

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh koše kontejneru typu Castor pro palivo
reaktoru typu VVER 1000

Autor: **Bc. Petr ČEKAN**

Vedoucí práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr ČEKAN**
Osobní číslo: **S11N0035P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba jaderně energetických zařízení**
Název tématu: **Návrh koše kontejneru typu Castor pro palivo reaktoru typu VVER 1000**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhnout konstrukční provedení koše pro kontejner Castor pro ukládání vyhořelého jaderného paliva z reaktoru typu VVER 1000 s ohledem na moderní konstrukční materiály se stínící schopností.

Vybrat optimální variantu s ohledem na maximální kapacitu uložených palivových souborů, technologickou náročnost zpracování materiálů a jednoduchost konstrukčního provedení koše.

Máte za úkol:

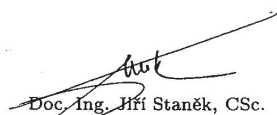
1. Navrhnout konstrukční varianty řešení koše s ohledem na vhodné materiály a polotovary.
2. Provést technicko-ekonomické zhodnocení a výběr vhodné konstrukční varianty/variant.
3. Provést konstrukční návrh doložený informativními výpočty pevnostními, fyzikálními a teplotními.
4. Nakreslit výkres sestavy s gabaritními rozměry ze 3D modelu včetně detailů jednotlivých důležitých uzlů a detailní konstrukční výkres jednoho z hlavních dílů.
5. Závěr - shrnutí výsledků.

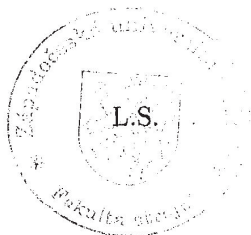
Rozsah grafických prací: 1 - 2 výkresy A2
Rozsah pracovní zprávy: 50 - 70 stran A4
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

- **Bečvář J. a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL Praha, 1981**
- **Lamarsh J. R., Baratta A. J.: Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 2001**
- **Industry Spent Fuel Storage Handbook, Final Report 1021048, EPRI, USA, July 2010**
- **Monograph on Spent Nuclear Fuel Storage Technologies, Edited By: Johnson E. R., Saverot P. M., Institute of Nuclear Materials Management, Northbrook, Illinois 60062 U.S.A.**
- **Sovremenyje tendencii obraščeniija s oblučenym jadernym toplivom, Radčenko M. B., Makarčuk T. F., Analytičeskij obzor - M.: Izdatělskij dom "Azimut", 2008 - 294 s., ISBN 978-5-98059-006-2, Moskva 2008**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**
ŠKODA JS a.s., Plzeň
Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Mištera**
ŠKODA JS a.s., Plzeň
Datum zadání diplomové práce: **5. listopadu 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. listopadu 2012

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

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Zdeborovi CSc. Dále musím poděkovat svému konzultantovi panu Ing. Josefu Mišterovi za jeho vstřícný přístup, ochotu a cenné odborné rady při konstruování vnitřního koše kontejneru. Mé díky patří také panu Doc. RNDr. Josefu Voldřichovi CSc. a panu Dr. Ing. Šikovi za cenné rady a připomínky k výpočtové části této práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Čekan	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zdebor, CSc.	Jméno Jan	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh koše kontejneru typu Castor pro palivo reaktoru typu VVER 1000		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	93	TEXTOVÁ ČÁST	80	GRAFICKÁ ČÁST	13
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce je zaměřena na transportní a skladovací kontejnery pro vyhořelé jaderné palivo. Věnuje se jednotlivým částem kontejnerů, zejména jejich vnitřním košům. Popisuje některá současná konstrukční řešení. Hlavní část práce je věnována návrhu vnitřního koše kontejneru typu Castor pro palivo VVER 1000. Součástí práce je nelineární stacionární úloha přenosu tepla v konstrukci koše řešená numericky pomocí MKP.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Vyhořelé jaderné palivo, transportní a skladovací kontejnery, obalové soubory, koš, kontejner, tepelný výpočet, přestup tepla, MKP

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Čekan	Name Petr
FIELD OF STUDY	2302T041 „Nuclear Power Equipment Design“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of baskets Castor cask for fuel reactor type VVER 1000	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	93	TEXT PART	80	GRAPHICAL PART	13
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis is focused on the transport and storage cask for spent nuclear fuel. It deals with the various parts of the container, especially their inner baskets. Describes some of the existing designs. The main part is devoted to the design of internal basket Castor cask for fuel VVER 1000. The part of the thesis is non-linear stationary problem of heat transfer in the design of basket solved numerically using FEM.
KEY WORDS	Spent nuclear fuel, transport and storage casks, overpacks, basket, container, cask, thermal analysis, heat transfer, FEM

SEZNAM VELIČIN

Symbol	Jednotka	Název
A	[m ²]	Plocha, průřez
L, l, l_0	[m]	Délka, char. rozměr
t	[m]	Tloušťka
Q	[W]	Tepelný výkon
T	[K]	Termodynamická teplota
ΔT	[K]	Rozdíl teplot
V	[m ³]	Objem
h, H	[m]	Výška, výška žebrování
φ	[-]	Součinitel osálení
ε	[-]	Poměrná sálavost
C_0	[-]	Stefan-Boltzmanova konstanta
D, d	[m]	Průměr
R, r	[m]	Poloměr
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
q	[W/m ²]	Hustota tepelného výkonu
q_v	[W/m ³]	Vnitřní zdroj tepla
γ	[1/K]	Součinitel objemové roztažnosti
λ	[W/m · K]	Součinitel tepelné vodivosti
λ, λ_m	[-]	Štíhlostní poměr, mezní štíhlost
i_{min}	[m]	Poloměr setrvačnosti
J_{min}	[m ²]	Kvadratický moment
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita
σ, σ_{kr}	[Pa]	Napětí, kritické napětí
F	[N]	Síla
E	[Pa]	Modul pružnosti
ρ	[kg/m ³]	Hustota
m	[kg]	Hmotnost
a	[m ² /s]	Součinitel teplotové vodivosti
a	[m/s ²]	Zrychlení
α_{Th}, α_{To}	[1/K]	Součinitel Teplotní roztažnosti
c_p	[J/kg · K]	Specifické teplo
α	[W/m ² · K]	Součinitel přestupu tepla
C, n	[-]	Konstanty
η_z	[-]	Účinnost žebrování
k_z	[-]	Součinitel žebrování
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Gr	[-]	Grashofovo číslo
Nu	[-]	Nusseltovo číslo

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Název
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
OS	Obalový soubor
PS	Palivový soubor
JE	Jaderná elektrárna
ETE	Elektrárna Temelín
EDU	Elektrárna Dukovany
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
IAEA	International Atomic Energy Agency - MAAE
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
LANL	Los Alamos National Laboratory
MOX	Směsné palivo Pu a U ²³⁵

OBSAH

1 ÚVOD	9
1.1 CÍLE PRÁCE A ČLENĚNÍ	10
2 TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
2.1 JADERNÉ PALIVO	11
2.2 VYHOŘELÉ JADERNÉ PALIVO (VJP)	11
2.3 PALIVOVÝ CYKLUS	12
2.3.1 Přední část palivového cyklu	12
2.3.2 Činná část palivového cyklu	13
2.3.3 Zadní část palivového cyklu	13
2.4 MOKRÉ SKLADOVÁNÍ.....	13
2.5 SUCHÉ SKLADOVÁNÍ.....	14
2.5.1 Jednotlivé/modulové suché skladování	15
2.5.2 Halové suché skladování	16
2.6 NAKLÁDÁNÍ S VJP V ČR	18
2.7 HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ – MOŽNOST PŘEPRACOVÁNÍ VJP.....	19
3 REŠERŠE KONTEJNERŮ PRO VJP	21
3.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....	22
3.2 SKLADOVACÍ KONTEJNERY	22
3.2.1 Modulové systémy/betonové kontejnery.....	22
3.3 KONTEJNERY TYPU CONSTOR	23
3.4 KONTEJNER MC-10.....	24
3.5 KONTEJNERY ŘADY TN	25
3.6 KONTEJNERY TYPU CASTOR.....	26
3.6.1 CASTOR V/52 a CASTOR V/21	27
3.6.2 Kontejner CASTOR [®] 440/84M	30
3.6.3 Kontejner CASTOR [®] 1000/19.....	31
3.7 TECHNOLOGIE PLNĚNÍ KONTEJNERŮ.....	34
4 POŽADAVKY NA TRANSPORTNÍ A SKLADOVACÍ OS	35
4.1 ZKOUŠKY PRO PODMÍNKY NEHODY PŘI PŘEPRAVĚ.....	35
4.2 OSTATNÍ KRITÉRIA PRO TYPOVÉ SCHVÁLENÍ.....	36
4.3 PŘÍKLADY PROVÁDĚNÝCH CRASH-TESTŮ.....	37
5 NÁVRH KOŠE KONTEJNERU PRO PALIVO VVER 1000.....	38
5.1 STANOVENÉ PARAMETRY A OMEZUJÍCÍ KRITÉRIA NÁVRHU	38
5.2 NÁVRHY ROZMÍSTĚNÍ PALIVOVÝCH SOUBORŮ	40
5.3 ANALÝZA KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ A POLOTOVARŮ.....	41
5.4 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH VARIANT	42
5.4.1 Popis varianty 1.....	42
5.4.2 Popis varianty 2.....	45
5.5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VARIANT	47
5.5.1 Posouzení variant	47
5.5.2 Výběr varianty	47

5.6	VÝPOČET ZATÍŽENÍ PŘI HORIZONTÁLNÍM PÁDU	48
5.7	SPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH TRUBIC	52
5.7.1	1. typ zámku (nepoužit)	52
5.7.2	2. typ zámku	54
5.8	TRANSPORT KOŠE	55
5.8.1	Nosná spodní deska	56
5.8.2	Hmotnost koše	57
5.8.3	MKP Model spodní desky	57
5.9	POSOUZENÍ PODKRITICNOSTI A STÍNĚNÍ	59
5.9.1	Metodika výpočtů	59
5.10	TEPELNÝ VÝPOČET	60
5.10.1	Teorie k přenosu tepla	60
5.10.2	Popis výpočtového modelu	64
5.10.3	Teplo-fyzikální vlastnosti materiálů	65
5.10.4	Teplo-fyzikální vlastnosti náhradního materiálu	65
5.10.5	Výpočet součinitele přestupu tepla	70
5.10.6	Výstupy numerického výpočtu	74
6	ZÁVĚR	75
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
8	SEZNAM PŘÍLOH	80

1 Úvod

V současné době, kdy se lidstvo nachází na prahu 3. tisíciletí a technologický vývoj posledních desetiletí nabyl nevídaného růstu, je logické, že s tímto vývojem roste i potřeba energií. Tyto potřeby souvisejí jak se zvyšováním lidské populace světa, tak neméně výrazně se zvyšující se životní úrovní ekonomicky vyspělých států. Proto je zapotřebí udat jasný směr ve vývoji energetiky a investovat do zdrojů, které jsou technicky zvládnuté a ekonomicky, ale i ekologicky vhodné.

V České republice je, se zohledněním geografického rozložení země, nejvhodnější koncepcí tzv. energetický „MIX“, což je vyvážené rozložení obnovitelných i neobnovitelných zdrojů, kde významnou roli hraje jaderná energetika. Energetické reaktory jsou jistou známkou vyspělosti země, ve které jsou provozovány, a zaručují určitou energetickou nezávislost, zejména díky jejich velkým výkonům a stabilní dodávce elektřiny ke koncovým uživatelům. K rozvoji jaderné energetiky a k jejímu využívání je potřeba zkušeností a technické vzdělanosti v tomto oboru, ale také dobré informovanosti společnosti a s tím spojené kladné veřejné mínění, protože tento obor s sebou nese několik kontroverzních otázek. Jednou z nich je nakládání s radioaktivními odpady, jejich manipulace, skladování a ukládání.

Menší část těchto odpadů tvoří „vyhořelé“ palivo, které je ovšem vysoce radioaktivní. Termín „vyhořelé“ je zde zavádějící, protože v reaktoru neprobíhá hoření, čili chemická reakce, nýbrž velké množství reakcí jaderných. Uvážíme-li, že palivo vyňaté z reaktoru obsahuje stále velké množství uranu (asi 95%), převážně U^{238} ale i malé procento štěpitelného U^{235} a izotopy plutonia, naskýtá se zde možnost přepracování či pozdějšího využití této energie novými technologiemi. Proto je přesnější užívat termínu „použité jaderné palivo“. Protože se však spojení „vyhořelé jaderné palivo“ (VJP) vžilo a je hojně uváděno a to i v odborné literatuře, je tohoto spojení užíváno i níže v této práci s vědomím této významové nepřesnosti.

Vzhledem k vysoké radioaktivitě VJP jsou kladeny vysoké nároky na radiační bezpečnost při manipulaci s tímto materiálem a jsou stanovena přísná kritéria na konstrukci a technologické zpracování Obalových souborů (OS), což jsou různé typy kontejnerů či ochranných obálek, které jsou určeny právě k manipulaci a skladování VJP. Jedním z nich je kontejner typu CASTOR pro palivo reaktorů typu VVER 1000, kterým disponuje například naše jaderná elektrárna Temelín. Důležitou součástí tohoto kontejneru je vnitřní vestavba, tzv. koš, o jehož konstrukci pojednává tato práce.

1.1 Cíle práce a členění

Diplomová práce je rozdělena na několik částí. V první části bude věnována pozornost základním teoretickým poznatkům problematiky VJP, komplexnímu popisu možných způsobů nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Bude zde stručně popsán palivový cyklus, způsoby skladování (tzv. mokré a suché skladování), popis meziskladů suchého skladování, hlubinné ukládání VJP a možnost jeho přepracování.

Další část práce bude věnována rešerši různých typů skladovacích a transportních kontejnerů a analýza současného stavu techniky. Zejména zde bude uveden popis stávajících konstrukčních řešení obalových souborů, použité materiály a výrobní technologie. Tato část bude také obsahovat podrobnější popis kontejnerů typu Castor, popis vnějšího tělesa, vnitřního koše, jednotlivých vík a technologii plnění.

