

**Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.**



**Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště  
vyhořelého jaderného paliva.**

**Závěrečná zpráva řešení projektu**

**Ostrava prosinec 2012**

Zhotovitel: **Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.**

Kód zakázky: SÚRAO: č.  
ÚGN: č. 11/8230/0101

Název zakázky: Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva.

Objednatel: **SÚRAO – Správa úložišť radioaktivních odpadů**  
Ing. Markéta Dvořáková – zmocněnec pro technická jednání

Odpovědný  
řešitel projektu:

prof. RNDr. Radim Blaheta, CSc., doc. RNDr. Josef Malík, CSc.  
Za ÚGN schválil:

Prof. RNDr. Radim Blaheta, CSc. – ředitel .

Řešitelský tým:

Prof. RNDr. R. Blaheta, CSc., Mgr. P. Byczanski, doc. RNDr. J. Malík, CSc.,  
RNDr. R. Kohut, CSc., Mgr. A. Kolcun, CSc., Ing. J. Starý, Ph.D., doc. Ing. M. Hokr, Ph.D.,  
doc. Ing. J. Královcová Ph.D., doc. Ing. D. Frydrych Ph.D.

# 1. Úvod

Předložená zpráva popisuje výsledky řešení projektu „Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva“, jehož cílem je provést tepelnou analýzu optimálního uložení kontejnerů v bentonitu spolu s optimalizací vzdálenosti vrtů pro dva typy úložišť – horizontální a šikmé uložení. Výsledky výzkumu dávají podklady pro dimenzování hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva, které bere v úvahu na jedné straně teplotní omezení 90°C na povrchu uložených kontejnerů a na druhé straně snahu o kompaktní uložení s co nejmenšími rozměry celého úložiště.

Teplotu na povrchu kontejneru ovlivňuje řada faktorů:

- velikost kontejneru,
- počáteční tepelný výkon kontejneru, který je určen dobou uplynulou mezi uložení a vyjmutím paliva z reaktoru,
- tepelné parametry bentonitu,
- tloušťka bentonitového mezikruží obepínajícího kontejner
- tepelné parametry okolní horniny,
- způsob uložení kontejnerů v ukládacím vrtu,
- vzájemná poloha ukládacích vrtů,
- celkový počet uložených kontejnerů.

V popisované analýze uvažujeme vyhořelé palivové kazety VVER 1000 (obalový soubor obsahuje 3 palivové soubory). Velikost a další informace o kontejneru jsme získali ze zprávy vypracované v ÚJV Řež a.s. [1]. Podle této zprávy je průměr ocelové kazety (včetně ocelové stěny o tloušťce 8 mm) 717 mm, její výška je (včetně ocelové stěny o tloušťce 8 mm) 5066 mm. Kazeta je vložena do mezikruží z bentonitu (optimální tloušťka mezikruží je předmětem výzkumu v rámci tohoto projektu), pro které se v současné době předpokládá tloušťka 674.5 mm a je opatřena dnem a víkem z bentonitu o síle 700 mm. Kazeta s bentonitem tvoří superkontejner, jehož plánované rozměry jsou - průměr 2066 mm a výška 6466 mm. Superkontejnery se ukládají do vrtu o délce necelých 300 metrů. Při standardním způsobu ukládání předpokládáme, že k čelu vrtu budou zasunuty dva unifikované distanční bloky z bentonitu, každý o výšce 500 mm, a poté následuje první superkontejner. Před uložení dalšího superkontejneru bude v případě kazety VVER 1000 zasunuto 9 těchto distančních bloků. Po uložení posledního superkontejneru budou mezi superkontejner a zátku vloženy v případě kazety VVER 1000 opět 2 distanční bloky. Vrt bude uzavřen ocelovo-betonovou zátkou o síle 2.5m.

Vzhledem k uvedenému budeme předpokládat, že modelový úložný vrt (viz kap. 2) má délku 296.852m a obsahuje 27 superkontejnerů (určeno z výše uvedených parametrů pro ukládání kontejnerů do vrtu). Vrt je umístěn v homogenním prostředí (granit).

Základním parametrem analýzy je tepelný výkon kontejneru, který byl převzat ze zprávy [2]. Tepelný výkon obalových souborů s vyhořelým jaderným palivem závisí na stupni vyhoření, době skladování paliva po jeho vyjmutí z reaktoru a počtu palivových souborů umístěných do jednoho obalového souboru. V předkládané analýze předpokládáme, že se jedná o tepelný výkon palivového souboru VVER 1000 o stupni vyhoření 50000 MWd/tU (W). Tepelné výkony palivového souboru z reaktoru VVER 1000 a obalového souboru se 3 palivovými soubory jsou pak uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Tepelný výkon palivových souborů z reaktoru VVER 1000 po vyjmutí z reaktoru.

Čas po vyjmutí z reaktoru	Tepelný výkon palivového souboru (W)	Tepelný výkon obalového souboru (W)
5	2985	8954
10	1715	5144
20	985	2955
30	712	2137
40	566	1698
50	473	1420
60	409	1228
70	362	1085
80	325	975
90	296	888
100	272	816
200	156	469
300	113	339
400	90	269
500	75	225
600	65	195
700	57	172
800	52	155
900	47	141
1000	43	129

Pro tepelnou analýzu je dále potřebná znalost tepelných vlastností jednotlivých materiálů, viz tabulka 2. Hodnoty jsou převzaty ze zprávy [2], vlastnosti paliva pak ze zprávy [4]. Poznamenejme, že celá modelovaná oblast je podle předpokladu uvažována jako homogenní (granit). Ocelový plášť má sílu jen 8 mm, proto jej v tepelném výpočtu neuvažujeme a vlastnosti paliva a oceli považujeme za stejné. Objemová kapacita  $c_V$  je rovna součinu hustoty  $\rho$  a tepelné kapacity  $c$  ( $c_V = \rho c$ ). Předpokládáme také, že tepelné vlastnosti použité v modelu jsou nezávislé na teplotě a jiných veličinách.

Tabulka 2: Tepelné vlastnosti jednotlivých materiálů.

	tep.vodivost $\lambda$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	tep.kapacita $c$ ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	hustota $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	objem. tep. kap. $c_V$ ( $\text{MJ m}^{-3}\text{K}^{-1}$ )
granit	2.7	850	2700	2.295
beton	1.5	880	2800	2.464
bentonit	1.0	2500	2000	5.000
palivo	200.0	400	7000	2.800

Celý projekt tepelné analýzy byl rozdělen do 3 etap. V první etapě (Kap. 2) se zabýváme jedním ukládacím vrtem a zkoumáme především závislost teploty na povrchu kontejnerů na tloušťce bentonitového mezikruží kolem kontejnerů. V druhé etapě (Kap. 3,4) analyzujeme nástroje pro modelování více vrtů a celého úložiště a zkoumáme vliv jednotlivých způsobů

rozmístění ukládacích vrtů na teplotu na povrchu kontejnerů. V třetí etapě (Kap.5-7) pak srovnáváme a vyhodnocujeme jednotlivé způsoby uložení.

## 1.1 Použitý software

V předkládané analýze je využit především konečně prvkový (MKP) software GEM, který je vyvinut na Ústavu geoniky AV ČR, viz např. [3,18]. Tento software byl také použit pro řešení úloh termomechaniky, např. [19]. Tento software byl doplněn o prostředky pro superpozici numerického MKP a analytického řešení, viz další kapitoly.

Dále byl využit software ISERIT [6] pro modelování transportu tepla a vlhkosti vyvinutý Technickou univerzitou v Liberci.

Alternativní výpočty byly provedeny komerčním MKP programem ANSYS.

## 1.2 Numerické metody

Pomocí programu GEM řešíme úlohy nestacionárního vedení tepla v následujícím tvaru:

Hledáme teplotu  $\tau = \tau(x, t)$  takovou, že platí

$$c_v \frac{\partial \tau}{\partial t} = \lambda \sum_i \frac{\partial^2 \tau}{\partial x_i^2} + Q(t) \quad v \quad \Omega \times (0, T), \quad (1)$$

kde  $c_v$  je objemová tepelná kapacita,  $\lambda$  je tepelná vodivost, při splnění odpovídajících okrajových podmínek na  $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2$

$$\tau(x, t) = \bar{\tau}(x, t) \quad na \quad \Gamma_0 \times (0, T), \quad (2)$$

$$-\lambda \sum_i \frac{\partial \tau}{\partial x_i} n_i = q \quad na \quad \Gamma_1 \times (0, T), \quad (3)$$

$$-\lambda \sum_i \frac{\partial \tau}{\partial x_i} n_i = H(\tau - \bar{\tau}_{out}) \quad na \quad \Gamma_2 \times (0, T), \quad (4)$$

a počáteční podmínky

$$\tau(x, 0) = \tau_0(x) \quad v \quad \Omega. \quad (5)$$

Prostorové proměnné diskretizujeme použitím metody konečných prvků (MKP) s lineárními čtyřstěnnými prvky. Diskretizaci vzhledem k časové proměnné provádíme implicitní Eulerovou metodou s adaptivní volbou časového kroku.

Uvažujme tedy rozdělení časového intervalu  $\langle 0, T \rangle$ :

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_p = T, \quad \Delta_i = t_i - t_{i-1}.$$

Nahrazením časové derivace převedeme soustavu diferenciálních rovnic na soustavu lineárních algebraických rovnic pro každý časový bod  $t_i$ ,

$$\left[ M_h + \Delta_j \theta A_h(t_j) \right] \underline{\tau}^j = \left[ M_h - (1 - \theta) \Delta_j A_h(t_{j-1}) \right] \underline{\tau}^{j-1} + \Delta \varphi_j, \quad (6)$$

kde  $\theta \in \langle 0,1 \rangle$ ,  $\underline{\tau}^j$  je vektor hledaných uzlových hodnot teplotního pole v čase  $t_j$ ,  $\underline{\tau}^{j-1}$  je vektor hledaných uzlových hodnot teplotního pole v čase  $t_{j-1}$ ,  $\varphi_j = \theta \underline{b}_h(t_j) + (1-\theta) \underline{b}_h(t_{j-1})$ ,  $\underline{b}_h$  je pravá strana odvozená od původní pravé strany rovnice (4), okrajových a počátečních podmínek,  $\Delta_j$  je časový interval  $t_j - t_{j-1}$ . Matice  $M_h$  se nazývá maticí kapacity, matice  $A_h$  maticí vodivosti.

Pro  $\theta=1$  dostaneme implicitní Eulerovo (IE) schéma, které bude zvolenou diskretizační metodou,  $\theta=0.5$  dává Crank-Nicholsonovo (CN) (lichoběžníkové) schéma. Pokud tedy v (6) dosadíme  $\theta=1$  a dosadíme vztah  $\underline{\tau}_j = \underline{\tau}_{j-1} + \Delta_j \underline{\tau}_j$ , převedeme soustavu (6) do přírůstkového tvaru

$$[M_h + \Delta_j A_h] \Delta_j \underline{\tau}^j = \Delta_j (\underline{b}_j - A_h \underline{\tau}^{j-1}). \quad (7)$$

Při konstantním malém časovém kroku musíme soustavu (7) řešit mnohokrát (v řádech stovek či tisíců kroků), což znamená obrovskou časovou zátěž. Časový krok proto volíme adaptivně [3]. Využijeme lokálního srovnání IE a CN schémat, počítáme však soustavu (6) v přírůstkové formě jen pro  $\theta=1$ . Pokud řešení  $\underline{\tau}_j = \underline{\tau}_{j-1} + \Delta_j \underline{\tau}_j$  uvažujeme jako počáteční aproximaci řešení soustavy (6) pro  $\theta=0.5$  (CN schéma), pak jedna iterace Richardsonovy metody představuje aproximaci řešení soustavy (6) pro  $\theta=0.5$ , tedy  $\underline{\tau}_{CN}^j \cong \underline{\tau}^j - r^j$ , kde

$$r^j = (M_h + 0.5\Delta_j A_h) \underline{\tau}^j - (M_h - 0.5\Delta_j A_h) \underline{\tau}^{j-1} - 0.5 \underline{b}_h(t_j) - 0.5 \underline{b}_h(t_{j-1}). \quad (8)$$

Velikost časového kroku se pak řídí hodnotou  $\eta = \|r^j\| / \|\underline{\tau}^j\|$  podle následujícího algoritmu ( $k = 1, 2, \dots$  označuje adaptivní změny,  $\underline{\tau}^{j,k} = \underline{\tau}_{j-1} + \Delta \underline{\tau}^{j,k}$ , kde  $\Delta \underline{\tau}^{j,k}$  je odpovídající řešení soustavy (7)):

```

for  $k=1,2,\dots$  until stop do
  řešíme systém (7),  $\rightarrow \underline{\tau}^{j,k}$ , počítáme  $r^{j,k}$  a  $\eta_k$ 
  if  $\eta_k < \varepsilon_{min}$  then  $2\Delta_j \rightarrow \Delta_j$ 
  if  $\eta_k > \varepsilon_{max}$  then  $\Delta_j/2 \rightarrow \Delta_j$ 
  if  $\eta_k \in \langle \varepsilon_{min}, \varepsilon_{max} \rangle$  or  $\eta_k < \varepsilon_{min}$  &  $\eta_{k-1} > \varepsilon_{max}$  then
     $\Delta_{j+1} = \Delta_j$ ,  $\underline{\tau}_j = \underline{\tau}^{j,k}$ , stop
  if  $\eta_k > \varepsilon_{max}$  &  $\eta_{k-1} < \varepsilon_{min}$  then
     $\Delta_{j+1} = \Delta_j/2$ ,  $\underline{\tau}_j = \underline{\tau}^{j,k-1}$ , stop
end

```

Protože matice soustavy (7) se mění při každé změně časového kroku, bude vhodné adaptivně měnit časové kroky v každém  $k$ -tém časovém kroku. Zpravidla volíme hodnotu  $k=5$ . Pro parametry  $\varepsilon_{min}$ ,  $\varepsilon_{max}$  volíme obvykle hodnoty  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ . Poznamenejme, že jako počáteční aproximaci řešení používáme řešení spočítané v předcházejícím časovém kroku.

V případě modelování tepelných procesů v úložišti jaderných odpadů je soustava rovnic (7) řádu milionů neznámých. Z těchto důvodů je velká pozornost věnována řešení těchto soustav s využitím efektivních iteračních metod a výpočtu na paralelních počítačích. Přesněji pro řešení soustavy rovnic (7) používáme metodu sdružených gradientů s předpokládáním, kdy předpokládání je realizováno aditivní Schwarzovou metodou s překrytím. Soustavu rovnic (7) řešíme paralelně na paralelním počítači typu symetrického multiprocesoru. Paralelní

výpočty jsou realizovány v prostředí OpenMP na pracovní stanici se systémem TYAN vybavené 8 QuadCore procesory AMD Opteron 8380, 2.5 GHz.

## 2. Teplotní analýza jednoho úložného vrtu

V této kapitole se omezíme na případ jednoho úložného vrtu s 27 kontejnery a výpočty pro stanovení základních představ o závislosti teploty na povrchu kontejneru na tloušťce okolního bentonitového pláště pro řešení otázek optimální tloušťky bentonitové vrstvy.

### 2.1 Modelový vrt

Jako modelový příklad volíme 296.852 metrů dlouhý vrt (orientovaný ve směru osy z), který je umístěn do centra oblasti (horninového masívu) o rozměrech 1000x1000x500 metrů. Protože úloha je symetrická, uvažujeme jen čtvrtinu oblasti se čtvrtinou vrtu - viz obr. 1 ukazující řez rovinou  $xy$  i charakter použité MKP sítě.

