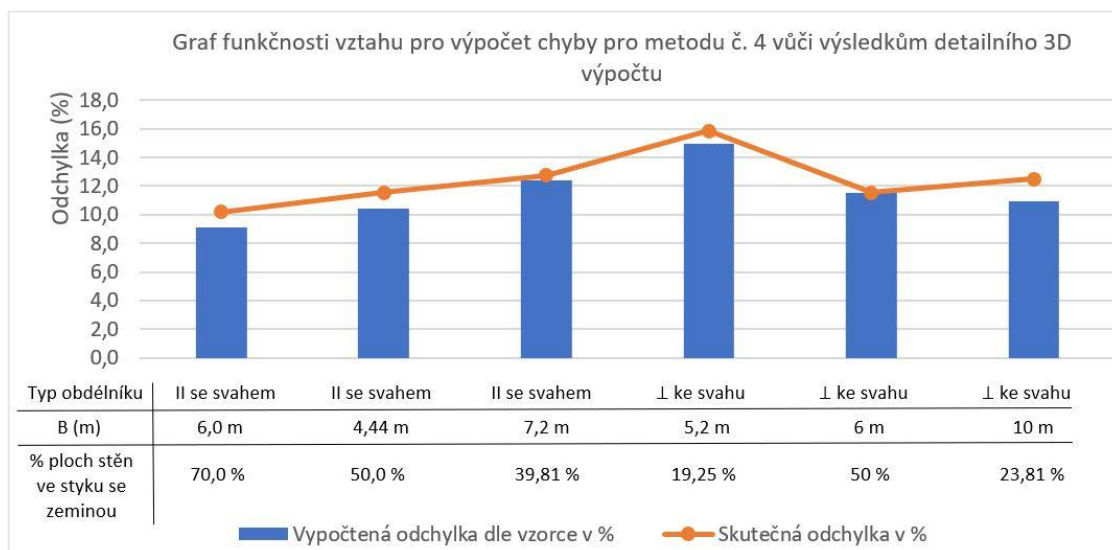
Obr. 101: Skutečné a odhadnuté odchylky výsledků výpočtu měrného toku zjednodušenou metodou č. 1 vůči výsledkům detailního 3D výpočtu



Obr. 102: Skutečné a odhadnuté odchylky výsledků výpočtu měrného toku zjednodušenou metodou č. 2 vůči výsledkům detailního 3D výpočtu



Obr. 103: Skutečné a odhadnuté odchylky výsledků výpočtu měrného toku zjednodušenou metodou č. 3 vůči výsledkům detailního 3D výpočtu



Obr. 104: Skutečné a odhadnuté odchylky výsledků výpočtu měrného toku zjednodušenou metodou č. 4 vůči výsledkům detailního 3D výpočtu

Z grafů je patrné, že odhadnuté odchylky podle vztahů (24) a (32) vycházejí nižší než skutečné odchylky pro případy, kdy jsou kladné (tj. zjednodušenou metodou se stanoví vyšší tepelný tok než 3D výpočtem). A v případě záporných odchylek (tj. zjednodušenou metodou vychází tepelný tok nižší než z 3D modelu) jsou skutečné odchylky nižší než odhadnuté odchylky.

Provedená porovnání dokládají, že odhad odchylky zjednodušené metody vůči detailnímu 3D výpočtu s použitím vztahů (24) a (32) by měl být spolehlivě na straně bezpečnosti.

7 Chování suterénu ve svahu s různými vlastnostmi konstrukcí

Tato samostatná kapitola poukazuje na problematiku, která není nijak detailně zpracována v této diplomové práci a je zde uvedena jen pro doplnění. Protože se v běžné praxi nesetkáváme pouze s novostavbami, kde stěny a podlaha splňují normové hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2 [3], stojí za zmínku, jakým způsobem se budou chovat suterény ve svahu u stávajících budov, které jsou minimálně tepelně technicky izolované, případně suterény, které prošly rekonstrukcí.

Pro vytápěný suterén ve svahu se sklonem 20° od vodorovné roviny, který má půdorys ve tvaru čtverce, jsou zkoumány 4 typy suterénů, které se liší právě tepelně izolačními vlastnostmi podlah a stěn.

