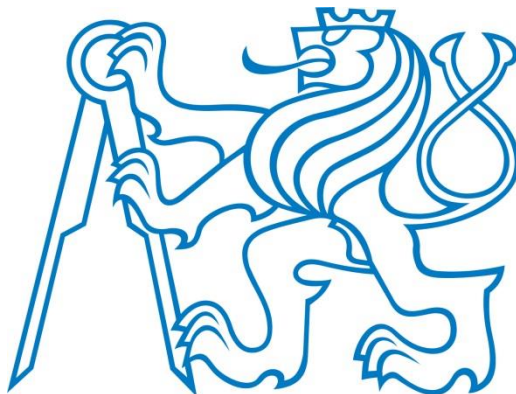


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



# **Dimenzování silových kabelů z hlediska tepelného namáhání**

Bakalářská práce

Bachelor's thesis

Jan Vočko

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2014

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za jeho ochotu a odborné rady při vytváření této bakalářské práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady a výpočetní prostředky, které jsou uvedeny v kapitole 8. Zdroje. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla podle § 60 zákona č. 121/Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je modelování tepelného zatížení kabelů 110 kV z hlediska tepelného namáhání při různých provozních stavech. Vybral jsem běžná uložení kabelů v zemi, v chráničkách a v kolektorech. Dále byly zkoumány geometrie pro uložení kabelů v rovině vedle sebe, v rovině vedle sebe s mezerou mezi každou fází a v trojúhelníku. Všechny simulace byly uskutečněny pro hliníkové a měděné jádro. Výsledkem této práce jsou závěry, ve kterých jsem se pokusil shrnout kritická místa a uložení, resp. prostředí ve kterých jsou kabely uloženy z hlediska tepelného namáhání. Tyto teplotní simulace byly provedeny v programech Agros 2D a Wolfram Mathematica.

The aim of this bachelor thesis is to make a model of a thermal strain of 110 kV power cable in various working situations. The placements of cables were selected for soils, protecting tubes and collectors. The study was conducted for different geometries of cables-flat formation, trefoil formation and flat formation with a space between each conductor. All simulations were made for aluminium conductors and copper conductors. In conclusion, the results of this work are to find critical locations and placements of the cables in diverse ambients with respect to thermal effects. The models and calculations were created in computers programs: Wolfram Mathematica and Agros 2D.

## **Klíčová slova:**

110 kV kabel, tepelná vodivost, teplota, zkrat, zatěžování

## **Key words:**

110 kV cable, thermal conductivity, temperature, short-circuit, strain

## Obsah:

1.	Úvod.....	10-11
2.	Silové kabely.....	12-14
	2.1 Účel.....	12
	2.2 Struktura 110 kV kabelu.....	12-13
	2.3 Materiály 110 kV kabelů.....	14
3.	Dimenzování silových kabelů.....	14-22
	3.1 Bezpečnost.....	15
	3.2 Selektivita.....	15
	3.3 Úbytky napětí.....	15-16
	3.4 Mechanické namáhání.....	16
	3.5 Odolnost vůči zkratovým proudům.....	16-19
	3.6 Dovolené oteplení.....	19-22
4.	Optické kabely.....	23-36
	4.1 Funkce a využití.....	23
	4.2 Konstrukce optického kabelu.....	23-24
	4.3 Princip šíření paprsku ve vlákně.....	24-34
	4.4 Měření teploty pomocí optických kabelů.....	34-36
5.	Přenos tepla.....	37-46
	5.1 Úvod.....	37
	5.2 Přenos tepla vedením.....	37-38
	5.3 Přenos tepla sáláním.....	38-39
	5.4 Přenos tepla konvekcí.....	39-40
	5.5 Geologicko-tepelné vlastnosti zeminy.....	40-41
	5.6 Přenos tepla v zemi.....	41-43
	5.7 Přenos tepla v chráničkách.....	43-45
	5.8 Přenos tepla v kolektorech.....	46
6.	Praktická část.....	47-81
	6.1 Uložení v zemi.....	47-67
	6.1.1 Simulace teploty kabelu při změně zatížení.....	47-58
	6.1.2 Simulace teploty kabelu při zkratu a ustálených stavech.....	59-67
	6.2 Kabely v chráničkách.....	68-75
	6.2.1 Simulace teploty kabelu v chráničce při změně zatížení.....	68-73
	6.2.2 Simulace teploty kabelu při zkratu a ustálených stavech kabelů v chráničkách.....	73-75
	6.3 Kabely v kolektorech.....	76-81
	6.3.1 Simulace teploty kabelu v kolektoru při změně zatížení.....	76-78
	6.3.2 Simulace teploty kabelu při zkratu a ustálených stavech.....	79-81
7.	Celkový závěr.....	82
8.	Zdroje.....	83
9.	Příloha.....	84-93

## Seznam obrázků a tabulek:

### Tabulky:

Tabulka 1: Použité veličiny a konstanty

Tabulka 2: Napěťové hladiny

Tabulka 3: Průřezy 110kV kabelu

Tabulka 4: Napěťové hladiny

Tabulka 5: Koeficienty pro zkraty

Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti zemin č.1

Tabulka 7: Fyzikální vlastnosti zemin č.2

Tabulka 8: Fyzikální vlastnosti zemin č.3

Tabulka 9: Srovnání hliníkových vodičů v zemi

Tabulka 10: Srovnání měděných vodičů v zemi

Tabulka 11: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●●

Tabulka 12: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●● s vlivem teplovodu

Tabulka 13: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ☼

Tabulka 14: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ☼ s teplovodem

Tabulka 15: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●●

Tabulka 16: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●● s vlivem teplovodu

Tabulka 17: Ustálené stavy hliníkových vodičů před zkratem

Tabulka 18: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro, uložení ●●●

Tabulka 19: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro, uložení ●●● s vlivem teplovodu

Tabulka 20: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro, uložení ☼

Tabulka 21: Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro, uložení ●●●

Tabulka 22: Ustálené stavy měděných vodičů před zkratem

Tabulka 23: Porovnání kabelů vedle sebe v chráničkách a v zemi

Tabulka 23: Porovnání kabelů vedle sebe v chráničkách a v zemi

Tabulka 24: Porovnání kabelů v trojúhelníku v chráničkách a v zemi

Tabulka 25: Ustálené stavy kabelů uložených vedle sebe v chráničkách, hliníkový a měděný vodič

Tabulka 26: Ustálené stavy kabelů v chráničkách uložených v trojúhelníku, měděný a hliníkový vodič

### Obrázky:

Obr. 1: Kabely uložené přímo v zemi

Obr. 2: Kabely uložené v chráničkách

Obr. 3: Kabely uložené v kolektorech

Obr. 4: 110 kV kabel

Obr. 5: Optický kabel  
Obr. 6: Optický kabel  
Obr. 7: Rozhraní dvou prostředí  
Obr. 8: Rovina dopadu rozhraní  
Obr. 9:  $n_1 > n_2$   
Obr. 10:  $n_1 < n_2$   
Obr. 11: Totální odraz  
Obr. 12: Meridiánový paprsek u SI a GRIN vlákna  
Obr. 13: Úhel akceptance  
Obr. 14: Rozložení vidů  
Obr. 15: Mechanismus vedení v GI vlákne  
Obr. 16: Komunikační okna  
Obr. 17: Ohyb vlákna  
Obr. 18: Vidová disperze  
Obr. 19: Ramanův a Brillouinův rozptyl  
Obr. 20: Optický kabel jako snímač teploty fáze silového kabelu  
Obr. 21: Kabely v chráničkách  
Obr. 22: Cirkulace vzduchu v omezeném prostoru  
Obr. 23: Modelová situace simulovaných kabelů  
Obr. 24: Uspořádání kabelů vedle sebe  
Obr. 25: Uspořádání kabelů vedle sebe s teplovodem  
Obr. 26: Uspořádání kabelů v trojúhelníku  
Obr. 27: Uspořádání kabelů v trojúhelníku s teplovodem  
Obr. 28: Uspořádání kabelů s mezerou  
Obr. 29: Kabel v chráničce  
Obr. 30: Smyčka pro nalezení ekv. tepelné vodivosti  
Obr. 31: Kabely vedle sebe  
Obr. 32: Kabely v trojúhelníku

**Tabulka 1: Použité veličiny a konstanty**

$U_f$	fázové napětí	[V]	$I_{Dov}$	dovolený proud	[A]
$R$	odpor	[ $\Omega$ ]	$k_1, k_2, k_i$	přepočítávací činitelé	[-]
$X$	reaktance	[ $\Omega$ ]	$K_{ix}, K_{iy}, K_{iz}$	složky vlnových vektorů	[-]
$I_{\xi}$	činná složka proudu	[A]	$Z_1, Z_2$	impedance prostředí	[ $\Omega$ ]
$I_j$	jalová složka proudu	[A]	n	index lomu	[-]
$F$	síla	[N]	$\theta_t$	prostupný úhel	[°]
$B$	magnetická indukce	[T]	$\theta_i$	kritický úhel	[°]
$H$	intenzita mag. pole	[A/m]	$\theta_{\alpha}$	úhel akceptance	[°]
$l$	délka	[m]	$t_n$	zpoždění nejnižšího vidu	[s]
$I_{km}$	nárazový zkrat. proud	[A]	$t_v$	zpoždění nejvyššího vidu	[s]
$I_k''$	počáteční zkrat. proud	[A]	$L_v$	dráha nejvyššího vidu	[m]
$Z_k$	zkratová impedance	[ $\Omega$ ]	$c_0$	rychlost světla ve vakuu	[m/s]
$f_k$	okamžitá síla	[N]	$\Delta\tau_m$	výsledné zpoždění vidů	[s]
$k_1$	činitel tvaru vodiče	[-]	a	poloměr jádra vlákna	[mm]
$k_2$	činitel uspořádání vodičů	[-]	$\alpha_A$	absorpční ztráty	[-]
$a$	vzdálenost	[m]	$\alpha_R$	ztráty Rayleigho rozptylem	[-]
$Q$	teplo	[J]	$\alpha_N$	makroskopické neregularity	[-]
$t_k$	doba trvání zkratu	[s]	$\alpha_M$	ztráty na mikroohybech	[-]
$i_k$	zkrat. proud	[A]	$\alpha_O$	ztráty na ohybech	[-]
$I_{ke}$	oteplovací proud	[A]	$R_K$	kritický poloměr	[mm]
$c_v$	měrná tepelná kapacita	[J. m <sup>-3</sup> . K <sup>-1</sup> ]	$\lambda$	vlnová délka	[m]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]	$D_V$	koeficient vlnovodné disperze	[-]
$R_{20}$	resistance vodiče při 20°C	[ $\Omega$ ]	$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\vartheta_f$	fiktivní teplota vodiče	[°C]	$\nabla$	operátor nabla	[m <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Úhel mezi osami	[°]	$\lambda$	tepelná vodivost	[J.m <sup>-3</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	teplotní odpor. Činitel	[-]	r	polohový vektor	[m <sup>-1</sup> ]
$K$	materiálová konstanta	[-]	c	tepelná kapacita	[J/K]
$P$	vyvinutý tepelný výkon	[W]	T	teplota	[K], [°C]
$\Delta v_m$	max. dovolené oteplení	[°C]	t	čas	[s]



$v_m$	nejvyšší dovol. teplota vodiče	[°C]	$Q_v$	objemová hustota tep. toku	[W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$v_m$	teplota okolí	[°C]	$\sigma$	Boltzmannova konst.	[W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$R_{AC}$	střídavý odpor	[Ω]	$\varepsilon$	emisivita	[-]
$R_{DC}$	stejnsměrný odpor	[Ω]	$T_0$	teplota okolí	[K]
$\alpha_{20}$	tepl. Souč. el. Rezistivity při 20°C	[K <sup>-1</sup> ]	$S_1$	velikost povrchu řezu kabelu	[m <sup>2</sup> ]
$\theta$	nejvyšší pracovní teplota	[°C]	$S_2$	velikost povrchu řezu chráničkou	[m <sup>2</sup> ]
$y_s$	činitel skinefektu	[-]	$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$f$	frekvence	[Hz]	$\varepsilon_k$	součinitel konvekce	[-]
$y_p$	činitel přiblížení	[-]	$\lambda_{ekv}$	ekvivalentní tepelná vodivost	[J.m <sup>-3</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$d_c$	průměr jádra	[mm]	Pr	Pradtlovo číslo	[-]
$s$	vzdálenost mezi osami jader	[mm]	Gr	Grasshoffovo číslo	[-]

## Kapitola 1: Úvod

Kabelová silnoproudá technika a technologie jsou nepostradatelné součásti energetiky a distribuce elektrické energie. Silové kabely přenášejí velký proud, napětí a výkon a proto je nutno dbát na kvalitu a spolehlivost přenosu elektrické energie. V tomto směru se i toto odvětví neustále rozšiřuje a zdokonaluje, můžeme například jmenovat neustále se zdokonalující izolační materiály, které musí vyhovovat řadě mezinárodních norem a směrnic. Důležitým parametrem pro silová kabelová vedení je teplotní zatížitelnost kabelů. V případě zařízení, která jsou v provozu přístupná např.: transformátory, stroje, koncovky atd. je možné použít celou řadu různých metod měření teploty. U kabelových vedení, pokud jsou uložena v zemi je obtížné zjistit jejich teplotu při provozu. Zejména pokud jde o měření v delším časovém úseku. Jako komplexní řešení je možné pro tento případ použít snímání teploty pomocí optického vlákna spojeného s vodičem. S využitím optického vlákna lze snímat teplotu silového kabelu kontinuálně v jakémkoliv místě vedení. Toto řešení lze využít v případě, kdy je optický kabel instalován současně se silovým kabelem. V případě, že snímání teploty není možné, lze provést simulaci tepelného modelu kabelu pomocí výpočetních programů. V bakalářské práci jsem se zabýval touto aplikací zjišťování teploty.

Teplotní vlivy, které působí na kabel, jsem rozdělil do dvou skupin. Za prvé jde o vlivy samotného systému, kdy systém sám sebe ovlivňuje, například resistance samotného vodiče. Za druhé pak vlivy vnější jako jsou např. přírodní vlivy nebo jiné zdroje tepelné energie.

Kabely jsou uloženy zpravidla třemi způsoby: přímo v zemi (obr.1), v chráničkách (obr.2) nebo v kolektorech (obr.3). Působí na ně různé přírodní vlivy dané prostředím. U kabelů v zemi je zcela rozhodující v jaké houbce je kabel uložen, o jaký typ zeminy se jedná a jaké má zemina tepelné parametry. To nám může ovlivnit výběr typu a průřezu navrhované kabelové trasy. Některé typy půd odvádějí teplo velice dobře, potom při vhodné volbě můžeme docílit toho, že kabel dokáže výborně odvádět teplo, a proto není kabel tolik tepelně namáhán a zároveň snese i horší provozní stavy, jaké mohou nastávat například při přechodových dějích.

Dále pak je vyvinuté teplo ovlivněno geometrií uložení kabelů. Základní tři typy uložení, kterými jsem se v této bakalářské práci zabýval jsou uložení tří kabelů vedle sebe bez mezery, do trojúhelníku a dále vedle sebe s mezerou mezi každým kabelem. Další vliv, který jsem zkoumal, byl vliv blízkého tepelného zdroje energie-teplovodu. Pro simulace a výpočty jsem uvažoval uložení kabelů v zemi, chráničkách a v kolektoru. Jako materiál vodičů jsem použil hliníkové a měděné jádro. Pro výběr kabelu jsem zvolil distribuční kabely o střídavém napětí 110 kV při frekvenci 50 Hz.

Zatížení jsem simuloval pro stavy, kdy byl kabel zatěžován polovičním proudovým zatížením a následně jsem ho zatížil maximálním jmenovitým proudem a sledoval jsem jeho teplotní charakteristiky. Druhá simulace byl zkratový přechodový děj, kde jsem odečetl hodnoty z ustáleného stavu před zkratem a následně sledoval jeho charakteristiky během zkratu a po jeho odeznění.



**Obr. 1: Kably uložené přímo v zemi**



**Obr. 2: Kably uložené v chráničkách**



**Obr. 3: Kably uložené v kolektorech**

## Kapitola 2: Silové kabely

### 2.1 Účel

Účelem silových kabelů je rozvod a distribuce elektrické energie v požadované míře a kvalitě. Běžná uložení mohou být v zemi, v chráničkách nebo v kolektorech. Silové kabely můžeme rozdělit podle napěťových hladin (viz tabulka 2). Pro každou hladinu pak existuje několik druhů průřezu kabelu (tabulka 3 pro průřezy).

Tabulka 2: Napěťové hladiny

Napěťová hladina	Napětí [kV]
NN	0,4
	1
VN	6
	10
	22
	35
VVN	110
	220

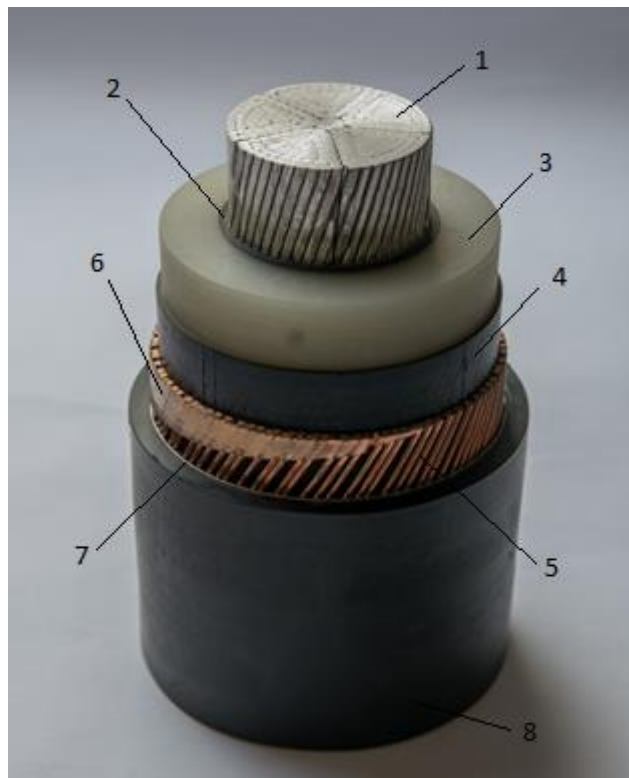
Tabulka 3: Průřezy 110kV kabelu

	SCC	SC
	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>
VVN	185	1000
	240	1200
	300	1400
	400	1600
	600	1800
	630	2000
	800	2500

Zdroj: Katalog firmy NKT cables, High Voltage cable systems

### 2.2 Struktura 110 kV kabelu

1. Jádno - Materiálem je Cu nebo Al.
2. Vnitřní polovodičivá vrstva
3. XLPE izolace
4. Izolační ochrana
5. Polštářová vrstva
6. Měděné stínění
7. Hliníková fólie
8. Vnější polyethylenový plášť



Obr. 4: 110 kV kabel

**1.Jádro**-Je složeno ze slaněných vodičů z mědi nebo hliníku. Mohou být segmentovaná (SC-segmental conductor), což v praxi znamená, že jsou kolem měděného nebo hliníkového jádra vytvořeny segmenty lan resp. sektorů. Tato modifikace znamená, že kabel má především lepší mechanické vlastnosti např. při manipulaci při pokládání kabelu, dále pak snižují vliv skinefektu. Pro menší průřezy jsou používány slané vodiče (SCC-stranded compacted conductor).

**2.Vnitřní polovodivá vrstva**-Slouží k zrovnoměnění intenzity elektrického pole mezi jádrem a izolací. Vzhledem k tomu že lanka, z kterých je jádro tvořeno jsou různě zaoblena, mikroskopicky deformována apod. a tvoří tak mikronehomogenity, která narušují izolační vrstvu (např. tzv. treeingem nebo-li stromečkováním, kdy v izolaci vznikají miniaturní praskliny, které výrazně snižují životnost izolace). Tato vrstva tedy především omezuje částečné výboje mezi izolací a jádrem, které jsou zdrojem výše uvedených problémů. Použitím této vrstvy zajistíme zlepšení provozní životnosti kabelu a jeho izolačních vlastností. Dále pak zlepšuje i mechanické vlastnosti a zaručuje, že kovové jádro nepoškodí izolaci. Jako nejčastější materiály se používají PE nebo jiné polymery s uhlíkem.

**3.XLPE izolace**-Tato vrstva je rozhodující pro VN kabely, samozřejmě záleží na materiálu, který nemusí vždy být zesítěný polyethylene (XLPE), ale může to být i například PVC, nicméně ten je teplotně omezený a nepoužívá se pro hodnoty vyšší než je 70°C, dále se například používají kabely s olejem napuštěnou a naimpregnovanou izolací, avšak tyto kabely se v dnešní době stále více nahrazují již zmíněnými kabely s izolací XLPE, více o izolačních materiálech je v kapitole 2.3 Materiály 110 kV kabelů.

**4.Izolační ochrana**-Má ochrannou funkci tak, aby chránila izolační vrstvu 3. před mechanickým namáháním způsobeným kovovým stíněním. Zlepšuje se tím životnost celé izolace.

**5.Polštářová ochrana**-Tato vrstva je elastická a díky svým vlastnostem se používá k redukci roztažných sil, protože se vzrůstající teplotou se mění velikost kovového stínění. Tato vrstva je ukládána mezi izolační ochranu a stínění.

**6.(Měděné) stínění**-Tato vrstva je také velmi důležitá, neboť všemi třemi fázemi prakticky nikdy neprotéká stejný proud, například vlivem úbytků napětí apod., přesto že tyto rozdíly jsou zpravidla malé, vzniká zde tzv. vyrovnávací proud. Tato vrstva má za úkol odvádět tento vyrovnávací proud. Je spojena se zemí a má ochrannou funkci v případě proražení izolace vodiče. Stínění je tvořeno zpravidla měděnými drátky, na nichž je přetažena ještě vrstva měděného pásu, popřípadě zde může být i kovový pancíř.

**7.Hliníková fólie**-Tato vrstva má opět ochrannou funkci proti elektrickému poli vytvořeném ve stínění pro vrstvu, která je nad ní.

**8. Vnější polyethylenový plášť**-Tento element chrání celý kabelový systém proti mechanickému namáhání při manipulaci, dále před tepelnými či chemickými jevy, které ovlivňují životnost kabelu. V dnešní době se jako materiál používá plášť z HDPE, který nahrazuje PVC, nicméně HDPE je hořlavý. PVC se jako plášť přestalo vyrábět z důvodu své toxicity při hoření. Nehořlavý materiál, neboli oheň retardující je PE (polyethylen) resp. různé jeho směsi. Je to materiál velice odolný.

## 2.3 Materiály 110 kV kabelů

Tabulka 4: Materiály vodičů

Materiál	Elektrická vodivost [S.m <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Tepelná kapacita [J.mol <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
Měď	58,1.10 <sup>6</sup>	8940	386	24,44
Hliník	37,7. 10 <sup>6</sup>	2700	237	24,20

**Jako materiál pro vodivou žílu (jádro)** se standardně používá hliník nebo měď. Porovnáme-li technické parametry obou materiálů (viz. Tabulka 4) je měď lepším materiálem pro silové rozvody. Nicméně hliník je používanější jako materiál jádra, a to především z ekonomických důvodů, dále pak např. z důvodu jeho nižší hmotnosti. Vzhledem k nižší vodivosti hliníku (hliník má přibližně 60% vodivosti mědi), musí být průřez zhruba 1,3krát větší než je tomu u měděného jádra. Největší výhodou mědi je určitě její vodivost, kterou má druhou nejvyšší ze všech známých kovů. Další pozitivní vlastností je mechanická odolnost, díky níž měděné kabely snesou větší mechanické namáhání při pokládání, dobrá svařitelnost, pájitelnost a odolnost proti korozi. Dále z tabulky můžeme vyčíst, že měď lépe vede teplo. Nevýhodou mědi může být fakt, že negativně reaguje na některé jiné prvky jako je síra, pryž, atd. resp. jejich složky. Výhody hliníku jsou dobrá svařitelnost a pájitelnost, široké zastoupení v přírodě, a tedy i jeho relativně nízká cena. Nevýhodami jsou především větší křehkost a náchylnost k lámání a deformacím, dále také poměrně složitý způsob výroby čistého hliníku, neboť v přírodě se čistý hliník prakticky neobjevuje, pouze jeho sloučeniny jako např. bauxit- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , a tudíž se musí pomocí elektrolýzy vyrobit.

**Izolační materiály pro silové kabely** jsou nejčastěji PVC (Polyvinylchlorid) a XLPE (zesíťovaný polyetylen). PVC izolace byla ještě do nedávné doby nejpoužívanější, ovšem její negativní účinky na životní prostředí vedly k mnoha omezením zejména v Evropské Unii, tím také došlo k zhoršení některých technických parametrů tohoto typu izolace, a proto se od PVC ustupuje. Tato izolace patří do skupiny izolací zvaných Termoplastické polymery, tuto kategorii lze ještě rozdělit podle teploty do několika skupin od polymerů s nižší kvalitou, kam patří právě PVC nebo PE, jejichž teplota se pohybuje mezi 60°C až 70°C, u XLPE jsou provozní teploty běžně 90°C, ale mohou být až 120°C. Nad touto kritickou teplotou kabely, ztrácí svoji hustotu a fyzikální vlastnosti. Nejpoužívanější izolací pro kabely 110 kV je XLPE, které se od PVC vyznačuje tím, že jsou lisovány při vysoké teplotě stejně jako termoplastické polymery, ovšem po lisování prochází chemickým procesem, který vede k přeměně vnitřní struktury polymeru. Výsledný produkt má síťové uspořádání, z tohoto důvodu je odvozen i jejich název. Díky tomu pak mají i lepší mechanické, elektrické a zejména pak tepelné vlastnosti. (Zdroj [1])

## Kapitola 3: Dimenzování silových kabelů

Tato kapitola se zabývá obecnými požadavky, které musí být splněny pro správný a bezpečný provoz kabelového vedení. Rozdělil jsem ji do následujících podkapitol Bezpečnost, Selektivita, Dovolené úbytky napětí, Mechanické namáhání, Odolnost vůči zkratovým proudům, Dovolené oteplení.

### 3.1 Bezpečnost

Toto hledisko je zcela zásadní pro celý kabelový systém a je nejdůležitější. Znamená to správnou volbu kabelu, správnou funkci ochran a další provozně bezpečnostní opatření, která nejsou dále v této práci sledována.

### 3.2 Selektivita

Tato podkapitola částečně souvisí a navazuje na podkapitolu Bezpečnost. Spočívá v tom, že při poruše vypne ten ochranný prvek, který je umístěn bezprostředně před ním. Ve VVN soustavách musí být zajištěno vypnutí vedení nejbližším jisticím prvkem, který předchází vedení.

### 3.3 Úbytky napětí

Tento parametr je důležitý pro samotné provozování celé soustavy a je to (spolu s kmitočtem) kvalitativní popis celého vedení. U vedení protékaného proudem vzniká vlivem vlastní impedance úbytek napětí a to vede k poklesu napětí. Tento pokles může vést k zhoršení některých provozních vlastností, z toho důvodu musí být úbytky napětí ( $\Delta U$ ) omezeny. Z tohoto plyne, že průřez vodičů musí být navržen tak, aby při nejvyšším předpokládaném zatížení nepřesáhl úbytek napětí povolenou mez stanovenou příslušnou normou. Není-li dovolený úbytek předepsán, pak platí že jeho hodnota je pro VN vedení  $\pm 5\% \div \pm 10\%$  a pro VVN  $\pm 10\%$  jmenovitého napětí sítě. Dalším důležitým faktorem je materiál vodiče, charakterizovaný resistivitou (měrným odporem), která charakterizuje elektrickou vodivost látky. Platí, že čím větší je resistivita, tím větší je elektrický odpor a tím více se zvětšuje úbytek napětí. Pro srovnání resistivita hliníku je zhruba  $0,0267 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ , měď zhruba  $0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ . Dalším důležitým parametrem je délka, neboť se zvětšující se délkou roste odpor. Tyto veličiny vyjádříme ve vzorci pro úbytek napětí ve VN soustavách:

$$\Delta \bar{U}_f = \hat{Z}_l \hat{I} = (R + jX)(I_\xi + jX_j) \quad (1-1)$$

$$\Delta \Delta \bar{U}_f = RI_\xi + XI_j + j(XI_\xi + RI_j) \quad (1-2)$$

po zanedbání imaginární části:

$$\Delta \bar{U}_f = RI_\xi + XI_j = RII \cos \varphi + XII \sin \varphi \quad (1-3)$$

$R$  je činný odpor  $R = \rho \frac{l}{S}$  [ $\Omega$ ]

$X$  je reaktance [ $\Omega$ ]

$I_\xi$  je činná složka proudu [A]

$I_j$  je jalová složka proudu [A]

pozn.: Tento vzorec platí pro vedení kapacitního charakteru, což splňují kabelová vedení. Pokud by se jednalo o vedení induktivního charakteru, jako například venkovní vedení, pak by ve vzorci u imaginární části místo znaménka „+“ bylo „-“.

Úbytky napětí jsou jev nežádoucí, nicméně přirozený, a proto se musíme snažit ho co nejvíce limitovat. Tento problém nejvíce ovlivňuje nízkonapěťové rozvody a na ně navazující spotřebiče, jejichž stabilita může být díky této skutečnosti ohrožena, tzn. že regule pro úbytky jsou důležitější pro NN vedení než pro VN či VVN vedení. V této bakalářské práci se zabýváme 110 kV kabely, které spadají do VVN. Zde

se úbytky napětí řeší většinou vhodným přepojením odboček na transformátoru, tak aby se co nejvíce limitoval tento nežádoucí vliv a aby na navazujícím transformátoru bylo požadované napětí. tzn. buď se napětí zvýší o určitou tolerovanou mez nebo naopak sníží ( $\pm 10\%$  jmenovité hodnoty).

### 3.4 Mechanické namáhání

Toto kritérium zohledňuje především geometrii uložení kabelů, resp. montáž kabelů, dále pak kabely musí být schopny odolávat vlivů při zkratových proudech. Průřezy kabelů musí být navrženy tak, aby byly schopny snést výše uvedené jevy při nejvyšším namáhání, které mohou při montáži nebo za provozu nastat.

### 3.5 Odolnost vůči zkratovým proudům

Vodič musí být navržen, tak aby byl schopen odolat účinkům zkratových proudů, přičemž tyto proudy několikanásobně převyšují jmenovité proudy. Při zkratu na vodiče působí elektromagnetické, elektrodynamické, elektrotepelné a mechanické síly a dochází při nich k velkému úniku tepelného výkonu, který může při překročení určité povolené hodnoty zničit izolaci a tím i celý kabel. Všechny tyto účinky jsou dány nejvíce charakterem vedení, například dynamické síly se nejvíce projevují u pevně uložených tuhých vodičích v rozvodných zařízeních, naopak tepelné účinky se nejvíce projevují u volně uložených kabelů nebo zavěšených kabelů. Odolnost vodičů vůči zkratovým proudům můžeme vyjádřit ze vztahu pro velikost síly  $F$ , kterou na sebe působí dva rovnoběžné vodiče o délce  $l$ , jimiž protéká proud o velikosti  $I$  (podle [2]):

$$\bar{F} = \bar{B}Il \sin \alpha \quad [N] \quad (1-4)$$

kde:

$\bar{B}$  je magnetická indukce [T], vyjádřená dále vztahem  $\bar{B} = \mu_0 \bar{H}$

$\mu_0$  je permeabilita vakua  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad [H \cdot m^{-1}]$

$\bar{H}$  je intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]

$\alpha$  je úhel, který svírá směr síly s osou vodiče

Intenzitu magnetického pole ve vzdálenosti  $a$  od vodiče dále vyjádříme vztahem:

$$\bar{H} = \frac{I}{2\pi a} \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1-5)$$

Největší síla působí v kolmém směru k ose vodičů, pro  $\sin \alpha = 1$ , po dosazení do vztahu (1-4) dostaneme pro vodič o délce  $l$ :

$$\bar{F} = 4\pi 10^{-7} \frac{I^2}{2\pi a} l = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I^2}{a} l \quad [N] \quad (1-6)$$

Největší hodnota síly, způsobená zkratovým proudem, bude nejvyšší okamžitá hodnota zkratového proudu, nazývaná též nárazový zkratový proud, která odpovídá prvnímu vrcholu proudu po vzniku zkratu a můžeme ji vyjádřit jako:



$$I_{km} = k\sqrt{2}I_k'' \quad [A] \quad (1-7)$$

kde:

$k$  je činitel závislý na druhu rozvodné sítě, který se určí ze vztahu  $k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$  (1-8), popř. se může určit z grafu, pro VVN sítě je jeho hodnota 1,7

$$I_k'' \text{ je počáteční zkratový proud } I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad [A] \quad (1-9)$$

$cU_n/\sqrt{3}$  je ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

$Z_k$  je zkratová impedance

Nejvyšší okamžitá síla, která působí na jednotkovou délku vodiče, dostaneme po dosazení do vztahu (F) a podle normy ČSN EN 60865-1, pak dostaneme vztah:

$$f_k = 2k_1k_210^{-7} \frac{I_{km}^2}{a} \quad [N \cdot m^{-1}; A, m] \quad (1-10)$$

kde:

$f_k$  je síla působící na 1m délky vodiče  $[N \cdot m^{-1}]$

$k_1$  je činitel tvaru vodiče, respektující rozložení proudu po průřezu vodiče

$k_2$  je činitel respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů

$I_{km}$  je nárazový zkratový proud  $[A]$

$a$  je vzdálenost vodičů  $[m]$

$k_1, k_2$  se určí podle normy ČSN 33 3022-1

Těmto účinkům musí být schopné odolat nejenom vodiče a izolace, ale dále také např. podpěrné izolátory, odpojovače a další vybavení zabezpečující provoz vedení.

**Tepelné účinky** jsou určeny působením časově proměnného zkratového proudu po dobu trvání celého zkratového jevu na parametry vodičů a izolací. Pro následující určování a odvozování vycházíme z teoretického předpokladu, že jistící ochrany jsou nastaveny, tak že vypnou zkrat za čas, kdy se vyvinuté teplo nestačí odvést ani vyzářit a projeví se pouze lokálním zvýšením teploty vodiče.

Výsledný vzorec pro vyvinutý tepelný výkon ve vodičích můžeme zapsat jako:

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t) \cdot dt \quad (1-11)$$

kde:

$Q$  je vyvinuté teplo  $[J]$

$R$  je odpor vodiče  $[\Omega]$

$t_k$  je doba trvání zkratu  $[s]$

$i_k$  je zkratový proud  $[A]$ , tento časově proměnný proud lze nahradit ekvivalentním oteplovacím proudem  $I_{ke}$  dle vztahu:

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (1-12)$$

Tento proud můžeme definovat jako proud, který by vyvolal stejné tepelné účinky za dobu trvání zkratu, jako časově proměnný zkratový proud. Podle normy zmíněné normy ČSN EN 60865-1, lze tento proud určit vztahem:

$$I_{ke} = k_e I_k'' \quad (1-13)$$

kde:

$k_e$  je koeficient, který se určí podle tabulky 5, v závislosti na době trvání zkratu a na soustavě napětí.