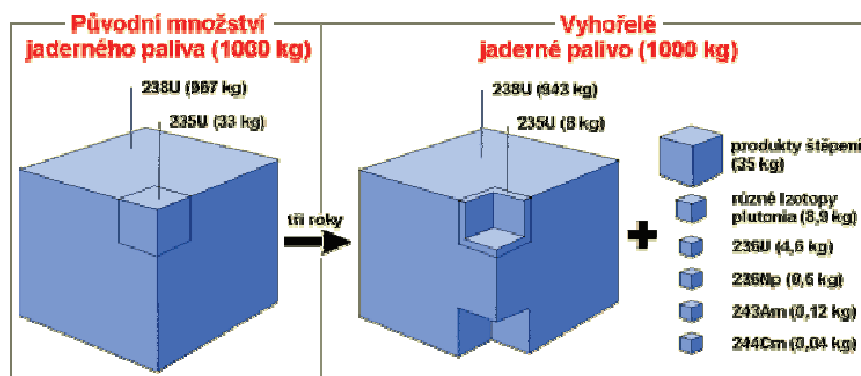
V následující kapitole budou uvedeny požadavky na transportní a skladovací OS, které pro ČR stanovuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který obecně vychází z požadavků na OS, které vydává Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE). Shrnutí těchto informací slouží jako primární kritéria při budoucím návrhu vnitřního koše kontejneru.

Hlavním cílem této práce bude návrh jednotlivých variant řešení vnitřního koše kontejneru typu Castor pro palivo VVER 1000 s ohledem na vhodné materiály, polotovary a technologickou náročnost výroby. Následně bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení a výběr vhodné varianty, která bude detailně propracována a budou na ni provedeny informativní výpočty, které prověří správnou funkci koše. K práci bude přiložena výkresová dokumentace obsahující výkres sestavy koše včetně detailních výkresů jednotlivých komponent a 3D modelu vytvořeného v CAD-systému CatiaV5 R19.

2 Teoretický úvod do problematiky

2.1 Jaderné palivo

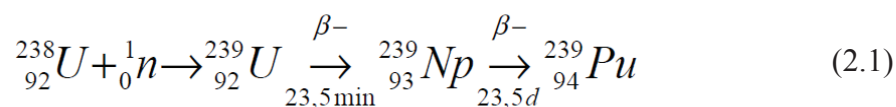
Uranová ruda, ze které se vyrábí palivo pro energetické bloky jaderných elektráren, projde velice náročnými procesy, než jsou z ní vyrobeny palivové soubory, které lze považovat za tzv. čerstvé palivo. Nejčastěji používané palivo v jaderných elektrárnách je přírodní nebo obohacený uran ve velmi čistém stavu UO_2 (oxid uranický). U lehkovodních reaktorů je používáno obohacení do 5% koncentrace isotopu ^{235}U . Každý palivový soubor má koncentraci isotopu U^{235} různě vysokou a vyrábí se přesně na objednávku provozovatele dané jaderné elektrárny. V jaderné elektrárně Temelín (VVER 1000) je použito v palivových souborech palivo o různé koncentraci ^{235}U , od 1,5% do 4,5%. Jaderné palivo s různým obohacením je vhodně uspořádáno v palivových souborech a ty jsou rozmístěny tak, aby bylo palivo co nejlépe využito. Příklad složení čerstvého paliva a složení paliva po použití v reaktoru znázorňuje obr. 1.



Obr.: 1 – Složení jaderného paliva po vyhoření [3]

2.2 Vyhořelé jaderné palivo (VJP)

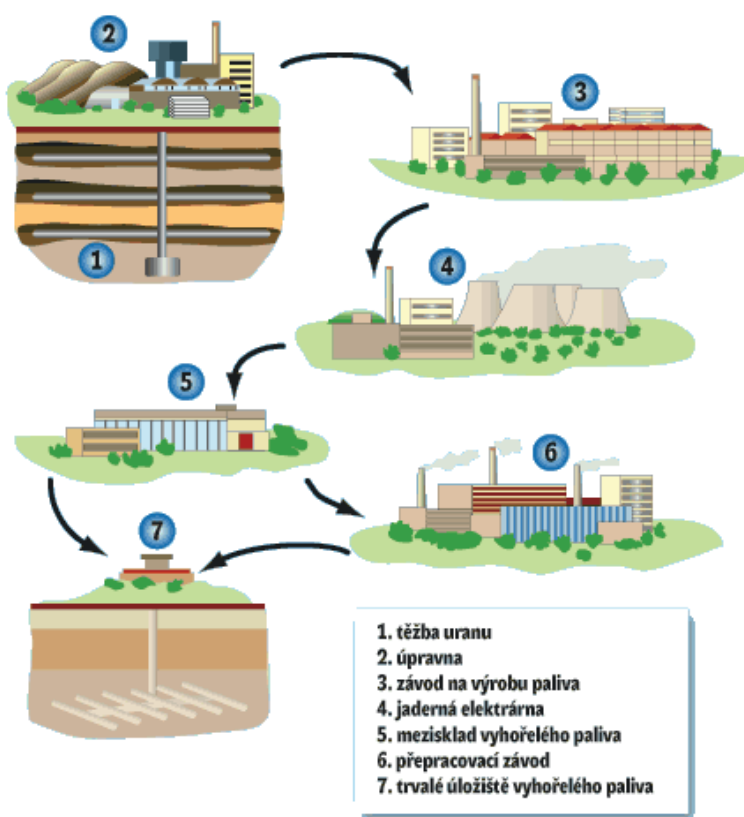
Jaderné palivo je v aktivní zóně lehkovodních reaktorů přítomno po dobu jednoho cyklu, který trvá 4 roky (snaha přejít na pětiletý cyklus). Za tuto dobu v rámci každoroční odstávky mění palivové soubory svoji pozici v aktivní zóně a tím je docíleno maximálního využití. Přesné rozmístění palivových kazet a sledování jejich stavu je zabezpečováno jadernými fyziky a specialisty v JE. Palivo po dobu práce v reaktoru tzv. „vyhořívá“, to je proces štěpení jader uranu a tedy snižování jeho koncentrace v palivu. Tento proces je spojený se vznikem lehkých štěpných produktů ale také s procesem absorpce neutronů různými těžkými jádry, které vlivem následných beta rozpadů jsou příčinou vzniku štěpitelných nuklidů, hlavně plutonia Pu^{239} v malém množství také Pu^{240} (není štěpitelné) a Pu^{241} . Jednu z těchto hlavních jaderných reakcí charakterizuje známá rovnice (1) [1].



2.3 Palivový cyklus

Palivový cyklus představuje všechny činnosti související s těžbou přírodních zdrojů, jejich zpracováním, přes energetické využití až po nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Během vyhořívání v jaderných reaktorech se v palivu změní mnoho vlastností, ale vnější geometrie palivového souboru zůstane po vyjmutí z reaktoru stejná jako u čerstvého paliva. Palivový cyklus je zjednodušeně zobrazen na obr. 2. V podstatě se rozděluje na 3 etapy:

- Přední část palivového cyklu (obr. 1, pozice 1-3)
- Činná část palivového cyklu (obr. 1, pozice 4)
- Zadní část palivového cyklu (obr. 1, pozice 5-7)



Obr.: 2 – Palivový cyklus [3]

2.3.1 Přední část palivového cyklu

Palivový cyklus začíná těžbou uranové rudy a je jím chemickým zpracováním. Z rozemleté rudy se získá žlutý koncentrát oxidu uranu obsahující minimálně 65 % přírodního uranu. Z něho se rafinuje čistý kovový uran a obohacuje izotopem U_{235} . Výroba paliva začíná přeměnou na oxid uranický UO_2 , který se lisuje do malých pelet. Pelety se vkládají do hermeticky uzavřených trubek, vyrobených ze slitiny zirkonia, a vytvářejí palivové proutky. Svazek palivových proutků tvoří palivový soubor [4]. Po složitém procesu výroby paliva s obohacením dle projektu se čerstvé palivo za přísných podmínek transportuje do skladu čerstvého paliva v areálu elektrárny.

2.3.2 Činná část palivového cyklu

Zahrnuje činnosti související s energetickým využitím paliva v jaderném reaktoru. Jeho zavezení do aktivní zóny, procesy za dobu práce jaderného bloku s tímto palivem a vyvezení použitého paliva do bazénu skladování.

2.3.3 Zadní část palivového cyklu

Zde se jedná o činnosti spojené s naložením paliva po jeho využití v energetickém reaktoru. Použité palivo se po několika letech nahrazuje palivem čerstvým a ukládá se nejprve do bazénu skladování přímo v reaktorovém sálu nebo v kontejnmentu (u některých západních projektů i mimo kontejnment, ovšem v kontrolovaném pásmu elektrárny), kde je stíněno pod hladinou vody viz kapitola 2.4. – mokré skladování. Po několika letech v bazénu skladování se sníží zbytkový tepelný výkon a sníží se výše radioaktivního záření těchto palivových souborů. Poté je možno palivo přeložit do kontejnerů pro transport a skladování a palivo je převezeno do meziskladu vyhořelého jaderného paliva v areálu JE. Zde je uloženo do doby, než bude rozhodnuto a dalším naložení.

2.4 Mokré skladování

Termín mokré skladování znamená ukládání VJP do vody, což má mnoho výhod díky jejím vlastnostem. Způsoby mokrého skladování můžeme rozdělit na 2 typy:

- *Skladování v bazénu přímo u reaktoru*
- *Centrální mokrý sklad*

Ve většině případů se jedná o krátkodobé řešení, které je ovšem velice efektivní a technicky zvládnuté. Po vyjmutí VJP z reaktoru se tyto palivové kazety umísťují do tzv. bazénu skladování v reaktorovém sálu, kde jsou na určitou dobu uloženy (zpravidla minimálně 6 let). Protože bazén je umístěn hned vedle reaktoru a manipulace probíhá pod hladinou vody, je toto řešení velice vhodné vzhledem k relativně vysokému zbytkovému tepelnému výkonu jednotlivých palivových kazet a také kvůli jejich vysoké aktivitě. Nevýhodou je nutnost stálého provozu chlazení těchto bazénů.

Voda v bazénu má několik funkcí. Jednou z nich je dobré stínění a tedy dobrá ochrana pracovníků před ionizujícím zářením. Po dobu několika let, kdy je palivo uskladněno v bazénech, jeho aktivita klesne vlivem rozpadu krátkodobých štěpných produktů, které se rozpadají na stabilní izotopy. Zbytkový tepelný výkon je bezpodmínečně nutné odvádět tepelnými výměníky vloženého chladicího okruhu. Čerpadla těchto okruhů jsou opatřena zajištěným napájením a okruhy využívají tzv. technickou vodu důležitou (zajištěnou). Tato bezpečnostní opatření jsou nutná, protože v případě ztráty chlazení bazénů hrozí var média a roztavení konstrukce palivových souborů.

Ve světě existuje i několik centrálních mokrých skladů, například ve Švédsku nebo Japonsku. Tento způsob je rozšířen zejména v přímořských zemích, kde mokré mezisklady leží v blízkosti mořského pobřeží a přebytečná tepelná energie se odvádí do moře. Centrální mokrý sklad a bazén skladování jsou vidět na obr. 3 a na obr. 4.

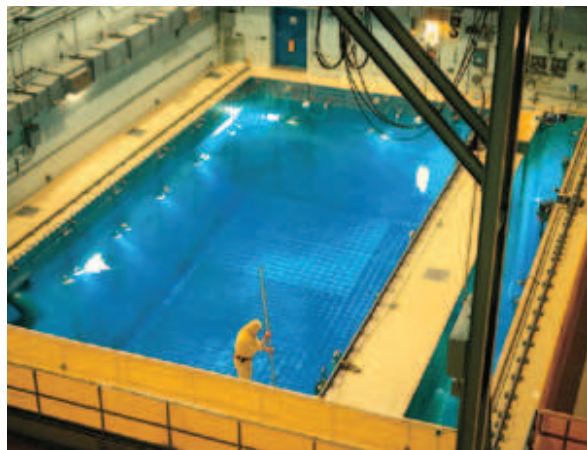
Tato metoda skladování po dobu mnoha let provozu jaderné elektrárny není technickým problémem. Technologie se používá již desítky let. U mnoha jaderných elektráren ve světě proto rozšiřují skladovací kapacity ukládáním palivových souborů do hustějších skladovacích mříží. [4]

Výhody mokrého skladování:

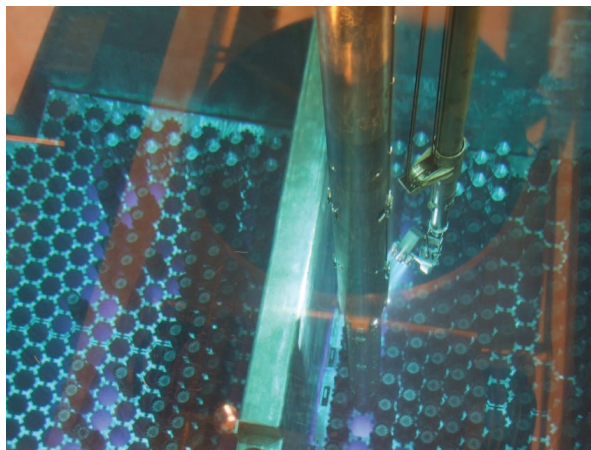
- *dobré stínící vlastnosti vody*
- *účinnější odvod tepla*
- *možnost vizuální kontroly palivových kazet*

Nevýhody:

- *stálá spotřeba energie na chlazení (ekonomická náročnost)*
- *nutnost čištění bazénů*
- *omezená kapacita*



Obr. 3: Centrální mokrý sklad VJP



Obr. 4: Bazén skladování – ETE [5]

2.5 Suché skladování

U suchého skladování se používá speciálních stíněných kontejnerů, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Tento způsob skladování je vhodný pro delší intervaly uskladnění VJP a je výrazně ekonomičtější, zejména díky nižším provozním nákladům. Palivo je ukládáno buď do speciálních betonových staveb (sklípků – tzv. modulové skladování), nebo do betonových či kovových kontejnerů, které jsou umístěny do odvětrávaných hal. Suché skladování umožňuje snadnou manipulaci s VJP, které je již umístěno v ochranných OS (obalové soubory - kontejnery), které stíní radioaktivitu. Suché sklady, jak v podobě hal či modulových sklípků, nemají po jejich výstavbě téměř žádné provozní náklady a v případě potřeby lze relativně snadno rozšířit jejich kapacitu. Do suchých skladů se použité palivo dává po několika letech "odpočinku" v bazénu vyhořelého paliva.

způsoby suchého skladování:

- *jednotlivé/modulové (ve speciálních betonových sklípcích či boxech)*
- *halové (v kontejnerech - skupinové)*

2.5.1 Jednotlivé/modulové suché skladování

Příkladem prvního přístupu je již zmíněné jednotlivé nebo modulové skladování. Skladovací boxy či sklípky jsou vystavěny volně v terénu pro jednotlivé speciální koše s palivem nebo pro omezený počet palivových kazet umístěných v hermetických trubkách, které jsou naplněny inertním plynem. Trubky jsou vertikálně umístěny v hnízdech v betonové stavbě s cirkulujícím vzduchem. Takové řešení je použito v USA u reaktoru Fort Saint Vrain nebo v Anglii na elektrárně Wylfa [3]. Další možností jsou vertikální betonové boxy. Vyhořelé palivo je v zapouzdřených ocelových koších uloženo do betonových nádob. Chladicí vzduch proudí ve speciálních kanálech. Tento systém je používán například v USA na elektrárně Oconee nebo v Kanadě na elektrárně Gentilly [3]. Existuje ještě mnoho modifikací tohoto principu. Různé typy uspořádání modulového skladování využívají například v USA, Anglii, Rusku nebo Ukrajině.