7.1 Vlastnosti konstrukcí pro stávající objekty

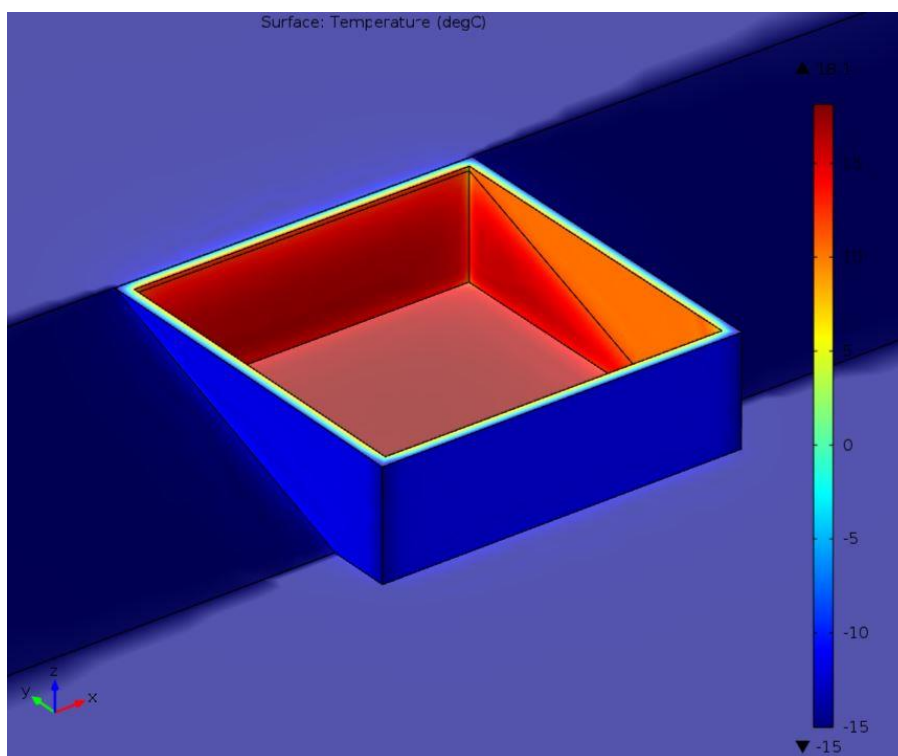
Stávající staré objekty mající vytápěný suterén jsou minimálně tepelně technicky řešené. S těmito konstrukcemi se stále setkáváme a je otázka, jakým způsobem se zjednodušené výpočetní postupy liší od detailní 3D analýzy.

Uvažovaný suterén má celkový tepelný odpor podlahy $0,24 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ a celkovou tloušťku 300 mm. Celková tloušťka stěny suterénu je 320 mm a má celkový tepelný odpor $0,29 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. Pro nadefinování materiálových vlastností pro řešený model v programu Comsol Multiphysics jsou použity hodnoty z Tab. 27.

Tab. 27: Definované hodnoty pro vytvoření materiálu v programu Comsol Multiphysics

	Tepelná vodivost $\lambda \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$	Objemová hmotnost $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Měrná tepelná kapacita $c \text{ (J/(kg}\cdot\text{K))}$
Zemina	2	2000	920
Stěny	1,111	2051	1025
Podlaha	1,256	2217	1020

Výsledné teplotní pole pro uvažovaný stávající suterén, který není nijak tepelně technicky řešen, je znázorněno na Obr. 105.