**Tabulka 5: Koeficienty pro zkraty**

Doba trvání zkratu $t_k$ [S]	Činitel $k_e$		
	Zkrat na svorkách alternátoru	Zkrat v soustavě	
		VVN, VN	NN
pod 0,05	1,70	1,60	1,50
0,05-0,1	1,60	1,50	1,20
0,1-0,2	1,55	1,40	1,10
0,2-1,0	1,50	1,30	1,05
1,0-3,0	1,30	1,10	1,00
nad 3,0	1,15	1,00	1,00

Dosadíme-li hodnoty ekvivalentního oteplovacího proudu do rovnice (1-11), pak vyvinuté teplo bude ve tvaru:

$$Q = R(\vartheta) \cdot I_{ke}^2 \cdot t_k \quad (1-14)$$

tímto teplem se ohřeje vodič z teploty  $\vartheta_1$  před zkratem na teplotu  $\vartheta_k$  při zkratu, při objemu  $V$ , takže výše zmíněný vzorec můžeme zapsat ve tvaru:

$$Q = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c_V \cdot V \cdot d\vartheta \quad (1-15)$$

kde:

$c_V$  je měrná tepelná kapacita objemu vodiče [ J . m<sup>-3</sup> . K<sup>-1</sup> ]

$V$  je objem vodiče [m<sup>3</sup>]

Po úpravě rovnice (1-15) dostaneme:

$$I_{ke}^2 t_k = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} \frac{c_V}{R(\vartheta)} d\vartheta \quad (1-16)$$

Závislost resistance vodiče na teplotě, pak vyjádříme:

$$R(\vartheta) = R_{20} \frac{\vartheta_f + \vartheta}{\vartheta_f + 20} \quad (1-17)$$

kde:

$R_{20}$  je resistance vodiče při 20°C [Ω]

$\vartheta_f$  je fiktivní teplota vodiče  $\vartheta_f = \frac{1}{\alpha}$

$\alpha$  je teplotní odporový činitel materiálu vodiče [ $K^{-1}$ ]

Dosažením vztahu (1-16) do (1-17) dostaneme:

$$I_{ke}^2 t_k = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} \frac{c_V V}{R_{20}} \frac{\vartheta_f + \vartheta}{\vartheta_f + 20} d\vartheta \quad (1-18)$$

Po integraci dostaneme:

$$I_{ke}^2 t_k = \frac{c_V V}{R_{20}} (\vartheta_f + 20) \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1} \quad (1-19)$$

Po úpravě, kdy za objem  $V$  dosadíme průřez vodiče  $A$  a délku  $l$  a  $R_{20}$  vyjádříme jako  $R_{20} = \rho_{20} \frac{l}{A}$  ( $\rho_{20}$  je resistivita 1 m délky vodiče při 20°C [ $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ])

Dále můžeme z výše uvedeného a podle normy ČSN EN 60865-1 určit hodnotu průřezu, který vyhoví z hlediska tepelného namáhání při zkratu:

$$A = \frac{I_{ke} \sqrt{t_k}}{K} \quad [\text{mm}^2] \quad (1-20)$$

$K$  je materiálová konstanta, určena vztahem:

$$K = \sqrt{\frac{c}{\rho_{20}} (\vartheta_f + 20) \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} \quad [\text{A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (1-21)$$

Zvolený průřez dále kontrolujeme, zda-li odolá tepelným účinkům zkratových proudů.

### 3.6 Dovolené oteplení

Dovoleným oteplením rozumíme teplotu, která je stanovena pro hospodárny provoz vedení, a která nesmí být překročena. Každý vodič musí být schopen přenášet jmenovitý proud tak, aby nedocházelo k nadměrnému oteplení vodiče, protože průchodem proudu vodičem dochází k jeho zahřívání. Vyvinuté teplo ve vodiči na jednotku délky je přímo úměrné odporu této jednotkové délky vodiče  $R$  a druhé mocnině proudu  $I$  podle vzorce:

$$P = R_{AC} I^2 = \frac{\Delta v_m}{T} \quad (1-22)$$

Kde:

$P$  je vyvinutý tepelný výkon [W]

$\Delta v_m$  je maximální dovolené oteplení vodiče ( $\Delta v_m = v_m - v_0$ ) [°C]

$v_m$  je nejvyšší dovolená teplota vodiče podle dovolené teploty izolace [°C]

$v_0$  je teplota okolí [°C]

$R_{AC}$  je střídavý odpor při 90°C, který se podle normy ČSN IEC 287-1-1 + A1 určí ze vztahu (popř. z katalogu výrobce kabelu):

$$R_{AC} = R_{DC}(1 + y_s + y_p) \quad (1-23)$$

$R_{DC}$  je stejnosměrný odpor, který se určí ze vztahu (nebo se opět vyhledá v příslušném katalogu):

$$R_{DC} = R_{20}(1 + \alpha_{20}(\theta - 20)) \quad (1-24)$$

$\alpha_{20}$  je teplotní součinitel elektrické rezistivity při 20°C na Kelvin (v této práci jsme pracovali s hodnotou  $0.004 \text{ K}^{-1}$ )

$\theta$  je nejvyšší pracovní teplota ve stupních Celsia

$y_s$  je činitel skin efektu, který se určí

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (1-25)$$

$$x_s = \frac{8\pi f}{R_{DC}} 10^{-7} k_s \quad (1-26)$$

Kde:

$f$  je frekvence [Hz]

$k_s$  je koeficient, který se určí z tabulky 2, str. 29 z normy ČSN IEC 287-1-1 + A1

$y_p$  je činitel přiblížení, který se určí

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^{2,9} \quad (1-27)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{DC}} 10^{-7} k_p \quad (1-28)$$

Kde:

$d_c$  je průměr jádra [mm]

$s$  je vzdálenost mezi osami jader [mm]

$k_p$  je koeficient, který se opět určí z tabulky 2, str. 29 z normy ČSN IEC 287-1-1 + A1

Pozn.: Při výpočtu resistance jsme použili koeficient  $k_{ss}$ , který ekvivalentně odpovídá členům v závorce  $(1 + \gamma_s + \gamma_p)$  a jehož hodnota byla 1,02 [-]. Je to především z důvodu zpřehlednění a urychlení výpočtu.

Z předešlého vzorce lze vypočítat i proud, kterým může být vodič zatěžován. Dovolené oteplení se pro praktické účely určuje podle norem řady IEC 287, kde jsou uvedeny základní hodnoty pro prostředí a přepočítávací koeficienty.

**Teplota vodiče**-Pro kabelová vedení jsou nejvyšší provozní teploty podle výše zmíněné normy pro PVC 70°C a pro XLPE 90°C. Tyto hodnoty nesmí být překročeny, neboť izolace vodičů je méně odolná než samotné vodiče a nesnesla by dlouhodobě takové tepelné zatížení.

**Referenční podmínky**- jsou určeny podle normy ČSN IEC 287 a ČSN 341050.

Pro 3 fázové vedení s jednožilovými kabely jsou referenční hodnoty:

Teplota země	20°C
Teplota v kabelové kanále	30°C
Teplota okolního vzduchu	35°C
Hloubka uložení L	1,0m
Vzdálenost os kabelů při rovné formaci	70+D <sub>s</sub>
Zemní tepelný odpor	1,0 (K.m)/W

Dovolený proud se vypočítá:

$$I_{DOV} = I_N k_1 k_2 \dots k_i \quad (1-29)$$

$I_{DOV}$  - jmenovitý maximální proud vodiče při teplotě jádra 90°C, (je výrobcem udáváný pro uložení v trojúhelníkové/rovinná formaci, v zemi/na vzduchu).

$k_1 k_2 \dots k_i$  jsou redukční (přepočítávací) součinitelé, kteří respektují zatížení v závislosti na způsobu uložení, seskupení, okolní teplotu, atd. ( výpočet lze provést podle ČSN 287, koeficienty nalezneme v katalogu výrobce. (zdroj [12])

$k_1$  redukční faktor pro hloubku uložení rozdílnou od referenční

Hloubka uložení v m	0,5	0,7	1	1,3	1,5
Redukční faktor $k_1$	1,1	1,05	1	0,97	0,95

$k_2$  redukční faktor pro teplotu země rozdílnou od referenční

Teplota °C	10	15	20	25	30
Redukční faktor $k_2$	1,11	1,04	1	0,96	0,93

$k_3$  redukční faktor pro teplotní odpor země rozdílný od referenční

Tepelný odpor země Km/W	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5
Redukční faktor $k_3$	1,14	1,09	1,00	0,93	0,84

$k_4$  redukční faktor pro různou vzdálenost fází mezi sebou (kde je  $D_e$   $\emptyset$  vodiče v mm)

Vzdálenost fází jednoho vedení (mm)	$D_e$	$D_e+70$	250	300	1,5
Redukční faktor $k_4$	0,93	1,00	1,04	1,08	1,09

$k_5$  redukční faktor pro vzájemnou vzdálenost více skupin kabelů vedle sebe

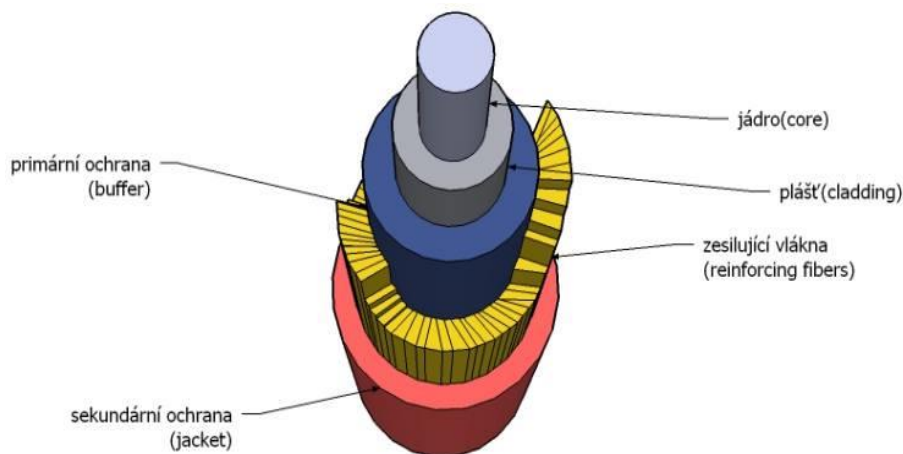
Osová vzdálenost skupin kabelů (mm)	Počet skupin kabelů (mm)			
	1	2	3	4
100	1	0,78	0,66	0,60
200	1	0,81	0,70	0,65
400	1	0,86	0,76	0,74
800	1	0,91	0,83	0,81
2000	1	0,96	0,93	0,92

## Kapitola 4: Optické kabely

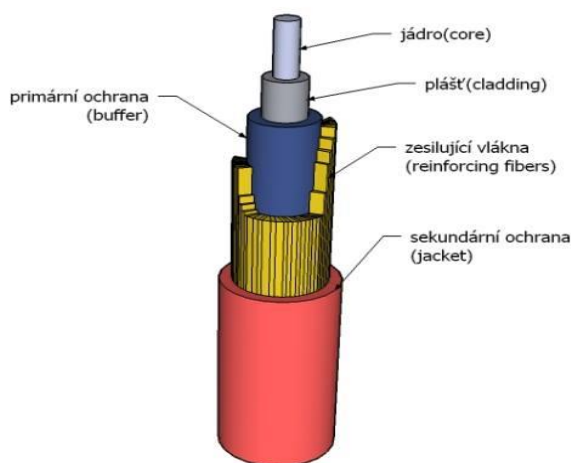
### 4.1 Funkce a využití

Optické kabely v současné době mají velmi široké uplatnění v mnoha technických oborech, z nichž největší význam mají v telekomunikační technice jako prostředek pro přenos signálu. V dnešní době nahrazují, v oblasti komunikací, metalické kabely díky svým výborným vlastnostem jako je například velká šířka přenosového pásma daná vysokou frekvencí nosných vln, přenosovou rychlostí, množstvím přenášených dat atd. Optické kabely se využívají i v silnoproudé elektrotechnice v oblasti přenosu informací, ale také ve speciálním případě pro měření tepelných účinků silových kabelů, kdy je optický kabel umístěn podél silového kabelu a měří jeho teplotní závislost.

### 4.2 Konstrukce optického kabelu



Obr. 5: Optický kabel



Obr. 6: Optický kabel

1. **Jádno**-V jádře se šíří paprsek podle zákonů geometrické optiky. Zpravidla bývají křemenná nebo plastová.
2. **Plášť**-Vrstva obalující jádra a společně s ním tvoří optické vlákno. Na rozhraní jádro-plášť dochází k odrazu prostupujícího světelného paprsku.
3. **Primární ochrana**-Má za úkol chránit optické vlákno před vnějšími vlivy.
4. **Zesilující vlákna**-Zlepšují mechanické vlastnosti celého optického kabelu.
5. **Sekundární ochrana**-Vnější ochranná vrstva která chrání celý optický kabel.

### 4.3 Princip šíření paprsku ve vlákně

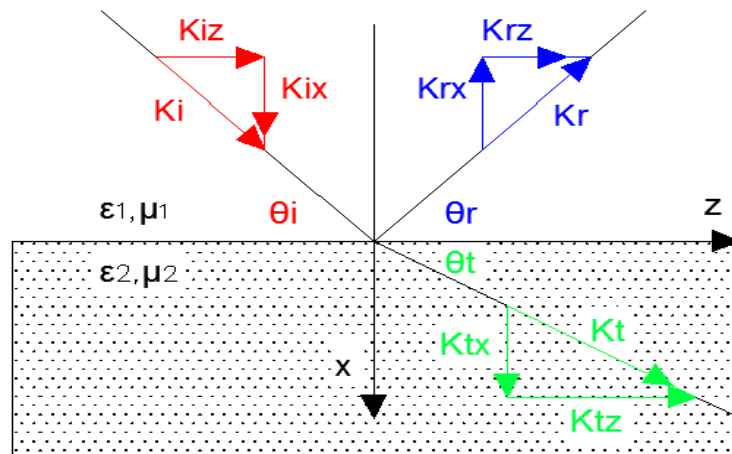
Paprsek je elektromagnetická vlna šířící prostředím na principu odrazu a lomu na rozhraní dvou prostředí (lze vidět na obr. 7), u optických vláken předpokládáme, že rozhraní na kterých dochází k těmto jevům jsou dielektrické materiály s odlišnými materiálovými konstantami, na obrázku označeny jako  $\epsilon_1, \mu_1$  a  $\epsilon_2, \mu_2$ ). Jako příklad uvažujme (podle [3] str.31-33 a [4], str. 14-16), že harmonická vlna dopadá pod obecným úhlem  $\theta_i$  (kde index i znamená incident wave-dopadající vlna) na uvažované nekonečně dlouhé rozhraní a je dále určena vlnovým vektorem  $K_i$ . Produkty, které se po dopadu vytvoří jsou vlnové vektory  $K_r$  (kde r, reflected-odražený) a  $K_t$  (kde t, transmitted-prostupný) pod úhly  $\theta_r$  a  $\theta_t$ .

Složky vlnových vektorů ve směru osy x a z, při uvažování nulové složky do osy y pak jsou (obr 7.):

$$K_{ix} = K_1 \sin \theta_i, K_{rz} = -K_1 \sin \theta_r, K_{tz} = K_2 \sin \theta_t \quad (2-1)$$

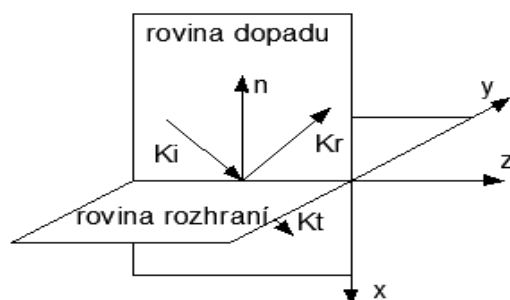
$$K_{ix} = K_1 \cos \theta_i, K_{rz} = K_1 \cos \theta_r, K_{tz} = K_2 \cos \theta_t \quad (2-2)$$

Při 3D prostorovém uspořádání pak bude situace vypadat podle obr. 8.



Obr. 7: Rozhraní dvou prostředí





Obr. 8: Rovina dopadu a rozhraní

Na obr. 8 můžeme vidět rovinu dopadu (odpovídající rovině  $xz$ ), která je určena vektorem  $K_i$  a normálou  $n$ . Složky vektorů  $K_i$ ,  $K_r$  a  $K_t$  do osy  $z$  (rozhraní) určují změnu fáze vln podél rozhraní. Dále musí být splněny podmínky na rozhraní pro tečné složky vektorů  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  ve všech bodech rozhraní, aby se fáze všech tří vln v tomto směru měnily se stejnou rychlostí.

Pro podmínky pro tečné složky  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  na rozhraní dvou dielektrik platí, (elektrické pole je potenciálové):

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2-3)$$

$$E_{1t} dl - E_{2t} dl = 0 \quad (2-4)$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (2-5)$$

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2-6)$$

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (2-7)$$

Podmínky na rozhraní budou splněny pokud bude platit:

$$K_{iz} = K_{rz} = K_{tz} = K_z \quad (2-8)$$

Odtud 
$$K_1 \cos \theta_i = K_1 \cos \theta_r = K_2 \cos \theta_t \quad (2-9)$$

Kde:  $K_i = K_r = K_1$  (stejná prostředí) a  $K_t = K_2 \quad (2-10)$

Z rovnice jsme dostali dva Snellovy zákony ve finálním tvaru:

Zákon odrazu 
$$\theta_r = \theta_i \quad (2-11)$$

Zákon lomu 
$$K_1 \cos \theta_i = K_2 \cos \theta_t \quad (2-12)$$

či ekvivalentní zápis:

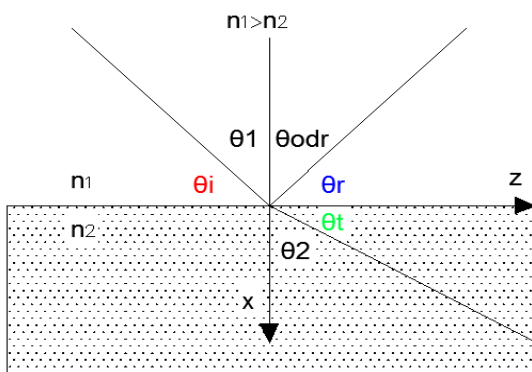
$$\frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2-13)$$

$Z_1, Z_2$ -impedance prostředí

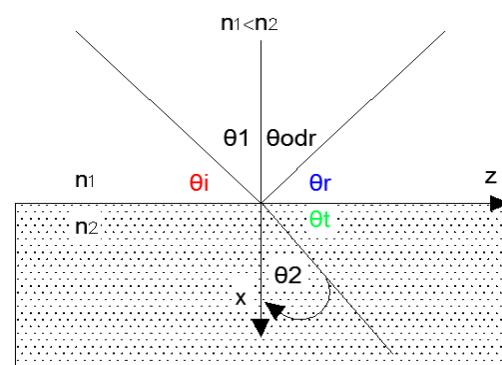
$n_1, n_2$ -indexy lomu prostředí [-]

Index lomu prostředí (resp. materiálu), který se lze vyjádřit vztahem  $n = \frac{c}{v}$  (2-14), (kde  $c$  je fázová rychlost šíření záření ve vakuu [m/s] a  $v$  je fázová rychlost záření v daném materiálu [m/s]), vyjadřuje kolikrát pomaleji se šíří záření v daném materiálu než by se šířilo ve vakuu.

„Čím větší index lomu prostředí má, tím více je opticky hustším. Naopak, čím nižší index lomu má, tím více je opticky řidší“ (podle [5] na str. 17). Pokud zachováme konstantní úhel  $\varphi_1$  a index lomu  $n_1$  dopadajícího paprsku a budeme pouze zvětšovat index lomu druhého prostředí (tedy  $n_1 < n_2$ ), pak se úhel  $\theta_2$  bude lámat více ke kolmici a tím i více energie se ztratí v plášti kabelu.



Obr. 9.:  $n_1 > n_2$



Obr. 10.:  $n_1 < n_2$

Pokud budeme uvažovat obrácený případ, tedy konstantní index lomu druhého prostředí a zvětšující se  $n_1$ , tedy  $n_1 > n_2$ , pak se bude se úhel  $\varphi_2$  bude lámat směrem k rozhraní. V tomto případě může dojít k zajímavé situaci, kdy se paprsek bude lámat z jednoho prostředí do druhého pod úhlem  $90^\circ$ . Tomuto jevu říkáme totální odraz (viz. [5] str. 16-19).

**Totální odraz (Total reflection)**-V případě, že  $n_1 > n_2$  se vlna láme od kolmice, může nastat případ, že prostupná vlna, resp. prostupný úhel  $\theta_t$  bude nulový a procházející vlna se bude šířit podél rozhraní (viz [3], str.34). Úhel odrazu se bude rovnat úhlu dopadu. Definujeme pak nový úhel  $\theta_c$ , tzv. kritický nazývaný též nazývaný mezní.

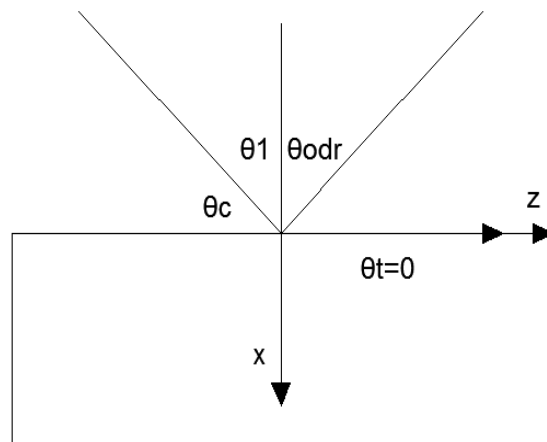
Který je určen vztahem:

$$\cos \theta_c = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-15)$$

$$\theta_c = \arccos \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} = \arccos \frac{n_2}{n_1} \quad (2-16)$$

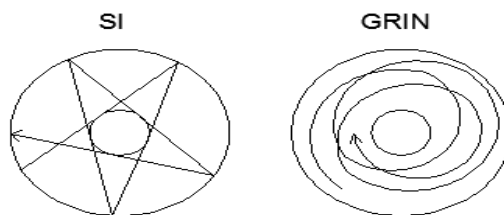
Totální odraz je nejdůležitějším jevem v optických komunikacích a zároveň mechanismem vedení vln ve většině vlnovodů. Je důležité ho splnit, protože pak je zaručeno, že se žádná energie neztrácí na rozhraní do pláště, ale je stále vedena v jádře.

Jak již bylo uvedeno, pokud paprsek dopadne na rozhraní pláště a jádra a nebude splňovat podmínku totálního odrazu, část jeho energie je převzata lomeným paprskem, který je utlumen nebo vyzářen z vlákna ven. Tomuto jevu říkáme radiční ztráty, jelikož není záření transformováno na jinou formu energie, ale je vyzářeno z jádra ven.



Obr. 11: Totální odraz

Aby mohlo dojít k totálnímu odrazu, je nezbytné formulovat ještě jeden důležitý pojem a to je úhel, pod kterým je paprsek navázán do vlákna, tzv. úhel akceptance  $\theta_a$ , celý tento jev pak nazýváme Numerická apertura (NA).



Obr. 12.: Meridiánový paprsek u SI a GRIN vlákna

**Numerická apertura (Numerical aperture)**-Uvažujme meridionální paprsek (viz. [3], str. 78-80), což je paprsek procházející kolem osy jádra (viz. obr. 12), který dopadá na vstup vlákna a je součástí vedeného vidu (obr. 9), pokud je úhel  $\theta$  menší než  $\theta_c$ , a tedy jak bylo uvedeno dříve:  $\cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$  resp.  $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$  (2-17). Pro naši analýzu budeme dále předpokládat, že paprsek dopadá do jádra ze vzduchu, a tedy  $n_0 = 1$ .

Pak odvodíme:

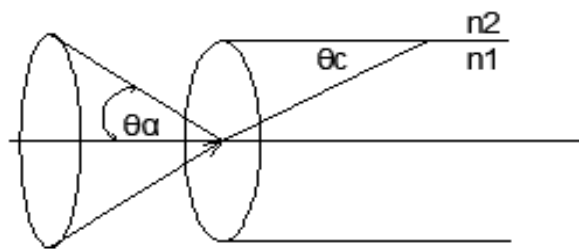
$$n_0 \sin \theta_\alpha = n_1 \sin \theta_0 \quad (2-18)$$

$$n_0 \sin \theta_\alpha = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) \quad (2-19)$$

$$\sin \theta_\alpha = n_1 \cos \theta_c \quad (2-20)$$

kde využijeme  $\cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c}$  (2-21) a dosadíme za  $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$  (2-22), pak dostane výsledný vztah pro numerickou aperturu ve tvaru:

$$NA = \sin \theta_\alpha = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-23)$$



Obr. 13: Úhel akceptance

Z této definice vidíme, že NA je bezrozměrná veličina, která je menší než jedna. Tato veličina nám říká, jak je vlákno schopné přijmout záření z okolního prostředí tak, aby mohlo být vedeno bezztrátově. Jinými slovy dopadající paprsek musí být v rozmezí úhlu  $\theta_\alpha$  (úhlu akceptance), jinak nedojde k podmínce totálního odrazu.

Z hlediska způsobu přenosu informací se optické kabely dělí podle počtu vedených paprsků (vidů) na jednovidová vlákna a vícevidová vlákna. Obecně se optické kabely rozdělují ještě např. podle indexu lomu, geometrických rozměrů, materiálového složení, funkce atd.

**Jednovidová vlákna(Single mode,SM)**-Tento režim má celkově lepší parametry, jako např. příznivější vlastnosti z hlediska disperze (deformace, nebo-li rozptyl přenášeného signálu), jelikož se u něho uplatňuje jediný druh disperze, z tohoto důvodu mají větší šířku přenosového pásu a dále také větší přenosovou rychlost. Používá se tedy na delších trasách v řádu stovek metrů až kilometrů, ovšem používá se i pro podmořské spoje např. systém TAT mezi Evropou a Amerikou. Nevýhodou je horší návaznost na optický zdroj signálu (laserová dioda), díky svému relativně malému průměru, který bývá

do 10  $\mu\text{m}$ . Tato velikost musí být alespoň přibližně splněna, aby normovaný kmitočet vyhovoval podmínce  $V = 2\pi \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,4048$ , tuto podmínku by šlo splnit ještě druhým způsobem a to velmi malým rozdílem indexů lomu jádra a pláště. Nicméně přenosová rychlost může dosáhnout, až 26 Tbit/s na vzdálenost do 50 km u nejlepších. Vlnová délka se pohybuje mezi 1300 nm až 1550 nm.

**Vícevidová vlákna (Multi mode, MM)-V** těchto vláknech se šíří více paprsků oproti SM. Mají obvykle nižší vlnovou délku a to okolo 850 nm. Jak již bylo řečeno mají horší vlastnosti, a to především z hlediska disperze, kdy může dojít k tomu, že šířící se vidy se pohybují po různých drahách a tedy i s odlišnými úhly dopadu a odrazu. Z toho plyne, že některé vidy dorazí na konec vlákna v kratším čase, zpožděné vidy pak způsobí nežádoucí roztahování pulsu a energie je rozdělena do těchto nepravidelných vidů (tzv. Vidová disperze). Délka dráhy paprsku nejnižšího vidu se neliší příliš od dráhy vlnovodu L a jeho zpoždění je

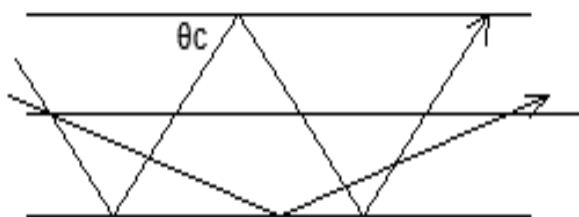
$$t_n = \frac{L}{c_0} n_1 \quad (2-24)$$

Naproti tomu nejvyšší vid musí vykonat nejdélší dráhu a úhel, který svírá s osou, se blíží úhlu kritickému  $\theta_c$ , který jsme dříve definovali. Dráhu, kterou tento paprsek musí vykonat  $L_v = L / \cos \theta_c$  (2-25). Pak zpoždění bude

$$t_v = \frac{L_v}{c_0} n_1 = \frac{L}{c_0 \cos \theta_c} n_1 = \frac{L n_1^2}{c_0 n_2} \quad (2-26)$$

a výsledné zpoždění vidů pak bude

$$\Delta\tau_m = \frac{t_v - t_n}{L} = \frac{n_1(n_1 - n_2)}{c_0 n_2} \quad (2-27)$$



Obr. 14: Rozložení vidů

Výhodou MM kabelů je, že mají lepší návaznost na optický zdroj, takže je vhodné jako zdroj použít LED diodu. Další výhodou může být jejich nižší cena. Používají se nejčastěji na kratší vzdálenosti. Přenosová rychlost bývá od 10 Mbit/s do 10 Gbit/s na vzdálenost do 600 metrů. Velikost jádra se pohybuje od 50 do 70  $\mu\text{m}$ .

Další rozdělení kabelů můžeme provést, podle průběhu indexu lomu v závislosti na poloměru vlákna se skokovou změnou indexu lomu SI (step index) a gradientní (téměř parabolické) GRIN (Gradient index), někdy též pouze GI. (viz. [3], str. 60).

**SI vlákna (step index)**-Vlákna se skokovým indexem lomu jsou vyrobena z materiálu o indexu lomu  $n_1$ , který se skokově pro  $|r| > a$  mění na hodnotu indexu lomu pláště  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ). Tedy:

$$n(r) = n_1 \text{ pro } |r| \leq a \text{ nebo } n_2 \text{ pro } |r| > a \quad (2-28)$$

$n_1$  je index lomu jádra [-],  $a$  je poloměr jádra vlákna [ $\mu\text{m}$ ]

$n_2$  je index lomu pláště [-],  $r$  je proměnná poloměru [ $\mu\text{m}$ ]

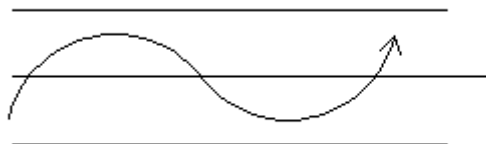
Vedení paprsku u SI vláken je pomocí odrazu na rozhraní jádro-plášť (viz.např. obr 10). Tento typ je vývojově starší a používá se na nejkratší vzdálenosti, má také horší vlastnosti.

**GI vlákna**-Zde se využívá mechanismus šíření vln pomocí ohybu (tzv. fokusace, obr. 11). Index lomu se zde mění téměř parabolicky a vyjádříme ho:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \text{ pro } |r| \leq a \quad (2-29)$$

$\alpha$  je profilový parametr [-], který bývá  $\approx 1,98$ ,  $\Delta$  je relativní změna indexu lomu [-].

Na obr. 15 je vidět mechanismus šíření. GI vlákna mají lepší parametry a díky fokusaci mohou zlepšit vlastnosti kabelu z hlediska disperze.



**Obr. 15: Mechanismus vedení v GI vlákne**

Tyto uvedené typy optických kabelů je možné kombinovat a můžeme, tedy vytvořit širokou škálu kabelů s různými parametry, zejména materiálovými. Nejčastějšími typy bývají kabely SM-SI (single mode-step index) a MM-GI (multi mode-gradient index), viz. [5], str. 34-35.

**Negativní vlivy (produkty), které ovlivňují přenos optických kabelů**-Tyto jevy můžeme rozdělit na ztráty útlumem a disperzi, které si probereme detailněji.

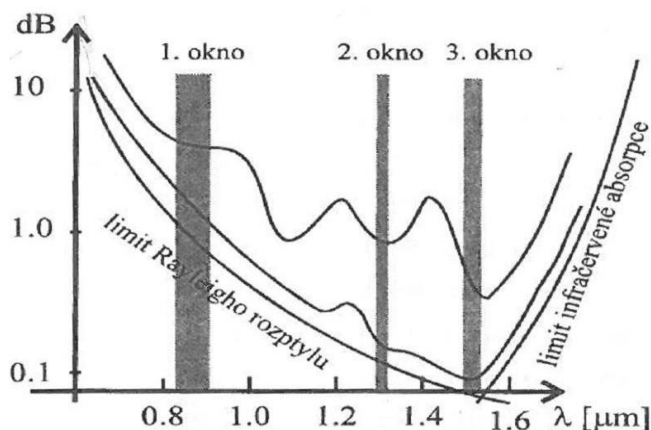
**Útlum**-Šířící se paprsek je zásadní měrou ovlivňován útlumem, neboť prostředí, kterým se šíří není bezztrátové. Útlum ovlivňuje amplitudu a puls přenášeného signálu a způsobuje deformaci signálu. Je to v podstatě, rozdíl síly signálu na jednom konci oproti druhému konci. Čím menší je útlum, tím lepší je přenos. Útlum měříme v decibelech na kilometr. Výkon šířící se ve vlákne (na podélné

souřadnici) můžeme definovat vztahem  $P \approx e^{-\alpha z}$ ,  $z$  je osa  $z$  a  $\alpha$  je koeficient útlumu, který zahrnuje všechny druhy ztrát a můžeme ho rozvést na vztah:

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_M + \alpha_O \quad (2-30)$$

kde  $\alpha_A$  je koeficient absorpce,  $\alpha_R$  je koeficient Rayleighova rozptylu,  $\alpha_N$  je koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách,  $\alpha_M$  je koeficient rozptylu na mikroohybech,  $\alpha_O$  je koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích.

**Absorpční ztráty (koeficient  $\alpha_A$ )-** Jedná se především o nečistoty, které se do materiálu dostanou při výrobním procesu (jedná se o ionty kovů a vody), ale také při manipulaci jako je například převoz nebo pokládka (jako Fe,Cu,Cr,Ni,V). Tyto prvky, pak při určitých kmitočtech rezonují, čímž vytvářejí tepelné ztráty. Absorpční pásy  $\text{SiO}_2$  jsou v ultrafialové oblasti a v infračervené oblasti (obr. 16), jsou to tzv. vibrační přechody. U OH iontů je maximum základní vibrační absorpce v infračervené oblasti při vlnové délce  $\lambda = 2,74\mu\text{m}$ , nicméně toto je mimo pásmo, které je používáno pro přenos (viz. předchozí stránky). Ovšem vyšší harmonické složky tvoří absorpci na vlnových délkách  $0,95\mu\text{m}$ ,  $1,25\mu\text{m}$  a  $1,4\mu\text{m}$ , v blízkosti prvního, druhého a třetího komunikačního okna. Útlum v těchto oblastech dosahuje maxima.



Obr. 16: Komunikační okna

Zdroj: [3], str. 101

**Ztráty rozptylem (koeficient  $\alpha_R$ )-** Opět způsobeny především při výrobě, kdy při tavení oxidu křemičitého vzniká amorfni struktura (látky v pevném skupenství, charakteristické tím, že nemají pravidelnou krystalickou amorfni strukturu), kde jsou molekuly nahodile rozmístěny. Tyto nehomogenity způsobují náhodné změny indexu lomu v materiálu. Pokud tyto lokální změny hustoty jsou v porovnání s vlnovou délkou malé, pak se jedná o Rayleighova ztráty a jejich závislost na vlnové délce lze vyjádřit vztahem  $\alpha_R \approx \lambda^{-4}$ . Tyto ztráty převažují především u krátkých vlnových délek, bohužel tento rozptyl je všudypřítomný a neodstranitelný, nicméně se dá redukovat na velmi malé hodnoty, např. u fluoridozinkonátových vláken se dostáváme pod hodnotu  $10^{-2}$  dB/km při vlnové délce zhruba  $2,55\mu\text{m}$ . Pokud je velikost výše uvedených mikronehomogenit srovnatelná v porovnání s vlnovou délkou, pak hovoříme o tzv. Mieho ztrátách, které jsou úměrné  $\lambda^{-m}$ , kde  $m < 4$ .

