

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení

Studijní specializace: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Numerické modelování chlazení kontejneru na vyhořelé palivo

Autor: Bc. Václav Kazda

Vedoucí práce: Ing. Richard MATAS, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Václav KAZDA
Osobní číslo:	S21N0040P
Studijní program:	N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení
Specializace:	Stavba jaderně energetických zařízení
Téma práce:	Numerické modelování chlazení kontejneru na vyhořelé palivo
Zadávací katedra:	Katedra energetických strojů a zařízení

Zásady pro vypracování

1. Rešerše problematiky – kontejnery na vyhořelé palivo a jejich testování.
2. Rešerše problematiky – simulace volné konvekce, výtípnování vhodných modelů pro zadanou úlohu.
3. Popis zjednodušeného modelu pro měření, návrh modelu pro CFD simulace a stanovení okrajových podmínek.
4. Příprava CFD modelů.
5. CFD simulace modelů chlazení kontejneru pro zadané podmínky a sledování vlivu různých parametrů.
6. Analýza získaných výsledků, případné úpravy modelů.
7. Shmutí, závěry a doporučení pro CFD modelování úloh podobného typu.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **geometrie modelů, získaná proudová pole a grafy sledovaných veličin**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Davidson, L. Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling, Chalmers University of Technology, 2020
- Firemní podklady ŠKODA JS a.s.
- Manuály a firemní literatura ANSYS, Inc.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Klíma**
ŠKODA JS a.s.

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kazda	Jméno Václav		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Matas, Ph.D.	Jméno Richard		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Numerické modelování chlazení kontejneru na vyhořelé palivo			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	79	TEXTOVÁ ČÁST	55	GRAFICKÁ ČÁST	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Diplomová práce je zaměřena na modelování a simulaci přestupu tepla v izolovaném ocelovém segmentu kontejneru OS Škoda 440/84 a volné konvekce v jeho okolí. Výsledky jsou porovnány s reálným experimentem a dále jsou provedeny simulace pro sledování vlivu různých zvolených parametrů, úprav modelů a okrajových podmínek s cílem přiblížit se naměřeným hodnotám a rovněž určit vliv některých nejistot v hodnotách měření. Výsledky jsou porovnány s měřením, je provedena analýza získaných výsledků, shrnutí, závěry a doporučení pro numerické i fyzikální modelování úloh podobného typu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	volná konvekce, žebrování, citlivostní analýza, přestup tepla, sálání, CFD, kontejner

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kazda	Name Václav	
STUDY PROGRAMME	N0715A270013 Design of Power Machines and Equipment		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Matas, Ph.D.	Name Richard	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Numeric modeling of spent fuel container cooling		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	79	TEXT PART	55	GRAPHICAL PART	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis is focused on the modeling and simulating of heat transfer in the insulated steel segment of the OS Škoda 440/84 container and free convection in its surroundings. The results were compared with a real experiment and more simulations were performed to monitor the influence of various selected parameters, model modifications and boundary conditions with the aim of approaching the measured values and also determining the influence of some uncertainties in the measurement values. The results are compared with measurements with an analysis of the obtained results, summaries, conclusions and recommendations for numerical and physical modeling of similar tasks.
KEY WORDS	free convection, ribbing, sensitivity analysis, heat transfer, radiation, CFD, container

Obsah

1	Úvod.....	13
2	Jaderné palivo.....	13
2.1	Palivový cyklus.....	13
2.1.1	Uran a jeho těžba.....	14
2.1.2	Mletí a další zpracování	14
2.1.3	Obohacení.....	15
2.1.4	Výroba paliva	16
2.1.5	Energetické využití.....	16
2.1.6	Vyhořelé palivo	17
2.2	RADIOAKTIVNÍ ODPADY	18
2.2.1	Nízkoaktivní odpad (NAO).....	19
2.2.2	Středněaktivní odpad (SAO).....	19
2.2.3	Vysokoaktivní odpad (VAO)	19
2.3	JEDNOTLIVÉ MOŽNOSTI ULOŽENÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU	20
2.3.1	Povrchová a podpovrchová úložiště.....	21
2.3.2	Hlubinné geologické úložiště	21
2.3.3	Hlubinné vrty.....	22
2.3.4	Další nápady na likvidaci	22
2.4	MOŽNOSTI SKLADOVÁNÍ	22
2.4.1	Mokrý metoda skladování - Bazény skladování	23
2.4.2	Suchá metoda skladování	23
2.4.3	Betonová síla	24
2.4.4	Kovové a betonové kontejnery.....	25
2.5	Popis kontejneru OS ŠKODA 440/84 a OS ŠKODA 1000/19	25
2.5.1	Kontejnery CASTOR®	25
2.5.2	Konstrukce CASTOR 440/84M a OS ŠKODA 440/84	26
2.5.3	Kontejner CASTOR 1000/19 a OS ŠKODA 1000/19 pro JETE.....	27
2.6	Skladování a ukládání jaderného odpadu v ČR.....	28
2.6.1	Ukládání nízko a středně aktivních odpadů	28
2.6.2	Ukládání vysokoaktivních odpadů	28
2.6.3	Sklady RAO	29
3	Teorie přestupu tepla.....	32
3.1	Vedení tepla.....	32

3.1.1	Teplota a tepelný tok	32
3.1.2	Fourierův zákon.....	32
3.1.3	Tepelná vodivost látek	33
3.1.4	Tepelná bilance	34
3.1.5	Okrajové podmínky.....	35
3.1.6	Stacionární vedení tepla válcovou stěnou	35
3.1.7	Teorie podobnosti.....	36
3.2	Sdílení tepla prouděním.....	36
3.2.1	Volná konvekce.....	37
3.3	Sálání	37
3.3.1	Emisivita.....	40
4	Praktická část.....	41
4.1	Popis úlohy	41
4.1.1	Geometrie a zjednodušení.	41
4.1.2	Síť.....	43
4.1.3	Nastavení výpočtu	45
4.1.4	Výsledky výchozí simulace.....	47
4.2	Citlivostní analýza	48
4.2.1	Vliv turbulentních a radiačních modelů	48
4.2.2	Vliv emisivity žeber a okolí	49
4.2.3	Vliv vlastností materiálů použitých v modelu.....	50
4.2.4	Vliv parametrů sítě	51
4.2.5	Vliv příkonu	52
4.3	Vyhodnocení citlivostní analýzy	53
4.4	Zkoumání vlivu dalších parametrů	55
4.4.1	Reálné provedení izolace	58
4.5	Upravený model	59
4.5.1	Síť.....	60
4.5.2	Nastavení výpočtu	61
4.5.3	Výsledky.....	62
4.5.4	Grafický výstup upraveného modelu	63
5	Doporučení pro úlohy podobného typu.....	66
6	Závěr.....	66
7	Bibliografie.....	68

Přehled použitých zkratk

ISL	In Situ Leach
JE	Jaderná elektrárna
JEDU	Jaderná elektrárna Dukovany
JETE	Jaderná elektrárna Temelín
AZ	Aktivní zóna
BWR	Boiling water reactor
PWR	Pressurized water reactor
LWR	Light water reactor
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
MOX	Mixed oxide fuel
NAO	Nízkoaktivní odpad
SAO	Středněaktivní odpad
VAO	Vysokoaktivní odpad
RAO	Radioaktivní odpad
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SUJB	Státní úřad jaderné bezpečnosti
PS	Palivový soubor
OS	Obalový soubor
SW	Software
t TK	Tun těžkých kovů
EU	Evropská unie
EBBT	External Black Body Temperature

Seznam použitých symbolů a veličin

λ	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
λ	$[-]$	Vlnová délka
α	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla
τ	$[\text{s}]$	Čas
ε	$[-]$	Emisivita
ρ	$[\text{kgm}^{-3}]$	Měrná hmotnost
φ	$[\text{°}]$	Obecný úhel
∇	$[-]$	Operátor nabla
σ_0	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$	Konstanta sálání dokonale černého tělesa
k	$[-]$	Boltzmannova konstanta
c	$[\text{kms}^{-1}]$	Rychlost světla ve vakuu
h	$[-]$	Planckova konstanta
e_τ	$[\text{Wm}^{-1}]$	Intenzita vyzařování

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Palivový cyklus a jeho jednotlivé etapy [1].....	14
Obr. 2-2 Schéma zpracování uranové rudy [1]	15
Obr. 2-3 Schéma procesu výroby paliva pro reaktory [3] [4] [5] [6].....	16
Obr. 2-4 Složení jaderného paliva před a po energetickém využití [7].....	17
Obr. 2-5 Dávky ekvivalentního záření [9]	18
Obr. 2-6 Složení VAO [10].....	20
Obr. 2-7 Schéma podpovrchového uložení [11].....	21
Obr. 2-8 Přehled povrchových a podpovrchových uložení [12].....	22
Obr. 2-9 Schéma rozdělení metod suchého skladování [14].....	24
Obr. 2-10 Schéma systému suchého typu skladování NUHOMS [18].....	25
Obr. 2-11 Vzhled CASTOR 440/84 [21]	27
Obr. 2-12 Vzhled kontejneru CASTOR 1000/19 [21]	28
Obr. 2-13 MSVP Dukovany [24]	30
Obr. 2-14 Sklad VJP v Temelíně [24].....	31
Obr. 3-1 Závislost tepelné vodivosti některých kovů na teplotě.....	34
Obr. 3-2 Závislost intenzity záření na vlnové délce [25]	39
Obr. 3-3 Intenzita záření pro různé zářiče [29]	40
Obr. 4-1 Fotografie reálného provedení experimentu	41
Obr. 4-2 Detail žebra na poskytnutém modelu	42
Obr. 4-3 Výchozí 3D model výpočetní domény	43
Obr. 4-4 Výchozí povrchová síť.....	44
Obr. 4-5 Detail buněk výchozího modelu na žebrech	45
Obr. 4-6 Schéma rozmístění termočlánků.....	47
Obr. 4-7 Porovnání výsledků s experimentem	47
Obr. 4-8 Vliv turbulentních a radiačních modelů	48
Obr. 4-9 Vliv emisivity žeber.....	49
Obr. 4-10 Vliv emisivity okolí	50
Obr. 4-11 Vliv vlastností materiálů.....	50
Obr. 4-12 Vliv sítě.....	51
Obr. 4-13 Vliv příkonu.....	52
Obr. 4-14 Upravený model pro zkoumání vlivu izolace	53
Obr. 4-15 Graf průběhu teplot na žebrech.....	54
Obr. 4-16 Fotografie z termokamery.....	56

Obr. 4-17 Vliv teploty okolí.....	56
Obr. 4-18 Vliv rozvrstvení	57
Obr. 4-19 Fotografie reálného provedení izolace.....	58
Obr. 4-20 3D model upraveného návrhu.....	59
Obr. 4-21 Detail provedení stolu a izolace upraveného modelu	59
Obr. 4-22 Polyhedrální síť upraveného modelu	60
Obr. 4-23 Detail žebra s mezní vrstvou upraveného modelu.....	61
Obr. 4-24 Ukázka teplotního profilu s vloženým obrysem 3D modelu	62
Obr. 4-25 Výsledný průběh teplot.....	63
Obr. 4-26 Proudnice v okolí žebra	63
Obr. 4-27 Teplotní pole upraveného modelu	64
Obr. 4-28 Teplota na povrchu stolu	64
Obr. 4-29 Graf teploty skrz žebra [°C].....	65
Obr. 4-30 Graf teploty skrz kontejner [°C]	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 Velikosti buněk výchozího modelu (hodnoty v [mm]).....	43
Tabulka 2 Vlastnosti materiálů použitých při experimentu	45
Tabulka 3 Vlastnosti materiálu kontejneru	46
Tabulka 4 Vlastnosti vzduchu	46
Tabulka 5 Parametry sítí pro „mesh independence study“	52
Tabulka 6 Získané velikosti jednotlivých oblastí.....	52

Seznam příloh

PŘÍLOHA č. 1 Výkres Ae 33343 S - Segment kontejneru	i
PŘÍLOHA č. 2 Rozmístění termočlánků.....	ii
PŘÍLOHA č. 3 Grafický výstup z upraveného modelu	iii

1 Úvod

Teoretická fyzika představuje nástroj k popisu přírodních jevů a na základě získaných poznatků jsme pak schopni porozumět problematice sledovaných jevů a využít takto získaných znalostí k vlastním účelům.

Jinak tomu není ani v případě jaderných procesů objevených z pohledu historie fyziky poměrně nedávno. Dne 2. prosince 2022 tomu bylo přesně 80 let ode dne, kdy tým pod vedením Enrica Fermiho spustil prvním člověkem vytvořený jaderný reaktor schopný udržení štěpné řetězové reakce a o devět let později, 20. prosince 1951, byla pomocí jaderné energie poprvé vyrobena elektřina.

Jaderným štěpením a jadernou přeměnou vzniká mj. teplo, právě čehož využívají jaderné elektrárny k výrobě elektřiny. Nevýhodou však je, že tento proces generování tepla nelze jednoduše zastavit a vzniká tzv. zbytkové teplo. Palivo vyvezené z reaktoru tedy dále funguje jako zdroj tepla a z bezpečnostních důvodů je nutné jej chladit, aby se předešlo jeho přehřátí, dokud úroveň zbytkového tepla neklesne pod bezpečnou mez.

Z fyzikálního i inženýrského pohledu je odvod či sdílení tepla komplexním tématem zahrnujícím jak samotné termodynamické procesy, tak i vliv materiálů nebo geometrie jednotlivých úloh.

Tématem této práce je právě zkoumání, popis a modelování sdílení tepla u kontejneru na vyhořelé palivo včetně identifikace a kvantifikace různých parametrů, mající vliv na chlazení kontejneru pomocí přirozené konvekce. Součástí je i rešerše různých typů skladování a samotný proces výroby, využití a dalšího zpracování jaderného paliva.

Sdílení tepla bylo počítáno pomocí CFD softwaru Ansys Fluent a pro validaci výpočtů sloužil experiment provedený ve Škodě JS na segmentu stěny reálného kontejneru na vyhořelé palivo.

2 Jaderné palivo

2.1 Palivový cyklus

Palivový cyklus je série industriálních procesů spojených s produkcí elektrické energie z jaderného paliva. Začíná těžbou rudy a končí konečným vypořádáním se s jaderným odpadem.

Pro případ uranu¹ se příprava jaderného paliva skládá z těžby, mletí, konverze a dalšího zpracování rudy případně i obohacení. Konečným krokem² přípravy paliva pro energetický reaktor je výroba palivových pelet. Tato část cyklu se nazývá přední část palivového cyklu.

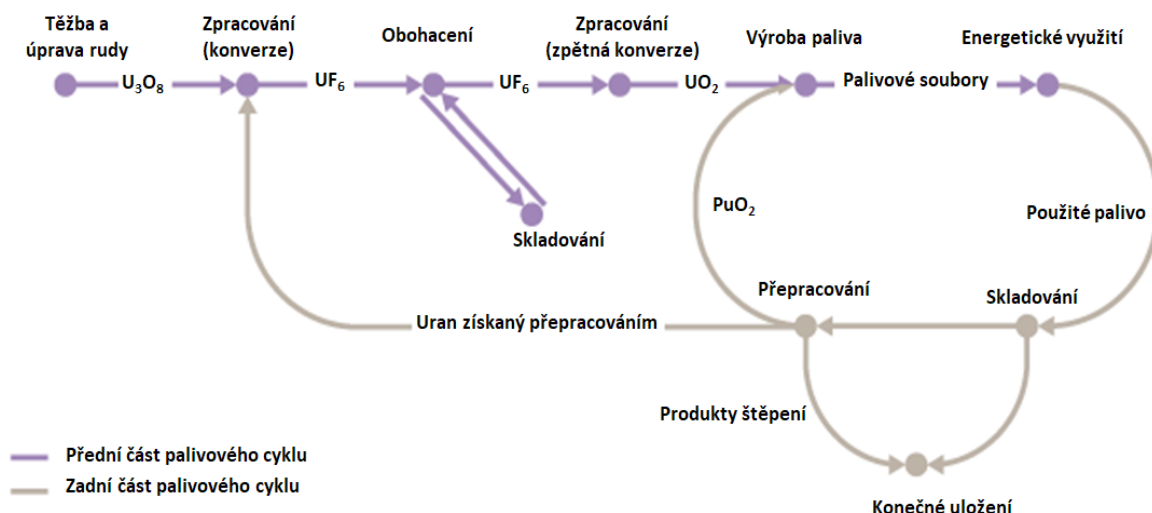
Poté následuje činná část palivového cyklu, kdy je palivo vloženo do reaktoru pro energetické využití. V reaktoru je palivo několik let v závislosti na délce palivové kampaně.

Na konci palivové kampaně je vyvezeno z reaktoru a převezeno nejprve do bazénu skladování, z důvodu nutného odvodu zbytkového tepla a následně do dočasného skladu vyhořelého paliva. Palivový cyklus končí buď přepracováním a recyklací paliva (uzavřený

¹ Palivo pro jaderné reaktory lze vyrábět i z přírodně se vyskytujícího thoria, který má odlišný palivový cyklus [36].

² Dalším způsobem výroby jaderného paliva pro energetické reaktory je přepracování jaderného materiálu ze zbraní. Tomuto způsobu se tato práce dále nevěnuje [37].

palivový cyklus) nebo uložením do konečného úložiště (otevřený palivový cyklus). Tato část se nazývá zadní část palivového cyklu.



Obr. 2-1 Palivový cyklus a jeho jednotlivé etapy [1]

2.1.1 Uran a jeho těžba

Uran je mírně radioaktivní kov vyskytující se na Zemi v různých podobách (horninách). Pro těžbu se využívá oblastí s tak vysokou koncentrací uranu, která dává ekonomický smysl pro jeho extrakci.

Rozhodnutí o způsobu těžby uranu závisí na jeho způsobu výskytu v přírodní formě a na bezpečnostních a ekonomických hlediscích. Využívá se jak povrchová, tak podpovrchová těžba. Podpovrchová těžba se používá typicky při těžbě z ložisek v hloubce větších než 120 m. Při tomto způsobu je třeba speciálních opatření, zejména zvýšené intenzity ventilace, pro ochranu proti koncentraci radioaktivity ve vzduchu.

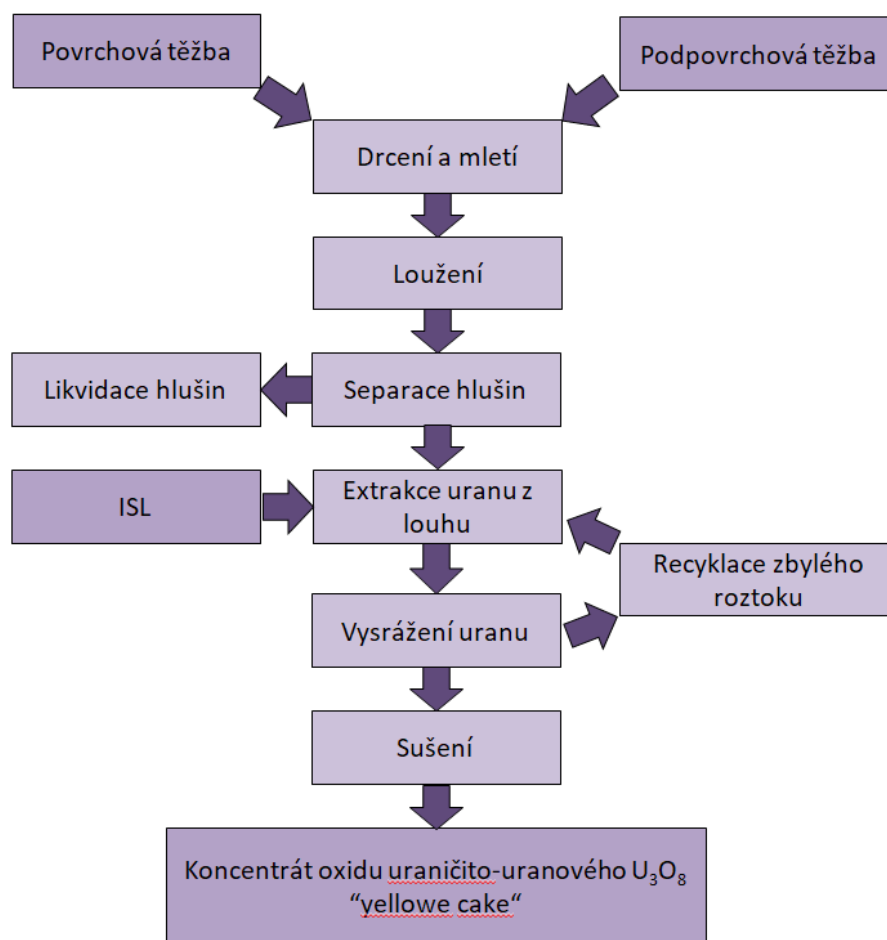
Rostoucím způsobem těžby se v posledních letech stává chemická těžba uranu louhováním (angl. In Situ Leach – ISL), kdy okysličená voda proudí skrz porézní rudu. Nízká koncentrace kyseliny ve vodě rozpouští uran, který je následně společně s roztokem vyčerpán z ložiska. Uran lze také získat extrakcí z mořské vody [2].

2.1.2 Mletí a další zpracování

Nejdříve je ruda rozdrčena a namleta a poté vylouhována v roztoku kyseliny sírové. Účel drcení a následného mletí je zvýšení celkového povrchu a tím i zvýšení výtěžku chemické reakce. Roztok kyseliny sírové separuje uran z rudy tím, že jej v sobě rozpustí. Poté se z roztoku separují hlušiny nejčastěji usazováním a následně pomocí filtrace. Z kapalného roztoku se poté vysráží koncentrovaný oxid uranu U_3O_8 nazývaný též jako „yellow cake“. V tomto stavu je hmotnost koncentráту složena z více než 80 % uranem.

Zbytky rud z procesu obsahují většinu původní radioaktivity, protože původní ruda byla radioaktivní hlavně díky izotopům vzniklým z rozpadu přírodního uranu a proto je třeba tyto zbytky bezpečně izolovat a uložit (nejčastěji v blízkosti dolu).

V případě ISL odpadá proces drcení, mletí a následného vypořádání se se zbytky rud.



Obr. 2-2 Schéma zpracování uranové rudy [1]

2.1.3 Obohacení

K udržení štěpné řetězové reakce je potřeba izotop, který dokáže zachytit neutron a poté se rozštěpit za vzniku dostatečného počtu dalších neutronů, které zajistí pokračování štěpné řetězové reakce. Přírodní uran obsahuje přibližně 99,3 % izotopu ^{238}U , zbylých 0,7 % je ^{235}U , který je schopný štěpné řetězové reakce³. Pro většinu dnes provozovaných energetických reaktorů je třeba koncentraci ^{235}U zvýšit typicky na hodnotu 3,5 – 5 %. Proces obohacení uranu vyžaduje, aby byl uran ve formě plynu. Tohoto stavu se docílí tím, že se U_3O_8 konvertuje na UO_2 ze kterého se plyn stane konverzí na fluorid uranový UF_6 , který je v plynném stavu při relativně nízkých hodnotách teploty a tlaku (trojný bod UF_6 : 64 °C a 1,5 bar).

Hlavním způsobem obohacování uranu je pomocí víceetapových odstředivých centrifug, které využívají nepatrného rozdílu mezi hmotností molekuly UF_6 s izotopem ^{235}U a ^{238}U . Těžší molekuly se koncentrují dále od osy rotace centrifugy a lehčí blíže k ose rotace, odkud se odsává plyn o vyšší koncentraci ^{235}U . Produktem je obohacený koncentrát UF_6 , který je zpětně konvertován na UO_2 .

³ Mezi další primární izotopy schopné udržet řetězovou reakci patří i ^{233}U a ^{239}Pu . Izotop ^{233}U vzniká jadernou přeměnou při zachytu neutronu v ^{232}Th . ^{239}Pu vzniká zachytem neutronu v ^{238}U a následnou jadernou přeměnou [35].

Dalšími méně používanými způsoby jsou difúzní nebo laserové obohacování.

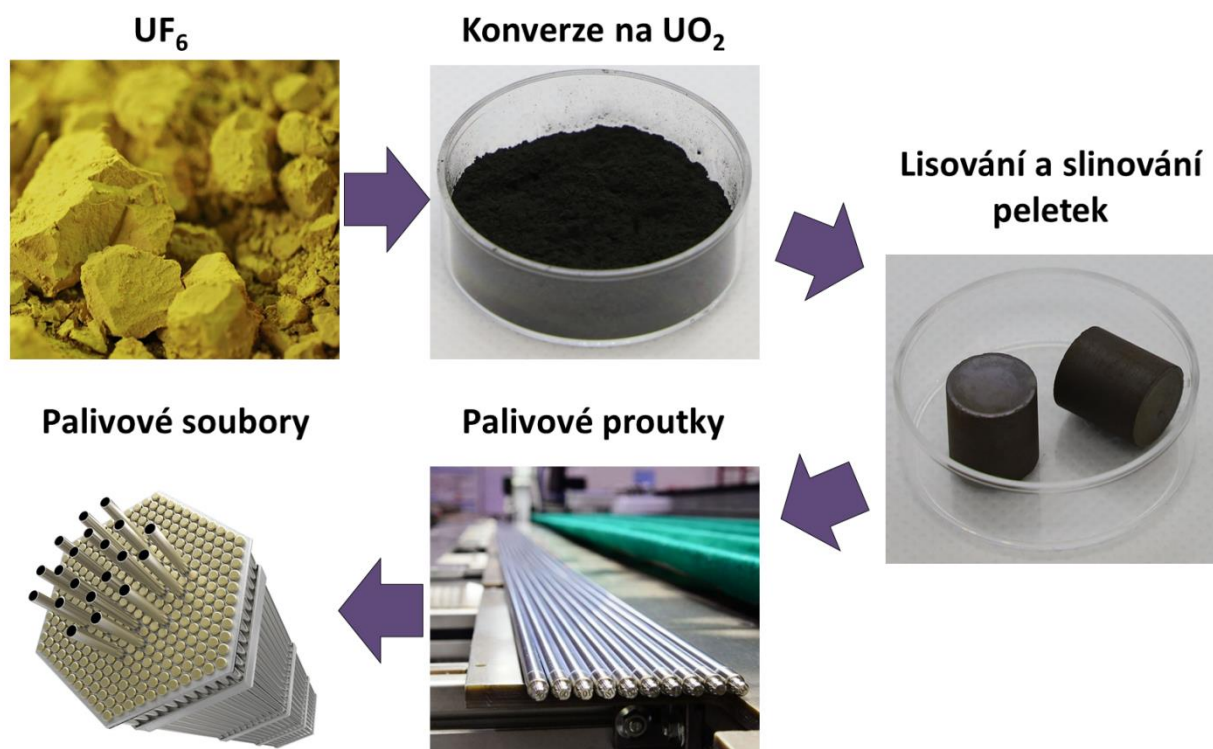
Proces obohacování uranu vede k výrobě uranu značně ochuzeného o izotop ^{235}U . Malá množství tohoto materiálu se používají v aplikacích, kde jsou vyžadovány jeho charakteristiky s velmi vysokou hustotou, například v municích nebo i jako radiační stínění. I když ^{238}U není štěpný, jedná se o radioaktivní materiál s nízkou aktivitou, a proto je třeba při jeho skladování nebo likvidaci přijmout určitá bezpečnostní opatření.

Některé typy reaktorů jako například CANDU jsou designovány na palivo z přírodního (neobohaceného) uranu.

2.1.4 Výroba paliva

Palivo pro energetický reaktor je většinou ve formě keramických pelet vzniklých lisováním a slinováním prášku UO_2 při teplotách přes $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Následně jsou pelety naskládány do kovových trubek, které tvoří pokrytí paliva. V této formě tvoří palivo palivové proutky, které se skládají do palivových souborů.

V závislosti na obohacení paliva je nutné při zpracování uvažovat bezpečnostní hledisko nedosažení kritického stavu paliva, při kterém by došlo ke spontánní nekontrolovatelné štěpné řetězové reakci.



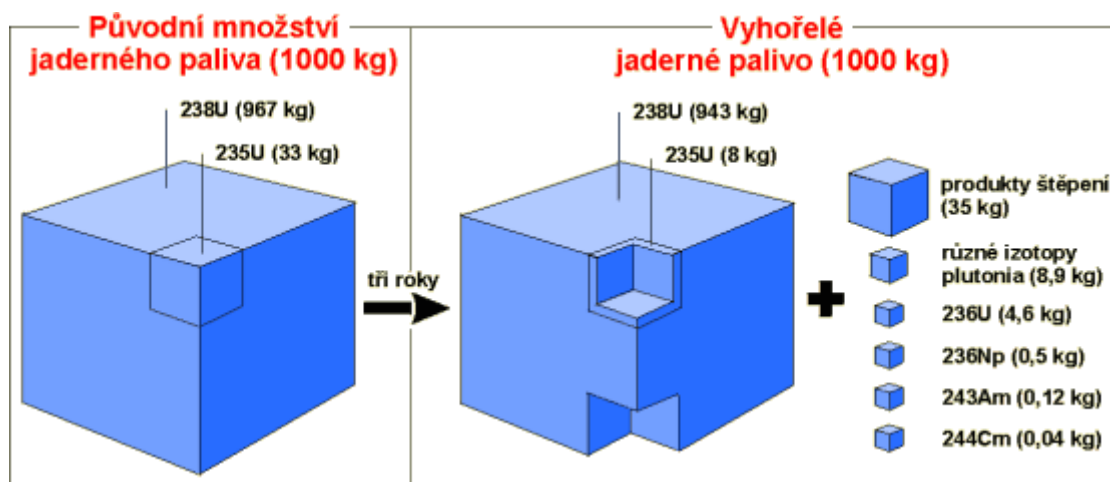
Obr. 2-3 Schéma procesu výroby paliva pro reaktory [3] [4] [5] [6]

2.1.5 Energetické využití

Několik stovek palivových souborů je zavezeno a seskládáno v reaktoru, kde tvoří společně s moderátorem a chladičem aktivní zónu (AZ) reaktoru. Díky štěpné řetězové reakci, při níž se mění hmota na tepelnou energii, se postupně mění chemické i izotopické složení paliva a klesá koncentrace ^{235}U , vznikají izotopy různých produktů štěpení a záchytem neutronu v uranu vznikají izotopy Pu a jiných minoritních aktinidů. Tento proces nazýváme vyhořívání a doba, po kterou se palivo nachází v reaktoru, se nazývá palivová kampaň. Během palivové

kampaně se palivo přesouvá kvůli optimalizaci rozložení výkonu v aktivní zóně a také kvůli snížení dávky neutronového toku na nádobu.

U reaktorů s nekontinuální výměnou paliva (např. BWR a PWR/VVER) se palivo překládá a část se mění při periodických odstávkách.



Obr. 2-4 Složení jaderného paliva před a po energetickém využití [7]

2.1.6 Vyhořelé palivo

Po vyvezení z reaktoru je díky rozpadu produktů štěpení palivo silně radioaktivní a produkuje zbytkové teplo. Proto je bezprostředně po vyvezení⁴ vloženo do bazénů vyhořelého paliva poblíž reaktoru, odkud se kontinuálně odvádí zbytkové teplo a který je odstíněn od okolí. Po několika letech, za které se úroveň radioaktivity snížila, je možné palivo přemístit do dočasného skladu nejčastěji v areálu elektrárny nebo centrálního dočasného skladu. Takto uskladněné palivo je možné převézt do závodu na přepracování, kde se recykluje - separují se použitelné izotopy ^{235}U , ^{238}U a ^{239}Pu od produktů štěpení a minoritních aktinidů – čímž se palivový cyklus uzavře. Palivo vzniklé z recyklovaného paliva se nazývá MOX (mixed oxide fuel), protože vyhořelé palivo obsahuje kromě cca 1 % ^{235}U i značné množství (přibližně 1 %) ^{239}Pu vzniklého záchytem rychlého neutronu v ^{238}U ⁵.

Kromě uvedeného využití ^{238}U (viz kapitola 2.1.3) není ^{238}U v palivovém cyklu pro konvenční energetické reaktory použitelný. V rychlém reaktoru se však jeho schopnosti zachytit neutron a přeměnit se na ^{239}Pu využívá a proto je pro tento typ reaktoru primárním palivem.

V současné době nejsou v provozu žádná úložiště (na rozdíl od skladovacích zařízení), do kterých by bylo možné ukládat vyhořelé palivo určené k přepracování a odpady z přepracování. V obou případech je materiál skladován v pevné, stabilní formě odpadu. Zároveň neexistuje naléhavá logistická potřeba zřizovat konečná úložiště, protože celkový objem takového odpadu je relativně malý. Dále platí, že čím déle je skladováno, tím snazší je další manipulace z důvodu klesající radioaktivity. O potřebě konečného uložení vyhořelého paliva se stále vedou diskuze, protože představuje významný energetický zdroj, který by bylo možné později přepracovat a umožnit recyklaci uranu a plutonia. Řada zemí provádí studie s cílem určit optimální přístup k likvidaci vyhořelého paliva a odpadu z přepracování [1].