Obr. 105: 3D teplotní pole vytápěného suterénu stávajícího objektu

7.2 Vlastnosti konstrukcí pro rekonstruované objekty

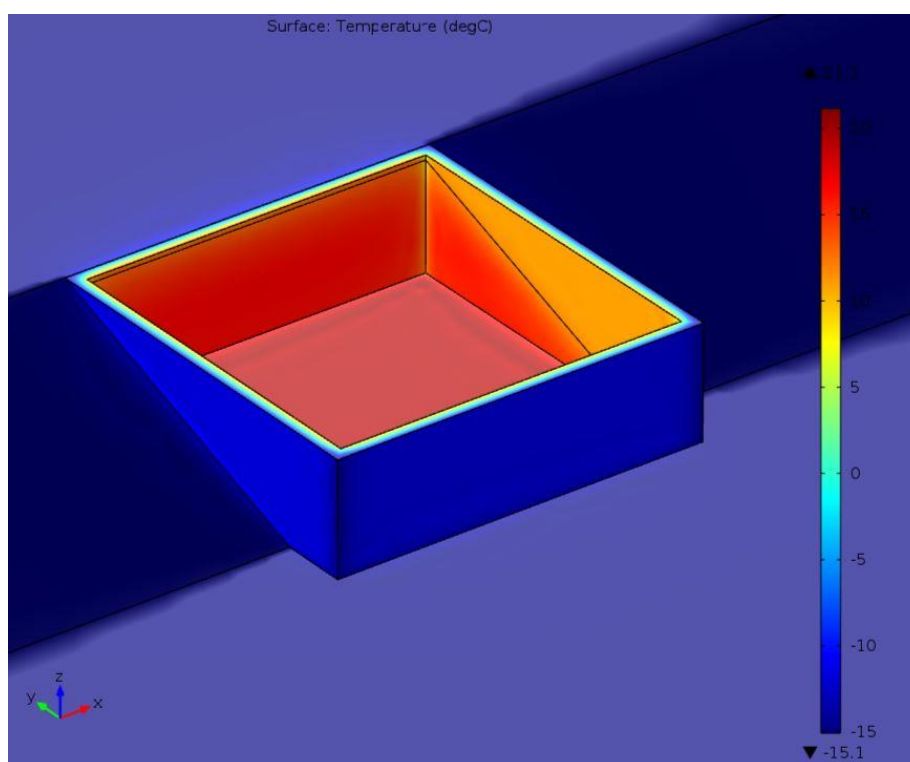
Po rekonstrukci objektu se můžeme setkat se situací, kdy jsou zatepleny pouze stěny, nebo podlaha.

Řešený suterén, který prošel rekonstrukcí podlah, má celkový tepelný odpor podlahy $3,73 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ a celkovou tloušťku 400 mm. Celková tloušťka stěny suterénu je 320 mm a má celkový tepelný odpor $0,29 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$. Pro nadefinování materiálových vlastností pro řešený model v programu Comsol Multiphysics jsou použity hodnoty z Tab. 28.

Tab. 28: Definované hodnoty pro vytvoření materiálu v programu Comsol Multiphysics

	Tepelná vodivost λ (W/(m·K))	Objemová hmotnost ρ (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita c (J/(kg·K))
Zemina	2	2000	920
Stěny	1,111	2051	1025
Podlaha	0,107	1513	1101

Na Obr. 106, kde je znázorněno 3D teplotní pole modelu suterénu po rekonstrukci podlahy, můžeme sledovat rozdíly teplot na povrchu stěn, kde působí zemina a kde naopak venkovní prostředí. Zemina má v daném případě vyšší teplotu než exteriér.