Oblast, která byla modelována, má tedy rozměry 500.0 x 500.0 x 500.0 metrů. Odpovídající MKP síť pak má 300 x 300 x 143 uzlů, což představuje 12 870 000 stupňů volnosti (uzlů) pro úlohu vedení tepla.

Počáteční termální podmínky vycházejí z geotermického stupně (viz [1]), kdy se předpokládá, že průměrná teplota na povrchu je 10 °C a každých dalších 100 m pod povrchem se zvyšuje o 2.7 °C. V této části budeme předpokládat počáteční teplotu 24 °C v celé oblasti, což odpovídá hloubce 520 m. Proměnnou počáteční teplotu použijeme až v části 4 této zprávy. Na všech stěnách předpokládáme tepelný nulový tok (adiabatický děj), protože numerické testy ukázaly, že ve vzdálenosti 500m od vrtu (kolmo k vrtu) zůstává během tepelného procesu teplota prakticky konstantní.

Zdroj tepla simulující kontejner s jaderným odpadem snižuje tepelný výkon  $Q(t)$  exponenciálně. Programem v MATLABU byla určena funkce aproximující hodnoty uvedené v tabulce 1. Tato funkce má tvar

$$Q(t) = Q_0(a_1 \exp(-\beta_1 t) + a_2 \exp(-\beta_2 t) + a_3 \exp(-\beta_3 t)), \quad (9)$$

kde  $Q_0 = 14418.6$ ,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 0.2193$ ,  $a_3 = 0.02376$ ,  $\beta_1 = 0.18444$ ,  $\beta_2 = 0.019993$ ,  $\beta_3 = 0.0006659$ .

Materiály předpokládáme izotropní, vlastnosti se nemění se změnami teploty.

### 2.2 Numerické výsledky

V této části jsou prezentovány výsledky řešení nestacionární úlohy tepla pro různé hodnoty počátečního tepelného výkonu kontejneru a různé mocnosti (tloušťky) bentonitového mezikruží obepínajícího válcovou kazetu s vyhořelým jaderným palivem. Speciálně nás bude zajímat průběh teplot na povrchu palivového kontejneru (rozhraní kontejner – bentonit).

V tabulce 3 jsou uvedeny počáteční hodnoty tepelného výkonu  $Q(t_0)$ , kde  $t_0$  odpovídá době skladování paliva po jeho vyjmutí z reaktoru, pro různé doby skladování  $t_0$ .

Tabulka 3: Počáteční hodnoty tepelného výkonu pro různé doby skladování

počáteční hodnota tepelného výkonu (W)	doba skladování paliva (roky)
1282	60.000
1400	54.246
1500	49.850
1600	45.837
1700	42.169
1800	38.825
1900	35.792
2000	33.066
2100	30.639
2137	30.000

Mocnost betonového mezikruží měníme od hodnoty 0 cm ( bez bentonitu) po hodnotu 110 cm, a to po 5 centimetrech. V tabulce 4 jsou pro jednotlivé kombinace počáteční hodnoty tepelného výkonu a mocnosti betonového mezikruží uvedeny maximální dosažené teplotní hodnoty na povrchu kontejneru. Červeně jsou vyznačeny teploty na povrchu překračující mez 90 stupňů.

Tabulka 4: Maximální teploty dosažené na povrchu kontejneru pro různé počáteční hodnoty tepelného výkonu a různou mocnost bentonitového mezikruží

cm\W	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
0	59.74	62.21	64.67	67.10	69.51	71.86	74.17	76.40
5	61.95	64.57	67.19	69.79	72.35	74.86	77.31	79.68
10	63.86	66.62	69.38	72.11	74.80	77.45	80.03	82.53
15	65.58	68.46	71.33	74.18	76.99	79.76	82.45	85.07
20	67.12	70.12	73.10	76.06	78.98	81.85	84.66	87.38
25	68.53	71.62	74.70	77.76	80.79	83.76	86.88	89.45
30	69.82	73.00	76.18	79.33	82.44	85.50	88.50	91.40
35	71.01	74.29	77.54	80.77	83.97	87.12	90.19	93.19
40	72.12	75.47	78.80	82.11	85.39	88.62	91.76	94.83
45	73.16	76.58	79.98	83.37	86.72	90.01	93.23	96.38
50	74.12	77.61	81.09	84.54	87.96	91.32	94.61	97.82
55	75.03	78.58	82.13	85.65	89.12	92.55	95.90	99.17
60	75.88	79.50	83.10	86.68	90.22	93.71	97.12	100.44
65	76.69	80.36	84.03	87.66	91.25	94.79	98.26	101.64
70	77.45	81.18	84.89	88.58	92.23	95.83	99.35	102.78
75	78.18	81.96	85.72	89.46	93.16	96.81	100.38	103.86
80	78.84	82.70	86.51	90.30	94.05	97.74	101.36	104.89
85	79.53	83.40	87.26	91.09	94.89	98.63	102.29	105.87
90	80.15	84.07	87.97	91.85	95.69	99.47	103.18	106.80
95	80.73	84.70	88.67	92.58	96.47	100.30	104.05	107.71
100	81.30	85.31	89.30	93.27	97.20	101.07	104.86	108.56



<b>105</b>	81.85	85.90	89.93	<b>93.94</b>	<b>97.90</b>	<b>101.81</b>	<b>105.63</b>	<b>109.37</b>
<b>110</b>	82.38	86.46	<b>90.53</b>	<b>94.57</b>	<b>97.93</b>	<b>102.52</b>	<b>106.38</b>	<b>110.15</b>

V příloze (obr. 2-12) jsou zobrazeny grafy závislosti maximální teploty na povrchu kontejneru na čase (0-30 let) pro různé mocnosti bentonitu a pro různé počáteční hodnoty tepelného výkonu. V obrázku 13 jsou pro mocnost bentonitu  $d=100$  cm zobrazeny grafy pro různé počáteční výkony. Z tabulky 4 a obrázků v příloze je vidět, že pro vlastnosti bentonitu uvedené v tabulce 2 např. pro mocnost bentonitu 25 cm a více musí být doba před uložením do úložného vrtu větší než 30 let (počáteční hodnota tepelného výkonu 2100 W a méně). V této části projektu jsme používali pro bentonit hodnoty tepelných parametrů uvedené v tabulce 2. Je proto na místě položit si otázku, jak jsou uvedená teplotní pole závislá právě na těchto parametrech. Byly proto provedeny výpočty, kdy se

- měnily hodnoty objemové tepelné kapacity  $c_v$  bentonitu v rozmezí 4.0-6.0
- měnily hodnoty tepelné vodivosti  $\lambda$  bentonitu v rozmezí 0.7-1.3.

V tabulce 5 jsou uvedeny maximální teploty na povrchu kontejneru pro měnící se hodnoty tepelné kapacity  $c$  bentonitu při počáteční hodnotě tepelného výkonu kontejneru 1900 W a pro mocnost bentonitové vrstvy  $d=100$  cm. Je vidět, že teplota na povrchu kontejneru je na změny objemové tepelné kapacity bentonitu málo citlivá. V tabulce 6 jsou uvedeny maximální teploty na povrchu kontejneru pro měnící se hodnoty tepelné vodivosti bentonitu. Závislost na hodnotách tepelné vodivosti bentonitu je poměrně velká. Pro analýzu teplotních poměrů v úložišti bude proto znalost skutečných hodnot tepelné vodivosti velmi důležitá a k analýze závislosti vodivosti na saturaci bentonitu vodou se podrobně vrátíme v části 2.4..

Tabulka 5: Závislost maximální teploty na povrchu kontejneru na změnách tepelné kapacity bentonitu.

$c_v$ (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Teplota °C	101.15	101.09	101.07	101.03	100.99

Tabulka 6: Závislost maximální teploty na povrchu kontejneru na změnách tepelné vodivosti bentonitu

$\lambda$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
Teplota °C	121.33	112.87	106.30	101.07	96.78	93.23	90.23

Zajímá nás také, jak velký vliv má teplo produkované kontejnerem na teplotu okolí. Na obr. 14 je zobrazen průběh teploty se vzdáleností od středu kontejneru pro mocnost bentonitu 100 cm, počáteční výkon  $Q=1900$  W. Průběh odpovídá času  $t=4$  roky od uložení kontejneru, což je přibližně čas, kdy byla dosažena maximální teplota. Z obrázku je patrné, že teplo z kontejneru ovlivňuje významně jen relativně blízké okolí kontejneru. Pro ilustraci uvádíme tabulku 7, kde jsou uvedeny teploty (odpovídají grafu na obrázku 14) v různých vzdálenostech od povrchu kontejneru. V sloupci 2 jsou hodnoty teplot pro mocnost bentonitu 100 cm, v sloupci 3 jsou pro srovnání hodnoty teplot pro řešení bez bentonitu (mocnost 0). Poznamenejme, že původní teplota horniny byla při tomto výpočtu 24 stupňů.

Tabulka 7: Změny teplot se vzdáleností od povrchu kontejneru.

vzdálenost od povrchu kontejneru (m)	bentonit 100 cm	bentonit 0 cm
0	101.16	71.38
1	52.58	52.79
2	45.45	45.61
3	41.07	41.21
4	38.21	38.35
5	36.27	36.41
6	34.49	34.63
7	33.06	33.20
8	31.92	32.06
9	30.97	31.10
10	30.13	30.26
15	27.26	27.35
20	25.78	25.84
25	24.94	24.99
30	24.48	24.51

Z tabulky 7 je také vidět, že vliv mocnosti bentonitu na teploty v okolí kontejneru je malý, teploty pro řešení s bentonitem o síle 100 cm a pro řešení bez bentonitu jsou srovnatelné.

Z provedených výpočtů je zřejmé, že průběh teplot na povrchu kontejnerů je výrazně závislý na tloušťce bentonitové vrstvy, na počátečním tepelném výkonu a na tepelné vodivosti bentonitu. Požadované teploty na povrchu tedy dosáhneme vhodnou kombinací těchto parametrů. Znalost přesné hodnoty vodivosti tedy sehrává důležitou roli při optimálním návrhu tloušťky bentonitové vrstvy a její hodnota závisí na obsahu vody v bentonitu.

#### 2.4 Vliv obsahu vody na tepelné parametry

Při řešení úloh trvalého úložiště vyhořelého jaderného paliva je jedním z rozměrově malých, ale komplikovaných detailů, bentonitový buffer. Jeho chování významně ovlivňuje konstrukci celého úložiště. Vzhledem k rozsáhlosti celkového modelu, tento detail diskutujeme odděleně v této kapitole, která se bude zabývat stanovením „průměrné“ (efektivní) hodnoty koeficientu tepelné vodivosti, tj. konstantní hodnoty vodivosti, při níž bude tepelný tok stejný jako při nerovnoměrném rozložení vodivosti v závislosti na saturaci bentonitu vodou. Dále popsané výpočty se budou zabývat detailním chováním bentonitu při stavbě úložiště až do doby ustavení rovnovážného stavu. Na základě vypočtených parametrů tohoto rovnovážného stavu budou stanoveny průměrné hodnoty koeficientu tepelné vodivosti pro použití v modelu vedení tepla v celém úložišti.

K výpočtu je použit software ISERIT vyvinutý na Technické univerzitě v Liberci rámci řešení projektu Task Force EBS [6]. Model uvažuje sdružený transport tepla a vlhkosti, přičemž vzájemné ovlivnění obou jevů je podstatné pro tepelné chování bentonitové bariéry – redistribuce vlhkosti je řízena gradientem teploty (vysoušení ohřáté části, přesun vlhkosti do chladnější části, eventuálně do okolí) a zároveň rozložení teploty je zpětně ovlivněno vlhkostí díky výrazné závislosti tepelné vodivosti na obsahu vody.

### 2.4.1 Model ISERIT

Hlavní myšlenkou modelu ISERIT je fyzikálně věrný popis probíhajících jevů transportu vody v jílovém materiálu, uvažuje reprezentaci vody ve formě vodní páry (mobilní) v pórech a sorbované v zrnech pevné fáze (imobilní), která množstvím dominuje. Model zahrnuje vedení tepla, transport vlhkosti ve formě mobilní i imobilní fáze, s nerovnovážnou výměnou řízenou koeficientem rychlosti a rovnovážnou sorpční křivkou. Úloha je řešena jako plně sdružená, koeficienty mohou být popsány obecnými nelineárními závislostmi na řešených veličinách.

Popsaný proces je řízen soustavou tří rovnic (vedení tepla, difuze vodních par a nerovnovážný přechod mobilní-imobilní):

$$\begin{aligned}
 c_{v(T,C_a,C_b)} \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (\lambda_{(T,C_a,C_b)} \nabla T) + \chi_{(T,C_a,C_b)} \frac{\partial C_b}{\partial t} \\
 \varepsilon \frac{\partial C_a}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial C_b}{\partial t} &= \nabla \cdot (D_{a(T,C_a,C_b)} \frac{\varepsilon}{\tau} \nabla C_a) \\
 \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial C_b}{\partial t} &= \left( \frac{C_a}{C_a^{100}} - \varphi(C_b) \right) \gamma_{(T,C_a,C_b)}
 \end{aligned} \tag{10} \text{ (a-c)}$$

kde  $T$  je teplota [K],  $C_a$  koncentrace vlhkosti ve vzduchu (air) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $C_b$  koncentrace vlhkosti v bentonitu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $t$  čas [s],  $c_v$  objemová měrná tepelná kapacita bentonitu [ $\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$ ],  $\chi$  latentní teplo sorpce [ $\text{J}/\text{kg}$ ],  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ],  $\varepsilon$  pórovitost [1],  $D_a$  difuzní koeficient vodních par [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\tau$  efektivní tortuosita [1],  $C_a^{100}$  koncentrace vlhkosti pro 100% relativní vlhkost (RH) vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] (absolutní vlhkost sytých par),  $\varphi(C_b)$  inverzní sorpční křivka (relativní vlhkost mezi 0 a 1),  $\gamma$  je koeficient rychlosti výměny vody mezi vzduchem a bentonitem [ $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$ ]. V dalším textu pak budeme používat značení:  $\varphi$  relativní vlhkost (RH) [5] nebo [%],  $w$  hmotnostní podíl vody [%],  $w = C_b / \rho_{dry}$  ( $\rho_{dry}$  je objemová hmotnost v suchém stavu),  $S$  saturace (podíl koncentrace vody vzhledem ke stavu se 100% RH),  $C_b(\varphi)$  sorpční křivka.

### 2.4.2 Geometrie zájmové oblasti

Při řešení této úlohy budeme uvažovat zjednodušenou geometrii zájmové oblasti. Zájmová oblast bude uvažována jako 2D oblast ve tvaru mezikruží, viz obr 15. Vnitřní průměr bude odpovídat průměru kontejneru (tj. 0,7 m), vnější průměr bude odpovídat průměru chodby (tj. 2,1 m). Třetí rozměr, tloušťka mezikruží je zadána pomocí materiálových parametrů  $s = 1$  m.

Pro prostorovou diskretizaci zájmové oblasti byly použity trojúhelníkové elementy s lineárními aproximačními funkcemi. Vygenerovaná síť se skládá z 1844 uzlů a 3968 elementů.

### 2.4.3 Úlohy s definovaným tepelným tokem

Před řešením úlohy stanovení závislosti teplotního rozdílu na tloušťce bentonitového pláště je nutné určit signifikantní parametry popisující chování bentonitového bufferu. Prvním krokem bude analýza chování systému pro různé varianty nelineární tepelné vodivosti a tepelné kapacity bentonitu v závislosti na jeho vlhkosti.

Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby je bylo možné pro výsledky co nejsnadněji použít. Na vnější straně mezikruží je zadána Dirichletova okrajová podmínka  $T = 0$  °C. Teploty, které jsou uváděné ve vypočtených výsledcích, tedy přímo odpovídají teplotnímu rozdílu, který by byl spočten při jiné hodnotě teploty na vnější hranici (linearita modelu).