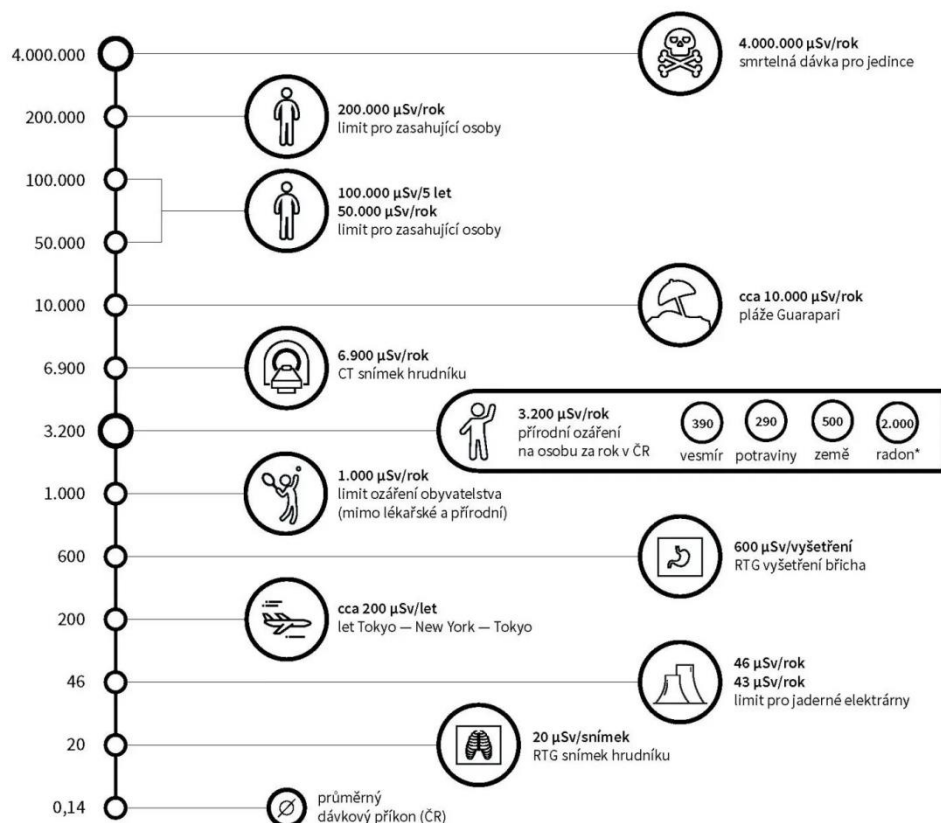
⁴ Vyvezením se rozumí opuštění oblasti AZ. Přemístění mezi reaktorem a bazénem skladování vedle reaktoru dochází pod vodou, která slouží jako stínění a médium pro odvod tepla.

⁵ ^{239}Pu se díky schopnosti štěpné řetězové reakce z části podílí na celkovém výkonu reaktoru [34].

2.2 RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Radioaktivní odpad (RAO) zahrnuje jakýkoli materiál bez dalšího použití, který je buď vnitřně radioaktivní, nebo byl radioaktivitou kontaminován. Jednotlivé státy si určují kritéria pro označení těchto materiálů jako odpad. V ČR definuje pojem radioaktivní odpad Atomový zákon (263/2016 Sb.) jako: věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nespĺňuje podmínky stanovené tímto zákonem pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště. Každý radionuklid (nestabilní izotop) má poločas rozpadu – dobu, za kterou se rozpadne polovina jeho atomů, a tedy ztratí polovinu své radioaktivity⁶. Nakonec se veškerý radioaktivní odpad rozpadne na neradioaktivní (stabilní) prvky.

Úroveň radioaktivity vyjadřuje jednotka Becquerel (Bq) udávající počet přeměn v látce (1 Bq = 1 radioaktivní rozpad za sekundu). Radioaktivní přeměnu doprovází radioaktivní záření, které má tři druhy: alfa, beta a gama. Podíl energie radioaktivního záření absorbované hmotou nazýváme absorbovaná dávka a vyjadřuje jí jednotka Grey (Gy). V praxi má ale vyšší využití tzv. ekvivalentní dávka, jejíž jednotka je Sievert (Sv) a která vyjadřuje absorbovanou dávku upravenou na radiační účinnost daného typu záření [8].



Obr. 2-5 Dávky ekvivalentního záření [9]

Radioaktivní odpad z jaderného palivového cyklu je kategorizován jako vysoce-, středně- nebo nízkoaktivní podle úrovně radioaktivity. Tento odpad pochází z mnoha zdrojů a zahrnuje:

⁶ Vztaženo k původnímu množství jednoho izotopu. Rozpadem mohou vzniknout další nestabilní izotopy, a tedy celková radioaktivita sledovaného vzorku klesnout nemusí.

- Nízkoaktivní odpad produkovaný ve všech fázích palivového cyklu.
- Středněaktivní odpad vznikající během provozu v reaktoru a přepracováním.
- Vysokoaktivní odpad, což je odpad obsahující vysoce radioaktivní štěpné produkty oddělené při přepracování, a v mnoha zemích i samotné vyhořelé palivo [9].

2.2.1 Nízkoaktivní odpad (NAO)

Úroveň radioaktivity NAO nepřesahující 4 GBq/t aktivity alfa záření nebo 12 GBq/t aktivity záření beta a gama. NAO nevyžaduje stínění při manipulaci a přepravě a je vhodné pro uložení v podpovrchových zařízeních. NAO je produkován v nemocnicích a průmyslu, stejně jako v jaderném palivovém cyklu. Zahrnuje papíry, látky, nástroje, oděvy, filtry atd., které obsahují malá množství převážně krátkodobé radioaktivity. Aby se zmenšil jeho objem, NAO se před likvidací často zhutňuje nebo spaluje. NAO tvoří přibližně 90 % objemu, ale pouze 1 % radioaktivity veškerého radioaktivního odpadu.

2.2.2 Středněaktivní odpad (SAO)

SAO je radioaktivnější než NAO, ale teplo, které produkuje ($<2 \text{ kW/m}^3$), není dostatečné k tomu, aby bylo zohledněno při návrhu nebo výběru skladovacích a likvidačních zařízení. Vzhledem ke své vyšší úrovni radioaktivity vyžaduje určité stínění. SAO typicky obsahuje pryskyřice, chemické kaly a kovové obaly paliva, stejně jako kontaminované materiály z vyraženého reaktoru z provozu. Menší předměty a jakékoli nepevné částice mohou být zpevněny v betonu nebo bitumenu pro likvidaci. Tvoří asi 7 % objemu a má 4 % radioaktivity veškerého radioaktivního odpadu.

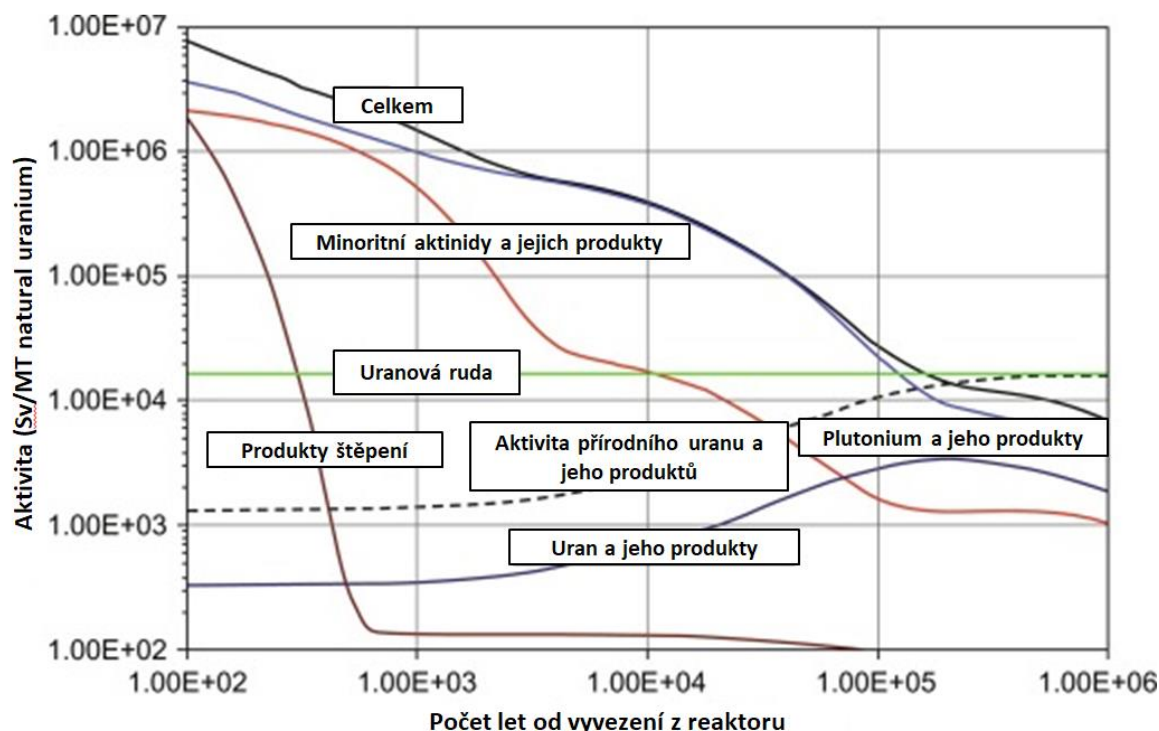
2.2.3 Vysokoaktivní odpad (VAO)

VAO je dostatečně radioaktivní, aby jeho rozpadové teplo ($>2 \text{ kW/m}^3$) výrazně zvýšilo jeho teplotu a teplotu okolí. V důsledku toho VAO vyžaduje chlazení a stínění. Vzniká vyhoříváním uranového paliva v jaderném reaktoru a obsahuje štěpné produkty generované v aktivní zóně reaktoru. VAO tvoří pouze 3 % objemu, ale 95 % celkové radioaktivity produkovaného odpadu. VAO se dále dělí na vyhořelé palivo, které bylo označeno jako odpad a na separovaný odpad z přepracování vyhořelého paliva.

Kapalný vysokoaktivní odpad vzniklý po přepracování lze kalcinovat (silně zahřát) za vzniku suchého prášku, který je zabudován do borosilikátového skla (pyrex), aby jej znehybnil. Sklo je poté možno nalít do nerezových kanystrů (sudů). Ty mohou být snadno přepravovány a skladovány s vhodným stíněním.

Složení VAO lze rozdělit na:

- Zbytky uranu a jeho produkty vzniklé rozpadem.
- Vzniklé plutonium a jeho produkty.
- Minoritní aktinidy a jejich produkty, což jsou všechny ostatní aktinidy vyjma uranu a plutonia jako například ^{241}Am , ^{243}Am , ^{237}Np nebo ^{249}Ca .
- Produkty štěpení, což jsou izotopy vzniklé rozštěpením jader při štěpné reakci jako například ^{137}Cs , ^{129}I , ^{135}Xe nebo ^{149}Sm .



Obr. 2-6 Složení VAO [10]

VAO obsahuje jak složky s dlouhou životností, tak složky s krátkou životností, v závislosti na době, po kterou bude radioaktivita konkrétních radionuklidů klesat na úroveň, které nejsou považovány za nebezpečné pro lidi a okolní prostředí. Pokud lze obecně štěpné produkty s krátkou životností oddělit od aktinidů s dlouhou životností, stává se tento rozdíl důležitým při nakládání s VAO. Na Obr. 2-6 je možná vidět aktivita jednotlivých složek v závislosti na čase od vyjmutí z reaktoru [1].

2.3 JEDNOTLIVÉ MOŽNOSTI ULOŽENÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

Pod pojmem uložení rozumíme konečnou fázi nakládání s radioaktivním odpadem. Hlavní zásadou pro uložení radioaktivních odpadů je zamezení jakékoli možnosti úniku radiace nebo ozáření lidí.

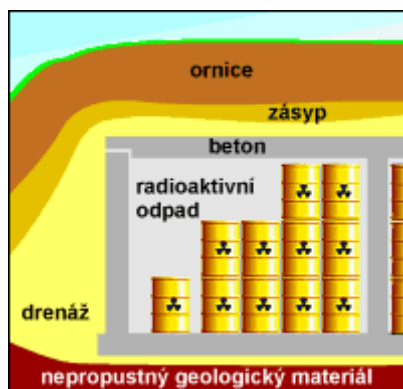
Většina nízkoaktivních radioaktivních odpadů (NAO), který tvoří přibližně 90 % objemu všech druhů odpadů z jaderných technologií, je obvykle odesílána na pozemní úložiště ihned po zpracování pro dlouhodobé uložení. Středně aktivní radioaktivní odpad (SAO), který obsahuje radioizotopy s dlouhou životností, je po zpracování ukládán v geologickém úložišti. Řada zemí likviduje SAO obsahující radioizotopy s krátkým poločasem rozpadu v zařízeních pro blízkopovrchové úložiště, která se používají pro ukládání NAO. Kapalný VAO vznikající při přepracování je vitrifikován ve skle a skladován až do konečného uložení. Konečnou fází nakládání s VAO, tedy dlouhodobé uložení, momentálně nepraktikuje žádná země světa, ovšem mezi nejrozšířenější způsob, který většina zemí plánuje uskutečnit, je hlubinné geologické ukládání.

Kromě hlubinného geologického ukládání bylo zkoumáno mnoho možností, které se snaží poskytnout veřejně přijatelná, bezpečná a ekologicky vhodná řešení konečného nakládání s radioaktivním odpadem. Důraz je kladen na to, jak a kde taková zařízení postavit.

Při zvažování způsobu likvidace je třeba poznamenat, že vhodnost možnosti nebo nápadu závisí na formě, objemu a radioaktivitě odpadu. Pokud by stát neměl možnost konečného vypořádání se s radioaktivním odpadem z důvodu nenalezení vhodného místa k uložení, nebo pokud by vzhledem k objemu radioaktivního odpadu nebylo ekonomicky výhodné takové zařízení vybudovat v dané zemi, má možnost využít nadnárodní uložení v zemi jiné⁷.

2.3.1 Povrchová a podpovrchová úložiště

Tato zařízení jsou na povrchu nebo pod povrchem v hloubce řádově několika metrů nebo několika desítek v případě podpovrchového úložiště v důlních šachtách. V závislosti na jednotlivých oblastech mohou být tato zařízení vybavena odvodněním nebo ventilací. Tento typ zařízení se běžně používá pro nízko a středně aktivní odpady s poločasem rozpadu do 30 let.

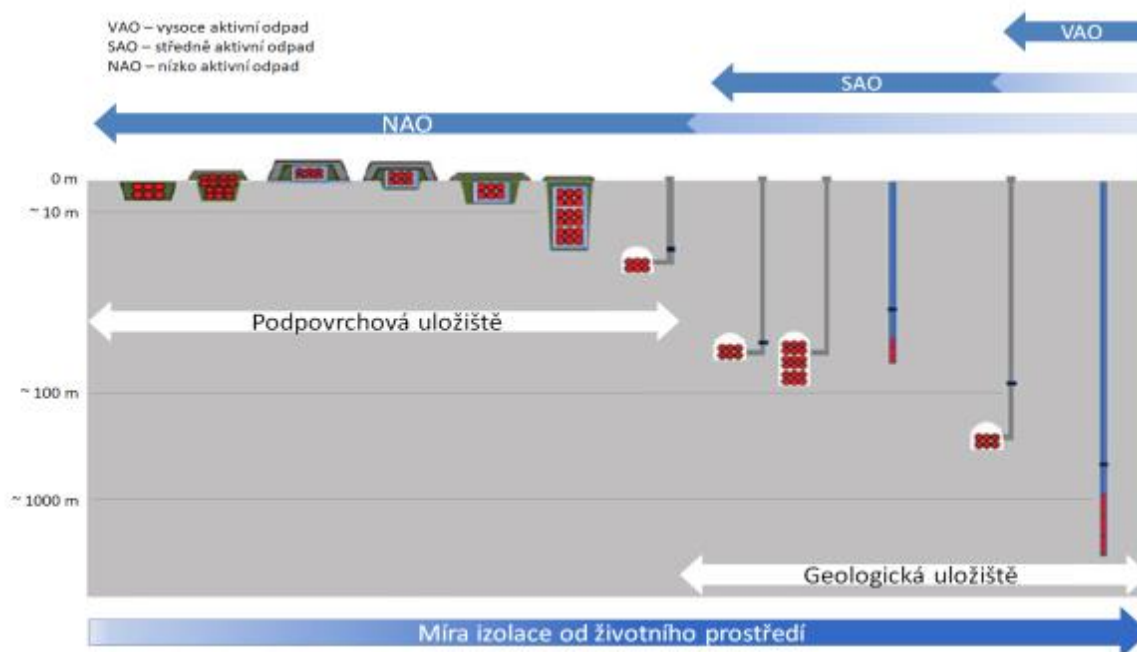


Obr. 2-7 Schéma podpovrchového úložiště [11]

2.3.2 Hlubinné geologické úložiště

Vzhledem k času, po který zůstává radioaktivní odpad aktivní (zejména VAO), se obecně jeví jako nejvhodnější způsob konečného vypořádání se s těmito odpady uložení do hlubinných úložišť, ve kterých by byl odpad bezpečně uložen ve stabilních geologických formacích. Výhodou tohoto přístupu je vypořádání se s odpadem bez předávání nutnosti aktivně se o něj starat dalším generacím. Bariéry proti úniku radiace jsou kombinací jak umělých, tak přírodních vyplývajících z vhodně zvolené geologické oblasti. To je často nazývané multibariérovým konceptem. Výběr materiálů a konstrukce nádob pro odpad se liší v závislosti na odpadu nebo typu okolní horniny. Samotné úložiště by pak sestávalo z povrchového a podpovrchového komplexu, které jsou spojeny přístupovými tunely. Podpovrchový komplex v hloubce mezi 250 a 1000 m by byl tvořen množstvím tunelů, ve kterých by se odpad ukládal a které by byly zpětně zavezeny vhodným materiálem.

⁷ Mezinárodní úložiště je zatím jen konceptuální návrh a takové zařízení nikde neexistuje. V EU byla snaha toto zařízení vybudovat a pro zkoumání a mezinárodní spolupráci v této věci vznikla organizace ERDO.



Obr. 2-8 Přehled povrchových a podpovrchových uložení [12]

2.3.3 Hlubinné vrty

Do kategorie hlubinných geologických uložení patří také koncept hlubinných vrtů. Do jednotlivých vrtů o hloubce až 5000 m by se odpadní nádoby skládaly za sebou oddělené vrstvou izolačního materiálu a zbytek šachty by se zpětně zavezl. Vrty je možné vytvořit i na moři, což značně rozšiřuje okruh míst vhodných pro tento způsob uložení, ovšem u tohoto způsobu není již možné radioaktivní obsah získat zpět.

2.3.4 Další nápady na likvidaci

V minulosti byly zvažovány četné možnosti dlouhodobého nakládání s jaderným odpadem. Mezi příklady patří likvidace odpadu ve vesmíru, uložení do ledovců, roztavení odpadu vlivem vlastní produkce tepla v hornině, uložení na mořské dno nebo rozptýlení v moři. Tyto možnosti byly zkoumány v mnoha zemích jako je USA, Rusko nebo Velká Británie a některé způsoby byly i realizovány, avšak dnes se tyto způsoby uložení nevyužívají z důvodů ekonomičnosti nebo mezinárodních smluv [13] [1].

2.4 MOŽNOSTI SKLADOVÁNÍ

Skladování je na rozdíl od uložení taková fáze v palivovém cyklu, po které následuje další nakládání se skladovaným materiálem.

Při zaměření se na vyhořelé palivo je prvním krokem skladování umožňující snížení úrovně radioaktivity a odvodu tepla, díky čemuž je následná manipulace bezpečnější. To je uskutečňováno v bazénu vedle reaktoru. Dále je vyhořelé palivo skladováno buď mokrou (v bazénech) nebo suchou metodou skladování (dnes nejčastěji v kontejnerech). Tyto sklady mohou být v areálu elektrárny nebo mohou být centrální pro více původců vyhořelého paliva.

V současnosti je asi 65 % vyhořelého paliva skladována mokrou metodou skladování a asi 30 % bylo nebo je určeno k recyklaci [14].

2.4.1 Mokrý metoda skladování - Bazény skladování

Pojmem metoda mokrého skladování referuje na skladování paliva pod hladinou vody. Voda má výhodu v tom, že funguje jako stínění před radiací, ale také jako médium pro odvod tepla, proto je nutné vodu chladit. Palivo je pod vodou skladováno v bazénu skladování vedle reaktoru po dobu nejméně pěti let od jeho vyvezení. PS jsou v bazénech umístěny do košů ze speciálních materiálů (nejčastěji oceli nebo hliníku s příměsí bóru) pohlcujících neutrony. Mokrý metoda je využívána i v meziskladech vyhořelého paliva nejčastěji jako centrální sklad.

Bazény bývají vyztuženy ocelovými pláty a sloupec vody je dostatečně vysoký pro to, aby odstínil radiaci a také aby umožnil manipulaci jednotlivých PS kontinuálně pod hladinou. Důležitým faktorem u této metody je chemické složení vody.

Výhody této metody jsou snadná vizuální kontrola, přístupnost a chlazení. Nevýhodou pak je finanční a technická náročnost výstavby, nutnost aktivního chlazení a jeho bezpečnostní zajištění nebo omezená kapacita [15].

2.4.2 Suchá metoda skladování

Po strávení doby nejčastěji 5-10 let v bazénu vedle reaktoru je vyhořelé palivo možné přemístit do skladovacího zařízení, které zbytkový výkon neodvádí pomocí vody, ale nejčastěji díky přirozené konvekci.

Suchá metoda skladování využívá různé způsoby zajištění bezpečnosti vysokoaktivního odpadu při skladování, ke kterým patří:

Obálka zajišťující odolnost vůči úniku radioaktivních látek do prostředí.

Podkritičnost souborů vycházející z jak z geometrie způsobu uložení souborů do kontejneru, tak použití materiálů se schopností pohlcovat neutrony.

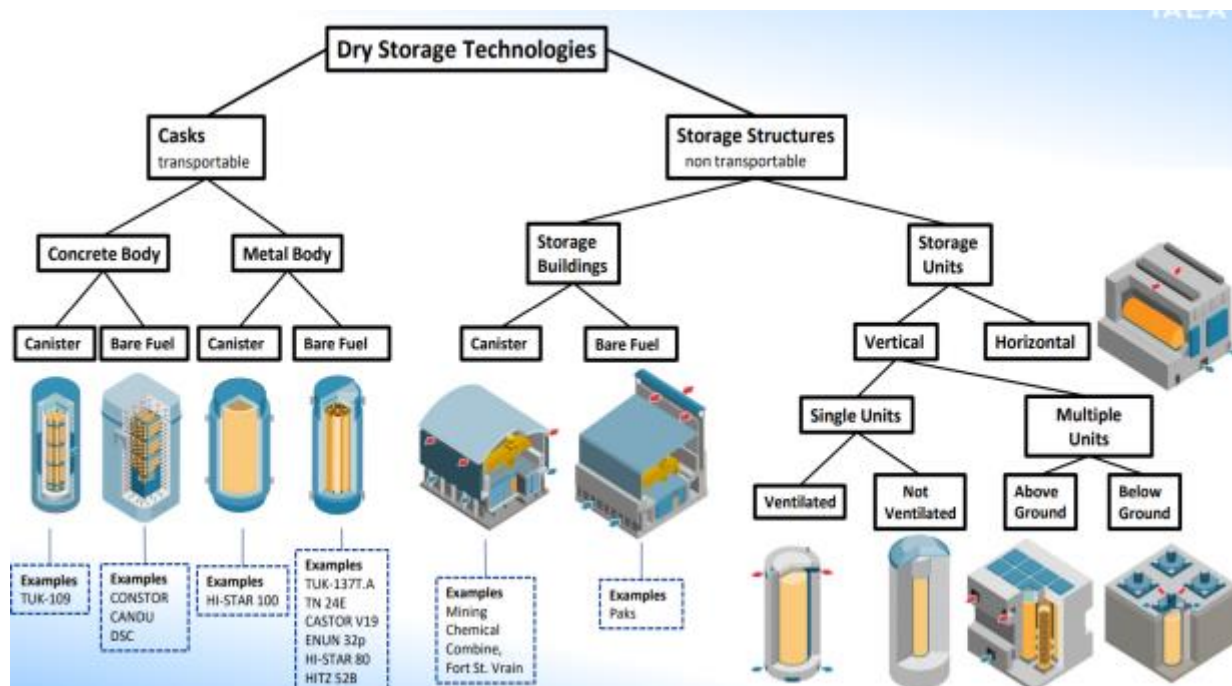
Stínění na úrovni bezpečnostních limitů v okolí skladovacího systému.

Odvod tepla během skladování pasivně nebo aktivně například pomocí ventilátorů. Odvod tepla je důležitý vzhledem k ostatním bezpečnostním vlastnostem skladovacích systémů z důvodu materiálového porušení ať už obálky, vnitřních částí nebo pokrytí paliva což by mohlo mít za následek zhoršení stínících vlastností, kritičnost nebo ztrátu integrity.

Možnost následné manipulace kam patří zejména možnost jaderný odpad vyjmout a dále s ním manipulovat [16].

Během skladování ztrácí vyhořelé palivo svou aktivitu, což může částečně nebo zcela kompenzovat zhoršení některé z výše uvedených vlastností vlivem materiálového stárnutí nebo radiačního poškození. Skladovací systém by měl umožňovat jeho kontrolu pro vyhodnocení, zda je nadále schopen zajišťovat výše uvedené bezpečnostní funkce.

Skladování suchou metodou lze rozdělit na skladování ve víceúčelových kontejnerech, také nazývaných duální, a na skladovací systémy. Ve víceúčelových kontejnerech lze palivo transportovat, skladovat a případně i trvale uložit. Přeprava z mokrého skladování do suchých kontejnerů v areálu elektrárny může využívat speciální stíněné přepravní kontejnery, které jsou méně robustní než ty, které se používají pro přepravu mimo lokalitu. Kontejnery mohou obsahovat zapečetěný kanystr, který lze přenášet z jednoho druhu kontejneru do druhého. Technologie suchého skladování se dělí dle následujícího schématu:

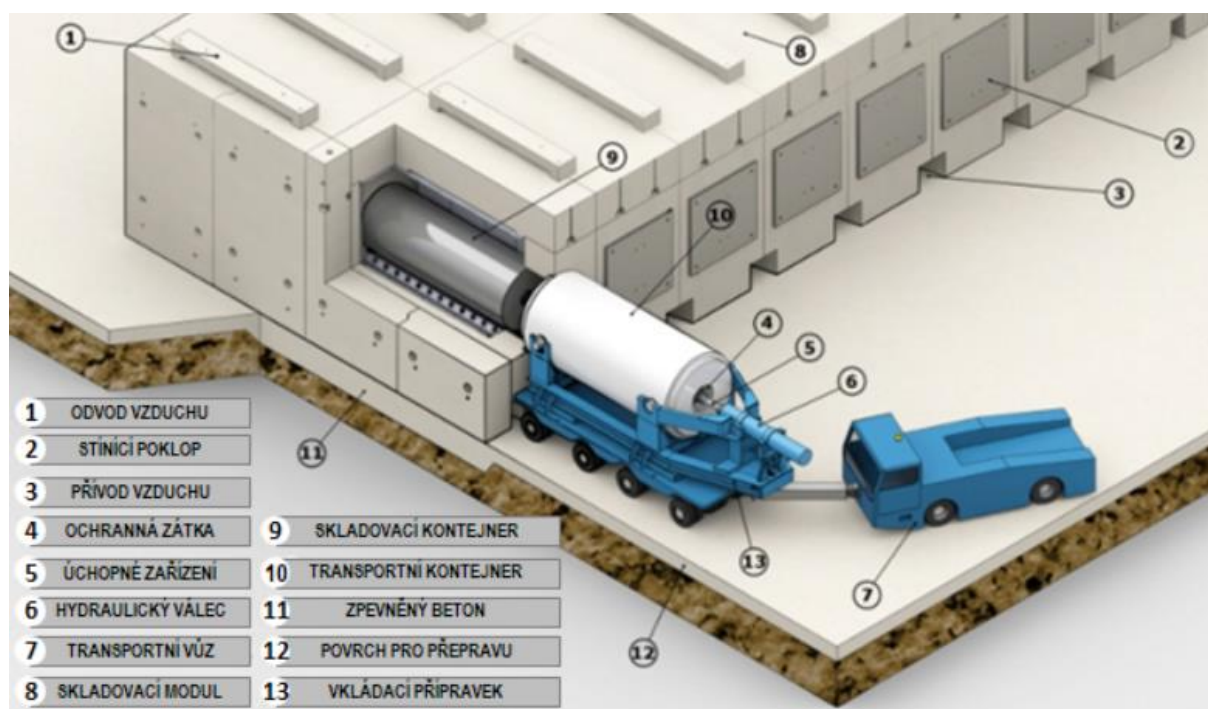


Obr. 2-9 Schéma rozdělení metod suchého skladování [14]

Výhodou suché metody skladování je jednoduché zvýšení kapacity skladu, relativně jednoduchá manipulace a pasivní způsob odvodu zbytkového výkonu. Nevýhodou je horší přístupnost a kontrola stavu vyhořelého paliva [17].

2.4.3 Betonová síla

Technologie pro suché skladování vyhořelého paliva v sílech byla vyvinuta firmou Atomic Energy Canada Limited (AECL) v jejich laboratořích Whiteshell v 70. letech, jejichž prototyp systému byl nasazen v roce 1975. Původní design spoléhá na přirozenou konvekci od betonového stínění, a proto vede k omezenému limitu tepelného zatížení. Pozdější systémy síl (NUHOMS a MACSTOR) obsahují větrací otvory k podpoře odvodu tepla. Technologie se skládá z pevné monolitické nebo modulové železobetonové konstrukce. Beton poskytuje stínění, zatímco skladovací kontejner je zajištěn buď integrální vnitřní kovovou vložkou, která může být utěsněna po naložení paliva, nebo samostatným uzavřeným kovovým kanystrem. Síla mají buď vertikální (CANDU) nebo horizontální orientaci (LWR).



Obr. 2-10 Schéma systému suchého typu skladování NUHOMS [18]

2.4.4 Kovové a betonové kontejnery

Kovové a betonové kontejnery jsou schránky (obalové soubory), do kterých se ukládá vyhořelé palivo pro transport a skladování nebo případnou likvidaci. Jsou to buď silnostěnné nádoby, nebo tenkostěnné nádoby používající samostatný přebal pro účely stínění. Konstrukční materiál kovových kontejnerů může být kovaná ocel, tvárná litina, ocel/olovo nebo kovaný sendvič ocel/pryskyřice/ocel. Betonové sudy jsou betonové či železobetonové konstrukce nebo jsou složeny z tenkostěnného ocelového kanystru, který je pak umístěn uvnitř přebalu (obvykle železobetonový).

Koncepce využití betonového kontejneru pro přepravu, skladování a případnou likvidaci vyhořelého paliva bylo poprvé zkoumáno společností Ontario Hydro (Kanada). Byl proveden demonstrační program v roce 1988 a první komerční systém využívající tuto technologii byl zprovozněn v roce 1996 [19].

2.5 Popis kontejneru OS ŠKODA 440/84 a OS ŠKODA 1000/19

2.5.1 Kontejnery CASTOR®

V České republice jsou provozovány dvě jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory typu VVER 440/213 (JEDU) a VVER 1000/320 (JETE). Oba tyto typy lehkovodních reaktorů jsou provozovány kampaňovým způsobem, kdy se vždy po skončení kampaně, trvající 10 až 11 měsíců, odstaví výrobní blok a provede se plánovaná výměna paliva a revize zařízení. Výměna paliva zahrnuje vyvezení částí vyhořelých PS z AZ, jež mají odpracován požadovaný počet cyklů případně se z důvodů revize vnitřních částí a nádoby reaktoru vyvezou i zbylé PS. Tyto PS jsou přemístěny pod vodou do bazénu skladování vedle, kde stráví 5 až 10 let z důvodu dochlazení v kompaktním roštu. Po uplynutí této doby se PS zavezou pod vodou do OS určených k transportu a skladování [20].

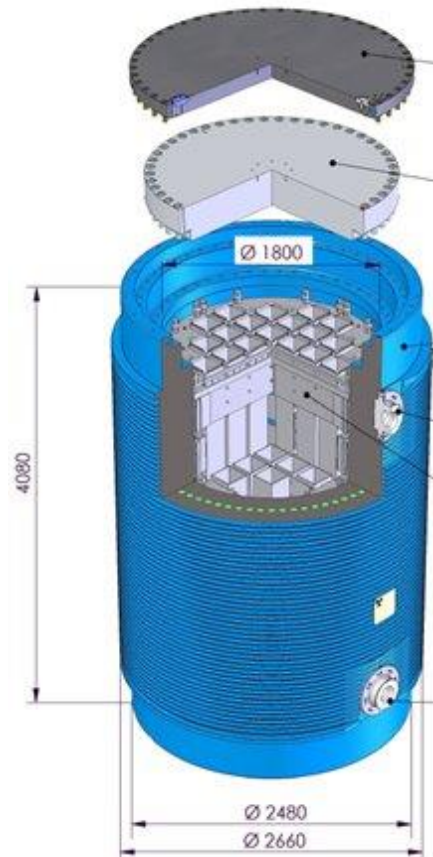
Pro dlouhodobé skladování se v ČR používají dvouúčelové OS typu CASTOR. To znamená, že kontejner, ve kterém jsou PS uzavřeny a odvezeny z bazénu skladování, lze použít po

transportu i na skladování v meziskladech. OS se vyrábí podle německého projektu společnosti GNS mbH Essen a momentálně jsou dodávány od ŠKODY JS. V ČR se používají dvě modifikace OS typu CASTOR. Pro JETE se používá CASTOR 1000/19 respektive OS ŠKODA 1000/19, ve kterém lze skladovat 19 PS. Pro JE Dukovany se používá CASTOR 440/84, respektive OS ŠKODA 440/84, který umožňuje skladovat 84 PS.

2.5.2 Konstrukce CASTOR 440/84M a OS ŠKODA 440/84

Konstrukce sestává z vnějšího monolitického tělesa, které je z tvárné litiny s kuličkovým grafitem (GGG 40) se systémem dvou vík a nosného koše. Na vnitřním povrchu kontejneru je niklový návar z důvodu zlepšení korozní odolnosti. Vnější povrch je opatřen radiálními žebry, která zvětšují plochu pro přestup tepla. Dále je vnější povrch pokryt epoxidovým snadno dekontaminovatelným nátěrem. Primární i sekundární víko se vyrábí z nerezové oceli a jsou opatřeny technologickými otvory, které slouží pro vysušování, plnění inertním plynem, tlakové zkoušky a monitorování tlaku mezi víky. Sekundární víko je překryto ochranným víkem, které plní funkci ochrany před vnějšími vlivy. Na spodní straně sekundárního víka je připevněna stínící vrstva, která je umístěna i ze spodní strany dna, kterou drží uzavírací hliníková deska. Ta zároveň slouží k ochraně dna proti otěru. Uvnitř kontejneru je umístěn nosný koš, který zabezpečuje rozmístění PS, jejich oddělení od ostatních PS a zároveň odvádí zbytkové teplo ke stěně OS. Z 85 pozic se PS nachází v 84., centrální hexagonální trubka zůstává volná. Ze strany jsou přišroubovány k OS dva páry nosných čepů pro horizontální a vertikální manipulaci a převoz [15] [21].