Obr. 106: 3D teplotní pole vytápěného suterénu po rekonstrukci podlahy

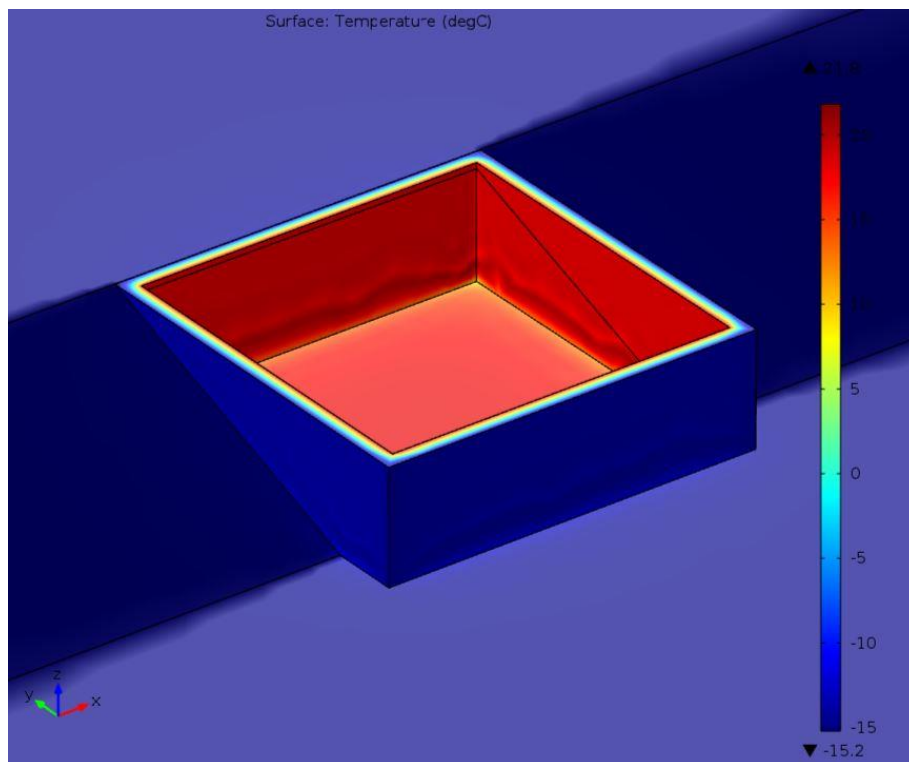
V opačném případě, kdy jsou zatepleny stěny a podlaha zůstává nezateplená je pro tento případ řešen suterén, který má celkový tepelný odpor podlahy 0,24 m²·K/W a celkovou tloušťku 300 mm. Celková tloušťka stěny suterénu je 420 mm a má celkový

tepelný odpor $4,52 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Pro nadefinování materiálových vlastností pro řešený model v programu Comsol Multiphysics jsou použity hodnoty z Tab. 29.

Tab. 29: Definované hodnoty pro vytvoření materiálu v programu Comsol Multiphysics

	Tepelná vodivost $\lambda \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$	Objemová hmotnost $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Měrná tepelná kapacita $c \text{ (J/(kg}\cdot\text{K))}$
Zemina	2	2000	920
Stěny	0,093	1431	1111
Podlaha	1,256	2217	1020

Na Obr. 107 je znázorněno výsledné 3D teplotní pole modelu suterénu po rekonstrukci stěn.



Obr. 107: 3D teplotní pole vytápěného suterénu po rekonstrukci stěn

7.3 Výsledky pro suterény s různými vlastnostmi konstrukcí

Pro všechny výše zmíněné případy jsou vytvořeny detailní 3D modely pro stanovení ustáleného měrného tepelného toku konstrukcemi ve styku se zemínou a zároveň jsou tepelné toky stanoveny pomocí čtyř zjednodušených výpočtů.

V rámci numerického výpočtu je připočtena přírážka na vliv tepelných vazeb dle ČSN 73 0540-4 [5], která je přenásobena plochou ve styku se zemínou. Pro všechny dobře tepelně technicky řešené konstrukce (tj. rekonstruované) je stanovena hodnota vlivu tepelných vazeb $0,02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a pro stávající konstrukce je uvažována hodnota $0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Výsledné hodnoty ustálených měrných tepelných toků jsou uvedeny v Tab. 30. Pro porovnání jsou zde uvedeny i hodnoty pro model představující novostavbu, který je řešen v rámci celé diplomové práce.