Rozdělení podle polohy kontejneru:

- *Horizontální skladování*
- *Vertikální skladování*

Na obrázku 5 je vidět rozsáhlý modulový sklad (horizontálně situovaný) v Černobyli na Ukrajině. Tento sklad byl vybudován na základě komplexního programu ustanovujícího nutnost vybudovat suchý typ zařízení pro skladování VJP a přejít tak z mokrého na suché skladování. Doposud byla většina VJP (více než 18.000 palivových kazet) z JE Černobyl uloženo v pěti oddílech mokrého skladu s bazény typu ISF-1. [6]



Obr.: 5 – Horizontální modulový sklad (Černobyl – Ukrajina) [6]



Obr.: 6 - Vertikální betonové boxy (USA)

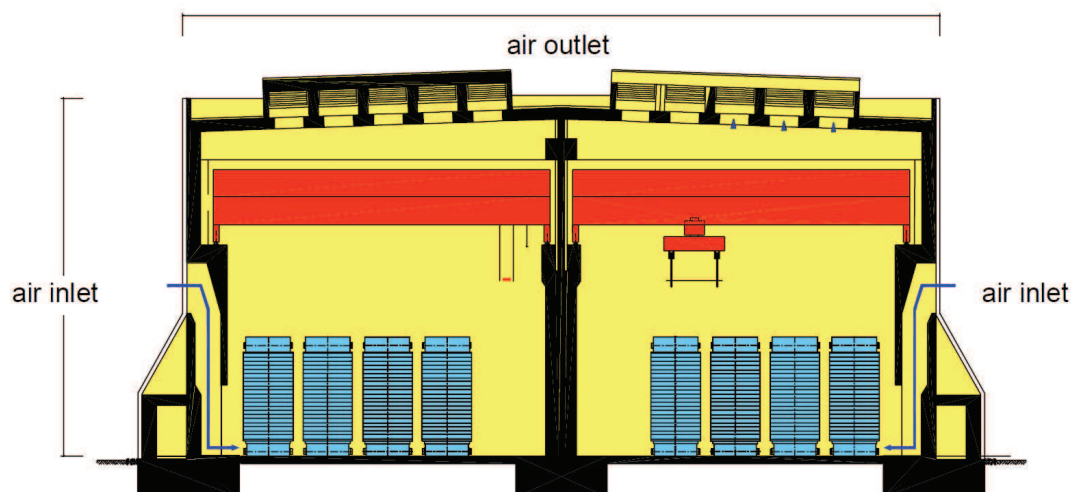


Obr.: 7 - Betonové boxy [7]

Na obrázcích 6 a 7 je vidět koncepce volného skladu, kde betonové boxy jsou umístěny ve vertikální poloze volně ve venkovním prostoru na vybetonované ploše. I tyto sklady jsou samozřejmě fyzicky chráněny. Prostory jsou obehnané ploty a jsou hlídány proti vniknutí nepovolaných osob.

2.5.2 Halové suché skladování

Tento typ skladování je velmi rozšířený a využívá se i v České republice. VJP se ukládá do speciálních kontejnerů, které se plní na JE a poté jsou tyto kontejnery převezeny do tzv. meziskladů většinou zbudovaných v areálu elektrárny nebo mimo ni. Tyto mezisklady jsou velice odolné stavby, kde je zajištěno stálé odvádění tepla pomocí ventilačního systému, který je založen na principu přirozené konvekce. Stavba je projektována jako seismicky odolná. V těchto halách se předpokládá uskladnění VJP na 50-60 let, a poté přesun palivo do hlubinných úložišť, ovšem nic nebrání provedení rekonstrukce, vystavění nového skladu, popřípadě přeložení palivových soubodů do nových kontejnerů a takovýmto způsobem skladovat VJP i nadále. Projekty těchto hal jsou opět různě řešené.



Obr.: 8 – Koncept meziskladu [16]

Na obrázku 8 je vidět schéma koncepce meziskladu, kde z boků haly je nasáván venkovní studený vzduch, který vstupuje do spodní části vnitřního prostoru. Vzduch pak stoupá vzhůru kolem jednotlivých kontejnerů a konvekcí odebírá teplo uloženým OS s

palivem. Ohřátý vzduch pak odchází ventilačními otvory ve střeše meziskladu. Ve světě je zbudováno mnoho takovýchto meziskladů různých koncepcí, ovšem založených na podobném principu. Skladovací kontejnery pro tyto účely jsou ve stovkách designů z různých materiálů a v různých velikostech. Těmto kontejnerům je podrobněji věnována kapitola 3.



Obr.: 9 – Zaplněný mezisklad v EDU [8]

Na obrázku 9 je vidět vnitřní prostor plně zavezeného meziskladu v jaderné elektrárně Dukovany. Kontejnery jsou rozmístěny pravidelně na určených pozicích se stejnými vzdálenostmi mezi sebou.

Výhody suchého skladování:

- *minimální provozní náklady*
- *velká kapacita skladovacích hal*

Nevýhody suchého skladování:

- *velké nároky na spolehlivost kontejnerů*
- *životnost kontejnerů (cca 50-60 let)*

2.6 Nakládání s VJP v ČR

Do roku 1991 bylo VJP vyváženo mimo území tehdejšího Československa na základě mezistátních smluv se Sovětským svazem. Po vzniku Ruské federace byl tento vývoz ukončen a bylo nutné nalézt vhodné místo pro vybudování meziskladu na vlastním území. Nejprve se problém řešil zvětšením kapacity bazénů skladování. Poté byly postupně vybudovány mezisklady v lokalitě EDU a následně i v lokalitě ETE.

O použité jaderné palivo se podle tzv. „atomového zákona“ přijatého Parlamentem ČR v roce 1997 musí postarat provozovatel jaderného zařízení, který toto palivo používá, v ČR je to energetická společnost ČEZ a.s. [8]. To znamená, že veškeré náklady spojené s manipulací VJP, jeho uložením až po zabezpečení těchto úložišť nese právě provozovatel. Záruky za bezpečné uložení včetně použitého jaderného paliva nese stát, který proto založil Správu úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Každý radioaktivní odpad v ČR navíc podléhá regulaci a dozoru Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB). [8]

Momentálně jsou v ČR v provozu 3 mezisklady. V EDU jsou k dispozici 2 tyto mezisklady, z nichž u jednoho je již kapacita naplněna (600 tun VJP uloženého v 60 kontejnerech). Druhý mezisklad je využíván od roku 2006 a jeho kapacita je více než dvojnásobná. V ETE je vybudován jeden mezisklad, který se začal využívat od roku 2010 [8]. SÚRAO se zabývá projekty a vyhledává vhodnou lokalitu pro výstavbu konečného hlubinného úložiště na území ČR. Zahájení provozu první části hlubinného úložiště, kam bude použité palivo ze skladů v jaderných elektrárnách převezeno, je plánováno na rok 2065. [8]



Obr.: 10 - Mezisklad z venku - ETE [8]



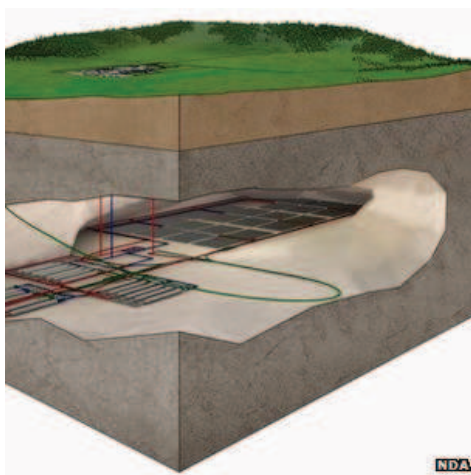
Obr.: 11 – Mezisklad zevnitř - ETE [8]

Na obrázcích výše jsou fotografie vystavěného meziskladu v areálu jaderné elektrárny Temelín. Vlevo pohled na mezisklad z venku a vpravo ještě téměř prázdná hala, kde je na podlaze vidět připravené pozice pro budoucí zaplnění. Celková kapacita temelínského skladu je 1370 tun VJP. Toto množství paliva se vejde do 152 kontejnerů, které budou ve skladu umístěny [8]. V první etapě zaplňování skladu se jedná o 35 kontejnerů typu CASTOR. Tyto kontejnery budou podrobně popsány v kapitole 3.

2.7 Hlubinné ukládání – možnost přepracování VJP

Konečné řešení zadní části palivového cyklu spočívá buď v přepracování VJP (tzv. uzavřený palivový cyklus), nebo v jeho konečném ukládání do hlubinných úložišť. S hlubinným úložištěm se počítá do budoucna i v ČR a momentálně probíhá výběr vhodné lokality. Toto úložiště pro vysoko-aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo se bude skládat ze tří částí [10]:

- *podzemních prostorů pro ukládání a manipulaci s kontejnery s vyhořelým palivem a vysoko-aktivními odpady*
- *přístupových šachet a tunelů*
- *nadzemního - povrchového areálu.*



Obr.: 12 – Hlubinné úložiště [11]

Momentálně na světě není v provozu žádné hlubinné úložiště, ale v mnoha zemích jako například ve Švédsku, Finsku nebo USA jsou již hotové projekty a probíhají přípravné práce výstavby nebo je hlubinné úložiště již ve výstavbě. V pokročilé fázi výstavby je např. hlubinné úložiště budované v lokalitě Yucca Mountain, ve státě Nevada v USA. To je lokalita s velmi příznivými vlastnostmi pro budování úložných prostor. První část úložiště by měla sloužit k uložení asi 70 000 tun vysoce-radioaktivního odpadu převážně z energetických bloků jaderných elektráren [10].



Obr.: 13 - Vstup do úložiště v Yucca Mountain v USA [10]

Další již zmíněnou možností naložení s VJP je jeho přepracování a znovu použití v jaderných reaktorech. Přepracovávání VJP je dnes využíváno jen v několika málo zemích světa a to zejména proto, že tato technologie je velice nákladná a ekonomicky se stále více vyplatí nakupovat čerstvé palivo z nově vytěžené uranové rudy. Principiálně se věc provádí tak, že se z palivových kazet odstraní zirkoniový obal a palivové články se rozpustí v kyselině dusičné a ze vzniklého roztoku se chemicky oddělují jednotlivé prvky. Isotopy Pu a U^{235} se opět použijí jako palivo (tzv. MOX*) a zbytky kovového pokrytí palivových článků se zpracují jako středně-aktivní odpad. Štěpné produkty se oddělují a vitrifikací se převádí do formy skla. Tento vzniklý materiál je vysoce aktivní a musí se uložit jako radioaktivní odpad, kterého je ovšem asi jen 1/10 původního VJP. Takovéto přepracovací závody existují například ve Francii, či Anglii. [32]

Na závěr teoretického úvodu je třeba ještě připomenout, že hlubinné ukládání nebo chemické přepracování nemusí být do budoucna jediné možné řešení, protože s postupem doby se rýsují nové technologie, jak palivo přepracovávat a dokonce i možnosti jak z VJP uvolnit daleko větší množství energie, která nám je prozatím „nedostupná“. Je to například technologie ADTT**. I z tohoto důvodu se v současné době jako výhodný postup jeví použité palivo prozatím skladovat v meziskladech a počat na to, jak se vyvinou tyto technologie. Dalším důvodem proč je lepší s přepracováváním paliva nechvátat je fakt, že radioaktivita v palivu postupně klesá a proto možné přepracování bude v budoucnu snadněji proveditelné a hlavně také levnější.

* MOX - Mixed oxide fuel. Jedná se o směsné palivo oxidu uranu a plutonia.