**Makroskopické neregularity (koeficient  $\alpha_N$ )-** Zde mluvíme o makronečistotách jako jsou např. bublinky, trhliny v materiálu, poruchy tvaru, eliptičnosti a excentricity jádra atd. způsobující

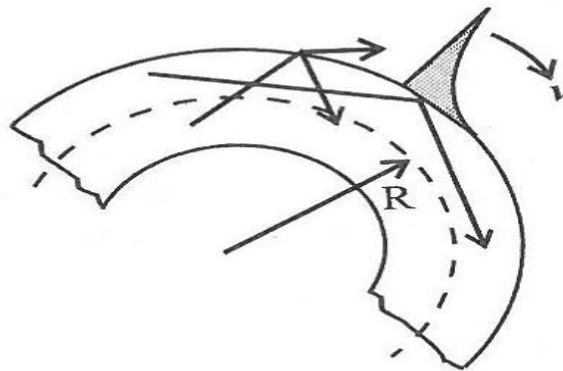
nehomogenitu optického vlákna. Jako výše uvedené ztráty i tyto se dají se zlepšující technologií minimalizovat a téměř úplně odstranit.

**Ztráty na mikroohybech (koeficient  $\alpha_M$ )**-Jedná se o poruchy přímočarosti osy vlnovodu. Opět jsou vytvořeny při výrobě a dále působením okolních vlivů uvnitř kabelu při provozu. Nutno dodat, že se jedná o náhodné jevy, které není možné vysledovat jinak, než statisticky.

**Ztráty na ohybech vláken (koeficient  $\alpha_O$ )**-Dány instalací, např. při spojení vlákna se zdrojem, detektorem, u spojek apod. v rozvodnách a atd. Optické vlákno je v určitých úsecích ohnuto. Toto ohnutí musí být samozřejmě v toleranci dané vztahem (tzv. kritický poloměr):

$$R_k = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \quad (2-31)$$

kde  $n_1[-]$  je index lomu jádra,  $n_2[-]$  je index lomu pláště a  $\lambda [nm]$  je vlnová délka paprsku.



Obr. 17: Ohyb vlákna

Zdroj:[3], str. 102 obr. 3.4.2

Vlákna, tedy nesmí být ohnuta přes tuto dovoleno mez, jednak z důvodu své křehkosti a pak z důvodu vyzářování své energie do pláště. Tento jev je zobrazen na obr. 17. Do těchto ztrát můžeme dále započítat i ztráty dané při spojování vláken, jelikož optické vlákno může být několik kilometrů dlouhé (v případě podmorských spojů i několik tisíc kilometrů), je nutné ho po určitých úsecích spojit spojku. Při nejvyšších svarech dochází ke ztrátám cca 0,1 dB. U zmíněných podmorských typů se dále používají, tzv. opakovače (repeater), které mají za úkol zrekonstruovat deformovaný signál a převést ho dále.

(Zdroj: [3],str.100-102 a [4], str. 45-48)

**Disperze**-(Deformace signálu) Projevuje se rozptylem, neboli časovým rozšířením resp. zpožděním signálu. Je způsobena rozdílnými fázovými i skupinovými rychlostmi složek signálů (vidů, frekvenčních složek). Popsána je disperzním koeficientem. Nejvíce limitující je pro vysokorychlostní přenosy s velkou přenosovou kapacitou. Rozšiřováním pulsů signálu může dojít v určité vzdálenosti k jejich protnutí a vzniká, tak mezisymbolová interference a tím vzrůstá chybovost celého přenosu. Tím dochází i k deformaci pulsů. Základní disperzi můžeme rozdělit na chromatickou (která se dále rozděluje na materiálovou (závislost  $n(\lambda)$ ) a vlnododovou ( $\beta(\lambda)$ ) a vidovou ( $\beta(m)$ ). Kde  $\beta$  je fázová konstanta [ $m^{-1}$ ] a  $m$  je počet vidů.



**Materiálová disperze**-Je způsobena závislostí grupové rychlosti šíření na vlnové délce. Pokud je tato změna dána materiálovými vlastnostmi, pak hovoříme o materiálové disperzi. Uvažujme teď příklad, kdy vstupující signál je rozdělen do dvou složek s odlišnými vlnovými délkami  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  a rychlostmi, vlivem toho je signál deformován a dojde k jeho rozšíření. Označme si vstupní puls jako  $\lambda$  a puls na konci myšleného úseku jako  $\lambda + \Delta\lambda$ . Je-li skupinová rychlost při nosném kmitočtu  $f$  rovna  $v_s$ , pak čas, který potřebuje vlna k uběhnutí jednotkové vzdálenosti, neboli skupinové zpoždění je

$$t_s(\lambda) = \frac{1}{v_s(\lambda)} = \frac{N}{c_0} = \frac{1}{c_0} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad [\text{s/m}] \quad (2-32)$$

kde  $t_s$  je skupinové zpoždění (doba náběhu systému) [s],  $v_s$  je skupinová rychlost šíření [m/s],  $N$  je skupinový index lomu [-],  $c_0$  je rychlost světla ve vakuu [m/s] a  $n$  je index lomu [-]  
 $N$  při vlnové délce  $\lambda + \Delta\lambda$  aproximujeme prvými dvěma členy Taylorova rozvoje a dostaneme

$$t_s(\lambda + \Delta\lambda) = t_s(\lambda) + \frac{dt_s}{d\lambda} \Delta\lambda \quad [\text{s/m}] \quad (2-33)$$

$$\text{A pak rozdíl těchto dvou zpoždění je } \Delta\tau = t_s(\lambda + \Delta\lambda) - t_s(\lambda) = \frac{dt_s}{d\lambda} \Delta\lambda \quad (2-34)$$

Tento rozdíl skupinových rychlostí vyjadřuje rozšíření signálu v polovině amplitudy. Z rovnice (2-32) pak vypočteme

$$\Delta\tau_s = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{n}{c_0} - \frac{\lambda}{c_0} \frac{dn}{d\lambda} \right) \Delta\lambda = -\frac{1}{c_0} \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda = -D_m \Delta\lambda \quad [\text{s/m}] \quad (2-35)$$

Veličinu  $D_m = \frac{1}{c_0} \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2}$  [ps/(nm \* km)] nazýváme koeficient materiálové disperze.

Ze vztahu vidíme, že při zvyšování vlnové délky nám klesá koeficient materiálové disperze, tzn. že pro nejrychlejší přenosy se snažíme mít co největší vlnovou délku (zhruba 1550 nm). [3]

**Vlnovodová disperze**-Nastává současně s materiálovou disperzí a způsobuje jako materiálová disperze skupinové zpoždění složek signálu. Pro rozdíl skupinových složek vlnovodové disperze pak platí:

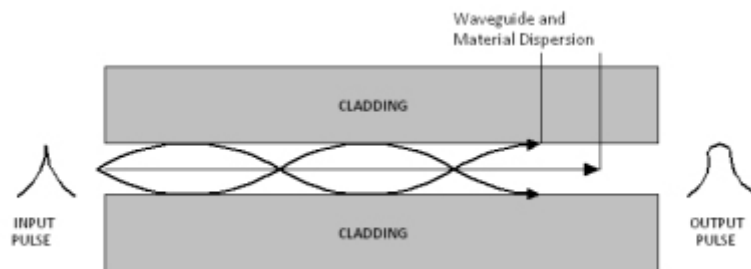
$$\Delta\tau_s = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{n_{ef}}{c_0} - \frac{\lambda}{c_0} \frac{dn_{ef}}{d\lambda} \right) = -\frac{1}{c_0} \lambda \frac{d^2n_{ef}}{d\lambda^2} \Delta\lambda = -D_v \Delta\lambda \quad (2-36)$$

Kde:

$n_{ef}$  je efektivní index lomu, definovaný jako  $n_{ef} = \frac{\beta}{k_0}$  (2-37),  $k_0$  je konstanta šíření

$D_v$  je koeficient vlnovodové disperze

**Vidová disperze**-Tento typ disperze se uplatňuje u vícevidových vláken (MM), kde se šíří více vidů současně. Energie je zde "rozsypána" do jednotlivých vidů s různými rychlostmi (viz kapitola o vícevidových vláknech), tento jev je zachycen na následujícím obrázku 18. [3]



Obr. 18: Vidová disperze

Zdroj: <http://sanhealthcheck.com/?q=node/8>

#### 4.4 Měření teploty pomocí optických kabelů

Mezi tyto senzory teploty patří tzv. vlákna typu DTS (Distributed Temperature Sensing). V energetice je využíváme zejména pro měření teplotního profilu silových kabelů, kdy je optický kabel buď zabudován v plášti silového kabelu nebo je natažen podél kabelu (viz obr. 20), tak aby dokázal snímat jeho tepelné účinky. Další využití má například u transformátorů, kde se používá ke stejným účelům, dále například v geotechnice strojírenství nebo stavebnictví. U systémů DTSS využívající Brillouinův rozptyl je možné měřit dále i mechanické vlivy. Tyto systémy využívají optické vlákno jako snímač teploty, který dokáže během jediného měření získat tisíce hodnot, a tím dokáže určit celý teplotní profil. Princip je založen na tom, že je do optického vlákna navázán paprsek, jehož určitá část se vrací zpět a analyzuje se ve vyhodnocovací jednotce, tato metoda se nazývá OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), které využívá Ramanova a Brillouinova rozptylu, což jsou tzv. Nelineární rozptyly.

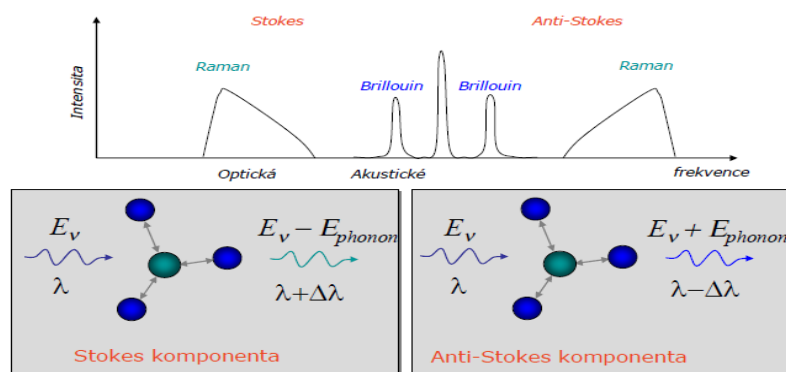
**Nelineární rozptyl**-Je důsledkem interakce záření (fotonů) a hmoty materiálu. Po interakci mohou nastat tyto situace, dle [5],str. 72-73):

1. Pohlcení fotonu a přeměně jeho energie na teplo, konverze foton-fonon (kvantová jednotka termálních kmitů)
2. Pohlcení fotonu a přechod atomu do vyššího energetického stavu, tj. přechod elektronu do vyšší kvantové hladiny
3. Foton není atomem pohlcen a prochází dál-bez interakce
4. Trajektorie fotonu je ovlivněna tak, že se změní jeho směr, ale jeho energie a potažmo frekvence záření se nemění-jedná se o elastický, lineární rozptyl (Mieův, Rayleighův)
5. Trajektorie fotonu je ovlivněna tak, že se změní jeho směr, tak i jeho energie-jde o neelastický rozptyl
6. Dojde k stimulovanému přechodu elektronu z vyšší hladiny na nižší se současným vyzářením nového koherentního fotonu.

Během všech těchto interakcí musí být splněna podmínka zákona zachování energie a zákona zachování momentů hybnosti částic, které do interakce vstupují. Důležitým poznatkem je fakt, že Ramanův a Brillouinův rozptyl způsobují vznik záření na jiných vlnových délkách, které ale do vlákna nikdy nevstoupily. Vyplyvá to z bodu 5., kdy při střetu fotonu s atomem dojde ke vzniku nového fotonu s jinou energií, a též i jinou vlnovou délkou podle vztahu  $E = h \cdot \nu$ , kde  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence. Tato nově vzniklá energie může být větší i menší než energie fotonu, který do vlákna

původně vstoupil. Pokud je energie větší znamená to, že původní atom přišel o část své energie, kterou předal nově vzniklému fotonu, tak aby platil zákon zachování energie. Při této interakci foton odebírá část kmitající energie atomu (fonon), tzn. v podstatě se ochladí a zpomalí se jeho pohyb a odebere se část jeho kinetické energie, která je reprezentována tepelnou energií. Záření vzniklé při tomto jevu říkáme anti-Stokesovo záření.

Daleko častějším jevem je stav kdy má větší vlnovou délku tzn. nižší energii. Zde se při interakci předá část energie atomu. Toto záření nazýváme Stokesovo záření. (zdroj: [5], str. 72-73)



Obr. 19: Ramanův a Brillouinův rozptyl

Zdroj:[15]

**Brillouinův rozptyl**-Liší se oproti Ramanovu rozptylu typem interakce s hmotou. Vysoká intenzita záření vede ke vzniku akustické mechanické vlny (v případě teplotních měření jsou tyto mechanické vlny, teplotně závislé), která se šíří vláknem a od níž se záření odráží zpět, toto vede k převážně zpětnému rozptylu. Toto nově vzniklé záření se od původního liší velice málo, v řádech několika gigahertzů. Nicméně frekvenční posuv vracejícího paprsku v sobě má zakódovanou informaci o lokální teplotě v každém místě kabelu, přičemž přesné určení se stanoví z informace, kdy se světelný paprsek vrátí z určitého místa.

**Ramanův rozptyl**-Zde je interakce zajišťována přímo mezi fotonem a kmitajícími atomy nebo molekulami materiálu. Díky jejich vysoké frekvenci je pak vzniklé pásmo posunuto o několik terahertzů, a dále je větší o šířku rozsahu vlnových délek.

Praktické uplatnění snímání teploty optickým kabelem vidíme na obrázku 20, kde je patrné upevnění optického kabelu k jedné fázi kabelu 110 kV a dále prosmýčování optického kabelu přes spojky všech tří fází. Nakalibrováním trasy je možné sledovat teplotu v každém místě trasy včetně teploty jednotlivých spojek.



**Obr. 20: Optický kabel jako snímač teploty fáze silového kabelu**

## Kapitola 4: Přenos tepla

### 5.1 Úvod

V této kapitole jsem se pokusil shrnout základní tepelné vlastnosti a přenos tepla pro jednotlivá prostředí pro silová kabelová vedení. Silové kabely jsou uloženy přímo v zemi nebo na ně působí okolní vzduch např. v chráničkách nebo v kolektorech. Přenos tepla u silových kabelů je zásadní měrou ovlivňován prostředím, ve kterém jsou uloženy, což hraje roli především z hlediska bezpečnosti, ale dále také např. hospodárného provozu apod.

**Rovnice sdílení tepla**-V kabelu je sdílení tepla popsáno Fourier-Kirhoffovou rovnicí, následovně:

$$\rho(\vec{r}) \cdot c(\vec{r}) \cdot \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\vec{r}) \cdot \nabla T(\vec{r}, t)) + Q_V \quad (3-1)$$

Kde:

$\nabla$  je operátor nabla [ $m^{-1}$ ]

$\vec{r}$  je polohový vektor [ $m^{-1}$ ]

$\lambda$  je tepelná vodivost [ $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ]

$\rho$  je hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$c$  je měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T$  je teplota tělesa, v našem případě kabelu [ $^{\circ}C$ ]

$Q_V$  je objemová hustota tepelného výkonu, které vzniká Jouleovými ztrátami podle vzorce

$P = I^2 \cdot R/V$  [ $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ], tento výkon vzniká v jádře a stínění a proto ho můžeme zapsat ve tvaru:

$$Q_V = Q_{Vjádřo} + Q_{Vstínění}$$

Tuto rovnici numericky řeší program Agros 2D, kde za vodič dosadíme  $Q_V$  (které jsem si vypočítal pomocí programu Wolfram Mathematica ze známé hodnoty proudu) a dále  $c$ ,  $\rho$  a  $\lambda$ . Pro přehled uvádím tyto hodnoty pro hliník a měď v Tabulce 4.

### 5.2 Přenos tepla vedením

K tomuto jevu dochází v pevných látkách. Přenos tepla je zde zajištěn ve směru klesající teploty mezi bezprostředně sousedícími částicemi v tělese. V tuhém tělese je tedy množství tepla úměrné teplotnímu gradientu, který je podle [6] na str. 13, definován jako:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \quad [^{\circ}C/m] \quad (3-2)$$

dále je pak úměrné času a průtokové ploše kolmé na směr proudění tepla. Pro množství tepla protékajícího jednotkou plochy bude platit:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (3-3)$$

Kde:

$q$  je tepelný tok [W]

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$t$  je teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Tento zákon je základním zákonem vedení tepla a nazýváme ho Fourierovým zákonem.

**Součinitel tepelné vodivosti (Tepelná vodivost)**-Tato fyzikální veličina vyjadřuje propustnost látky vůči teplu. Definujeme ji jako:

$$\lambda = -q / \text{grad } t \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (3-4)$$

Tepelná vodivost závisí na mnoha fyzikálních parametrech jako je například hustota, vlhkost, tlak atd., a proto je poměrně obtížné ji určit, tudíž její hodnotu bereme z technických tabulek nebo například v případě chrániček provedeme výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti za použití výpočetního programu Wolfram Mathematica a Agros 2D.

### 5.3 Přenos tepla sáláním

Je jedním ze způsobů jakým se šíří teplo u silových kabelů uložených v kolektorech či chráničkách. Přestup tepla sáláním souvisí se změnami vnitřní energie těles a tělesa pak vydávají záření, které je do prostoru vysíláno ve formě elektromagnetických vln, pokud dopadne toto záření na jiné těleso, dojde k pohlcení tohoto záření (teplota tohoto tělesa se zvýší), a také odražení části záření. Pohltivost a odrazivost materiálu jsou dané především jakostí daného materiálu a barvou povrchu. Pro absolutně bílé těleso platí, že se veškerá jeho energie odrazí, naopak pro absolutně černé těleso dojde k pohlcení. Výkon sáláním (radiací) obecně můžeme vyjádřit jako:

$$Q_r = \sigma \varepsilon S T^4 \quad (3-5)$$

Kde:

$\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta, jejíž hodnota je  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$\varepsilon$  je emisivita tělesa [-]

$T$  je teplota [K]

Kromě záření ze samotného tělesa, pak může být ještě pohlcováno záření z jiného tepelného zdroje s teplotou  $T_0$  a platí zde analogicky:  $Q_a = \sigma \varepsilon S T_0^4$ . V praktických aplikacích pak nastávají obě situace a vzorce můžeme upravit do tvaru:

$$Q = Q_r - Q_a = \sigma \varepsilon S (T^4 - T_0^4) \quad (3-6)$$

V našem případě, bereme jako model těleso (kabel), který na sebe samo nesálá a je uzavřen v druhém tělese (chránička). Výkon sáláním pak bude:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = S_1 \cdot \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (3-7)$$

$S_1$  je velikost povrchu řezu kabelu [ $m^2$ ],  $\varepsilon_1$  je emisivita kabelu [-]

$S_2$  je velikost povrchu řezu chráničkou [ $m^2$ ],  $\varepsilon_2$  je emisivita chráničky [-]

Pokud pro žílu platí, že  $\frac{S_1}{S_2} \rightarrow 0$  pak se vztah (3-7) zjednoduší na tvar:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = S_1 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-8)$$

Ve výpočtovém programu Agros 2D pro 2D modely pak počítáme v oblasti odpovídající vzduchové mezeře s tepelnou vodivostí, kterou označíme jako  $\lambda_{ekv}^{salani}$  a je řešením rovnice:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ekv}^{salani} (T_{kabel} - T_{chranička})}{\ln \left( \frac{d_{chranička}}{d_{kabel}} \right)} = \pi \cdot d_{chranička} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{kabel}^4 - T_{chranička}^4}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (3-9)$$

Zdroj: [7] kapitola 2.6

## 5.4 Přenos tepla konvekcí

K tomuto jevu dochází při styku pevného tělesa s kapalinou či plynem (v našem případě budeme předpokládat ideální plyn, tedy vzduch), zároveň dochází k ochlazení nebo naopak ohřívání tenké vrstvy tekutiny či plynu při stěně, pak záleží, zda-li je teplota povrchu pevného tělesa větší než teplota kapaliny nebo naopak. Tento teplotní rozdíl způsobí přirozené proudění neboli konvekci. Konvekci rozdělujeme na vynucenou, smíšenou a přirozenou, s posledně jmenovanou pak budeme počítat pro kabely uložené v zemi, chráničkách a kolektorech. Přenos tepla konvekcí obecně můžeme popsat následující rovnicí:

$$Q_c = \alpha S \Delta T \quad [W] \quad (3-10)$$

Kde:

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$S$  je plocha stěny tělesa [ $m^2$ ]

$\Delta T$  je rozdíl teplot ohříváné či ochlazované kapaliny [K]

Součinitel přestupu tepla udává, jaký tepelný výkon proudí z kapaliny do stěny tělesa nebo naopak o ploše  $1 m^2$  při teplotním rozdílu 1 K za dobu jedné sekundy. Velikost  $\alpha$  nelze obecně určit, ale musíme ho vypočítat pro různé druhy situací, protože velikost  $\alpha$  je určena celou řadou faktorů jako například rychlost proudění kapaliny, tepelnou vodivostí, kapacitou atd. Nicméně pro jednodušší aplikace se mohou její hodnoty nalézt ve vhodných fyzikálních tabulkách. (Zdroj: [8] str. 24-25)

## 5.5 Geologicko-tepelné vlastnosti zeminy

Tato kapitola zahrnuje hodnoty tepelných vlastností různých druhů zemin. Parametrem, který nejvíce ovlivňuje tepelné vlastnosti zeminy a přenos tepla je tepelná vodivost  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ], jak bude také vidět z výsledků měření v praktické části této bakalářské práce. Tato veličina naprosto zásadní měrou ovlivňuje tepelné vlastnosti kabelu, který je přímo uložený v zemi. Pro určité druhy zemin, i při plném proudovém zatížení nedojde k překročení nejvyšší dovolené teploty kabelu odpovídající  $90^\circ C$ , která je mezní a jejíž hodnota nesmí být po delší časový úsek překročena. Jinými slovy tyto druhy zemin jsou schopny „uchladit“ kabel tak, že výše zmíněná teplota není překročena, protože dochází k většímu odvodu tepla do okolní půdy. Tepelná vodivost je velmi závislá na pórovitosti a obsahu vody v půdě. Čím je zem kypřejší, tím je její vodivost menší, protože obsahuje větší množství vzduchu. V tabulce 6 můžeme vidět vybrané tepelné parametry jednotlivých zemin.

Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti zemin č.1

Zemina	$\lambda$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	$\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	$c$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
velmi vlhká půda	2,5	1900	1418
vlhká půda	1,4	1400	1836
mírně zvlhlá půda	1,0	1400	1836
suchá půda, řídké deště	0,5	800	1209
suchá půda, velmi řídké deště	0,4	800	1209

Kde:

$\lambda$  je tepelná vodivost,  $\rho$  je hustota a  $c$  je tepelná kapacita

Hodnoty z tabulky 7 jsem použil při měřeních a výpočtech tepelných vlastností kabelů uložených v zemi, mimo velmi vlhké půdy. Tyto hodnoty jsem získal z výpočtového programu Sichr pro NN energetické sítě, firmy OEZ Letohrad. Dále je možné tyto parametry získat například z normy ČSN EN ISO 13370, str. 8 tabulka 1-Tepelná vlastnosti zeminy, kterou uvádím níže (tabulka 7), nicméně tato norma se zabývá spíše přenosem tepla mezi budovami a zemínou a je určena spíše pro stavebnictví.



**Tabulka 7: Fyzikální vlastnosti zemin č.2**

Kategorie	Popis	$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\rho c$ [J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ]
1	hlíny a jíly	1,5	3,0.10 <sup>6</sup>
2	písky a štěrky	2	2,0.10 <sup>6</sup>
3	stejnorodá skála	3,5	2,0.10 <sup>6</sup>

Pro ukázkou uvádím ještě tabulku 8 z [10].

**Tabulka 8: Fyzikální vlastnosti zemin č.3**

<b>Magmatické horniny</b>	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$c$ [kWh.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]
bazalt	2600-3200	1,7	0,64-0,72
<b>Metamorfované horniny</b>			
mramor	2500-2800	2,1	0,56
<b>Sedimentární horniny</b>			
vápenec	2600-2700	2,8	0,58-0,67
pískovec	2600-2700	2,3	0,44-0,78
<b>Nezpevněné horniny</b>			
štěrk(suchý)	2700-2800	0,4	0,39-0,44
štěrk(nasycený vodou)	2700	1,8	0,67
písek(suchý)	2600-2700	0,4	0,61-0,81
písek(nasycený vodou)	2600-2700	2,4	0,42-0,44
jíl(suchý)		0,5	0,42-0,44
jíl(nasycený vodou)		1,7	0,44-0,94

Dalšími parametry ovlivňujícím tepelný přenos v zemi jsou tepelná kapacita a hustota. Platí, že čím větší má půda tepelnou kapacitu (tepelnou jímavost) či hustotu, tím pomaleji se ohřívá. Jak můžeme vidět z tabulky 7, největší tepelnou kapacitu (mimo velmi vlhkou půdu, pro kterou jsem nedělal simulace) má vlhká a mírně zvlhlá půda a proto se ohřeje za nejdelší čas. Obecně má suchá půda 3krát až 5krát menší tepelnou kapacitu než voda, tudíž tepelná kapacita půdy je závislá na obsahu vody v půdních pórech a dutinách.(Zdroj: [11])

## 5.6 Přenos tepla v zemi

Při tomto popisu vyjdeme ze zákona zachování energie a zákona zachování hmoty. Podle [10]: „Množství tepla naakumulovaného v zemině je určeno její teplotou. Tento vztah mezi teplotou a teplem definuje tepelná kapacita. Celkové množství tepla obsažené v zemním zásobníku pak přímo závisí na aktuální teplotě, objemu zásobníku, na objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacitě zeminy“.

$$Q = C \cdot T = V \cdot c \cdot \rho \cdot T \quad (3-11)$$

Kde:

$Q$  je teplo naakumulované v zemině [J]

$C$  je tepelná kapacita zeminy [J. K<sup>-1</sup>]

$T$  je aktuální teplota zeminy [K]

$c$  je měrná tepelná kapacita zeminy [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

$\rho$  je hustota zeminy [kg. m<sup>-3</sup>]

$V$  je objem zemního zásobníku [m<sup>3</sup>]

Jako aktuální teplotu zeminy jsem pro výpočty a měření volil teplotu 10°C. Dále je nutné si uvědomit, že samotná zem se skládá z pórů a z pevné fáze. Póry mohou být vyplněny vodou nebo kombinací vody a vzduchu. Z tohoto důvodu definujeme rovnici (3-12), kde měrná tepelná kapacita závisí na pórovitosti, mineralogickém složení pevné fáze a na stupni nasycení pórů vzduchem a vodou. Pro horniny, které jsou nasycené vodou, určíme  $c$  takto:

$$c = S_w \cdot n \cdot c_w + S_a \cdot n \cdot c_a + c_s \cdot (1 - n) \quad (3-12)$$

Kde:

$c_w$  je měrná tepelná kapacita vody [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

$c_a$  je měrná tepelná kapacita vzduchu [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

$c_s$  je měrná tepelná kapacita pevné fáze [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

$S_w$  je stupeň nasycení vodou [-]

$S_a$  je stupeň nasycení vzduchem [-]

$n$  je pórovitost horninového prostředí [-]

$$S_w = \frac{V_w}{V_p}; S_a = \frac{V_a}{V_p}; S_w + S_a = 1 \quad (3-13)$$

$V_w$  je objem vody [m<sup>3</sup>]

$V_a$  je objem vzduchu [m<sup>3</sup>]

$V_p$  je objem pórů [m<sup>3</sup>]

V zemině dochází k dvěma způsobům přenosu tepla, a to vedením a konvekcí. V případě vedení (kondukcí) tepla dohází k tomu, že je teplo transportováno z oblasti s vyšší tepelnou energií do oblasti s nižší tepelnou energií (jak již bylo uvedeno v podkapitole Přenos tepla vedením). Vlivem malé vzduchové mezery při styku kabelu, a dále díky pórovitosti a vodě v zemině dochází i ke konvekci tepla. Přenos tepla vedením je definován Fourierovým zákonem stejně jako v podkapitole Přenos tepla vedením, který můžeme přepsat na:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3-14)$$

Kde:

$q$  je hustota tepelného toku vedením [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$\lambda$  je tepelná vodivost [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]

$\text{grad}(T)$  je teplotní gradient [ $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

$T$  je teplota zeminy [ $\text{K}$ ]

$\vec{n}$  je normála [ $\text{m}$ ]

Pro homogenní izotropní prostředí se šíření tepla popíše časovým a prostorovým rozložením teploty v tomto prostředí pomocí diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3-15)$$

Kde:

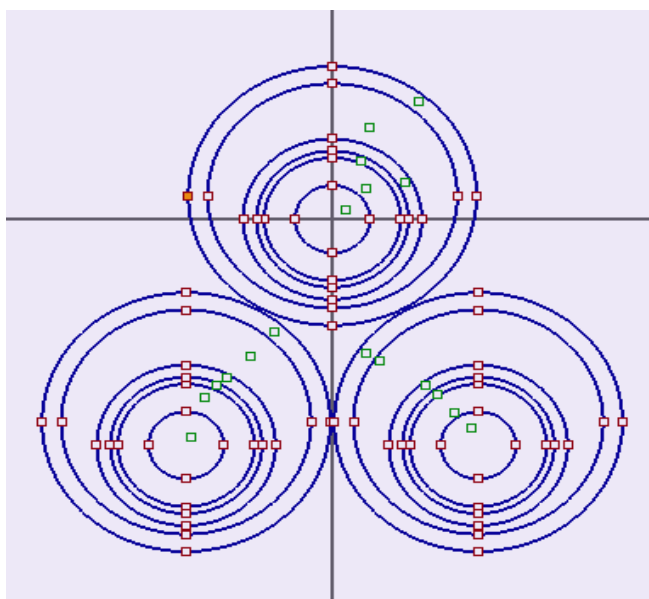
$T$  je teplota zeminy [ $\text{K}$ ]

$t$  je čas [ $\text{s}$ ]

$a$  je teplotní vodivost [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

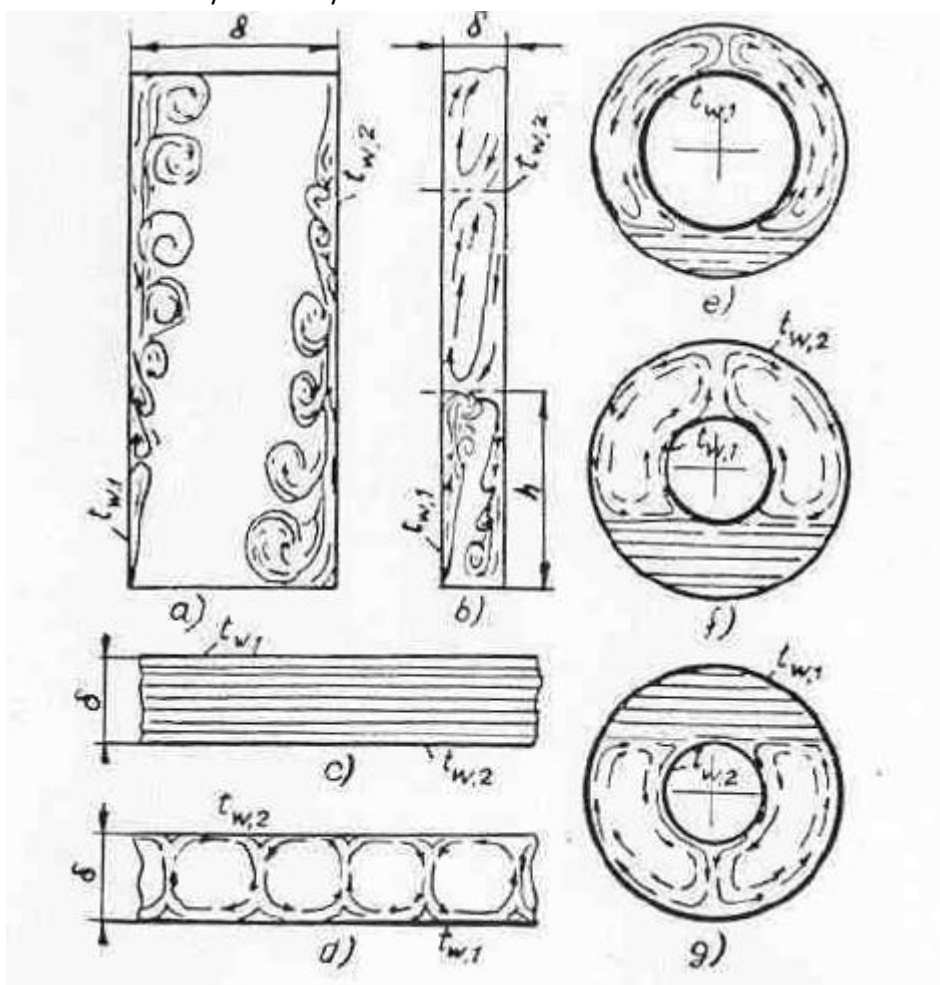
## 5.7 Přenos tepla v chráničkách

Uvažujeme kabel, který je uložen v chráničce a dotýká se dna chráničky (viz. Obrázek 21), pro praktické výpočty jsem udělal korekci uložení tak, že jsem kabel uvažoval symetricky vycentrovaný do středu chráničky. Přenos tepla je zde zajištěn přirozenou konvekcí a sáláním.



Obr. 21: Kabely v chráničkách

Pro další úvahy vyjdeme z teoretických poznatků z [6] str. 81-83 kapitola 13. Přestup tepla do omezeného prostoru. Pro konvekci v malém prostoru (omezeném a uzavřeném jako je náš kabel v chráničkách) nemůžeme oddělit od sebe ohřívání a ochlazování kapaliny (vzduchu), a proto celý tento proces bereme jako děj, který probíhá v uzavřeném prostoru. Podmínky pro proudění stoupající a klesající kapaliny a tím přestup tepla je poměrně složitý a závisí na celé řadě fyzikálních parametrů, mimo jiné i na rozměrech a tvaru prostoru. Nyní vyjdeme z teoretického předpokladu pro proudění kapaliny ve vodorovných mezerách a kanálech, kde proudění závisí na vzájemné poloze ohřívacích a chladících povrchů a na jejich vzdálenosti. Pokud je ohřívací plocha nahoře, cirkulace nevznikne (obr. 22 c). Pokud je ohřívací plocha dole, vzniknou stoupající a klesající proudy, které se střídají (obr. 22 d). Uvažujme případ pro válcové a kulové mezery (což opět odpovídá našemu kabelu), kde probíhá cirkulace kapaliny či vzduchu (obr. 22 e a 22 f). Jak uvádí výše zmíněná publikace, cirkulace se objeví vždy jen nad dolním okrajem ohřívajícího povrchu, kdežto dole zůstává tekutina (plyn) v klidu. Pokud však ohřívající plochou je vnější válcový povrch, má cirkulace tvar podle obr. 22 g a zasahuje do celého prostoru pod horním okrajem chladícího povrchu. V porovnání s prouděním tepla v neomezeném prostoru, je tento typ proudění tepla nesrovnatelně složitější. Proto je prakticky nemožné stanovit součinitele přestupu tepla s ohledem na jejich cirkulaci. Proto pro další počítání a zpracování výsledků, budeme uvažovat přestup tepla vedení, který je zároveň jednodušší a zavedeme tzv. **ekvivalentní tepelnou vodivost**  $\lambda_{ekv}$ . Toto zavedení nám umožňuje to, že nemusíme zvlášť určovat hodnoty  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  pro povrch kabelu a stěny chráničky.