Tab. 30: Tabulka výsledků pro suterén s rozdílnými vlastnostmi konstrukcí

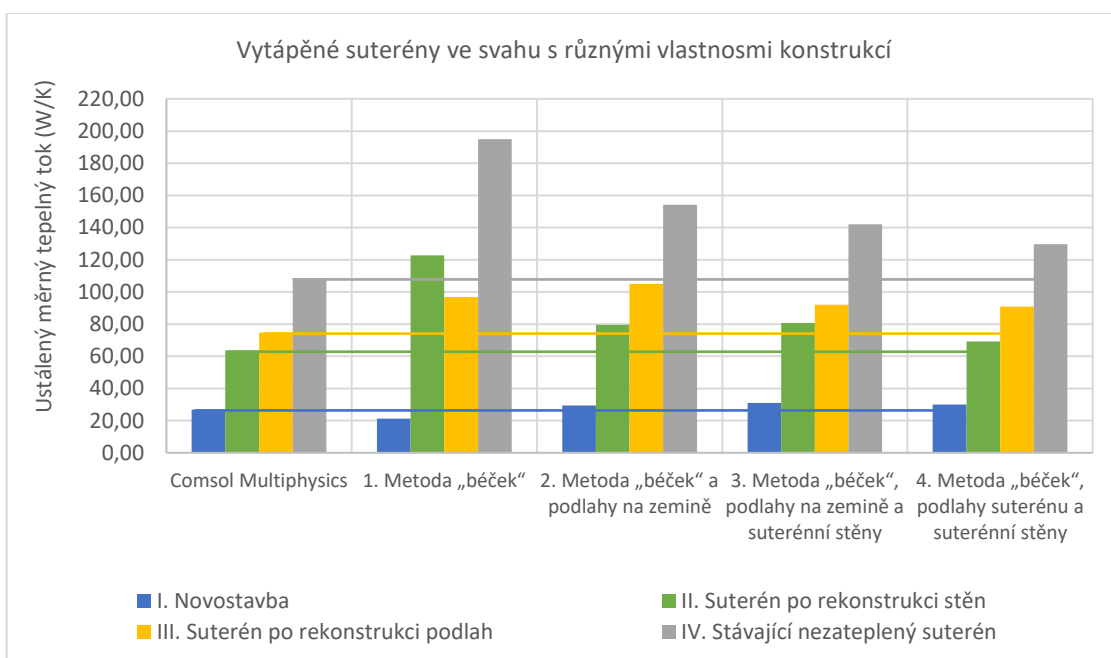
Výsledky – Ustálený měrný tepelný tok (W/K)								
Tvar půdorysu		Detailní 3D analýza v programu Comsol		Výpočet dle zjednodušených postupů				
Čtverec se sklonem 20°		Comsol - tepelný tok vnitřními konstrukcemi	Comsol - tepelný tok zemínou	1. způsob	2. způsob	3. způsob	4. způsob	Přirážka na lineární vazby
I. $U_s=0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_p=0,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	Podlaha	16,20	26,77	11,03	19,05	19,05	17,88	3,32
	Stěny	10,47		6,93	6,93	8,70	8,70	
	Celkem	26,67		17,97	25,98	27,74	26,58	
II. $U_s=0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_p=2,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	Podlaha	50,80	63,58	104,79	61,72	61,72	50,26	11,26
	Stěny	12,55		6,64	6,64	7,69	7,69	
	Celkem	63,35		111,42	68,36	69,41	57,95	
III. $U_s=2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_p=0,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	Podlaha	17,85	74,70	11,03	19,23	19,23	18,04	8,58
	Stěny	58,46		77,23	77,23	64,17	64,17	
	Celkem	76,31		88,27	96,47	83,40	82,21	
IV. $U_s=2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $U_p=2,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	Podlaha	50,83	108,31	104,79	63,97	63,97	51,65	16,29
	Stěny	59,15		73,90	73,90	61,70	61,70	
	Celkem	109,98		178,69	137,87	125,66	113,35	

V Tab. 31 jsou spočteny odchylky, které udávají, jak se liší zjednodušený výpočet jednotlivých metod oproti detailní 3D analýze, která je provedena v softwaru Comsol Multiphysics.