V roce 2021 dodala ŠKODA JS první kontejner vlastního designu OS ŠKODA 440/84 pro JEDU. Kontejner byl ve ŠKODĚ JS kompletně vyvinutý a vyrobený. Do roku 2048 bude dodáno na JEDU celkem 91 ks těchto OS [22].



Obr. 2-11 Vzhled CASTOR 440/84⁸ [21]

2.5.3 Kontejner CASTOR 1000/19 a OS ŠKODA 1000/19 pro JETE

Tento typ kontejneru byl vyvinut pro palivo TVSA-T pro JETE. Kontejner je koncipován jako masivní tlustostěnná litinová nádoba, v níž je umístěn koš se šestiúhelníkovými pouzdry pro zasunutí palivových kazet. Primární víko je opatřeno otvorem pro vyčerpávání vody, plnění inertním plynem a diagnostické prvky. Koš je koncipován pro 19 palivových soubor TVSA-T. Kontejner je vybaven systémem uzavírání několika víky, kdy mezi primárním a sekundárním víkem je umístěno stínění. Sekundární víko je ještě překryto krycím víkem. Tělo kontejneru je opatřeno žebry pro zvětšení plochy pro přestup tepla do proudícího vzduchu. Kontejner váží 119 t a je přes 5 m vysoký [23].

Na konci roku 2018 byl dodán první kontejner OS ŠKODA 1000/19 dle designu ŠKODA JS na vyhořelé palivo na JETE. Celkově bude dodáno na JE Temelín 58 ks do roku 2035 [22].

⁸ Čtvercový vnitřní koš je pro palivo západního typu. Na českých jaderných elektrárnách je kontejner vybaven šestihranným košem.



Obr. 2-12 Vzhled kontejneru CASTOR 1000/19 [21]

2.6 Skladování a ukládání jaderného odpadu v ČR

Za bezpečné ukládání všech radioaktivních odpadů v České republice je zodpovědný stát. Na základě původního atomového zákona (zákon č. 18/1997 Sb.) byl bezpečný provoz úložišť a ukládání radioaktivních odpadů svěřen Správě úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Od roku 2001 je Správa organizační složkou státu, jejíž činnosti jsou financované z prostředků jaderného účtu, na který přispívají dle zákona původci radioaktivních odpadů a který spravuje Ministerstvo financí. SÚRAO také koordinuje všechny práce směřující k přípravě a samotné stavbě hlubinného úložiště VAO v ČR.

2.6.1 Ukládání nízko a středně aktivních odpadů

RAO je třeba před uložením roztřídit a zpracovat tak, aby bylo možné jej bezpečně oddělit od životního prostředí na dostatečně dlouhou dobu. Pevné odpady mohou být lisovány, kapalné odpady je nutné zahustit a zpevnit vhodným ztužidlem (cement, bitumen, aluminosilikát, skelná matrice) podle typu odpadu. Odpady z provozu jaderných elektráren jsou většinou zpevněny zamícháním do bitumenu a v nerezovém sudu uloženy v dukovanském úložišti. Institucionální odpady jsou obvykle zabetonovány do sudu o objemu 100 litrů, který je vložen do 216 litrového sudu. Prostor mezi oběma nádobami je vyplněn betonem, sud je uzavřen víkem, natřen protikorozním nátěrem a putuje do úložiště Richard nebo Bratrství. V obou případech finální podobu nazýváme obalovým souborem.

2.6.2 Ukládání vysokoaktivních odpadů

Na základě dlouhodobého vývoje byl navržen multibariérový koncept. Jeho základní bariérou je ukládací obalový soubor, další bariérou jsou nepropustné materiály s těsnicí a tlumící funkcí (buffer) a třetí bariéru tvoří stabilní horninové prostředí cca 500 metrů pod povrchem

země. V České republice je v současné době vyhořelé jaderné palivo skladováno v meziskladech přímo v areálu jaderných elektráren [9].

V souladu s koncepcí nakládání s RAO a vyhořelého jaderného paliva z roku 2002 se v ČR předpokládá vybudování hlubinného úložiště (HÚ). Program jeho vývoje byl zahájen již v roce 1992. Budoucí hlubinné úložiště přijme všechny RAO, který nelze uložit do přípovrchových úložišť a vyhořelého paliva po jeho prohlášení za radioaktivní odpad. Zahájení provozu HÚ se předpokládá kolem roku 2065⁹.

V současnosti se v ČR nachází tři aktivně provozované a jedno zavřené úložiště radioaktivních odpadů.

ÚRAO Dukovany (od roku 1995) v areálu JE Dukovany sloužící pro ukládání upraveného RAO z jaderné energetiky. Případnému úniku radionuklidů do biosféry zabraňuje soustava bariér s dlouhodobou životností. Celkový objem úložných prostor 55 000 m³ je dostatečný k přijetí všeho RAO ze stávajících bloků JE Dukovany i JE Temelín, které splní podmínky přijatelnosti pro uložení, a to i v případě prodloužení jejich provozu na 60 let.

Od roku 2005 je do ÚRAO Dukovany možno ukládat i omezené množství institucionálního odpadu zpracovaného v ÚJV Řež, a. s.

ÚRAO Richard (od roku 1964) v komplexu bývalého vápencového dolu Richard II sloužící pro ukládání zejména institucionálního odpadu (RAO pocházející z užití radioizotopů ve zdravotnictví, průmyslu a výzkumu). Jedná se zejména o použité uzavřené radionuklidové zářiče, shromážděné zdroje z požárních hlásičů a jaderné materiály, které splňují podmínky pro uložení. Úložiště je v provozu od roku 1964.

ÚRAO Bratrství (od roku 1974) vzniklo adaptací těžní štoly bývalého uranového dolu. Toto úložiště je určeno výhradně odpadu obsahujícího přírodní radionuklidy.

ÚRAO Hostím (1965-1997) ve vápencovém lomu Alkazar poblíž vesnice Hostím. V úložišti jsou uloženy nízko a středně aktivní odpady z ÚJV Řež, a. s. a bývalého ÚVVVR. Provoz úložiště byl ukončen v roce 1965 a v roce 1997 bylo úložiště uzavřeno.

2.6.3 Sklady RAO

Poté co je vyhořelé palivo vyvezeno z bazénu skladování vedle reaktoru, je převezeno do provozovaných suchých skladů vyhořelého paliva, kde je bezpečně skladováno po dobu řádově desítek let. Suché skladování je zvládnutá, dlouhodobě ověřená a prakticky bezodpadová technologie založená na izolaci vyhořelého paliva v obalových souborech pro přepravu a skladování.

Mezisklad vyhořelého jaderného paliva Dukovany (MSVP Dukovany) je užíván od roku 1995 pro dlouhodobé skladování vyhořelého jaderného paliva z reaktorů typu VVER-440 provozovaných v JEDU. Vyhořelé jaderné palivo je zde skladováno v obalových souborech

⁹ Vznik úložiště v roce 2065 vychází z dlouhodobého plánování ČR, avšak dle evropské taxonomie je podmínkou pro provoz JE v členských státech vybudování jaderného úložiště do roku 2050.

typu CASTOR 440/84. Celková kapacita meziskladu je 60 kusů obalových souborů pro 600 t TK (tun těžkých kovů). Dne 8. března 2006 byl do skladu zavezen poslední obalový soubor s vyhořelým jaderným palivem.



Obr. 2-13 MSVP Dukovany [24]

V areálu jaderné elektrárny Dukovany byl již vybudován a v roce 2008 uveden do provozu koncepčně identický nový sklad VJP s kapacitou 133 kusů obalových souborů pro 1340 t TK, což je dostatečná kapacita pro skladování zbylého vyhořelého paliva z JEDU, které vzniklo a vznikne po dobu jejího celkového provozu. V současnosti ale provozovatel elektrárny ČEZ provádí investice do tohoto zařízení za účelem prodloužení životnosti a dále jsou zde plánovány 1-2 nové jaderné zdroje, na což nejsou sklady dimenzovány.

V areálu JE Temelín se nachází Sklad vyhořelého jaderného paliva Temelín (SVJP Temelín), který byl vybudován v roce 2012 a vyhořelé palivo je zde skladováno v suchých obalových souborech pro přepravu a skladování typu CASTOR 1000/19 a ŠKODA 1000/19. Projektovaná kapacita skladu je 1370 t TK [24].



Obr. 2-14 Sklad VJP v Temelíně [24]

V České republice se nachází také sklady pro RAO pocházející z těžby a zpracování uranových rud. Jedná se o zařízení GEAM Dolní Rozinka (od 1957), MAPE Mydlovary (1962 až 1991) a TUU Stráž pod Ralskem (1967 až 1995) [24].

3 Teorie přestupu tepla

Mezi způsoby sdílení tepla patří sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním (angl. kondukce, konvekce a radiace).

Sdílení tepla vedením se vztahuje k jedné látce a tepelná energie se přenáší jen mezi bezprostředně sousedícími částicemi hmoty ve směru klesající teploty.

U proudění je tepelná energie přenášena pomocí částic hmoty, které mění svou polohu v prostoru. Tento způsob přenosu tepla je tedy možný pouze u tekutin (kapalin a plynů) a je současně doprovázen vedením tepla, protože v proudící látce neexistuje teplotní rovnováha.

Sálání je v podstatě elektromagnetické vlnění v určitém rozsahu vlnových délek a z tohoto charakteru tedy plyne, že se sálání uskutečňuje i v prostoru, který není vyplněn žádnou látkou (např. Slunce a Země). Mezi dvěma tělesy sestává z vyzařování, pohlcování a propouštění zářivé energie. Část tepelné energie tělesa se mění v zářivou energii, která prochází prostorem a při dopadu na jiné těleso se částečně nebo zcela opět mění v teplo.

3.1 Vedení tepla

3.1.1 Teplota a tepelný tok

Pro sdílení tepla vedením je nutné znát dvě veličiny: teplotní pole a tepelné toky.

Teplotní pole je rozložení teplot v tělese v určitém čase a lze jej popsat funkcí $T = T(x, y, z, \tau)$, kde x, y a z jsou prostorové souřadnice a τ značí čas. Pokud by se teplota s časem neměnila, mluvíme o stacionárním vedení tepla, pokud je teplotní pole funkcí času, jedná se o nestacionární vedení tepla.

Tepelný tok vznikne, podle druhého termodynamického zákona, v místě, kde existují teplotní rozdíly. Pak se tepelná energie přenáší z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Množství tepla přeneseného za časovou jednotku nazýváme tepelným tokem Q_τ . Tepelný tok procházející plochou o jednotkové velikosti dS kolmo ke směru toku, se označuje jako měrný tok q_τ a platí

$$dQ_\tau = q_\tau dS, \quad (3.1-1)$$

pokud by normála plochy svírala se směrem toku úhel φ pak by pro tepelný tok platil vztah

$$dQ_\tau = q_\tau \cos\varphi dS. \quad (3.1-2)$$

3.1.2 Fourierův zákon

Závislost mezi teplotním polem a tepelným tokem lze vyjádřit pomocí Fourierova zákona. Pro homogenní rovinnou desku o tloušťce s s povrchy o konstantní teplotě T_1 a T_2 lze vyjádřit tepelný tok tekoucí kolmo deskou jako:

$$dQ_\tau = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) dS, \quad (3.1-3)$$

kde λ značí součinitel tepelné vodivosti, který je různý pro různé materiály (viz kapitola 3.1.3). Za předpokladu homogenního a izotropního materiálu pro dvě nekonečně blízké izotermy protéká elementární plochou dS ve směru normály n k této ploše teplo:

$$dQ_{\tau} = -\lambda dS \frac{\delta T}{\delta n}, \quad (3.1-4)$$

kde poměr δT a δn značí teplotní gradient ve směru normály k ploše a vztah je záporný, neboť směr tepelného toku je opačný k vektoru teplotního gradientu. Pro měrný tepelný tok všemi směry potom bude platit

$$q_{\tau} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \nabla T, \quad (3.1-5)$$

kde ∇T je gradient teploty.

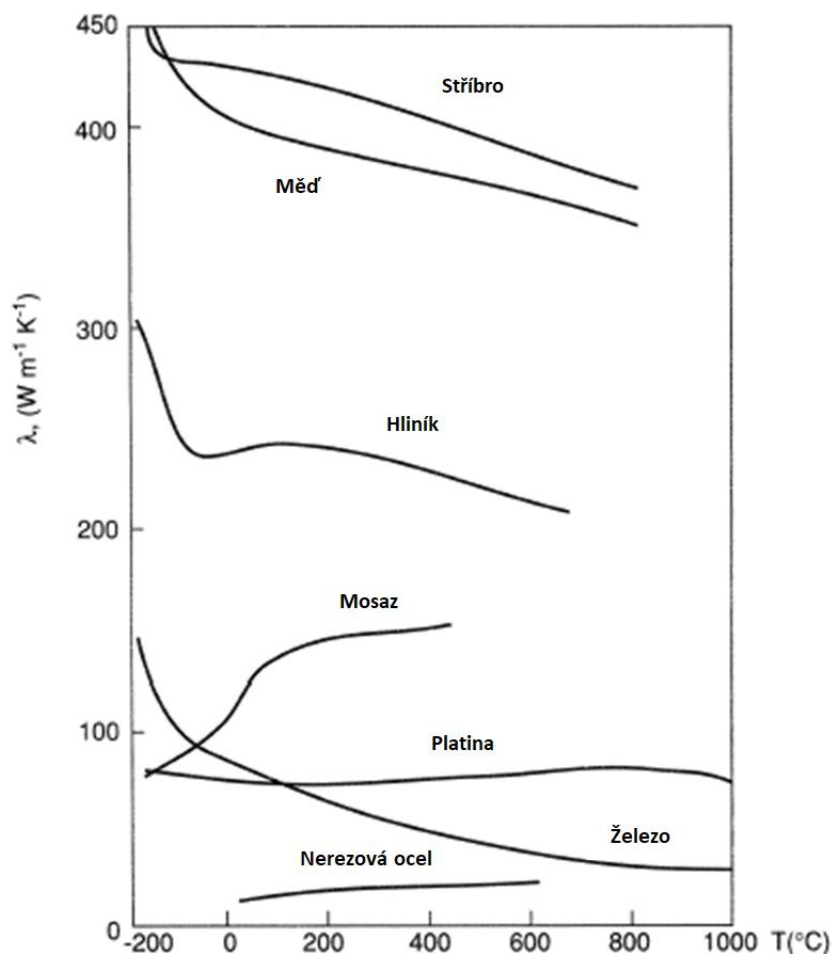
3.1.3 Tepelná vodivost látek

Tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] je definována jako množství tepla procházejícího za sekundu jednotkou plochy při teplotním spádu 1 Kelvin na 1 metr. Jinými slovy udává schopnost látek vést teplo. Tepelná vodivost je závislá na teplotě a u plynů a kapalin i na tlaku. Závislost tepelné vodivosti na tlaku se většinou při výpočtech zanedbává.

Mezi dobré tepelné vodiče patří kovy, což se využívá např. u teplosměnných ploch výměníků tepla. Naopak materiály s nízkou tepelnou vodivostí se využívají jako tepelné izolace, kam patří např. polystyren, dřevo nebo plyny. Většina těchto izolačních materiálů nejsou látky homogenní, ale pórovité. Póry vyplněné nejčastěji vzduchem jsou hlavní důvodem izolačních vlastností těchto látek, protože jak již bylo zmíněno, vzduch je dobrý tepelný izolant. Velkou roli hraje také vnitřní struktura těchto izolantů.

Kovy

U kovů je tepelná vodivost přibližně úměrná jejich elektrické vodivosti. Velkou roli hraje čistota kovů, kdy čistší kovy mají vyšší vodivost než kovy legované, nebo kovy s vyšším obsahem nečistot. Jako příklad uveďme měď, která má v čistém stavu tepelnou vodivost $\lambda = 403$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], avšak průmyslová měď se stopami nečistot 349 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]. U oceli hraje roli míra legujících prvků ale i obsah uhlíku. Na Obr. 3-1 je možné vidět závislost tepelné vodivosti některých kovů na teplotě. Je možné vidět, že platina má víceméně konstantní závislost tepelné vodivosti, což platí i pro její elektrický odpor. Z toho důvodu je Pt používaná v některých odporových teploměrech.



Obr. 3-1 Závislost tepelné vodivosti některých kovů na teplotě

Kapaliny

Tepelná vodivost kapalin bývá v rozmezích $0,09$ až $0,7$ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] a s výjimkou některých kapalin jako např. vody klesá při rostoucí teplotě.

3.1.4 Tepelná bilance

Tepelná bilance jednotkového objemu $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ do kterého z jednotlivých směrů proudí a vystupuje tepelný tok, spolupůsobí na teplotní změnu elementu za jednotku času a platí:

$$dQ_{\tau} = c \rho dV \frac{\delta T}{\delta \tau}, \quad (3.1-6)$$

kde c je měrné teplo a ρ je měrná hmotnost neboli hustota. Tepelný zdroj uvnitř elementu, vzniklý přeměnou energie je dán výrazem

$$dQ_{\tau} = q_{\tau} dV, \quad (3.1-7)$$

kde $q_{\tau} = q_{\tau}(x, y, z, \tau, T)$ znamená vniklé množství tepla pro objemovou jednotku za jednotku času.

Dle zákona o zachování energie platí, že vstupující a uvnitř vzniklé teplo musí být v rovnováze s vystupujícím a naakumulovaným teplem. Pak dostaneme

$$c\rho \frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q_{\tau}. \quad (3.1-8)$$

Což je obecný tvar diferenciální rovnice vedení tepla v látce, kde c a ρ jsou látkové vlastnosti a λ je funkcí místa, směru tepelného toku a teploty, jejíž integrací nalezneme funkci rozložení teploty představující teplotní pole v dané látce. Pokud budeme uvažovat látkové vlastnosti za konstantní, pak můžeme rovnici zjednodušit na tvar:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = a \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + \frac{q_{\tau}}{c\rho}, \quad (3.1-9)$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti $a = \lambda/c \cdot \rho$ [m^2s^{-1}].

Při stacionárním vedení tepla bez vnitřních zdrojů tepla přechází rovnice na tvar:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = 0 = \nabla^2 T, \quad (3.1-10)$$

Rovnici (3.1 9) lze vyjádřit za stejných předpokladů v kulových souřadnicích jako:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = a \left(\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta^2 T}{\delta \varphi^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + \frac{q_{\tau}}{c\rho}. \quad (3.1-11)$$

3.1.5 Okrajové podmínky

Pro vyřešení teplotního pole uvnitř tělesa pomocí parciálních diferenciálních rovnic je potřeba znát okrajové a počáteční podmínky.

Počáteční podmínky stanovují v určitém okamžiku na každém místě tělesa určitou teplotu, čímž je dáno teplotní pole v čase $\tau=0$ $T_0=T_0(x,y,z)$, které se pak mění během nestacionárního vedení tepla. Během stacionárního sdílení tepla tato podmínka odpadá, neboť se teplotní pole v čase nemění.

Okrajové podmínky lze rozdělit do tří typů na okrajové podmínky předepisující na ploše tělesa:

- teplotu jako funkci času a místa
- tepelný tok jako funkci času a místa
- tepelný přestup do teplotnosné látky

U třetí podmínky platí, že tepelný tok, který přechází z jedné látky do druhé, je pro obě tělesa stejně velký. Na kontaktní ploše proto platí vztah

$$\lambda_I \left(\frac{\delta T}{\delta n} \right)_I = \lambda_{II} \left(\frac{\delta T}{\delta n} \right)_{II} \quad (3.1-12)$$

3.1.6 Stacionární vedení tepla válcovou stěnou

Uvažujme válcovou trubku o délce $L=1$ m s vnitřním poloměrem r_1 a vnějším poloměrem r_2 o tepelné vodivosti λ , teplotě povrchů T_1 a T_2 , kde $T_1 > T_2$. Teplota se mění pouze v radiálním směru, proto se jedná o jednorozměrné teplotní pole.

Skrz válcovou vrstvu na poloměru r o tloušťce stěny dr proteče dle Fourierova zákona množství tepla:

$$Q_{\tau} = -\lambda S \frac{dT}{dr} = -\lambda 2\pi r L \frac{dT}{dr}, \quad (3.1-13)$$

separací proměnných a integrací dostaneme

$$T = -\frac{Q_{\tau}}{2\pi\lambda L} \ln r + C. \quad (3.1-14)$$

Po dosazení T_1 za T pro r_1 respektive T_2 za T pro r_2 a odečtením obou rovnic dostaneme

$$T_1 - T_2 = \frac{Q_{\tau}}{2\pi\lambda L} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q_{\tau}}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.1-15)$$

Vyjádřením Q_{τ} pak dostaneme vzorec pro množství tepla tekoucího skrz válcovou stěnu jako:

$$Q_{\tau} = \frac{2\pi\lambda L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} T_1 - T_2. \quad (3.1-16)$$

Poté je možno z rovnic (3.1 13), (3.1 14) a (3.1 16) zjistit teplotu T v libovolném místě

$$T(r) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (3.1-17)$$

Rozložení teploty ve vzdálenosti od vnitřní stěny má tedy podobu logaritmické křivky, pokud je λ konstantní.

Při uvažování složené válcové stěny o n vrstvách pak vzorec (3.1 17) pro tepelný tok skrz stěnu přejde na výraz

$$q_{\tau} = \frac{2\pi(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \quad (3.1-18)$$

kde λ_i a d_i značí tepelnou vodivost, respektive poloměr příslušné i -té vrstvy a T_{n+1} teplotu vnějšího povrchu.

3.1.7 Teorie podobnosti

Modelová podobnost je v mnoha odvětvích fyziky a techniky využívána za účelem redukce množství proměnných veličin a seskupení jich do tzv. bezrozměrných argumentů. Teorie podobnosti se využívá pro stanovení vlastností fyzikálních veličin nějakého modelu a poté tyto vlastnosti přenést na reálné dílo nebo podobnou úlohu. Metody modelování podobnosti mají velký význam zejména u řešení problémů s prouděním tekutin a sdílením tepla a umožňují podstatně zjednodušit jejich řešení.

3.2 Sdílení tepla prouděním

V proudících tekutinách dochází ke sdílení tepla jak vedením tepla popsáním výše, tak přemísťováním částic tekutiny. Sdílení tepla prouděním je tedy vždy doprovázeno i sdílením tepla vedením, kdy míra samostatných dějů podílejících se na přestupu tepla závisí na vlastnostech dané látky a na rychlosti a typu proudění.

U proudění v blízkosti stěny nastává z pohledu teploty i rychlosti k poměrně velkým změnám, neboť je relativní rychlost tekutiny vůči stěně na povrchu nulová, která se vzdáleností od stěny přechází na rychlost blízkou střední rychlosti okolního proudění. Tuto oblast nazýváme rychlostní mezní vrstva. Protože je konvektivní sdílení tepla závislé i na proudění tekutiny,

tak je touto změnou rychlosti ovlivněno a dochází k tvorbě teplotní mezní vrstvy. Jak ale bylo zmíněno výše, v tekutinách dochází i k vedení tepla a konvektivní přestup tepla je závislý také na proudění, proto neplatí, že teplotní mezní vrstva je stejná jako rychlostní.

Přestup tepla mezi stěnou a tekutinou lze charakterizovat dle Newtonova zákona:

$$Q = \alpha S(T_s - T_k) \quad (3.2-1)$$

kde T_s je teplota stěny, T_k je střední teplota tekutiny a α je součinitel přestupu tepla.

Součinitel přestupu tepla α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] udává množství sdíleného tepla za sekundu jednotkou povrchu při rozdílu teplot 1 K mezi stěnou a tekutinou. Součinitel přestupu tepla závisí na vlastnostech tekutiny, charakteru proudění, tvaru stěny a nezávisí na materiálu stěny. Složitost úloh s přestupem tepla je tak koncentrovaná prakticky výhradně do tohoto součinitele, neboť ostatní veličiny vystupující ve vzorci sdílení tepla nejsou v inženýrské praxi zdaleka tak složité na určení. Často se alfa určuje experimentálně s využitím teorie podobnosti nebo pomocí numerických simulací.

3.2.1 Volná konvekce

Dle příčiny pohybu částic tekutiny lze rozdělit konvekci na nucenou a volnou. U nucené konvekce je příčinou proudění mechanické zařízení (nejčastěji čerpadlo nebo ventilátor). U volné konvekce, také nazývané jako přirozené, je příčinou proudění teplotní závislost hustoty tekutiny. Při změně teploty v určitém místě tekutiny začne na dané částice hmoty působit jiná vztlaková síla a vzniklou diferencí vztlaku se částice dají do pohybu. Čím je tedy větší teplotní rozdíl v tekutině, tím je proudění intenzivnější od čehož se odvíjí i typ proudění. Volná konvekce je například způsob ohřívání vzduchu uvnitř místností.

Volná konvekce u svislé desky ($T_{\text{desky}} > T_{\text{okolí}}$) je charakterizována tím, že s přibývajícím vzdáleností od spodní hrany dochází k postupnému urychlování okolního vzduchu, proudění vzduchu je nejdříve laminární a v určité vzdálenosti může přejít do turbulentního s čímž se mění i součinitel přestupu tepla podél stěny, z čehož plyne, že přestup tepla ze stěny nebude po výšce konstantní.

Speciálním případem u konvekce nastává, pokud dochází ke kondenzaci nebo vypařování jedné látky na povrchu stěny.

3.3 Sálání

Sálání neboli radiace či vyzařování označuje jakýkoliv druh emitace energie do prostoru ve formě elektromagnetických vln které se šíří rychlostí světla v dané látce. Tepelné záření tvoří jen část elektromagnetického spektra a rozumíme jím infračervené záření o vlnové délce přibližně 0,8 až 360 μm avšak principiálně není odlišné od jiných elektromagnetických záření. Dále bude pozornost věnována tepelnému záření, při němž vyzařovaná energie vzniká jen z tepelné energie sálajícího tělesa a absorpcí přijímaná energie se opět mění v teplo.

Vznik tepelného záření z tepelné energie označujeme jako emise a naopak přeměnu tepelného záření na tepelnou energii jako absorpce. Vyzářená energie závisí jen na vlastnostech zářiče a ne na jeho okolí a důležitou roli hraje povrch zářícího tělesa.

Tepelné záření z jednoho tělesa se na jiném tělese buď odrazí, pohltí nebo jím prostoupí. Odražené záření dopadá na okolní tělesa, u nichž dochází ke stejnému procesu. Nakonec je veškeré tepelné záření pohlceno okolními tělesy. Všechna tělesa tedy neustále vyzařují a pohlcují tepelné záření a tento proces označujeme jako sdílení tepla sáláním.

Rozdělme množství tepla Q dopadající na těleso na část, která se odrazí Q_R , část která tělesem prostoupí Q_D a část která se pohltí Q_A . Pak platí, že:

$$Q_R + Q_D + Q_A = Q, \quad (3.3-1)$$

což po vydělení celkovým dopadajícím množstvím tepla přejde na tvar:

$$\frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} + \frac{Q_A}{Q} = 1, \quad (3.3-2)$$

kde člen Q_A/Q je poměrná tepelná pohltivost A , člen Q_R/Q je poměrná tepelná odrazivost R a člen Q_D/Q je poměrná průteplivost D , pro které platí

$$A + R + D = 1. \quad (3.3-3)$$

Tělesa s $A=1$ nazýváme dokonale černá, s $R=1$ těleso bílé a $D=1$ těleso dokonale průteplivé. V praxi taková tělesa neexistují, hodnoty A , R a D závisí na vlastnostech tělesa, teplotě a délce vln, které vyzařuje. Tuhá tělesa a některé kapaliny mohou být neprůteplivá $D=0$, pro něž platí $A+R=1$, tedy čím lépe těleso absorbuje záření, tím hůře jej odráží a naopak. Některé látky pak mohou být průteplivá jen pro určité délky vlnění jako třeba sklo, které propouští světelné paprsky, ale téměř vůbec nepropouští ultrafialové a tepelné záření. Z pohledu vlastností povrchu má význam jak barva, tak drsnost.

Celkové množství energie záření, vyzařované povrchem tělesa o ploše S za jednotku času se nazývá zářivý tok Q_τ a protože na povrchu tělesa může být zářivý tok nerovnoměrně rozložen, tak definujeme intenzitu vyzařování e_τ [Wm^{-1}] jako

$$e_\tau = \frac{dQ_\tau}{dS}. \quad (3.3-4)$$

Při uvažování, že na těleso dopadá zářivá energie $e_{\tau d}$, pak část tohoto tepla $A \cdot e_{\tau d}$ bude pohlceno a zbytek $(1-A) \cdot e_{\tau d}$ se odrazí a bude se spolupodílet na zářivosti tělesa. Výsledné sálavé teplo pak nazýváme efektivní sálavost tělesa

$$e_{\tau ef} = e_\tau + (1 - A)e_{\tau d}. \quad (3.3-5)$$

Při uvažování dvou nekonečně dlouhých desek o sálavosti $e_{\tau 1}$ respektive $e_{\tau 2}$ a pohltivosti A_1 respektive A_2 uspořádaných tak, že zářivá energie jedné desky je pohlcena druhou deskou, pak při stejné teplotě obou desek je dle druhého termodynamického zákona nemožné, aby jedna deska svou teplotu vlivem sálání zvýšila. Z toho lze odvodit, že:

$$\frac{e_{\tau 1}}{A_1} = \frac{e_{\tau 2}}{A_2} = e_{\tau 0} = f(T), \quad (3.3-6)$$

což je Kirchoffův zákon o emisi a absorpci tepelného záření, kde $e_{\tau 0}$ je úhrnná sálavost absolutně černého tělesa. Plyne z něj, že poměr úhrnné sálavosti a pohltivosti tepelného záření je stejný pro tělesa o stejné absolutní teplotě a rovná se úhrnné sálavosti dokonale černého tělesa. Kirchoffův zákon je také platný pro monochromatické sálání, kdy je poměr monochromatické sálavosti a pohltivosti tepelného záření stejný a je funkcí teploty a uvažované délce vlny λ . Tvar této funkce odvodil Max Planck použitím své kvantové hypotézy, která tvrdí, že vyzařování a pohlcování zářivé energie se děje jen po celistvých „kvantech“ a nikoli spojitě¹⁰. Velikost energie těchto kvant je

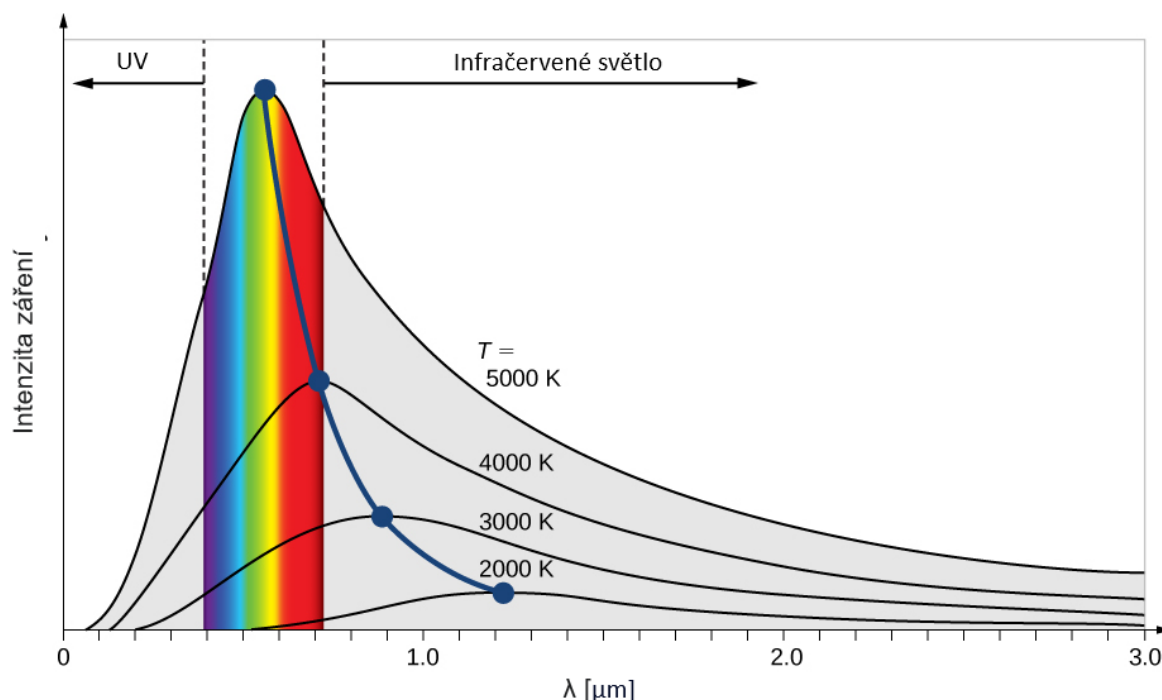
¹⁰ Toto byl zásadní objev vedoucí k vypracování kvantové teorie.

$$e = h \frac{c}{\lambda}, \quad (3.3-7)$$

kde h je Planckova konstanta $h=6,624 \cdot 10^{-34}$ a $c \approx 300\,000$ [km/s] je rychlost světla ve vakuu. Planckův vyzařovací zákon má pak tvar:

$$e_{\tau 0 \lambda} d\lambda = \left(\frac{hc^2}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \right) d\lambda, \quad (3.3-8)$$

kde k je Boltzmannova konstanta $k=138,05 \cdot 10^{-25}$ [JK⁻¹]. Závislost intenzity záření na teplotě a vlnové délce lze vidět na Obr. 3-2.



Obr. 3-2 Závislost intenzity záření na vlnové délce [25]

Úhrnné množství energie, jež vysílá 1 m² dokonale černého tělesa popisuje Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru:

$$e_{\tau 0} = 10^8 \sigma_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.3-9)$$

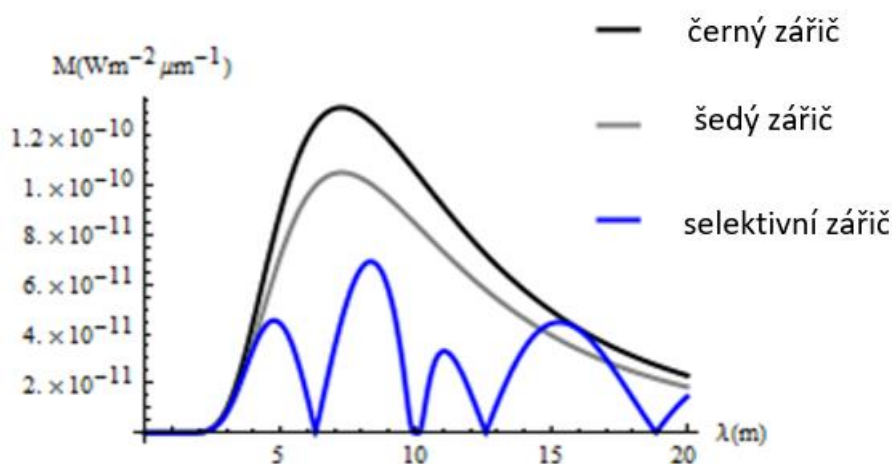
kde $\sigma_0=5,775 \cdot 10^{-8}$ [Wm⁻²K⁻⁴] je konstanta sálání dokonale černého tělesa.