Obr. 22: Cirkulace vzduchu v omezeném prostoru

Sdílení tepla se zde počítá vedením, kde se uvažuje zvýšená tepelná vodivost vzduchu podle vzorce:

$$\lambda_{ekv}^{konvekce} = \varepsilon_k \cdot \lambda \quad (3-16)$$

Kde:

$\lambda$  je tepelná vodivost kapaliny [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\varepsilon_k$  je součinitel konvekce

Pro součinitel konvekce platí:

$$\varepsilon_k = 0,105(Pr \cdot Gr)^{0,3} \quad \text{pro } 10^3 \leq Pr \cdot Gr \leq 10^6 \quad (3-17)$$

$$\varepsilon_k = 0,4 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0,2} \quad \text{pro } 10^6 \leq Pr \cdot Gr \leq 10^{10} \quad (3-18)$$

Kde:

$Pr$  je Prandtlovo číslo, což je bezrozměrné číslo, které používáme při řešení přestupu tepla, přičemž je závislé pouze na fyzikálních vlastnostech tekutiny, můžeme ho vyjádřit vztahem  $Pr = \frac{\nu}{a}$  (3-19)

$\nu$  je kinematická viskozita kapaliny při střední teplotě mezi teplotou povrchu kabelu a kapaliny (vzduchu) [ $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ]

$a$  je teplotní vodivost  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  (3-20), (při střední teplotě mezi teplotou stěny a vzduchu)

Pozn.: Pro vzduch se obvykle uvádí hodnota  $Pr = 0,7$ . Dále lze doporučit pro určení koeficientu např. zdroj bych doporučil pro určení koeficientu například webové stránky: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>.

$Gr$  je Grashofovo číslo, které je také bezrozměrné a vyjadřuje samovolné proudění dané rozdílem hustoty teplého a studeného vzduchu. Je definováno vztahem:  $Gr = \frac{\beta \Delta T g L^3}{\nu^2}$  (3-21)

$\beta$  je teplotní objemová roztažnost kapaliny při střední teplotě mezi teplotou stěny a vzduchu (kapaliny)

$T_{stř} = \frac{T_{stěna} + T_{kapalina}}{2}$  (3-22), a pro ideální plyn (vzduch) platí:  $\beta = 1/T_{stř}$  [ $1/\text{K}$ ]. (3-23)

$\Delta T$  je absolutní hodnota rozdílu teplot povrchu kabelu a vzduchu

$g$  je gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$L$  je charakteristický rozměr tělesa, pro kabel nebo jednu žílu umístěném v chrániče vezmeme charakteristický rozměr podle vztahu  $L = \frac{4 \cdot S}{o}$  (3-24)

Kde:  $S$  je plocha, která odpovídá ploše mezi kabelem a chráničkou v příčném řezu [ $\text{m}^2$ ],  $o$  je obvod řezu chráničky [ $\text{m}$ ]

Pokud nastane případ, že  $Pr \cdot Gr < 10^3$  tak se konvekce neuplatní a vezmeme  $\varepsilon_k = 1$

Zdroj: [7]

## 5.8 Přenos tepla v kolektorech

Jak již bylo řečeno v podkapitole Přenos tepla konvekcí, jedná se zde o konvekci přirozenou a sálání (vysvětleno v podkapitole Přenos tepla sáláním). V případě konvekce jsem použil vztah  $Q_c = \alpha S \Delta T$ . Pro další výpočty, tedy musíme najít vhodný postup. Součinitel teplotní vodivosti určíme přepočtem naměřených hodnot pro zvolenou tekutinu a uspořádání s využití teorie podobnosti. Aby byl přepočet možný mezi různě velkými objekty v tekutinách, musí platit podmínka rovnosti Nusseltových čísel:

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot L_1}{\lambda_1} = \frac{\alpha_2 \cdot L_2}{\lambda_2} = Nu_2 \quad (3-25)$$

Kde:

$L$  je charakteristický rozměr tělesa

$\lambda$  je vlnová délka

Nusseltovo číslo je bezrozměrné číslo, které slouží právě k určení součinitele teplotní vodivosti. Při znalosti  $Nu$ , pak můžeme  $\alpha$  určit takto:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (3-26)$$

Pozn: Pokud je uvažována střední hodnota Nusseltova čísla, je výsledkem „alfa střední“, pokud místní hodnota, získáme „alfa místní“.

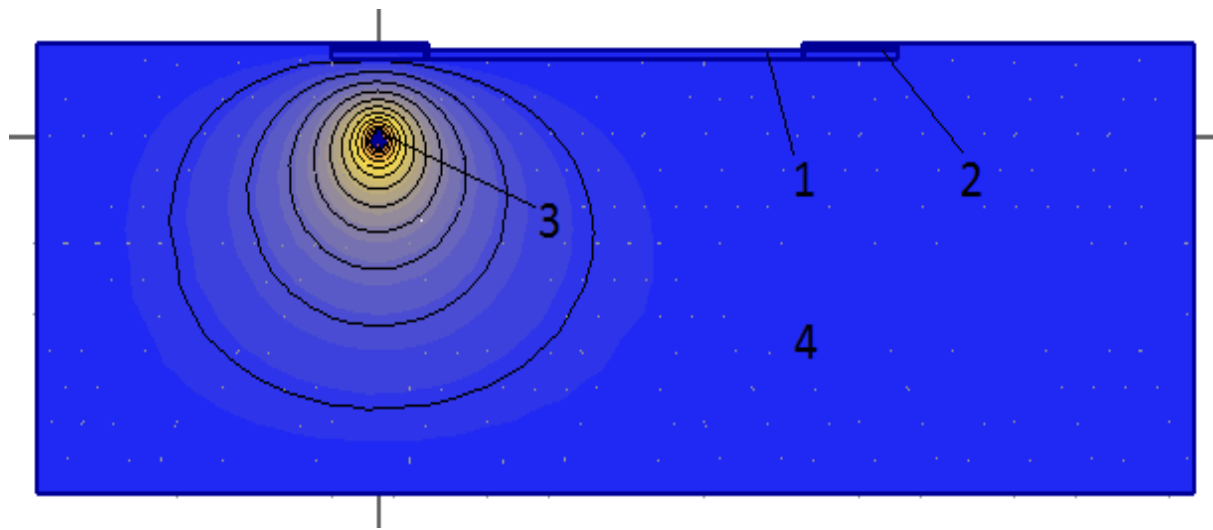
Zdroj: [7]

## Kapitola 6: Praktická část

V této kapitole jsem se zabýval praktickými simulacemi a výpočty tepelných účinků silových kabelů, a to v uložení v zemi, v chráničkách a v kolektorech. Zároveň jsem simuloval situaci se zdrojem tepla- teplovodem v blízkosti kabelů u všech geometrií a typů půd. Všechny simulace jsem provedl pro silové kabelové vedení 110 kV s hliníkovým a měděným jádrem se stejnými průřezy. Zvolil jsem kabel o jmenovitém průřezu vodiče 1000 mm<sup>2</sup>, z katalogu firmy Brugg Cables. Simulace a výpočty všech stavů jsem provedl ve výpočetních programech Agros 2D a Wolfram Mathematica.

### 6.1 Uložení v zemi

Uspořádání kabelu v zemi vidíme na obrázku 23. Simulované kabely jsou uloženy 1 m pod chodníkem.



Obr. 23: Modelová situace simulovaných kabelů

Legenda: 1-Silnice, 2-chodník, 3-kabely, 4-zemina

#### 6.1.1 Simulace teploty kabelu při změně zatížení

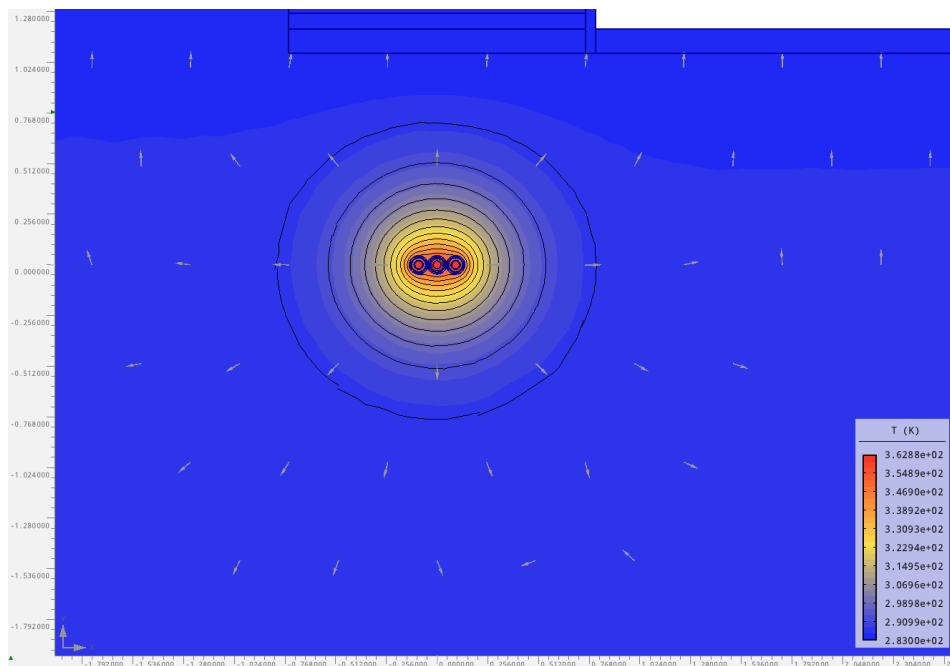
V této části jsem provedl několik simulací. Kabel jsem vždy zatěžoval po dobu 20 tisíc sekund (zhruba 5 a půl hodiny) konstantním výkonem při polovičním proudovém zatížení. Po uplynutí této doby jsem kabel zatížil proudem, který odpovídal maximálnímu proudovému zatížení dané výrobcem. V této simulaci mě zajímal čas, kdy dojde k překročení kritické teploty 90°C ≈ 353 K, pro různá seskupení vodičů (vedle sebe, v trojúhelníku a s mezerou) a pro různé půdní typy viz. tabulka 7, z této tabulky jsem čerpal hodnoty tepelné vodivosti zeminy  $\lambda$  0,4 a 0,5 W/(m.K). Pro provozování vedení jde o nejhorší stavy z hlediska tepelného dimenzování. Pro ostatní hodnoty  $\lambda$  se nepodařilo překročit kritickou teplotu v žádném seskupení.

Pozn.: Z praktických důvodů jsem pro různé typy zemin a materiál zavedl v grafech a tabulkách značení tímto způsobem: 1. Typ materiálu 2. Tepelná vodivost (bez jednotek) 3. Uspořádání kabelů 4. Teplovod. Například, hliníkový kabel s tepelnou vodivostí zeminy 0,4 W/(m.K), s uspořádáním vodičů vedle sebe a teplovodem je následující: al 0,4 vedle sebe+teplvod.

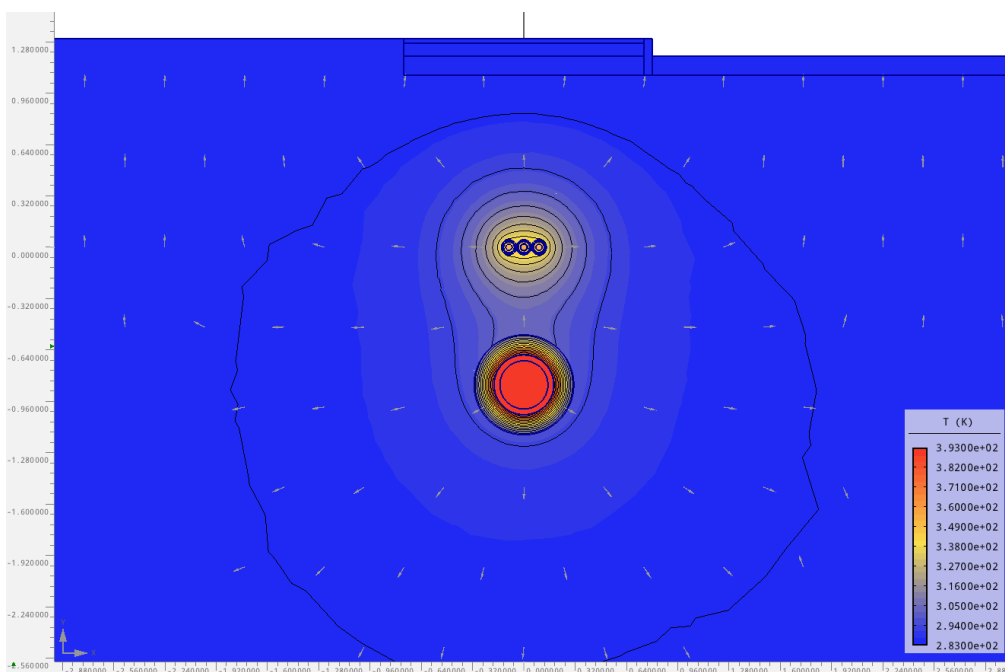
#### Simulace č.1-Tři hliníkové vodiče vedle sebe●●●

V této simulaci (viz obr. 24) jsem kabel zatěžoval jak je uvedeno výše, tedy polovičním proudovým zatížením, a po 20 tisíci sekundách jsem ho zatížil maximálním proudovým zatížením, pro hliník odpovídající 791 A. V programu Wolfram Mathematica jsem následně vytvořil funkci, která podle

vzorce  $P = \frac{R \cdot I^2}{V}$  převedla proud na výkon. Tento výkon jsem dále dosadil do programu Agros 2D, který řeší tepelné simulace.



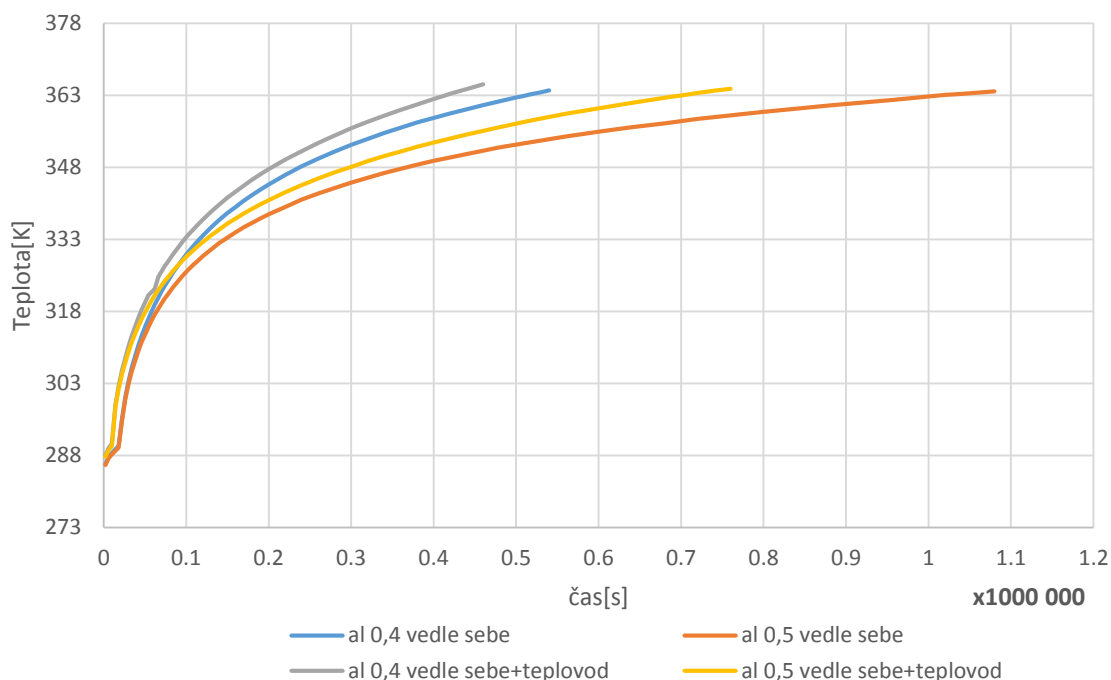
Obr. 24: Uspořádání kabelů vedle sebe



Obr. 25: Uspořádání kabelů vedle sebe s teplovodem



## Teplota hliníkového vodiče v seskupení vedle sebe



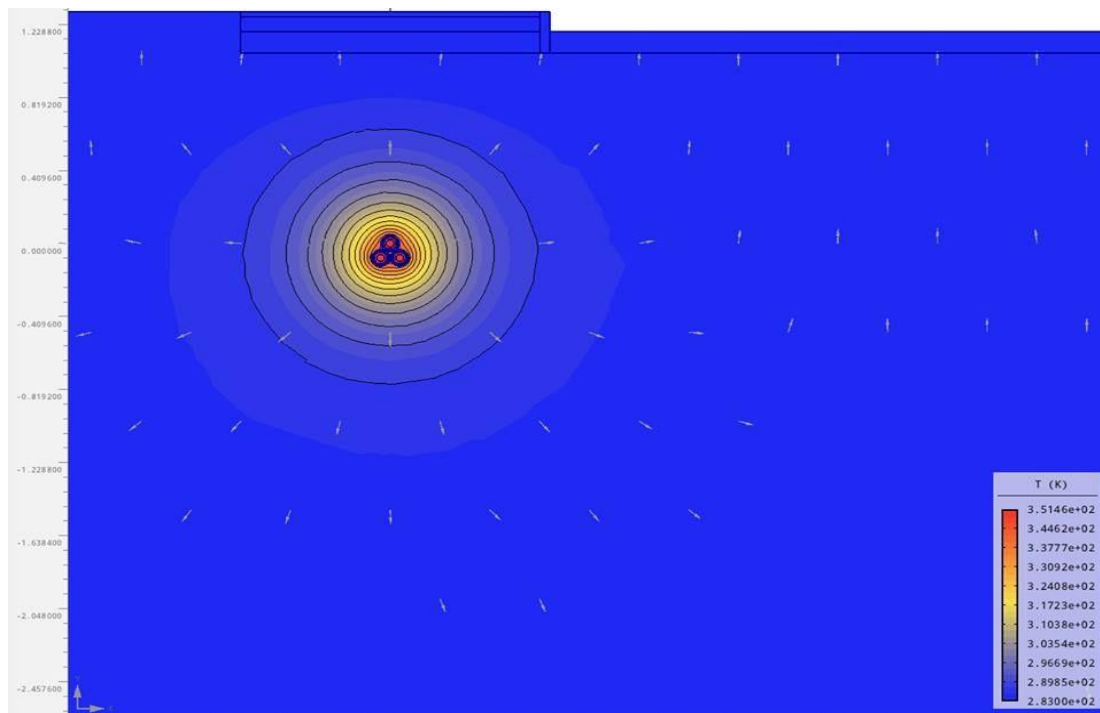
Graf 1

Pro tuto simulaci jsem zvolil čtyři následující situace: 1. Hliníkový vodič s tepelnou vodivostí rovnající se hodnotě  $\lambda = 0,4 \text{ W/(m.K)}$ , 2. Hliníkový vodič s  $\lambda = 0,5 \text{ (W/m.K)}$ , 3. Hliníkový vodič s  $\lambda = 0,4 \text{ (W/m.K)}$  s teplovodem, 4. Hliníkový vodič s  $\lambda = 0,5 \text{ W/(m.K)}$  s teplovodem (Obr. 25).

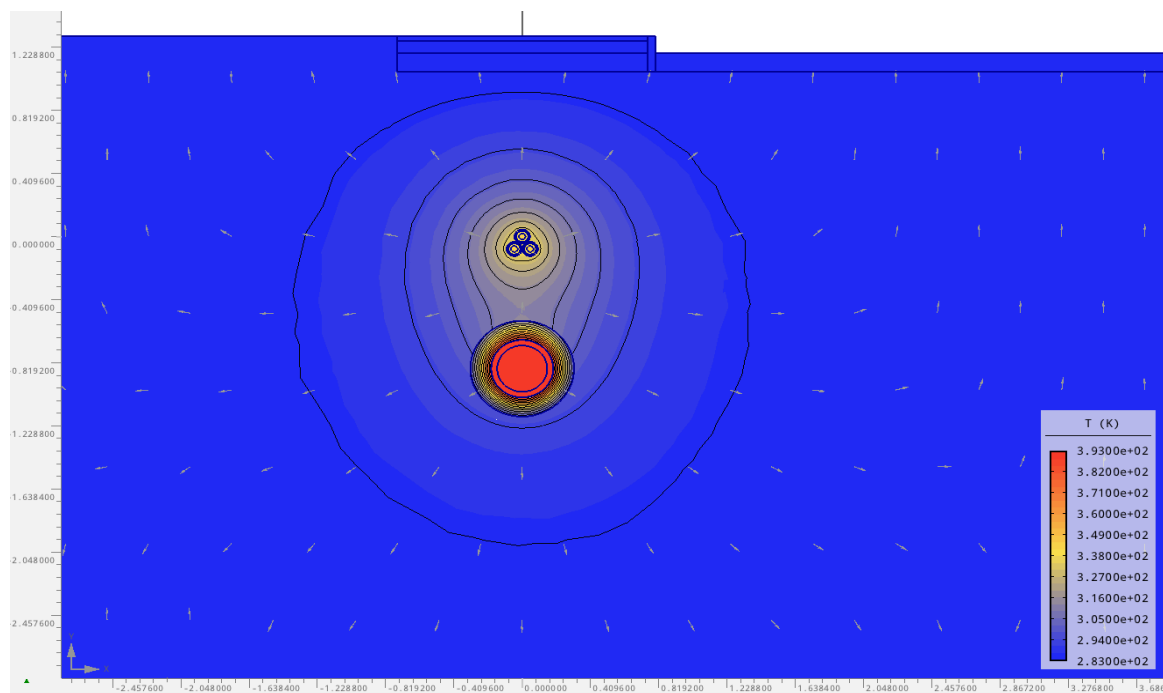
Jak je vidět na grafu 1 v čase 20 000 dojde ke skoku vlivem nárůstu proudu a charakteristiky stoupají prudčeji. Nejrychleji dosáhla teploty odpovídající 363 K charakteristika č. 3, která tohoto kritického bodu dosáhla v čase přibližně odpovídajícímu 418 000 sekund, což je zhruba 116 hod. Jako druhá protнула tuto hodnotu charakteristika č. 1, v čase 516 000 s (zhruba 143 hod.). S mnohem větším odstupem, v čase přibližně 710 000 s (zhruba 197 hod.), dosáhla kritické hodnoty charakteristika č. 4. V nejdelším čase dorazila do tohoto sledovaného bodu charakteristika č. 2, a to konkrétně za 1 020 000 s (zhruba 283 hod.). Z následujícího grafu můžeme tedy vyčíst jak velký vliv má změna tepelné vodivosti prostředí na teplotu kabelu, při zvýšení o pouhý  $0,1 \text{ W/(m.K)}$ . Tato hodnota ovlivňuje celý systém, protože objem resp. rozměry půdy jsou prakticky nekonečné v porovnání s rozměry kabelu, a proto na tepelné vlastnosti bude tato složka mít větší vliv, než některé jiné složky resp. vrstvy kabelu jako např. stínění. Dále si můžeme všimnout vlivu teplovodu (v našem případě teplovod přenášel médium o teplotě  $120^\circ\text{C}$ ), který především u zeminy s  $\lambda = 0,5 \text{ W/(m.K)}$  podstatně urychlil nárůst teploty. Z grafu vyplývá, že teplota půdy s  $\lambda = 0,5 \text{ W/(m.K)}$  s teplovodem je zpočátku vyšší než teplota půdy s  $\lambda = 0,4 \text{ W/(m.K)}$  bez teplovodu. Je to dáno tím, že jsme pro přechodové stavy v programu Agros 2D museli zadat počáteční podmínku, což je průměrná teplota celého systému (teplovod, kabel, zem, chodník). Tato hodnota byla logicky vyšší u situace s teplovodem, nicméně při přechodovém ději, přibližně v čase 50 000 sekund dojde k protnutí charakteristik a kritické teploty dosáhne dříve charakteristika bez teplovodu, ale s nižší tepelnou vodivostí.

## Simulace č.2-Tři hliníkové vodiče uspořádané do trojúhelníku ●●

Uspořádání kabelu je na obr. 26 a obr.27, i zde jsem postupoval stejným způsobem zatěžování.

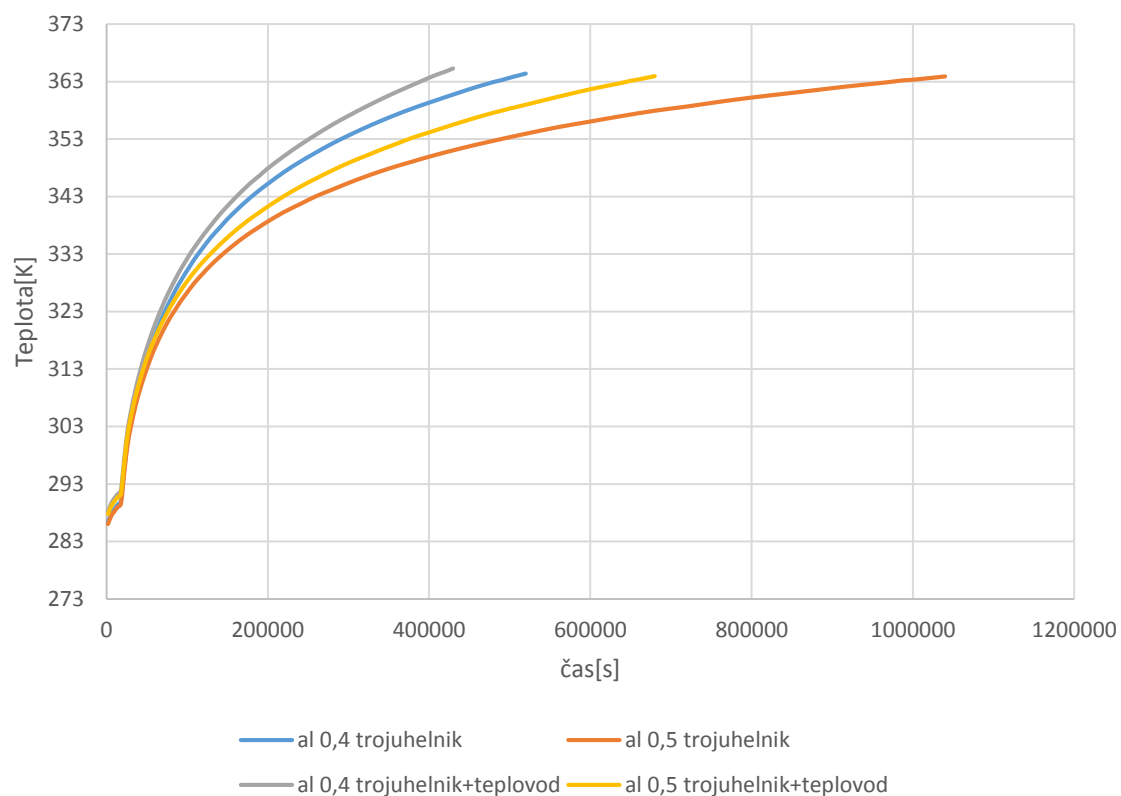


Obr. 26: Uspořádání kabelů v trojúhelníku



Obr. 27: Uspořádání kabelů v trojúhelníku s teplivodem

## Teplota hliníkového vodiče v seskupení do trojúhelníku při

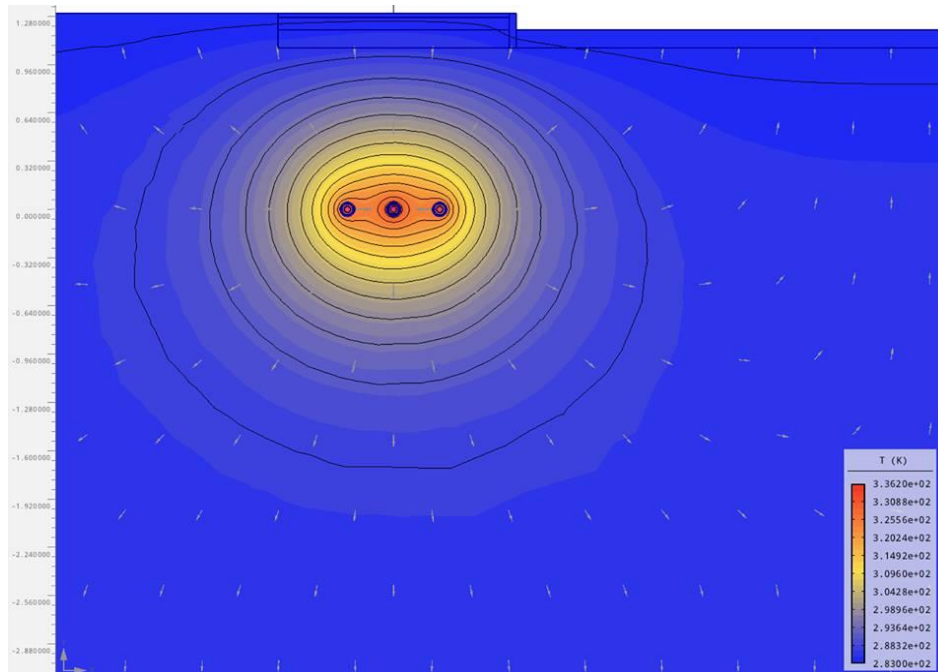


**Graf 2**

Z grafu 2 můžeme vidět, že se charakteristiky chovají velice podobně jako v simulaci č.1. Charakteristika s hliníkovým vodičem,  $\lambda = 0,4 \text{ W/(m.K)}$  a teplovodem dosáhne  $90^\circ\text{C}$  za čas zhruba 396 000 s (asi 110 hodin). Čas stejné charakteristiky bez teplovodu je asi 490 000 s (přibližně 136 hodin). Pro hliníkový vodič s  $\lambda = 0,5 \text{ W/(m.K)}$  a teplovodem dostáváme čas zhruba 650 000 s (180 hodin), pro poslední variantu je čas okolo 990 000 s (275 hodin).

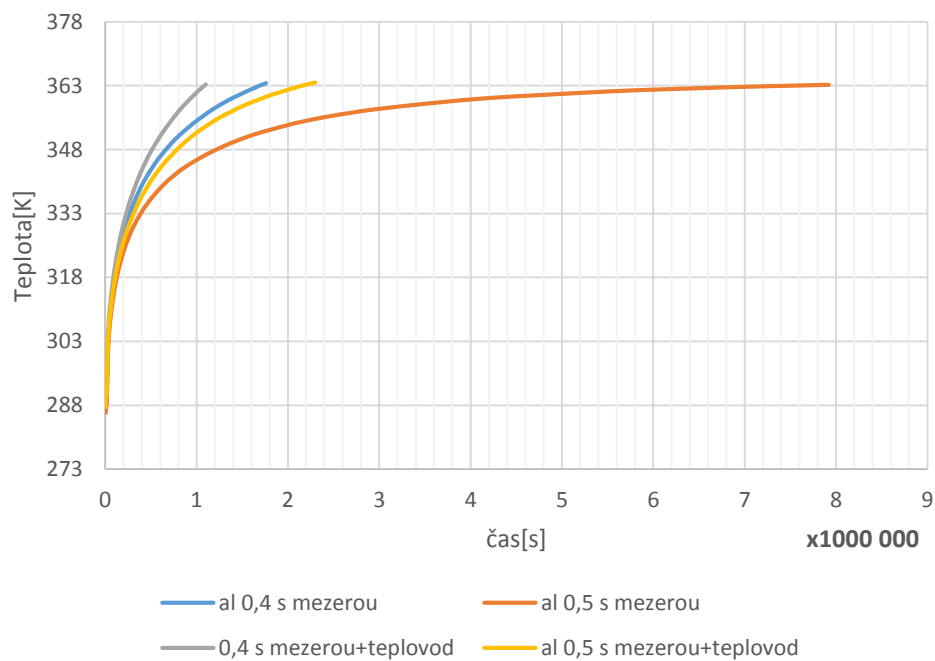
### Simulace č.3-Tři hliníkové vodiče s mezerou mezi každou žílou •••

Tato simulace byla prováděna stejnou metodou jako předchozí dvě. Jednotlivé vodiče měly mezi sebou 207 mm dlouhou mezeru. Díky tomuto faktu, vodiče vykazovaly nejpomalejší teplotní nárůst ze všech geometrií, jelikož vzájemný vliv okolních vodičů byl značně omezen.



Obr. 28: Uspořádání kabelů s mezerou

### Teplota hliníkového vodiče s mezerou mezi žílymi



Graf 3

Z grafu 3 vidíme, že charakteristika al 0,4 s mezerou+teplovodem dosáhne kritické teploty v čase zhruba 1 100 000 s (přibližně 305 hodin), charakteristika al 0,4 s mezerou v čase zhruba 1 710 000 s (přibližně 472 hodin), charakteristika al 0,5 s mezerou+teplovodem za čas okolo 2 200 000 s (611 hodin) a poslední charakteristika za 7 920 000 s (2200 hodin). Z této simulace je patrné, že se nejvíce zvětšil časový rozestup především mezi charakteristikami al 0,5 s mezerou+teplovodem a al 0,5 s mezerou.

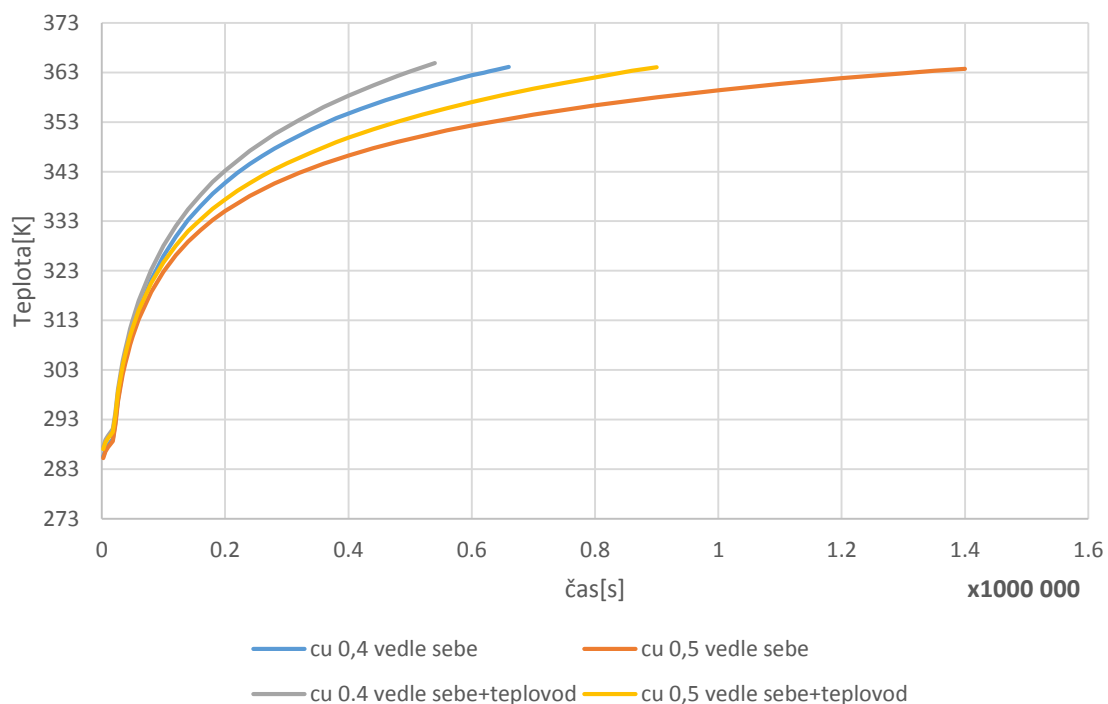
Pozn.: Situace kabelů s mezerou a teplovodem je analogická s předchozími situacemi.