Na vnitřní straně mezikruží je zadána Neumannova okrajová podmínka odpovídající celkovému toku po obvodu  $Q = 400$  W. Tento výkon odpovídá dané tloušťce mezikruží při celkově generovanému výkonu 2000 W kontejneru celkové délky 5m. Pro výpočet ustáleného stavu byla zvolena tato zaokrouhlená hodnota (odpovídající výkonu po zhruba 3 letech), pro výpočet časového průběhu s poklesem výkonu vlivem rozpadu paliva je pak použita přesnější určená hodnota 2137W na počátku.

#### 2.4.3.1 Úlohy ustáleného vedení tepla s konstantním koeficientem tepelné vodivosti

Prvním krokem byly výpočty ustálených úloh. Bylo provedeno šest výpočtů, kdy byl zadán konstantní koeficient tepelné vodivosti. Hodnoty byly zvoleny tak, aby rovnoměrně pokryly interval  $<0,4, 1,4>$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, do kterého spadá většina experimentálně zjištěných dat v zahraničí i českých bentonitech ([5], [7]).

Výsledky takto definované úlohy jsou vyneseny do grafu, viz obr. 16. Tento výpočet byl proveden jako pomocný. Bude sloužit k porovnání dále prováděných výpočtů a případně umožní ověření správnosti a přesnosti použitého modelu ISERIT.

#### 2.4.3.2 Úlohy ustáleného vedení tepla s nekonstantním koeficientem tepelné vodivosti

Tepelná vodivost bentonitu je dle četných experimentálních výsledků výrazně závislá na obsahu vody – vodivost saturovaného materiálu dosahuje více než trojnásobku vodivosti materiálu vysušeného. Závislost lze teoreticky vysvětlit zlepšením tepelného kontaktu mezi zrny pevné fáze při přítomnosti vody ať již pórové nebo vázané.

Ve zprávě [5] i další literatuře je uveden vztah, odvozený empirickým proložením experimentálních dat, aproximující koeficient tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti bentonitu

$$\lambda = \lambda_{max} + (\lambda_{min} - \lambda_{max}) / (1 + \exp((S - S_{str}) / dx)) \quad (11)$$

kde  $\lambda_{min}$  je minimální hodnota tepelné vodivosti,  $\lambda_{max}$  je maximální hodnota tepelné vodivosti,  $S$  je saturace bentonitu vodou,  $S_{str}$  je saturace odpovídající průměrné hodnotě  $\lambda_{max}$  a  $\lambda_{min}$ ,  $dx$  je převrácená hodnota strmosti křivky v bodě  $S_{str}$ .

Byly zvoleny takové kombinace hodnot parametrů, viz tabulka 8, vstupujících do vztahu (11), pro které výsledné křivky průběhu tepelné vodivosti pokrývají celý rozsah od strmého přechodu (obr. 17, modrá křivka) po téměř lineární závislost (obr. 17, zelená křivka). Varianty N2 a N3 přibližně reprezentují rozpětí odpovídající různým druhům bentonitu v české i zahraniční literatuře ([8]).

Tabulka 8: Tabulka parametrů použitých ve vzorci (10)

Varianta	N1	N2	N3	N4
$\lambda_{min}$	0,4	0,4	0,4	0,2
$\lambda_{max}$	1,4	1,4	1,4	1,6
$S_{str}$	50	50	50	50
$dx$	0,1	5	12	30

Pro realizaci výpočtu bylo nutné definovat rozložení saturace vlhkosti v bentonitu. K tomu byl použit také model ISERIT a stejně diskretizovaná zájmová oblast. Jak na vnější, tak na vnitřní straně mezikruží byla zadána Dirichletova okrajová podmínka: na vnitřní straně hodnota  $S = 0 \%$  (vysušený bentonit vlivem tepla), na vnější straně hodnota  $S = 100 \%$  (saturovaný vlivem přítoku vody z horniny). Hodnoty byly zvoleny bez vazby na konkrétní přírodní podmínky tak, aby úloha ověřila celý rozsah oboru hodnot koeficientu tepelné vodivosti. Koeficient v rovnici transportu vlhkosti byl pro zjednodušení zadán konstantní. Model ISERIT pak vypočetl rozložení saturace vlhkosti. Přestože jde o lineární úlohu, saturace není po profilu rozdělena lineárně, vzhledem k tomu, že se jedná o radiálně symetrickou úlohu. Profil křivky saturace je podobný jako průběh teploty. Výsledky takto definované úlohy jsou vyneseny do grafu, viz obr. 18.

### 2.4.3.3 Úlohy neustáleného vedení tepla

Při úlohách neustáleného vedení tepla byla zvolena homogenní počáteční podmínka, teplota bufferu  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Výkon vyzařovaný kontejnerem byl dán pro časy  $t = 0$  roků  $P = 2137 \text{ W}$ , pro  $t = 10$  roků  $P = 1698 \text{ W}$  a pro  $t = 20$  roků  $P = 1420 \text{ W}$  (data pro VVER1000 a obalový soubor pro vertikální ukládání, spočteno ÚJV Řež 2005). Výkon zadaný do modelu byl na daných časových intervalech linearizován. Pro interval  $t = (0, 10>$  let byl pokles výkonu  $43,9 \text{ W/rok}$ , pro interval  $t = (10, 20>$  let byl uvažován pokles výkonu  $27,8 \text{ W/rok}$ .

Úloha byla řešena celkem v osmi variantách lišících se danými materiálovými parametry.

Varianty **UL1x** (kde  $x$  specifikuje podvariantu, viz následující odstavec) jsou řešeny pro koeficient tepelné vodivosti  $\lambda = 0,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (minimální varianta – konstanta). Varianty **UL6x** (kde  $x$  specifikuje podvariantu, viz následující odstavec) jsou řešeny pro koeficient tepelné vodivosti  $\lambda = 1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (maximální varianta – konstanta).

Pro varianty **UL1x** a **UL6x** byly řešeny podvarianty **a** a **b**, vyjadřující jinou hodnotu uvažované tepelné kapacity. Podvarianty **a** uvažují konstantní tepelnou kapacitu  $C_v = 700 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (nejmenší v rámci níže uvedeného nelineárního vztahu) a podvarianty **b** uvažují tepelnou kapacitu  $C_v = 1500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (největší v rámci níže uvedeného nelineárního vztahu). Varianty UN1 až UN4 pak pracují s nekonstantními vztahy pro výpočty koeficientu tepelné vodivosti a tepelné kapacity. Vztahy byly převzaty ze zprávy [5]. Vztah pro výpočet koeficientu tepelné vodivosti je uveden výše pod označením (11). Vztah aproximující koeficient tepelné kapacity v závislosti na saturaci vodou a teplotě bentonitu

$$C_v = (4200/1630)(3.5S) + (1.38T + 732.5) \quad (12)$$

odpovídá součtu tepelné kapacity pevné matrice (druhý člen) a přítomné vody (první člen). Jednotlivé varianty odpovídají variantám N1-N4 nekonstantní tepelné vodivosti, vztah pro tepelnou kapacitu nemá nastavitelné parametry.

Výsledky jsou znázorněny (viz obr. 19) jako průběh teploty na vnitřním povrchu bentonitu (zároveň maximální teplota v oblasti) v čase. Křivky **UL1a** a **UL1b** jsou pro bentonit s tepelnou vodivostí  $\lambda=0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , křivka **UL1a** pak  $C_v = 700 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a křivka **UL2a** pak  $C_v = 1500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Křivky **UL6a** a **UL6b** jsou pro bentonit s tepelnou vodivostí  $\lambda=1.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , křivka **UL6a** pak  $C_v = 700 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a křivka **UL6b** pak  $C_v = 1500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Křivky **UN1** až **UN4** pak představují výsledky vypočtené pro bentonit, jehož vlastnosti jsou dány vztahy (11) a (12).

Velikosti maxim teploty odpovídají teplotě v ustáleném stavu (jsou nezávislé na tepelné kapacitě). Mírný rozdíl je dán tím, že čas maxima neodpovídá přesně času, kdy tepelný výkon v neustáleném stavu je roven tepelnému výkonu v modelu ustáleného stavu. Různá tepelná

kapacita ovlivňuje rychlost nárůstu teploty na počátku ohřívání. Výsledky však zároveň ukazují, že pro analýzu chování systému v neustáleném stavu nelze dobře použít aproximaci modelem pouze s vrstvou bentonitu, protože pro realistické výsledky by bylo třeba uvažovat postupný nárůst teploty na vnější stěně a to by zároveň kvůli celkovému nárůstu teploty vedlo k větší akumulaci tepelné energie jak v bentonitu, tak v okolní hornině a tedy k výrazně nižší rychlosti nárůstu teploty a posunu maxima teploty v čase.

#### 2.4.4. Úlohy s definovaným teplotním spádem

Okrajové podmínky byly zvoleny na základě hodnot spočtených z úlohy rozložení tepla v celém úložišti. Na vnější straně mezikruží je zadána Dirichletova okrajová podmínka  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na vnitřní straně mezikruží je zadána Dirichletova okrajová podmínka  $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Všechny výpočty jsou realizovány jako neustálené úlohy. Počáteční teplota bentonitu je pro všechny varianty shodná  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Počáteční vlhkost bentonitu je zadávána jako relativní vlhkost v procentech. Vlhkost pórového vzduchu Ca a vlhkost pevné fáze Cb je shodná (relativní vlhkosti vzduchu a pevné fáze jsou v rovnováze). Jednotlivé varianty mají zadanou různou hodnotu počáteční relativní vlhkosti.

##### 2.4.4.1 Úlohy s definovaným teplotním spádem s konstantním koeficientem tepelné vodivosti

Na úvod bylo provedeno šest výpočtů, kdy byl zadán konstantní koeficient tepelné vodivosti. Hodnoty byly zvoleny tak, aby rovnoměrně pokryly interval  $\langle 0.3, 1.0 \rangle\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ , (tento rozsah je dostatečný pro následující přepočtení průměrného koeficientu tepelné vodivosti). Cílem úlohy bylo vypočítat tepelný tok, odpovídající zadaným okrajovým podmínkám pro daný koeficient tepelné vodivosti.

Výsledky takto definované úlohy jsou uvedeny v Tabulce 9 a jsou také vyneseny do grafu, viz obr. 20. Tento výpočet byl proveden jako pomocný. Bude sloužit k porovnání, dále prováděných výpočtů a případně umožní ověření správnosti a přesnosti použitého modelu ISERIT.

Výše popsanou úlohu je v případě konstantní vodivosti možné řešit analyticky. Pro analytické řešení byla použita Dupuitova rovnice

$$Q = 2\pi\lambda(T_i - T_o) / (\ln(r_o) - \ln(r_i)) \quad (13)$$

kde  $\lambda$  je koeficient tepelné vodivosti,  $T_i$  je teplota na stěně kontejneru,  $T_o$  je teplota na stěně chodby,  $r_o$  je poloměr chodby a  $r_i$  je poloměr kontejneru. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 9. V tabulce 9 je též porovnání výsledků modelu ISERIT a analytického řešení. Chyba je uvedena v procentech. Vzhledem k relativně malé úloze je i chyba malá.

Tabulka 9: Tepelný tok odpovídající koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda$

$\lambda$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Tepelný tok [W m <sup>-1</sup> ]	68.7518	91.6691	114.5864	137.5036	160.4209	183.3382	206.2554	229.1727
Analytické řešení [W m <sup>-1</sup> ]	68.6304	91.5072	114.3840	137.2608	160.1376	183.0145	205.8913	228.7681
Chyba [%]	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769

#### 2.4.4.2 Realizace výpočtů

Pro jednotlivé varianty (N1 až N4) byla řešena neustálená úloha s okrajovými podmínkami viz kapitola 2.4.3. Výpočty byly realizovány pro různé počáteční podmínky, pro různé počáteční stupně nasycení bentonitu vodními parami.

Po realizaci celého výpočetního scénáře, po dosažení nového ustáleného stavu daného okrajovými podmínkami byl vypočten tepelný tok. Tepelné toky pro počáteční stupně nasycení a jednotlivé varianty jsou uvedeny v tabulce 10 a zobrazeny v grafu na obrázku 21.

Tabulka 10: Tepelný tok Q odpovídající počátečnímu stupni nasycení Ca\_Rel

Ca_Rel (init) [%]	Varianta N1 Tepelný tok [W m <sup>-1</sup> ]	Varianta N2 Tepelný tok [W m <sup>-1</sup> ]	Varianta N3 Tepelný tok [W m <sup>-1</sup> ]	Varianta N4 Tepelný tok [W m <sup>-1</sup> ]
10	91.6691	91.7356	98.5336	108.8726
20	91.6691	92.3882	105.4569	122.6063
30	91.6691	98.0531	117.3758	137.6793
40	107.3368	113.2179	133.8918	153.6849
50	128.1928	134.4777	153.3102	170.1920
60	153.1684	157.7205	173.7	186.7591
70	174.4083	180.4786	193.5546	202.9721
80	196.3342	201.8651	212.0300	218.5095

#### 2.4.4.3 Výpočet průměrovaného koeficientu tepelné vodivosti

Posledním krokem bylo nalezení průměrného koeficientu tepelné vodivosti  $\lambda$  odpovídající počátečnímu stupni nasycení Ca\_Rel. Jedná se o jednoduchý přepočítání pomocí lineární interpolace výsledků kapitoly 2.4.3.1. Výsledky interpolace jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Průměrovaný koeficient tepelné vodivosti  $\lambda$  odpovídající počátečnímu stupni nasycení Ca\_Rel

Ca_Rel (init) [%]	Varianta N1 $\lambda$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Varianta N2 $\lambda$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Varianta N3 $\lambda$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Varianta N4 $\lambda$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
10	0.4000	0.4003	0.4300	0.4751
20	0.4000	0.4031	0.4602	0.5350
30	0.4000	0.4279	0.5122	0.6008
40	0.4684	0.4940	0.5842	0.6706
50	0.5594	0.5868	0.6690	0.7426
60	0.6684	0.6882	0.7579	0.8149
70	0.7610	0.7875	0.8446	0.8857
80	0.8567	0.8808	0.9252	0.9535

Z provedené analýzy vyplývá, že je potřeba uvažovat tepelné dimenzování i s vodivostí bentonitu menší než  $\lambda=1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , i když hodnota  $\lambda=1$  se běžně používá v literatuře [9,17]. Při srovnávání návrhů podzemního úložiště v Kap. 4 proto používáme hodnoty  $\lambda=1$  i  $\lambda=0.75$  a  $\lambda=0.5$ .

### 3. Modelování tepelného pole kolem modelové soustavy vrtů naplněných kontejnery

V předcházející kapitole jsme modelovali teplotní pole kolem jednoho 296.852 metrů dlouhého vrtu naplněného střídavě kontejnery s vyhořelým jaderným palivem (VJP) a distančními bloky z bentonitu. Cílem bylo nalézt závislost tepelného pole na tloušťce bentonitového mezikruží a na počátečním tepelném výkonu kontejneru VJP daného časovým intervalem mezi dobou vyjmutí z reaktoru a dobou uložení do vrtu a stanovit takové hodnoty tloušťky bentonitu a výkonu paliva, aby teplota na povrchu kontejneru nepřekročila 90 stupňů Celsia. Odpovídající tloušťky bentonitu pro jednotlivé tepelné výkony jsou uvedeny v tabulce 12.

Poznamenejme, že v [1] se pro kontejner VVER1000 uvažuje tloušťka bentonitu 67.45 cm. Z tabulky je vidět, že pro jeden vrt s 27 kontejnery je možné vyhořelé jaderné palivo ukládat již po asi 30 letech při tloušťce bentonitové vrstvy 29 cm, pro tloušťku bentonitu 142 cm by to bylo kolem 50 let.