U reálných těles potom mluvíme o šedých nebo selektivních zářičích. Intenzita záření šedého tělesa je 0÷1 násobkem¹¹ intenzity záření dokonale černého tělesa a nazývá se emisivita, která je definována právě jako poměr intenzity záření šedého tělesa k intenzitě záření absolutně černého tělesa:

$$\varepsilon = \frac{e_{\tau}}{e_{\tau 0}} = A \quad (3.3-10)$$

¹¹ V krajních mezích se nejedná o šedé těleso, ale v případě nultého násobku se jedná o dokonale bílé těleso, které odráží veškerou energii dopadajícího záření a v případě násobku 1 je těleso dokonale černé.

Selektivní zářiče naopak vykazují nerovnoměrné rozdělení intenzity záření v závislosti na vlnové délce. Jedná se zejména o kovy, plyny a páry. Srovnání intenzity záření černého, šedého a selektivního zářiče je vidět na Obr. 3-3 [26] [27] [28].



Obr. 3-3 Intenzita záření pro různé zářiče [29]

3.3.1 Emisivita

Emisivita není materiálovou konstantou, neboť kromě materiálu tělesa závisí také na vlastnostech jeho povrchu a teplotě. Emisivita je jedním z největších zdrojů chyb při radiometrickém měření. Znalost emisivity měřeného povrchu je velmi důležitou součástí jakéhokoliv radiometrického měření. Je důležitá znalost teploty pozadí a vlivu emisivity předmětů v pozadí. Tyto faktory jsou pak mnohem důležitější, mluvíme-li o kalibrátorech teploměrů infračerveného záření.

V praxi je možné určovat emisivitu spektrometrem nebo s použitím termovizní kamery. U měření spektrometrem je registrováno infračervené spektrum, tj. závislost intenzity infračerveného záření na vlnové délce a následnou emisivitu získat z Fourierovy transformace naměřených dat.

Termovizní kamera snímá emitované tepelné záření o vlnové délce dané vlastnostmi snímacího zařízení a tento tepelný tok vizualizuje do určeného barevného spektra. Hodnoty emisivit z těchto měření jsou relativně přesné a lze je získat poměrně rychle, protože hodnotu výsledné emisivity lze odečíst přímo z přístroje a není nutný žádný výpočtový postup. Přesnost všech termovizních měření se zvyšuje se zvyšujícím se rozdílem mezi radiační teplotou okolí a teplotou vzorku. [30]

4 Praktická část

Cílem této diplomové práce je pomocí CFD simulace namodelovat přestup tepla ze segmentu válcové stěny kontejneru do okolí. Výsledky simulace budou porovnány s reálným experimentem provedeným ve ŠKODA JS.

4.1 Popis úlohy

Segment stěny kontejneru (dále jen kontejneru) o daných rozměrech (viz příloha 1) je elektricky vytápěn na vnitřní stěně a kromě vnější stěny je izolován od okolí pomocí polystyrenu a korku případně pomocí dřevěné desky, která jej izoluje od stolu. Vnější stěna s žebry je opatřena nátěrem s definovanou emisivitou. Segment je umístěn na stole asi 1 m nad zemí a je na něm umístěno celkem 20 termočlánků typu 5TC-TT-K-36-36, z nichž 15 je umístěno na žebrech a 5 na zbylých částech segmentu pod izolací. Tloušťka stěny segmentu a tvar žeber odpovídají svými rozměry provedení na reálném kontejneru OS Škoda 440/84 č.004.



Obr. 4-1 Fotografie reálného provedení experimentu

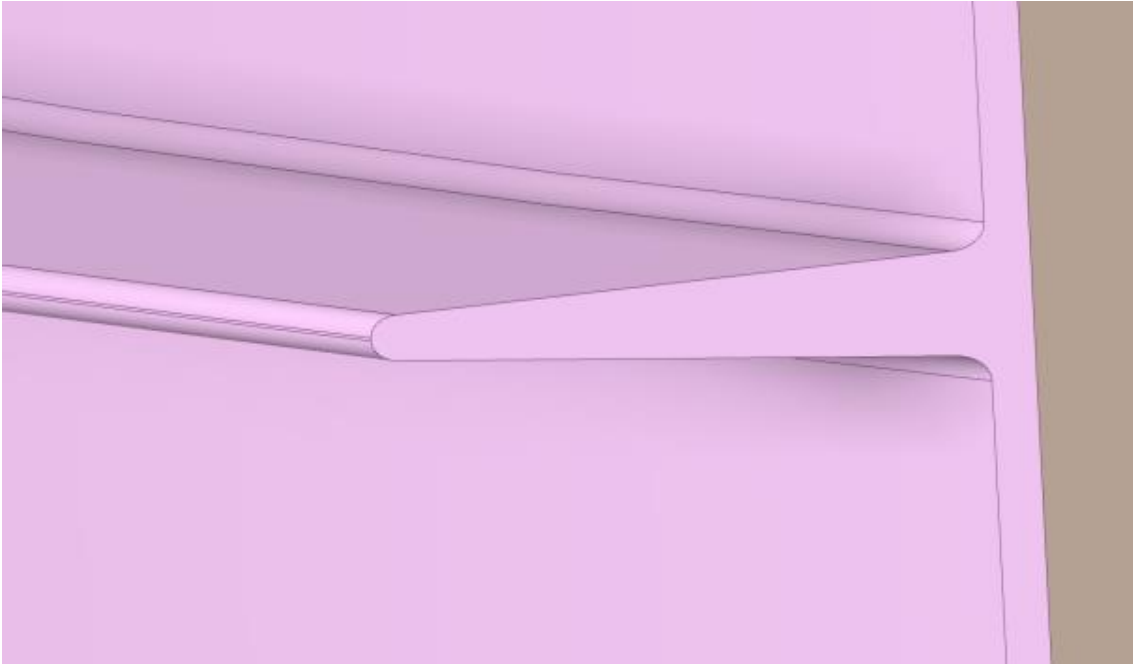
4.1.1 Geometrie a zjednodušení.

ŠKODA JS poskytla geometrii kontejneru, se kterou se dále pracovalo v SW Ansys SpaceClaim. Na kontejneru je 8 závitových děr pro manipulaci, které byly odstraněny. Dále byla odstraněna hrana (obr. Obr. 4-2) na čele žeber, která byla vzhledem k celkovým rozměrům poměrně malá a která se nevyskytuje na výkresu kontejneru.

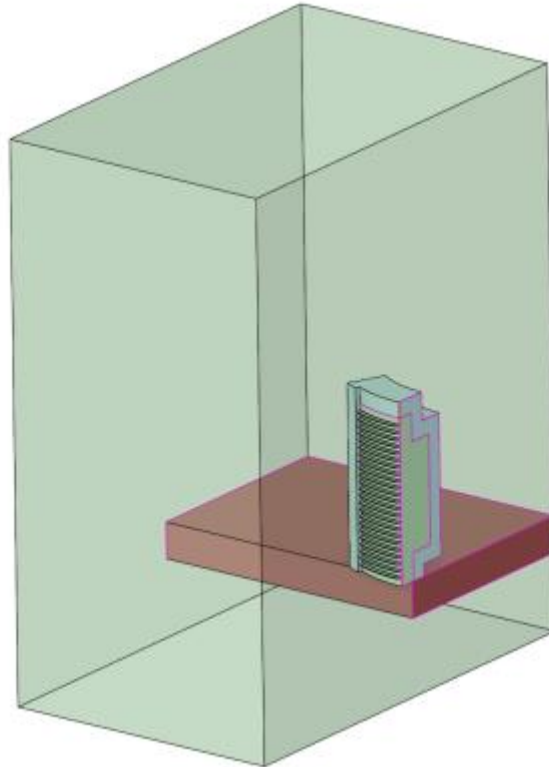
Dále byla dle fotografií vymodelovaná izolace o tloušťce kolem zadních stěn kontejneru a stůl, na kterém kontejner stojí. Izolace byla ekvidistantní od povrchu kontejneru a stůl byl vymodelován jako rovinná deska o tloušťce 320 mm. Nebyl vytvořen korek, který byl použit jako dodatečná izolace mezi polystyrenem a kontejnerem, stejně jako dřevěná deska, na které kontejner stojí z důvodu snížení velikosti sítě, což bylo následně vykompenzováno přidáním tepelného odporu na příslušné stěny.

Jako proudová oblast bylo vymodelováno okolí přibližně 3 metry směrem od čela kontejneru a 2 metry do zbylých stran.

Celá úloha je symetrická a proto bylo možné pracovat pouze s jednou polovinou modelu.



Obr. 4-2 Detail žebra na poskytnutém modelu



Obr. 4-3 Výchozí 3D model výpočetní domény

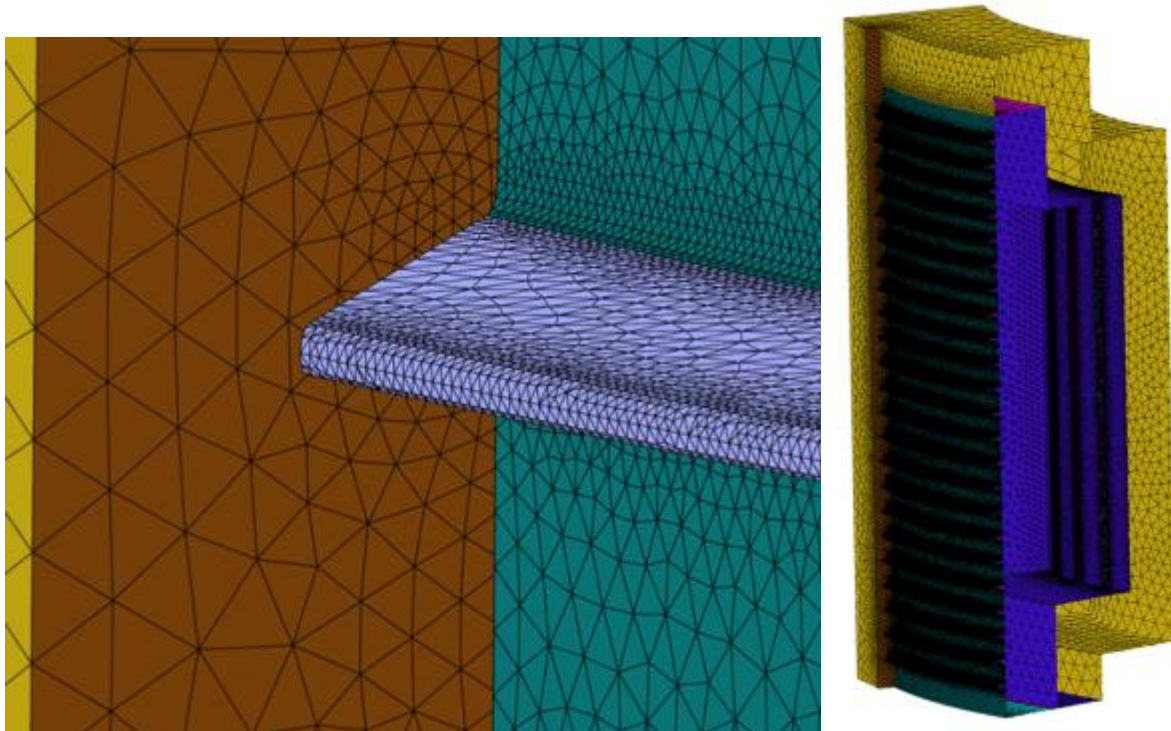
4.1.2 Síť

Výpočetní síť byla vytvořena v SW ANSYS Fluent Meshing. Velikosti buněk byly vzhledem k povaze úlohy nastaveny dle Tabulka 1.

Protože je celá úloha navržena tak, aby hlavní přestup tepla byl uskutečněn na žebrech kontejneru, byla tato oblast později podrobena zkoumání vlivu velikosti buněk žebřer a jejich okolí na výsledky výpočtu.

Tabulka 1 Velikosti buněk výchozího modelu (hodnoty v [mm])

Oblast	Velikost buněk	
	Min	Max
Žebra	1,5	8
Izolace	1	50
Termočlánky	2,5	10
Stůl	20	200
Objem	20	200



Obr. 4-4 Výchozí povrchová síť

Při tvorbě sítě je nutné nejdříve vytvořit povrchovou síť a následně objemovou. U povrchové sítě je důležitá kontrola a diagnostika pro případné odhalení chyb CAD modelu nebo chybného nastavení velikostí buněk. Nastavení velikostí vychází nejčastěji ze samotných geometrických rozměrů a dále z povahy úlohy, neboť v místech, kde je předpokládána velká změna parametrů (např. rychlost, teplota, tlak nebo skupenství), by měla být síť hustější pro dosažení dostatečně přesných výsledků a stability výpočtu. V tomto případě je to oblast žebér a jejich bezprostředního okolí.

Jako kontrola kvality slouží různé parametry buněk, mezi nimiž jsou nejdůležitější:

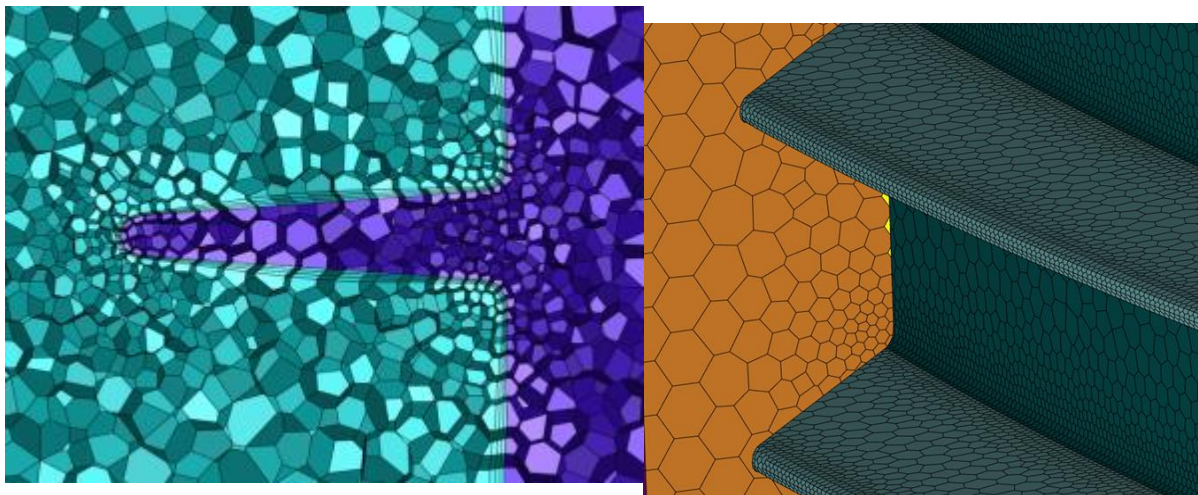
„Skewness“ – Tento parametr charakterizuje zkosení (nesouměrnost) elementů sítě a je v rozmezí 0 (nejlepší) až 1 (nejhorší). Výsledná síť by neměla dosahovat hodnoty větší než 0,9,

„Aspect ratio“ – Hodnocení dle tohoto kritéria znamená hodnocení maximálního poměru stran (protažení) buněk. Tato hodnota by neměla být větší než 100,

„Orthogonal quality“ – Toto měřítko kvality hodnotí kolmost buněk a dosahuje hodnot 0 (nejhorší) až 1 (nejlepší). Výpočetní síť lze považovat za kvalitní, pokud minimální hodnota kolmosti dosahuje hodnot větších než 0,1.

U výchozího modelu bylo dosaženo „skewness“ 0,58 [-], „aspect ratio“ 3,97 [-] a „orthogonal quality“ 0,1 [-].

Po vytvoření a úpravě povrchové sítě byla vytvořena objemová síť s polyhedrálními buňkami. Na žebrech byly vytvořeny tři prizmatické vrstvy pro podchycení charakteru mezní vrstvy. Vliv prizmatických vrstev na výsledky bude dále také zkoumán.



Obr. 4-5 Detail buněk výchozího modelu na žebrech

4.1.3 Nastavení výpočtu

Úloha je řešena jako stacionární. Turbulentním modelem byl zvolen výchozí model SST $k-\omega$ a radiční model byl zvolen jako „Surface to Surface“.

Byly uvažovány teplotně závislé vlastnosti materiálů dle poskytnutých podkladů od ŠKODA JS a zbylé dle internetových zdrojů [31] [32].

Tabulka 2 Vlastnosti materiálů použitých při experimentu

Izolace polystyren	$\rho = 40 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ $c_p = 1270 \left[\frac{J}{kg K} \right]$ $\lambda = 0,033 \left[\frac{W}{m K} \right]$
Izolace korek	$\rho = 300 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ $c_p = 2100 \left[\frac{J}{kg K} \right]$ $\lambda = 0,041 \left[\frac{W}{m K} \right]$
Teplovodivá pasta (tmel)	$\rho = 250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ $c_p = 1150 \left[\frac{J}{kg K} \right]$ $\lambda = 2 \left[\frac{W}{m K} \right]$
Dřevěná deska	$\rho = 1500 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ $c_p = 1450 \left[\frac{J}{kg K} \right]$ $\lambda = 0,18 \left[\frac{W}{m K} \right]$

Tabulka 3 Vlastnosti materiálu kontejneru

Těleso segmentu VP 666			
$T [^{\circ}C]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kg K} \right]$	$\lambda \left[\frac{W}{m K} \right]$
20	7750	430,6	60,4
50		453,1	59,8
75		467,1	58,9
100		479,7	58,0
125		490,3	57,0
150		499,9	55,9
175		507,8	54,7
200		516,1	53,6
225		525,1	52,5
250		534,0	51,4
275		543,1	50,3
300		553,0	49,2
325		563,7	48,1
350		574,8	47,0

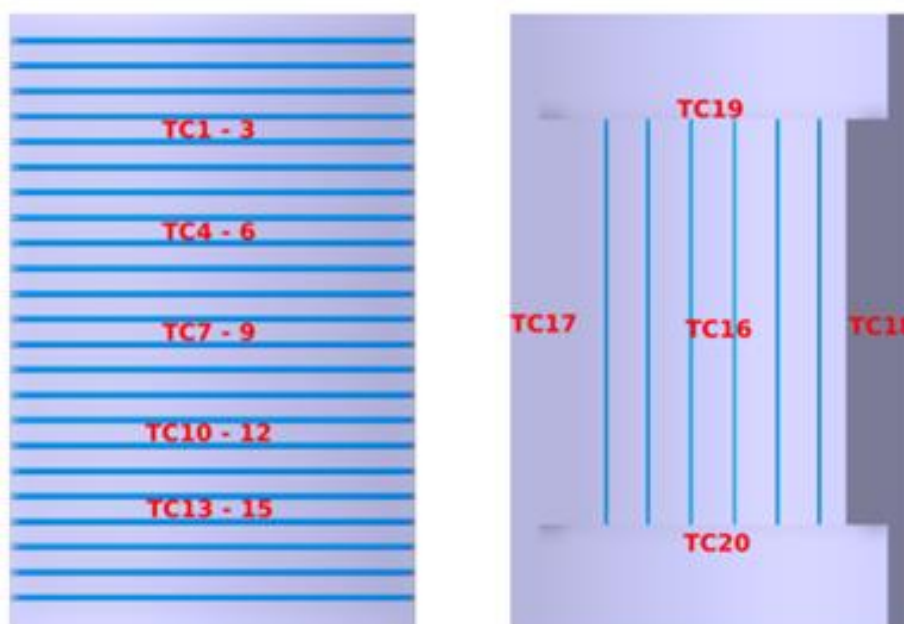
Tabulka 4 Vlastnosti vzduchu

Vzduch				
$T [^{\circ}C]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kg K} \right]$	$\lambda \left[\frac{W}{m K} \right]$	$\eta \left[\frac{kg}{m s} \right]$
20	1,204	1006	0,0258	1,813e-05
50	1,093	1007	0,0273	1,953e-05
80	1,000	1010	0,0302	2,088e-05
100	0,947	1012	0,0340	2,174e-05

Teplota okolního vzduchu byla nastavena dle naměřené teploty vzduchu při experimentu stejně jako byl nastaven příkon topných těles.

Je předepsáno, že celková tloušťka nátěru celého kontejneru včetně žebér musí být v rozmezí 90-540 μm . Skládá se ze základní barvy, mezivrstvy a vrchní vrstvy. Finální vrstva je barva na bázi dvousložkové polyuretanové pryskyřice (PUR). Barva má předepsanou emisivitu normou – minimální emisivita je 0,9 a konkrétní naměřená hodnota byla 0,96.

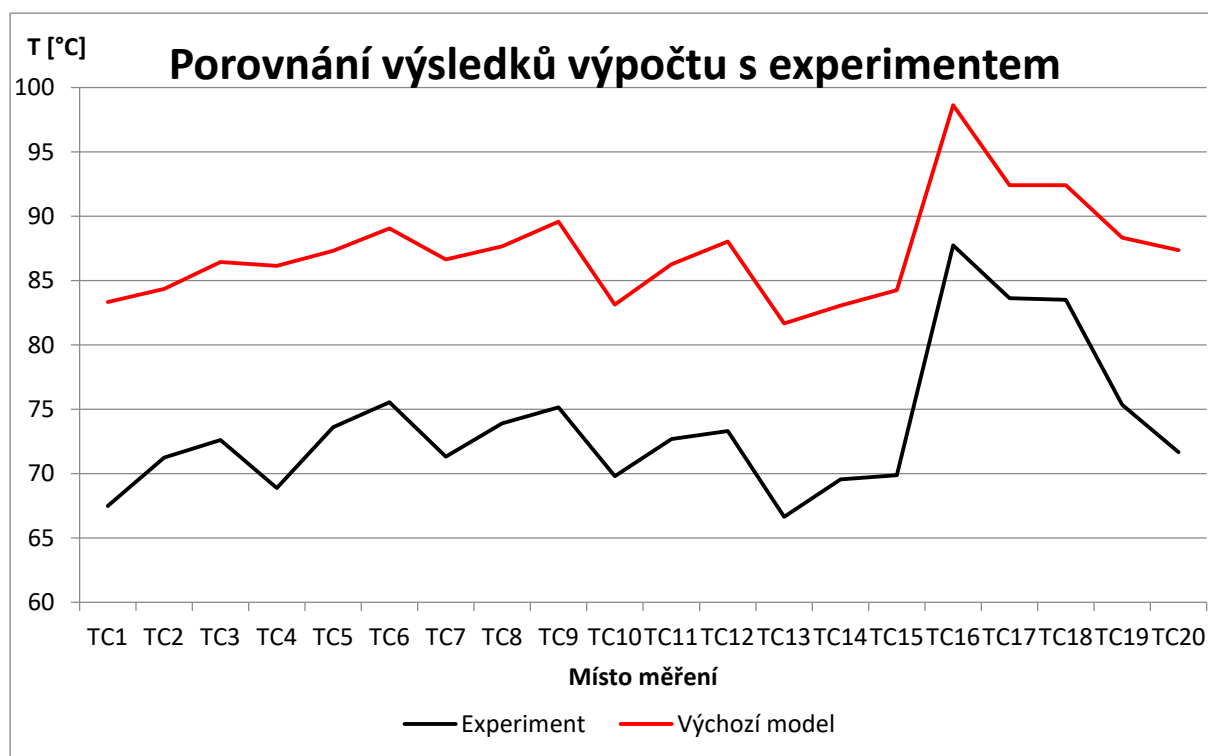
Rozmístění termočlánků a tedy místa, ve kterých bude porovnávána teplota s experimentem je vidět na Obr. 4-6, přesné umístění je pak možné vidět v příloze č.2.



Obr. 4-6 Schéma rozmístění termočlánků

4.1.4 Výsledky výchozí simulace

Srovnání experimentu a výpočtu ukázala rozdíly teplot na žebrech $\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozdílné rozložení teplot, kdy teploty na žebrech byly přibližně stejné jako teploty stěn pod izolací, což se velmi lišilo od průběhů teplot z experimentu, kde byly teploty TC17, TC18 (na stranách) a TC16 (mezi termočlánky) výrazně vyšší než teploty na žebrech.



Obr. 4-7 Porovnání výsledků s experimentem¹²

¹²Byly měřeny pouze teploty v bodech, spojnicový graf je použitý pro lepší vizualizaci jak zde, tak i dále.

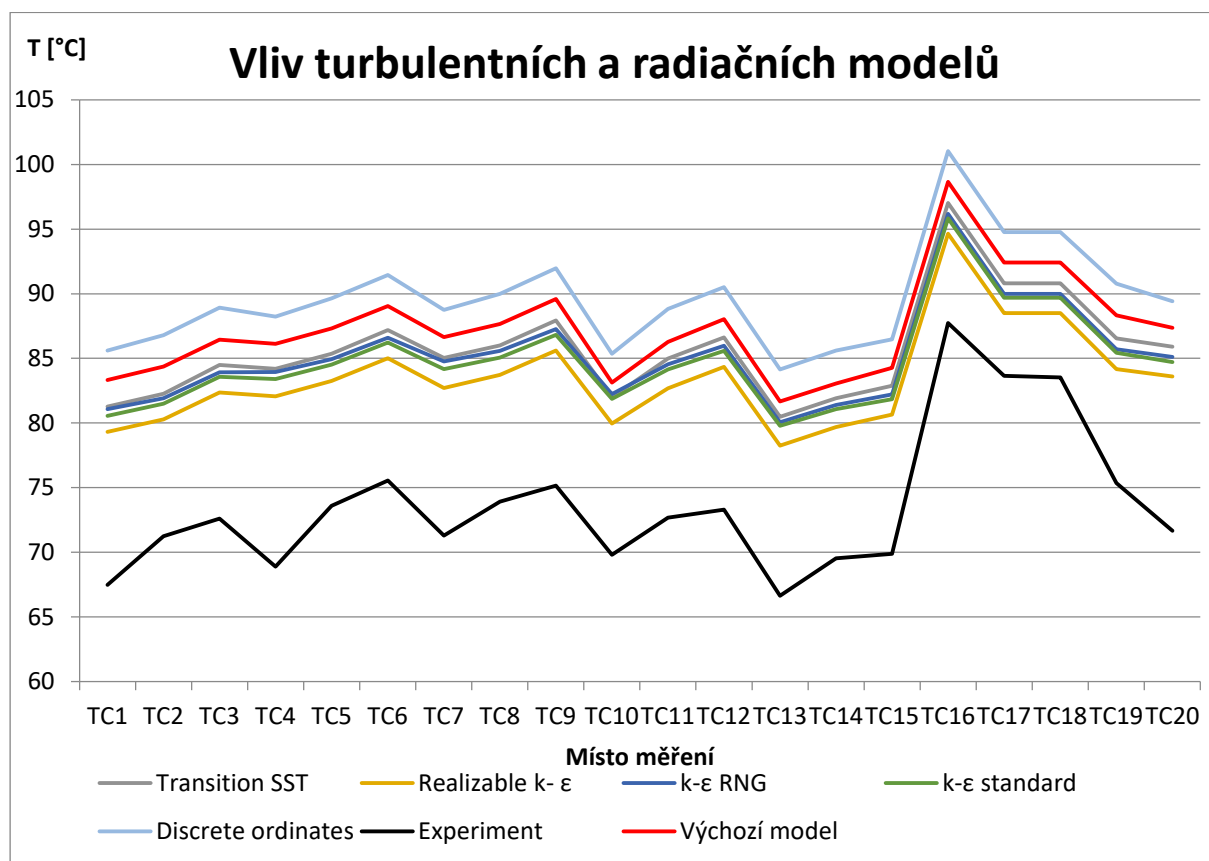
Na základě neshody výpočtu s experimentem byla vytvořena následující citlivostní analýza, tedy vliv změny vstupních parametrů na výsledky výpočtu:

- vliv turbulentních a radiačních modelů
- vliv emisivity žeber a okolí
- vliv vlastností materiálů použitých v modelu
- vliv parametrů sítě
- vliv příkonu

4.2 Citlivostní analýza

Metodika uskutečnění citlivostní analýzy spočívala ve vytvoření a výpočtu jednoho referenčního modelu, který se následně porovnával s výsledky výpočtů modelů se vždy právě jedním změněným parametrem. Tímto způsobem je možné sledovat vliv toho konkrétního parametru na výpočetní model. Vytipované sledované parametry, které se porovnávaly, byly následující: teploty v místech měření reálného experimentu (TC1-TC20), teplo procházející skrz žebra a vnější stěnu izolací a tepelný výkon sáláním žeber.

4.2.1 Vliv turbulentních a radiačních modelů



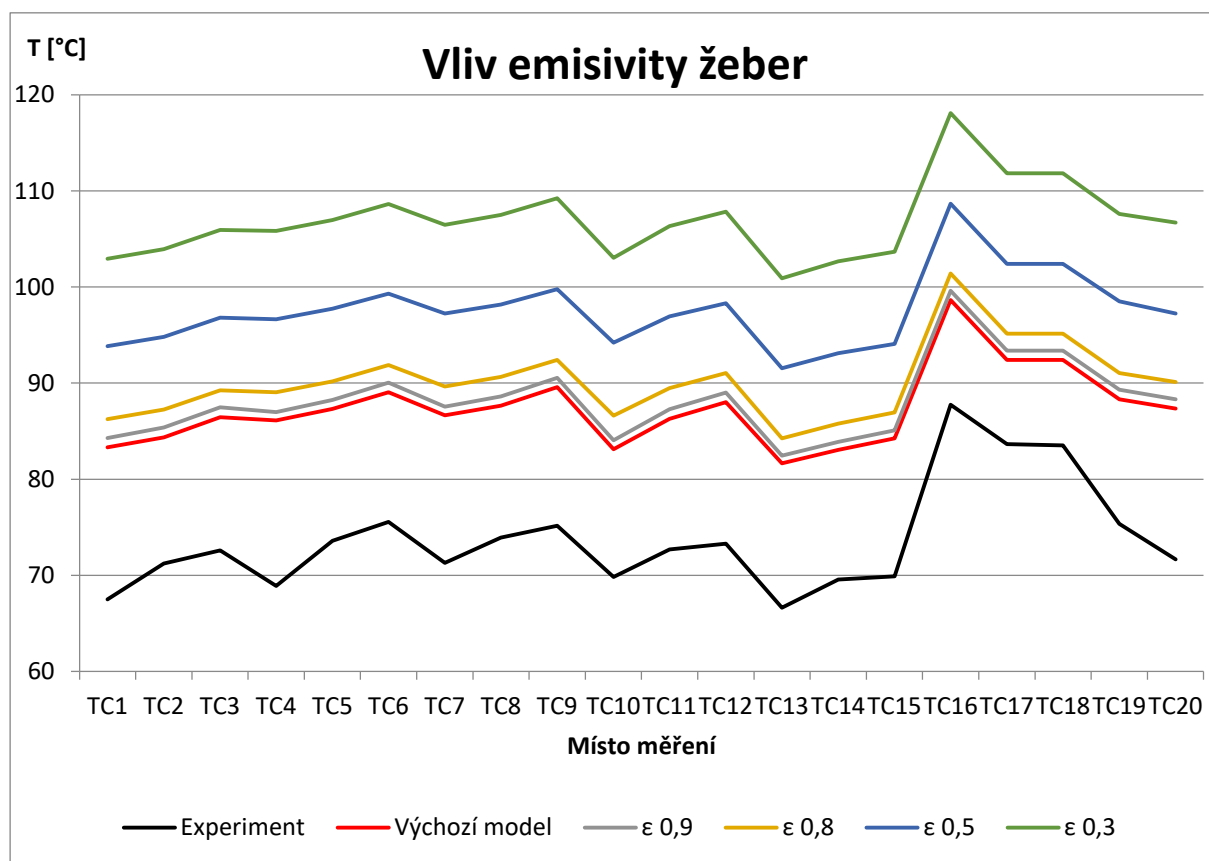
Obr. 4-8 Vliv turbulentních a radiačních modelů

Bylo porovnáno pět turbulentních modelů standardně používaných pro modelování úloh podobného typu a to sice čtyři dvourovnicové modely $k-\omega$ SST, $k-\epsilon$ „RNG“, $k-\epsilon$ „Realizable“ a $k-\epsilon$ „Standard“. Dále byl použit i čtyřrovnicový model „Transition“ SST.

U radiačních modelů byl porovnáván model „Surface to Surface“, použitý ve výchozím výpočetním modelu, s modelem „Discrete ordinate“.

Rozdíly mezi jednotlivými modely byly v řádech $\pm 3,5$ °C. Jako nejvhodnější model pak byl na základě konzultací s vedoucím práce, Škodou JS a dle manuálu SW Ansys zvolen turbulentní model $k-\varepsilon$ „Realizable“, který lépe predikuje proudění v oblastech silného zakřivení proudnic a vírů, a radiační model „Surface to Surface“, u kterého byl také zkoumán vliv změny počtu povrchů v klastru, který pro 1, 2 a 4 povrchy na klastr nebyl pozorován prakticky žádný vliv na výsledek [33].