#### Simulace č.4-Tři měděné vodiče vedle sebe ●●●

Tato simulace je identická se simulací č.1. Měřeným materiálem vodiče bude místo hliníku, měď. Geometrie a uložení jsou stejné jako na obr. 24 a obr.25.

Z grafu je opět zřejmé, že nejrychlejší nárůst teploty je opět u kabelu s tepelnou vodivostí 0,4 W/(m.K) s teplovodem s časem přibližně 500 000 sekund (zhruba 138 hodin), nicméně charakteristika s tepelnou vodivostí 0,4 W/(m.K) bez teplovodu (čas 628 000 s, 174 hodin) má větší časový rozestup od předchozí charakteristiky než tomu bylo u hliníku. Charakteristika cu 0,5 vedle sebe dosáhne kritické teploty za 1 350 000 s (375 hodin) a cu 0,5 vedle sebe (860 000 s, 238 hodin) mají také mnohem větší časový rozdíl daný rozdílnými materiálovými vlastnostmi.

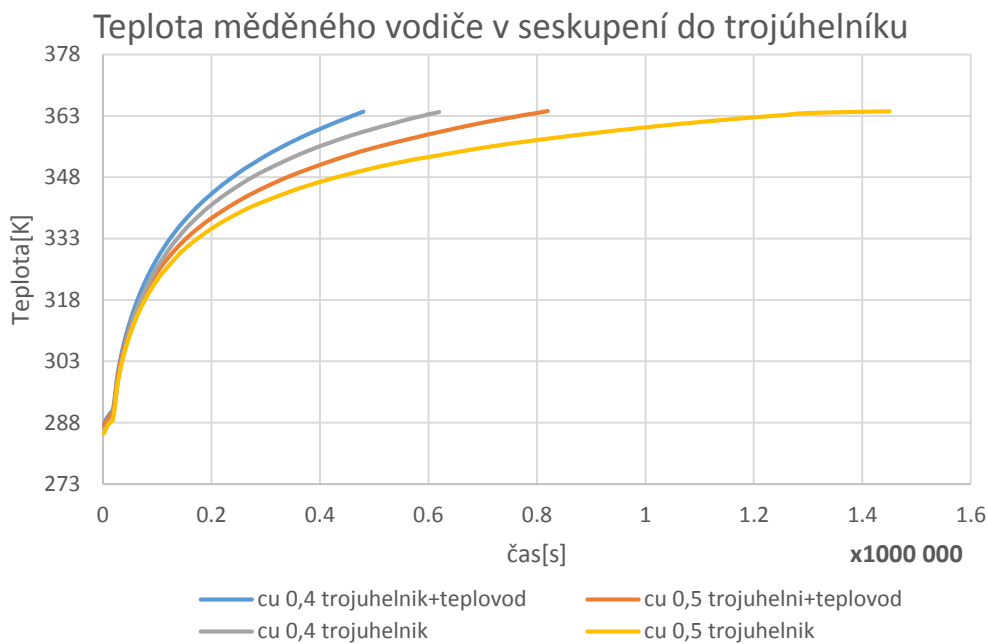
Teplota měděného vodiče v seskupení vedle sebe



Graf 4

#### Simulace č.5-Tři měděné vodiče do trojúhelníku ●●●

Zde se jedná o stejnou situaci jako v případě simulace č.2, místo jádra z hliníku je měď.

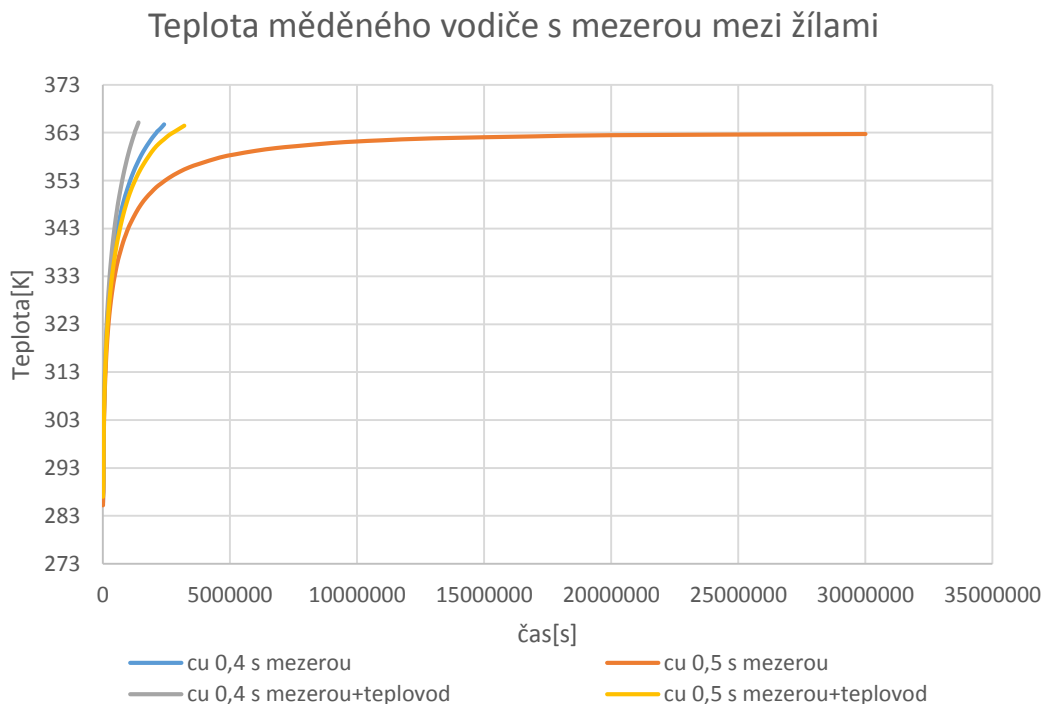


**Graf 5**

Můžeme zde vidět větší časový rozestup mezi jednotlivými charakteristikami. Pro charakteristiku cu 0,4 trojúhelnik+teplovod je čas 466 000 s (129 hod.), pro cu 0,4 trojúhelnik 594 000 s (165 hod.), pro cu 0,5 trojúhelnik+teplovod 770 000 s (213 hod.) a pro poslední 1 450 000 s (347 hod.).

### Simulace č.6-Tři měděné vodiče s mezerou mezi každou žílou

Postup měření byl stejný jako v simulaci č.3., opět jsme nahradili hliník mědí.

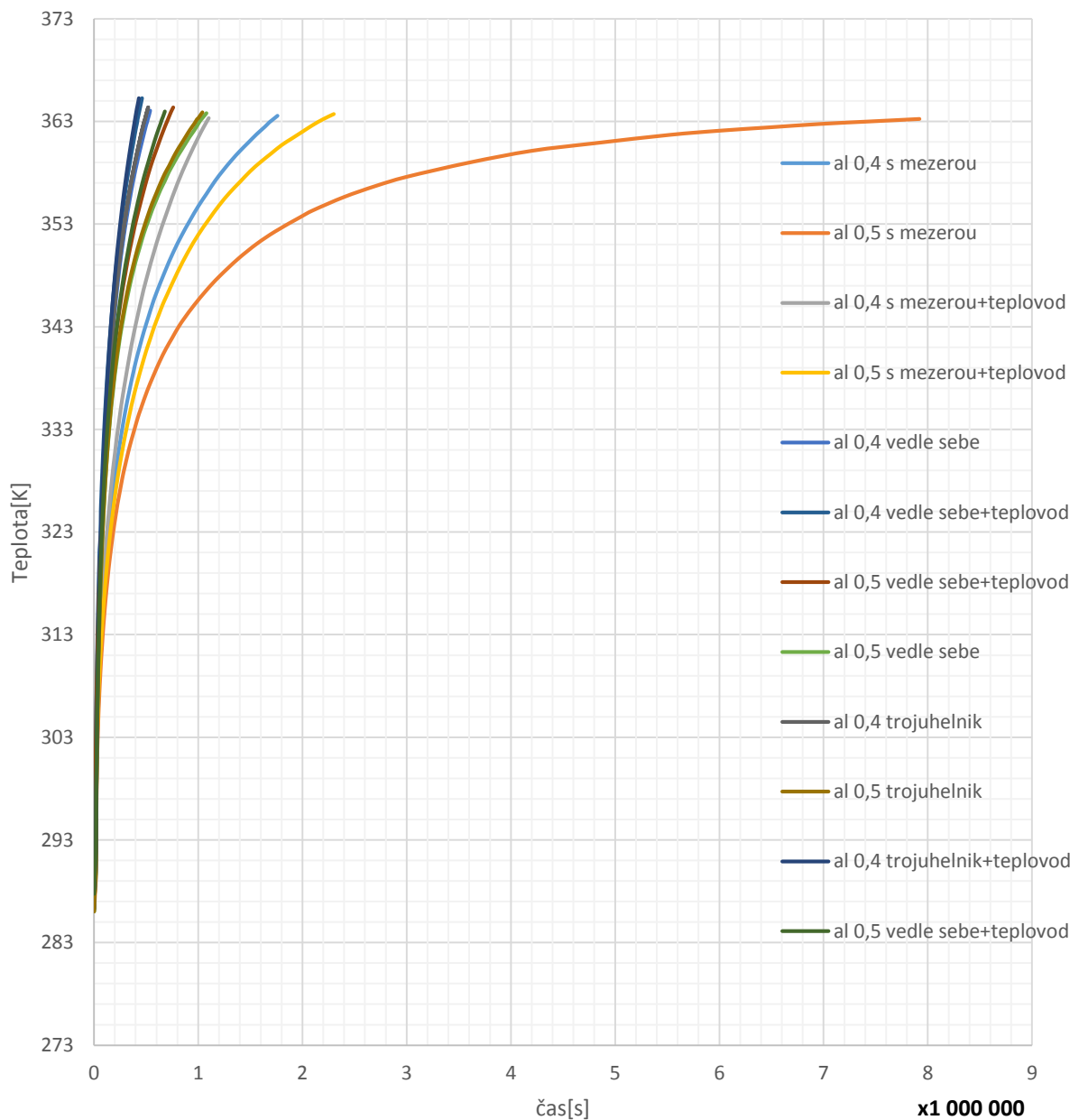


**Graf 6**

Při této simulaci podle grafu 6 charakteristika cu 0,5 s mezerou nepřekročila teplotu 90°C, protože se ustálala na hodnotě těsně pod ní a byla dále konstantní. Charakteristika cu 0,4 s mezerou+teplovod má čas překročení kritické hodnoty 1 260 000 s (350 hod.), charakteristika cu 0,4 s mezerou má čas (2 130 000 s, 591 hod) a charakteristika cu 0,5 s mezerou+teplovodem je 2 800 000 s (777 hod.).

### Porovnání simulací pro hliníkové vodiče

Teplotní charakteristiky pro hliníkové vodiče



Graf 7

**Tabulka 9: Srovnání hliníkových vodičů v zemi**

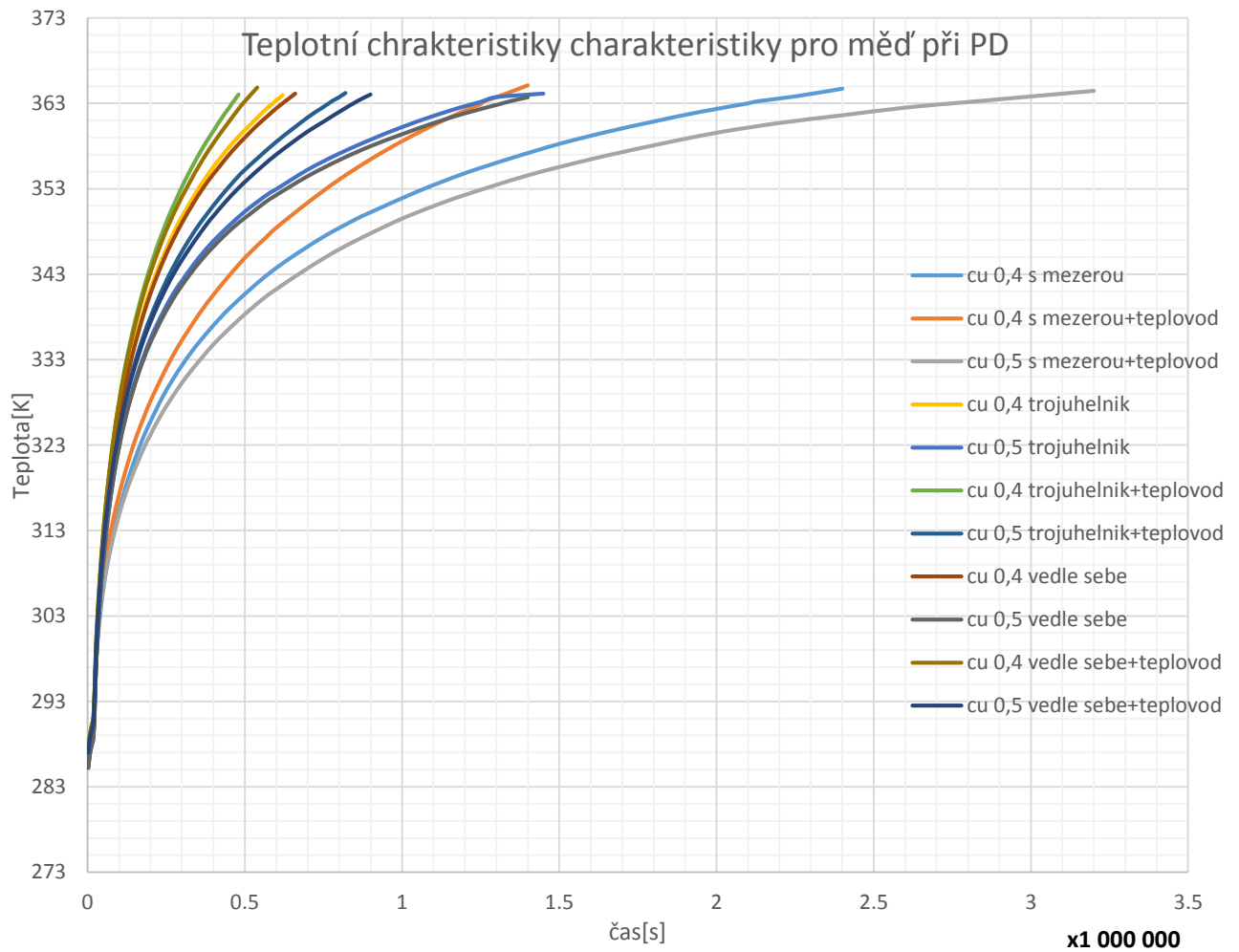
Pořadí	Typ	Počet hodin do překročení 90°C
1	Al 0,4 trojúhelník ●●● + teplovod	110
2	Al 0,4 vedle sebe ●●● + teplovod	116
3	Al 0,4 trojúhelník ●●	136
4	Al 0,4 vedle sebe ●●●	143
5	Al 0,5 trojúhelník ●● + teplovod	180
6	Al 0,5 vedle sebe ●●● + teplovod	197
7	Al 0,5 trojúhelník ●●	275
8	Al 0,5 vedle sebe ●●●	283
9	Al 0,4 s mezerou ● ● ● + teplovod	305
10	Al 0,4 s mezerou ● ● ●	472
11	Al 0,5 s mezerou ● ● ● + teplovod	611
12	Al 0,5 s mezerou ● ● ●	2200

### Zhodnocení

Podle grafu 7 jsem vytvořil tabulku č.9, kde jsem shrnul, kdy daný vodič dosáhl kritické teploty 90°C. Z této tabulky vidíme, že nejrychleji se otepleval vodič v seskupení do trojúhelníku, následovaný seskupení vodičů vedle sebe. Všechny charakteristiky těchto dvou seskupení dosáhli kritické teploty dříve, než kterákoliv charakteristika geometrického uskupení vodičů s mezerou. Z tohoto je tedy zřejmé, že v této geometrii je mnohem menší vliv okolních kabelů na sebe sama. Dále podle předpokladu nejrychlejší nárůst teploty vykazovaly kabely, v jejichž blízkosti byl umístěn teplovod. V tabulce resp. grafech nejsou znázorněny charakteristiky kabelů uložených v zeminách s tepelnou vodivostí 1 W/(m.K) a 1,4 W/(m.K). Je to z důvodu toho, že žádná z těchto charakteristik nedosáhla kritické teploty, jelikož se ustálila na nižší teplotě. V reálné situaci např. u dlouhých vedení, kde se střídají různé druhy půd, je nutné dimenzovat vedení na nejhorší případ uložení. Nejrychlejší nárůst teploty vykazují charakteristiky kabelů, uložených v trojúhelníku. Je to dáno tím, že vliv okolních dvou vodičů je v této geometrii větší než u kabelů vedle sebe, protože v trojúhelníku působí současně okolní dva vodiče současně na jednu stranu třetí žíly, naproti tomu krajní kabely (v seskupení vedle sebe) ovlivňují symetricky obě poloviny žíly.



## Porovnání simulací pro měděné vodiče



Graf 8

Tabulka 10: Srovnání měděných vodičů v zemi

Pořadí	Typ	Počet hodin
1	Cu 0,4 trojuhelnik ●● + teplovod	129
2	Cu 0,4 vedle sebe ●●● + teplovod	138
3	Cu 0,4 trojuhelnik ●●	165
4	Cu 0,4 vedle sebe ●●●	174
5	Cu 0,5 trojuhelnik ●●+teplovod	213
6	Cu 0,5 vedle sebe ●●●+ teplovod	238
7	Cu 0,5 trojuhelnik ●●	347
8	Cu 0,4 s mezerou ●●● +teplovod	350
9	Cu 0,5 vedle sebe ●●●	375
10	Cu 0,4 s mezerou ●●●	591
11	Cu 0,5 s mezerou ●●● + teplovod	591
12	Cu 0,5 s mezerou ●●●	-

## **Zhodnocení**

Všechny simulované charakteristiky jsou podobné charakteristikám hliníkových vodičů, nicméně z tabulky 10 vidíme, že se nám změnilo pořadí na pozici 8 a 9. Charakteristika cu 0,5 vedle sebe dosáhla kritické teploty v delším čase než charakteristika cu 0,5 s mezerou+teplovodem. Dále charakteristika cu 0,5 s mezerou nepřekročila kritickou teplotu a ustálila se těsně pod ní. Všechny sledované simulace vodičů z mědi měly mezi sebou také větší časové rozestupy. Porovnáním tabulek 9 a 10 delší čas do překročení kritické teploty, pro vodiče měděné oproti hliníkovým přibližně 20-30%.

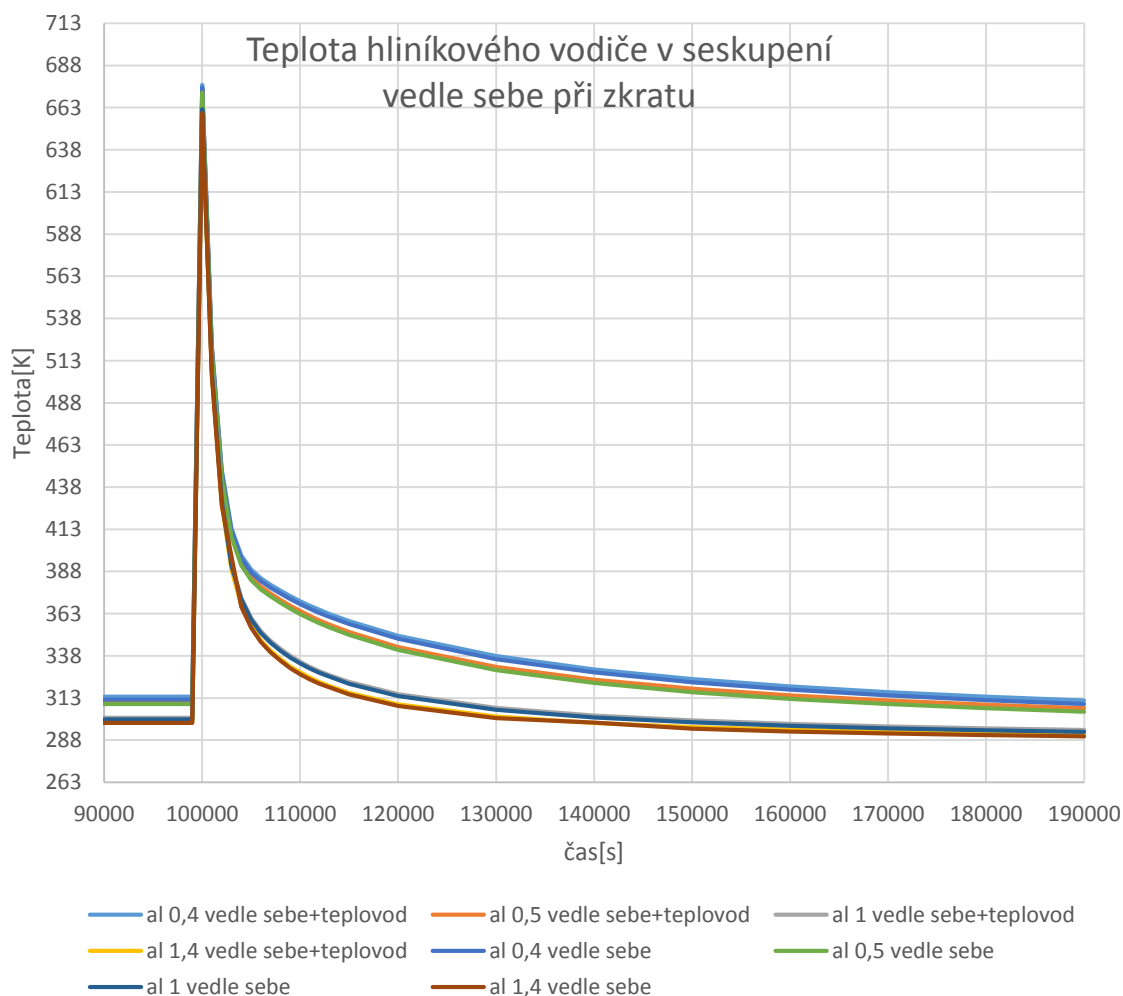
## 6.1.2 Simulace teploty kabelu při zkratu a ustálených stavech

V této části jsem zkoumal pokles teplot jednotlivých charakteristik po zkratu. Sledovaný úsek byl simulován v čase od 90 000 s do 190 000 s. V čase 100 000 s dojde při sledovaných simulacích ke zkratu z ustáleného stavu, zároveň odečteme hodnotu jednotlivých charakteristik v ustálených stavech. Podobně jako u podkapitoly Simulace teploty kabelu při ustáleném stavu jsem použil stejné kombinace geometrií uložení kabelů bez i s teplovodem. Oproti předchozí simulaci jsem do tohoto pozorování zahrnul i zeminy s  $\lambda = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a  $1,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

### Simulace č.1-Hliníkové vodiče uspořádané vedle sebe ●●

Uspořádání vodičů je naprosto stejné jako bylo v části 5.1.1 Přechodové stavy-Simulace č.1. Zkratový děj jsem modeloval v programu Agros 2D, kde jsem zadal výkon jádra jako výkon, který odpovídá proudu 3,15 kA po dobu 5 s.

Z naměřených charakteristik vidíme, že vliv teplovodu není příliš velký, jedná se o rozdíl zhruba o 1,5K po téměř celém sledovaném úseku viz. tabulky 11 a 12, kde jsou rozdíly na vybraných časových úsecích mezi s teplovodem a bez teplovodu. Vliv půdy při zkratu měl větší dopad na simulované charakteristiky. Do tabulky 11 a 12 jsem z důvodu rozsáhlého množství dat, vybral jen některé časové body.



Graf 9

**Tabulka 11:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●●**

čas[s]	al 0.4 vedle sebe	al 0.5 vedle sebe	al 1 vedle sebe	al 1.4 vedle sebe
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	312.092	309.477	300.245	298.203
<b>100 000</b>	<b>674.837</b>	<b>671.977</b>	<b>662.010</b>	<b>659.804</b>
101 000	520.752	517.729	506.618	504.167
102 000	446.814	443.627	430.065	427.206
110 000	368.709	362.827	333.497	327.124
150 000	322.304	316.503	298.611	294.771
190 000	309.477	304.902	292.974	290.278

**Tabulka 12:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●●s vlivem teplovodu**

●●●+Teplovod				
čas[s]	al 0.4 vedle sebe	al 0.5 vedle sebe	al 1 vedle sebe	al 1.4 vedle sebe
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	313.725	311.111	301.307	299.183
<b>100 000</b>	<b>676.471</b>	<b>673.693</b>	<b>663.072</b>	<b>660.784</b>
101 000	522.386	519.444	507.680	505.147
102 000	448.529	445.343	431.127	428.186
110 000	370.425	364.624	334.477	328.105
150 000	324.183	318.464	299.673	295.833
190 000	311.520	307.026	294.118	291.503

V obou tabulkách vidíme ustálený stav kabelu před zkratem (čas 90 000-99 999 s sledovaného úseku) a v průběhu zkratu a po něm (100 000-190 000 s). Rozdíly v ustáleném stavu a pro několik prvních kroků po zkratu jsou přibližně konstantní, nicméně s narůstajícím časem se časové rozdíly zvětšují, což je logické vzhledem k tomu, že zeminy s vyšší vodivostí odvádějí lépe teplo z povrchu kabelu.

### Simulace č.2-Hliníkové vodiče uspořádané do trojúhelníku ●●

Opět se jedná o velmi podobné charakteristiky, obdobně jako v simulaci č.1. Pro přehled hodnot v ustáleném stavu, a dále během a po zkratu uvádím tabulku 14 pro uložení do trojúhelníku a 15 pro uložení do trojúhelníku s teplovodem.

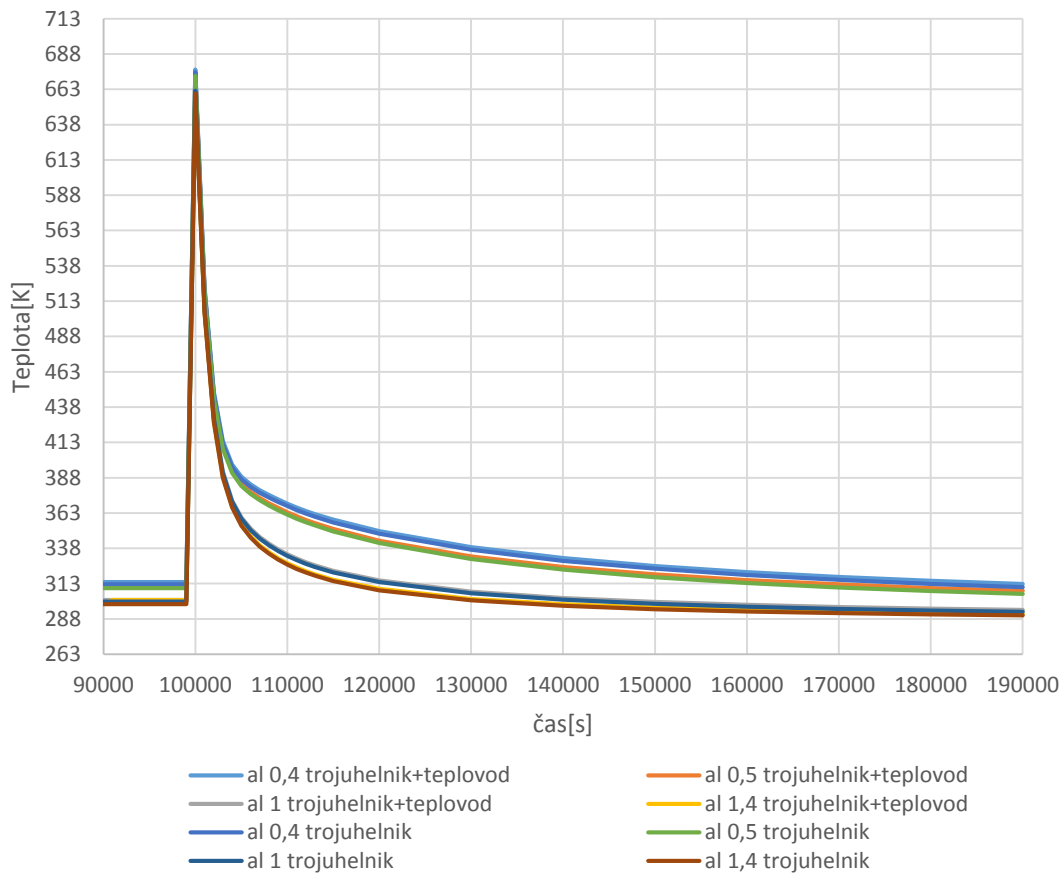
**Tabulka 13:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení ●●**

čas[s]	al 0.4 trojúhelník	al 0.5 trojúhelník	al 1 trojúhelník	al 1.4 trojúhelník
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	312.500	309.886	300.327	298.366
<b>100 000</b>	<b>675.245</b>	<b>672.467</b>	<b>662.092</b>	<b>659.967</b>
101 000	521.078	518.137	506.618	504.248
102 000	447.059	443.791	429.984	427.206
110 000	368.056	361.846	332.680	326.471
150 000	323.529	298.774	317.565	294.934
190 000	310.376	305.637	293.056	290.441

**Tabulka 14:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení  $\clubsuit$  s vlivem teplovodu**

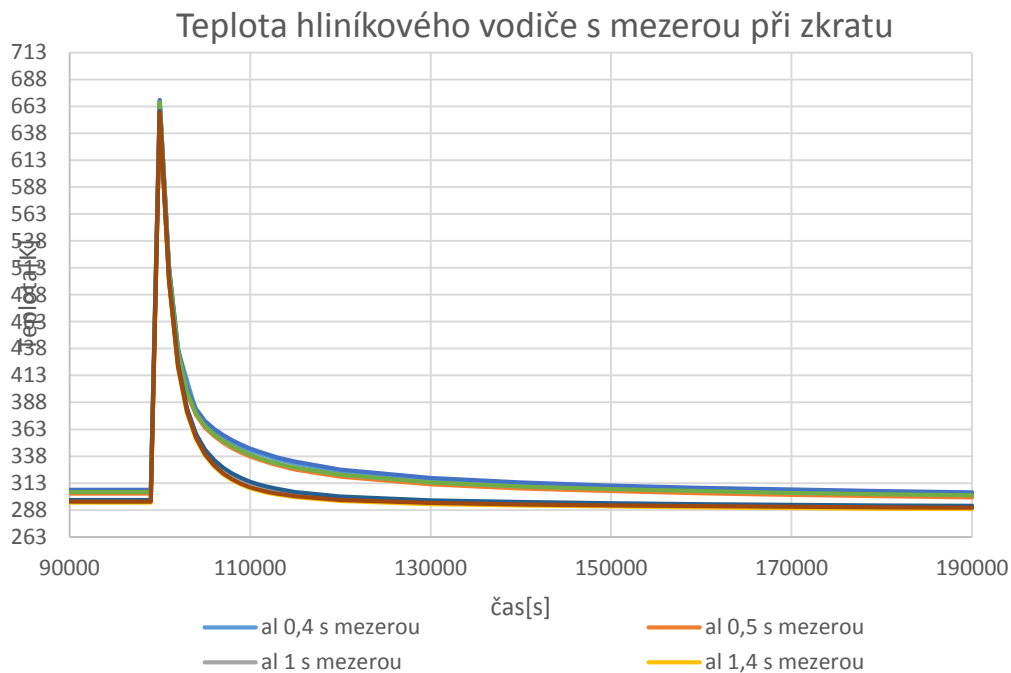
$\clubsuit$ + Teplovod				
čas[s]	al 0,4 trojúhelník	al 0,5 trojúhelník	al 1 trojúhelník	al 1,4 trojúhelník
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	314.216	311.438	301.389	299.265
<b>100 000</b>	<b>677.042</b>	<b>674.101</b>	<b>663.235</b>	<b>660.866</b>
101 000	522.876	519.771	507.680	505.229
102 000	448.856	445.425	431.046	428.105
110 000	369.608	363.480	333.824	327.451
150 000	325.490	319.526	300.000	295.997
190 000	312.663	307.925	294.363	291.667

Teplota hliníkového vodiče v seskupení do trojúhelníku při zkratu



**Graf 10**

### Simulace č.3-Hliníkové vodiče s mezerou •••



**Graf 11**

**Tabulka 15:**

Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro, uložení •••

čas[s]	al 0.4 mezera	al 0.5 mezera	al 1 mezera	al 1.4 mezera
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	305.065	303.268	296.242	294.935
<b>100000</b>	<b>667.320</b>	<b>665.278</b>	<b>657.680</b>	<b>656.209</b>
101000	512.418	510.212	501.307	499.592
102000	436.765	434.232	422.712	420.507
110000	343.464	341.422	316.585	311.438
150000	308.742	308.088	294.281	292.157
190000	302.369	299.592	290.605	288.889

**Tabulka 16:**

Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , hliníkové jádro uložení ••• s vlivem teplovodu

•••+Teplovod				
čas[s]	al 0.4 mezera	al 0.5 mezera	al 1 mezera	al 1.4 mezera
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	306.863	304.820	297.304	295.833
<b>100000</b>	<b>669.036</b>	<b>666.912</b>	<b>658.660</b>	<b>657.190</b>
101000	514.134	511.846	502.288	500.490
102000	438.562	435.784	423.775	421.405
110000	345.261	339.461	314.297	309.232
150000	310.703	307.353	294.281	292.239
190000	304.493	301.634	291.830	290.033

## Porovnání hliníkových vodičů v ustálených stavech před zkratem

Tabulka 17: Ustálené stavy hliníkových vodičů před zkratem

Uspořádání	Typ	Bez tepl.	Teplovod
		Teplota[K]	Teplota[K]
••• Vedle sebe	Al 0,4	312,09	313,72
	Al 0,5	309,47	311,11
	Al 1	300,24	301,30
	Al 1,4	298,20	299,18
•• Trojúhelník	Al 0,4	312,5	314,21
	Al 0,5	309,88	311,43
	Al 1	300,32	301,38
	Al 1,4	298,36	299,26
••• S mezerou	Al 0,4	305,07	306,86
	Al 0,5	303,27	304,82
	Al 1	296,24	297,3
	Al 1,4	294,93	295,83

### Závěr:

Z tabulky 17 je patrné, že pořadí charakteristik teplotních křivek je stejné jako bylo v simulacích, kde jsme přecházeli z polovičního proudového zatížení na maximální. Nejvyšší teploty dosáhly kabely v trojúhelníku, následované kabely vedle sebe. Nejmenší teplotu vykazovaly vodiče s mezerou.

U zkratů a v dalším průběhu po něm bylo pořadí všech charakteristik opět stejné, což je vidět z tabulek jednotlivých simulací.

### Simulace č.4-Měděné vodiče vedle sebe •••

Postup u této simulace je analogický k simulaci č.1, místo hliníkového jádra je měděné.