Tabulka 12: Hodnoty tloušťky bentonitu, kdy teplota na povrchu kontejneru dosáhne 90 stupňů, při různém počátečním tepelném výkonu

výkon (W)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
bentonit (cm)	142	106	78	56	41	35	29

Konečným cílem této studie je modelování teplotního pole v oblasti se 128 vrtů s uloženým jaderným palivem v 3456 kontejnerech VVER 1000 tak, aby teplota na povrchu jednotlivých kontejnerů nepřekročila 90 stupňů. Zde je teplota v okolí daného vrtu ovlivněna také tepelnými zdroji v okolních vrtech, takže je zřejmé, že pro dané tepelné výkony budou odpovídající maximální tloušťky bentonitu menší než v hodnoty v tabulce 12 a budou se zmenšovat se zmenšující se vzdáleností mezi jednotlivými vrtů. Přitom budou modelovány dva typy uložení kontejnerů:

- a) horizontální uložení, kdy kontejnery jsou uloženy v paralelních vrtech umístěných v jedné horizontální rovině.
- b) v šikmých vrtech, kdy kontejnery jsou uloženy v paralelních vrtech v několika rovnoběžných rovinách se zadaným sklonem.

S modelováním jsou spojeny otázky správné formulace modelu a potřeba ověřit vliv některých parametrů formulace na řešení. Půjde nám zde o volbu velikosti modelu a s ní spojenou volbu vhodných okrajových podmínek. Přitom budeme předpokládat konstantní hodnotu tepelných parametrů bentonitu během celého výpočtu. Vzhledem k tomu, že jsme ukázali, že teplota na povrchu kontejneru dosti závisí na tepelné vodivosti bentonitu a ta je ovlivněna stupněm saturace, musíme volit konzervativní přístup a testovat i takové hodnoty tepelných parametrů bentonitu, kterých při nižším stupni saturace může bentonit dosáhnout. Poznamenejme, že tabulce 5 jsme ukázali, že objemová tepelná kapacita bentonitu má na



teploty na povrchu kontejneru menší vliv, takže budeme testovat jen různé hodnoty tepelné vodivosti.

K modelování teplotního pole v okolí jednoho vrtu jsme použili metodu konečných prvků. Nyní budeme studovat teplotní poměry systému více vrtů, ve finální fázi půjde o více než 100 vrtů. Standardně použít metodu konečných prvků na úložiště se stovkou vrtů je ovšem problematické, protože konečněprvková síť respektující detaily kontejnerů a bentonitového obložení by byla extrémně rozsáhlá. Proto, podobně jako v termální analýze provedené Posivou [9] a v řadě dalších zahraničních studií použijeme kombinaci numerického řešení pro přímo studovaný vrt a zjednodušeného řešení pro působení okolních vrtů. Takové zjednodušení lze dosáhnout následujícími způsoby modelování působení okolních vrtů.

- a) Soustředěním tepelného zdroje do konečné linie při zachování nebo zjednodušení materiálového rozložení. Pro program GEM byl liniový zdroj používán již v [19].
- b) Použitím konečných liniových zdrojů při homogenizaci úlohy (jako materiál je uvažována pouze hornina). V tomto případě je celá oblast mimo studovaný vrt materiálově homogenní, což významně zjednodušuje tvorbu MKP sítě.
- c) Nahrazením tepelných zdrojů v okolních vrtech bodovými zdroji s využitím analytického řešení pro bodový zdroj. Podrobnosti k poslednímu způsobu budou popsány v další kapitole.

Pro získání celkového řešení použijeme v případech b) a c) metodu superpozice na řešení rozložení teplotního pole kolem jednoho vrtu. Použití principu superpozice je založeno na předpokladu linearit odpovídajících vztahů a parciálních diferenciálních rovnic popisujících nestacionární úlohu vedení tepla. Nicméně linearita zajistí plnou platnost superpozice jen za předpokladu nezměněného materiálového složení (neplatí v případě b) i c)) a nezměněných okrajových podmínek (neplatí v případě c)). Proto je nutné na vhodných testovacích úlohách ověřit možnost superpozice pro modelování teplotního pole úložiště.

### 3.1. Volba velikosti modelu a stanovení okrajových a počátečních podmínek

V této části uvažujeme jen modelový systém 51 vrtů a testování jevů, takže můžeme provést zjednodušení proti skutečnosti. Při numerických testech v této části budeme např. předpokládat konstantní počáteční teplotu  $24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která odpovídá hloubce 520 m v celé studované oblasti. Numerickým modelem počítáme změny teploty vyvolané uloženým vyhořelým jaderným palivem (VJP) a jako okrajovou podmínku volíme tepelný tok  $q=0$  na hranici modelované oblasti, což odpovídá adiabatickému ději, kdy teplo generované VJP zůstává v oblasti. Úlohu řešíme pro prvních 10 let od uložení, kdy teplota na povrchu kontejneru dosáhne maxima. Testem zjistíme, zda zdroje změní teplotní pole na hranici oblasti a volba  $q=0$  je realistická. Volba tepelného toku  $q=0$  přitom představuje mezní situaci, na povrchu bude ve skutečnosti docházet k přestupu tepla do vzduchu a tedy k snižování teploty na povrchu. Poznamenejme, že numerický test jsme provedli pro 51 vrtů a zkoumali jsme dosah teplotních změn v 6. roce od uložení, kdy teplota v kontejneru dosáhla maxima. V tabulkách 13–14 jsou uvedeny výsledky pro 51 liniových zdrojů. Ukazuje se, že dosah teplotních změn není velký (viz také obr. 22 a obr. 23), i když je pro zdůraznění efektu testována i superhustá situace (rozestupy vrtů pouhé 2m). Na obrázku 24 jsou zobrazeny izolinie v řezu kolmo na vrty pro detail. Teplotní pole při této hustotě vrtů není z hlediska modelování tak zajímavé, proto zobrazujeme teplotní pole i pro vrty vzdálené 10 metrů. (obr. 25-26). Protože při těchto testovacích úlohách jsme uvažovali teplotní zdroj v celé délce vrtu,

je vidět že izolacie jsou při horizontálním řezu v centrální části rovnoběžné s liniovým zdrojem. Při zohlednění bentonitu mezi jednotlivými kontejnery by teplotní pole kolem vrtu bylo kvalitativně podobné poli kolem jednoho vrtu pro úlohu s jedním vrtem (viz obr. 27)

### 3.2. Použití liniových zdrojů, srovnání liniových a objemových (kontejner) tepelných zdrojů

Při testování okrajových podmínek chceme ověřit, zda koncentrace VJP do několika vrtů uložených blízko sebe ovlivní teplotu blízko hranice. Vytvoření konečně prvkové sítě pro větší množství vrtů není možné. Pokud by ale šlo nahradit VJP ve vrtu (kazety) odpovídajícími liniovými zdroji, numerický test by šel provést. Provedeme proto test, kdy srovnáme řešení pro VJP uložené v jednom vrtu s řešením, kdy odpovídající zdroj tepla je umístěn do osy vrtu (liniový zdroj). Poznamenejme, že v testu má vrt průměr odpovídající kazetě (kontejneru) s VJP. Úlohu řešíme pro 2 případy. V prvním případě je kolem vrtu 200 cm široké mezikruží z bentonitu, v druhém případě bentonit kolem vrtu neuvažujeme. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 13.

Vidíme, že výsledky pro liniový zdroj a pro kazetu jsou prakticky stejné, takže je možné při testech nahradit kazety liniovými zdroji. Všimněme si, že ve vzdálenosti 2.3585 m od osy vrtu, kde končí 2 m silné bentonitové mezikruží, jsou teploty podobné jak pro řešení s bentonitem, tak pro řešení bez bentonitu. Ve vzdálenosti 0.3585 m (povrch kazety) je závislost na síle bentonitového mezikruží velká (viz tabulka 13). Tabulka 13 odpovídá času  $t=6$  let od uložení. Teploty v okolí kontejneru pro úlohu s bentonitem a úlohu bez bentonitu jsou podrobněji znázorněny v tabulce 14 a na obrázcích 28-31. Zdá se, že teploty se srovnávají po dosažení maximální teploty na povrchu kontejneru.

Tabulka 13: Srovnání teplot pro liniový zdroj a objemový zdroj v 6. roce od uložení (max. teplota ve vrtu), síla bentonitu 0 a 200 cm.

Vzdálenost od středu vrtu (metry)	bentonit 0 kontejner	bentonit 0 liniový zdroj	bentonit 200 kontejner	bentonit 200 liniový zdroj
0.3585	76.96	76.98	120.32	120.33
2.3585	49.37	49.39	49.09	49.09
5.90	38.29	38.31	37.94	37.94
10.00	33.00	33.01	32.67	32.67
20.00	27.31	27.32	27.11	27.11
30.00	25.18	25.18	25.08	25.08
39.80	24.39	24.39	24.35	24.35
50.00	24.11	24.11	24.10	24.10
85.00	24.00	24.00	24.00	24.00

Tabulka 14: Srovnání teplot pro úlohu s bentonitem a úlohu bez bentonitu v různých časech a vzdálenostech od středu kontejneru.

čas (roky)/	bentonit 0 cm			bentonit 200 cm		
	vzdálenost od středu (m)			vzdálenost od středu (m)		
	<b>0.35</b>	<b>2.35</b>	<b>10.00</b>	<b>0.35</b>	<b>2.35</b>	<b>10.00</b>
<b>0.1</b>	59.37	30.11	24.00	84.45	25.17	24.00
<b>0.5</b>	68.58	38.10	24.80	109.39	34.39	24.38
<b>1.0</b>	72.04	41.67	26.32	116.22	39.33	25.62
<b>3.0</b>	76.14	46.76	30.14	121.38	45.93	29.58
<b>5.8</b>	77.09	49.22	32.94	120.61	48.88	32.60
<b>8.0</b>	76.75	50.08	34.33	118.61	49.90	34.09
<b>15.0</b>	74.11	50.38	36.20	111.53	50.39	36.09
<b>30.0</b>	66.98	48.15	36.81	96.76	48.24	36.79

### 3.3. Testování vlivu úložiště na teploty u hranice oblasti.

Testujeme vliv 51 liniových zdrojů umístěných v 300 m dlouhých vrtech, které jsou umístěny v horizontální poloze v hloubce 500m. Vzdálenost mezi vrty volíme 2m, 5m, 10m a 20m (vzdálenost 2 metry určitě není reálná, ale nám jde o možný vliv na teploty na hranici oblasti). V tomto případě předpokládáme, že liniový zdroj je umístěn po celé délce vrtu. Děj uvažujeme adiabatický – teplo z oblasti nemůže odcházet, zkoumáme dosah teplotních změn. Oblast volíme 5000x5000x1430 m. V tabulce 15 uvádíme změny teploty se vzdálenosti od vrtů směrem k povrchu (směr z), v tabulce 16 sledujeme změny ve směru liniových zdrojů (směr x), v tabulce 17 sledujeme změny ve směru kolmém na směr liniových zdrojů (směr y). Výchozí bod je ve středu liniového zdroje, který je uprostřed soustavy vrtů.

Tabulka 15: Změny teplot směrem k povrchu (směr z)

Vzdálenost od zdroje	Vzdálenost linií 2m	Vzdálenost linií 5m	Vzdálenost linií 10m	Vzdálenost linií 20m
85 m	24.004	24.001	24.001	24.000
55 m	25.896	24.746	24.380	24.187
30 m	76.851	45.229	34.629	29.357
0 m	623.13	270.53	155.56	99.081

Přestože jsme v numerickém testu použili velmi malou vzdálenost mezi vrty, větší výkon zdroje (2100 W na jednu kazetu) a navíc zdroj byl přes celou délku vrtu (jednotlivé kontejnery nebyly odděleny distančními bloky z bentonitu), je z tabulek vidět, že teplota se vzdáleností od úložiště rychle klesá, takže vliv úložiště na povrchovou teplotu bude zřejmě zanedbatelný.

Tabulka 16: Změny teplot ve směru liniových zdrojů (směr x)

Vzdálenost od začátku linie	Vzdálenost linií 2m	Vzdálenost linií 5m	Vzdálenost linií 10m	Vzdálenost linií 20m
75m	24.005	24.002	24.001	24.000
55m	25.312	24.521	24.262	24.131
25m	42.993	31.629	27.818	25.931
0m	318.25	144.60	88.101	60.582
střed linie	623.13	270.53	155.56	99.081

Tabulka 17: Změny teplot kolmo na směr liniových zdrojů (směr y)

Vzdálenost od krajní linie	Vzdálenost linií 2m	Vzdálenost linií 5m	Vzdálenost linií 10m	Vzdálenost linií 20m
75m	24.006	24.003	24.002	24.002
55m	25.517	24.733	24.492	24.384
25m	45.321	33.995	30.343	28.666
0m	352.31	180.42	124.35	95.593
centrál.l.	623.13	270.53	155.56	99.081

### 3.4. Ověření principu superpozice na liniových zdrojích

Pokud budeme předpokládat, že nestacionární úloha rozložení teplot v okolí velkokapacitních vrtů s uloženým VJP je lineární, můžeme předpokládat platnost principu superpozice a to i při malých změnách materiálového rozložení. Jeli  $\tau_0(x, t_0)$  počáteční teplota v bodě  $x$  a čase  $t_0$  jeli  $d\tau_i(x, t)$  přírůstek teploty jen od působení VJP ve vrtu  $i$ , pak přírůstek teploty od všech  $n$  vrtů je

$$d\tau(x, t) = \sum_{i=1}^n d\tau_i(x, t)$$

a teplota v celé oblasti je

$$\tau(x, t) = \tau_0(x, t) + \sum_{i=1}^n d\tau_i(x, t).$$

Protože předpokládáme, že každý vrt představuje stejný tepelný zdroj, můžeme na základě výpočtu teplotního pole od jednoho zdroje získat superpozicí teplotní pole od dalšího zdroje. Můžeme i uvažovat, že jednotlivé zdroje mají start v jiný čas. Jeli tedy  $d\tau(x, t)$  přírůstek teplotního získaný výpočtem pro jeden vrt, pak přírůstek teplotního pole  $d\tau_i$  od vrtu

vzdáleného  $dx_i$  od původního vrtu a začínajícího působit jako tepelný zdroj o čas  $dt_i$  později je

$$\begin{aligned} d\tau_i(x,t) &= d\tau(x+dx, t-dt_i) \quad \text{pro } t > dt_i, \\ d\tau_i(x,t) &= \text{pro } 0 \leq t \leq dt_i \end{aligned}$$

Takže výpočtem teplotního pole od jednoho vrtu s VJP můžeme superpozicí získat globální teplotní pole od působení všech vrtů s VJP.

Provedli jsme numerický test, kdy jsme spočítali teplotní pole za současného působení 51 tepelných liniových zdrojů vzdálených od sebe 2m a srovnali ho z výpočtem, který jsme získali použitím metody superpozice na teplotní pole získané výpočtem pro jeden liniový zdroj. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18: Srovnání řešení pro 51 liniových zdrojů s řešením získaným superpozicí v čase 6 let. Vzdálenost je ve směru liniového zdroje (směr x)

Vzdálenost od zdroje	30 m	20m	10m	0 m	střed linie
51 zdrojů	34.36	57.63	121.98	318.22	623.06
Superpozice	34.36	57.63	121.98	318.22	623.07

Z tabulky je vidět, že superpozicí jsme v tomto případě získali prakticky stejné hodnoty jako pro řešení s 51 vrty najednou. Při řešení s jedním vrtem jsme předpokládali, že materiál kolem vrtu je homogenní.