4.2.2 Vliv emisivity žebër a okolí

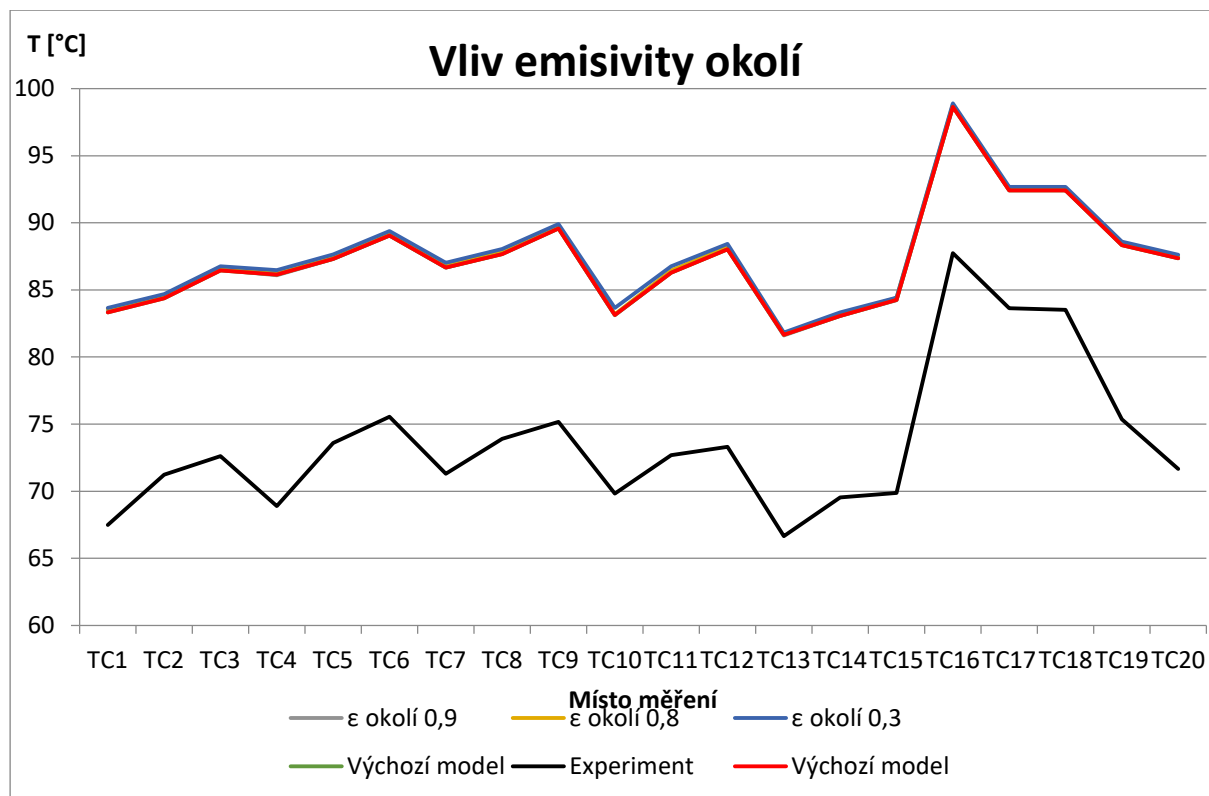


Obr. 4-9 Vliv emisivity žebër

Snižování emisivity žebër mělo za následek poměrně výrazné zvýšení teploty. Tento vliv má význam zejména u porovnání nenatřeného povrchu s natřeným, neboť hodnota emisivity kovových povrchů může v závislosti na teplotě a úpravě povrchu dosahovat hodnot nižších než $\varepsilon = 0,3$ a v případě natřeného povrchu hodnot blízkým $\varepsilon = 1$.

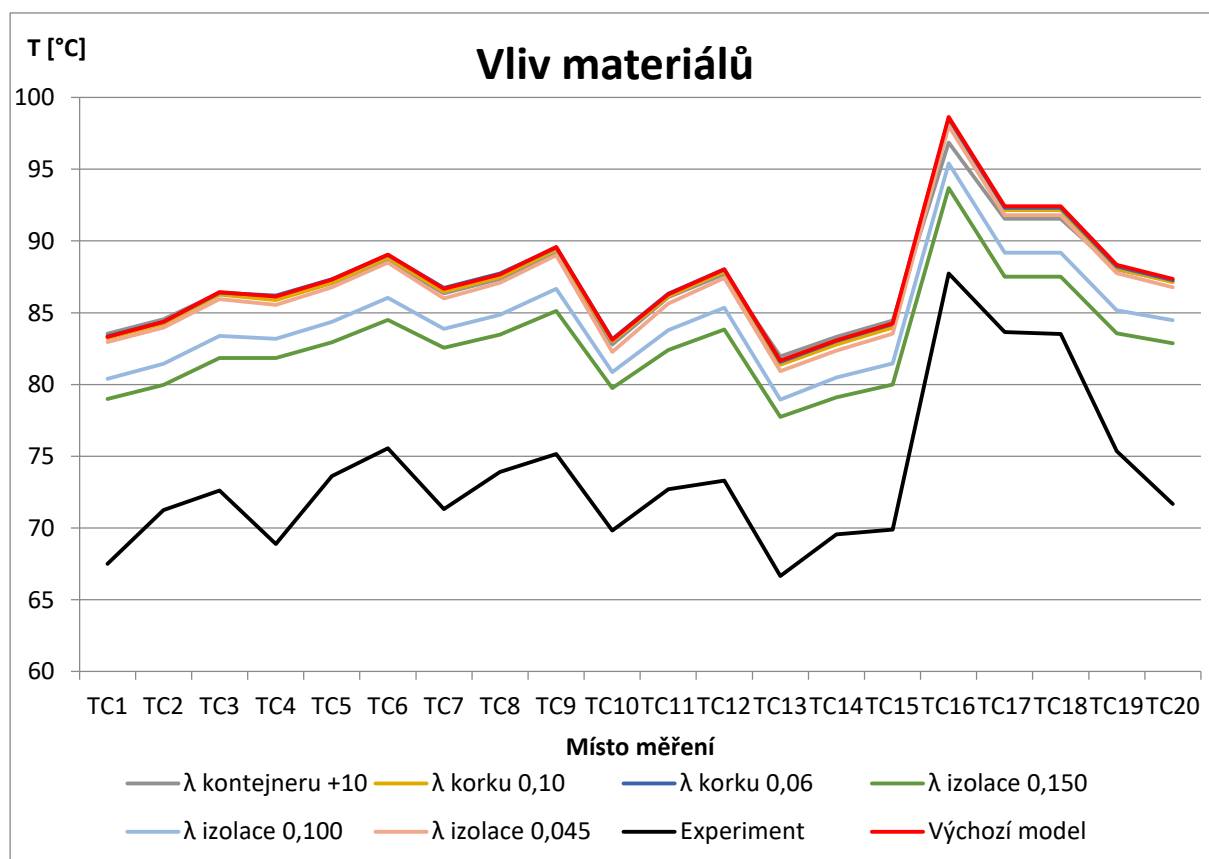
Důležitým závěrem z této analýzy tedy je, že pouhým natřením kovového povrchu je možné dosáhnout podstatného snížení povrchové teploty v řádech desítek °C.

Naopak změna emisivity okolních povrchů neměla prakticky žádný vliv na teploty na povrchu kontejneru, jak je vidět z Obr. 4-10:



Obr. 4-10 Vliv emisivity okolí

4.2.3 Vliv vlastností materiálů použitých v modelu

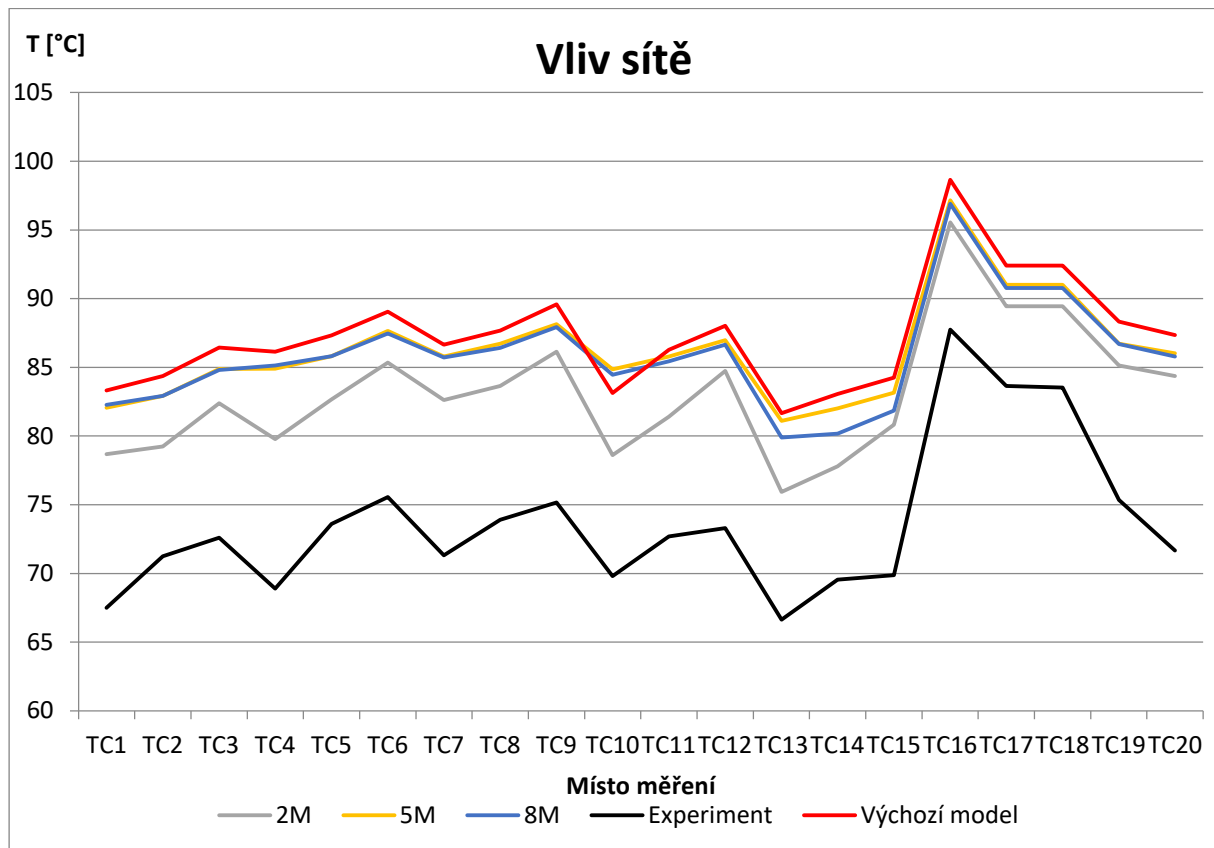


Obr. 4-11 Vliv vlastností materiálů

Z Obr. 4-11 je patrné, že při použití materiálů s odlišnými vlastnostmi, než které byly zadány, se teplota na žebrech prakticky nezmění. Důvodem zkoumání vlivu materiálů bylo zjistit, zda by potenciální jiná vlastnost materiálu měla zásadní vliv na průběh teplotní pole. U izolace byl zkoumán vliv na průběh teplot pod izolací, proto byly zvoleny nereálné koeficienty teplotní vodivosti, aby byla potenciální změna v průběhu lépe viditelná.

Změna průběhu teplot pod izolací ani výrazná změna teplot v závislosti na vlastnostech materiálů se nakonec nepotvrdila ani není důvod předpokládat, že by kombinace těchto změn vliv měla.

4.2.4 Vliv parametrů sítě



Obr. 4-12 Vliv sítě

U CFD modelování hraje provedení sítě značnou roli. Při validaci výsledků se provádí tzv. „mesh independence study“, která zkoumá vliv sítě na výsledné hodnoty. Protože se ale výchozí výpočet výrazně neshoduje s reálně naměřenými hodnotami, které jsou považovány za správné, tak nemůžeme tu síť, u které by se výsledky přiblížili více považovat za lepší. Základním předpokladem u sítě totiž je, že u simulací na jemnější síti jsou výsledky přesnější než na síti s méně elementy. „Mesh independence study“ se provádí z důvodu zjištění, ke kterým hodnotám konvergují výsledky u jednotlivých sítí.

Tato analýza citlivosti tedy nemá za úkol najít takové vlastnosti sítě, které by výpočet přiblížil naměřeným hodnotám, ale má za úkol zjistit potřebnou jemnost sítě pro pozdější verze výpočetního modelu. Z průběhu teplot na Obr. 4-12 je vidět, že poslední dvě verze sítě měly prakticky totožný průběh teplot na žebrech, a proto bylo nastavení pro jemnější z nich bráno jako dostatečně správné. V Tabulka 5 je možné vidět parametry jednotlivých sítí a v Tabulka 6 jsou pak velikosti jednotlivých oblastí, které budou použity pro další výpočetní síť.

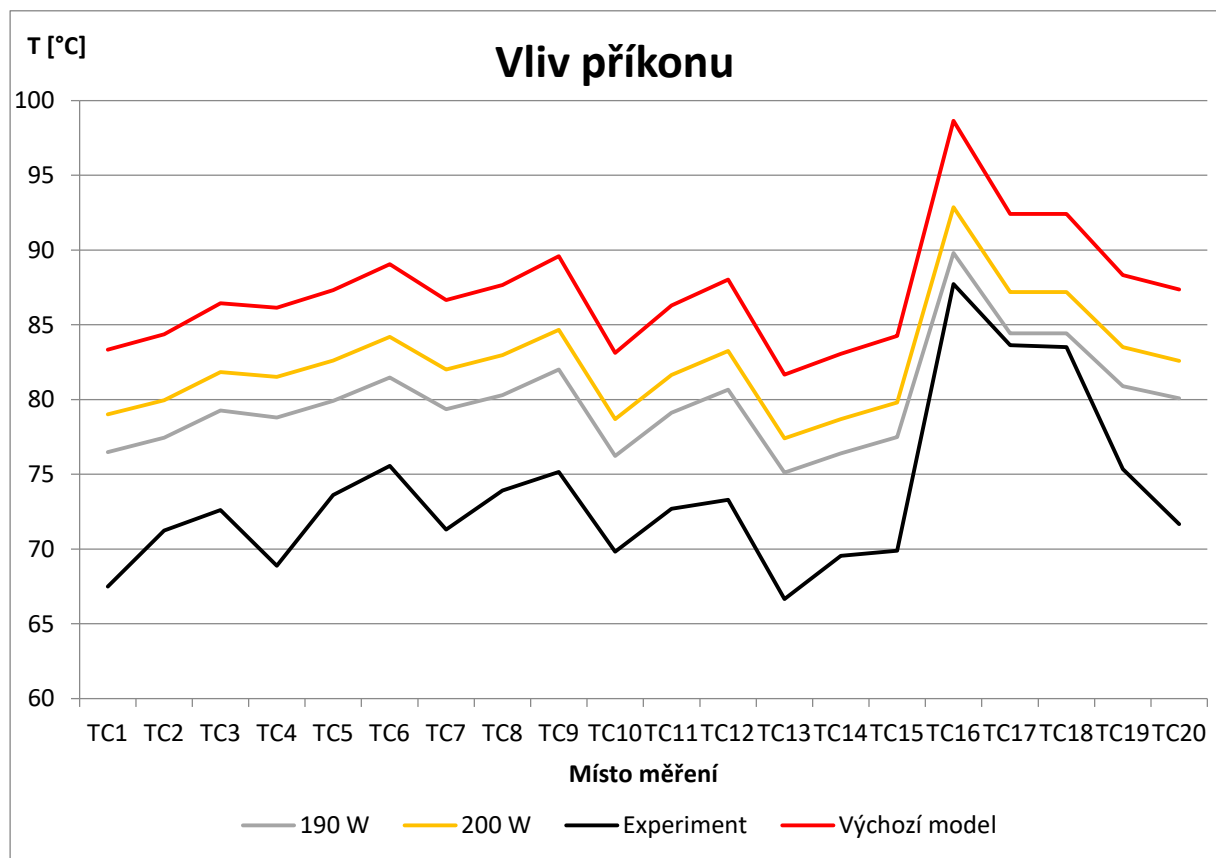
Tabulka 5 Parametry sítí pro „mesh independence study“

Síť	2M	Výchozí	5M	8M
Počet buněk	2 155 000	4 026 000	5 508 000	8 343 000
Počet mezních vrstev	2	3	4	5
Počet buněk žebek	234 000	329 000	400 000	563 000

Tabulka 6 Získané velikosti jednotlivých oblastí

Oblast	Velikost buněk		„Normal angle“ [°]	„Cells per gap“ [-]
	Min [mm]	Max [mm]		
Žebra	1	10	15	-
Izolace	1	50	30	3
Termočlánky	2,5	10	-	3
Stůl	20	220	-	3
Objem	20	250	-	4

4.2.5 Vliv příkonu



Obr. 4-13 Vliv příkonu

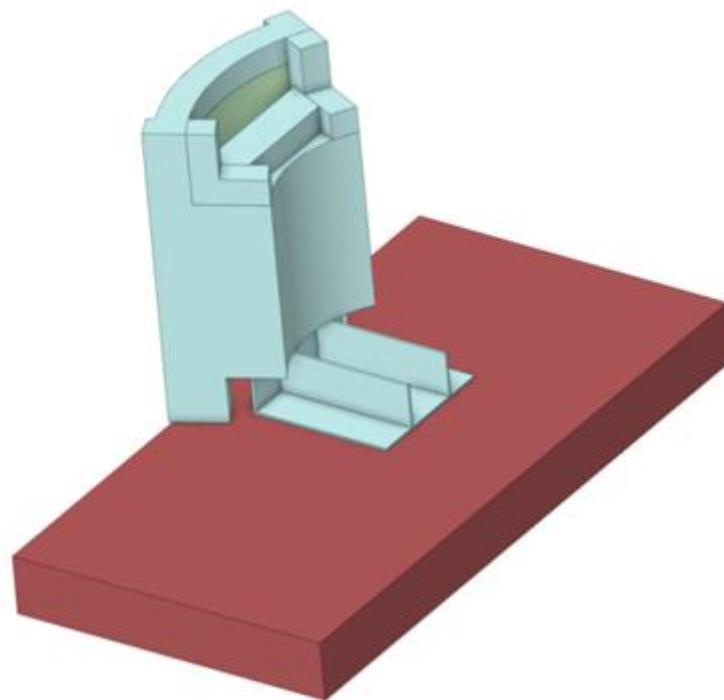
Experiment byl prováděn při dvou topných příkonech, proto je zkoumán vliv topného příkonu, aby se potvrdila odezva výpočetního modelu na změnu příkonu. U experimentu byla při změně topného příkonu o 10,5 W průměrná změna teplot o 2 °C tedy 0,190 °C/W. U výpočetního modelu byla průměrná změna teplot 4,73 a 7,32 °C při změně příkonu o 19 respektive 29 W, což odpovídá teplotní závislosti 0,249 respektive 0,252 °C/W.

4.3 Vyhodnocení citlivostní analýzy

Vyhodnocením citlivostní analýzy bylo dospěno k závěru, že v modelu nebyl nalezen parametr, který by měnil hodnoty a rozsah teplot nebo dostatečně přiblížil výsledky výpočtu k experimentálním hodnotám. Z toho důvodu bylo přezkoumáno zadání úlohy a hledání možných příčin nesouladu výpočtového modelu s reálným experimentem.

Průběhu teplot získaných výpočtem se oproti experimentu liší v rozdílu teplot naměřených v místech nad a pod širší částí kontejneru (TC19 a TC20), jejichž rozdíl byl u všech zkoumaných vlivů ~ 1 °C, oproti experimentu, kde byl rozdíl 3,5 °C. Další odlišností je rozdíl mezi průměrnou teplotou žeber a maximální teplotou pod izolací (v místech topení - TC16), kdy u zkoumaných vlivů je ~ 12,5 °C a u experimentu ~ 16,5 °C a ještě větší rozdíl při porovnání průměrné teploty žeber s TC17 nebo TC18 (experiment ~ 12,3 °C; výpočty 6,5 °C).

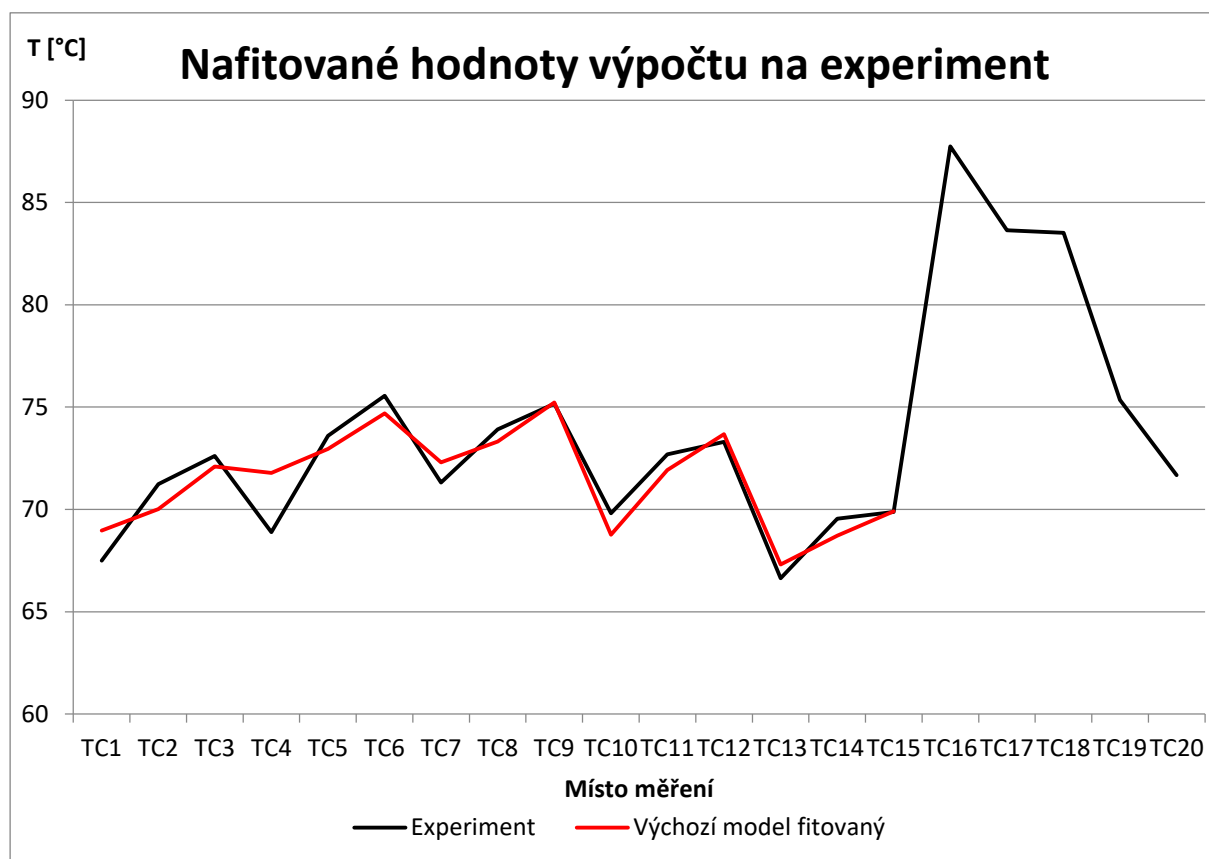
Toto pozorování vedlo k předpokladu nedokonalé izolace, která by mohla mít za následek vyšší teploty pod izolací oproti žebřům. Na fotografiích, které byly poskytnuty k zadání úlohy nebylo viditelné celkové provedení izolace. Z toho důvodu byl přezkoumán vliv nedokonalé izolace na průběh teplot a zároveň byla kontaktována ŠKODA JS ohledně poskytnutí dalších fotografií s provedením izolace. Na Obr. 4-14 je vidět upravený model z poskytnutých fotografií.



Obr. 4-14 Upravený model pro zkoumání vlivu izolace

Při zkoumání vlivu izolace byla izolace záměrně vytvořena velice špatně ve smyslu provedení v závislosti na funkci, aby bylo možné lépe pozorovat vliv na průběh teplot pod izolací a na žebrech.

Dalším předmětem zkoumání byl průběh teplot na samotných žebrech. Zde je na první pohled viditelná nesrovnalost v průběhu teplot na prvních devíti termočláncích¹³. Porovnáním teplot na špičce a na dně žebra je u experimentu rozdíl ~ 5,3 °C a u výpočtů ~ 3°C. Při nařívání vypočtených hodnot na hodnoty experimentu je lépe vidět rozdíl v průběhu teplot na žebrech.



Obr. 4-15 Graf průběhu teplot na žebrech

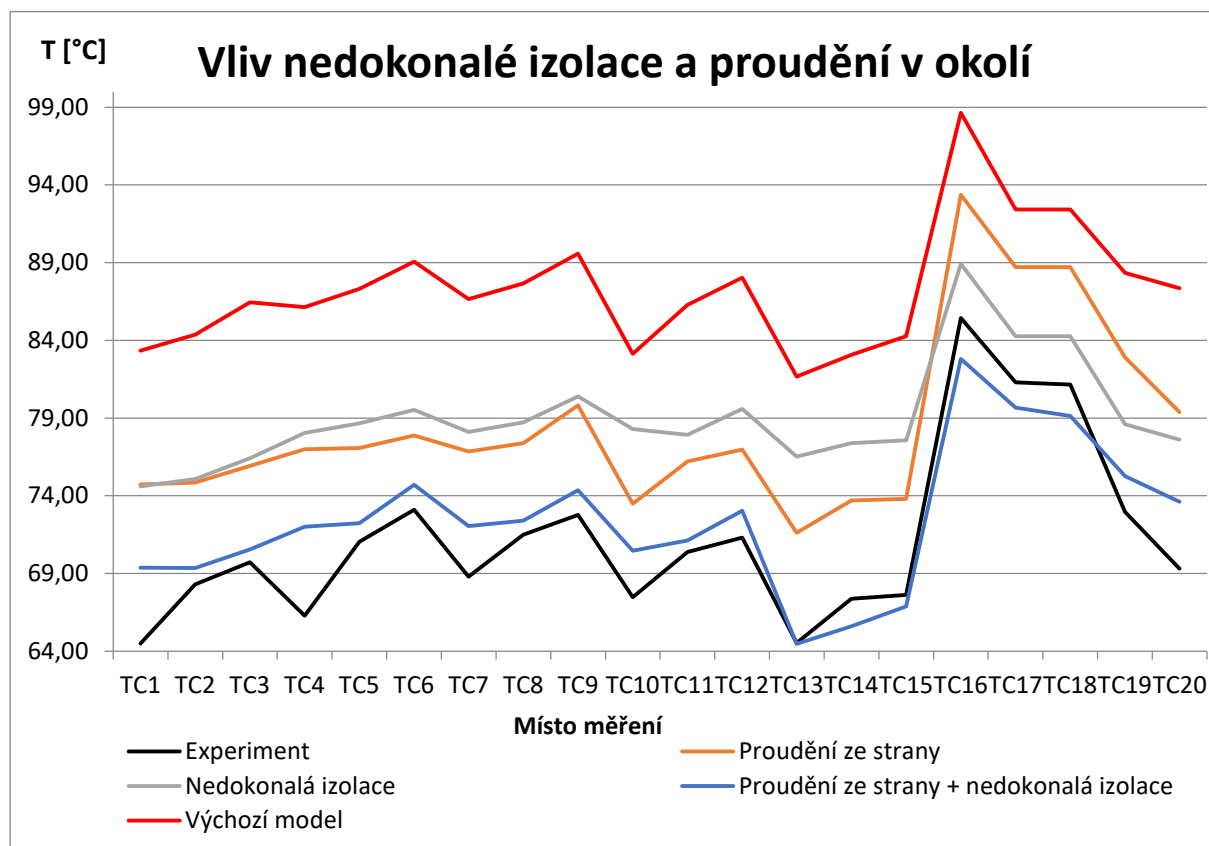
Připomeňme si, že číslování termočlánců na žebrech je shora dolů, tedy průběh teplot na žebrech je prakticky správný v oblastech dolní části kontejneru. Po výšce kontejneru se mění především rychlost proudícího vzduchu, což nejspíš hraje největší roli v rozdílnostech oproti experimentu.

Z průběhu teplot na žebrech však nebyl vyhodnocen žádný předmět dalšího zkoumání, protože průběh teplot po nařívání výpočtu na experiment je dostatečně přesný vezmeme-li v úvahu absolutní rozdíly teplot, které jsou relativně větší.

Vzhledem k zadání úlohy byly nadále prověřeny další vlivy na snížení teplot na žebrech a to především vliv okolního prostředí. Vzhledem k horizontálnímu provedení žeberek je konvektivní přestup tepla (vyjma špičky žebra) uskutečňován při tvoření vírů v mezižebním

¹³ Rozdílem u všech žeberek je i rozložení teplot na žebrech ve směru od stěny, ale vzhledem k nepřesně zadanému místu termočlánců na stranách žeberek (TC2, TC5, TC8, TC11 a TC14) nebyl tento úkaz dále zkoumán.

prostoru, což je z hlediska odvodu tepla horší způsob, než pokud by byla žebra vertikálně¹⁴. Z tohoto důvodu byl zkoumán vliv proudění vzduchu ze strany.



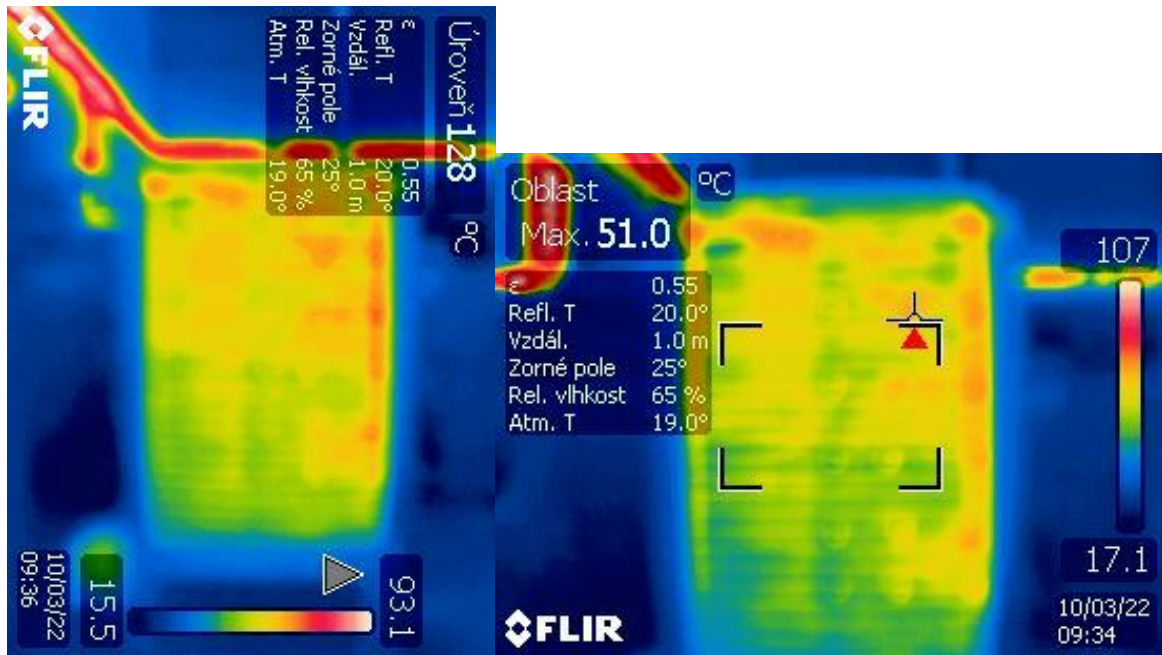
Vliv nedokonalé izolace měl očekávanou odezvu v rozložení teplot pod izolací, která se přiblížila experimentu a zároveň vedla ke snížení teplot na žebrech. Ke snížení teplot na žebrech vedl také případ s prouděním vzduchu ze strany s tím, že se změnilo i rozložení teplot na samotných žebrech, kde byla větší diference teplot mezi špičkou a dnem jednotlivých žeborů. Při výpočtu s oběma předpoklady se pak výsledné rozložení teplot velmi blíží rozložení teplot při experimentu.

Výsledky byly konzultovány se Škodou JS, která poskytla další fotografie a videa ohledně provedení experimentu. Z fotografií bylo již lépe vidět provedení izolace, avšak ne zcela jednoznačně. Na videu bylo zaznamenáno provedení testu s kouřem, který byl vpouštěn pod žebra a ze kterého bylo patrné, že proudění vzduchu kolem žeborů bylo ve svislém směru, což vyloučilo případ proudění vzduchu ze strany. Na základě těchto skutečností a poskytnutých materiálů byly vytipovány další předměty zkoumání vlivů na výpočetní model a byla upravená izolace.

4.4 Zkoumání vlivu dalších parametrů

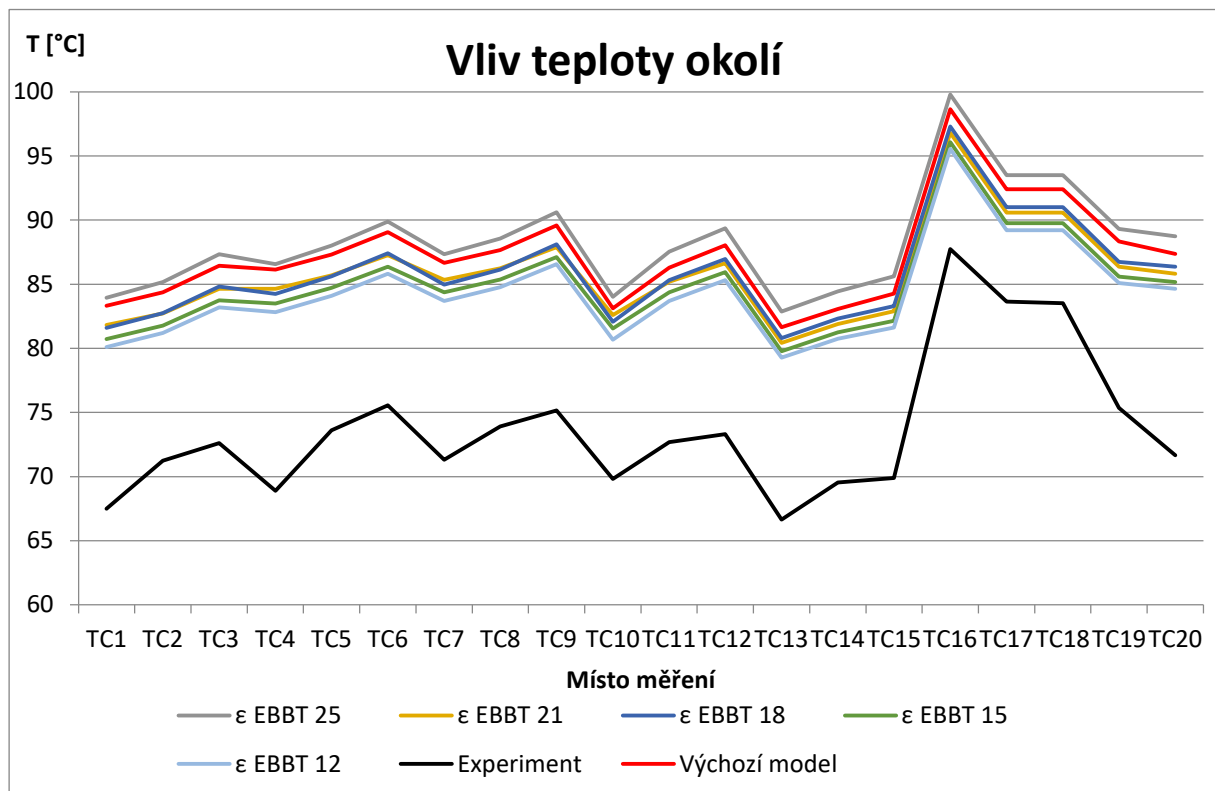
Na poskytnutých snímcích z termokamery bylo vidět zapnuté vytápění místnosti. Toto zjištění vedlo k přehodnocení údaje o teplotě při provádění experimentu.