Tab. 31: Stanovení odchylek zjednodušených výpočtů vůči detailní 3D výpočtu pro suterény s různými vlastnostmi konstrukcí

	$U_{stěna}$ (W/m ² ·K)	$U_{podlaha}$ (W/m ² ·K)	Comsol Multiphysics (W/K)	1. Metoda „běček“ (W/K)	Odchylka (%)	2. Metoda „běček“ a podlahy na zemině (W/K)	Odchylka (%)	3. Metoda „běček“, podlahy na zemině a suterénní stěny (W/K)	Odchylka (%)	4. Metoda „běček“, podlahy suterénu a suterénní stěny (W/K)	Odchylka (%)
I.	0,22	0,26	26,77	21,28	-26	29,30	9	31,06	14	29,89	10
II.	0,22	2,70	63,58	122,68	48	79,62	20	80,67	21	69,21	8
III.	2,40	0,26	74,70	96,84	23	105,04	29	91,97	19	90,79	18
IV.	2,40	2,70	108,31	194,98	44	154,16	30	141,96	24	129,64	16

Celkové tepelné toky skrz konstrukce ve styku se zeminou zjištěné 3D analýzou a zjednodušenými numerickými výpočty jsou znázorněny v grafu (Obr. 108).



Obr. 108: Graf ustálených měrných tepelných toků suterénů s různými vlastnostmi konstrukcí pro jednotlivé metody

V Tab. 31 si lze povšimnout z vypočtených odchylek, které vyjadřují, jak se liší příslušný zjednodušený výpočet vůči detailní 3D analýze v softwaru Comsol Multiphysics, že se model suterénu představující novostavbu liší od ostatních modelů, které mají odlišné tepelně-izolační vlastnosti konstrukcí.

Pro výše zkoumané případy vycházejí měrné tepelné toky stanovené pomocí zjednodušených metod vždy na straně bezpečnosti oproti detailnímu 3D výpočtu (tj. odchylka dosahuje kladných hodnot) s výjimkou suterénu představující model pro novostavbu. Pro model stávajícího neizolovaného suterénu a pro případ, kdy jsou izolovány pouze stěny, vycházejí nejvyšší odchylky pro nejjednodušší metodu zjednodušeného výpočtu (tj. výpočet pomocí činitele teplotní redukce). V opačném případě pro všechny suterény, opět s výjimkou suterénu představující model pro novostavbu, vycházejí nejnižší odchylky pro poslední metodu zjednodušeného výpočtu, kdy jsou stěny, které jsou ve svahu počítány pomocí činitele teplotní redukce, a podlaha a stěny kompletně zasypané jsou počítány dle ČSN EN ISO13370.

Nicméně tyto poznatky by bylo vhodné ověřit dalšími modely. Bohužel z časového hlediska je v této diplomové práci podrobněji řešen pouze vytápěný suterén, který odpovídá požadavkům dnešních novostaveb. Bylo by určitě zajímavé se této problematice dále detailněji věnovat a navázat na tuto práci.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou přesnosti zjednodušených výpočtů měrných tepelných toků u rozdílně zasypaných suterénních konstrukcí budov ve svahu. Technická norma ČSN EN ISO 13370 definující výpočty měrných tepelných toků zeminou nezahrnuje tento specifický případ a běžný uživatel (energetický specialista) je nucen použít kombinaci zjednodušených výpočtů měrného toku s pomocí činitele teplotní redukce a přesnějších výpočtů podle ČSN EN ISO 13370.

Cílem diplomové práce je vyhodnotit, zda jsou běžně používané zjednodušené způsoby výpočtu na straně bezpečnosti a to, o kolik se liší vůči detailní 3D analýze, kterou si obvykle energetický specialista z časových důvodů nemůže dovolit.

Pro dosažení tohoto cíle jsem zpracovala celkem 123 modelů vytápěných suterénů, které se odlišují svým tvarem, charakteristickým rozměrem podlahy a různým zasypaním suterénních stěn. Ustálené měrné tepelné toky jsou zjištěny pomocí softwaru Comsol Multiphysics a zároveň jsou spočteny pomocí čtyř zjednodušených metod, které se v běžné praxi používají.

Domnívám se, že stanovený cíl se mi podařilo splnit. Pro případy, kdy jsou suterénní konstrukce navrženy na požadované a lepší hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-2, vycházejí měrné tepelné toky stanovené uvažovanými zjednodušenými postupy - s jedinou výjimkou - vždy na straně bezpečnosti ve srovnání s detailním 3D výpočtem. Zmíněnou výjimkou je nejjednodušší zjednodušená metoda, která používá pro výpočet měrných toků přes podlahu a stěny činitele teplotní redukce. Ze zjednodušených výpočtů, které jsou na straně bezpečnosti, lze jako nejpřesnější považovat druhou metodu, kdy počítáme pouze stěny pomocí činitele teplotní redukce a podlahu jako na zemině dle EN ISO, protože se v drtivé většině nejvíce přibližuje detailnímu 3D výpočtu.