Při řešení úlohy pro jeden vrt předpokládáme kolem vrtu mezikruží z bentonitu, zbytek oblasti tvoří granit. Teplotní pole se tedy v místě předpokládaného nejbližšího dalšího vrtu (kde bude ve skutečnosti bentonitové mezikruží místo granitu) může trochu lišit. Řešili jsme dvě úlohy pro jeden vrt s tepelným zdrojem (kazetou). V prvním případě jsme předpokládali okolí tvořené granitem, v druhém případě jsme předpokládali ve vzdálenosti 20 metrů další vrt, ale bez tepelného zdroje, ale s bentonitovým mezikružím. Srovnali jsme obě řešení na stěně druhé ho vrtu (předpokládaný povrch kontejneru). Rozdíl byl asi 0.2 stupně.

Závěrem této kapitoly je tedy ověření vhodnosti uvažovaného rozsahu modelové oblasti, vhodnosti adiabatické okrajové podmínky i možnost použití superpozice.

## 4. Modelování tepelného pole úložiště. Srovnání různých koncepcí úložiště

V této části se budeme věnovat modelování teplotního pole v úložišti se 128 vrty s jaderným palivem uloženým v 3456 kontejnerech (uložení kontejnerů ve vrtu je popsáno v úvodu). Jde o modelový příklad úložiště, počty vrtů byly zvoleny tak, aby mohly být umístěny pravidelně s jistou symetrií. Není ovšem problém modelovat i rozsáhlejší úložiště s daleko větším počtem vrtů, ale jak ukážeme, kontejnery ve vzdálenějších vrtech mají na teplotu sledovaného kontejneru v centru úložiště zanedbatelný vliv. Kontejnery jsou uloženy ve vrtech a obloženy bentonitem, jehož vodivost je výrazně nižší než vodivost okolní horniny. Z hlediska matematického modelování řešíme dva zásadní problémy:

- tepelné pole v okolí kontejneru, které vzniká v důsledku rozpadu radioaktivního materiálu v samotném kontejneru a interakci tohoto tepelného zdroje s bentonitovým obalem a okolní horninou.
- příspěvky k tepelnému poli popsanému v předcházejícím bodě, které vznikají v důsledku šíření tepla z ostatních kontejnerů.

V případě tepelného pole popsaného v prvním bodě má rozhodující podíl na jeho tvaru počáteční tepelný výkon, tloušťka bentonitové vrstvy a tepelné vlastnosti bentonitu a okolní horniny. V případě pole popsaném v druhém bodě rozhodující roli hrají tepelné vlastnosti horniny a vzájemná poloha jednotlivých kontejnerů.

Tepelné pole zahrnující všechny kontejnery ve vzájemné interakci spolu s jejich strukturou je principiálně možné modelovat metodou konečných prvků. Nicméně řešit tuto úlohu bez určitých zjednodušení je velmi obtížné a neekonomické. Když uvážíme rozměry kontejneru, jehož průměr je 70cm, a tloušťku bentonitové vrstvy, která může být rovněž 70cm, je zřejmé, že síť pro MKP musí obsahovat konečné prvky, jejichž rozměry by měly být řádově centimetry. Samotné úložiště obsahuje v našem případě 3456 kontejnerů, které jsou uloženy ve vrtech. Samotné vrty jsou rovnoměrně rozloženy ve vzdálenostech zhruba 30m. V případě úložiště, kde kontejnery jsou uloženy v jedné horizontální vrstvě, zaplněná plocha má zhruba rozměry 1kmx1,5km. Pokud chceme eliminovat vliv okrajových podmínek musíme počítat s plochou 3kmx3km. Z výše uvedeného je patrné, že vytvořit MKP síť popisující celkovou strukturu úložiště a zahrnující korektně zvolené okrajové podmínky je minimálně nepraktické.

Řešením nastíněného problému bude spojení numerického a analytického řešení superpozicí. Teplotní pole vytvořené kontejnery v jednom vrtu lze řešit metodou konečných prvků velice přesně (za daných předpokladů popsaných v předcházející části). Analytické řešení, kdy tepelné zdroje jsou koncentrovány do bodů v centrech kontejnerů, nám dá dostatečně přesné řešení v bodech, které nejsou příliš blízko zdrojů. Proto výpočet teploty na povrchu daného kontejneru ve vybraném vrtu, který vychází z numerického řešení pro tento vrt a analytického řešení pro ostatní vrty, je vhodně vybranou variantou řešení našeho problému.

### 4.1. Analytické řešení

Řešíme tedy problém určení teplotního pole v úložišti postupem, který je založen na superpozici numerického řešení pro několik kontejnerů a analytickém řešení popisujícím tepelné pole okolních kontejnerů. V tomto analytickém řešení považujeme kontejnery za bodové zdroje (1 kontejner = 1 bodový zdroj), což vzhledem k tomu, že nás zajímá teplota ve vzdálenosti několik metrů od zdroje, je dostatečná aproximace. Pro přesnější určení teplot

blíže kontejneru může být každý kontejner nahrazen několika bodovými zdroji (testovali jsme použití 10ti zdrojů). Kontejner modelujeme jako zdroj tepla proměnného výkonu umístěný v nekonečném prostoru, což se zdá dostatečně dobrou aproximací pro tepelné pole generované okolními kontejnery.

V této zprávě uvažujeme pouze lineární šíření tepla, tedy superpozice je korektní až na otázku respektování nehomogenního prostředí (nahrazení kontejneru a bentonitu materiálem horniny) a okrajové podmínky (pro analytické řešení nulová teplota v nekonečnu). Tepelné pole generované samostatným kontejnerem či sadou kontejnerů uložených v jednom vrtu je možné v blízkém okolí (jemná síť) s vysokou přesností aproximovat numerickým řešením pomocí konečných prvků. Tepelné pole ve větších vzdálenostech, 10m a více, je pak možné s vysokou přesností aproximovat analytickým řešením s bodovými zdroji, jejichž výkon odpovídá celkovému výkonu jednotlivých kontejnerů. Toto je dobře patrné z grafů na obr. 32, kde je porovnáno tepelné pole od 27 kontejnerů umístěných v jednom vrtu s polem 27 bodových zdrojů umístěných v pozicích kontejnerů s tepelnými výkony odpovídajícími jednotlivým kontejnerům. Pro toto srovnání předpokládáme, že vrt není obalen bentonitovou vrstvou. V obecném případě numerického řešení jsou kontejnery v jednom vrtu navzájem odděleny bentonitem a celý vrt je obalen bentonitovou vrstvou. V případě bodových zdrojů, tyto byly umístěny do homogenní horniny. Z výše zmíněného srovnání numerického a analytického řešení vyplývá, že analytické řešení s bodovými zdroji od jisté malé vzdálenosti dostatečně přesně aproximuje řešení, které uvažuje strukturu kontejnerů v jednom vrtu. Teplotu v bodě na povrchu kontejneru neaproximujeme pomocí analytického řešení dobře, protože numerická integrace pro body blízko bodového zdroje je méně přesná (potřebovali bychom velice jemné dělení) a navíc chybu vnáší nahrazení objemového zdroje bodovými zdroji. Analytické řešení také neuvažuje bentonit mezi jednotlivými kontejnery. Analytické řešení je však přesné pro větší vzdálenosti. Vidíme na obrázku, že pro vzdálenost 30m od zdroje (vzdálenost vedlejšího vrtu) je rozdíl mezi analytickým a numerickým řešením menší než 0.1 stupně, což dokazuje i přesnost numerického řešení pro 1 vrt. Tedy superpozice popsaná výše je spolehlivě použitelná.

Věnujme se nyní popisu tepelného pole, které vzniklo pro případ bodového zdroje umístěného v počátku souřadnicového systému (viz [10]). Výkon zdroje je jednotkový a teplo bylo uvolněno v jediném okamžiku  $t = 0$ . Teplotní pole je popsáno funkcí  $\tau(x_1, x_2, x_3, t)$ , kde  $x_1, x_2, x_3$  patří do  $R$  a  $t$  do  $(0, \infty)$  a tato funkce je řešením následující rovnice pro vedení tepla

$$c\rho \frac{\partial \tau}{\partial t} - \lambda \nabla^2 \tau = \delta(x_1, x_2, x_3, t)$$

kde symboly v rovnici odpovídají veličinám.

- $c$  je tepelná kapacita hmotnostní jednotky horniny.
- $\rho$  je měrná hmotnost horniny.
- $\lambda$  je tepelná vodivost horniny.

Všechny zmíněné veličiny jsou konstantní v celém prostoru. Symbol  $\delta$  je Diracova funkce. Za těchto podmínek je možné nalézt analytické řešení, které má tvar

$$\tau(x, t) = \frac{(c\rho)^{1/2}}{(4\lambda\pi t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{|x|^2 c\rho}{4\lambda t}\right).$$

Toto řešení je základní nástroj pro obecné vyjádření průběhu teploty v bodě  $x$ , které je generováno bodovými zdroji. Potřebujeme znát časový vývoj tepelného pole v libovolném bodě v případě, že známe časový průběh výkonu kontejneru modelovaného jako bodový zdroj. Výkon kontejneru je definován funkcí  $f(t)$  definovanou na intervalu  $(0, \infty)$ . Toto řešení má tvar

$$\tau(x, t) = \int_0^t \frac{(c\rho)^{1/2}}{(4\lambda\pi(t-s))^{3/2}} \exp\left(-\frac{|x|^2 c\rho}{4\lambda(t-s)}\right) f(s) ds.$$

V našich modelech uvažujeme funkci  $f(t)$  ve tvaru

$$f(t) = \sum_{i=1}^3 A_i \exp(-B_i t),$$

která byla získána analýzou dlouhodobě sledovaného úbytku výkonu kontejneru. Pokud analyzujeme integrant v analytickém vyjádření pro bodový zdroj ve tvaru

$$\frac{(c\rho)^{1/2}}{(4\lambda\pi(t-s))^{3/2}} \exp\left(-\frac{|x|^2 c\rho}{4\lambda(t-s)}\right) \left(\sum_{i=1}^3 A_i \exp(-B_i s)\right),$$

můžeme snadno ověřit, že tento integrant je po částech monotónní funkce a intervaly, na kterých je tato funkce monotónní, je možné explicitně vyjádřit pomocí koeficientů nacházejících se v definici integrantu. Tímto je možné odhadnout přesnost řešení pro bodový zdroj umístěný v počátku soustavy souřadnic, jehož výkon v průběhu času je popsán funkcí  $f(t)$ . Toto je snadno možné nahlédnout pomocí použití obdélníkového pravidla, kdy okamžitě máme dolní a horní odhad integrálu, a v průběhu výpočtu můžeme kontrolovat přesnost.

Nyní předpokládejme že bodové zdroje s výkonem popsáným funkcí  $f(t)$  jsou umístěny v bodech  $x_j, j = 1, \dots, k$  a zajímá nás průběh teploty v bodě  $x$ , který se liší od bodů  $x_j$ . Toto pole má tvar

$$\tau(x, t) = \sum_{j=1}^k \int_0^t \frac{(c\rho)^{1/2}}{(4\lambda\pi(t-s))^{3/2}} \exp\left(-\frac{|x-x_j|^2 c\rho}{4\lambda(t-s)}\right) f(s) ds.$$

Takto získaný průběh teplot v bodě  $x$ , který se nachází na rozhraní bentonitu a pláště kontejneru, je třeba přičíst k numerickému řešení, které respektuje strukturu kontejneru a bentonitové vrstvy. Tento postup umožňuje věrně vyjádřit průběh teploty v kritických bodech úložiště a stanovit tak určité limity pro tloušťku bentonitu a vzájemné rozmístění kontejnerů. Pod kritickými body rozumíme pozice v úložišti, kde jsou dosahovány maximální teploty.



## 4.2. Modelované typy úložiště

Budou modelovány dvě koncepce úložiště s následujícími způsoby uložení kontejnerů:

- horizontální uložení, kdy kontejnery jsou uloženy v paralelních vrtech umístěných v jedné horizontální rovině (obr. 33),
- šikmé uložení, kdy kontejnery jsou uloženy v paralelních šikmých vrtech v několika rovnoběžných rovinách se zadaným sklonem 25 stupňů (obr.34).

Pro model horizontálního uložení vycházíme ze zprávy [1]. Zde jedno úložné pole představuje uložení vrtů po obou stranách zavážecí chodby (ta má šířku 6 -8 metrů). Před vrtem pro uložení kontejnerů je manipulační (ukládací) nika délky 24 m. Od zátky k ústí vrtu je 7.5m. Lze tedy říci, že mezi 2 krajními kontejnery, které leží ve vrtech v přímce po opačné straně zavážecí chodby jsou celkem 4.4 m bentonitu, 5 m zátky, 15 m zavezeného vrtu, 48 m zavezené niky a 6-8 m zavezené chodby, což je dohromady asi 80 m.

Celkově budeme předpokládat, že vrty jsou umístěny do 4 úložných polí přičemž každé pole obsahuje 32 vrtů, 16 po každé straně chodby (obr. 33). Budeme předpokládat, že mezi jednotlivými úložnými poli je vzdálenost 80 metru. Pro vzdálenost mezi jednotlivými vrty v jednom poli uvažujeme 4 varianty, a to vzdálenosti 30m, 40m 50m a 60m mezi vrty. Pro vzdálenost 30m jsme testovali i patrové uložení, kdy 2 úložná pole jsou umístěna 50 metrů nad dalšími 2 úložnými poli. Rozměry půdorysů jednotlivých uložení jsou patrné z tabulky 19.

Tabulka 19: Půdorysy různých horizontálních uložení

typ	H30	H40	H50	H60	H30-2H50
Půdorys [m]	1440x980	1440x1280	1440x1580	1440x1880	1440x450

V případě šikmého uložení jsme vycházíme ze zadání SÚRAO (obr.35). Uvažovaných 128 vrtů jsme rozdělili do 8 řad po 16 vrtech. Podle zadání byly vrty v jedné řadě od sebe vzdáleny 30 m, jednotlivé řady za sebou 50 m. Pak ale mezi vrty ve dvou různých řadách byla nejmenší vzdálenost 25.91 m (vrty v sudých řadách jsou vzhledem k předchozí řadě posunuty o polovinu vzdálenosti mezi vrty v řadě). Proto jsme vzdálenosti mezi chodbami poněkud zvětšili.

Celkově řešíme 4 varianty uložení (p značí posun mezi uloženími kontejnerů v sousedních vrtech):

- S30 71p - rozestup mezi vrty v řadě 30 m, mezi chodbami 71 m
- S40 95p - mezi vrty v řadě 40 m, mezi chodbami 95 m
- S50 118p - mezi vrty v řadě 50 m, mezi chodbami 118 m
- S60 142p - mezi vrty v řadě 60 m, mezi chodbami 142 m.

Rozměry půdorysů jednotlivých uložení jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20: Půdorysy různých šikmých uložení

typ	S30 71p	S40 95p	S50 118p	S60 142p
Půdorys [m]	766x450	934x600	1095x750	1263x900

## 4.3. Numerické výsledky

### 4.3.1 Numerické výsledky založené na superpozici

Pro numerické řešení rozložení nestacionárního teplotního pole kolem jednoho vrtu s 27 kontejnery (při tomto numerickém řešení ostatní vrty neuvažujeme) jsme prakticky vycházeli z modelové úlohy popsané v části 2.2, ale volili jsme jemnější síť ve směru z, který odpovídá směru uloženého vrtu. Využíváme osové symetrie, takže modelovaná oblast (512x512x896.5 metrů) představuje čtvrtinu skutečné oblasti, pro kterou teplotní pole počítáme (1024x1024x896.5 metrů).