** Princip ADTT byl navržen již v padesátých letech 20. století a dnes se jím zabývají především vědci v americké laboratoři Los Alamos, evropském CERNu a ruském Dubně. Jedná se o vývoj nového jaderného reaktoru kombinovaného s výkonným urychlovačem. Tento reaktor by umožňoval využívat i taková štěpná jaderná paliva, která nejsou samostatně schopna udržet řetězovou reakci - tedy např. vyhořelé palivo z dnešních jaderných elektráren, přírodní thorium apod. [12]

3 Rešerše kontejnerů pro VJP

Tato kapitola bude obsahovat několik podkapitol. Nejprve bude uvedeno základní rozdělení kontejnerů. Poté budou následovat podkapitoly obsahující rešerši s podrobnějším popisem různých typů skladovacích a transportních kontejnerů. Budou zde popsána různá stávající konstrukční řešení s popisem jednotlivých částí, ze kterých je kontejner a zejména pak vnitřní koš vyroben. Tato analýza současného stavu techniky ve světě je důležitá pro získání potřebných technických znalostí a utvoření určité představy při budoucím návrhu vnitřního koše kontejneru. Další podkapitoly budou zaměřeny na kontejnery typu CASTOR.

Ve světě je několik firem, zabývajících se výrobou kontejnerů pro suché skladování VJP a existuje na stovky typů a designových zpracování OS od speciálních kontejnerů pro paliva z ledoborců nebo z výzkumných reaktorů, které bývají menších rozměrů a menší kapacity až po vysokokapacitní velké kontejnery pro paliva z energetických bloků. Mezi tyto firmy patří například NAC International, ACL, Transnuclear Inc. (dnes dceřiná společnost Arevy), MHI nebo německá firma GNS mbH Essen se kterou v tomto oboru úzce spolupracuje česká firma Škoda JS. Kontejnery se liší zpracováním vnějších těles, jejich povrchem, který je hladký nebo žebrovaný pro zlepšení odvodu tepla, velikostí a kapacitou ukládaných palivových souborů. Velké rozdíly jsou zejména u vnitřních košů, kde jednotlivé vestavby jsou uzpůsobeny pro daný typ paliva. Palivové soubory jsou různých velikostí a tvarů v závislosti na typu reaktoru. U západních reaktorů (PWR) se používá palivo čtvercového průřezu a u východních projektů rovněž tlakovodních reaktorů s označením VVER se používá palivo šestihenné. Méně běžné typy reaktorů (například CANDU, RBMK, atd.) mají palivo, které má svoje specifika a proto jsou kontejnery vždy konstruovány přesně pro daný typ paliva, jeho obohacení, vyhoření, způsob plnění a skladování. Protože není možné v této práci obsáhnout popis všech typů dosud vyráběných kontejnerů, budou zde uvedeny ty nejpoužívanější a podrobný popis bude věnován zejména řešení vnitřních košů jednotlivých kontejnerů a budou podrobně popsány kontejnery Castor 440/84M a Castor 1000/19*, kterých se využívá na našich jaderných elektrárnách. Na konci této práce bude v příloze uveden přehled výrobců a seznam jimi vyráběných typů kontejnerů.

* Označení „CASTOR“ je odvozeno z anglického „Cask for storage and transport of radioactive material“. Označení „CASTOR[®]“ je registrovaná značka kontejneru firmou GNS.

3.1 Základní rozdělení

Kontejnery se v podstatě rozdělují podle jejich funkce, užití, technologie, skladovací polohy, typu paliva a kapacitou. Kovové kontejnery se pak také rozdělují podle toho, na jaký typ užití jsou licencovány. Mluvíme pak o jednoúčelových a dvou-účelových kontejnerech. V podstatě jde o to, zda je daný typ kontejneru licencován jako skladovací nebo zda splňuje přísnější kritéria daná pro přepravu, pak může být licencován jako skladovací i jako transportní. Stručné rozdělení je uvedeno v tabulce 1, kde největší pozornost bude věnována prvnímu typu kontejnerů (kovové kontejnery), které jsou většinou licencovány pro skladování i transport VJP.

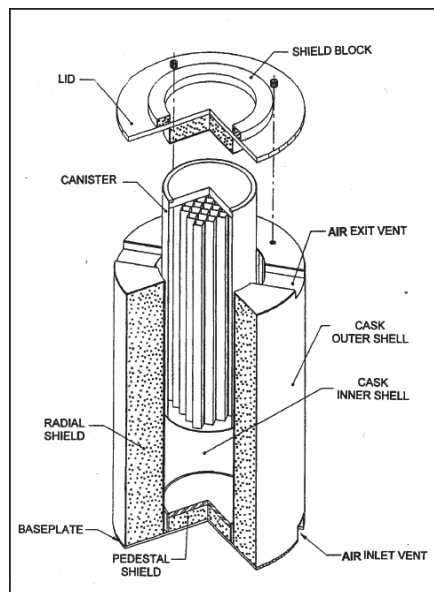
Typy kontejnerů	Odvod tepla	Konstrukce obalu (Médium)	stínění	funkce	Příklady kontejnerů
Kovové kontejnery	Konvekce (vzduchem) Žebry (stěnou) kontejneru	Dvojitá víka masivní stěny (inertní plyn)	Stěny kontejnerů	Transportní a skladovací (dvoúčelové)	Castor, TN, NAC-ST/STC, BGN řešení
Betonové/železobetonové	Konvekce (vzduchem) Okolo kontejneru (kanistru)	klasická/svařovaná těsnící víka (inertní plyn)	betonové/železobetonové stěny OS	Vertikální skladovací	CONSTOR, HI-STORM/ HI-STAR
Modulové (betonové)	Konvekce (vzduchem) - okolo kanistru	Tenkostěnný základní obal (Inertní plyn)	betonové stěny modulů	Horizontální, skladovací	NUHOMS, NAC-MPC/UMS, MAGNASTOR
Trubkové (Vault)	Konvekce (vzduchem) -okolo trubice	jednotlivé trubice Inertní plyn (v trubkách)	betonové stěny modulů/boxů	Různá provedení (funkce)	MVDS MACTOR

Tab.: 1 - Dělení OS/kontejnerů (data ze zdroje [15])

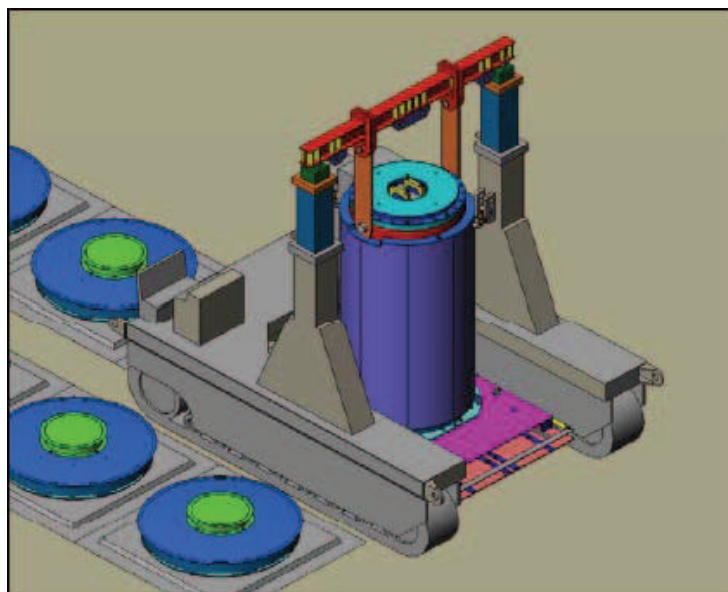
3.2 Skladovací kontejnery

3.2.1 Modulové systémy/betonové kontejnery

O suchém skladování pomocí modulů či různých provedení horizontálních či vertikálních betonových boxů byla zmínka v první části této práce a dále tomuto typu skladování nebude věnována větší pozornost. Pro představu zde bude uveden pouze příklad kontejneru typu HI-STORM, který je na obrázku 14, kde je vidět schéma OS s vnitřním obalem (kanistrem) a s vnější betonovou obálkou, Kde je možno toto provedení situovat do podzemí (obr. 15), musí být ovšem zajištěn přívod vzduchu k ventilačním otvorům, pro zajištění chlazení konvekce vzduchu vnitřním meziprostorem.

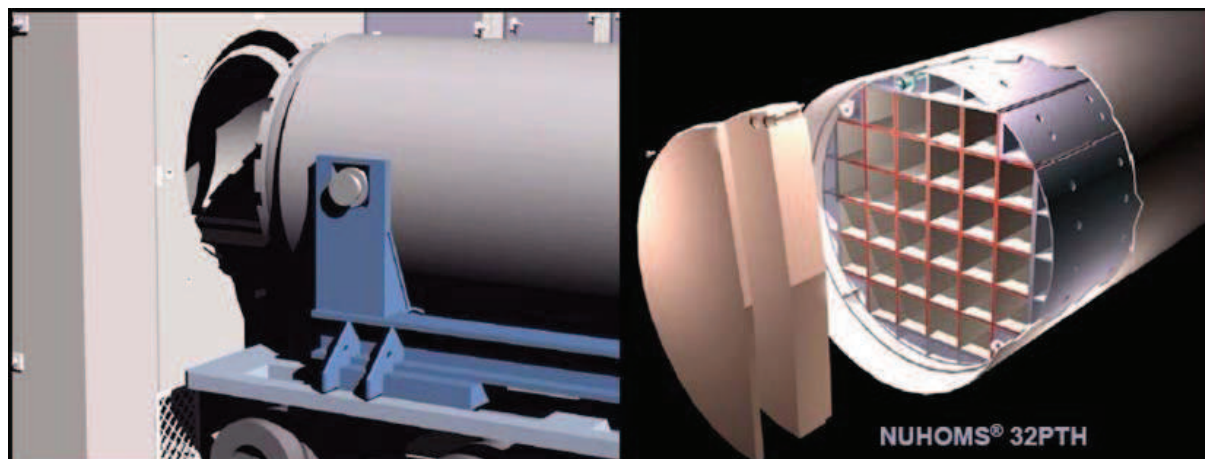


Obr.: 14 – HI-STORM [16]



Obr.: 15 – Systém HI-STORM 100U [16]

Podobných systémů s betonovou vnější obálkou je velké množství. Pro horizontální modulové uspořádání je uveden příklad systému NUHOMS, který produkuje firma Transnuclear INC, která je dceřinou společností AREVY. Tento systém je hojně rozšířen a technologie je v několika variantách přizpůsobena pro různé typy palivových souborů (PWR a BWR). Na obrázku 16 je v pravé části vidět vnitřní obálka, která je převezena na speciálně stíněném transportním zařízení, které se přitěsní ke skladovanému prostoru a pomocí hydraulických pístů je tato vnitřní obálka přesunuta do betonového bloku [14].

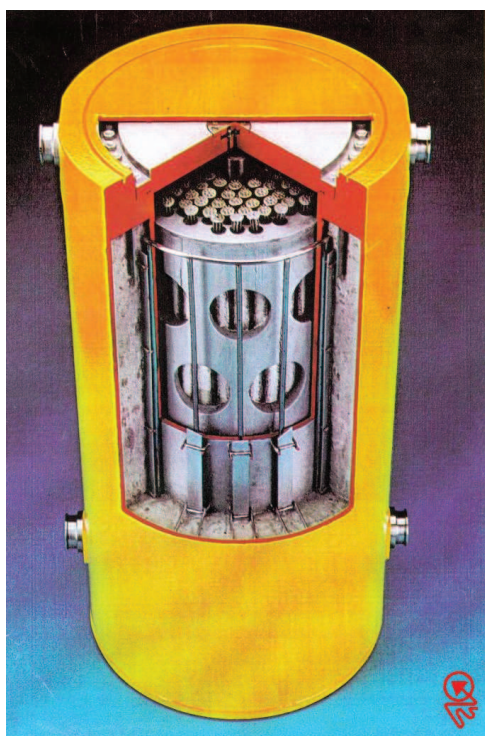


Obr.: 16 – Systém NUHOMS [14]

3.3 Kontejnery typu CONSTOR

Kontejnery s označením CONSTOR se liší od kontejnerů CASTOR (popsány podrobně dále) zejména vnějším tělesem, kde CONSTOR má železobetonovou konstrukci, kde vyztužený meziprostor tělesa je vyplněný vysoce pevnostním betonem který v sobě obsahuje kovový granulát. Kovové výztuže mezi ocelovými pláštěmi zlepšují pevnost a také lepší vodivost celého tělesa. Po vytvrdnutí vznikne železobetonová konstrukce s dobrými

stínícími vlastnostmi. Vnější povrch tělesa je většinou hladký. Tyto typy kontejnerů jsou designem Německé firmy GNS. Mnoho kontejnerů CONSTOR se v licenci vyrábělo i v ČR firmou Škoda JS. Jednalo se o kontejnery s označením CONSTOR[®] RBMK 1500 (obr. 17) pro Litevskou elektrárnu Ignalina nebo CONSTOR[®] 440/84 (Obr. 18) pro elektrárnu Kozloduj v Bulharsku [18]. Druhý zmiňovaný typ kontejneru má na povrchu vertikální žebra a lze do něho použít vnitřní koš vyvinutý ve Škoda JS, který je používán také do kontejnerů Castor 440/84, kde tento koš i kontejner bude podrobně popsán dále.



Obr.: 17 – CONSTOR[®] RBMK 1500 [18]

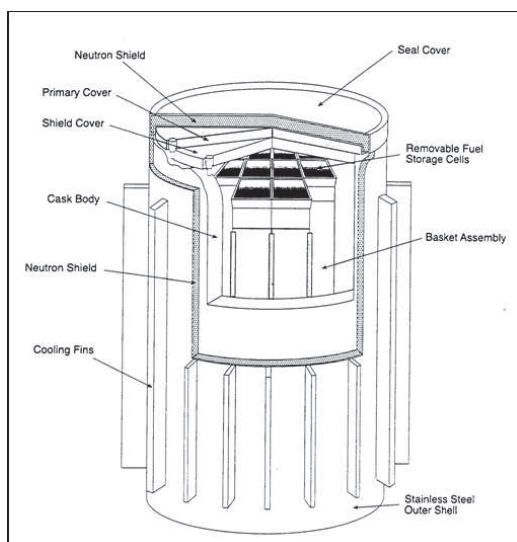


Obr.: 18 – CONSTOR[®] 440/84 [17]

Na obrázku 17 je v řezu viditelná železobetonová konstrukce tělesa kontejneru a speciální koš s typickým trubkovým palivem reaktorů RBMK. Tyto nechvalně známé reaktory velkých výkonů se již ve světě téměř nepoužívají. Vyhořelého jaderného paliva je však relativně velké množství. Převážně je ukládáno do výše popsaných modulových systémů nebo právě do kontejnerů CONSTOR.