¹⁴ Tento způsob provedení žebrování je z důvodu přepravy kontejneru, které se provádí s kontejnerem v horizontální poloze.



Obr. 4-16 Fotografie z termokamery

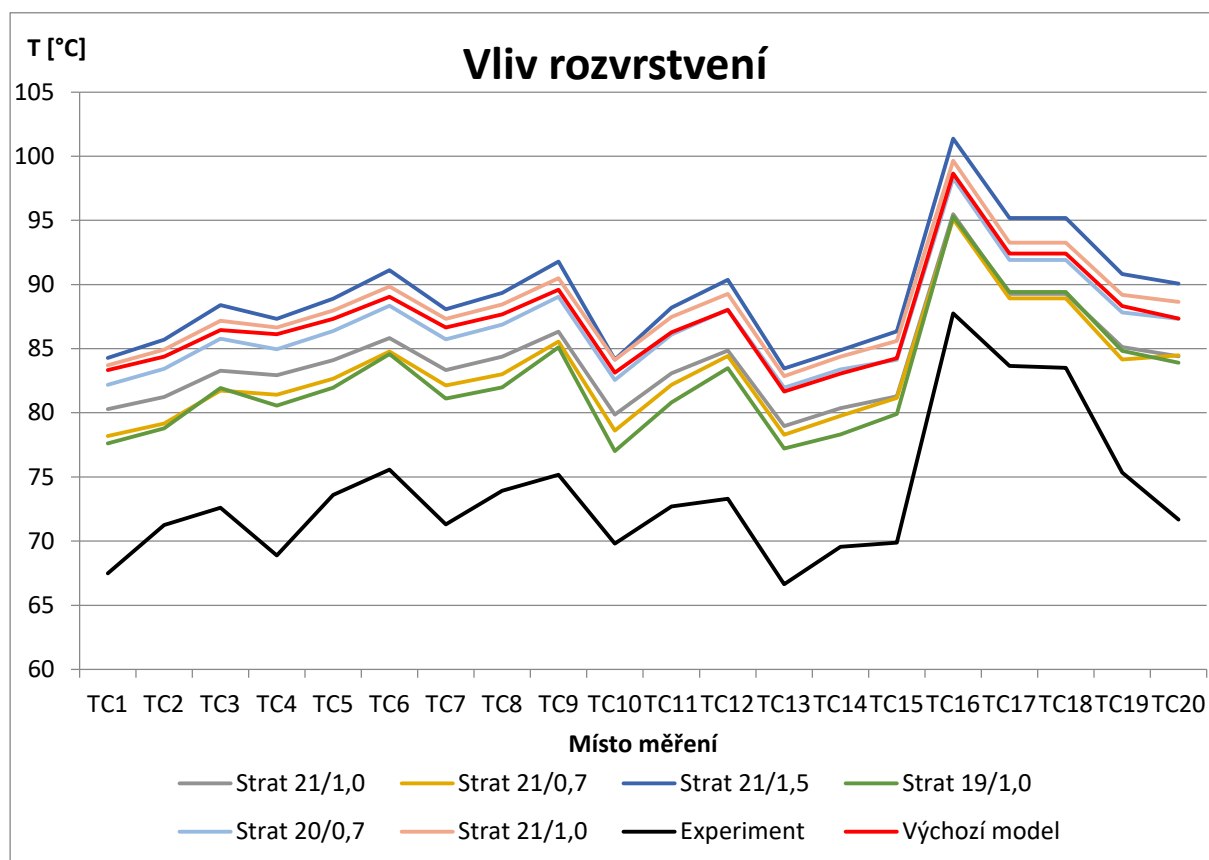
Byl přijat předpoklad, že při zapnutém topení je teplota vzduchu v místnosti vyšší než teplota stěn. To má u experimentu vliv na přestup tepla sáláním, protože míra výkonu přenášeného radiací závisí na čtvrté mocnině rozdílu teplot stěn a tedy snížení teploty okolních stěn zvýší tepelný tok přes žebra.



Obr. 4-17 Vliv teploty okolí¹⁵

¹⁵ Zkratka EBBT – External Black Body Temperature značí způsob zadání okrajové podmínky jako teploty stěny za okrajem modelového prostoru – za inletem. Jedná se o teplotu stěny považovanou za absolutně černé těleso.

Dále byl s teplotou uvažován vliv rozvrstvení ve svislém směru, neboť teplota v místnostech nebývá po výšce konstantní.



Obr. 4-18 Vliv rozvrstvení¹⁶

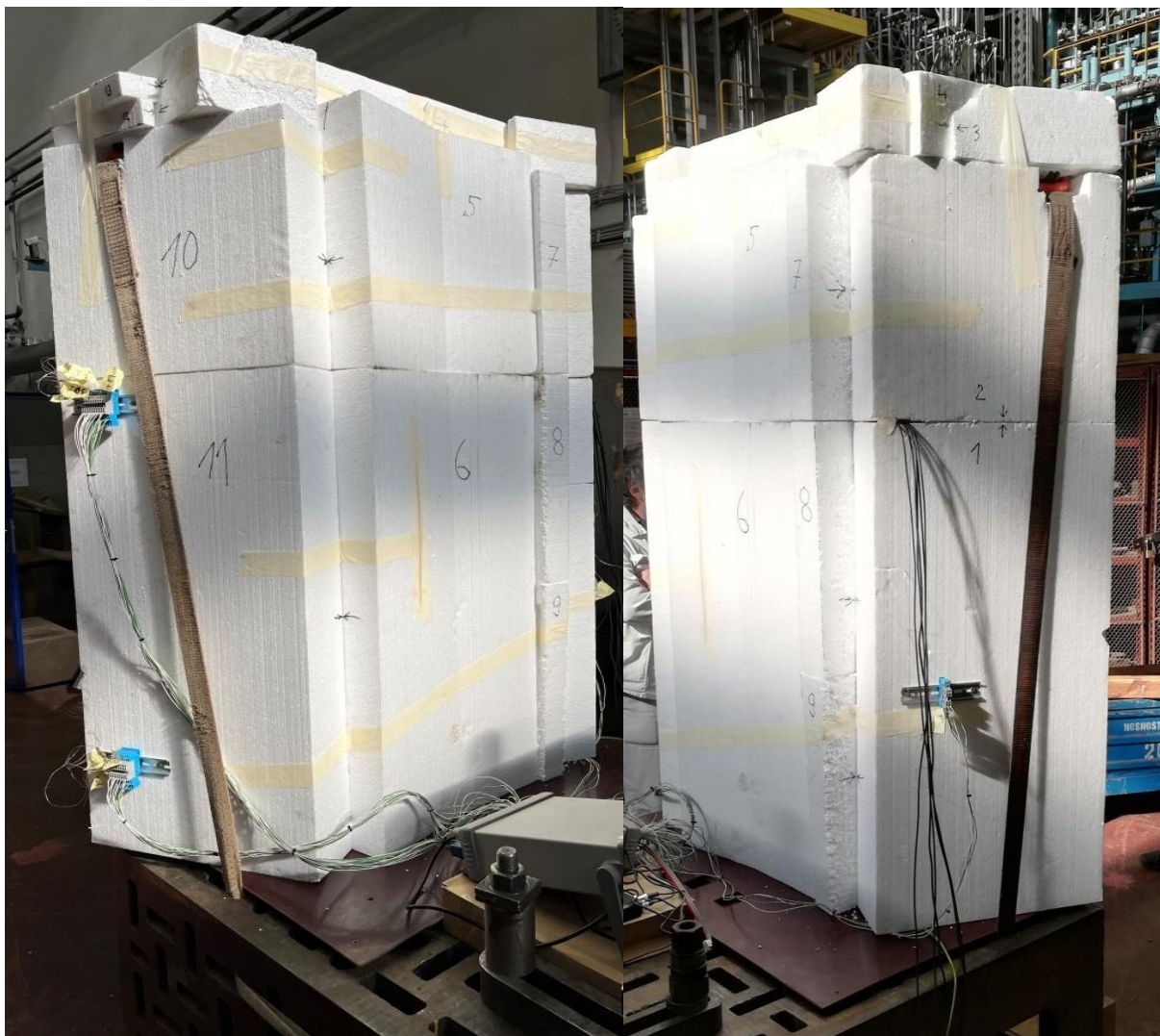
Tento vliv představuje největší neznámou. Rozvrstvení teplot po výšce místnosti nastane při jakékoli teplotní diferenci stěn v místnosti nebo při ohřívání prostoru (vzduchu) uvnitř. Je tedy jasné, že v podmínkách, při kterých byl experiment provedený, byla teplota po výšce místnosti rozvrstvena. Ovšem stanovení teplotního profilu by vyžadovalo měření teploty v několika výškách, což nebylo uskutečněno. Nemalou roli pak hraje roční období, kdy teploty stěn a stropu mohou během dne podstatně měnit svou teplotu a tím ovlivňovat rozvrstvení teploty uvnitř místnosti a cirkulaci vzduchu, což může být ovlivněno i v případě větrání.

Vzhledem k podchycení proudění okolního vzduchu bylo změněno i provedení stolu z desky na reálný tvar odpovídající skutečnosti.

Roli nepochybně hraje i odvod tepla stolem, který je od kontejneru izolován dřevěnou deskou. Materiál stolu je ocel, což je dobrý vodič tepla a vzhledem k velkému povrchu díky děrování na straně a v horní části lze předpokládat dobrou schopnost odvodu tepla do prostředí.

¹⁶ Popisky jednotlivých datových řad znamenají teplotu ve střední výšce kontejneru / teplotní spád na 1 metr výšky.

4.4.1 Reálné provedení izolace

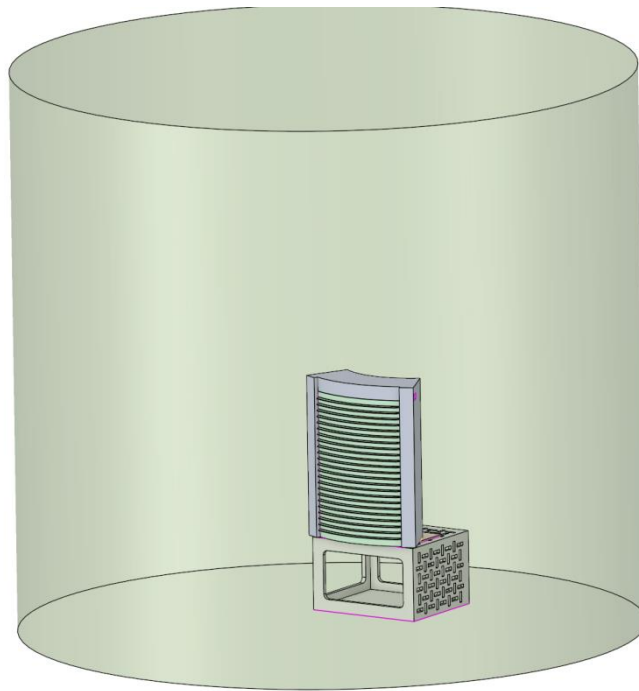


Obr. 4-19 Fotografie reálného provedení izolace

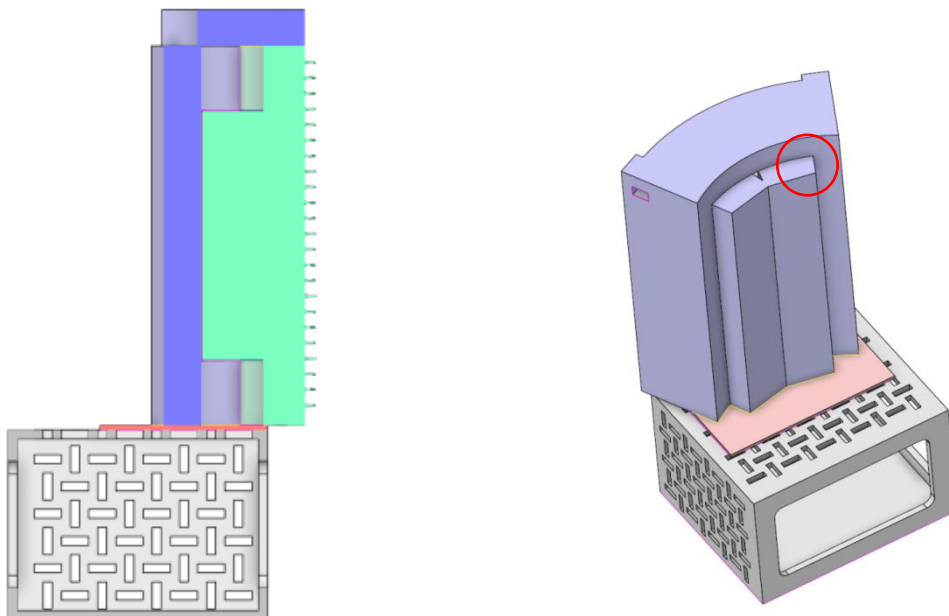
Fotografie reálného provedení izolace ukazují, že pod a nad rozšířenou částí kontejneru byl prostor vyplněn vzduchem a lze předpokládat, že na okrajích nebylo překrytí izolačních desek přes celou šířku desky. Dále je možné vidět, že chybí izolace v horní části kontejneru z důvodu uchycení ke stolu popruhem. Bohužel z fotografií nebylo vidět provedení izolace shora.

4.5 Upravený model

Upravený model poté vypadal následovně:



Obr. 4-20 3D model upraveného návrhu



Obr. 4-21 Detail provedení stolu a izolace upraveného modelu

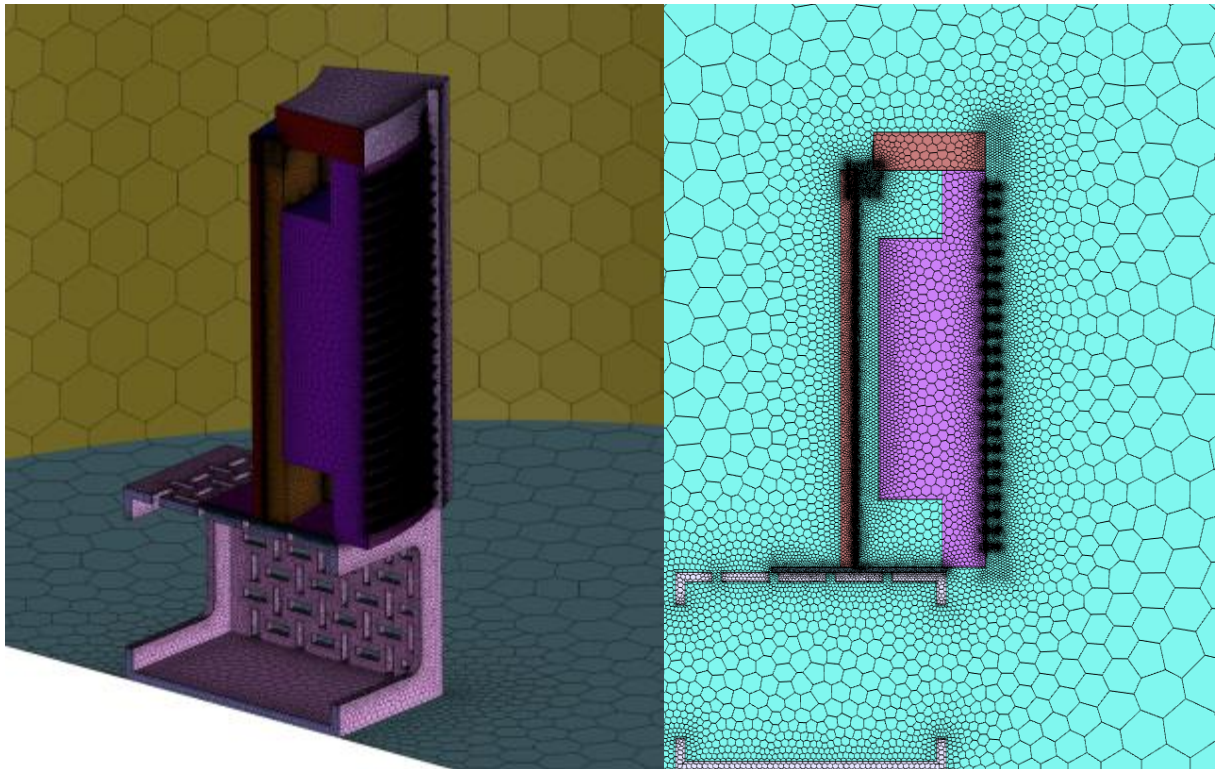
Okolní prostor byl vytvořen jako válcový, kvůli teplotnímu rozvrstvení, aby byl potlačen vliv proudění zapříčiněného diferencí teploty v závislosti na vzdálenosti od kontejneru v horizontálním směru.

V izolaci je vytvořena záměrně díra, která kompenzuje nedokonalosti v provedení izolace. Dále je dle fotografií předpoklad, že na hranách izolačních desek není překrytí přes celou tloušťku desky. V místech uchycení kontejneru ke stolu pak izolace není vůbec.

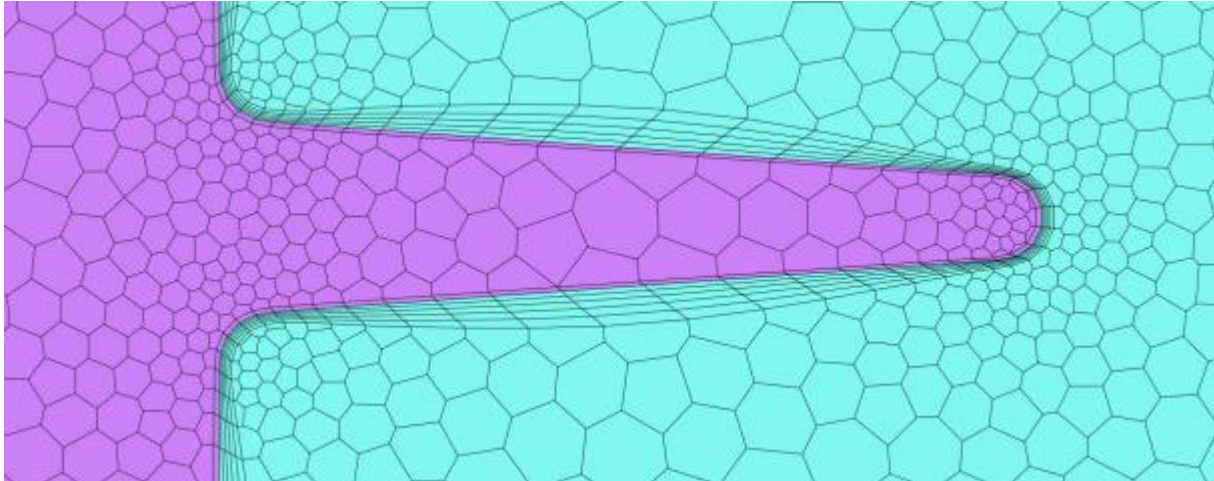
Kontejner je umístěn vůči stolu tak, jak je vidět na fotografiích, ze kterých byly odhadnuty i rozměry dřevěné desky (kromě tloušťky, která byla zadaná).

4.5.1 Sít'

Z modelu byla následně vytvořena polyhedrální sít' u které velikost buněk odpovídala zjištěným rozměrům z citlivostní analýzy na vliv sítě (viz kapitola 4.2.4). Na základě praxe vytváření sítí byla u žebér přidána mezní vrstva v solidu pro přesnější odečty teploty povrchu žebér a sít' byla zahuštěna v okolí žebér a v místech teplotních mostů u izolace – tedy tam, kde je předpoklad nejvyšších gradientů teplot a změn v proudění média. Korek nebyl modelován kvůli komplikacím při vytváření modelu a následné sítě, protože při své tloušťce 4 mm by představoval množství malých ploch a hran, které zbytečně zahušťují sít' v místech, kde to není nutné. Tenkostěnná tělesa je vhodné zahrnout do výpočtu nastavením tepelného odporu na stěnách.



Obr. 4-22 Polyhedrální sít' upraveného modelu



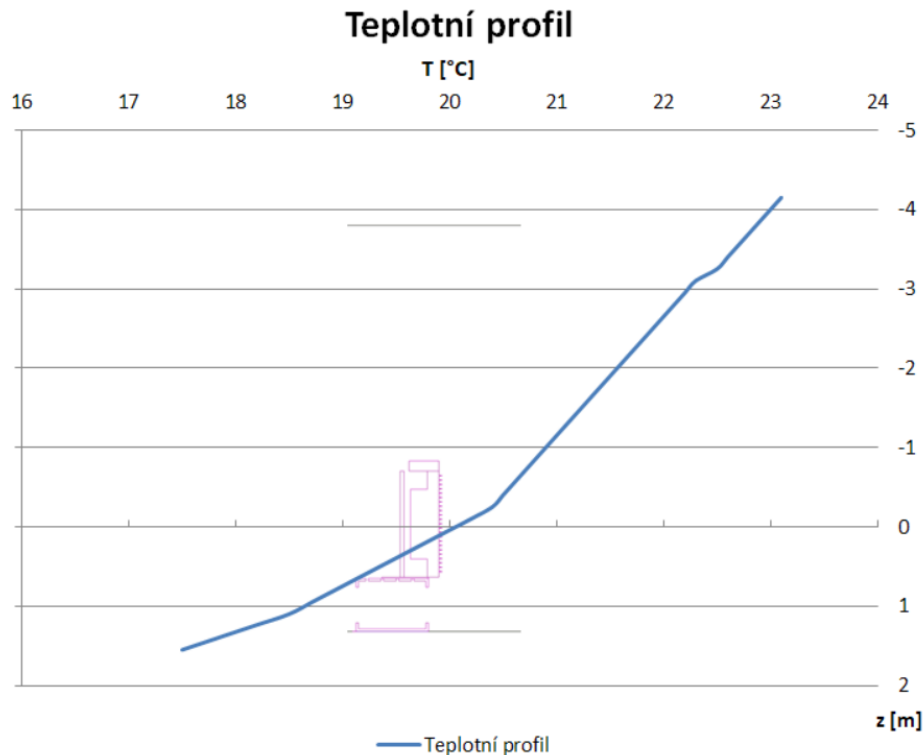
Obr. 4-23 Detail žebra s mezní vrstvou upraveného modelu

4.5.2 Nastavení výpočtu

Z předpokladů a dat získaných citlivostní analýzou byl následně nastaven výpočet.

Turbulentní model byl zvolen $k-\varepsilon$ Realizable a radiační model byl zvolen „Surface to Surface“ s emisivitou povrchu žeber $\varepsilon = 0,96$ a izolace $\varepsilon = 0,95$. Parametry materiálů nebyly změněny oproti výchozímu stavu (viz kapitola 4.1.3). Největší neurčitost při nastavování výpočtu představoval teplotní profil pro rozvrstvení teploty. Ten byl zvolen jako vlastní na základě fotografií z termokamer. Zároveň byla nastavena „tvrdá“ podmínka teploty podlahy odpovídající teplotnímu profilu v dané výšce. Jako teplota stěn okolí byla zvolena teplota 17 °C dle snímků z termokamer¹⁷.

¹⁷ Zde se jedná o odhad, neboť teploty vykreslované na termokameře jsou závislé na nastavené emisivitě při měření.



Obr. 4-24 Ukázka teplotního profilu s vloženým obrysem 3D modelu¹⁸

4.5.3 Výsledky

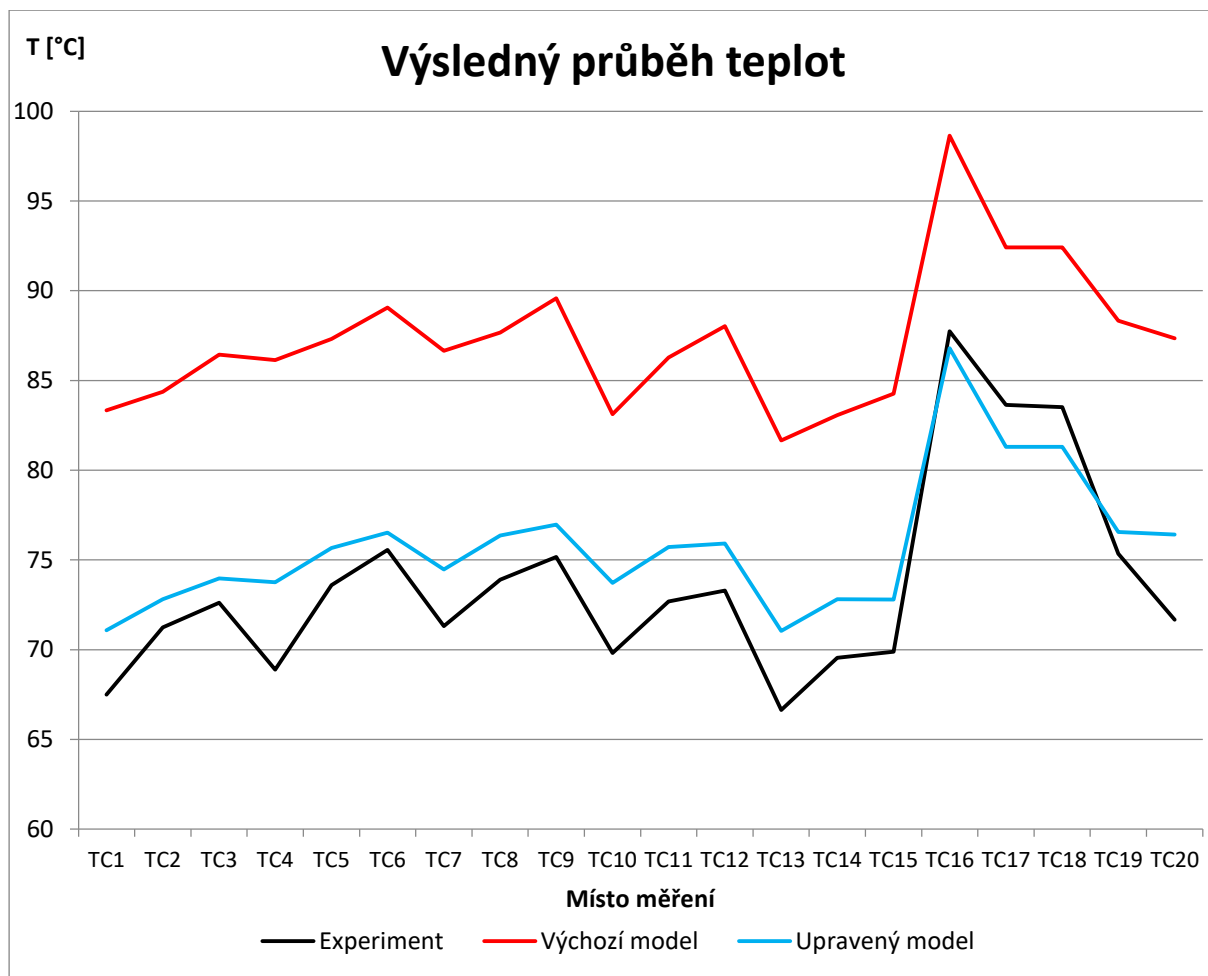
Výsledné teploty se již daleko více blíží teplotám naměřeným při experimentu. Všimněme si teplot TC19 a TC20 (nad a pod širší částí kontejneru), které se prakticky rovnají, avšak teplota TC20 naměřená při experimentu byla nižší než TC19 o ~ 3,5 °C. Je tedy důvod předpokládat, že dolní část kontejneru byla hůře odizolována od prostředí než horní část. Dodatečný odvod tepla by měl mít za následek další snížení teploty na žebrech.

Připomeňme také, že termočlánky na žebrech jsou číslovány shora a že stále dochází k rozdílnému průběhu teplot na horních žebrech, o čemž bylo pojednááno v kapitole 4.3. Rozdíl teplota mezi dnem a špičkou žeber je vyšší, než u naměřeného experimentu – to znamená nižší odvod tepla. Toto je další faktor, který může hrát roli v rozdílném průběhu teplot TC19 a TC20. Bohužel nebyl nalezen parametr, který by průběh teplot na žebrech měnil¹⁹.

Z důvodu vysoké neurčitosti výpočetního modelu, vycházejících z odhadovaných předpokladů, nebylo dále ve výpočtech a dalšímu přibližování se výsledkům experimentu pokračováno.

¹⁸ Souřadnice výšky z odpovídá souřadnicovému systému 3D modelu.

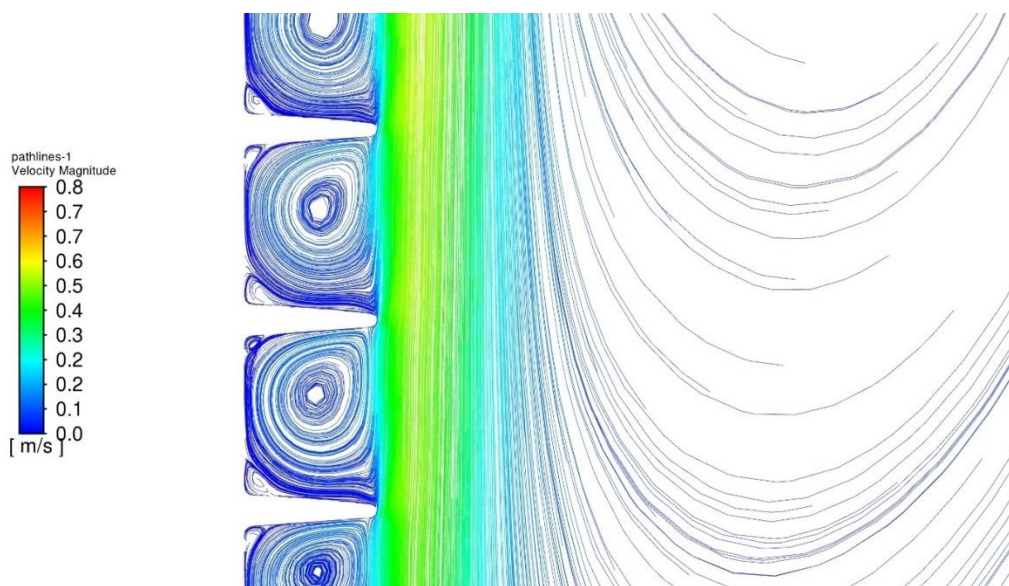
¹⁹ Kromě nereálně velké drsnosti povrchu žeber, což bylo zjištěno při jedné ze simulací díky chybnému zadání nastavení.



Obr. 4-25 Výsledný průběh teplot

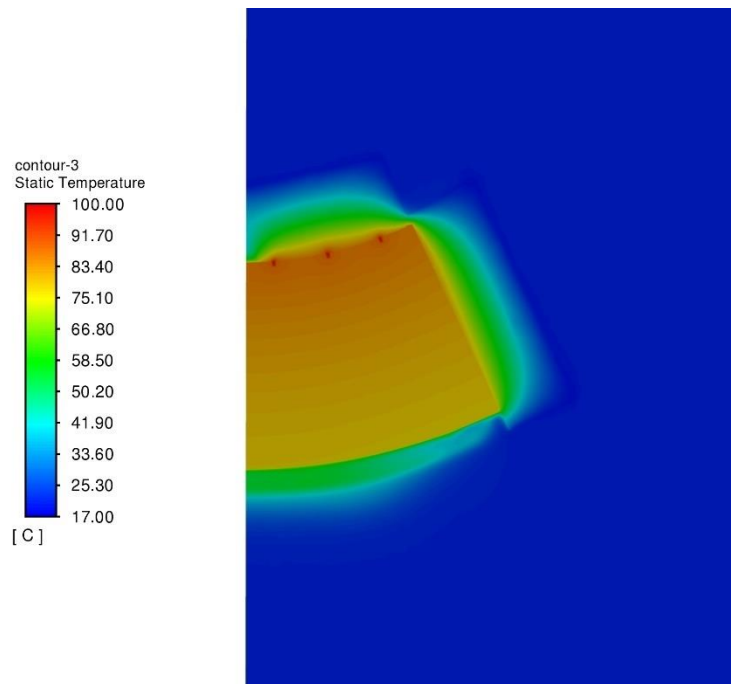
4.5.4 Grafický výstup upraveného modelu

V této části budou popsány některé grafické výstupy z upraveného modelu, další jsou pak možné k nahlédnutí v příloze č. 3.



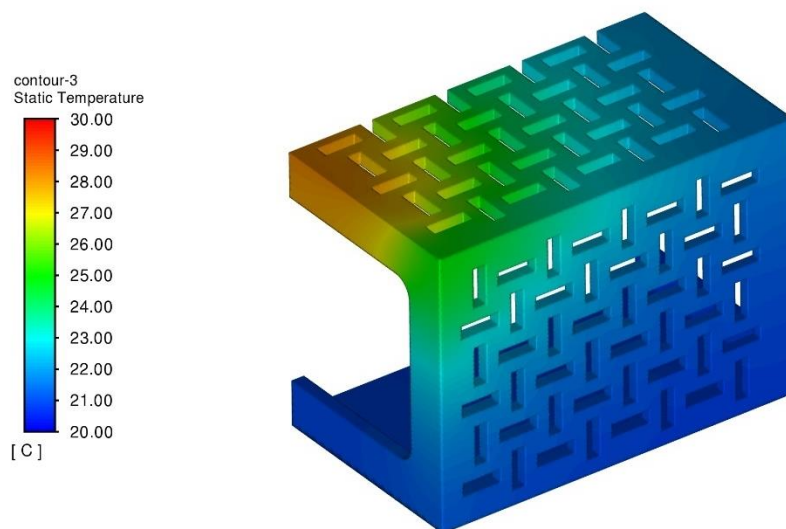
Obr. 4-26 Proudnic v okolí žeber

U proudění v okolí žeber je zjevné tvoření vírů v mezižeberním prostoru. Jak již bylo zmíněno, tento způsob orientace je pro odvod tepla méně vhodný než při vertikálním provedení žeber. Zvýšení odvodu tepla vlivem směru proudění bylo také ukázáno v kapitole 4.3.