Konečněprvková síť odpovídající modelové oblasti má rozměry 183x183x258 uzlů a je blízká síti použité v části 2 (viz obr.1). Úlohu řešíme pro různé hodnoty tepelné vodivosti bentonitu, pro různou tloušťku bentonitové vrstvy kolem vrtu a pro různý počáteční výkon kontejnerů (různá doba uložení po vyjmutí z reaktoru). Ukládáme pole obsahující informace, z kterých můžeme určit teplotu pro danou hloubku, danou vzdálenost od osy vrtu a pro daný časový okamžik. Tepelné vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 2. V kapitole 2 zprávy jsme ukázali, že velký vliv na teplotu na povrchu kontejneru vyvolanou teplem produkujícím tímto kontejnerem má tepelná vodivost bentonitu. Proto kromě tepelné vodivosti bentonitu  $\lambda=1$  používáme ve výpočtech i hodnoty tepelné vodivosti  $\lambda=0.75$  a  $\lambda=0.5$ .

Zdroj tepla simulující kontejner s jaderným odpadem snižuje tepelný výkon  $Q(t)$  exponenciálně a je popsán vztahem (1) v úvodu zprávy. Ve výpočtech budeme uvažovat 4 časy uložení kontejneru :  $t=60$  let (výkon kontejneru v okamžiku uložení  $P=1282$ ),  $t = 49.85$  let ( $P=1500W$ ),  $t=38.825$  ( $P=1800W$ ),  $t=30.639$  ( $P=2100W$ ).

Celková teplota na povrchu kontejneru je složena z původní teploty (zde předpokládáme lineární průběh původní teploty respektující tepelný gradient – diskutovaný v části 2.1), přírůstku od příslušného vrtu (numerické řešení) a přírůstku od ostatních vrtů (analytické řešení). Jak je vidět z obrázku 36 (čas uložení  $t=30.639$ ), přírůstek od příslušného vrtu má maximum kolem času  $t=5$  let, přírůstky od ostatních vrtů mají maximum v časech větších než 120 let.

Na obr. 37 vidíme nárůst teplot vlivem 1 vrtu v různých vzdálenostech od vrtu. Ve vzdálenosti 30m je maxima 5.9 stupňů dosaženo v 55 letech, ve vzdálenosti 50m je maxima 3.6 stupňů dosaženo v 84 letech, ve vzdálenosti 100m ke maxima 1.43 stupňů dosaženo v 169 letech a v případě vzdálenosti 200m teplota roste i ve 200 letech a dosahuje v té době 0.3 stupňů. Přírůstek od ostatních vrtů vychází z analytického řešení a neuvažuje bentonitovou vrstvu kolem těchto vrtů.

Na obr. 38. je znázorněn průběh teplot se vzdáleností od osy vrtu v čase  $t=4$  roky, kdy přírůstek teplot od jednoho vrtu má hodnoty blízké maximu (čas uložení 30.639 r.,  $\lambda_{bent}=0.5$ ). Z obrázku je patrné, že vně bentonitové vrstvy jsou teploty prakticky stejné pro úlohu s bentonitem i úlohu bez bentonitu. Proto je přírůstek od ostatních vrtů, i když neuvažujeme bentonit kolem těchto vrtů, stejný jako při přítomnosti bentonitové vrstvy. Z toho je také zřejmé, že přírůstek teploty od ostatních vrtů nelze zmenšit změnami v tloušťce bentonitové vrstvy, ale pouze změnou rozmístění vrtů.

V závislosti na parametrech úlohy (tloušťka bentonitové vrstvy, tepelná vodivost bentonitu, čas uložení kontejnerů do vrtů, rozmístění kontejnerů, tepelné parametry granitu) je maxima

celkové teploty dosaženo buď blízko maxima teploty pro řešení úlohy s jedním vrtem nebo v blízkosti maxima přírůstku teploty od ostatních vrtů. Z toho je zřejmé, že podmínku nepřekročení teploty 90 stupňů na povrchu kontejneru musí splňovat i úloha s jedním (aktivním) vrtem, což dává omezení pro tloušťku bentonitu a čas uložení. Vodivost bentonitu nemůžeme předem ovlivnit, k řešení bychom měli proto přistupovat konzervativně a použít vodivost, která odpovídá málo saturovanému bentonitu (jde o menší vodivost, kdy teploty na povrchu jsou větší). Dá se totiž předpokládat, že alespoň jeden vrt nebude ovlivňován vlhkostí z okolí a bentonit díky vysoké teplotě bude sušší, a tedy méně vodivý.

Nyní se podíváme na průběh celkové teploty na povrchu kontejneru pro různé tloušťky bentonitu, různou dobu uložení a různý typ uložení (výsledky pro uložení H60 neuvádíme, jsou stejné jak pro uložení H50). Přehledné grafické zobrazení výsledků je na obrázcích 39-62. Sledujeme průběh teploty v čase pro tloušťky bentonitu 0, 30, 70 a 100 cm. Grafické výsledky doplňují tabulky 21-28 a tabulky 29-36. V tabulkách 21-28 sledujeme, kdy uložení splňuje podmínku nepřekročení teploty 90 stupňů na povrchu kontejneru pro tloušťku bentonitu 70 cm (předpokládaná tloušťka pro kontejnery VVER 1000 v referenčním návrhu úložiště jaderných odpadů) Vyhovující uložení má v tabulce označení OK. Pokud podmínka není splněna, určíme pomocí interpolace výsledků přibližnou tloušťku bentonitu, pro kterou by již tato podmínka splněna byla. Označení X znamená, že podmínka není splněna pro žádnou tloušťku bentonitu. Z tabulek je vidět, že pro testované hodnoty a typy uložení při tloušťce bentonitu 70 cm nelze ukládat kontejnery v časech menších než 38.825 let a tepelná vodivost bentonitu nemůže mít hodnotu 0.5. Typ uložení S30 71p nelze použít vůbec.

Tabulka 21: Maximální tloušťka bentonitu pro horizontální uložení H30

	<b>H30</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	4	8	12	11	21	32	22	43	OK	34	OK	OK

Tabulka 22: Maximální tloušťka bentonitu pro horizontální uložení H40

	<b>H40</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	6	11	18	13	23	40	23	47	OK	36	OK	OK

Tabulka 23: Maximální tloušťka bentonitu pro horizontální uložení H50

	<b>H50</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	7	12	18	13	23	40	23	48	OK	36	OK	OK

Tabulka 24: Maximální tloušťka bentonitu pro horizontální uložení H30-2H50

	<b>H30 2H50</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	0	0	0	7	14	24	19	40	OK	33	OK	OK

Tabulka 25: Maximální tloušťka bentonitu pro šikmé uložení S30 71p

typ	<b>S30 71p</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabulka 26: Maximální tloušťka bentonitu pro šikmé uložení S40 95p

typ	<b>S40 95p</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0		0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	X	X	X	1	2	5	10	31	56	31	70	OK

Tabulka 27: Maximální tloušťka bentonitu pro šikmé uložení S50 118p

typ	<b>S50 118p</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	5	9	15	11	20	35	21	43	OK	33	OK	OK

Tabulka 28: Maximální tloušťka bentonitu pro šikmé uložení S60 142p

typ	<b>S60 118p</b>											
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>			<b>38.825(1800W)</b>			<b>49.85(1500W)</b>			<b>60.0(1282W)</b>		
$\lambda$ bent.	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
tloušťka bent.	6	10	16	12	21	35	22	43	OK	33	OK	OK

V tabulkách 29-36 sledujeme maximální teploty na povrchu kontejnerů, jak rovněž časy od uložení kontejnerů, kdy bylo maxima dosaženo pro tloušťku bentonitu 70 cm pro různé tepelné vodivosti, časy uložení a typy uložení. V posledním řádku tabulky je uveden příspěvek ostatních vrtů k celkové maximální teplotě.

Tabulka 29: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro horizontální uložení H30

typ	<b>H30, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
$\lambda$ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	161.0	111.6	142.4	100.1	123.0	87.9	108.8	78.9
čas dosažení	3.0	7.0	3.5	8.0	4.0	9.0	4.5	10.0
přísp. okolních vrtů	0.53	3.06	0.68	3.21	0.78	3.16	0.86	3.11

Tabulka 30: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro horizontální uložení H40

typ	<b>H40, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
$\lambda$ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	160.7	110.2	141.9	98.6	122.6	86.4	108.4	77.5
čas dosažení	2.5	4.0	2.5	5.0	3.0	5.5	3.0	6.0
přísp. okolních vrtů	0.03	0.22	0.03	0.38	0.05	0.41	0.04	0.44

Tabulka 31: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro horizontální uložení H50

typ	<b>H50, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
λ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	160.7	110.0	141.9	98.3	122.5	86.2	108.3	77.3
čas dosažení	2.5	3.5	2.5	4.0	3.0	4.5	3.0	5.0
přísp. okolních vrtů	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.06

Tabulka 32: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro uložení horizontální H30-2H50

typ	<b>H30-2H50, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
λ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	161.0	111.9	142.4	100.8	123.0	88.8	108.8	80.1
čas dosažení	3.0	9.5	3.5	14.0	4.0	18.0	4.5	23.5
přísp. okolních vrtů	0.53	5.39	0.69	7.98	0.79	9.11	0.88	10.5

Tabulka 33: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro šikmé uložení S30 71p

typ	<b>S30 71p, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
λ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	183.5	163.0	166.0	148.7	147.1	133.4	133.7	123.1
čas dosažení	51.5	78.0	56.5	86.5	66.5	103.0	83.5	150.5
přísp. okolních vrtů	84.1	100.1	77.9	91.5	71.9	82.5	69.0	78.4

Tabulka 34: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro šikmé uložení S40 95p

typ	<b>S40 95p, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
λ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	162.3	113.4	143.5	102.8	124.1	91.5	109.9	83.3
čas dosažení	2.5	24.0	3.0	28.5	3.0	36.0	3.5	49.5
přísp. okolních vrtů	0.05	18.2	0.10	19.1	0.08	20.2	0.14	22.6

Tabulka 35: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro šikmé uložení S50 118p

typ	<b>S50 118p, bentonit 70 cm</b>							
čas ul.	<b>30.639 (2100W)</b>		<b>38.825(1800W)</b>		<b>49.85(1500W)</b>		<b>60.0(1282W)</b>	
λ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	162.2	111.6	143.5	99.9	124.1	87.8	109.9	78.8
čas dosažení	2.5	3.5	2.5	4.5	3.0	5.0	3.0	5.0
přísp. okolních vrtů	0.00	0.02	0.00	0.08	0.01	0.11	0.01	0.10

Tabulka 36: Maximální teploty, časy jejich dosažení a příspěvek okolních vrtů k celkové teplotě při tloušťce bentonitu 70 cm pro šikmé uložení S60 142p

typ	S60 142p, bentonit 70 cm							
čas ul.	30.639 (2100W)		38.825(1800W)		49.85(1500W)		60.0(1282W)	
$\lambda$ bent.	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
max . teplota	162.2	111.5	143.5	99.9	124.1	87.7	109.9	78.8
čas dosažení	2.5	3.5	2.5	4.0	3.0	4.5	2.0	4.5
přísp. okolních vrtů	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01

Z tabulek 29-36 je vidět, že v případě horizontálního uložení jsou maximální teploty od vzdálenosti mezi vrty 40 metrů stejné, protože prakticky nezávisí na příspěvku od ostatních vrtů a jsou dány jen teplotou od kontejnerů v sledovaném vrtu. Ale i v případě uložení H30 a H30-2H50 je příspěvek ostatních vrtů malý. V případě šikmého uložení jsou maximální teploty na příspěvku od ostatních vrtů nezávislé pro vzdálenosti mezi vrty 50 metrů a více. Příspěvek je malý i pro uložení S40 95p, pokud je tepelná vodivost bentonitu  $\lambda=0.5$ . V tabulkách 28-36 vidíme, že i v případech malých příspěvků od okolních vrtů se maximální teploty pro horizontální a šikmé uložení nepatrně liší. To je ale dáno tím, že při šikmém uložení je kontejner s maximální teplotou v hloubce o asi 60 m větší než v případě horizontálního uložení, což odpovídá rozdílu v počáteční teplotě hornin asi 1.6 stupňů.

Uvedené výsledky ukazují, že dalším zvětšováním vzdálenosti mezi vrty nezabráníme překročení teploty 90 stupňů na povrchu kontejneru, protože ta je dána jen podmínkami v daném vrtu. Pro uložení S40 95p se ukazuje, že zmenšující se vodivost bentonitu potlačuje význam okolních vrtů a maximální teplota na povrchu je dána hlavně příspěvkem od daného vrtu. Srovnání výsledků pro horizontální a šikmé uložení provedeme v další části zprávy.

Během všech výpočtu jsme uvažovali granit s tepelnými vlastnostmi uvedenými v tabulce 2 ( $\lambda=2.7$ ,  $c_v=2.295$ ). Obecně však se vlastnosti prostředí mohou od uvedených hodnot dosti lišit. Jak jsou maximální teploty na povrchu kontejneru citlivé na změny těchto parametrů? Provedli jsme výpočty pro hodnoty  $\lambda=2.4$ ,  $c_v=2.0$  pro uložení S 40 95p a čas uložení 30.639. Průběh teplot je znázorněn na obrázku 63. Je vidět, že zmenšení parametrů o 10 procent zvýšilo maximální teplotu na povrchu až o 10 stupňů. Tento výsledek ale podstatně zvyšuje roli tepelných parametrů okolního prostředí při určování maximálních teplot na povrchu kontejneru

Zkoumali jsme také vliv úložiště na teplotu na povrchu. Průběh teplot v bodě 15 metrů pod povrchem (v 15 m pod povrchem se v ČR předpokládá konstantní teplota nezávislá na ročním období) je zobrazen na obrázku 64. Tyto teploty vycházejí z analytického řešení, které předpokládá, že zdroj je uložen v nekonečném prostředí. Z výsledků vyplývá, že teplota v hloubce 15 m pod povrchem může narůst přibližně o 0.0015 stupňů za rok. V našem případě však dochází k přestupu tepla na zemský povrch. Řešili jsme proto metodou konečných prvků úlohu, kdy 3456 kontejnerů v 128 vrtech bylo nahrazeno jedním plochým kvádrem o stejném tepelném výkonu, přičemž jsme uvažovali tepelný přestup na povrch. Teplo vyprodukované tímto tepelným zdrojem neovlivnilo teplotu na povrchu prakticky vůbec. Lze tedy konstatovat, že úložiště jaderného odpadu neovlivní teplotní poměry na zemském povrchu.

Při všech výpočtech používáme vrty, ve kterých je uloženo 27 kontejnerů. Při daném rozmístění kontejnerů ve vrtů nás také zajímá, jak ovlivňuje teplotu na povrchu kontejneru umístěného ve středu vrtu teplo produkované ostatními 26 kontejnery ve vrtu. Na obrázku 65

je srovnání teplot na povrchu od 1 kontejneru a od všech 27 kontejnerů ve vrtu pro čas uložení 30.69 let,  $\lambda_{\text{bent}} = 1.0$ . V případě 1 kontejneru je maxima 104.5 stupňů dosaženo pro čas  $t = 1.54$  r., v případě všech 27 kontejnerů je maxim 110.0 stupňů dosaženo v čase  $t = 3.59$  r. let.

## 5. Řešení problému určení nestacionárního teplotního pole jinými postupy

V předcházející části jsme řešili úlohu určení teplotního pole v okolí úložiště metodou superpozice numerického a analytického řešení. Numerické řešení bylo realizováno vlastním konečněprvkovým systémem GEM. V této části se zmíníme o jiném způsobu řešení problému numericky systémem GEM s využitím symetrie a spočítáme i jednoduchou úlohu teplotního pole kolem jednoho vrtu systémem ANSYS s využitím nekonečného prvku.