3.4 Kontejner MC-10

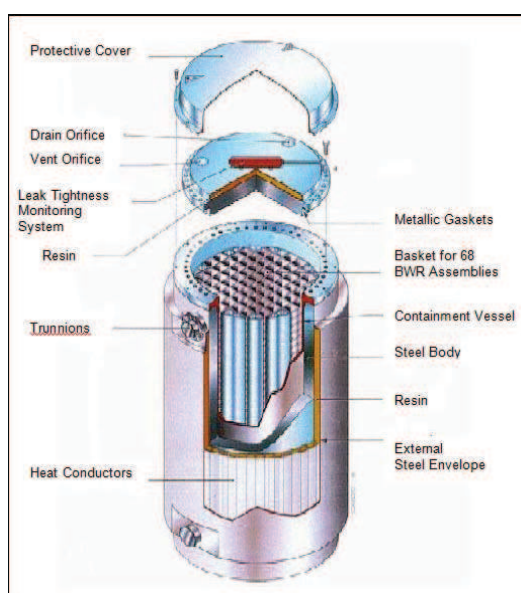
Kontejner MC-10 je vyráběn firmou Westinghouse. Těleso kontejneru je vyrobené z kovaného silnostěnného ocelového válce. Povrch kontejneru je opatřen 24 speciálními masivními žebry pro lepší přenos tepla, která jsou přivařena axiálně k povrchu. Celková délka kontejneru je 4,79m a průměr přibližně 2,71m. Tento kontejner má úložnou kapacitu 24 palivových souborů paliva typu PWR SNF pro které je vyroben. Na základním materiálu tělesa je stínění a ještě jedna vnější ochranná vrstva. Kontejner je licencován jako skladovací, ale nesplňuje podmínky pro transport paliva. [16]



Obr.: 19 – Kontejner MC 10 [16]

3.5 Kontejnery řady TN

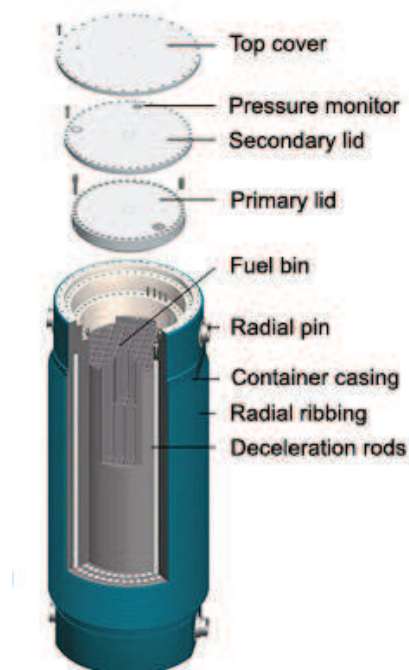
Velice úspěšnou řadu kontejnerů TN vyrábí firma Transnuclear Inc. (dnes Areva Cogema Logistics). Jedná se např. o kovové kontejnery s označením TN-24P, TN-40, TN-32 a TN-68. Číslo za pomlčkou vždy značí počet ukládaných palivových souborů. První tři typy jsou určeny pro palivo reaktorů PWR, kontejner TN-68 u pak určen pro uskladnění 68 palivových souborů BWR [16]. Některé typy kontejnerů jsou konstruovány na tepelné zatížení přes 30 kW. Většina kontejnerů z řady TN je dvou-účelová, licencovaná i pro transport. Na obrázku 20 je zobrazen kontejner TN-68 s jeho jednotlivými částmi. Kontejner je těsněn speciálním víkem s monitorovacím systémem. Na tomto víku je umístěna polypropylenová stínící deska. Na vrchu je ještě umístěn vnější ochranný kryt. Tělo je tvořeno litou ocelí a je překryto stínící vrstvou, ve které jsou zabudovány hliníkové plechy určené k odvádění tepla. Vnější ochranný plášť je z oceli. Vnitřní koš je tvořen nerezovou konstrukcí, která je montovaná.



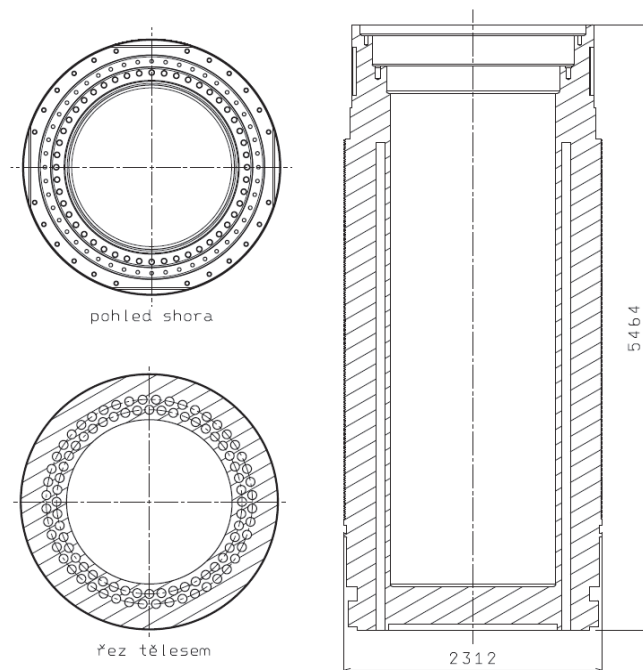
Obr.: 20 – Kontejner TN-68 [16]

3.6 Kontejnery typu CASTOR

Kontejnery typu Castor jsou osvědčené obalové soubory vyráběné v různých typových variantách pro různá paliva např. PWR, BWR, HTR, MTR atd. Výška kontejnerů se pohybuje podle typu od 4,0 do 6m, průměr pak 1,5 až 2,5m a tloušťka stěny od 0,25 do 0,45m [19]. Tyto OS jsou využívány i na našich jaderných elektrárnách. Jejich typické provedení spočívá v masivním odlévaném tělese většinou z tvárné litiny s kuličkovým grafitem (označení GGG 40). Stínění je zde realizováno pomocí axiálních otvorů vrtaných ode dna téměř po celé výšce kontejneru a to po celém obvodu tělesa. Tyto otvory jsou vyplněny stínící látkou, většinou polyethylenem. Otvory jsou vrtány na dvou roztečných kružnicích tak, aby se tyto vývrty na jednotlivých kružnicích navzájem překrývaly. Stínění pak pokryje záření po všech radiálních směrech a těleso si zachová svoji tuhost. Tyto vývrty jsou patrné z obrázku 22. Kontejner je utěsněn vždy systémem zdvojeným vík, kde prostor mezi primárním a sekundárním víkem je plněn inertním plynem o vyšším tlaku, než je tlak inertního plynu uvnitř kontejneru, i než hodnota atmosférického tlaku v okolí. Tento tlak mezi víky je nepřetržitě sledován a v případě jeho snížení je indikována případná netěsnost. Obě víka jsou pak překryta horní deskou. Primární víko je opatřeno malým těsněným otvorem, který slouží pro odsátí vody a vakuaci kontejneru po jeho zaplnění. Vnější povrch tělesa kontejneru je opatřen hustě rozloženými radiálními žebry pro zlepšení přestupu tepla. Pro manipulaci s celým kontejnerem pak slouží radiální čepy. Jednotlivé části Castoru jsou zřejmé z obrázku 21, na kterém je možno vidět typ CASTOR V/52, což je velký vysokokapacitní kontejner, který je konstruován na 52 palivových souborů typu BWR s maximálním obohacením 4.6% U-235. Je schopen odvádět zbytkový tepelný výkon 40kW.

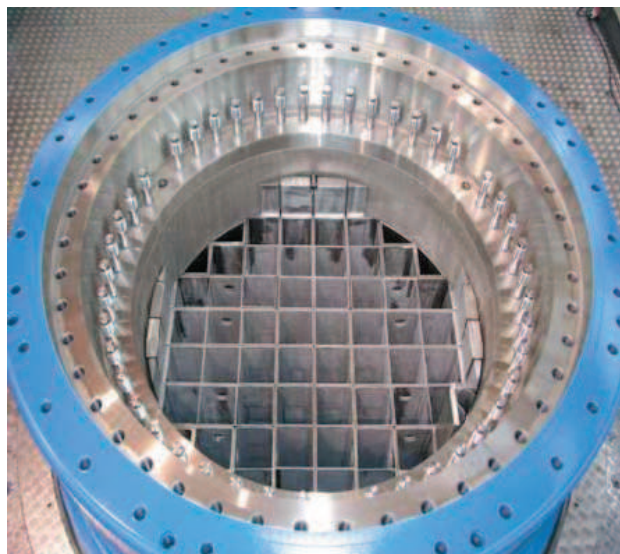


Obr.: 21 - CASTOR V/52 [19]

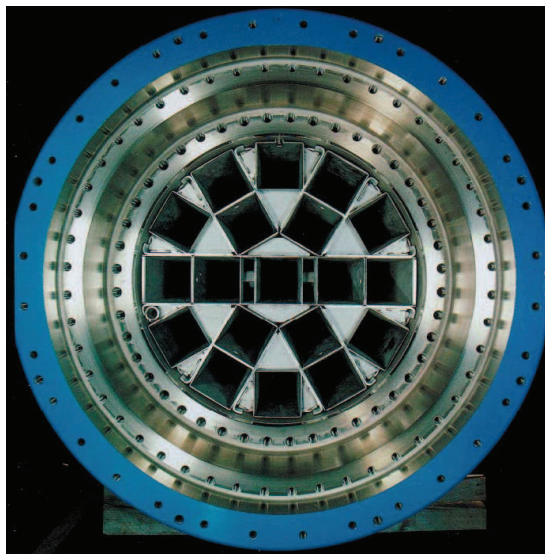


Obr.: 22 - Těleso kontejneru CASTOR

Na následujících obrázcích 23 a 24 jsou fotografie s pohledy do vnitřků kontejnerů s vnitřními koši pro různé typy PWR a BWR paliva. Vlevo je již popsán typ V/52 a vpravo typ Castor V/19. Konstrukce těchto košů je tvarována podle požadavků paliva pro západní typy elektráren, kde u typu V19 je zajímavé uspořádání vnitřního koše pro 19 palivový souborů. Tyto koše jsou vyrobeny převážně z antikorozi oceli.



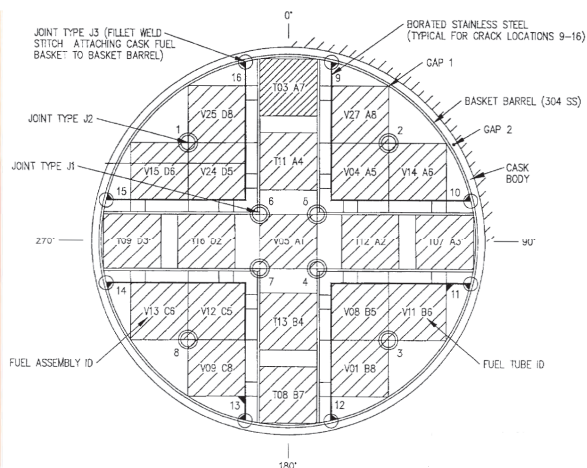
Obr.: 21 – Koš, CASTOR V/52 [19]



Obr.: 22 – Koš, CASTOR V/19 [19]



Obr.: 23 - Koš kontejneru CASTOR V/21 [17]

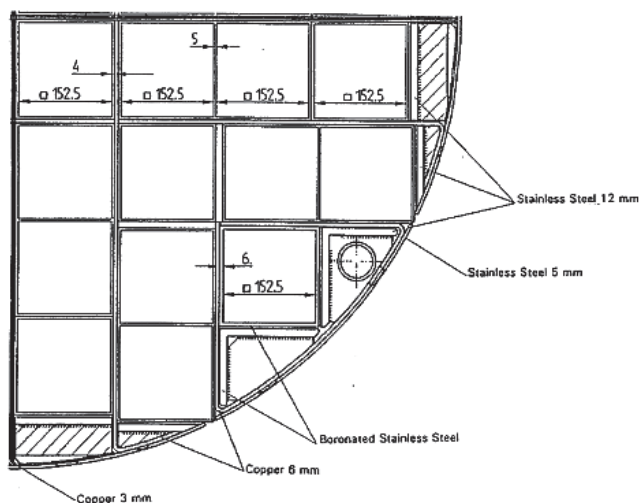


Obr.: 24 – Schéma koše CASTOR V/21 []

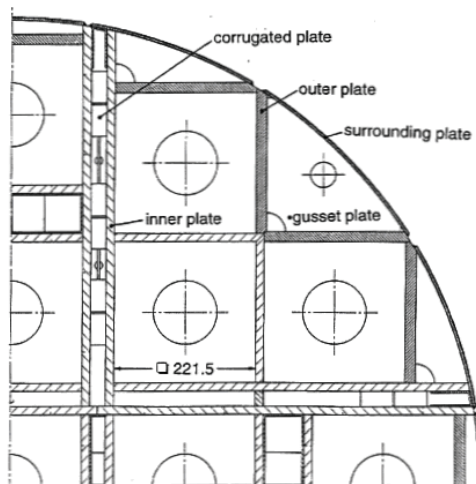
3.6.1 CASTOR V/52 a CASTOR V/21

Kontejnerů typu Castor je velké množství. V následujících odstavcích budou podrobněji popsány koše již zmíněného typu CASTOR V/52 a CASTOR V/21 pro 21 palivových souborů typu PWR. Tyto dva OS a konstrukce jejich košů budou porovnány s ohledem na ukládané palivové soubory, hmotnost komponent a užití materiálu. Na obrázku 23 a 24 je zobrazen koš kontejneru typu CASTOR V/21 a jeho schématický řez. Z obrázků je zřejmé, že konstrukce koše je svařovaná. Koš tvoří vnější nerezový plechový válec a jednotlivé řady buněk jsou k němu na osmi místech (v řezu) přivařeny. Jednotlivé buňky mají tvar čtverce 221,5 x 221,5 mm a jsou vyrobeny ze silného několikamilimetrového nerezového plechu. Buňky jsou k sobě navzájem rovněž přivařeny pomocí příčných plechů mezi jednotlivými řadami. Na obrázku 25 je ¼ řezu koše kontejneru CASTOR V/52. Jeho buňky mají rozměr 152,5 x 152,5 mm. Mezi jednotlivými buňkami z nerezového plechu jsou zde vloženy ještě různé plechy a profily z mědi pro zlepšení přenosu tepla. Použití mědi zde nemá žádný pevnostní efekt a je zde použita pouze pro zlepšení vodivosti konstrukce [26]. Vnitřní plechy jsou opatřeny na každé straně vrstvou bórovaného niklu. Bór (izotop B¹⁰) má zajistit

podkritičnost systému naplněného kontejneru díky jeho velkému účinnému průřezu pro absorpci neutronů.