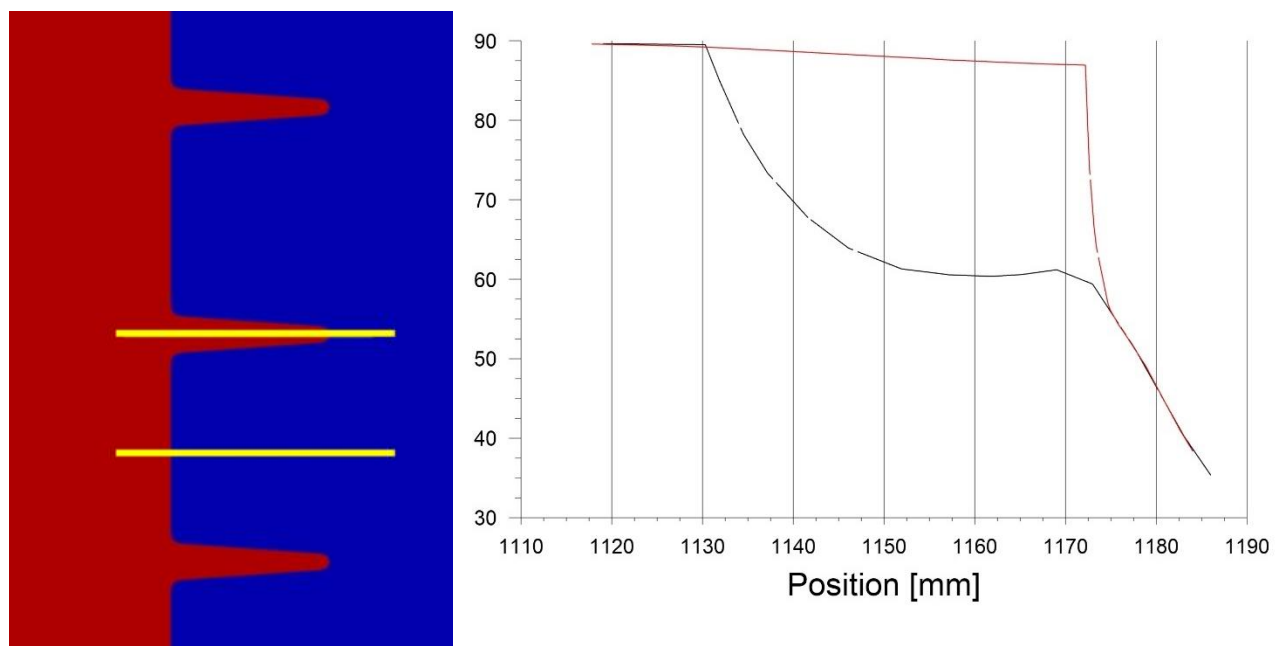
Obr. 4-27 Teplotní pole upraveného modelu

Z teplotního pole je vidět, že je teplota rovnoměrně rozložena v radiálním směru od topných těles a je to tedy důkaz toho, že navržený experiment dostatečně věrohodně simuloval reálné podmínky v kontejneru na vyhořelé palivo, kde je předpoklad rozložení teploty v radiálním směru.



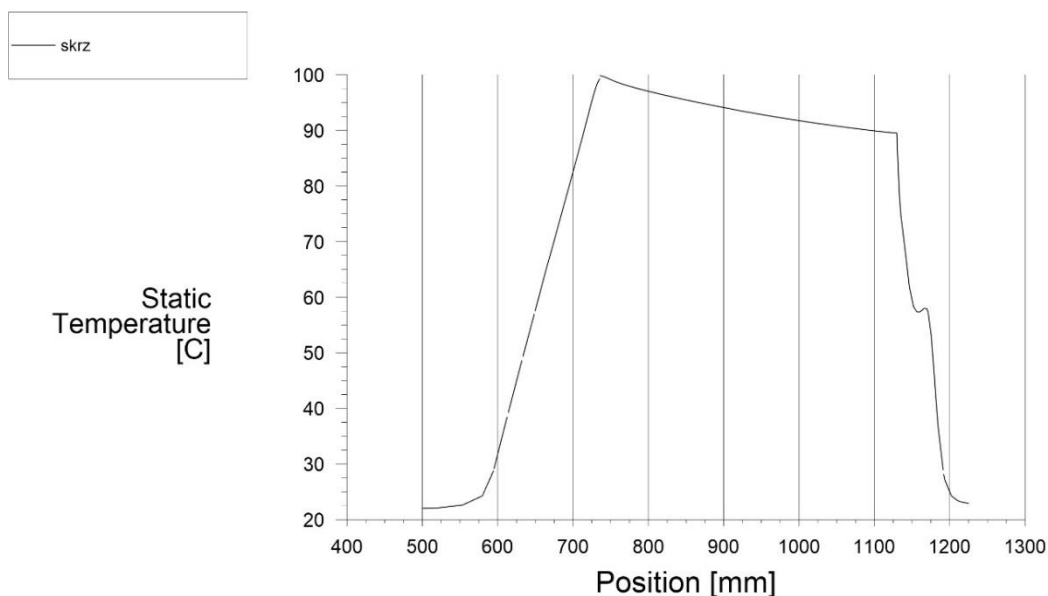
Obr. 4-28 Teplota na povrchu stolu

Stůl funguje jako dobrý prostředek pro odvod tepla, jak dokazuje Obr. 4-28 na kterém můžeme vidět, že teploty na krátké vzdálenosti od kontejneru klesají na úroveň teploty okolního vzduchu.



Obr. 4-29 Graf teploty skrz žebra [°C]

Z průběhu teploty na špičce žebra (Obr. 4-29 - červeně) je zjevný velký gradient teploty v proudové oblasti, což může být problém u měření pomocí termočlánků umístěných právě v tomto místě. V mezižebním prostoru se pak projevuje vliv víření a teplota v blízkosti hranice vymezené špičkami sousedních žeber mírně roste, než přejde do proudové oblasti podél žeber. Průběh teploty skrz celý kontejner je pak vidět na Obr. 4-30:



Obr. 4-30 Graf teploty skrz kontejner [°C]

V ocelovém kontejneru je zjevný logaritmický průběh teploty v radiálním směru. V izolaci tvořené izolačními deskami je pak průběh lineární, o čemž bylo pojednáno v kapitole 3.1. Protože je průběh vykreslován pro úsečku vedoucí skrz mezižební prostor, je zde opět vidět zvýšení teploty v místě před proudovou oblastí podél žeber.

5 Doporučení pro úlohy podobného typu

Ze zkušeností z modelování přirozené konvekce byly vyvozeny následující doporučení k provádění experimentu pro účely validace CFD simulace:

- a) Celá sestava experimentu by měla být geometricky zcela definovaná.
- b) Během experimentu by měla být změřena teplota okolních povrchů.
- c) Teplota prostředí by měla být změřena v několika bodech po výšce pro určení teplotního profilu, který je v místnosti.
- d) Samotná místnost by měla být definována z důvodu řešení proudění okolního vzduchu v místnosti.
- e) Měření na samotném díle by mělo být v co nejvíce bodech pro co nejpřesnější změření teplotního pole.
- f) Tělesa, u kterých je předpoklad vyššího přestupu tepla radiací, by měla mít přesně změřenou emisivitu povrchu.
- g) Samotná účast na provedení experimentu.

U samotného výpočtu je z důvodu geometrie a průběhu proudění kolem žeber vhodné použít model turbulence $k-\varepsilon$ „Realizable“, který lépe predikuje proudění v oblastech silného zakřivení proudnic a vírů. Pro modelování radiace nebyl viděn podstatný rozdíl mezi modelem „Discrete ordinates“ a „Surface to Surface“, kromě vyššího výpočetního času u „Discrete ordinates“. V případě „Surface to Surface“ neměla změna počtu povrchových buněk v klastru podstatný vliv na výsledky.

U modelování přirozené konvekce má okolí sledovaného objektu podstatný vliv. Je proto vhodné vytvořit okolní prostor relativně přesně, zvláště pak u těles a povrchů, u kterých je důvodné podezření, že by mohly ovlivňovat proudění v okolí sledovaného tělesa nebo jej ovlivňovat svou sálavou energií.

Vedení tepla v tělesech je naopak výpočetně jednoduchá záležitost a není proto nutná jemná síť v místech, které nejsou ve styku s proudovou oblastí.

6 Závěr

V této diplomové práci je uveden palivový cyklus jaderného paliva následovaný rešerší možností uložení jaderného odpadu a skladování vyhořelého jaderného paliva. Dále jsou popsány základní způsoby sdílení tepla a to vedením, prouděním a sáláním.

Praktická část se věnuje CFD simulaci sdílení tepla mezi vytápěným segmentem kontejneru OS Škoda 440/84 a okolním prostředím.

Je uveden proces vytváření výpočtového modelu sestávající z vytvoření a úprav 3D modelu, vytvoření výpočtové sítě a spuštění výpočtu. U spuštění výpočtu jsou popsány okrajové podmínky, vlastnosti použitých materiálů a jsou definována místa, u kterých se budou porovnávat teploty s provedeným experimentem.

U vyhodnocení výchozího výpočtového modelu jsou porovnány výsledky vypočtených teplot pomocí simulace a reálných teplot naměřených při experimentu. Protože se výsledky simulace s experimentem neshodují v absolutně naměřených teplotách, ale i v průběhu teplot na kontejneru. Proto byla vytvořena citlivostní analýza zkoumající vlivy jednotlivých parametrů výpočtu na výsledné teploty.

Na základě komunikace se Škodou JS a díky poskytnutí dalších fotografií z experimentu byla následně citlivostní analýza rozšířena o další možné vlivy na základě různých předpokladů.

Bylo zjištěno, že emisivita žeber má zásadní vliv na přestup tepla. Rozvrstvení teplot v místnosti nebo teplota okolních povrchů je rovněž důležitá. Naopak emisivita okolních povrchů nebo mírná změna tepelné vodivosti materiálů vliv prakticky nemá. Výše uvedené parametry však nemají vliv na rozdíl teplot na žebrech a pod izolací, tedy na průběh teplot v radiálním směru, ani na rozdíl teplot mezi špičkou žeber a dnem mezi žebry. Na průběh teplot v radiálním směru má vliv provedení izolace. Bohužel se však nepodařilo najít parametr, který by změnil průběh teplot na žebrech.

Za zmínku také stojí ovlivnění proudění okolního vzduchu geometrií stolu nebo geometrií okolního prostředí.

Za jistých předpokladů vycházejících z jak z informací o experimentu, tak z citlivostní analýzy, byla provedena úprava výpočtového modelu, u níž byly výsledky již velmi blízko naměřeným hodnotám. Avšak z důvodu vysoké neurčitosti výpočetního modelu, vycházejících z odhadovaných předpokladů, nebylo dále ve výpočtech a dalším přibližování se výsledkům experimentu pokračováno.

Praktická část práce je zakončena doporučeními pro způsob provádění experimentu a modelování podobných typů úloh.

7 Bibliografie

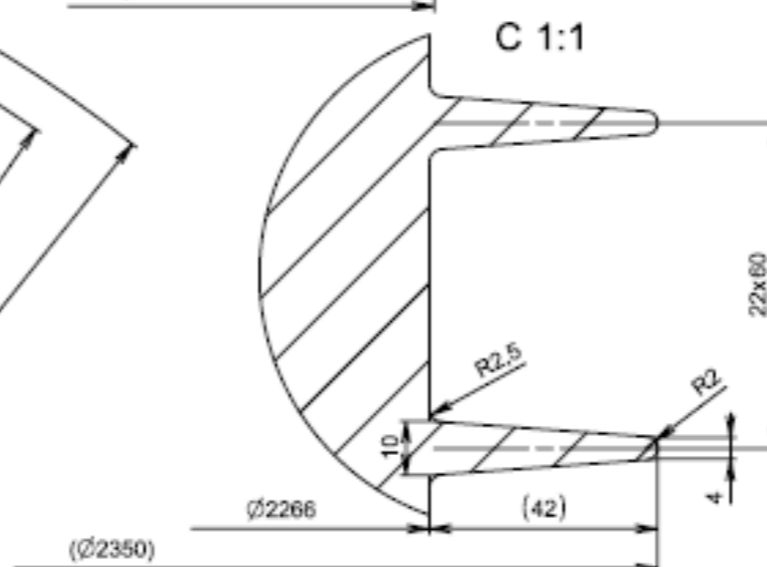
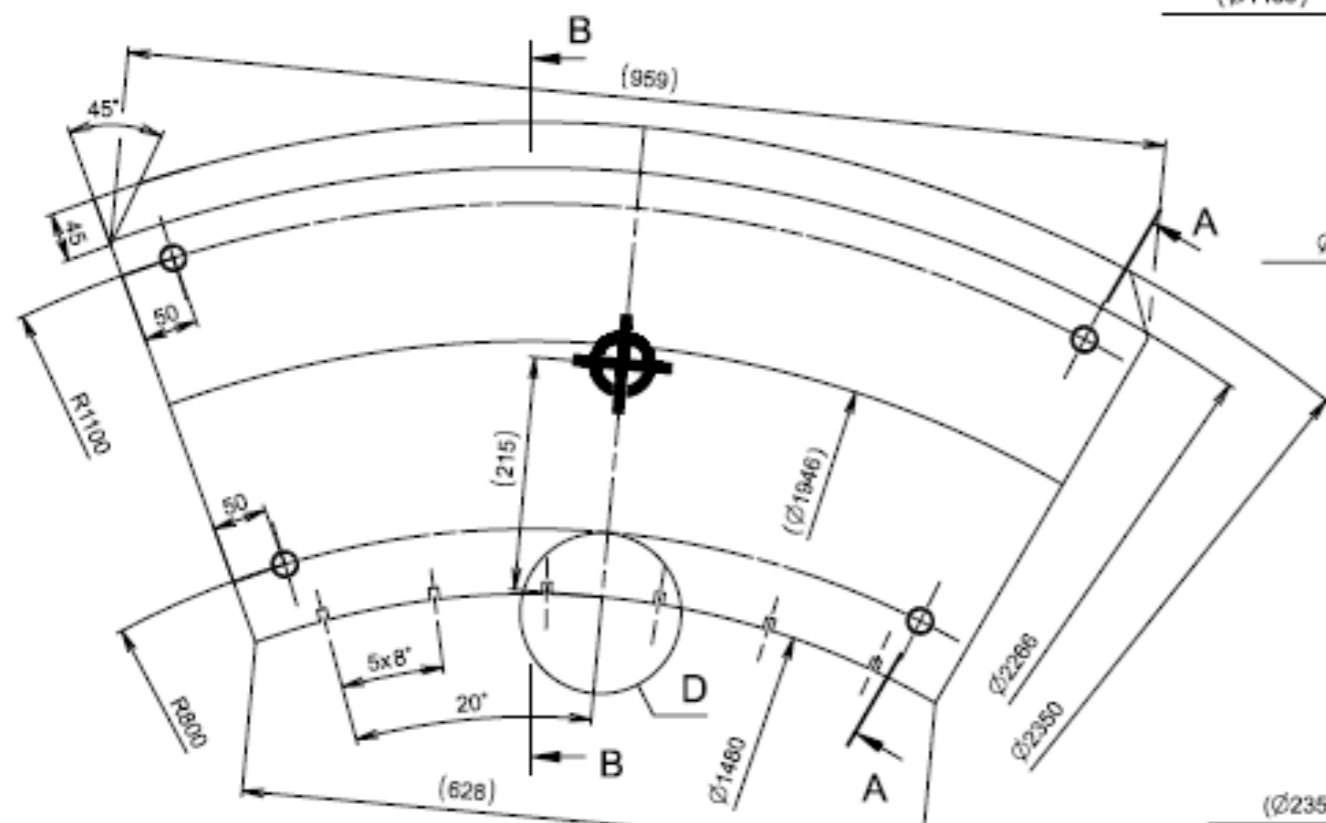
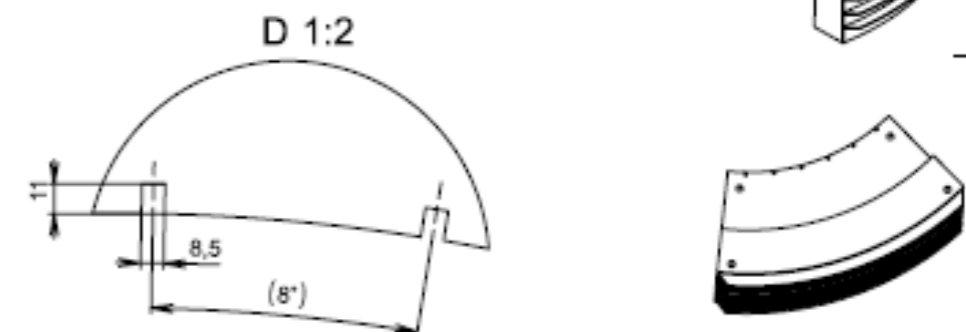
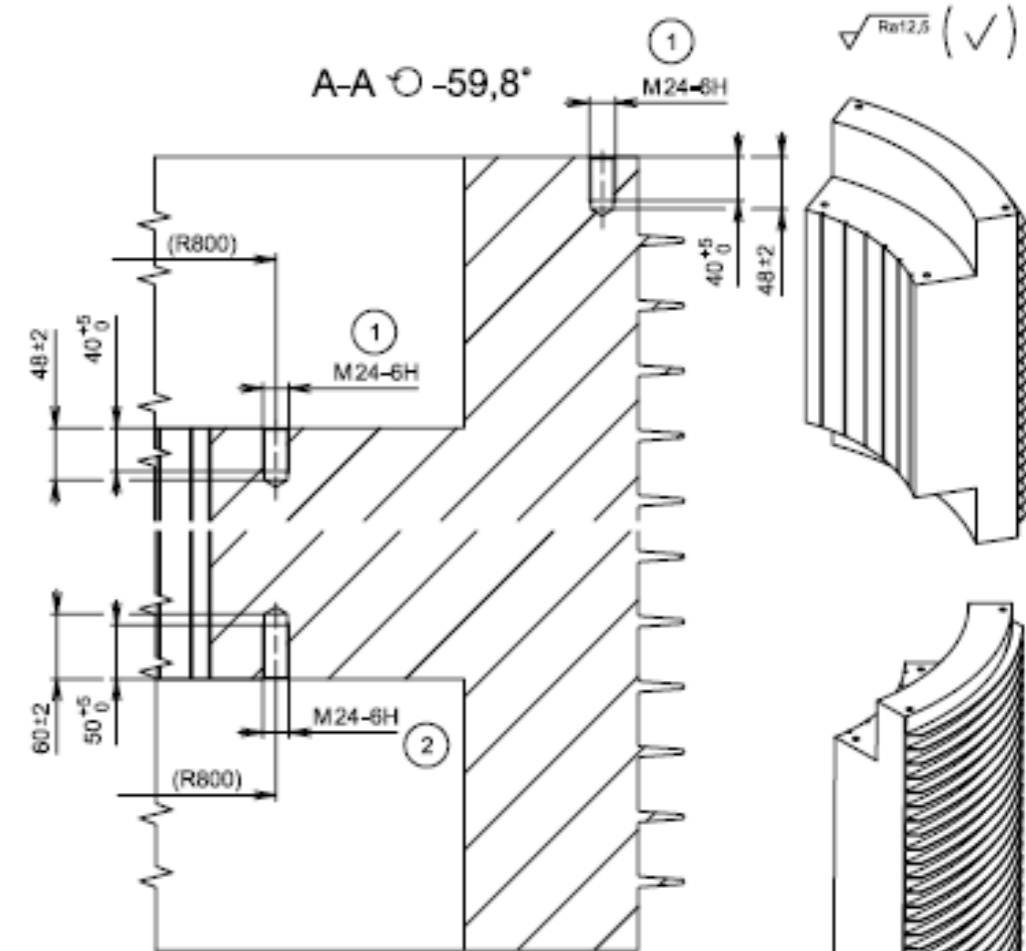
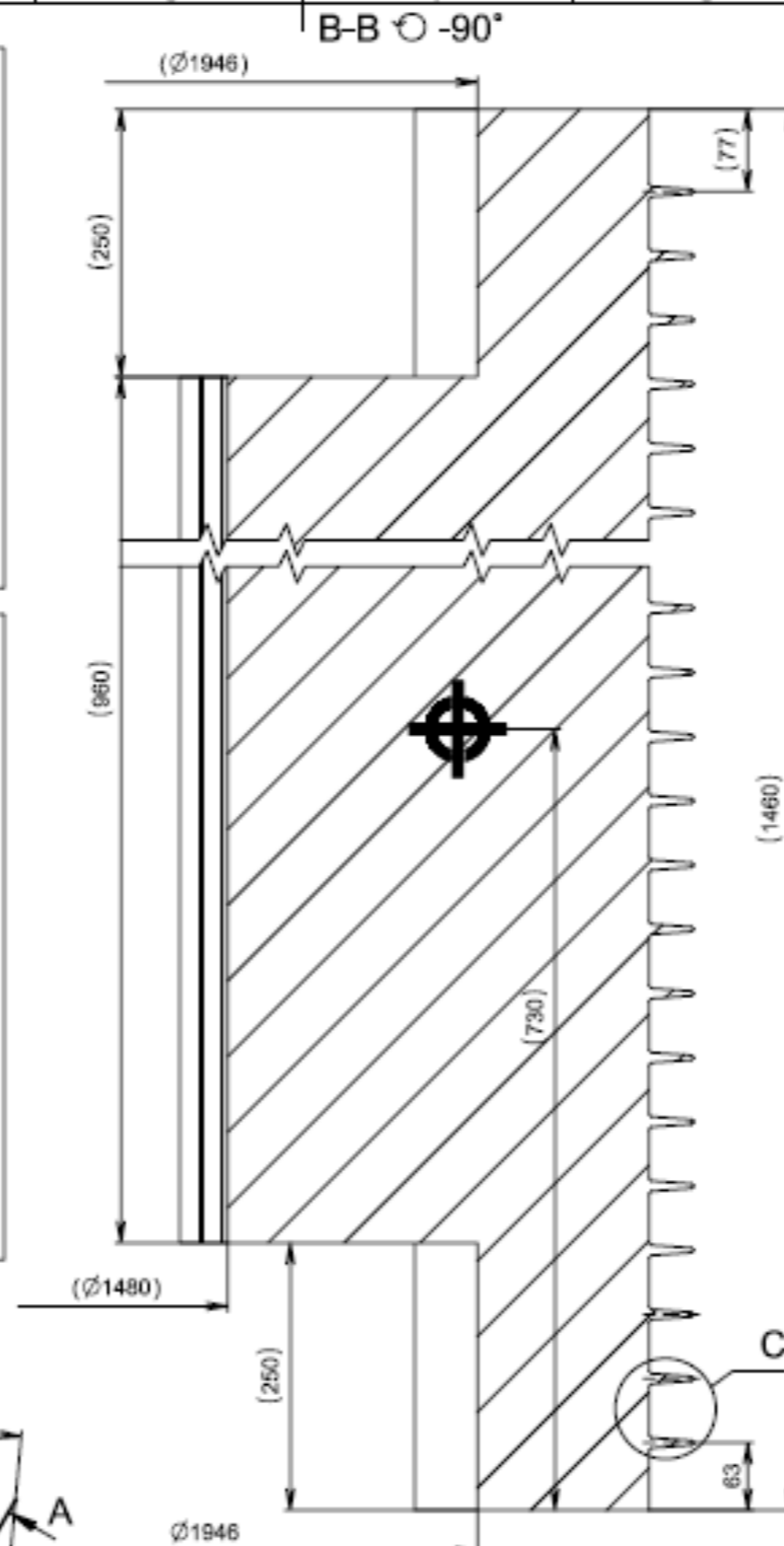
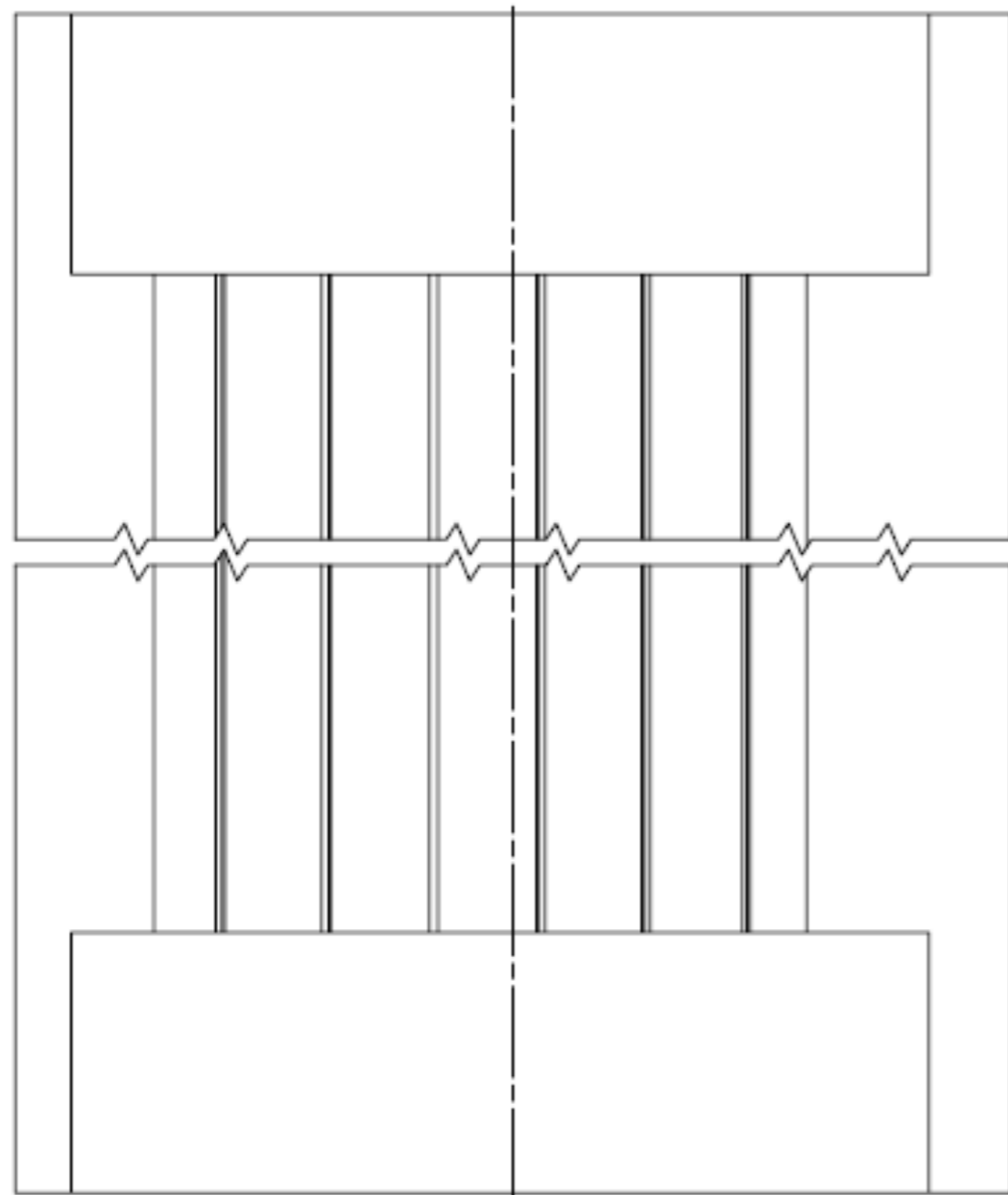
1. **World Nuclear Association.** Nuclear Fuel Cycle Overview. [Online] 2016. [Citace: 28. prosinec 2022.] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>.
2. **World Nuclear News.** CNNC launches test platform to extract uranium from seawater. [Online] 18. květen 2023. [Citace: 20. květen 2023.] <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/CNNC-launches-test-platform-to-extract-uranium-fro>.
3. **LARSON, Aaron.** Experimental Advanced Fuel Rods Loaded in Russian Nuclear Reactor. *POWER*. [Online] 29. září 2021. [Citace: 18. leden 2023.] <https://www.powermag.com/experimental-advanced-fuel-rods-loaded-in-russian-nuclear-reactor/>.
4. **Energy Encyclopedia Logo.** [Online] Simopt, 2023. [Citace: 20. leden 2023.] <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/nuclear-fuel/fuel-assembly>.
5. **Chemolunatic.** Uranium dioxide. [Online] 2023. [Citace: 20. leden 2023.] https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:UO2_Powder.jpg.
6. **Financial Times.** Uranium prices soar as investors scoop up nuclear power fuel. [Online] Financial Times, 2023. [Citace: 21. leden 2023.] <https://www.ft.com/content/624e3ac6-ffb0-49ee-959f-e59c27e96c80>.
7. **ČEZ.** VYHOŘELÉ PALIVO. [Online] [Citace: 20. únor 2023.] https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html.
8. **SURO.** Základní pojmy. [Online] 2023. [Citace: 2. únor 2023.] <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>.
9. **SÚRAO.** Radioaktivní odpady. [Online] [Citace: 20. březen 2023.] <https://www.surao.cz/onas/radioaktivni-odpady/>.
10. **JOYCE, Malcolm.** Radioactive Waste Management and Disposal. [autor knihy] Butterworth-Heinemann. *Nuclear Engineering*. 2018.
11. **ČEZ.** DOČASNÉ SKLADOVÁNÍ A KONEČNÉ UKLÁDÁNÍ. [Online] [Citace: 20. únor 2023.] https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/docas_3.html.
12. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*. [IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1)] Vídeň : IAEA, 2022.
13. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors*. [Proceedings Series - International Atomic Energy Agency] Vídeň : IAEA, 2019.
14. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Spent Fuel Storage Options: Challenges and Solutions*. [Prezentace] Vídeň : IAEA, 2021.
15. **ZAJÍC, Jan.** *Teplotní výpočet obalového souboru pro přepravu a skladování vyhořelého jaderného paliva*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
16. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Storage of Radioactive Waste*. [IAEA Safety Standards Series No. WS-G-6.1] Vídeň : IAEA, 2006.

17. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Storing Spent Fuel until Transport to Reprocessing or Disposal.* [IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.3] Vídeň : IAEA, IAEA, 2019.
18. **ORANO.** NUHOMS Dry Storage Systems. [Online] [Citace: 20. březen 2023.] <https://www.orano.group/usa/en/our-portfolio-expertise/used-fuel-management/used-fuel-storage>.
19. **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Behaviour of Spent Power Reactor Fuel During Storage.* [IAEA-TECDOC-1862] Vídeň : IAEA, 2019.
20. **ČEZ.** JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY. [Online] ČEZ, 2020. [Citace: 16. Duben 2023.] <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/>.
21. **GNS.** Safety has a name: CASTOR®. [Online] GNS. [Citace: 28. Duben 2023.] <https://www.gns.de/language=en/24429/castor>.
22. **ŠKODA JS.** Kontejnery pro transport a skladování použitého jaderného paliva. [Online] 2021. [Citace: 20. únor 2023.] <https://www.skoda-js.cz/reference/kontejnery-pro-transport-a-skladovani-pouziteho-jaderneho-paliva/>.
23. **JÍLEK, Jan.** *Teplotní výpočet dilatací kontejneru pro skladování.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
24. **SÚJB.** *Jaderná bezpečnost.* [Online] [Citace: 15. březen 2023.] <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost>.
25. **LibreTexts.** Blackbody Radiation. [Online] [Citace: 3. Květen 2023.] https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_%28OpenStax%29/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics.
26. **ŠORIN, S. N.** *Sdílení tepla.* Praha : SNTL, 1968.
27. **Josef KALČÍK, Karel SÝKORA.** *Technická termomechanika.* Praha : Academia, 1973.
28. **LINHART, Jiří.** Přenos tepla a hmoty. 2020.
29. **Termokamera.** *Tepelné záření.* [Online] [Citace: 3. Květen 2023.] <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>.
30. **ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.** Infračervená spektrometrie. [Online] 2012. [Citace: 20. březen 2023.] http://tftp.zcu.cz/files/pdf/skripta_kap3_irspektrometrie.pdf.
31. **Engineeringtoolbox.** Material Properties. [Online] 2009. [Citace: 8. září 2022.] https://www.engineeringtoolbox.com/material-properties-t_24.html.
32. **TZB-info.** Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů. [Online] 2023. [Citace: 8. září 2023.] <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>.
33. **Ansys, inc.** *ANSYS Fluent User's Guide 2022 R1.* 2022.
34. **František HEZOUČKÝ, Svatabor ŠTĚCH.** *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2015. 978-80-261-0548-0.
35. **NRC.** Fissile material. [Online] [Citace: 15. únor 2023.] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/fissile-material.html>.
36. **Frédéric LANTELME, Henri GROULT.** *Nuclear Energy Based on Thorium Molten Salt. Molten Salts Chemistry.* : Elsevier, 2013.

37. **World Nuclear Association.** Military Warheads as a Source of Nuclear Fuel. [Online] 2016. [Citace: 8. leden 2023.] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/military-warheads-as-a-source-of-nuclear-fuel.aspx>.