Pro obdélníkové suterény jsou navíc odvozené výpočetní vztahy pro odhad přesnosti zjednodušeného výpočtu, které je možné použít pro vytápěné suterény orientované kolmo či rovnoběžně se svahem a s obalovými konstrukcemi navrženými na požadované a lepší hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-2.

V rámci této diplomové práce jsem zpracovala pod vedením pana doc. Dr. Ing. Zbyňka Svobody článek, který by měl vyjít na portálu TZB-info. Příspěvek pojednává o stanovení odhadu chyby zjednodušeného výpočtu prostupu tepla podlahou

a stěnami vytápěných suterénů obdélníkového tvaru ve svahu. Po vydání tohoto článku budou tyto závěry dostupné široké veřejnosti. Uživatelé věnující se výpočtu prostupu tepla zeminou si díky definovaným vztahům pro odhad chyby zjednodušených výpočtů, budou moci ověřit, která z metod je na straně bezpečnosti, a která se nejvíce přibližuje detailnímu 3D výpočtu. Vztah je koncipován tak, aby ho bylo možné použít co nejsnadněji - bez detailních výpočtů, při dosazení charakteristického rozměru podlahy a procenta suterénních stěn v kontaktu se zeminou.

V samotném konci diplomové práce je pak kapitola věnující se vytápěným suterénům s různými vlastnostmi konstrukcí. V této práci bohužel nebyl prostor detailněji ověřovat chování těchto suterénů. Bylo by zajímavé, kdyby vznikla obdobná práce, která by navázala na doposud získané poznatky o vytápěných suterénech, které mají různé vlastnosti konstrukcí.

9 Zdroje

- [1] ČSN EN ISO 13370 Tepelné chování budov – Přenos tepla zeminou – Výpočtové metody. Praha: ÚNMZ, září 2019.
- [2] ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: ÚNMZ, listopad 2005.
- [3] ČSN 73 0540-2: Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: ÚNMZ, Září 2011. Zohledněna změna Z1 z r. 2012.
- [4] Varga, Martin. *Činitelé teplotní redukce*. [prezentace]. Semináře DEKSOFT 2016. [cit. 19. 10. 2020] Dostupné z: <http://www.stavebni-fyzika.cz/>.
- [5] ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody. Praha: ÚNMZ, červen 2005.
- [6] COMSOL Inc., *Comsol Multiphysics 4.4[software]*. 16. dubna 2014 [cit. 8. 10. 2020] Dostupné z: <https://www.comsol.com/product-download/4.4/windows>. Požadavky na systém: Windows 7, Windows 8, Windows 10; velikost 4,7 GB.
- [7] *COMSOL Multiphysics*[®] [online]. © HUMUSOFT 1991 – 2020. [cit. 26. 10. 2020] Dostupné z: <https://www.humusoft.com/comsol/details/>.
- [8] Svoboda, Zbyněk. *Manuál k programu Comsol*. Praha: ČVUT, březen 2019.
- [9] Mácha, Václav. *Počítačové modelování v programu COMSOL Multiphysics*. České Budějovice, 2012. Diplomová práce. JU. Pedagogická fakulta. Vedoucí práce Petr BARTOŠ.

- [10] Google Inc., *SketchUp 19.3.253[software]*. 16. října 2019 [cit. 18. 10. 2020]
Dostupné z: <https://www.slunecnice.cz/sw/sketchup/>. Požadavky na systém:
Windows 7, Windows 8, Windows 10; velikost 182,94 MB.

Seznam příloh

Příloha A – Protokol výpočtu čtvercového modelu vytápěného suterénu ve svahu se sklonem 60° v softwaru Comsol Multiphysics

Příloha B – Stanovení měrných tepelných toků pro jednotlivé zjednodušené metody pro vytápěný suterén ve svahu se sklonem 60°