Obr.: 25 – 1/4 řez košem CASTOR V/52 [26]



Obr.: 26 – Jiné uspořádání koše V/21 [26]

V následujících tabulkách jsou uvedeny základní parametry kontejnerů CASTOR V/52 a CASTOR V/21. V první tabulce jsou uvedeny celkové vnější a vnitřní rozměry jednotlivých kontejnerů. V tabulce 3 jsou pro představu uvedeny hmotnosti jednotlivých komponent a celková skladovací a transportní hmotnost OS.

parametr kontejneru		CASTOR V/19	CASTOR V/52
Vnitřní výška	[mm]	5025	4550
Vnitřní průměr	[mm]	1480	1480
Celková výška	[mm]	5826	5451
Vnější průměr	[mm]	2436	2436

Tab.: 2 – Porovnání rozměrů (data [26])

		CASTOR V/19	CASTOR V/52
Hmotnost palivových souborů	[kg]	15900	16640
Hmotnost kontejneru	[kg]	88490	83960
Hmotnost primárního víka	[kg]	4430	4430
Hmotnost sekundárního víka	[kg]	2320	2320
Hmotnost tlumičů pádu	[kg]	15590	16220
Transportní hmotnost	[kg]	136440	135250
Skladovací hmotnost	[kg]	123200	123590

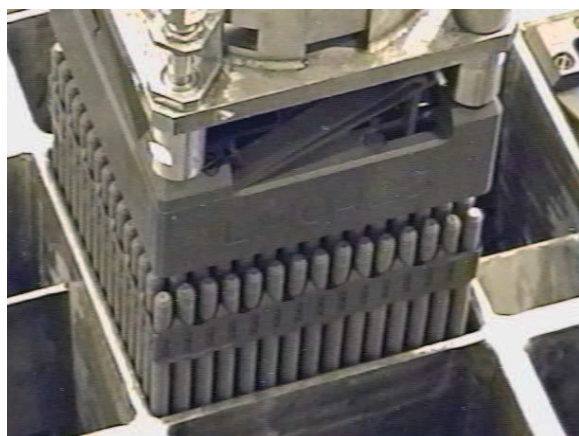
Tab.: 3 – Hmotnosti (data [26])

V tabulce 4 jsou uvedeny parametry palivových souborů, pro které jsou OS navrženy a je zřejmé, že tyto obalové soubory jsou vhodné i pro paliva MOX (PWR nebo BWR).

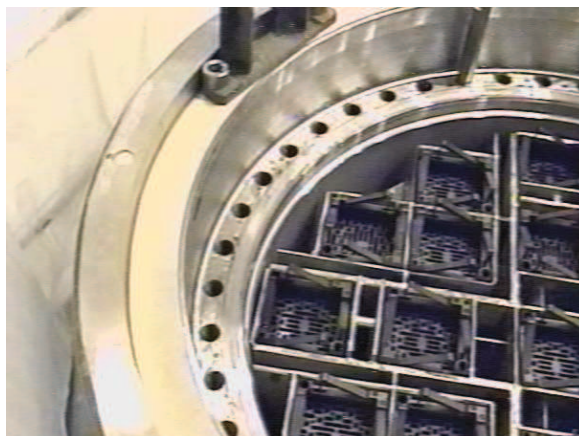
CASTOR V/19		Homog.	Heterog.	Heterog.
Typ - FA	PWR	UO₂	UO₂	UO₂
Max. počet pal. Souborů		19	15	15
Max. vyhoření	GWd/t _{HM}	55	55	55
Počáteční obohacení U ₂₃₅	%	4,05	4,05	4,05
Typ - special FA			MOX	UO₂
Max. počet speciálních souborů		-	4	4
Max. vyhoření	GWd/t _{HM}	-	55	65
Počáteční obohacení U ₂₃₅	%	-	3,95/3,7	4,05

CASTOR V/52		Homog.	Heterog.
Typ - FA	BWR	UO₂	UO₂
Max. počet pal. Souborů		52	52
Max. vyhoření	GWd/t _{HM}	55	55
Počáteční obohacení U ₂₃₅	%	4,05	4,05
Typ - special FA			MOX
Max. počet speciálních souborů		-	16
Max. vyhoření	GWd/t _{HM}	-	50
Počáteční obohacení U ₂₃₅	%	-	5,7/5,5

Tab.: 4 – Parametry palivových souborů jednotlivých kontejnerů (data [26])



Obr.: 27 - Koš CASTOR V/21 [30]

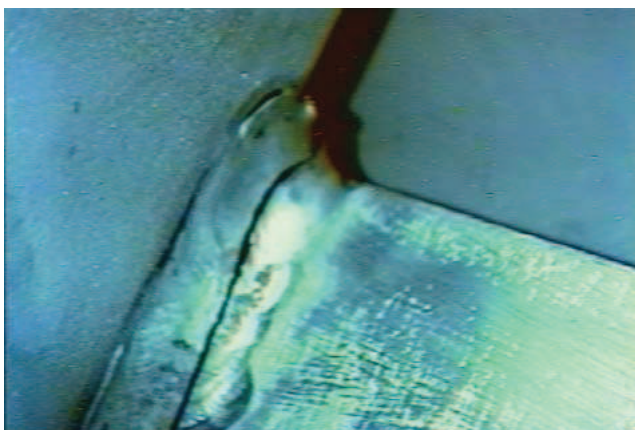


Obr.: 28 – Koš CASTOR V/21 [30]

Na výše popsaných kontejnerech bylo prováděno mnoho testů a výpočetních analýz. Konstrukce jednotlivých košů vykazují dobré vlastnosti jak pevnostního charakteru, tak relativně dobrého odvádění tepla. Protože je však konstrukce svařovaná, nastávají zde některé neblahé jevy, jako je například praskání svarů na určitých místech koše. Tyto praskliny jsou viditelné na fotografiích na obrázcích 29 a 30. Antikorozi ocel, ze které jsou koše kontejnerů převážně vyrobeny má označení WStE 500.



Obr.: 29 – Porušení svaru u koše V/21 [30]



Obr.: 30 – Porušení svaru u koše V/21 [30]

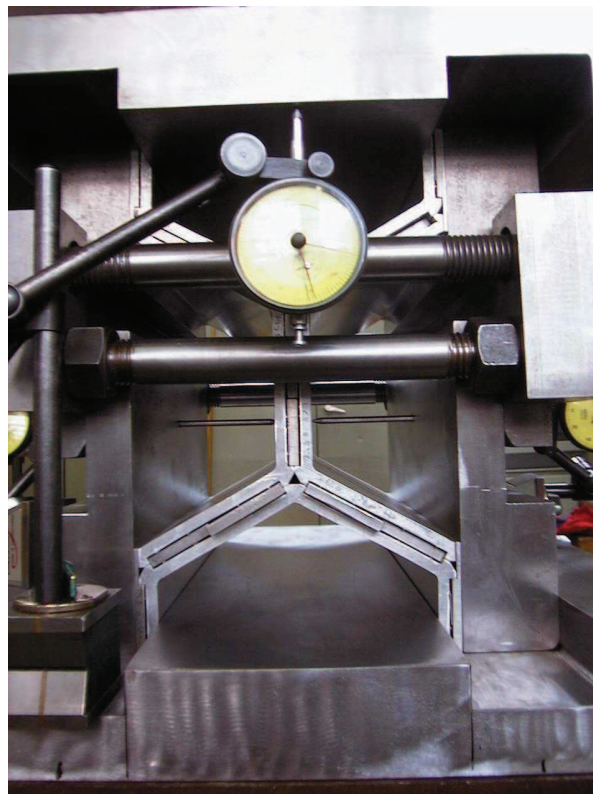
3.6.2 Kontejner CASTOR[®] 440/84M

Tento kontejner je určen pro palivové soubory východního typu elektráren velice rozšířeného projektu VVER 440. Je používán například v jaderné elektrárně Dukovany. Jedná se o inovaci oproti předchozímu typu CASTOR 440/84. Mezi těmito typy jsou drobné rozdíly z důvodu použití většího obohacení palivových souborů a tedy i vystavení kontejneru většímu tepelnému a radiačnímu zatížení. Kontejner CASTOR 440/84M má oproti svému předchůdci zesílené biologické stínění a konstrukčně a materiálově upravené provedení vnitřního koše kontejneru. Zlepšená je zde těsnost kontejneru, kde je navíc kromě kovového těsnění pod každé víko přidáno ještě elastomerové těsnění. Jeho vnější těleso je vyrobeno opět z tvárné litiny s kuličkovým grafitem (GGG 40). Na vnitřní povrch tělesa je nanášena niklová vrstva proti korozi a na vnější povrch se nanáší epoxidové nátěry. Vnitřní vestavbu uvedeného obalového souboru tvoří koš ŠKODA 440/84M s vlastním designem společnosti ŠKODA JS a.s. [28]. Skládá z 85 šestihranných trubek vyrobených ze slitiny hliníku AlMg1,8 metodou protlačování. V mezerách mezi stěnami trubek jsou umístěny ocelové plechy z ATABORu (typ oceli sycené bórem), které koš vyztužují. Tyto plechy jsou tvarově uzpůsobeny tak, aby vždy jednotlivé páry těchto plechů vyskládaných nad sebou tvořily klíny a při montáži se

navzájem rozpíraly. Takto jsou vyplněny všechny otvory mezi jednotlivými profily po celé výšce. Naplněný koš obsahuje celkem 84 palivových souborů, centrální buňka je neobsazena. Těsnicí principu, který je popsán výše. Jako inertní plyn je použito hélium, kterým se po vysušení plní prostor kontejneru na mírný podtlak. Prostor mezi jednotlivými víky se pak plní na přetlak 0,6 MPa. Pro manipulaci je kontejner vybaven dvojicí dolních a horních čepů.



Obr.: 31 – Koš ŠKODA 440/84M [17]



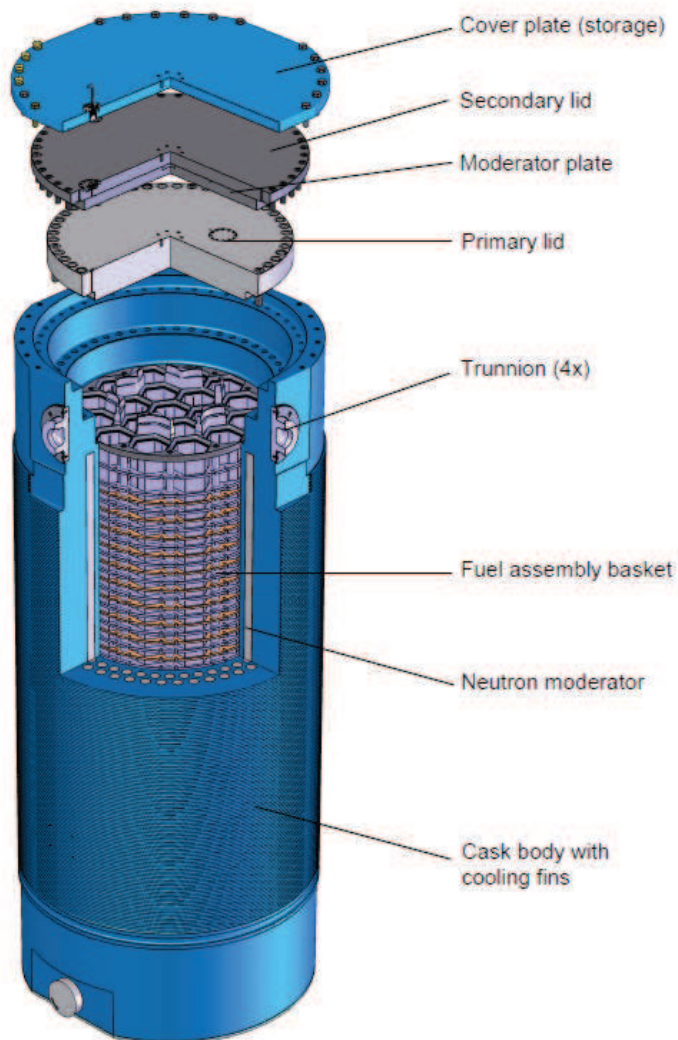
Obr.: 32 – Mechanická zkouška segmentu koše [28]

Úspěšná konstrukce koše neobsahuje žádné svary a splňuje všechna kritéria pro transportní a skladovací OS za všech možných hypotetických nehodových stavů. Z mechanického hlediska je nejméně příznivým zátěžovým stavem vodorovný pád kontejneru z výšky devíti metrů na tuhou podložku. Bylo proto potřebné zaručit omezené deformace koše při tomto pádu, aby nebyly poškozeny vsunuté palivové soubory, a aby tyto soubory bylo možné z koše následně vytáhnout [28]. Pro určení mezního stavu pevnosti koše ŠKODA 440/84 byla uskutečněna rovněž pevnostní zkouška jeho segmentu. Tato zkouška zároveň potvrdila konzervativnost výsledků výpočtů provedených na základě matematického modelování především metodou konečných prvků [28].