### 5.1 Numerické řešení založené na symetrii rozložení ukládacích vrtů.

Mimo techniku superpozice založené na kombinaci numerického řešení teplotního pole kolem jednoho vrtu a analytického řešení (a jeho superpozicí) pro teplotní pole vzniklé působením výkonů kontejnerů v ostatních vrtech je možné použít pro analýzu teplot na povrchu kontejnerů symetrického rozložení úložných vrtů (viz obr. 33 a 34). Místo řešení na rozsáhlé oblasti bychom úlohu řešili v úzkém výřezu (obr. 66). Takový výpočet je reprezentativní pro vnitřní část úložiště s vyššími teplotami, celkově je tedy na bezpečné straně odhadu.

Zatímco v případě horizontálního uložení stačí při modelování použít úzkou oblast kolem jednoho (vnitřního) úložného vrtu, která nemusí být velká ani ve směru uložení (můžeme využít dvou symetrií), je v případě šikmého uložení možné využít symetrie v úzkém pruhu obsahujícím ale všechny vrty uložené za sebou (v našem modelu 8 vrtů) a vzhledem k okrajovým podmínkám (nulový tok na hranici) musíme brát hranici ve směru uložení v tomto pruhu dost daleko od úložiště. V tomto případě je konečněprvková síť složitá a hodně rozsáhlá. Proto jsme se omezili na použití tohoto přístupu s využitím symetrie jen na horizontální uložení.

Pro otestování tohoto přístupu jsme modelovali úlohu pro bentonitovou vrstvu tloušťky 40 cm při časech uložení 30.639 r. (2100 W) a 49.85 r. (1500 W) a tepelné vodivosti bentonitu  $\lambda = 1.0$ . Srovnání dosažených maximálních teplot na povrchu kontejneru je uvedeno v je uvedeno tabulce 37.

Tabulka 37: Srovnání řešení při použití principu superpozice a řešení získaného využitím symetrie.

1500 W		2100 W	
superpozice	symetrie	superpozice	symetrie
81.1	80.4	102.5	101.1

Z výsledků je vidět, že v případě horizontálního uložení lze docílit dosti přesného odhadu teploty na povrchu kontejneru s využitím symetrie uložení, navíc dosažená shoda potvrzuje správnost modelování.

## 5.2 Metoda superpozice pro řešení rozložení teplotního pole v okolí jednoho ukládacího místa – SW ANSYS

Cílem této části je určit rozložení teploty v blízkosti jednoho úložného obalového souboru (ÚOS) za předpokladu, že budeme uvažovat jeden ukládací tunel. Užitá je metoda superpozice, kdy sčítáme příspěvky jednotlivých úložných obalových souborů. Pro tvorbu modelu a jeho řešení používáme SW ANSYS založený na metodě konečných prvků. Při tvorbě geometrie modelu vycházíme z rozměrů uvedených ve zprávě [1]. Rozměry kontejnerů a uložení ve vrtu je popsáno v úvodu této zprávy, vztah pro tepelný výkon kontejneru VVER1000 je dán vztahem (9). Předpokládáme, že k uložení ÚOS s vyhořelým palivem dochází po třiceti letech od vyjmutí z reaktoru. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 2. Vzhledem k velice malé tloušťce stěny ocelového kontejneru není tento v modelu uvažován. Tepelná vodivost oceli je výrazně vyšší nežli tepelná vodivost granitu či bentonitu a proto můžeme konstatovat, že zanedbáním ocelové stěny kontejneru dostáváme pesimističtější variantu výsledku, tedy, že spočtené teploty budou nepatrně vyšší nežli při uvážení ocelového kontejneru v modelu.

Samotná geometrie modelu obsahuje již výše popsaný superkontejner s bentonitovými bloky, které jej obklopují a granitové okolí o rozměrech 11 x 12 x 30 m. Rozměr 30 m je ve směru osy superkontejnerů. Geometrie modelu je znázorněna na obr. 67.

Vzhledem k symetrii oblasti je model koncipován jako jedna osmina celé zájmové oblasti. Rovinami symetrie jsou dvě vzájemně kolmé roviny procházející osou úložného obalového souboru a rovina kolmá na osu symetrie ÚOS dělicí ÚOS na dvě shodné části.

Okrajové podmínky jsou na rovinách symetrie zadány formou homogenní Neumannovy podmínky. Na zbývajících okrajích je okrajová podmínka řešena užitím tzv. „infinite boundary“. Infinite boundary je vlastností SW ANSYS. Jedná se o jednu vrstvu elementů na okrajích oblasti, které simulují pokračování oblasti ve směru kolmém na rovinu, která je okrajem oblasti, do nekonečna, kde se předpokládá Dirichletova okrajová podmínka. Za počáteční podmínku je zvolena teplota o velikosti 24°C. Tato hodnota je spočtena pomocí vztahu pro geotermální gradient uvedeném v dokumentu [2].

V grafu na obrázku 68 je znázorněn průběh maximální dosažené teploty v čase 3 roky od uložení ÚOS. Maximální teplota je 115,7°C. Zopakujme však, že tato maximální teplota je dosažena za předpokladu, že je uložen pouze jeden ÚOS. Jednotlivé ÚOS jsou uloženy v rozestupu 10,996 m. Pokud tedy vezmeme vypočtený průběh teploty, přičteme k délkové souřadnici uvedený rozestup, získáme příspěvek dalšího ÚOS. Vytvoříme tedy superpozici příspěvků jednotlivých ÚOS uložených v rozestupu 10,996 m. Tato superpozice teplotních příspěvků pěti sousedních ÚOS je znázorněna v grafu na obrázku 69. Je zřejmé, že superponovaný průběh je v místě prvního a pátého příspěvku deformován. Nicméně v místech druhého až čtvrtého ÚOS jsou maximální teploty superponovaného průběhu již srovnatelné. Maximální teplota superponovaného průběhu je 119,4°C.

### 5.2.1 Symetrický model pro řešení teplotního pole v okolí jednoho ukládacího místa – SW ANSYS

Pro porovnání výsledků modelu, ve kterém byla užitá superpozice, jsme vytvořili model jednoho ukládacího tunelu s nekonečně mnoha ÚOS. Opět je pro tvorbu modelu použit SW ANSYS. Stejně jako u předchozího modelu, vycházíme z parametrů úložiště uvedených ve



zprávách [1], [2] a zrekapitulovaných v předcházející části. Jedná se zejména o geometrické charakteristiky úložiště, velikost a průběh tepelného výkonu, materiálové parametry, počáteční podmínky.

Úložný obalový soubor je o průměru 0,717 m, jeho výška je 5,066 m. Úložný obalový soubor je obklopen bentonitovým mezikružím o síle 0,7 m a uzavřen víkem a dnem o síle 0,7 m. Celá tato struktura je ve výše uvedeném dokumentu označována jako superkontejner. Jednotlivé superkontejnery jsou v ukládacím tunelu odděleny bentonitovými bloky o celkové síle 4,5 m. Vzdálenost středů superkontejnerů je tedy 10,996 m.

Samotný model, vzhledem k symetrii oblasti je jednou symetrickou osminou jednoho segmentu obsahujícího ÚOS, příslušnou část ukládacího tunelu s bentonitovými bloky a granitové okolí. Geometrie modelu je znázorněna na obrázku 70. Rozměry modelu jsou 11 x 12 x 5,483 m. Zejména rozměr ve směru osy z je podstatný (5,483 m). Jedná se o součet délky poloviny superkontejneru a polovinu délky bentonitových bloků umístěných mezi jednotlivými ÚOS.

Na všech okrajích, tvořících roviny symetrie modelu, je zadána homogenní Neumannova podmínka. Na zbývajících okrajích je uplatněna „infinite boundary“ tak, jak je popsáno v předcházející části. Za počáteční podmínku je zvolena teplota o velikosti 24°C.

Vypočtené teploty jsou znázorněny v grafu na obrázku 71. Maximální dosažená teplota je 120,2°C. Při stejných vstupních parametrech se výsledky modelu, ve kterém je uvažována superpozice, liší o 0,8°C. Porovnání je uvedeno v tabulce 38.

Tabulka 38: Srovnání postupů založených na superpozici a symetrii

superpozice	symetrie
119,4°C	120,2°C

Rozdíl maximálních vypočtených teplot je zanedbatelný a můžeme konstatovat, že oba užití přístupy jsou v tomto ohledu rovnocenné.

Teploty získané tímto postupem jsou o několik stupňů větší než teploty spočítané v části 4 (viz obr.65). Vysvětlujeme to tím, že při řešení nestacionárního problému jsou v této části (ANSYS) použity hrubší časové kroky. Zatímco v části 4 začínáme s krokem 0.0001 roku (asi 50 minut), zde je použit počáteční krok 0.031 (asi 11 dnů), což při velkém gradientu teploty na začátku ovlivní spočítané teploty právě tím způsobem, že vypočtené hodnoty jsou vyšší.

## 6. Srovnání jednotlivých typů úložišť

Zásadní rozdíl mezi horizontálním a šikmým uložením je ten, že zatímco horizontální uložení (H30, H40, H50) leží v rovině a lze je s nadsázkou považovat za dvojrozměrné, šikmé uložení (a také „horizontální“ uložení H30-2H50) je výrazně prostorové. To se projevuje na vzdálenosti sledovaného vrtu od ostatních vrtů. V tabulce 35 uvádíme vzdálenost nejbližších 6 vrtů od sledovaného kontejneru v daném vrtu pro uložení H30, H30-2H50, S30 71p.

Tabulka 39: vzdálenosti nejbližších vrtů pro různé typy uložení při vzdálenosti mezi vedlejšími vrty 30 m

pořadí vrtů	1	2	3	4	5	6
H30 – vzdálenosti	30.0	30.0	60.0	60.0	90.0	90.0
H30-2H50 – vzdálenosti	30.0	30.0	58.3	58.3	60.0	60.0
S30 71p	30.0	30.0	33.5	33.5	33.5	33.5

Z tabulky 39 je vidět, že v případě šikmého uložení je nejbližších 6 vrtů téměř stejně vzdálených, takže mají v součtu daleko větší vliv na sledovaný vrt než v případě horizontálního uložení. Právě v případě uložení S30 71p se tato blízkost většího počtu vrtů negativně projevuje na tepelné bilanci a příspěvek ostatních vrtů do maximální teploty na povrchu kontejneru dosahuje v některých případech až 100 stupňů.

Podíváme-li se na tabulky 29-36, můžeme říci, kromě případu uložení S30 71p dávají ostatní uložení srovnatelné výsledky, protože vliv okolních vrtů na teplotu na povrchu sledovaného kontejneru je malý. Z tabulek 21-258 zase vidíme, že za daných parametrů musí být čas uložení minimálně kolem 50 let od vyjmutí z reaktoru a tepelná vodivost bentonitu  $\lambda$  by neměla být menší než 0.75.

Přestože teploty na povrchu kontejneru jsou od jisté vzdálenosti mezi vrty v podstatě stejné pro šikmá i horizontální uložení, zásadní rozdíl je v teplotách v okolí vrtů. Kontejnery uložené v jedné horizontální rovině se lépe zbavují vyvíjeného tepla a teplota v okolí vrtů klesá rychleji. Kontejnery uložené prostorově, což je případ druhého typu úložiště, mají tendenci hromadit teplo uvnitř úložiště a teplo se hůře uvolňuje do okolí. Tento jev ukazují obrázky 72-73, kde jsou zobrazeny izolinie pro řez celým úložištěm, a to jak pro horizontální uložení (H30), tak pro šikmé uložení (S40 95p). Izolinie odpovídají časům, kdy bylo dosaženo maximální teploty (H30 – 9.5 roků, S40 95p - 24 roků). V obou případech předpokládáme tloušťku bentonitu 70 cm, tepelnou vodivost bentonitu  $\lambda=1.0$  a čas uložení kontejnerů 30.639 let od vyjmutí z reaktoru. Na obrázcích 74-75 je zobrazen detail horizontálního uložení pro časy 9.5 a 50 let, na obrázcích 76-78 je detail šikmého úložiště v časech 24, 50 a 100 let. Vidíme, že v případě šikmého uložení jsou relativně vysoké teploty v okolí i po mnoha létech. V případě šikmého uložení se zobrazují i izolinie kolem vrtů z vedlejších chodeb. Zatímco ve sledovaném vrtu řez prochází středem 14. kontejneru (prostřední kontejner ve vrtu), v případě vrtů z vedlejších chodeb řez však prochází okrajem 7. resp. 21. kontejneru, proto jsou zobrazované teploty nižší.

Srovnáme-li tabulky 28, 34 a 35 a vezmeme-li v úvahu, že sledovaný kontejner je v případě šikmého uložení v hloubce větší asi o 60 m než v případě horizontálního uložení, jsou výsledky pro uložení H30 mezi výsledky pro uložení S40 71p a S50 95p. Protože obě šikmá uložení mají půdorys menší než uložení H30, lze konstatovat, že šikmé uložení je pro ukládání jaderného odpadu z pohledu plochy půdorysu vhodnější.

## **7. Srovnání výsledků modelování s výsledky publikovanými v zahraničí.**

V tomto paragrafu srovnáváme výsledky výpočtů a metodiky výpočtů použitých v této zprávě především s výpočty ve dvou zprávách společnosti POSIVA z let 2005 a 2009 [ 9], [17]. Hlavním cílem těchto zpráv bylo posoudit vývoj tepelného pole v modelovém úložišti a zkoumat otázky spojené s dimenzováním takového úložiště. Základním předpokladem bylo uložení kontejnerů s radioaktivním odpadem ve vrtech, kdy kontejnery byly obaleny bentonitovou vrstvou. Předpokládaná maximální teplota byla 100°C. Vzhledem k nejistotám v tepelných vlastnostech horniny a bentonitu bylo maximum stanoveno na 90°C. Dosažení limitní teploty bylo řízeno nastavením vzdáleností kontejneru ve vrtech, vzdáleností jednotlivých vrtů a délkou chladicího procesu před uložením kontejneru do vrtů. Byly modelovány dva typy úložiště. V obou případech kontejnery byly uloženy v jediné horizontální rovině.

V případě prvního úložiště bylo modelováno působení 440 kontejnerů uložených ve vrtech vzdálených 25 – 40 m při maximální povolené teplotě 90°C. V případě druhého úložiště bylo modelováno 900 kontejnerů, kdy byly uvažovány počáteční výkony kontejnerů 1700 W, 1370 W a 1830 W. V tomto případě byly modelovány situace, kdy vzdálenosti mezi jednotlivými kontejnery ve vrtech byly 6 – 10 m a vzdálenosti mezi jednotlivými vrty byly 25m, 30m, 40m.

Ve zprávách byla použita metoda superpozice analytických řešení liniových zdrojů, která se ukázala efektivnější než numerická analýza, přičemž analytická řešení byla ověřena na jednoduchých příkladech pomocí numerických výpočtů. Výsledky těchto řešení je možné nalézt ve výše zmíněných zprávách.

V předkládané zprávě je použita metoda kombinace numerického a analytického řešení pro bodové zdroje. Použitelnost analytických řešení byla ověřena pomocí numerického řešení pro situaci jednoho vrtu naplněného kontejnery, které mají přibližně stejné parametry jako kontejnery použité ve zprávách společnosti POSIVA. Kombinace numerického a analytického řešení umožňuje spolehlivě určit vývoj tepla na stěně kontejneru s ohledem na tloušťku bentonitového obložení a tepelné vlastnosti bentonitu a horniny. V této zprávě jsou také modelovány tři typy úložiště. V prvním případě, veškeré kontejnery byly uloženy v jedné horizontální rovině ve vrtech vzdálených 30 m a více metrů. Počet uložených kontejnerů je 3 456. V druhém případě, kontejnery byly uloženy ve dvou horizontálních rovinách a ve třetím případě, v šikmých vrtech s prostorovou strukturou a stanovenou vzdáleností mezi kontejnery ve vrtech a mezi jednotlivými vrty. Tyto parametry vycházely ze zadání SÚRAO. Můžeme říci, že bylo dosaženo zhruba stejných výsledků, pokud se týká charakteristik časového vývoje tepelných polí.