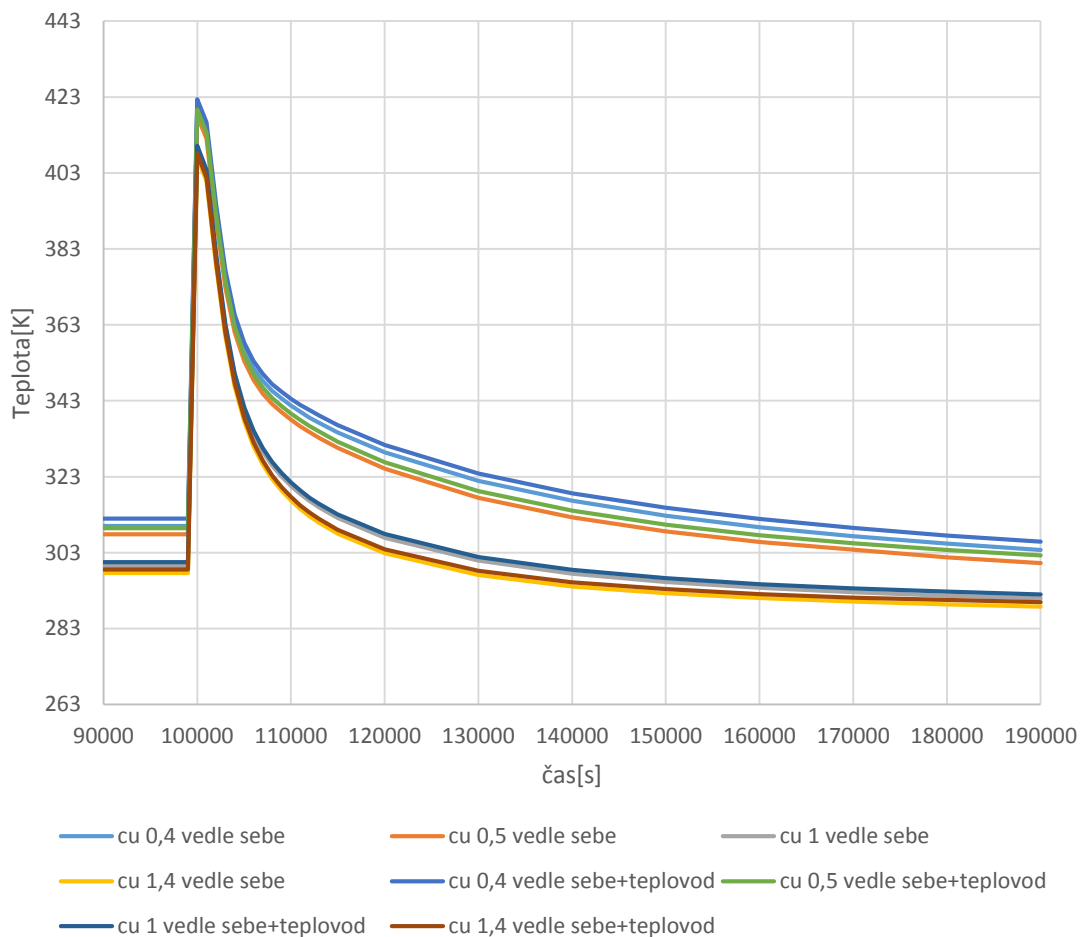
Tabulka 18:  
Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro •••

čas[s]	cu 0.4 vedle sebe	cu 0.5 vedle sebe	cu 1 vedle sebe	cu 1.4 vedle sebe
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	310.049	307.843	299.510	297.631
<b>100 000</b>	<b>420.507</b>	<b>418.056</b>	<b>409.232</b>	<b>407.190</b>
101 000	414.461	412.010	402.941	400.817
102 000	392.892	390.441	380.801	378.595
110 000	341.748	337.990	320.588	316.748
150 000	312.745	308.578	295.261	292.320
190 000	303.676	300.245	290.931	288.807

**Tabulka 19:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro ●●● s vlivem teplovodu**

●●●+Teplovod				
čas[s]	Cu 0,4 vedle sebe	Cu 0,5 vedle sebe	Cu 1 vedle sebe	Cu 1,4 vedle sebe
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	311.928	309.395	300.490	298.529
<b>100 000</b>	<b>422.386</b>	<b>419.690</b>	<b>410.212</b>	<b>408.170</b>
101 000	416.340	413.644	403.840	401.797
102 000	394.771	391.993	381.699	379.575
110 000	343.464	339.624	321.487	317.729
150 000	314.788	310.376	296.242	293.382
190 000	305.882	302.288	291.993	289.951

**Teplota měděného vodiče v seskupení vedle sebe při zkratu**



**Graf 12**

Z grafu 12 vidíme, že se charakteristiky pro měděný vodič liší od hliníkového, který má strmější pokles teploty po zkratu. To plyne z rovnice (3-1) v kapitole 5 jelikož platí, že čím větší je součin hustoty a tepelné kapacity, tím pomaleji se vodič ochlazuje.

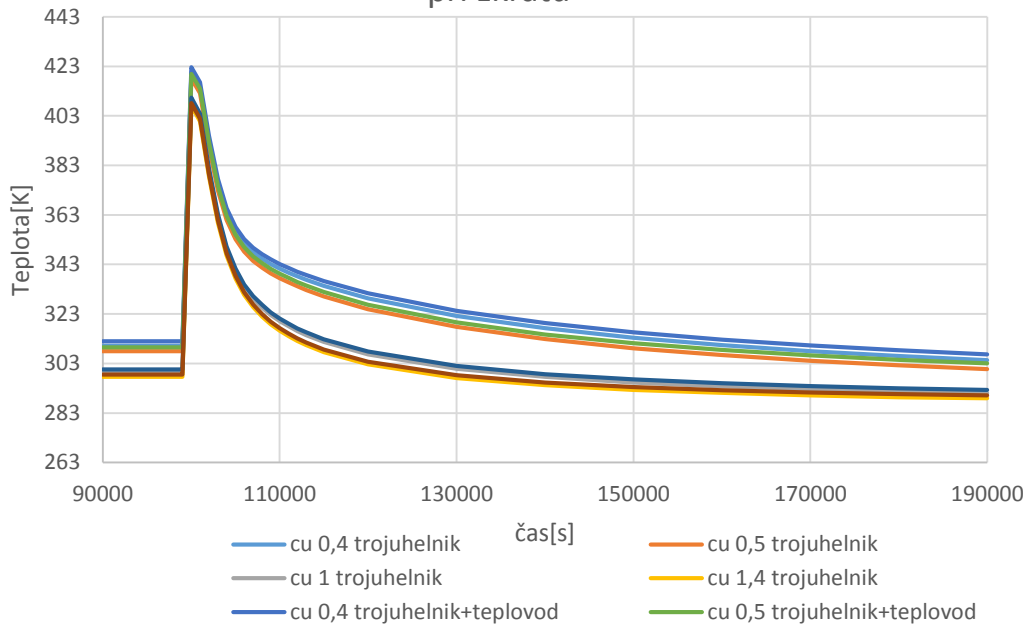


## Simulace č.5-Měděné vodiče vodiče do trojúhelníku ☼

**Tabulka 20:**  
**Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro ☼**

čas[s]	cu 0,4 trojúhelník	cu 0,5 trojúhelník	cu 1 trojúhelník	cu 1,4 trojúhelník
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90 000-99 999	310.131	307.925	299.428	297.549
100 000	420.588	418.137	409.150	407.108
101 000	414.624	412.092	402.859	400.735
102 000	393.056	390.441	380.637	378.513
110 000	341.258	337.418	320.098	316.258
150 000	313.399	309.150	295.343	292.320
190 000	304.330	300.735	291.013	288.889

**Teplota měděného vodiče v seskupení do trojúhelníku  
při zkratu**



**Graf 13**

Pozn.: Z výsledků vyplývalo, že se simulované charakteristiky pro uložení s teplovodem nelišily od předchozích, a proto jsem je zahrnul pouze do příloh.

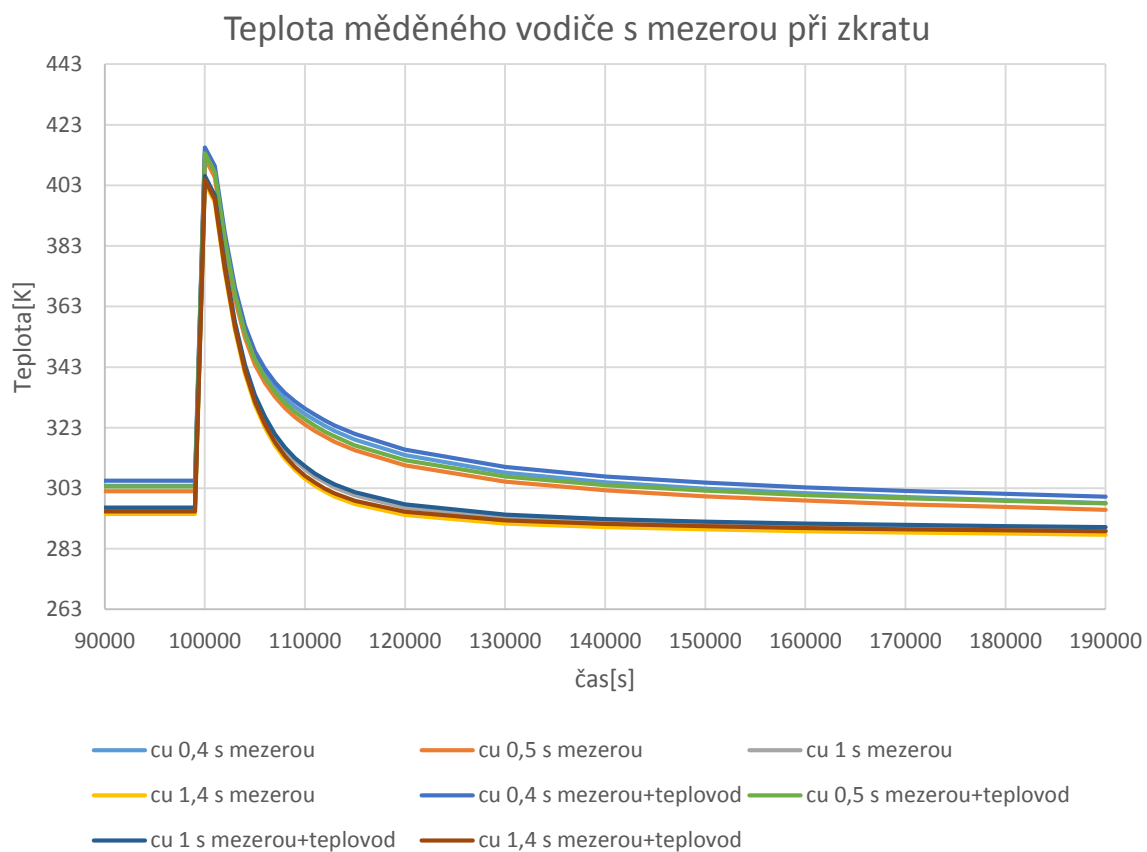
## Simulace č.6-Měděné vodiče s mezerou mezi vodiči •••

Tabulka 21:

Simulované hodnoty teploty kabelu pro různé druhy  $\lambda$ , měděné jádro, uložení •••

čas[s]	Cu 0.4 mezera	Cu 0.5 mezera	Cu 1 mezera	Cu 1.4 mezera
	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]	Teplota[K]
90000	303.758	302.042	295.588	294.444
100000	413.725	412.010	405.147	403.922
101000	407.598	405.719	398.611	397.386
102000	385.621	383.742	376.062	374.673
110000	327.451	324.020	309.150	306.127
150000	302.859	300.327	290.850	289.379
190000	298.121	295.915	288.971	287.663

Pozn.: Pro tuto simulaci jsem vybral pouze hodnoty charakteristik bez teplovodu jako v simulaci č.5.



Graf 14

## Porovnání měděných vodičů v ustálených stavech a zkratech

Tabulka 22: Ustálené stavy měděných vodičů před zkratem

Uspořádání	Typ	Bez tepl.	Teplovod
		Teplota[K]	Teplota[K]
••• Vedle sebe	Cu 0,4	310,04	311,92
	Cu 0,5	307,84	309,39
	Cu 1	299,50	300,49
	Cu 1,4	297,63	298,52
••• Trojúhelník	Cu 0,4	310,13	312,00
	Cu 0,5	307,92	309,55
	Cu 1	299,42	300,57
	Cu 1,4	297,54	298,52
••• S mezerou	Cu 0,4	303,75	305,47
	Cu 0,5	302,04	303,59
	Cu 1	295,58	296,65
	Cu 1,4	294,44	295,34

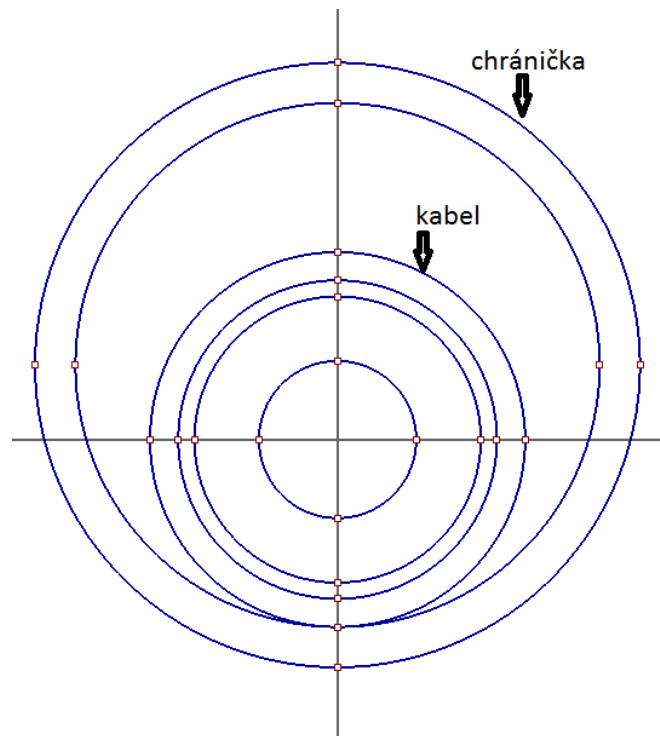
### Závěr

Pro ustálené stavy měděných vodičů platí stejné charakteristiky jako pro hliníkové vodiče, tedy nejteplejší jsou vodiče v trojúhelníku, následovány vodiči, seskupenými vedle sebe a kabely s mezerou. Pro zkraty je pořadí stejné, nicméně charakteristiky se tvarově liší, protože je u nich pomalejší pokles teploty po zkratu vlivem vyšší hustoty a tepelné kapacity než u hliníkových vodičů.

## 6.2 Kabely v chráničkách

### 6.2.1 Simulace teploty kabelu v chráničce při změně zatížení

V této kapitole jsem zkoumal vliv chráničky na kabel při přechodovém stavu. Typ okolní půdy obklopující chráničku jsem zvolil s tepelnou vodivostí  $0,4 \text{ W/(m,K)}$ . Tuto situaci můžeme vidět na obr. 29.



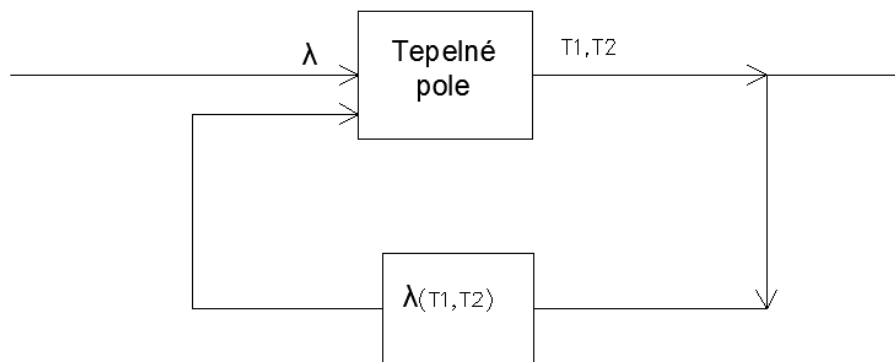
Obrázek 29: Kabel v chráničce

Chránička obklopující kabel je z materiálu HDPE (High Density Poly-Ethylen). Tento materiál má výborné mechanické vlastnosti, a jak již anglický název napovídá má vysokou hustotu. Konkrétní hodnoty fyzikální veličin pro tento materiál byli: tepelná vodivost  $0,46 \text{ W/(m,K)}$ , hustota  $940 \text{ kg/m}^{-3}$  a tepelná kapacita  $2000 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Simuloval jsem dva stavy, a to stav kdy jsou kabely v chráničkách uspořádány vedle sebe obr. 24 a dále stav, kdy jsou kabely v chráničkách uspořádány do trojúhelníku obr. 26. Opět jsem zkoumal situaci s nedalekým teplovodem. Jako materiály vodičů jsem použil měď a hliník.

#### Simulace č.1-Kabely s chráničkami uspořádány vedle sebe ●●●

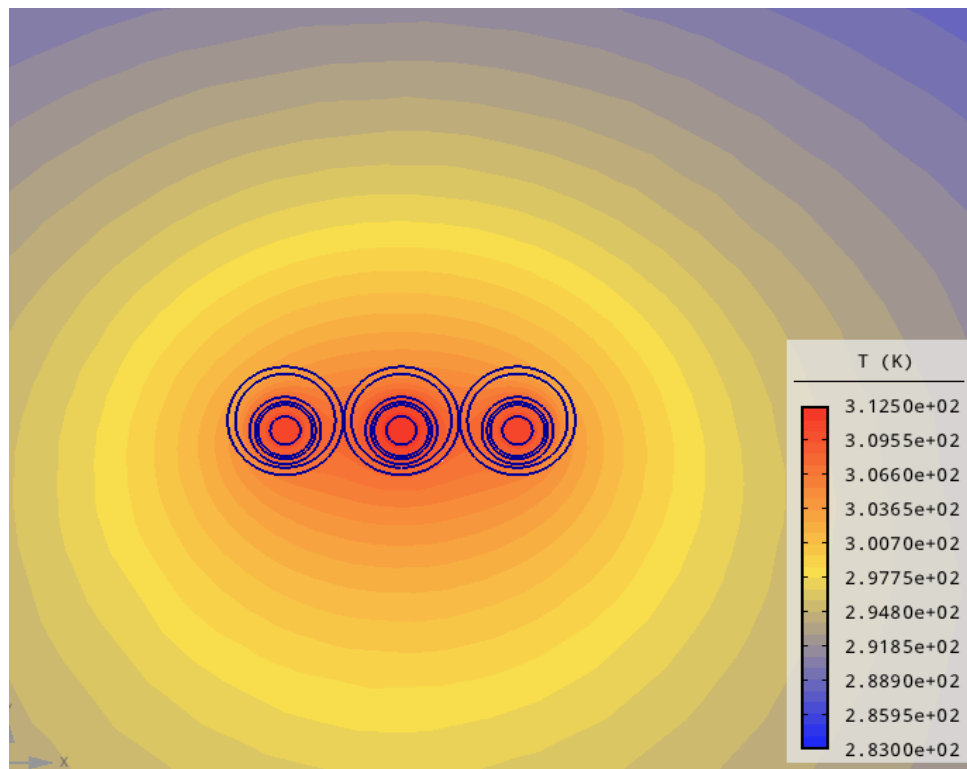
V této první simulaci jsem zkoumal přechodový stav tak, že z polovičního proudového zatížení jsem v čase 20 000 s zatížil kabel plným proudovým zatížením (pro hliník 791 A, pro měď 999 A), stejně jako tomu bylo u kabelů uložených přímo v zemi. Sledoval jsem, kdy charakteristiky překonají teplotu  $90^\circ\text{C}$ . Před touto simulací, však bylo nezbytné zjistit hodnotu tepelné vodivosti prostoru mezi kabelem a chráničkou vyplněného vzduchem. Tento fyzikální proces, tedy chování vzduchu v uzavřeném a omezeném prostoru je popsán v kapitole 5.7. Do vývojového prostředí PythonLab (v programu Agros 2D) byli nahrány parametry celého systému. V programu Wolfram Mathematica byl vytvořen vzorec

pro výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti. Tento vzorec byl posléze dosazen do zmíněného vývojového prostředí a byl naprogramován kód, který pro zadanou hodnotu  $\lambda$  generoval teploty (v nastaveném počtu kroků) na povrchu kabelu a vnitřku chráničky. Pokud se v několika po sobě jdoucích krocích teploty neměnily, pak byla nalezena správná hodnota tepelné vodivosti pro dané prostředí. Tuto situaci vidíme na obrázku 30.



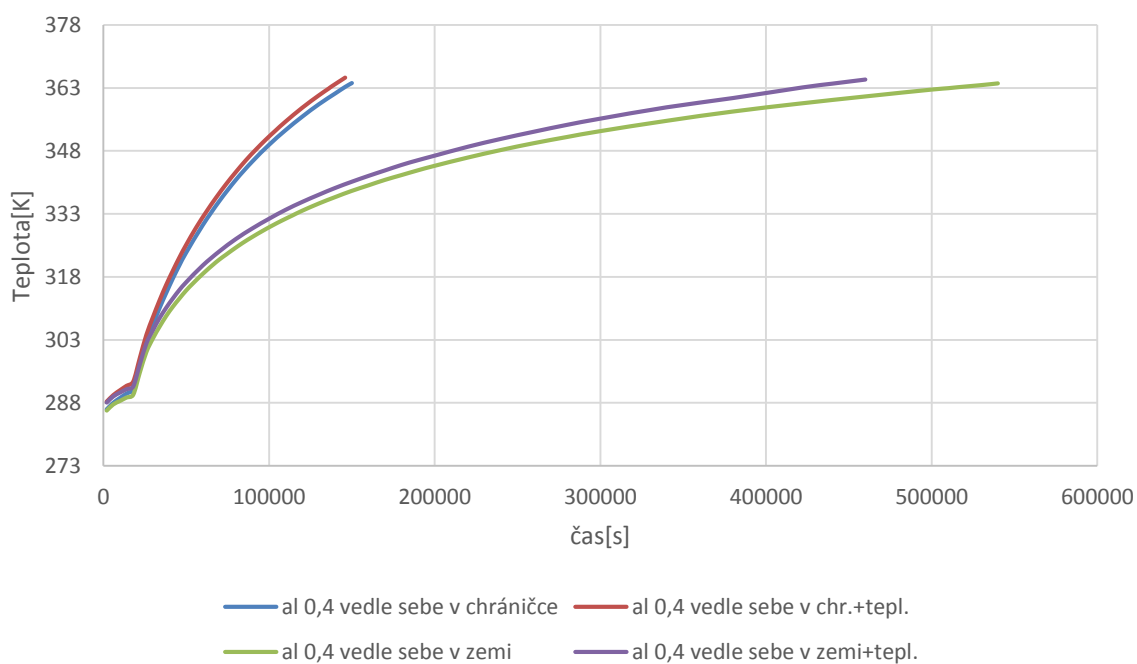
**Obr. 30: Smyčka pro nalezení ekv. tepelné vodivosti**

Uspořádání kabelů v chráničkách v této simulaci je zobrazeno na obr. 31, pro stav s teplotou platí analogicky stejný obrázek, ale s teplotou.



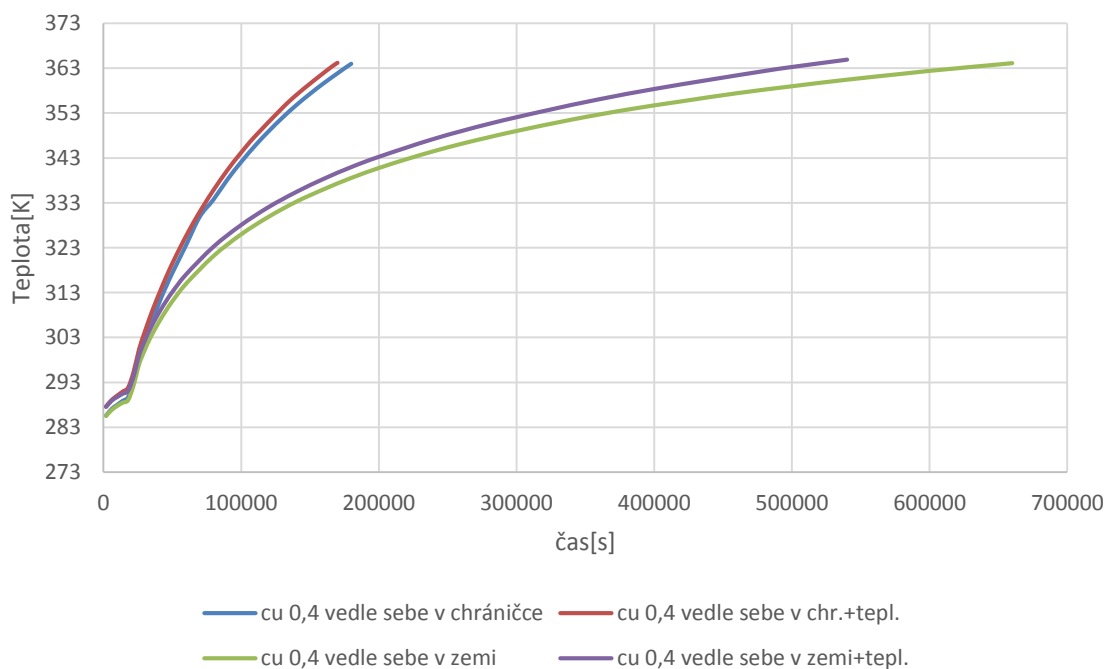
**Obr. 31: Kabely vedle sebe**

### Porovnání hliníkových vodičů v zemi a chrániče



Graf 15

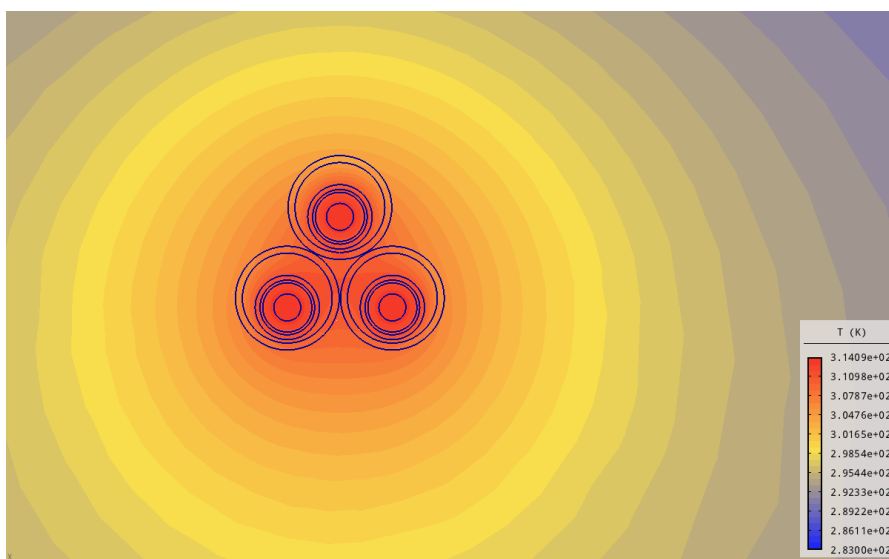
### Porovnání měděných vodičů v zemi a v chrániče



Graf 16

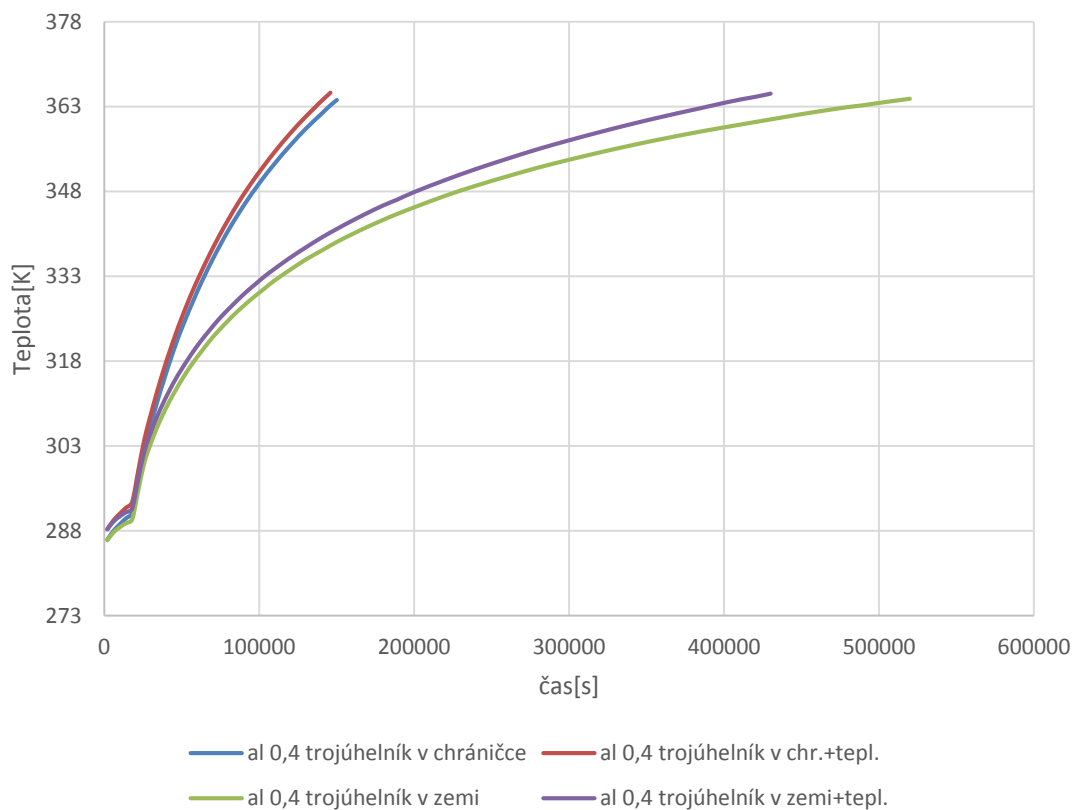
## Simulace č.2-Kabely s chráničkami uspořádaný do trojúhelníku

Geometrické uspořádání vidíme na obr. 32. Situace je analogická, ovšem v blízkosti kabelů je umístěn ještě teplovod.

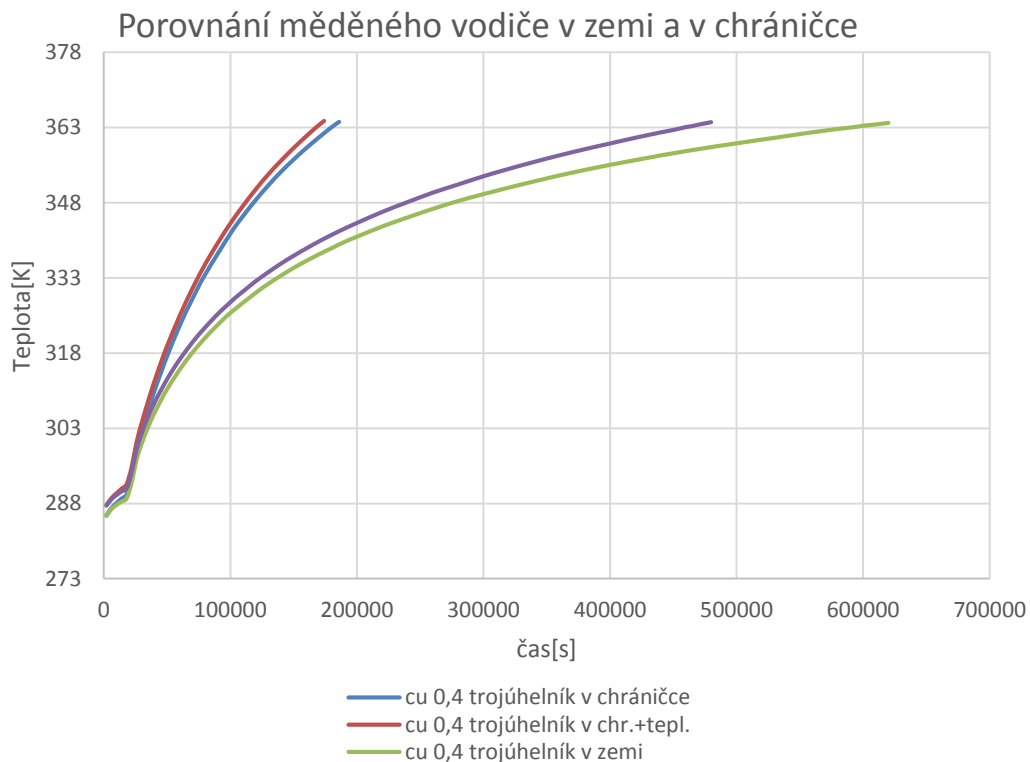


Obr. 32: Kabely v trojúhelníku

## Porovnání hliníkového vodiče v zemi a chrániče



Graf 17



**Graf 18**

### Závěrečné porovnání kabelů v chráničkách a v zemi

**Tabulka 23: Porovnání kabelů vedle sebe v chráničkách a v zemi**

Typ	čas[s]	čas[hod]	Typ	čas[s]	Čas [hod]
Al 0,4 chrán. ●●●+teplovod	134500	37	Cu 0,4 chrán. ●●●+teplovod	161000	45
Al 0,4 chránička ●●●	142500	40	Cu 0,4 chránička ●●●	176000	49
Al 0,4 v zemi c+teplovod	422000	117	Cu 0,4 v zemi ●●●+teplovod	500000	139
Al 0,4 v zemi ●●●	516000	143	Cu 0,4 v zemi ●●●	628000	174

**Tabulka 24: Porovnání kabelů v trojúhelníku v chráničkách a v zemi**

Typ	čas[s]	čas[hod]	Typ	čas[s]	Čas [hod]
Al 0,4 chrán. ●●●+teplovod	137500	38	Cu 0,4 chrán. ●●●+teplovod	168500	47
Al 0,4 chránička ●●●	145000	40	Cu 0,4 chránička ●●●	180500	50
Al 0,4 v zemi ●●●+teplovod	392000	109	Cu 0,4 v zemi ●●●+teplovod	462000	128
Al 0,4 v zemi ●●●	490000	136	Cu 0,4 v zemi ●●●	594000	165



Simulace kabelů v chráničkách ukazují mnohem prudší nárůst teploty a překročení kritické teploty ve výrazně kratším čase u všech charakteristik. Je to dáno tím, že tepelná vodivost prostoru mezi povrchem kabelu a chráničky je výrazně menší než u zeminy. Proto se teplo z kabelu odvádí hůře a dochází tím k většímu nárůstu teploty. Tento fakt ukazuje, že uložení kabelu v chráničkách je z hlediska tepelného namáhání kritickou částí kabelové trasy.