3.6.3 Kontejner CASTOR[®] 1000/19

V této kapitole bude popsán relativně nedávno vyvinutý kontejner s označením CASTOR[®] 1000/19, který byl vyvinut pro palivo VVER 1000, které používá JE Temelín. Těleso kontejneru je stejného provedení jako ostatní výše popsané kontejnery typu Castor, liší se pouze rozměrově. Velké změny představuje nová koncepce vnitřního koše. Tento typ kontejneru splňuje všechna kritéria pro transportní a skladovací kontejner pro používání

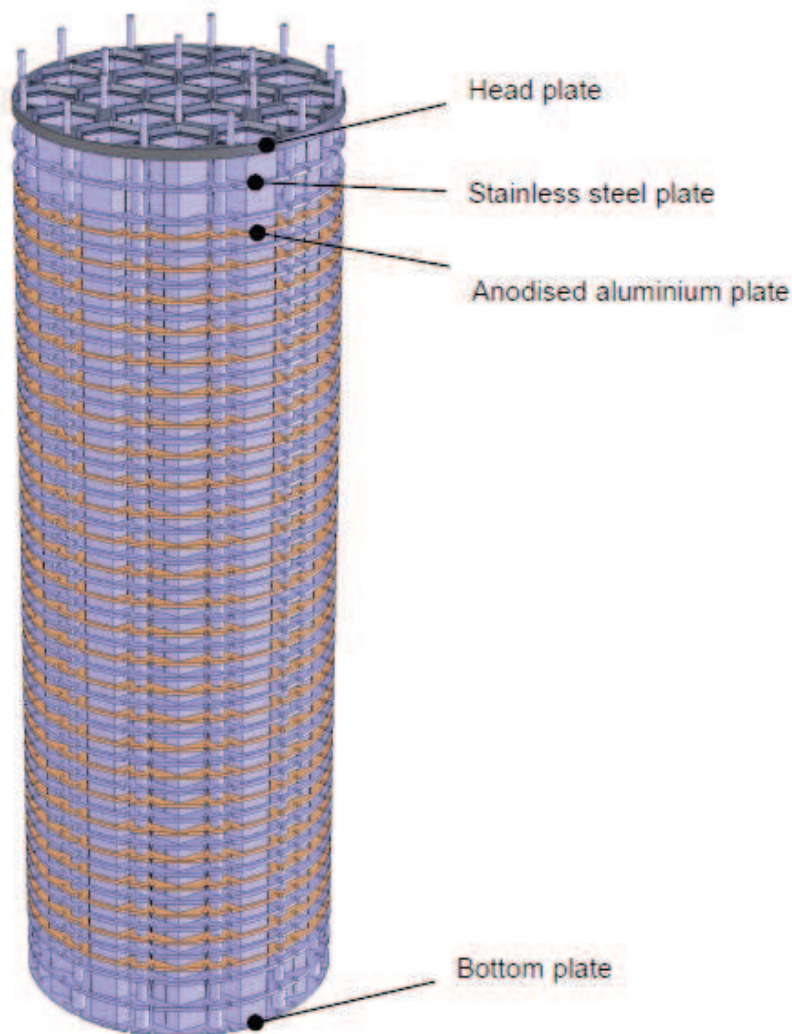
v ČR. Koš pojme 19 palivových souborů a je schopen odvádět tepelný výkon kolem 17 kW [27]. V naší jaderné elektrárně Temelín jsou již v meziskladu uloženy první kontejnery s vyhořelým palivem tohoto typu.



Obr.: 33 – Kontejner CASTOR® 1000/19 [27]

PARAMETR	VNĚJŠÍ ROZMĚRY	VNITŘNÍ ROZMĚRY
Výška	5500 [mm]	4630 [mm]
průměr	2330 [mm]	1470 [mm]
Hmotnost	116 [t]	

Tab.: 5 – Parametry kontejneru CASTOR® 1000/19 (data: [27])



Obr.: 34 – Koš kontejneru CASTOR® 1000/19 [27]

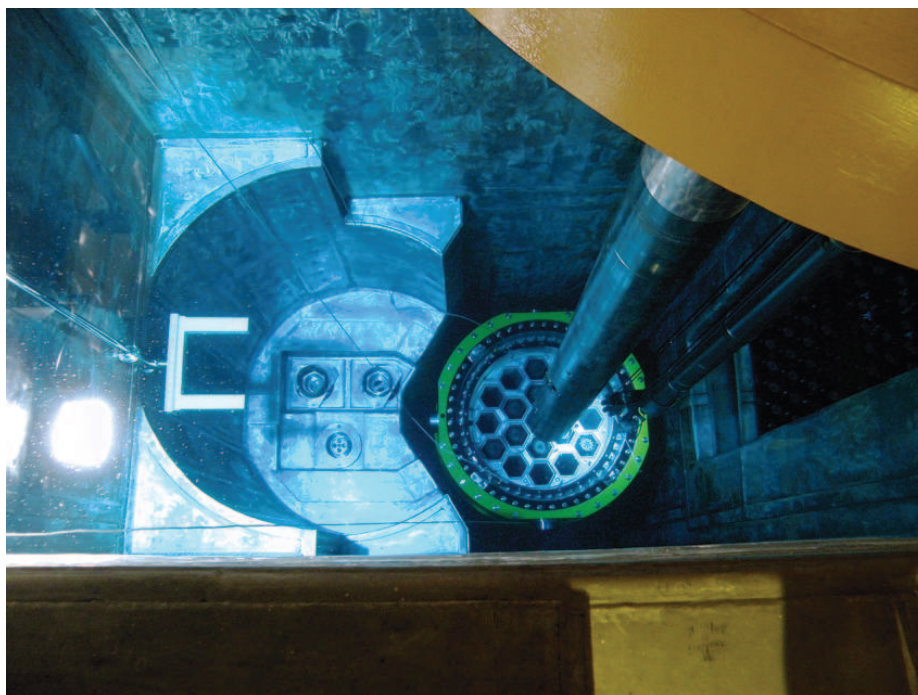
Konstrukce koše je vyrobena z 19 plechových šestiúhelníkových trubic z bórované nerezové oceli, okolo nichž jsou kolmo umístěny 2 typy válcových plechů z nerezové oceli a hliníkových eloxovaných plechů. Tyto plechy jsou střídavě řazeny po výšce koše a na obou koncích je tato sekvence zakončena deskami z ušlechtilé nerezové oceli. Prostor mezi plechy je vymezen distančními trubkami. Celý koš drží pohromadě 12 dlouhých závitových tyčí po obvodu stažených na obou koncích konstrukce. Horní válcové tyčinky slouží pro vymezení zbylé vůle k víku kontejneru.

Hlavní myšlenkou střídajících se desek je vyhovění požadavkům na mechanickou odolnost a zároveň dobré odvádění tepla. Nerezové plechy zde přenášejí mechanické zatížení, zatímco hliníkové plechy zlepšují radiální vedení tepla z koše. Obrázek 25 ukazuje konfiguraci koše bez vložených palivových souborů.

3.7 Technologie plnění kontejnerů

Plnění kontejneru se provádí pod hladinou vody. Plní se vždy palivem, které bylo již několik let (5-10) umístěno v bazénu skladování a jeho teplota i radioaktivita klesla. Vlastnímu plnění kontejnerů předcházejí zkoušky manipulací s kontejnerem. Během 9 dnů se zkoušejí manipulace uvnitř výrobního bloku elektrárny i převoz kontejneru do skladu. Výsledky zkoušek elektrárna předává SÚJB a po splnění všech podmínek dostane kladné stanovisko pro zaplnění kontejneru použitým palivem a jeho vyvezení do skladu [9].

Když je vše připraveno, ponoří se transportní a skladovací kontejner pod vodní hladinu a zavážecím strojem se do něj přemístí předem určené soubory. Po zaplnění se kontejner uzavře primárním víkem (stále pod hladinou vody). Poté může proběhnout vytažení kontejneru a zahájí se odvodňovací a vysušovací práce. Po vysušení se připevní sekundární víko a provedou se kontroly těsnosti a teploty povrchu kontejneru. Prostor mezi primárním a sekundárním víkem je zaplněn inertním plynem a vyšším tlaku, než je tlak okolí a tlak uvnitř kontejneru. Pomocí případného snížení tohoto tlaku se identifikují netěsnosti jednotlivých vík. Před transportem do skladu kontejner zapečetí inspektoři MAAE a Evropské komise [9].



Obr.: 35 - Plnění kontejneru CASTOR[®] 1000/19 – ETE [9]

4 Požadavky na transportní a skladovací OS

Kontejnery pro suché skladování a pro přepravu používané v ČR musí projít složitým procesem licencování a podle platných vyhlášek o typovém schvalování obalových souborů, musí splňovat stanovená kritéria. Tyto vyhlášky vychází z předpisů MAAE, a podle nich se řídí i SÚJB, který vydává potřebná povolení k užívání schválených typů kontejnerů. V následujícím textu budou popsány požadavky na kontejnery, které jsou převážně převzaty z oficiálních webových stránek SÚJB (zdroj [2]), některá upřesnění pak z [24].

4.1 Zkoušky pro podmínky nehody při přepravě

Jedná se o zkoušky prokazující schopnost přestát podmínky nehody při přepravě, které jsou rozděleny následovně:

Mechanické zkoušky:

- *Volný pád z výšky 9 m na neúhybnou podložku*
- *Volný pád na kolmou tyč dlouhou 0,2 m o průměru 0,15 m z výšky 1 m*
- *Volný pád tělesa hmotnosti 500 kg na obalový soubor z výšky 9 m*

Všechny zmíněné zkoušky se provádějí v dané posloupnosti a kontejnery jsou vždy při pádu orientovány tak, aby bylo dosaženo největšího poškození. Ze zkušeností z provedených zkoušek a z výpočtů simulovaných situací se ukazuje, že největší pozornost je třeba věnovat 1. mechanické zkoušce, tedy pádu z 9m v horizontální poloze kontejneru při dopadu. Další 2 zkoušky nevykazují na masivních kontejnerech větší poškození.

Tlakové zkoušky:

- *15 m pod hladinou vody (150 kPa) po dobu 8 hodin (prováděna při nižší aktivitě)*
- *200 m pod hladinou vody (2 Mpa) po dobu 1 hodiny (pro $A > 10^5 A^2$ *)*
- *0,9 m pod hladinou vody (9 kPa) po dobu 8 hodin (pro štěpné materiály).*

Těmito zkouškami se zatížením vnějším přetlakem se ověřuje hermetičnost a těsnost kontejneru. U takto silnostěnných masivních kontejnerů nemají takovéto hodnoty přetlaku větší vliv na pevnost. Poslední zmíněná tlaková zkouška se u OS, o kterých pojednává tato práce neprovádí.

* A_2 - hodnota aktivity radioaktivní látky jiné, než zvláštní formy podle přílohy č. 3, tabulka č. 1 vyhlášky č. 317/2002 Sb.

Tepelná zkouška:

- *Odolnost kontejneru při vystavení teplotě 800 °C po dobu 30 minut*

Při této zkoušce je vzorek v tepelné rovnováze při okolní teplotě 38°C, za podmínek ozáření sluncem a s maximálním vývinem vnitřního tepla.

4.2 Ostatní kritéria pro typové schválení

Zkoušky prokazující schopnost přestát normální podmínky přepravy:*

- *Postřik vodou – intenzita 5cm/hod*
- *Pád z výšky 0,3 m*
- *Pád tyče 6kg z 1m*

Dimenzování:

- *Dle podmínek přepravy, resp. Zrychlení daného typem prostředku.*

Dávkové příkony:

- *Normální podmínky přepravy*
 - *1m od povrchu: max. 0,1 [mSv/h]*
 - *Na libovolném místě vnějšího povrchu max. 2 [mSv/h]*
- *Přeprava za podmínek výlučného použití*
 - *1m od povrchu: max. 0,1 [mSv/h]*
 - *Na libovolném místě vnějšího povrchu max. 10 [mSv/h]*

Teplota povrchu:

- *Normální podmínky přepravy max. 50 [°C]*
- *Přeprava za podmínek výlučného použití max. 85 [°C]*

* Pozn.: Vzhledem k tomu, že zkoušky prokazují schopnost přestát podmínky nehody jsou přísnější, je možné tyto zkoušky normální přepravy vynechat. [24]

Zajištění těsnosti:

- Omezení ztráty max. $10 A_1^*$ pro krypton 85
- Omezení ztráty max. A_2^{**} pro ostatní radionuklidy

Teplodolnost materiálu:

- $Od - 40 [^{\circ}C]$ (přechodová teplota pod $-40 [^{\circ}C]$)
- $Do +38 [^{\circ}C]$ (max. dle teplotního výpočtu)

4.3 Příklady prováděných crash-testů

Splnění výše popsaných kritérií je prokazováno analytickými a numerickými výpočtovými modely a jejich výsledky jsou dokládány příslušnými crash-testy. Takovýchto testů proběhlo ve světě již mnoho. Mezi ty klasické patří zmíněný pád z devíti metrů na tuhou podložku (obr. 36 a 37) nebo žárová zkouška při simulovaném požáru. Ale byly simulovány i tak málo pravděpodobné havarijní situace jako například pád motoru dopravního letadla na kontejner nebo různé typy vlakových srážek s vozidly transportujícími testované obalové soubory.



Obr.: 36 - Pádová zkouška [13]



Obr.: 37 - Zkouška horizontálním pádem [13]

* A_1 - hodnota aktivity radioaktivní látky zvláštní formy

** A_2 - hodnota aktivity radioaktivní látky jiné, než zvláštní formy podle přílohy č. 3, tabulka č. 1 vyhlášky č. 317/2002 Sb.