Detailní srovnání je obtížné, protože byly modelovány jiné typy uložení. Navržená metodika může být použita pro různé typy uložení a může v budoucnu posloužit k optimálnímu návrhu rozložení vrtů, jejich vzájemné pozice a vzdáleností kontejnerů ve vrtech. Tato metoda může být zobecněna pro horniny s anizotropními tepelnými vlastnostmi, což je případ, který se vyskytuje v lokalitách vybraných pro potenciální úložiště. V tomto případě pro optimální návrh úložiště bude hrát roli i orientace vrtů vzhledem k anizotropii horniny. Obecně můžeme říci, že při řešení problémů spojených s tepelnou bilancí úložiště radioaktivního odpadu jsme narazili na obdobné problémy, které jsou popsány ve dvou výše zmíněných zprávách a dosažené výsledky jsou kvalitativně srovnatelné. Detailní srovnání je nemožné z důvodu, že v této zprávě se řešila tepelná bilance jiných typů úložišť s jiným počtem kontejnerů a jinými hodnotami výkonu, což vycházelo ze zadání společnosti SÚRAO.

Poznamenejme, že technika superpozice se objevuje i v dalších pracích, viz např. nedávná [14], a dále [15, 16].

## 8. Závěr

Pomocí matematického modelování jsme řešili úlohu rozložení teplotního pole v úložišti vyhořelého jaderného paliva. Výpočty byly rozděleny do dvou základních částí. V první části jsme modelovali tepelné pole kolem jednoho úložného vrtu, kdy jediným tepelným zdrojem bylo 27 kontejnerů VVER1000 uložených v tomto vrtu. Zformulujme si výsledky získané v této části do několika stručných tvrzení:

- z příložených výpočtů je patrné, že průběh teplot na povrchu kontejneru je výrazně závislý na tloušťce bentonitové vrstvy.
- teplota na povrchu kontejneru dosahuje svého maxima zhruba ve čtyřech až pěti letech a poté průběh teplotního pole plně koresponduje s průběhem změny tepelného výkonu kontejneru.
- z provedených výpočtů plyne, že teplota na povrchu kontejneru není příliš citlivá na hodnoty tepelné kapacity bentonitu, nicméně je extrémně citlivá na změnu vodivosti bentonitu. Tedy znalost přesné hodnoty vodivosti sehrává důležitou roli při optimálním návrhu tloušťky bentonitové vrstvy.
- grafy v příloze (obr. 2-14) dokládají průběh teploty na povrchu kontejneru v závislosti na tloušťce bentonitové vrstvy a počátečním tepelném výkonu kontejneru, což umožňuje určit potřebnou dobu chlazení kontejneru před jeho vložením do úložiště.
- z výpočtů je také zřejmé, že teplo uvolněné kontejnerem ovlivňuje teplotu výrazněji jen v blízkém okolí kontejneru, přičemž teploty vně bentonitové vrstvy nezávisí na mocnosti bentonitu

V druhé části jsme modelovali globální teplotní pole celého úložiště pro různé typy uložení. Analyzovali jsme dva základní typy uložení: horizontální uložení a šikmé uložení, kdy vrty mají odklon od horizontální roviny 25 stupňů. Cílem bylo srovnat tyto dva typy uložení. Předpokládáme, že úložiště obsahuje 3456 kontejnerů uložených do 128 ukládacích vrtů (jde o modelové počty kontejnerů, které umožňují symetrické rozložení vrtů). V případě horizontálního uložení jsou vrty rozděleny do 4 ukládacích polí, kdy v každém pole je 32 vrtů – 16 na každé straně zavázací chodby (viz obr. 33).

Pro horizontální uložení jsme vybrali 4 varianty uložení ukládacích vrtů:

- a) H30 - vrty jsou uloženy ve vzdálenosti 30 m od sebe,
- b) H40 - vrty jsou uloženy ve vzdálenosti 40 m od sebe,
- c) H50 - vrty jsou uloženy ve vzdálenosti 50 m od sebe,
- d) H30-2H50 - vrty jsou uloženy ve vzdálenosti 30 m od sebe, ukládací pole jsou po dvou ve dvou patrech 50 metrů nad sebou.

V případě šikmého uložení jsou ukládací vrty rozděleny do 8 skupin odpovídajících jednotlivým zavázacím chodbám, kdy z každé chodby vychází 16 ukládacích vrtů. Vrty v dané chodbě jsou vzhledem vrtům v sousedních chodbách posunuty o polovinu vzdálenosti vrtů v rámci jedné chodby (jsou „uprostřed“ mezi vrty k sousední chodbě). Uvažujeme 4 varianty ukládání:

- a) S30 71p - vzdálenost mezi vrty v 1 chodbě 30m, vzdálenost chodeb 71 m,
- b) S40 95p - vzdálenost mezi vrty v 1 chodbě 40m, vzdálenost chodeb 95 m,
- c) S50 118p - vzdálenost mezi vrty v 1 chodbě 50m, vzdálenost chodeb 118 m,
- d) S60 142p - vzdálenost mezi vrty v 1 chodbě 60m, vzdálenost chodeb 142 m.

K modelování teplotního pole úložiště jsme zvolili kombinaci numerického řešení metodou konečných prvků, které při jemné síti dává dosti přesné řešení v okolí uvažovaného vrtu a analytického řešení pro jednotlivé kontejnery v okolních vrtech, kdy jsou kontejnery nahrazeny bodovými zdroji. Teplotní pole celého úložiště pak poskládáme superpozicí numerického a analytického řešení.

Nyní si stručně shrňme výsledky analýz dosažených pomocí superpozice numerického a analytického řešení:

- průběh teplot v kritických bodech je dán součtem přírůstku teploty z tepla vyvinutého kontejnery ve sledovaném vrtu (27 kontejnerů) a přírůstku teploty z tepla pocházejícího od ostatních kontejnerů. Maximum teploty od daného vrtu nastává v několika prvních letech a souvisí s izolačním působením bentonitu na povrchu kontejneru a výkonem kontejnerů. Celkové maximum nastává později a souvisí s hromaděním tepla, které pochází z okolních kontejnerů daného vrtu. Časová prodleva mezi tímto maximem a maximem působení okolních vrtů souvisí s tepelnou vodivostí horniny. Na obr. 32 je vidět, že vliv kontejnerů v jednom vrtu se na teplotě ve vzdálenosti 35 metrů významněji projeví až po 1 roce.
- průběh teplot výrazně závisí na typu úložiště, pokud vzdálenost mezi vrty není velká (v našem případě 30m). V případě horizontálního úložiště je náběh teploty od ostatních vrtů pozvolný a dosažená maximální teplota je dána hlavně tepelným výkonem ve sledovaném vrtu (viz obr. 36). V případě šikmého uložení je narůstání teplot od ostatních vrtů rychlejší a dosažené maximum je pak dáno hlavně příspěvkem od ostatních vrtů, který může být větší než 100 stupňů a jeho dosažení až za několik desítek let.
- při zvětšování vzdálenosti mezi vrty se eliminuje vliv tepla vyvinutého okolními kontejnery a celkové maximum určuje teplotní pole vyvinuté kontejnery ve sledovaném vrtu. Pokud maximum teploty je určeno teplem z kontejnerů ve sledovaném vrtu a přírůstek teploty od ostatních kontejnerů je malý, nezlepší tepelnou bilanci další zvětšování vzdálenosti mezi kontejnery (viz tabulky 26-33).
- v námi řešených typech uložení se ukazuje, že kromě uložení S30 71p, kdy maximální teplota je určena přírůstkem teploty od ostatních vrtů a uložení S40 95p pro  $\lambda=1.0$ , je pro všechny ostatní případy přírůstek od okolních vrtů malý, takže teploty v kritickém bodě na povrchu kontejneru při použití bentonitu o tloušťce 70 cm jsou podobné
- geometrie úložiště hraje důležitou roli v celkové teplotní bilanci. Kontejnery uložené v jedné horizontální rovině se lépe zbavují vyvíjeného tepla a teplota v okolí klesá rychleji. Kontejnery uložené prostorově, což je případ úložiště se šikmým uložení, mají tendenci hromadit teplo uvnitř úložiště a teplo se hůře uvolňuje do okolí.
- tloušťka bentonitové vrstvy ovlivňuje teplotu na povrchu kontejneru a uvnitř bentonitu. Teploty vně bentonitu na tloušťce vrstvy nezávisí. Tato skutečnost nám umožňuje použít při superpozici analytická řešení, která jsou pro homogenní materiál a bentonitovou vrstvu neuvažují.
- vliv obou typů úložišť na povrch je zanedbatelný. Analytické řešení, které uvažuje zdroj v nekonečném prostředí sice ukazuje průměrný nárůst teploty na povrchu 0.0015 stupně za rok, ale tento vliv zcela eliminuje trvale probíhající přestup tepla z povrchu do vzduchu.
- geometrie úložiště hraje důležitou roli v celkové teplotní bilanci. Kontejnery uložené v jedné horizontální rovině se navzájem méně ovlivňují než kontejnery uložené prostorově při stejné vzdálenosti mezi vedlejšími vrty (viz tabulka 35)
- v prvních letech provozu tepelné vlastnosti bentonitu a síla bentonitové vrstvy hrají určující roli pro teplotu na povrchu kontejneru. V pozdějších letech hraje určující roli geometrie úložiště a tepelné vlastnosti horniny.
- pro spolehlivou předpověď vývoje teplot v úložišti bude hrát rozhodující roli dobrá znalost tepelných vlastností horninového masivu. Jak ukazují výsledky výpočtů (obr. 63), snížení tepelných parametrů o 10 procent navýšilo teplotu na povrchu kontejneru o 10 stupňů. Tyto hodnoty by měly být určeny spolehlivým měřením odpovídajících parametrů in situ.

- k teplotě na povrchu vnitřního kontejneru přispívají ostatní kontejnery ze stejného vrtu přírůstkem teploty několika stupňů (5.5°C v případě popsaném ve zprávě).
- výše zmíněné postupy mohou být použity na tepelnou analýzu jiných typů úložišť, např. horizontální uložení ve dvou patrech.
- byly určeny „průměrné“ (efektivní) hodnoty koeficientu tepelné vodivosti, tj. konstantní hodnoty vodivosti, při níž bude tepelný tok stejný jako při nerovnoměrném rozložení vodivosti v závislosti na saturaci bentonitu vodou.
- nízká tepelná vodivost  $\lambda$  bentonitu představuje velký problém. Při hodnotě  $\lambda=0.5$  dojde v námi uvažovaných časech uložení kontejnerů k přehřátí vždy. Je proto vhodné uvažovat i o způsobech zvýšení tepelné vodivosti materiálu obalujícího kontejnery.

Problém bezpečného uložení jaderných odpadů je složitý. Při konzervativním přístupu, kdy předpokládáme, že alespoň 1 vrt neobsahuje vodu, takže bentonit má špatnou tepelnou vodivost, můžeme docílit příznivých teplotních podmínek na povrchu kontejnerů jen snížením výkonu kontejnerů. Velký vliv na kritické teploty na povrchu kontejneru mají tepelné vlastnosti prostředí (v našem případě granit), které nemůžeme ovlivnit. Je proto nutné stanovit (nejlépe měřením in situ) minimální hodnoty těchto parametrů. Pro nepříznivé parametry prostředí a bentonitu pak můžeme hledat vhodné výkony (předchozí dobu uložení) kontejnerů a upravit vzdálenosti mezi vrty.

## Literatura

- [1] J. Oubram, I. Prachař, J. Blažek, J. Činka, M. Ferjenčík, P. Kotnour: Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, II. etapa – Varianty řešení a jejich návrh, D. Stavební část – podzemí, ÚJV Rež a.s. 2010
- [2] A. Vokál: Shromáždění a aktualizace vstupních údajů o vývoji tepla vyhořelých palivových souborů. Výstup 1.2, ÚJV Rež 2006
- [3] Blaheta R., Byczanski P., Kohut R., Starý J.: Algorithm for parallel FEM modelling of thermo-mechanical phenomena arising from the disposal of the spent nuclear fuel. In: thermo-mechanical phenomena arising from the disposal of the spent nuclear fuel. In: O. Stephansson, J. B. Hudson, Lanru Jing eds., Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical processes in Geo-systems, Elsevier 2004
- [4] L. Börgesson, L. Hernelind: Coupled thermo-hydro-mechanical calculations of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole. Influence of hydraulic rock properties on the water saturation phase. Technical Report TR-99-41, 1999
- [5] Task Force on Engineered Barrier System: Specification of Benchmark THM 1.3 - Heating Test With No Water Infiltration Performed By UPC, , August 2006
- [6] Hokr M, Frydrych D (2008), Provedení modelových výpočtů v rámci projektu EBS a účast při jeho hodnocení, Závěrečná zpráva, SÚRAO
- [7] Vašíček R (2010) The thermal conductivity of highly compacted bentonite in the fully saturated state, In Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Nantes, 2010
- [8] Pacovský, Vašíček, Hausmannová (2008), Experimentální výzkum materiálu na bázi bentonitu při dlouhodobém působení teploty a saturačního média s extrémními účinky, Závěrečná zpráva, SÚRAO
- [9] K. Ikonen: Thermal Analysis of Repository for Spent EPR-type fuel, POSIVA 2005-06
- [10] A.N.Tichonov, A.A.Samarskij: Uravnění matematika fiziki, Moskva 1972
- [11] Hökmark H, Fålb B, 2003. Thermal Dimensioning of the Deep Repository, SKB TR-03-09, December 2003. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [12] Harald Hökmark, Hydration of the bentonite buffer in a KBS-3 repository. Applied Clay Science 26 (2004) 219– 233.
- [13] Won-Jin Cho, Sangki Kwon: Effects of Variable Saturation on the Thermal Analysis of the Engineered Barrier System for a Nuclear Waste Repository. Nuclear Technology / Volume 177 / Number 2 / Pages 245-256, February 2012
- [14] Ernest Hardin et al., Generic Repository Design Concepts and Thermal Analysis (FY11), Sandia Nat. Lab. SAND2011-6202, August 2011
- [15] Jun Li, Man-Sung Yim, David McNelis, A simplified methodology for nuclear waste repository thermal analysis. Annals of Nuclear Energy 38 (2011) 243–253
- [16] Patrick Goblet, Ghislain de Marsily, Evaluation of the Thermal Effect in a KBS-3 Type Repository. A Literary Survey. SKI Report 00:18. Stockholm, 2000
- [17] K. Ikonen: Thermal Dimensioning of Spent Fuel Repository, POSIVA 2009- 69.
- [18] R. Blaheta, O. Jakl, R. Kohut, J. Starý: J. GEM - A Platform for Advanced Mathematical Geosimulations. In Wyrzykowski, R.; Dongarra, J.; Karczewski, K.; Wasniewski, J. (ed.). Parallel Processing and Applied Mathematics. Revised Selected Papers. Part 1.. Berlin, Heidelberg, New York : Springer - Verlag, 2010, pp. 266-275.
- [19] C. Andersson (ed.) Decovalex-2011 project. Final Report of Task B Modelling an in situ spalling experiment in hard rock. KTH Stockholm, June 2012