## 6.2.2 Zkratky a ustálené stavy kabelů v chráničkách

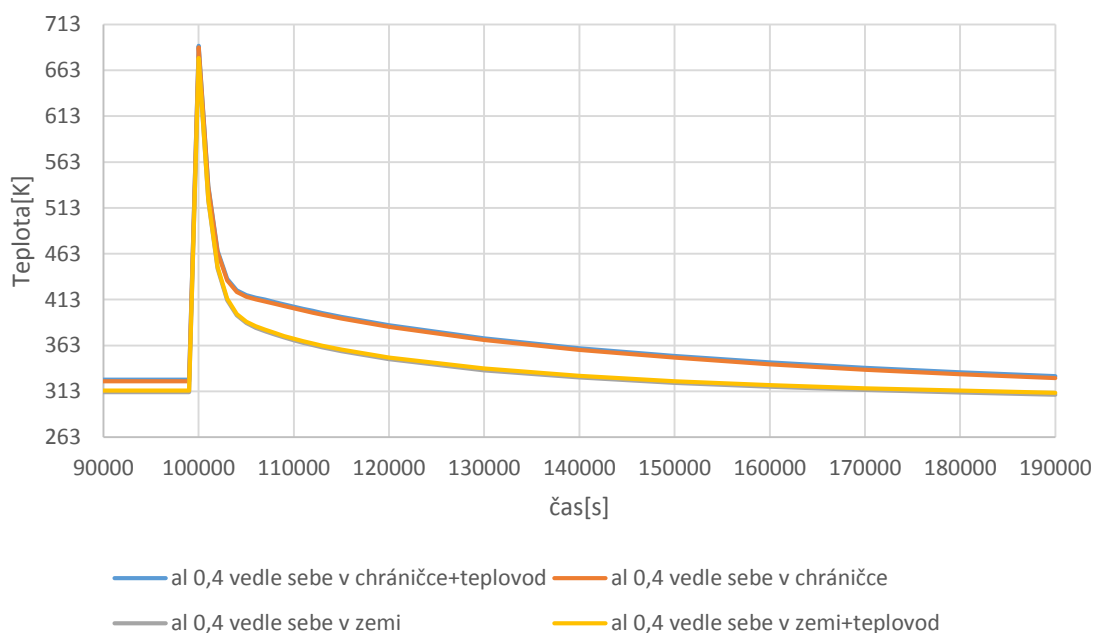
### Simulace č.1-Ustálené stavy a zkratky kabelů uspořádaných vedle sebe ●●●

Tato simulace je stejná jako simulace pro kabely uložené v zemi. V tabulce 25 vidíme ustálené stavy kabelu před zkratem pro hliníkový a měděný vodič. Vidíme, že rozdíl mezi kabelem bez teplovodu a s teplovodem je opět přibližně 1,5 K.

Tabulka 25: Ustálené stavy kabelů uložených vedle sebe v chráničkách, hliníkový a měděný vodič

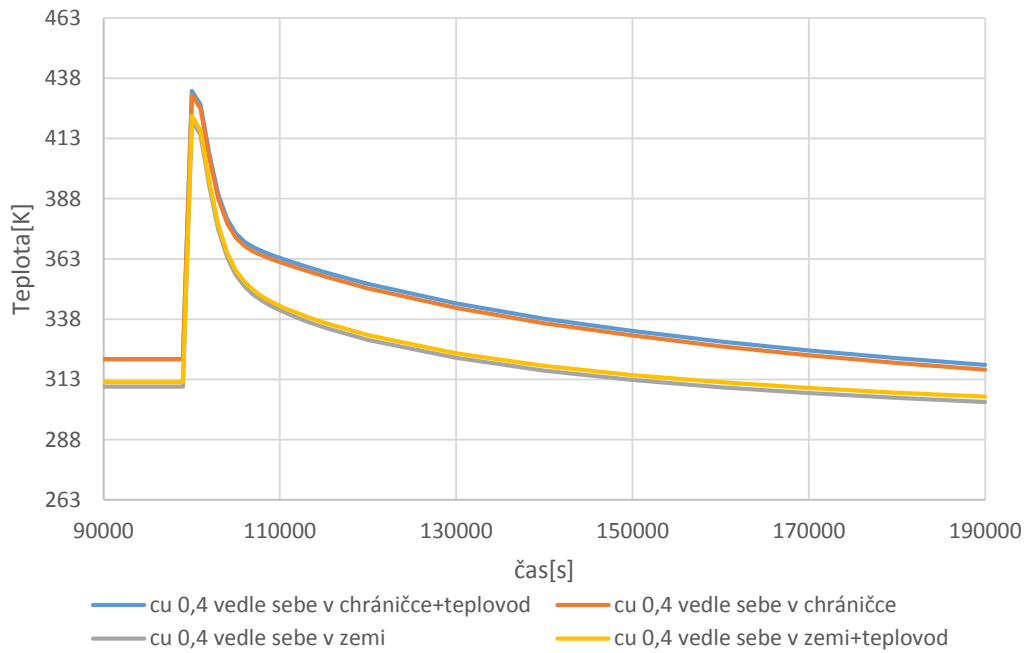
Typ	Teplota[K]	Typ	Teplota[K]
Al 0,4 chránička+teplovod	325,81	Cu 0,4 chránička+teplovod	321,48
Al 0,4 chránička	324,10	Cu 0,4 chránička	320,18

Porovnání hliníkových vodičů v seskupení vedle sebe



Graf č.18

### Porovnání měděných vodičů v seskupení vedle sebe při zkratu



Graf 19

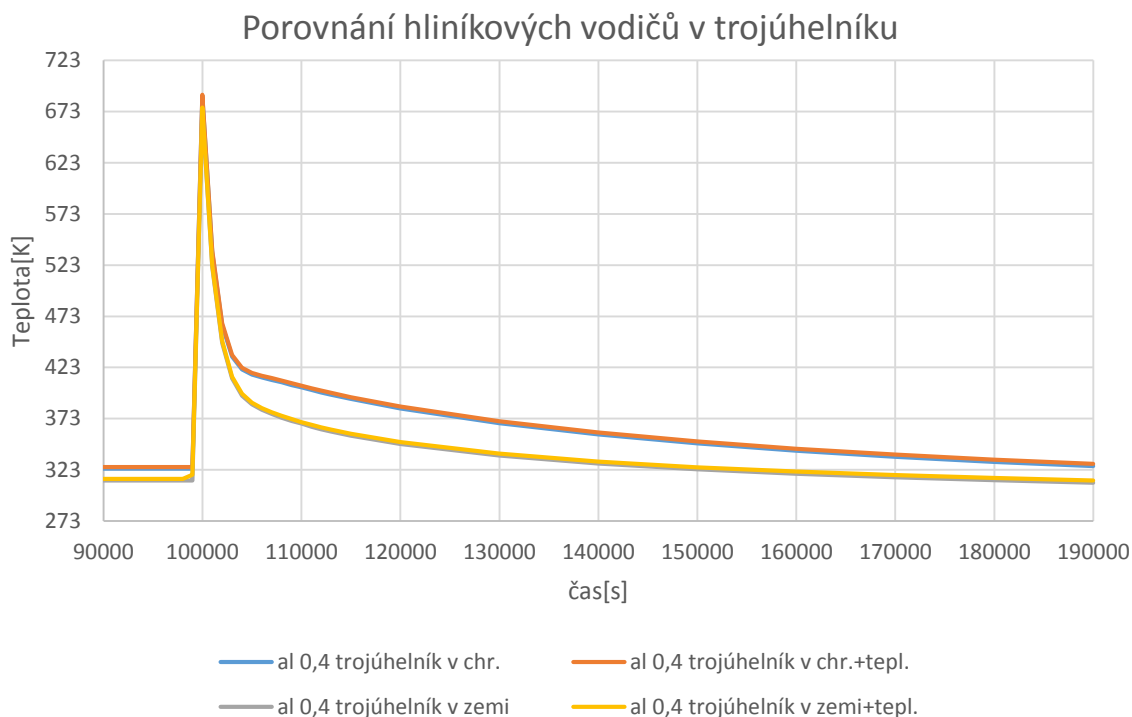
#### Závěr:

V případě kabelů v chráničkách je v ustálených stavech teplota vyšší o přibližně 10 K, oproti kabelům uloženým v zemi. Při zkratech je rozdíl maximální teplot u kabelů v chráničkách a v zemi malý. Při chladnutí kabelu po zkratu je průběh teploty velice podobný u kabelů v chráničkách i v zemi.

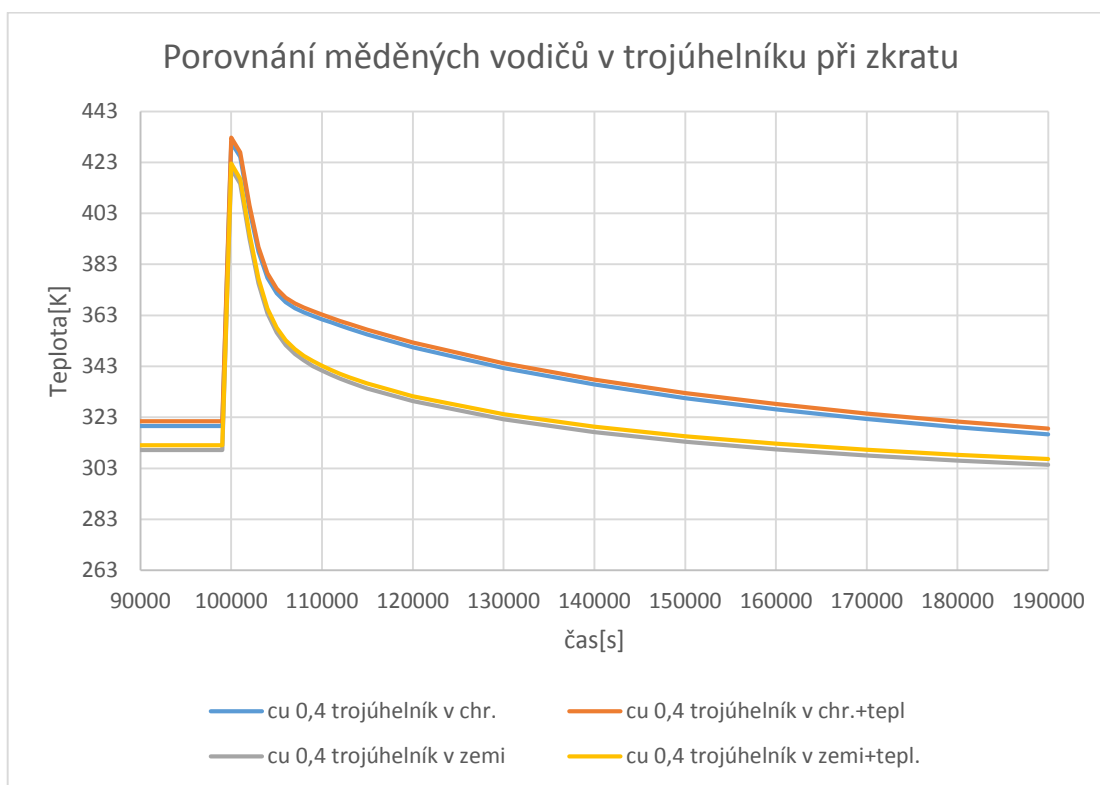
#### Simulace č.2-Ustálené stavy a zkraty kabelů uspořádaných do trojúhelníku

Tabulka 26: Ustálené stavy kabelů v chráničkách

Typ	Teplota[K]	Typ	Teplota[K]
Al 0,4 chránička+teplovod	325,65	Cu 0,4 chránička+teplovod	321,01
Al 0,4 chránička	324,01	Cu 0,4 chránička	319,60



**Graf 20**



**Graf 21**

#### Závěr

Hodnoty teplot kabelů v trojúhelníku v ustálených stavech jsou velice podobné hodnotám kabelů uložených vedle sebe v chráničkách. Zkratové charakteristiky jsou téměř totožné.

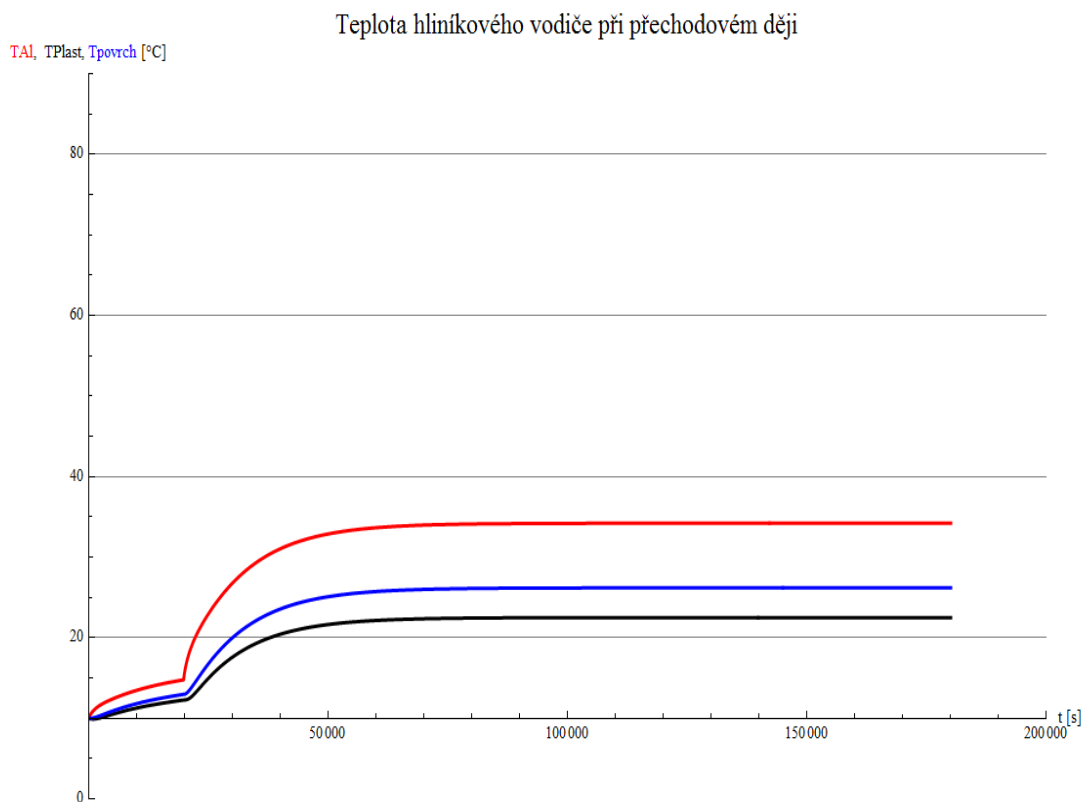
## 6.3 Kabely v kolektorech

V této kapitole jsem se zabýval kabelem, který je uložený v kolektoru (viz. Kapitola 5). Pro své výpočty jsem uvažoval jeden kabel. Šíření tepla u této situace se řídí podle (3-1). Pro tuto simulaci jsem využil výpočetní software Wolfram Mathematica. Řešil jsem opět přechodové děje, zkratky a ustálené stavy, jako tomu bylo v předchozích kapitolách.

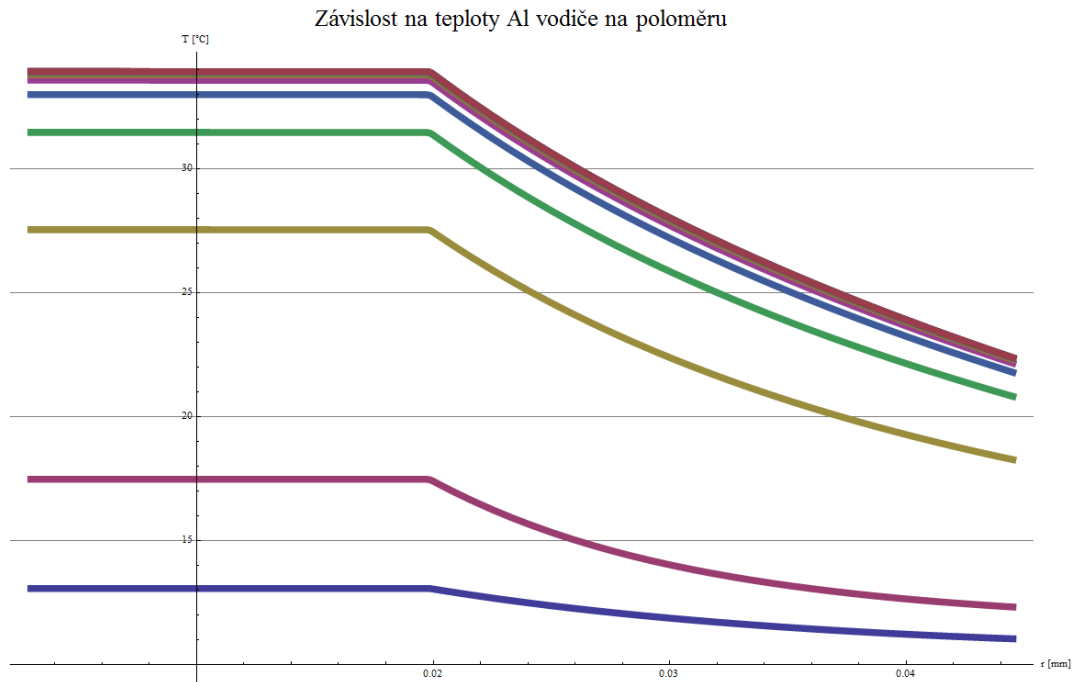
### 6.3.1 Simulace teploty kabelu v kolektoru při změně zatížení

#### Kabel s hliníkovým jádrem

Uvažujme kabel uložený na lávce v kolektoru jako je na obr. 3. Pro výpočet přechodového děje jsem počítal s proudem jádrem pro hliník 791 A a 999 A pro měď, dále jsem pro tento děj stanovil předpoklad, že proud stíněním je nulový. Parametry a rozměr jsem zachoval. Analýza kódu je umístěna v přílohách. První simulace je věnovaná hliníkovému vodiči. V čase 20 000 s vidíme nárůst teploty vlivem nárůstu proudu (graf 22). Tato teplota se zhruba v čase 70 000 s ustálí na teplotě 34,28 °C (červená křivka) pro hliníkové jádro. Dále jsem zobrazil průběh teploty na povrchu vodiče (modrá křivka), která byla 26,45°C. Teplota izolace XLPE se ustálila na zhruba 22,43°C. Průběh teplot v závislosti na poloměru vidíme na grafu 23. Vidíme tedy, že u kabelů v kolektorech nedojde k přehřátí a lze je zatěžovat maximálním proudovým zatížením jak u hliníku, tak i mědi.



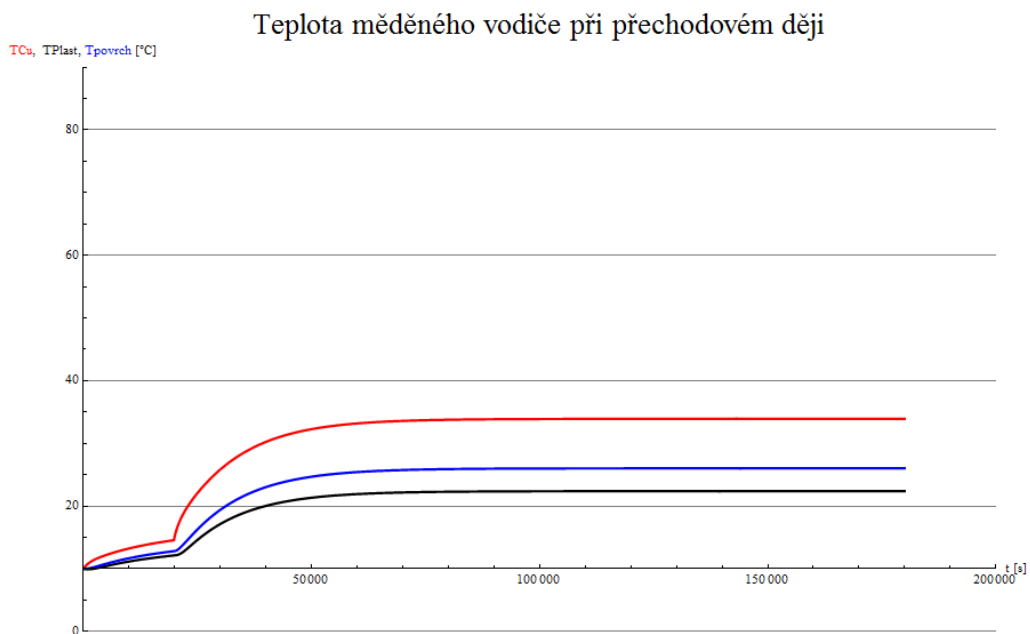
Graf 22



**Graf 23**

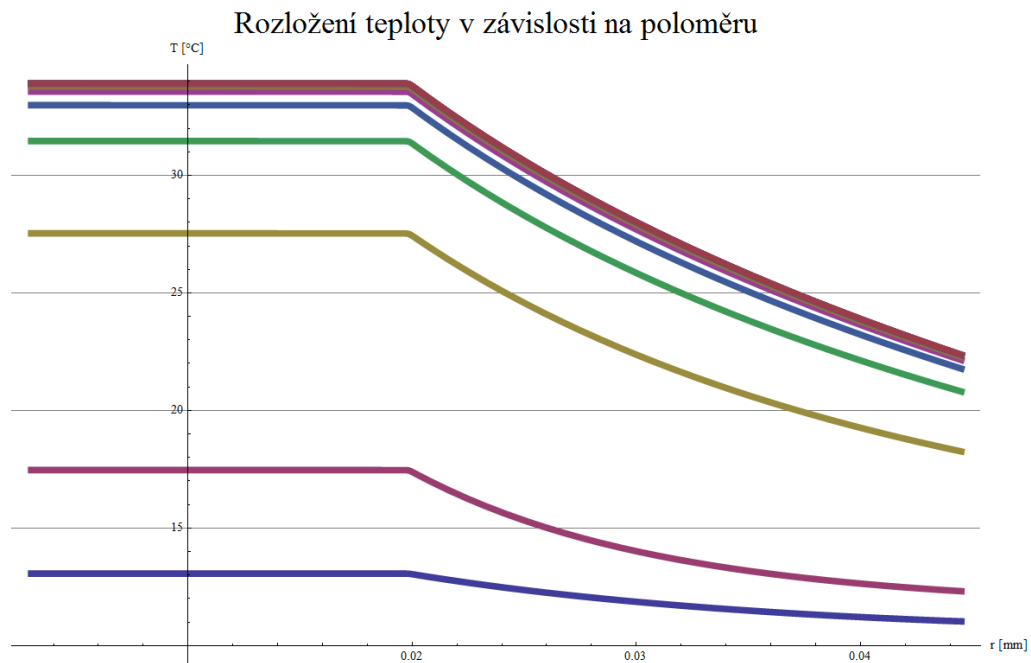
Průběh teploty měděného vodiče je zachycen na grafu 24. Teplota tohoto vodiče se ustálila na 33,92°C (červená křivka), teplota povrchu (modrá křivka) dosáhla 26,04°C a teplota izolace XLPE (černá křivka) se ustálila na 22,27°C.

### Kabel s měděným jádrem



**Graf 24**

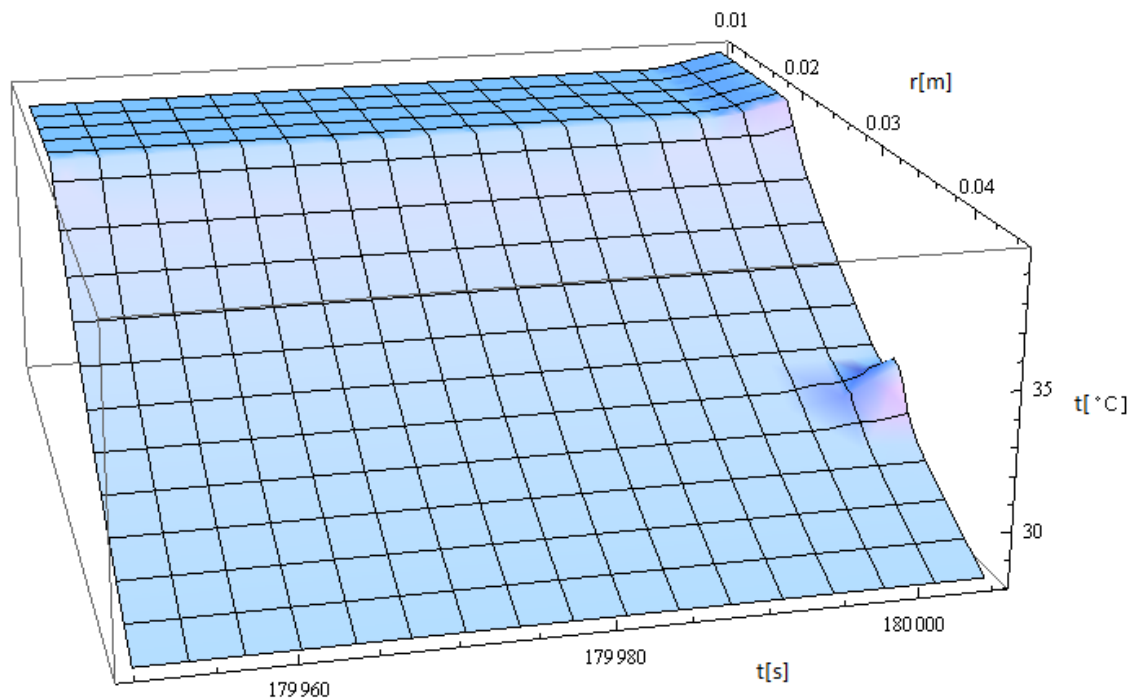
Rozložení teploty v závislosti na poloměru vidíme na grafu 25, pro jednotlivá zatížení. Vidíme, že pro větší vzdálenosti od jádra (zhruba 0,02mm) klesá teplota. Podobně tomu bylo i u hliníku. Tento fakt je dán také tím, že jsme pro tento děj považovali proud stíněním za nulový.



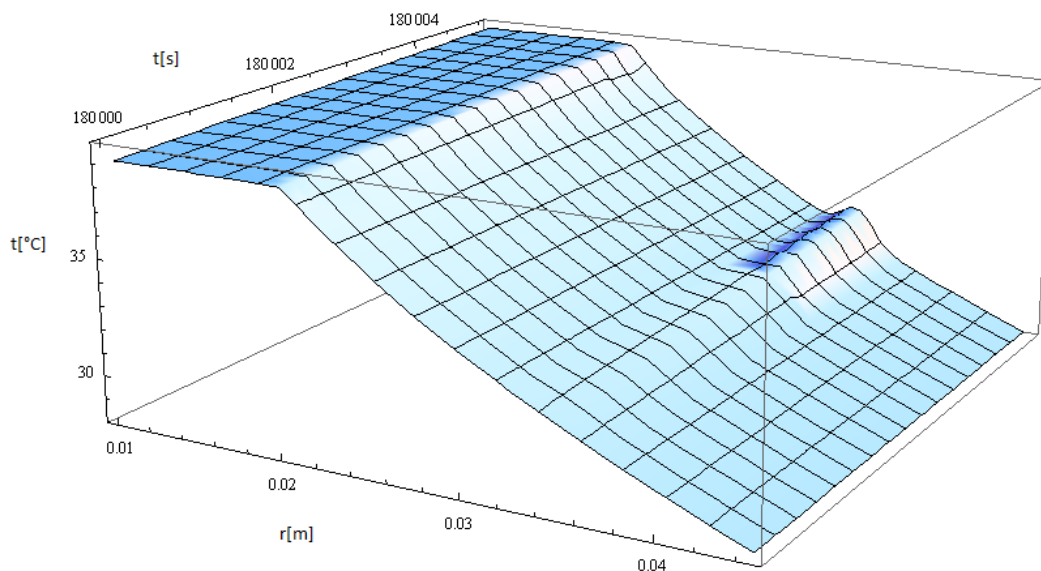
Graf 25

### 6.3.2 Simulace teploty kabelu při zkratu a ustálených stavech

V této kapitole jsem simuloval dvě situace, a to zatížení při 3,15 kA a 30 kA. V těchto simulacích jsem uvažoval proud stíněním nenulový.

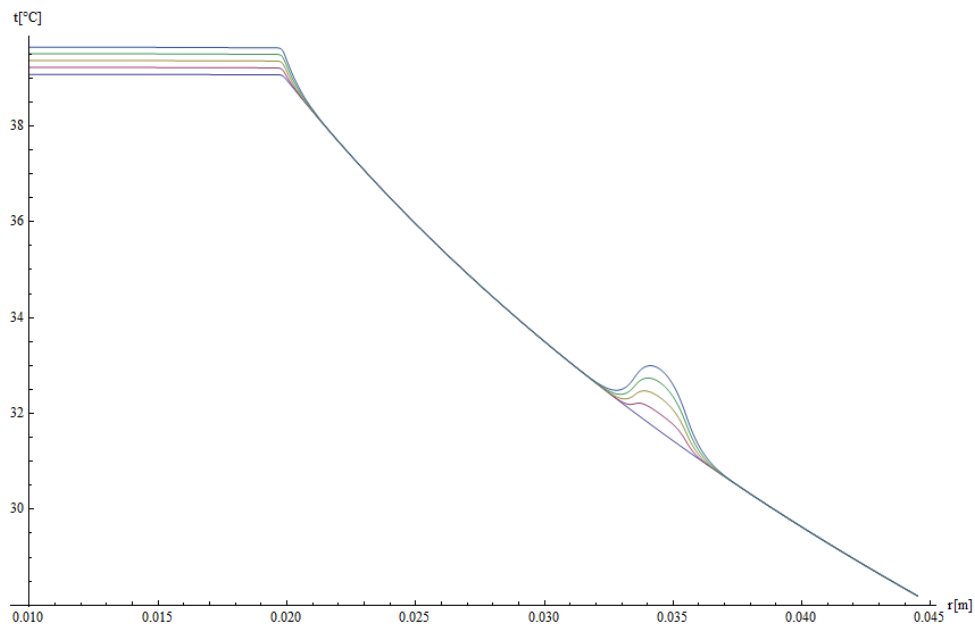


Graf 26



Graf 27

Na 3D grafech 26 a 27 je vidět rozložení teploty v závislosti na čase a poloměru. Na grafu 26 je vidět proud do času 180 001 s, tedy jednu sekundu po začátku zkratu. Na grafu 27 vidíme čas od 180 000 do 180 005 s, tedy průběh zkratu. Strmější nárůst teploty je u stínění. Je to díky větší resistanci, z důvodu velmi malého průřezu.



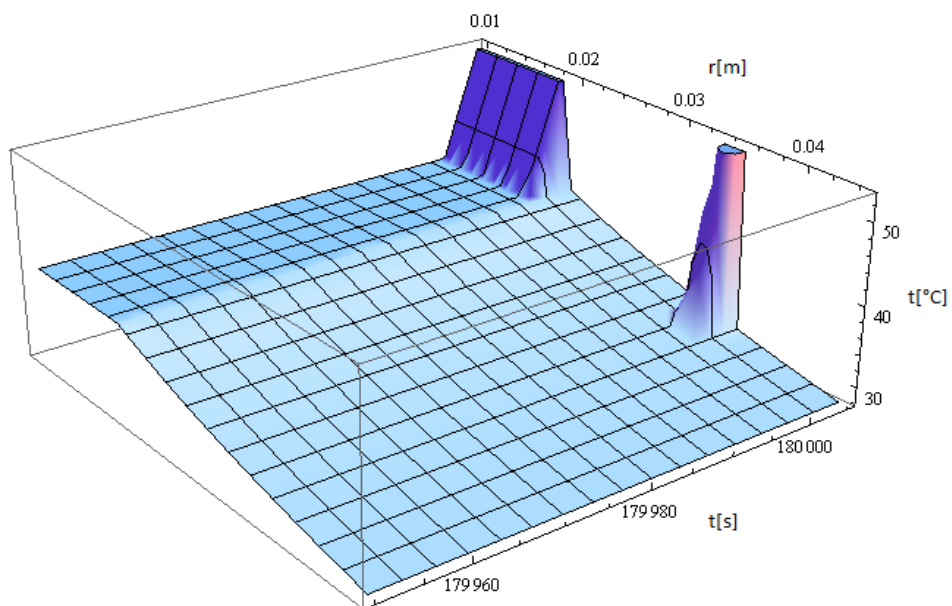
**Graf 28**

Na grafu 28 vidíme 2D zobrazení. S rostoucím časem vidíme nárůst teploty.

Pozn.: Všechny grafy v této podkapitole jsou určeny pro hliníkový vodič, neboť charakteristiky pro měděný vodič jsou velice podobné.

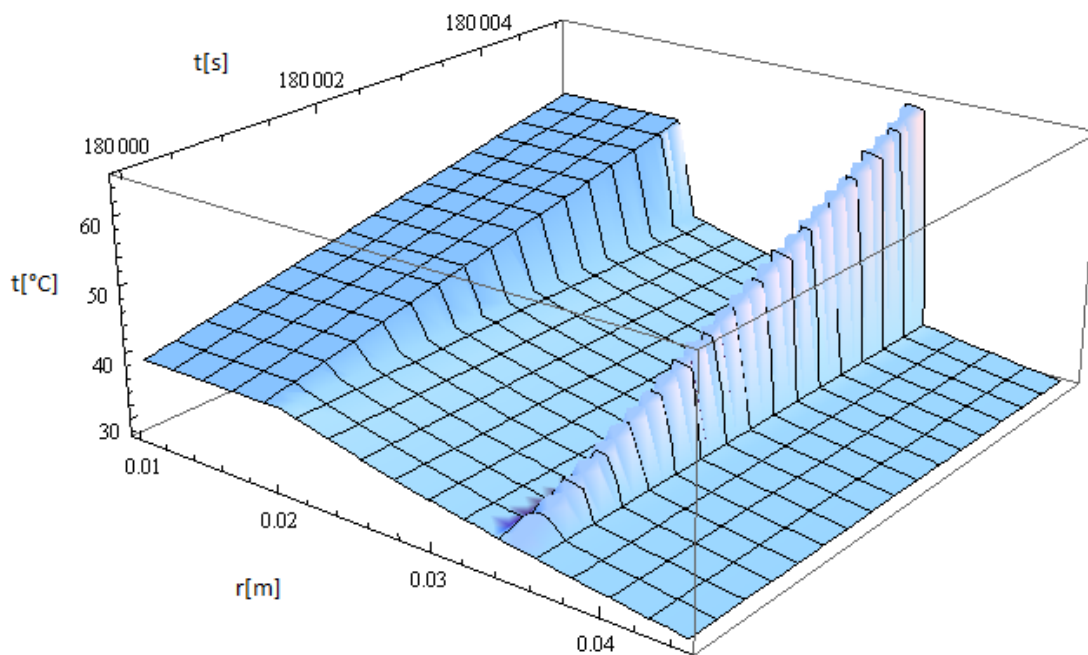
### Hliníkový vodič při zkratu 30 kA

V této simulaci jsem zatížil kabel přibližně desetinásobným proudem než v předchozí simulaci. Rozdíl nárůstu teploty u stínění a jádra kabelu je zde větší vlivem indukovaného proudu ve stínění.

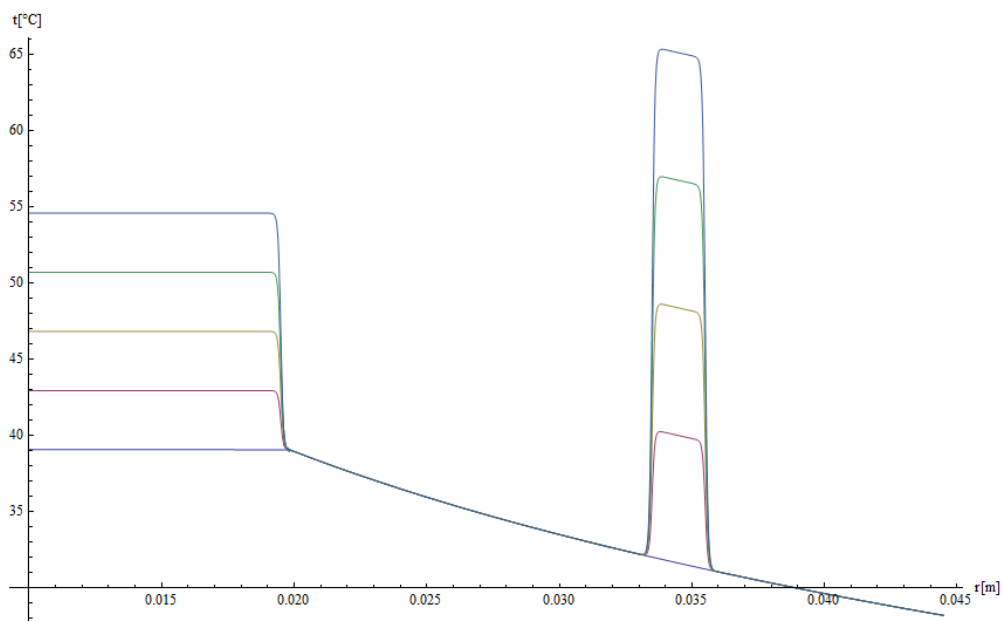


**Graf 29**





Graf 30



Graf 31

### Závěr

V tomto případě jsem pomocí programu Wolfram Mathematica zkoumal vliv proudu na jádro a stínění kabelu. Z vytvořených grafů je patrné, že stínění je nejvíce zatíženou součástí kabelového vedení, a v případě větších proudů je vidět značný teplotní rozdíl mezi jádrem kabelu a stíněním.