PŘÍLOHA č. 1

Výkres Ae 33343 S - Segment kontejneru

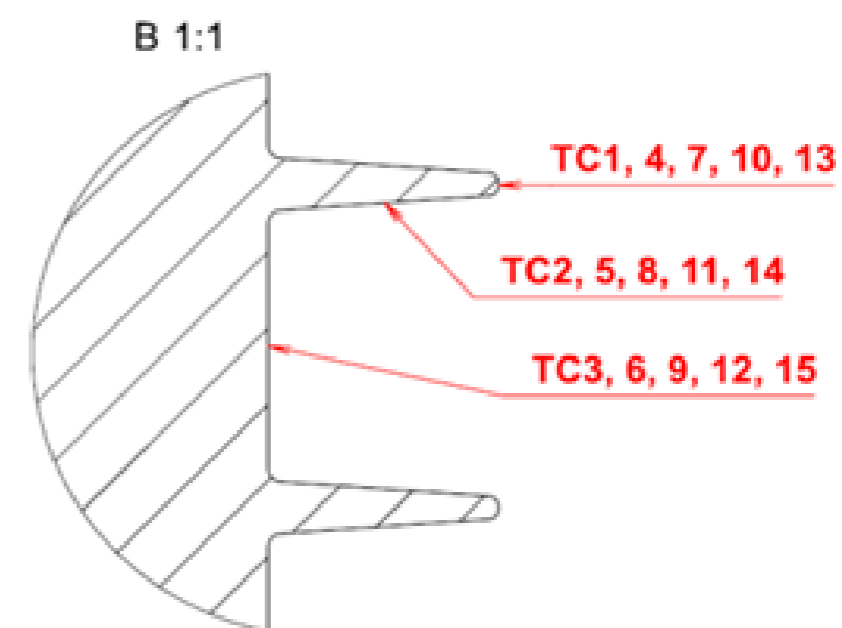
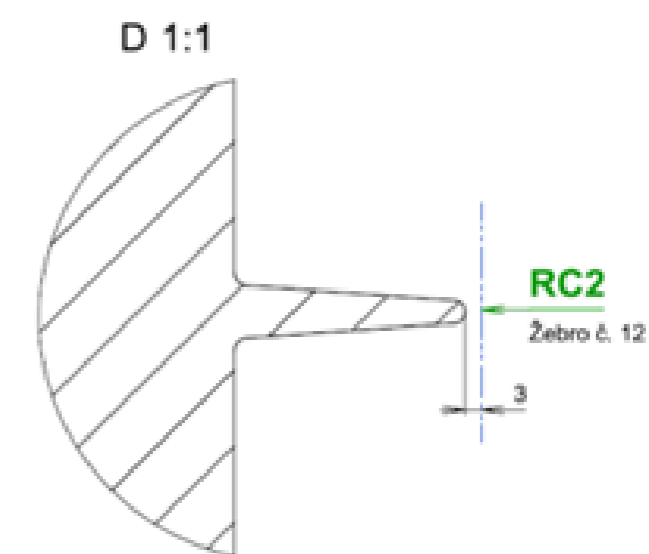
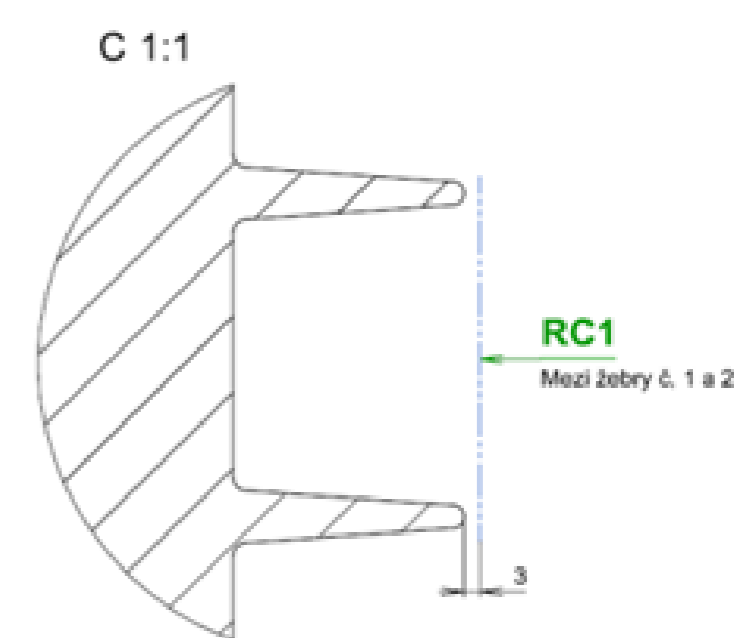
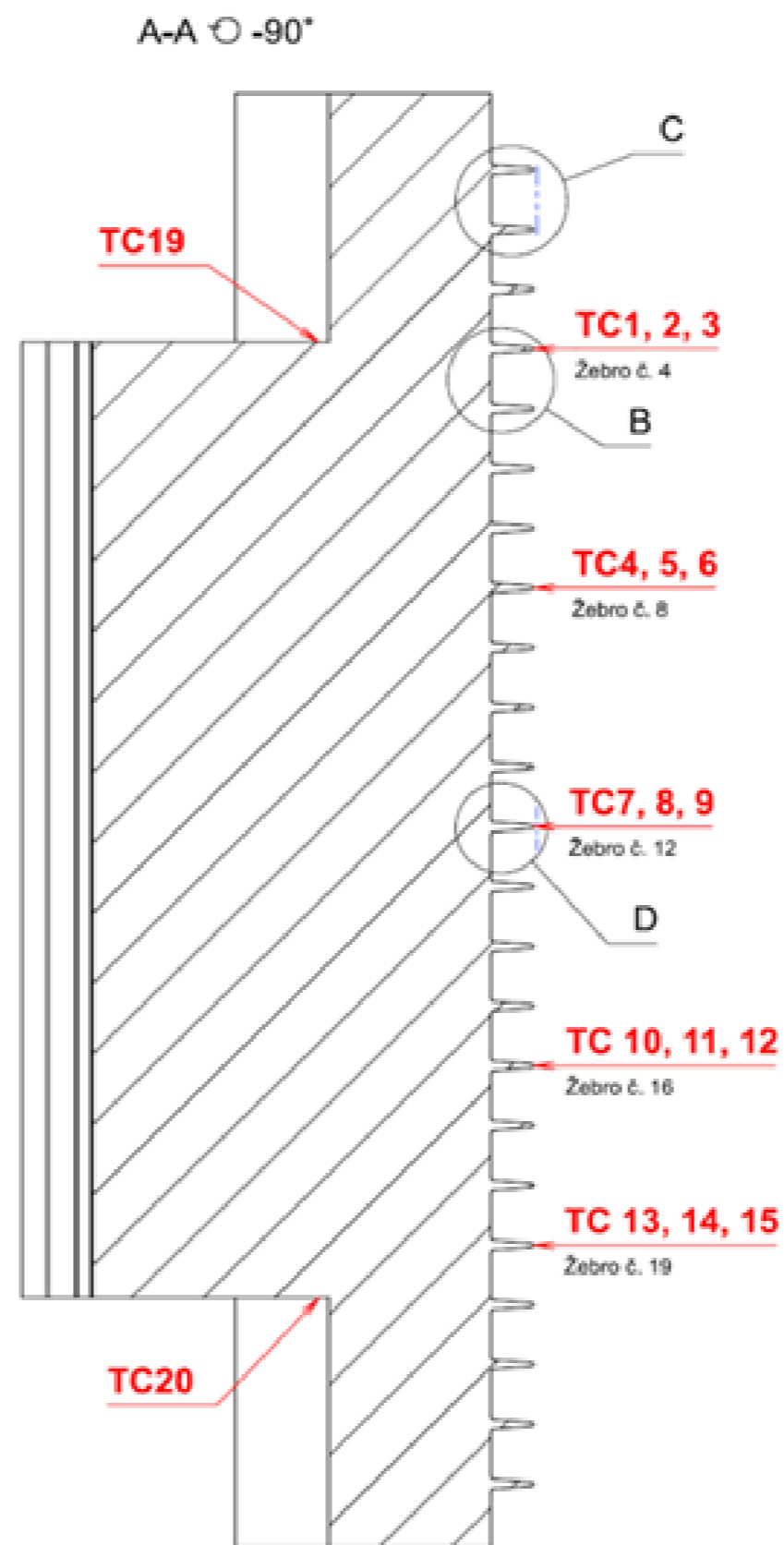
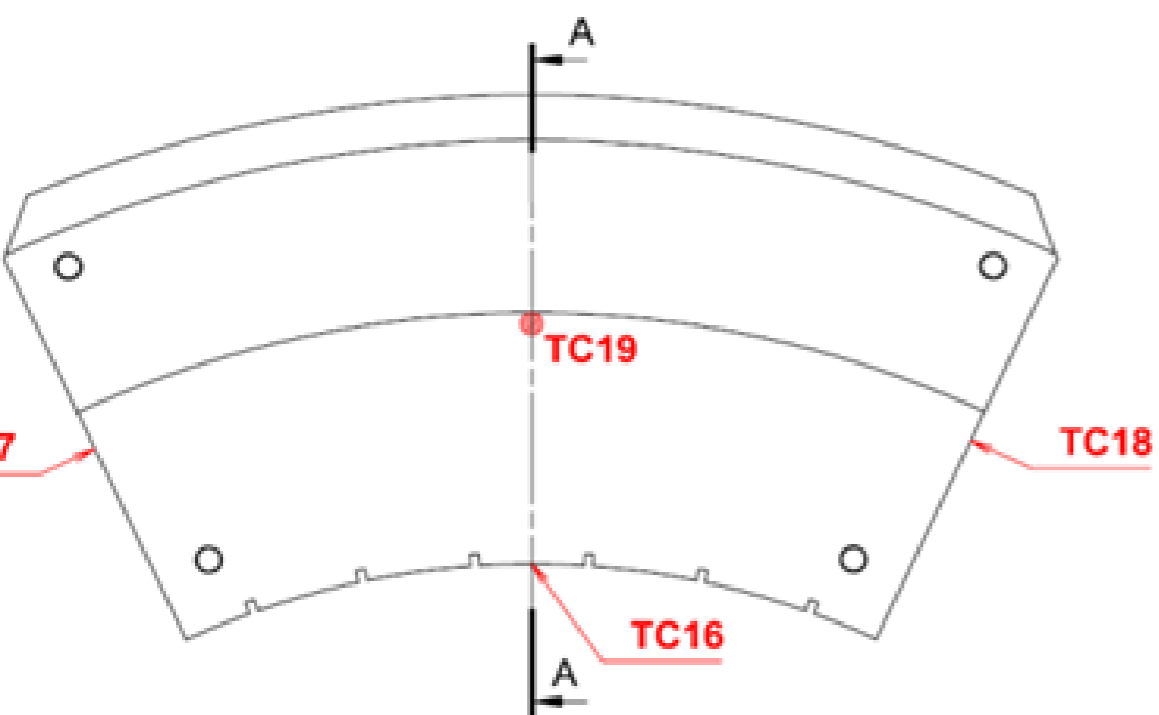
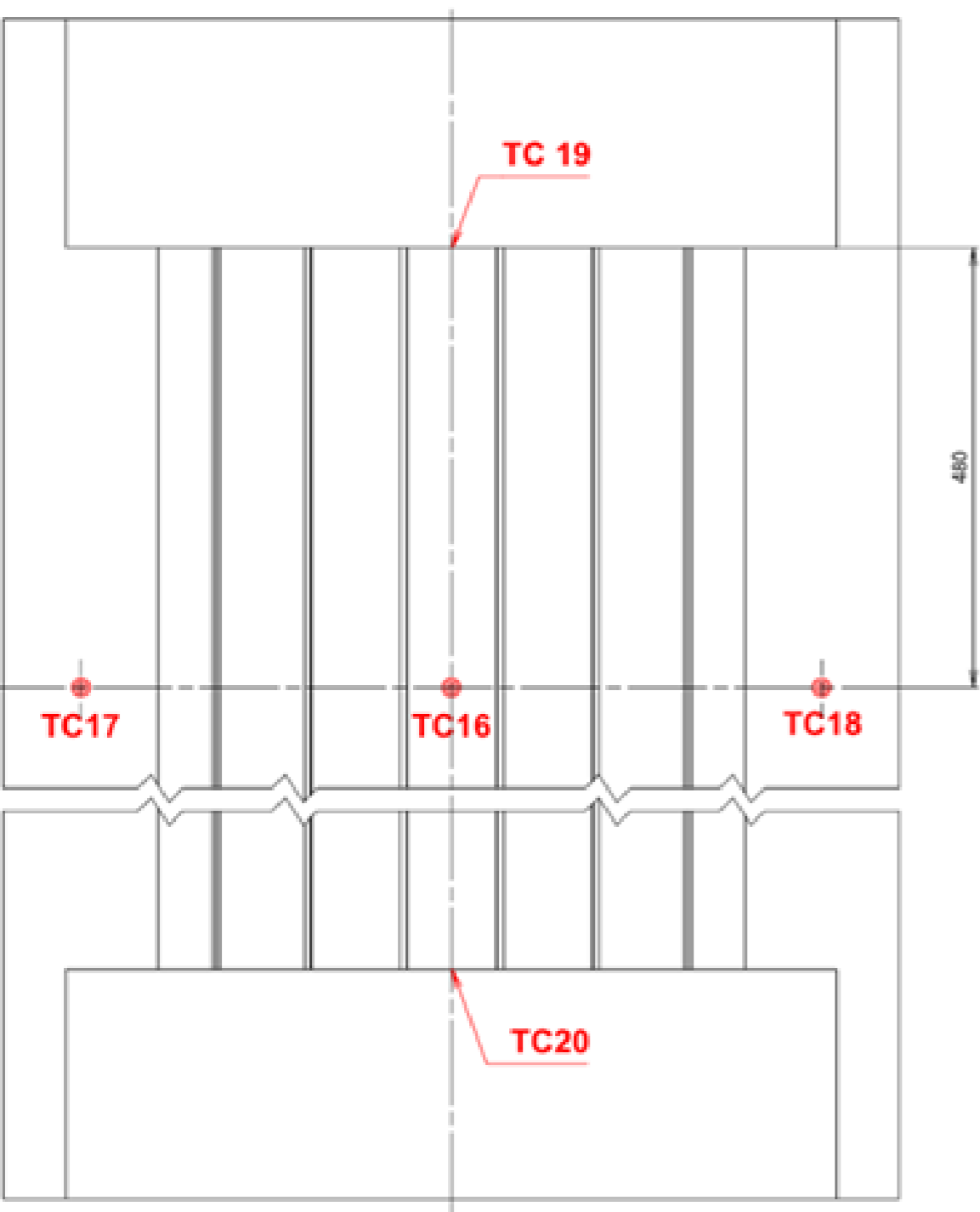


1. Závrtové otvory pro přenášení: 4x M24
2. Závrtové otvory pro připevnění podpěr při odložení: 2x M24

Stupeň důvěrnosti Confidentiality level	C1 - ŠLB (výhradní) C1 - ŠLB (confidential)	C2 - ŠLB (interní) C2 - ŠLB (internal)	X C3 - ŠLB (pověřeno) C3 - ŠLB (restricted)	C4 - ŠLB (veřejně) C4 - ŠLB (released)
0	První vydání First issue		Kupka	Svoboda
Rev. Index	Číslo změny Change identification	Data vydání Date of issue	Pracovatel Verifier	Schvázeno Approved by
Plan kontrol Inspection plan	Ae380F: S002, S301, S401		Jméno Name	Podpis / Datum Signature / Date
Heavy ISO 13715 Edges	Všeobecné General	Výřez - tolerances, jakost Welds - tolerances, quality	Konopík	
Formát Size	Antivýtvarná Material	ASME SA-360M, Grade LP2 Class 1		
Scale	1:3	Project OS ŠKODA	Typ 440/84	Partice -
ŠKODA		Segment VP 666		Hmotnost [kg] Weight [kg]
ŠKODA JS a.s.		Ae 33343 S		3050
Document is available at: www.skoda-js.cz , Document containing the ŠKODA JS's attached rights		List / počet listů Sheet / no. of sheets		1/1
		TO project TO part		P069014/0

PŘÍLOHA č. 2

Rozmístění termočlánků



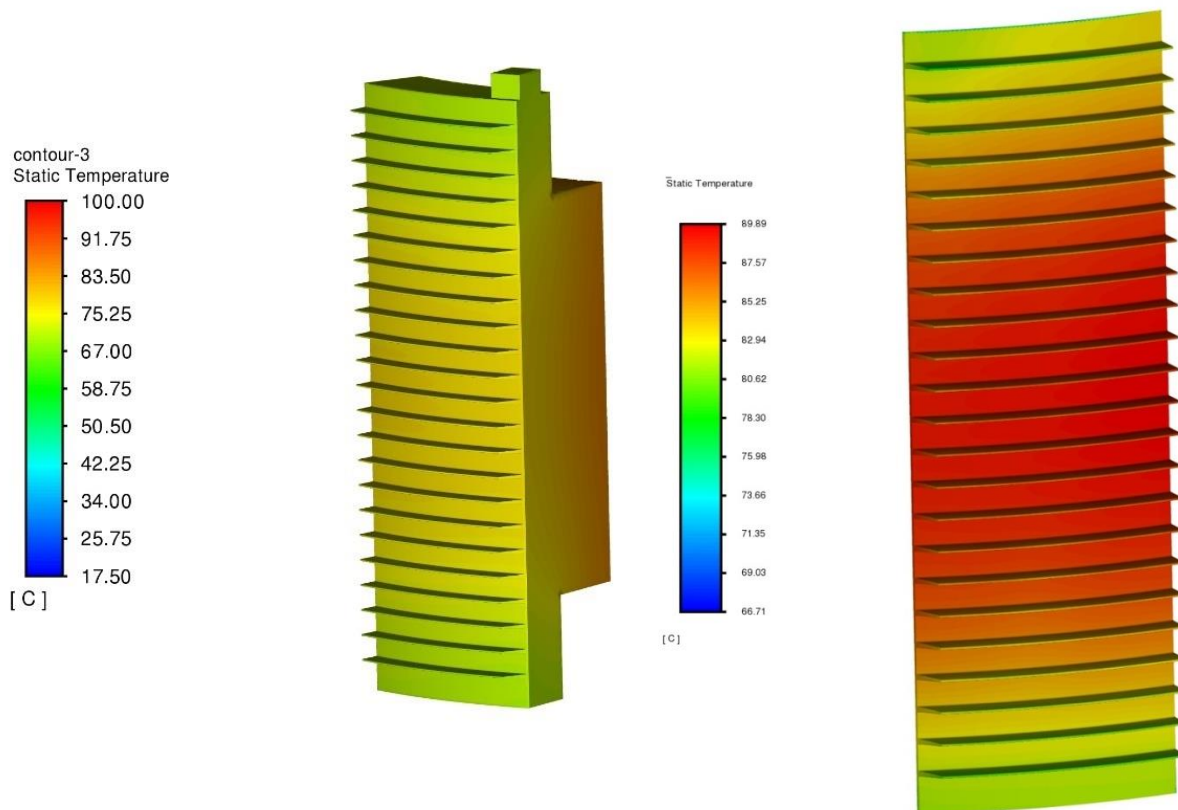
TC - teplotní čidlo
RC - čidlo měření rychlosti proudění

PŘÍLOHA č. 3

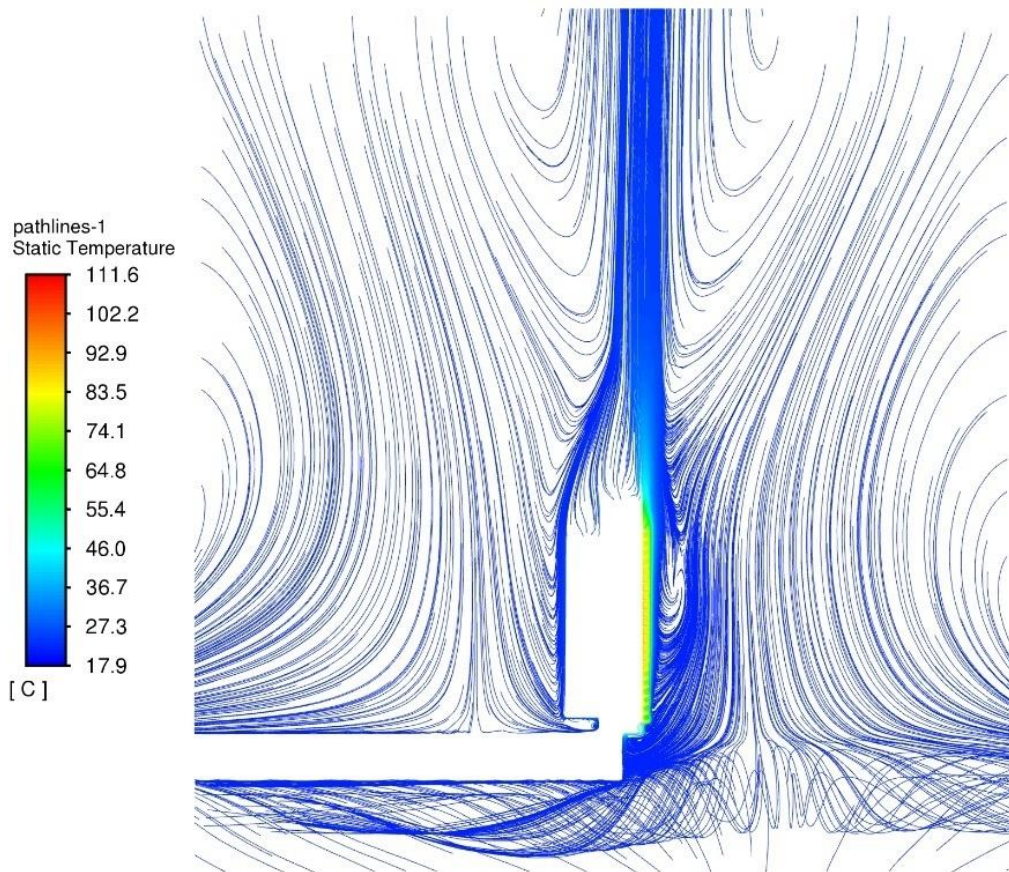
Grafický výstup z upraveného modelu



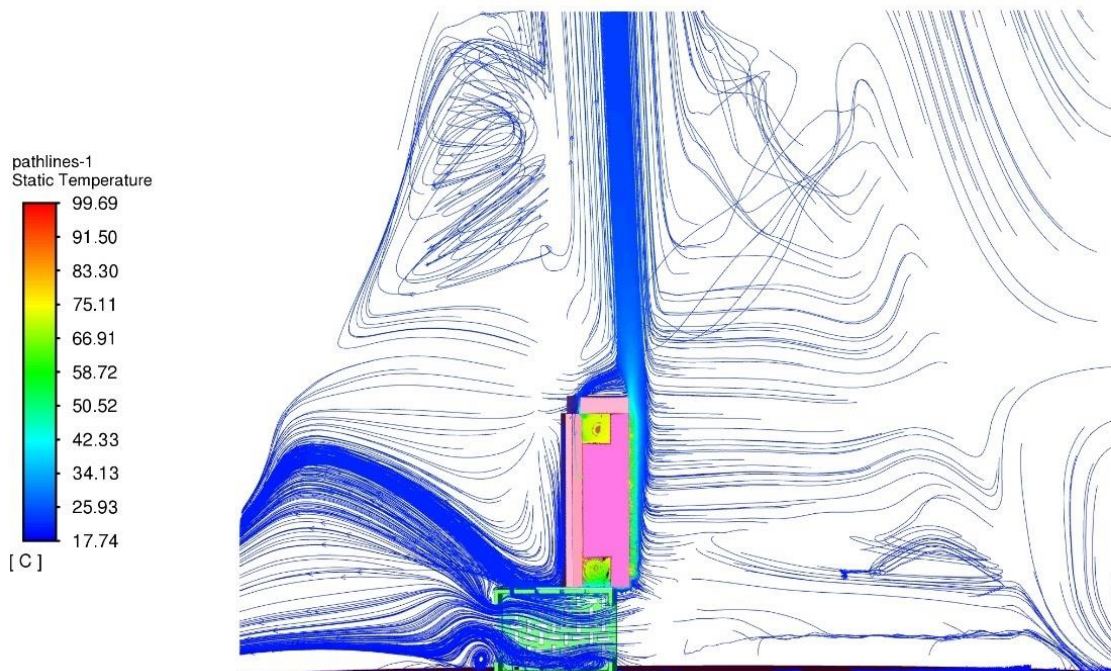
Teplota povrchů (bez žebér)



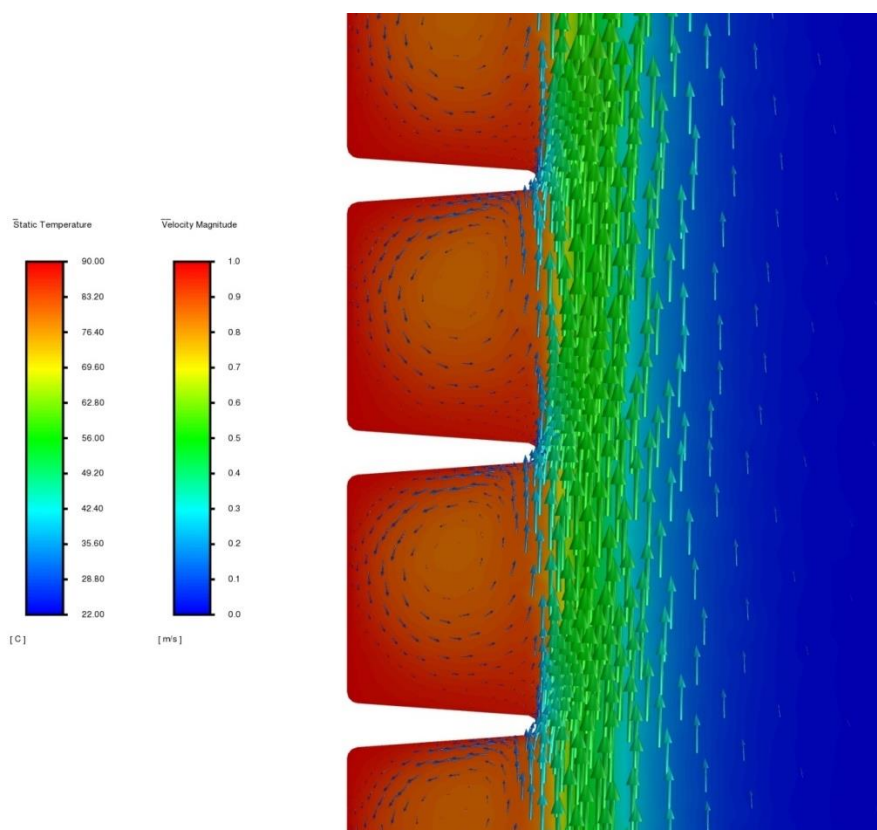
Teplota povrchů kontejneru a žebér



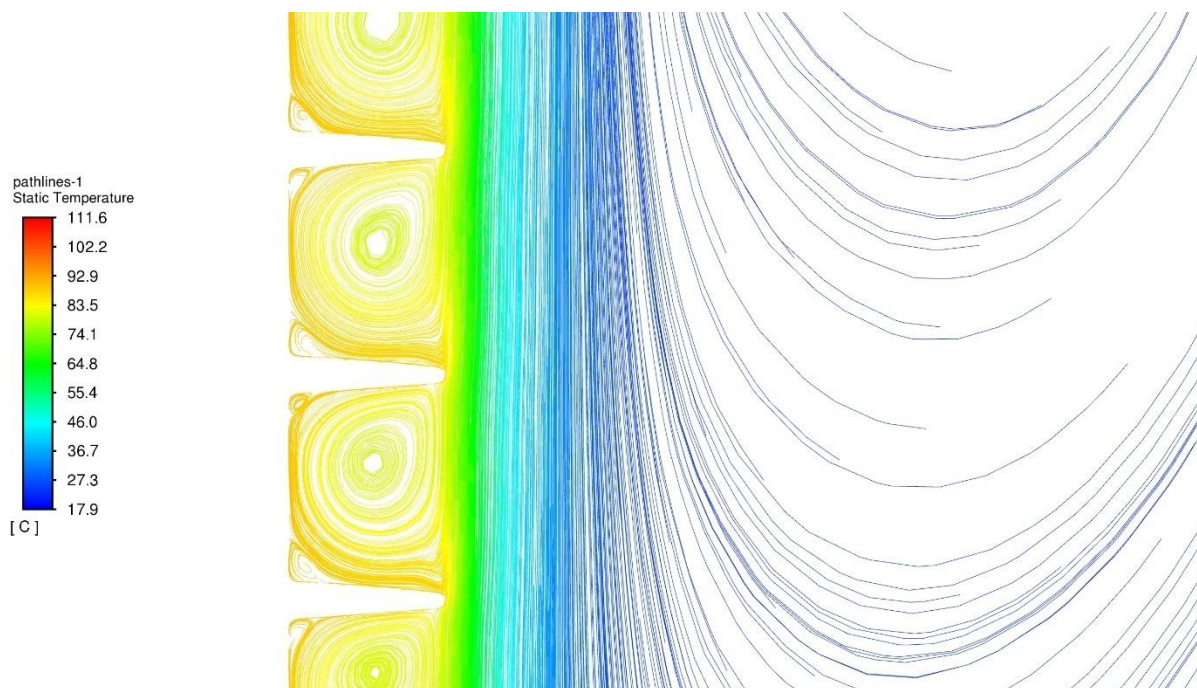
Proudnice u výchozího modelu.



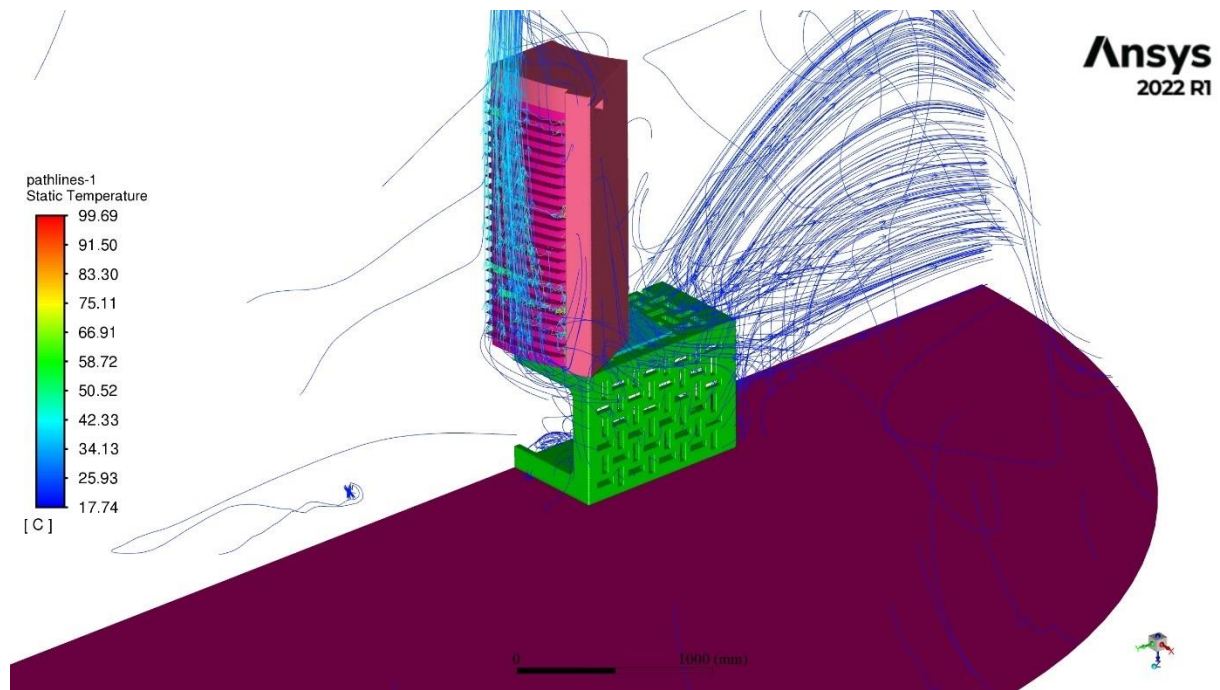
Proudnice u upraveného modelu



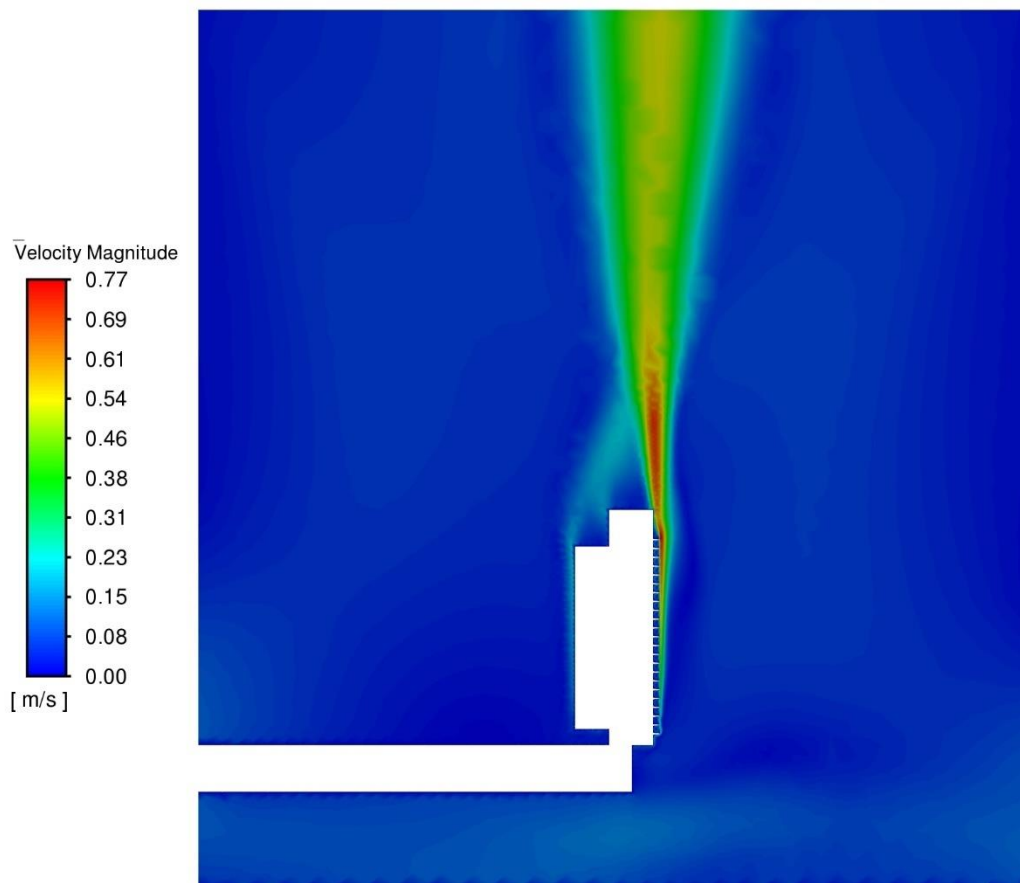
Teplotní a vektorové pole rychlostí na žebrech



Proudnice u žebor obarvené dle teploty



Proudnice



Rychlostní pole u výchozího modelu