## 7. Celkový závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval simulováním oteplení kabelů 110kV v typických případech instalací v zemi, v chráničkách a kolektorech. S ohledem na obtížné získání skutečných reálných měření těchto stavů jsem se zaměřil na simulaci uvedeného problému pomocí matematických a grafických simulačních programů.

Pro instalace vedení v kolektorech je z výsledků zřejmé, že v kolektoru nedochází v žádném režimu provozu k překročení maximální dovolené teploty jádra kabelu 90°C při zatížení kabelového vedení  $I_{dov}$  na 100%. Je však třeba konstatovat, že výpočet byl prováděn pro jeden kabel a kolektory zpravidla slouží k uložení více vedení nejrůznějšího typu a proto je nutné tento problém řešit v praxi komplexně. U kolektorů je ovšem řešení snížení provozní teploty okolí možné dodatečnými technickými prostředky jako je přirozeném nebo nuceném větrání kolektorů.

Při uložení vedení do země je překročení maximální dovolené provozní teploty jádra kabelu 90 °C při zatížení kabelového vedení  $I_{dov}$  na 100% reálné v zeminách se špatnou tepelnou vodivostí tj s tepelnou vodivostí  $\lambda \leq 0,5$ . V případech s  $\lambda \geq 1$  se při výpočtech překročení maximálního dovoleného oteplení nevyskytovalo. Snížení tohoto vlivu za daných podmínek simulace je možné dosáhnout vhodným uspořádáním a použitím Cu vodiče a uložení s mezerou jak je patrné ze simulace č.6 a tabulky č.10.

Největší problém, jak ukazují simulované výsledky, nastává u uložení vedení v zemi a v chráničkách. Ukazuje se, že problém překročení maximální dovolené provozní teploty jádra kabelu 90 °C je patrný ve všech režimech provozu (ustálený stav i přechodové stavy) a to ve všech konfiguracích do trojúhelníku i v rovině.

## 8. Zdroje

- [1]:<http://www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf>
- [2]:skripta: Elektrický rozvod a rozvodná zařízení, Doc. Ing. František Fencel CSc., ČVUT FEL 2009
- [3]:Optická komunikační technika, Doc. Ing. Karel Novotný CSc., ČVUT FEL 2007
- [4]:Systémy pro optické komunikace Doc.Ing. Karel Novotný CSc., Ing. Tomáš Martan, Ing. Jan Šístek, ČVUT FEL 2007
- [5]:Optické komunikační systémy, Leoš Boháč, Michal Lucki, ČVUT FEL 2010
- [6]: M.A.Michejev-Základy sdílení tepla
- [7]: Diplomová práce-Tepelný model kabelu, Petr Pátek
- [8]:Fyzikální olympiáda-Přenos tepla,Ivo Volf, Miroslava Jarešová, Miroslav Ouhrabka
- [9]:Normy ČSN uvedené v textu
- [10]:Analýza procesů při ukládání tepla do zeminy, Ing. Martin Beneš, VUT Brno FS
- [11]: Teplotní pole Zemin, Ing. Petr Kacálek, SF VUT v Brně
- [12]:Katalog firmy ABB
- [13]:<http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>
- [14]: <http://sanhealthcheck.com/?q=node/8>
- [15]: Optické přenosové systémy-X32OPS-„Fyzikální limity optické přenosové trasy-kompensace chromatické disperze, Ing. Leoš Boháč PhD
- [16]: Katalog firmy Brugg Cables
- [17]: Podklady z programu Sichr OEZ
- [18]: Webové stránky programu Agros 2D
- [19]: Webové stránky Wolfram Mathematica
- [20]: Fotografie pořízené z průběhu montáže kabelů 110 kV v PREdistribuce a.s.

## 9. Přílohy:

**Příloha 1: Parametry simulovaného kabelu**

Parametry 110 kV kabelu, průměr 1000 mm <sup>2</sup>	
Jádro [mm <sup>2</sup> ]	39,0
Vrstva XLPE [mm]	16,0
Plocha stínění [mm <sup>2</sup> ]	110
Vnější vrstva izolace [mm]	93
Hmotnost kabelu [kg/m]	15/9,1
Přípustné tažné síly [kN]	50/30
Min. poloměr ohybu při pokládce [m]	2,30
Min. poloměr ohybu na konci [m]	1,40
Elektrické parametry	
Cu vodič DC resistance při 20°C [Ω/km]	0,0176
Al vodič DC resistance při 20°C [Ω/km]	0,0291
Cu vodič AC resistance při 90°C [Ω/km]	0,0232
Al vodič AC resistance při 90°C [Ω/km]	0,0375
Síla pole při U <sub>0</sub> na stínění vodiče [kV/mm]	6,3
Síla pole při U <sub>0</sub> na stínění jádra [kV/mm]	3,7
Kapacita [μF/km]	0,24
Induktance [mH/km]	0,56
Maximální proud Cu jádro [A]	999
Maximální proud Al jádro [A]	791

Zdroj [16]

**Příloha 2: Parametry použitého teplovodu**

Parametry teplovodu		
Trubice [mm <sup>2</sup> ]		300
Vrstva oceli [mm]		36
Vrstva izolace polyuretanu [mm]		125
Fyzikální vlastnosti		
Polyuretan	tep. vodivost [W/(m.K)]	0,0227
	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	35
	tepelná kapacita [J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	1500
Ocel	tep. vodivost [W/(m.K)]	40
	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
	tepelná kapacita [J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	500
Teplonosné médium	tep. vodivost [W/(m.K)]	0,682
	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	943
	tepelná kapacita [J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	1895

**Příloha 3: Parametry ostatních objektů**

Typ	Tep. Vodivost	Hustota	Tep. Kapacita
XLPE	0,3	920	4130
Asfalt ACO 8	0,75	1100	920
Asfalt ACP 16	0,75	1200	920
Beton	0,5	1000	880
Štěrkoдрť	0,93	1650	840
HDPE	0,46	940	2000
vzduch v mezeře	0,0265	1,046	1015

#### Příloha 4: Ukázka kódu ve Wolfram Mathematica

```
In[1]:= pom = pom;
Remove["Global`*"];
Off[UpSet::write, UpSetDelayed::write];
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
cm = 0.01;
mm = 0.1 cm;
Off[General::"obspkg"];
<< Miscellaneous`ChemicalElements`;
Needs["VectorAnalysis`"];

In[11]:=

l = 1; (*delka vodice*)
prumer = 39 mm;
prurez =  $\frac{\text{prumer}^2}{4} * \pi * 0.84$ ; (*0.84=hodnota koeficientu plneni*)
izolace1 = 18 mm; (*tloustka prvni izolace*)
izolace2 = 7 mm; (*tloustka druhe izolac*)
RALnakm = 0.0000375;
kss = 1.02;
(*RAL=RALnakm* $\frac{1}{\text{prurez}}$ *kss*(1+(90-20)*0.004);*)


$$\gamma_{Al} = \frac{1}{RAL + \text{prurez}}$$

RAL = 0.0000375;
Out[18]=  $\frac{996.556}{RAL}$ 

In[20]:=  $\lambda_{\text{vodic}} = 237$ ; (* pro Al=237, pro Cu=395*)

In[21]:=  $\lambda_{\text{stineni}} = 395$ ;

In[22]:=  $\lambda_{\text{xlpe}} = 0.3$ ;

In[23]:=  $\text{objem} = l * \text{prurez}$ ; (*objem kabelu na 1m delky*)

rvodic =  $\frac{\text{prumer}}{2}$ ;
tloustkaIzolace = izolace1 + izolace2;
tloustkaStineni = 4 mm;
rocpAl =  $10^3 * \text{Density}[\text{Aluminium}][[1]] * \text{SpecificHeat}[\text{Aluminium}][[1]]$ ;
rocpXlpe =  $920 * 4130.$ ;
rmax = rvodic + tloustkaIzolace;
```

```
In[30]:= prechod[vlevo_, vpravo_] :=
  Module[{res, A, B}, res = Solve[{A - B == vlevo, A + B == vpravo}];
  A + B * Tanh[ $\frac{r - rvodic}{0.1 \text{ mm}}$ ] /. res[[1]];
  (*prechod vlevo (-1, jadro) a vpravo (+1, izolace) na rozhrani jadro-izolace,
  nutno si vytvorit funkci Module,
  protoze mathematica neumi resit skokove stavy,
  jako agros, viz. Plot pod timto textem,
  ktery ilustracne zobrazuje chovani cele teto funkce*)
```

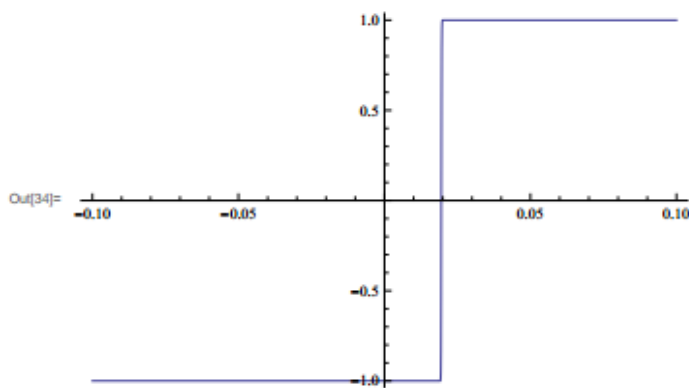
```
In[31]:= λ = prechod[λvodic, λxlpe];
```

```
In[32]:= rvodic
```

```
Out[32]:= 0.0195
```

```
In[33]:= myPl[co_, popis_] :=
  Plot[co, {r, 0, rmax}, PlotStyle -> {Thickness[0.006], Hue[0]},
  AxesLabel -> {"r [m]", popis}, AxesOrigin -> {0, 0}, GridLines -> Automatic];
```

```
In[34]:= Plot[Tanh[ $\frac{r - rvodic}{0.1 \text{ mm}}$ ], {r, -10 \text{ cm}, 10 \text{ cm}}
```



```
In[35]:=
```

```
In[36]:=
```

```
In[37]:= tmax = 50 * hodina;
rmin = 3 mm; (*nutno zadat rmin, ktery reprezentuje stred. Protoze
okrajova a pocatecni podminka koliduji v uplnem stredu jadra,
zavedeme rmin a pridame na vykonu kolem tohoto polomeru*)
Tpoc = 10;
kKor =  $\frac{rvodic^2}{rvodic^2 - rmin^2}$ ; (*?*)
rocp = prechod[kKor * rocpAl, rocpXlpe];
poc = T[r, 0] = Tpoc; (*pocatecni podminka*)
```

```

γAlCorr = γAl + kKor-1;
minuta = 60;
hodina = 60 * minuta;
SetCoordinates[Cylindrical[r, fi, z]];
(*cylindricke souradnice pri prevodu na ne vznikne  $\frac{1}{r}$  vyraz,
pro r=0 by nemelo reseni, proto zavedeme trik kdy misto
prostredku s rmin pridame na vykonu okolo tohoto polomeru*)
proudMax = 791.;
tauprubeh = 1;
fce[{t1_, t2_, ipomerne_Real}] :=
  proudMax * 0.5 * ipomerne * (Tanh[ $\frac{t - t1}{tauprubeh}$ ] - Tanh[ $\frac{t - t2}{tauprubeh}$ ]);
(*pro Al je proud 791 A, pro Cu je 999 A*)
dataZatizeni = {{0, 0.11 tmax, 0.5}, {0.11 tmax, 4 tmax, 1.}, {4 tmax, 6 tmax, 1.}};
proud = Plus@@(fce/@dataZatizeni);
Tvzduch = 12;
Tsteny = 8;
Plot[proud, {t, 0, tmax}, PlotRange -> All,
  PlotLabel -> "Zat ovEn hlin kov@ho kabelu", AxesLabel -> {"t [s]", "I[A]"}]

QVjadro =  $\frac{\text{proud}^2 * RAl}{\text{objem}}$  * prechod[1, 0]; (*tepelny vykon generovany jadrem*)

tauPS = 0.1 mm;
prechodStineni = 0.5 * (Tanh[ $\frac{r - \text{stredStineni} + 0.5 \text{tFiktivni}}{\text{tauPS}}$ ] -
  Tanh[ $\frac{r - \text{stredStineni} - 0.5 \text{tFiktivni}}{\text{tauPS}}$ ]);
myPl[prechodStineni, "pS"];
RStinenilm = 0.00005;
IStineni = 0;
stredStineni = rmax - 10 mm;
tFiktivni = 2 mm;

prechodStineni = 0.5 * (Tanh[ $\frac{r - \text{stredStineni} + 0.5 \text{tFiktivni}}{\text{tauPS}}$ ] -
  Tanh[ $\frac{r - \text{stredStineni} - 0.5 \text{tFiktivni}}{\text{tauPS}}$ ]);
objemStineni =  $\frac{1}{1} \text{Pi} * ((\text{stredStineni} + 0.5 \text{tFiktivni})^2 -
  (\text{stredStineni} - 0.5 \text{tFiktivni})^2)$ ;
QVStineni =  $\frac{IStineni^2 * RStinenilm}{\text{objemStineni}}$  * prechodStineni;

```



```

In[68]= alfa[ΔT_] := 1.536 * Abs[ΔT]0.33;
(*z neznameho duvodu Mathematica nebere v tomto pripade absolutni hodnotu,
z tohoto duvodu zavedem*)

alfaRce = Interpolation[#, alfa[#]] & /@Range[-30, 380, 0.5];
ε = 0.8;
σ = 5.67 * 10-8;
prechodcas =  $\frac{t}{t + 10.}$ ;
(*trik rusici rozpor okrajove podminky s pocatecni podminkou,
pri teto kolizi totiz je pocatecni podminka nulova,
kdezto okrajova podminka okolniho prostredi je nenulova → nesmysl*)

okrIn = D[T[r, t], r] == 0 /. r → rmin; (*okrajova podminka ve vnitru kabelu*)
okrOut = -λ * D[T[r, t], r] ==
  prechodcas * ((alfaRce[T[r, t] - Tvzduch] * (T[r, t] - Tvzduch) +
    ε * σ * ((T[r, t] + 273)4 - (Tsteny + 273)4)) /. r → rmax; (*vnejsek*)
rce = rocp * D[T[r, t], t] == Div[λ * Grad[T[r, t]]] + QVjadro + QVstineni;
(*F-K rovnice s teplem generovanim v stineni a jadre*)

In[76]= res = NDSolve[{rce, okrIn, okrOut, poc}, T[r, t], {r, rmin, rmax},
  {t, 0, tmax}, MaxStepSize → {0.03 mm, 0.5 minuta}][[1]];

```

## Příloha 5: Ukázka kódu v PythonLabu

```
1 import agros2d as a2d
2 def vodivost(t1,t2):
3     return -0.07929253915043233 -0.014254798890568202*(t1-273) -0.00012869714762084778*(t1-273)*(t1-273) +0.000004344101517883594*(t1-273)*
4     (t1-273)*(t1-273) -0.0000000330651423616425*(t1-273)*(t1-273)*(t1-273) +0.025094838154040802*(t2-273) + 0.00038649922192786546*(t1-273)*(t2-273)
5     -0.0007695180314694297*(t2-273)*(t2-273) -0.00000006809657597231259*(t1-273)*(t1-273)*(t2-273) +0.000008561858113363175*(t2-273)*(t2-273)
6     -0.0000000349193002226071*(t2-273)*(t2-273)*(t2-273);
7
8
9
10 def funkce((tch,tk)):
11     # problem
12     problem = a2d.problem(clear = True)
13     problem.coordinate_type = "planar"
14     problem.mesh_type = "triangle"
15
16     # fields
17     # heat
18     heat = a2d.field("heat")
19     heat.analysis_type = "steadystate"
20     heat.matrix_solver = "mumps"
21     heat.number_of_refinements = 1
22     heat.polynomial_order = 2
23     heat.adaptivity_type = "disabled"
24     heat.solver = "linear"
25
26
27     # boundaries
28     heat.add_boundary("prvni podminka", {"heat_heat_flux": {"heat_heat_flux": 0, "heat_convection_heat_transfer_coefficient": 7, "heat_convection_external_temperature": 363,
29     "heat_radiation_emissivity": 1, "heat_radiation_ambient_temperature": 363}})
30     heat.add_boundary("druha podminka", {"heat_temperature": {"heat_temperature": 363}})
31     heat.add_boundary("nova podminka", {"heat_temperature": {"heat_temperature": 283}})
32     heat.add_boundary("horkovod", {"heat_heat_flux": {"heat_heat_flux": 0, "heat_convection_heat_transfer_coefficient": 7.9, "heat_convection_external_temperature": 373,
33     "heat_radiation_emissivity": 0.67, "heat_radiation_ambient_temperature": 373}})
34
35
36     # materials
37     heat.add_material("zemina-sucha puda, ridke deste", {"heat_conductivity": 0.5, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0,
38     "heat_velocity_angular": 0, "heat_density": 800, "heat_specific_heat": 1209})
39     heat.add_material("xlpe", {"heat_conductivity": 0.28, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
40     "heat_density": 920, "heat_specific_heat": 4130})
41     heat.add_material("hlinik", {"heat_conductivity": 237, "heat_volume_heat": {"expression": "23689.6*(time>10000)+5922.4*(time<500400)-5922.4*(time>10000)" },
42     "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0, "heat_density": 2700, "heat_specific_heat": 24.2})
43     heat.add_material("medene stineni", {"heat_conductivity": 395, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0,
44     "heat_velocity_angular": 0, "heat_density": 8960, "heat_specific_heat": 383})
45     heat.add_material("ACO 8", {"heat_conductivity": 0.75, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
46     "heat_density": 1100, "heat_specific_heat": 920})
47     heat.add_material("ACP 16", {"heat_conductivity": 0.75, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
48     "heat_density": 1200, "heat_specific_heat": 920})
49     heat.add_material("sterkodrt", {"heat_conductivity": 0.93, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
50     "heat_density": 1650, "heat_specific_heat": 840})
51     heat.add_material("beton", {"heat_conductivity": 0.5, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
52     "heat_density": 1000, "heat_specific_heat": 880})
53     heat.add_material("voda", {"heat_conductivity": 0.682, "heat_volume_heat": 1000, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
54     "heat_density": 0, "heat_specific_heat": 4180})
55     heat.add_material("HDPE", {"heat_conductivity": 0.52, "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
56     "heat_density": 9.58e-05, "heat_specific_heat": 2700})
57     heat.add_material("vzduch", {"heat_conductivity": vodivost(tk,tch), "heat_volume_heat": 0, "heat_velocity_x": 0, "heat_velocity_y": 0, "heat_velocity_angular": 0,
58     "heat_density": 1.429, "heat_specific_heat": 29.378})
59
```

```

59
60 # geometry
61 geometry = a2d.geometry
62 geometry.add_edge(-5.5, -5, -5.5, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
63 geometry.add_edge(-0.75, 1.07, -0.75, 1.19)
64 geometry.add_edge(-0.75, 1.27, -0.75, 1.3)
65 geometry.add_edge(0.75, 1.07, 0.75, 1.19)
66 geometry.add_edge(0.75, 1.19, 0.75, 1.27, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
67 geometry.add_edge(0.75, 1.07, -0.75, 1.07)
68 geometry.add_edge(-0.75, 1.19, 0.75, 1.19)
69 geometry.add_edge(0.75, 1.27, -0.75, 1.27)
70 geometry.add_edge(-0.75, 1.3, -5.5, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
71 geometry.add_edge(-0.75, 1.3, 0.75, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
72 geometry.add_edge(0.75, 1.27, 0.75, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
73 geometry.add_edge(-0.75, 1.19, -0.75, 1.27)
74 geometry.add_edge(6.8, 1.07, 6.8, 1.19)
75 geometry.add_edge(0.75, 1.3, 0.8, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
76 geometry.add_edge(0.75, 1.07, 0.8, 1.07)
77 geometry.add_edge(0.8, 1.07, 6.8, 1.07)
78 geometry.add_edge(0.8, 1.19, 0.8, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
79 geometry.add_edge(0.8, 1.19, 0.8, 1.07)
80 geometry.add_edge(0.8, 1.19, 6.8, 1.19, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
81 geometry.add_edge(6.8, 1.19, 6.8, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
82 geometry.add_edge(6.8, 1.3, 6.85, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
83 geometry.add_edge(6.85, 1.27, 6.85, 1.3)
84 geometry.add_edge(6.85, 1.27, 6.85, 1.19)
85 geometry.add_edge(6.85, 1.19, 6.85, 1.07)
86 geometry.add_edge(6.85, 1.3, 8.35, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
87 geometry.add_edge(6.85, 1.27, 8.35, 1.27)
88 geometry.add_edge(6.85, 1.19, 8.35, 1.19)
89 geometry.add_edge(8.35, 1.3, 8.35, 1.27)
90 geometry.add_edge(8.35, 1.27, 8.35, 1.19)
91 geometry.add_edge(8.35, 1.19, 8.35, 1.07)
92 geometry.add_edge(6.8, 1.07, 6.85, 1.07)
93 geometry.add_edge(6.85, 1.07, 8.35, 1.07)
94 geometry.add_edge(8.35, 1.3, 13.1, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
95 geometry.add_edge(13.1, -5, 13.1, 1.3, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
96 geometry.add_edge(0.0195, 0, 0, 0.0195, angle = 90)
97 geometry.add_edge(0, -0.0195, 0.0195, 0, angle = 90)
98 geometry.add_edge(-0.0195, 0, 0, -0.0195, angle = 90)
99 geometry.add_edge(0, 0.0195, -0.0195, 0, angle = 90)
100 geometry.add_edge(0, -0.0355, 0.0355, 0, angle = 90)
101 geometry.add_edge(-0.0355, 0, 0, -0.0355, angle = 90)
102 geometry.add_edge(0, 0.0355, -0.0355, 0, angle = 90)
103 geometry.add_edge(0.0355, 0, 0, 0.0355, angle = 90)
104 geometry.add_edge(0.0395, 0, 0, 0.0395, angle = 90)
105 geometry.add_edge(0, 0.0395, -0.0395, 0, angle = 90)
106 geometry.add_edge(-0.0395, 0, 0, -0.0395, angle = 90)
107 geometry.add_edge(0, -0.0395, 0.0395, 0, angle = 90)
108 geometry.add_edge(0, 0.0465, -0.0465, 0, angle = 90)
109 geometry.add_edge(-0.0465, 0, 0, -0.0465, angle = 90)
110 geometry.add_edge(0, -0.0465, 0.0465, 0, angle = 90)
111 geometry.add_edge(0.0465, 0, 0, 0.0465, angle = 90)
112 geometry.add_edge(-5.5, -5, 13.1, -5, boundaries = {"heat" : "nova podminka"})
113 geometry.add_edge(0, -0.0515, 0.065, 0.0135, angle = 90)
114 geometry.add_edge(0.065, 0.0135, 0, 0.0785, angle = 90)
115 geometry.add_edge(0, 0.0785, -0.065, 0.0135, angle = 90)
116 geometry.add_edge(-0.065, 0.0135, 0, -0.0515, angle = 90)
117 geometry.add_edge(0, 0.0885, -0.075, 0.0135, angle = 90)
118 geometry.add_edge(-0.075, 0.0135, 0, -0.0615, angle = 90)
119 geometry.add_edge(0, -0.0615, 0.075, 0.0135, angle = 90)
120 geometry.add_edge(0.075, 0.0135, 0, 0.0885, angle = 90)
121 geometry.add_edge(0.1705, 0, 0.151, 0.0195, angle = 90)
122 geometry.add_edge(0.151, -0.0195, 0.1705, 0, angle = 90)
123 geometry.add_edge(0.1315, 0, 0.151, -0.0195, angle = 90)

```

```

124 geometry.add_edge(0.151, 0.0195, 0.1315, 0, angle = 90)
125 geometry.add_edge(0.151, -0.0355, 0.1865, 0, angle = 90)
126 geometry.add_edge(0.1155, 0, 0.151, -0.0355, angle = 90)
127 geometry.add_edge(0.151, 0.0355, 0.1155, 0, angle = 90)
128 geometry.add_edge(0.1865, 0, 0.151, 0.0355, angle = 90)
129 geometry.add_edge(0.1905, 0, 0.151, 0.0395, angle = 90)
130 geometry.add_edge(0.151, 0.0395, 0.1115, 0, angle = 90)
131 geometry.add_edge(0.1115, 0, 0.151, -0.0395, angle = 90)
132 geometry.add_edge(0.151, -0.0395, 0.1905, 0, angle = 90)
133 geometry.add_edge(0.151, 0.0465, 0.1045, 0, angle = 90)
134 geometry.add_edge(0.1045, 0, 0.151, -0.0465, angle = 90)
135 geometry.add_edge(0.151, -0.0465, 0.1975, 0, angle = 90)
136 geometry.add_edge(0.1975, 0, 0.151, 0.0465, angle = 90)
137 geometry.add_edge(0.151, -0.0515, 0.216, 0.0135, angle = 90)
138 geometry.add_edge(0.216, 0.0135, 0.151, 0.0785, angle = 90)
139 geometry.add_edge(0.151, 0.0785, 0.086, 0.0135, angle = 90)
140 geometry.add_edge(0.086, 0.0135, 0.151, -0.0515, angle = 90)
141 geometry.add_edge(0.151, 0.0885, 0.076, 0.0135, angle = 90)
142 geometry.add_edge(0.076, 0.0135, 0.151, -0.0615, angle = 90)
143 geometry.add_edge(0.151, -0.0615, 0.226, 0.0135, angle = 90)
144 geometry.add_edge(0.226, 0.0135, 0.151, 0.0885, angle = 90)
145 geometry.add_edge(-0.1315, 0, -0.151, 0.0195, angle = 90)
146 geometry.add_edge(-0.151, -0.0195, -0.1315, 0, angle = 90)
147 geometry.add_edge(-0.1705, 0, -0.151, -0.0195, angle = 90)
148 geometry.add_edge(-0.151, 0.0195, -0.1705, 0, angle = 90)
149 geometry.add_edge(-0.151, -0.0355, -0.1155, 0, angle = 90)
150 geometry.add_edge(-0.1865, 0, -0.151, -0.0355, angle = 90)
151 geometry.add_edge(-0.151, 0.0355, -0.1865, 0, angle = 90)
152 geometry.add_edge(-0.1155, 0, -0.151, 0.0355, angle = 90)
153 geometry.add_edge(-0.1115, 0, -0.151, 0.0395, angle = 90)
154 geometry.add_edge(-0.151, 0.0395, -0.1905, 0, angle = 90)
155 geometry.add_edge(-0.1905, 0, -0.151, -0.0395, angle = 90)
156 geometry.add_edge(-0.151, -0.0395, -0.1115, 0, angle = 90)
157 geometry.add_edge(-0.151, 0.0465, -0.1975, 0, angle = 90)
158 geometry.add_edge(-0.1975, 0, -0.151, -0.0465, angle = 90)
159 geometry.add_edge(-0.151, -0.0465, -0.1045, 0, angle = 90)
160 geometry.add_edge(-0.1045, 0, -0.151, 0.0465, angle = 90)
161 geometry.add_edge(-0.151, -0.0515, -0.086, 0.0135, angle = 90)
162 geometry.add_edge(-0.086, 0.0135, -0.151, 0.0785, angle = 90)
163 geometry.add_edge(-0.151, 0.0785, -0.216, 0.0135, angle = 90)
164 geometry.add_edge(-0.216, 0.0135, -0.151, -0.0515, angle = 90)
165 geometry.add_edge(-0.151, 0.0885, -0.226, 0.0135, angle = 90)
166 geometry.add_edge(-0.226, 0.0135, -0.151, -0.0615, angle = 90)
167 geometry.add_edge(-0.151, -0.0615, -0.076, 0.0135, angle = 90)
168 geometry.add_edge(-0.076, 0.0135, -0.151, 0.0885, angle = 90)
169
170 geometry.add_label(0.369615, 0.17118, materials = {"heat": "zemina-sucha puda, ridke deste"})
171 geometry.add_label(-0.0986851, 1.22248, materials = {"heat": "ACO 8"})
172 geometry.add_label(-0.0865799, 1.28353, materials = {"heat": "ACP 16"})
173 geometry.add_label(0.359633, 1.13468, materials = {"heat": "sterkodrt"})
174 geometry.add_label(1.27177, 1.13338, materials = {"heat": "ACO 8"})
175 geometry.add_label(7.17067, 1.12919, materials = {"heat": "sterkodrt"})
176 geometry.add_label(7.14727, 1.21499, materials = {"heat": "ACP 16"})
177 geometry.add_label(7.16807, 1.28779, materials = {"heat": "ACO 8"})
178 geometry.add_label(6.82242, 1.2122, materials = {"heat": "beton"})
179 geometry.add_label(0.758467, 1.20609, materials = {"heat": "beton"})
180 geometry.add_label(0.00699745, 0.00574761, materials = {"heat": "hlinik"})
181 geometry.add_label(0.0176848, 0.0176681, materials = {"heat": "xlpe"})
182 geometry.add_label(0.0152185, 0.0339046, materials = {"heat": "medene stineni"})
183 geometry.add_label(0.0378263, 0.0209565, materials = {"heat": "xlpe"})
184 geometry.add_label(0.0189446, 0.0533147, materials = {"heat": "vzduch"})
185 geometry.add_label(0.0452282, 0.0685444, materials = {"heat": "HDPE"})
186 geometry.add_label(-0.150565, 0.00481635, materials = {"heat": "hlinik"})
187 geometry.add_label(-0.137468, 0.024052, materials = {"heat": "xlpe"})
188 geometry.add_label(-0.129692, 0.0306003, materials = {"heat": "medene stineni"})
189 geometry.add_label(-0.12519, 0.0338745, materials = {"heat": "xlpe"})

```

```

145 geometry.add_edge(-0.1315, 0, -0.151, 0.0195, angle = 90)
146 geometry.add_edge(-0.151, -0.0195, -0.1315, 0, angle = 90)
147 geometry.add_edge(-0.1705, 0, -0.151, -0.0195, angle = 90)
148 geometry.add_edge(-0.151, 0.0195, -0.1705, 0, angle = 90)
149 geometry.add_edge(-0.151, -0.0355, -0.1155, 0, angle = 90)
150 geometry.add_edge(-0.1865, 0, -0.151, -0.0355, angle = 90)
151 geometry.add_edge(-0.151, 0.0355, -0.1865, 0, angle = 90)
152 geometry.add_edge(-0.1155, 0, -0.151, 0.0355, angle = 90)
153 geometry.add_edge(-0.1115, 0, -0.151, 0.0395, angle = 90)
154 geometry.add_edge(-0.151, 0.0395, -0.1905, 0, angle = 90)
155 geometry.add_edge(-0.1905, 0, -0.151, -0.0395, angle = 90)
156 geometry.add_edge(-0.151, -0.0395, -0.1115, 0, angle = 90)
157 geometry.add_edge(-0.151, 0.0465, -0.1975, 0, angle = 90)
158 geometry.add_edge(-0.1975, 0, -0.151, -0.0465, angle = 90)
159 geometry.add_edge(-0.151, -0.0465, -0.1045, 0, angle = 90)
160 geometry.add_edge(-0.1045, 0, -0.151, 0.0465, angle = 90)
161 geometry.add_edge(-0.151, -0.0515, -0.086, 0.0135, angle = 90)
162 geometry.add_edge(-0.086, 0.0135, -0.151, 0.0785, angle = 90)
163 geometry.add_edge(-0.151, 0.0785, -0.216, 0.0135, angle = 90)
164 geometry.add_edge(-0.216, 0.0135, -0.151, -0.0515, angle = 90)
165 geometry.add_edge(-0.151, 0.0885, -0.226, 0.0135, angle = 90)
166 geometry.add_edge(-0.226, 0.0135, -0.151, -0.0615, angle = 90)
167 geometry.add_edge(-0.151, -0.0615, -0.076, 0.0135, angle = 90)
168 geometry.add_edge(-0.076, 0.0135, -0.151, 0.0885, angle = 90)
169
170 geometry.add_label(0.369615, 0.17118, materials = {"heat": "zemina-sucha puda, ridke deste"})
171 geometry.add_label(-0.0986851, 1.22248, materials = {"heat": "ACO 8"})
172 geometry.add_label(-0.0865799, 1.28353, materials = {"heat": "ACP 16"})
173 geometry.add_label(0.359633, 1.13468, materials = {"heat": "sterkodrt"})
174 geometry.add_label(1.27177, 1.13338, materials = {"heat": "ACO 8"})
175 geometry.add_label(7.17067, 1.12919, materials = {"heat": "sterkodrt"})
176 geometry.add_label(7.14727, 1.21499, materials = {"heat": "ACP 16"})
177 geometry.add_label(7.16807, 1.28779, materials = {"heat": "ACO 8"})
178 geometry.add_label(6.82242, 1.2122, materials = {"heat": "beton"})
179 geometry.add_label(0.758467, 1.20609, materials = {"heat": "beton"})
180 geometry.add_label(0.00699745, 0.00574761, materials = {"heat": "hlinik"})
181 geometry.add_label(0.0176848, 0.0176681, materials = {"heat": "xlpe"})
182 geometry.add_label(0.0152185, 0.0339046, materials = {"heat": "medene stineni"})
183 geometry.add_label(0.0378263, 0.0209565, materials = {"heat": "xlpe"})
184 geometry.add_label(0.0189446, 0.0533147, materials = {"heat": "vzduch"})
185 geometry.add_label(0.0452282, 0.0685444, materials = {"heat": "HDPE"})
186 geometry.add_label(-0.150565, 0.00481635, materials = {"heat": "hlinik"})
187 geometry.add_label(-0.137468, 0.024052, materials = {"heat": "xlpe"})
188 geometry.add_label(-0.129692, 0.0306003, materials = {"heat": "medene stineni"})
189 geometry.add_label(-0.12519, 0.0338745, materials = {"heat": "xlpe"})
190 geometry.add_label(-0.108001, 0.0477896, materials = {"heat": "vzduch"})
191 geometry.add_label(-0.0977693, 0.0576121, materials = {"heat": "HDPE"})
192 geometry.add_label(0.158024, 0.000314391, materials = {"heat": "hlinik"})
193 geometry.add_label(0.169484, 0.0150481, materials = {"heat": "xlpe"})
194 geometry.add_label(0.180534, 0.0224149, materials = {"heat": "medene stineni"})
195 geometry.add_label(0.185036, 0.0260984, materials = {"heat": "xlpe"})
196 geometry.add_label(0.192812, 0.0351023, materials = {"heat": "vzduch"})
197 geometry.add_label(0.212457, 0.0473804, materials = {"heat": "HDPE"})
198 problem.solve()
199 pomT1=heat.local_values(0.04429,0.0124)
200 T1=pomT1["T"]
201 pomT2=heat.local_values(0.06559,0.01638)
202 T2=pomT2["T"]
203 print(T1,T2)
204 return [T1,T2]
205
206 k=funkce((290,353))
207
208 for i in range(10):
209     k=funkce(k)

```