5 Návrh koše kontejneru pro palivo VVER 1000

Tato část práce obsahuje celý postup vlastního návrhu vnitřního koše kontejneru pro palivo VVER 1000. Nejprve jsou popsány uvažované varianty, které jsou nahrubo zpracovány jako určité koncepce možných řešení s ohledem na znalosti a informace získané během studia této problematiky, z nichž je většina uvedena v rešeršní části této práce. Z těchto informací se při těchto návrzích vycházelo a bude na ně dále odkazováno. Následně je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení a je vybrána varianta, která je detailně zpracována. Na této variantě jsou provedeny některé důležité analytické a numerické výpočty. Tyto výpočty jsou převážně informativního charakteru a slouží zejména pro upřesnění dimenzovaných rozměrů některých konstrukčních uzlů a k ověření základních vlastností, které konstrukce koše musí podle přísných kritérií splňovat. Součástí výpočtů je také 2D numerická simulace stacionárního rozložení teploty v uvažovaném řezu koše a kontejneru, a prokázání tak schopnosti této konstrukce vhodně odvádět teplo na vnitřní stěnu tělesa kontejneru a následně přes tuto stěnu a přes vnější žebrovaný povrch do okolí skladovacího prostoru.

Jednotlivé detaily navrhované konstrukce jsou umístěny přímo v textu u popisů jednotlivých celků a mezi konkrétními výpočty. Kompletní výkresová dokumentace, 3D model sestavy a jednotlivé výkresy součástí jsou pak přiloženy na konci práce jako součást příloh.

5.1 Stanovené parametry a omezující kritéria návrhu

Geometrická omezení:

Omezujícím faktorem je geometrie vnějšího tělesa, zejména pak vnitřní průměr a výška válcového prostoru. Tyto parametry jsou známy z výkresu zadaného tělesa kontejneru a jsou zároveň omezujícími (maximálními) rozměry vnitřního navrhovaného koše s uvažováním vhodných vůlí kvůli teplotním dilatacím.

$$D_{iv} = 1482 [mm] \quad \text{vnitřní průměr tělesa}$$
$$v_{iv} = 4700 [mm] \quad \text{maximální výška koše}$$

Dalším omezením jsou vnější rozměry palivových kazet, které jsou známé z [25], kde výška kazety v podstatě určuje minimální vnitřní výšku tělesa a dále velikost hexagonu, podle kterého budou navrženy rozměry hnízd a maximální počet uložených kazet. Palivový soubor VVER 1000 je na obrázku na následující stránce.

$$D_k = 234 [mm] \quad \text{rozměr na klíč PS}$$

Podle daných rozměrů, je maximální možný počet kazet umístěných do koše 19, a na tento počet bude koš konstruován.

$$n = 19 [-] \quad \text{počet palivových souborů v koši}$$

Teplotní omezení:

Dalšími omezujícími kritérii jsou maximální teplota pokrytí palivových článků a teplota na vnější stěně kontejneru. Tyto teploty jsou samozřejmě závislé na konstrukci koše a vhodnosti použitých materiálů. Koš kontejneru musí být schopen dobře odvádět teplo, přičemž nesmí být překročeny tyto hodnoty:

$$T_{Maxo} = 85 [^{\circ}C] \quad \text{maximální teplota na povrchu kontejneru}$$

$$T_{Maxp} = 350 [^{\circ}C] \quad \text{maximální teplota na povrchu palivového pokrytí}$$

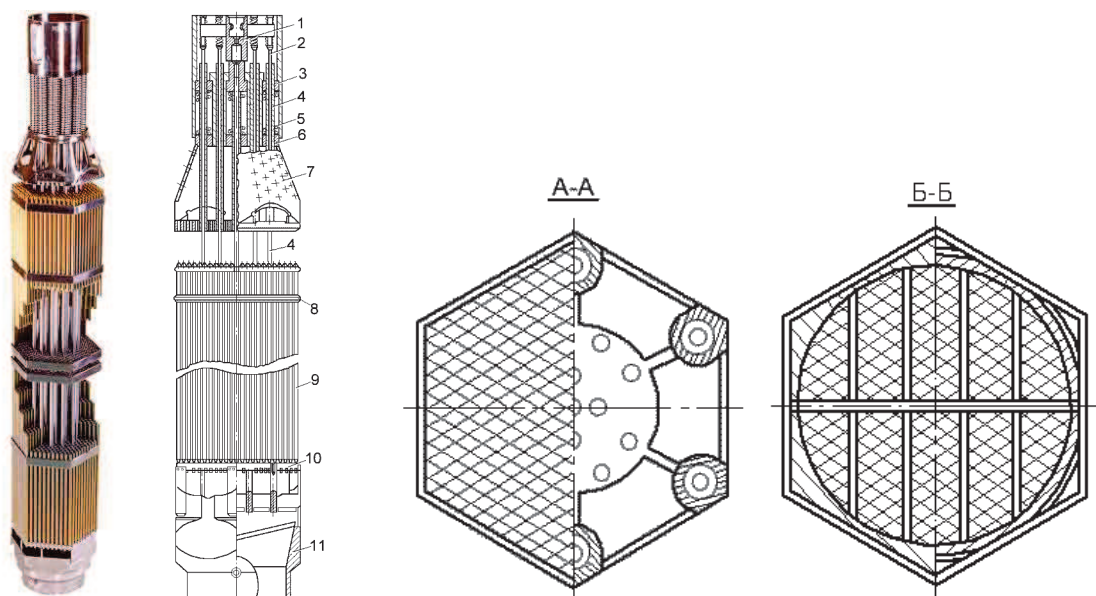
Tato kritéria budou posouzena v konečné části práce při znalosti výsledků tepelných výpočtů

Pevnostní omezení:

Kontejner s navrhovaným vnitřním košem má sloužit jako skladovací i jako transportní, proto se předpokládá pevnostní odolnost při všech možných havarijních stavech, které jsou popsány v kapitole 4. Proto je třeba použít vhodné materiály a správně dimenzovat nosné prvky konstrukce.

Stínění a podkritičnost:

Důležitým aspektem je dobré stínění a zajištění podkritičnosti ve všech uvažovaných havarijních situacích. Toho bude docíleno vhodným rozmístěním otvorů pro palivové soubory a použitím vhodných materiálů s dobrými vlastnostmi pro absorpci neutronů a stínění gama záření.

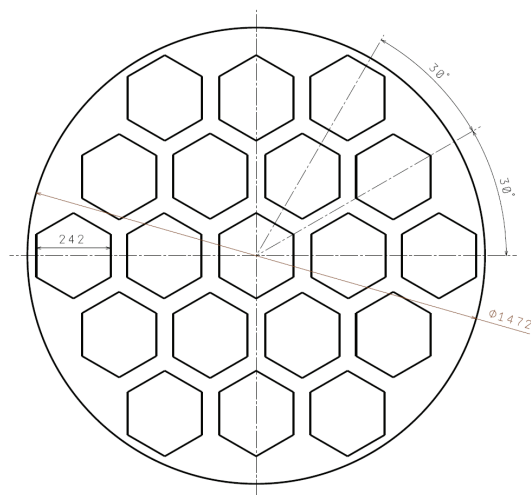


Obr.: - Palivový soubor VVER 1000 [38]

Na obrázku je palivová kazeta VVER 1000. Pro tyto soubory bude koš kontejneru konstruován. Důležitý je rozměr šestihranu a výška kazety, které jsou známy. Dále je pro tepelný výpočet potřeba znát tzv. aktivní výšku kazety, což je výška odpovídající výšce palivových proutků s palivem bez uvažování výšky hlavice a patice souboru. Fyzikální vlastnosti paliva pak závisí na obohacení, vyhoření, době chlazení v bazénech atd.

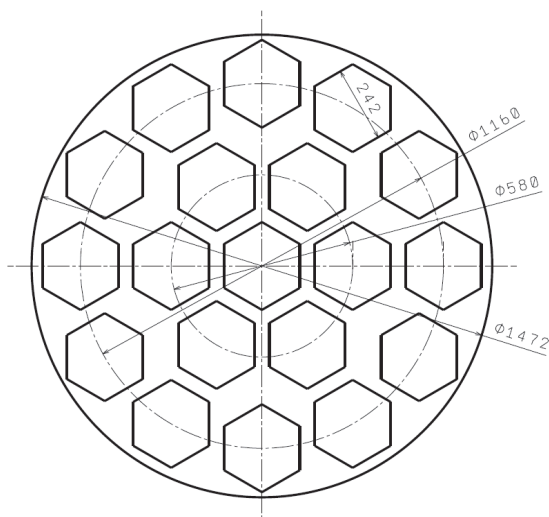
5.2 Návrhy rozmístění palivových souborů

Konstrukce musí obsahovat otvory („hnízda“), do kterých jsou jednotlivé kazety umístěny s patřičnou vůlí, jak kvůli výrobním tolerancím konstrukce, tak také proto, že jednotlivé palivové kazety mohou být vlivem několikaleté práce v reaktoru mírně deformované (zkroucené). Podle předešlých popsaných omezení přichází v úvahu tyto možnosti:

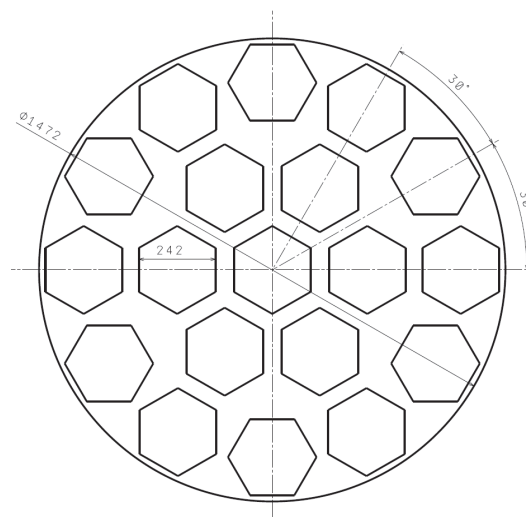


Obr.: 39 – Rozmístění 1

Jako první se nabízí možnost rozmístit jednotlivá „hnízda“ tak, že mezi jednotlivými otvory jsou všude stejné vzdálenosti a kazety tak tvoří symetrický šestihránný obrazec (obr. 39). Toto uspořádání je velice výhodné zejména pro stejné rozteče hexagonů a symetrii, což značně zjednoduší celou konstrukci a výrobu komponent. Jedinou nevýhodou je nevyužitý prostor na okrajích. Všeobecně je snaha soustředit palivové kazety více směrem od středu, kvůli zlepšení odvodu tepla a lepším fyzikálním vlastnostem.



Obr.: 40 – Rozmístění 2



Obr.: 41 – Rozmístění 3

Uspořádání 2 a 3 na obrázcích 40 a 41 jsou sice jako celek také symetrická podle několika os symetrie, ale vzdálenosti mezi „hnízd“ jsou různé. U rozmístění 2 je jediný rozdíl od rozmístění 1 ten, že 6 vnějších otvorů je vysunuto směrem od středu konstrukce a jejich středy leží spolu s ostatními vnějšími otvory na jedné roztečné kružnici. Výhoda spočívá ve vyplnění okrajových nevyužitých míst, ovšem za cenu větší předpokládané technologické náročnosti. U rozvržení 3 je těchto 6 otvorů ještě natočeno vždy o 30°, čímž je docíleno nejtěsnějšího umístění otvorů na okraj konstrukce. Zde však dochází k přiblížení rohů jednotlivých šestihranů ve směru roztečné kružnice a vzniká tak nepříjemně malá mezera, která je velkým konstrukčním omezením.

5.3 Analýza konstrukčních materiálů a polotovarů

Výběr vhodného materiálu je zde velice omezující. Základní materiál či materiály použité na konstrukci koše musí vykazovat několik důležitých vlastností. Jsou to zejména dobrá tepelná vodivost, pevnost, schopnost absorpce neutronů popřípadě možnost sycení základního materiálu vhodným absorbérem (nejčastěji B^{10}) nebo využití dalších stínících materiálů rovnoměrně rozložených do konstrukce. Použité materiály musí být možno vyrobit ve vhodných polotovarech. Všechny vyjmenované vlastnosti jdou u různých materiálu často proti sobě a je nutno volit vhodný kompromis, kde samozřejmě dnes hraje svoji roli i cena.

V rešeršní části práce byly popsány některé konstrukce vnitřních košů, kde bylo využíváno převážně korozivzdorných austenitických ocelí jako například WStE 500, dále slitin hliníku jako AlMg1.8 nebo slitiny Al s jiným obsahem hořčíku až do 6% (slitina AMG6). Popřípadě je možno využít i jiných materiálů či slitin, jako například mědi (pro zlepšení vodivosti), kde měď se využívá jako doplňkový materiál vždy ještě s jinými materiály např. se zmíněnou korozivzdornou ocelí. Všeobecně je však snaha vyhnout se materiálům s obsahem příměsí či prvků, které by mohly být snadno aktivovány zdroji ionizujícího záření paliva a neblaze by tak působily na celkovou bilanci emisí radioaktivního záření OS.

Konstrukce mohou být svařované nebo montované, tvořené různými polotovary jako jsou plechy, různé profily, tyčoviny, silnostěnné desky atd. U měkkých slitin jako jsou slitiny hliníku se nabízí využít protlačovaných profilů jako u koše ŠKODA 440/84M, kde tyto profily jsou vyrobeny ze slitiny AlMg1,8. Zde je však omezení maximální možné velikosti protlačovaného profilu a zejména pak protlačované hmotnosti vztažené na 1m délky profilu, která závisí na možnostech výrobní linky protlačovacího stroje. Při protlačování hliníkových slitin s určitým obsahem karbidu bóru se s jeho vyšší koncentrací snižuje tažnost a tato technologie se pak stává náročnější. Více členitý profil je pak problematické protlačovat.

Austenitickou chromniklovou ocel lze použít v různých polotovarech. Lze ji velmi dobře vyleštit na vysoký lesk. Má vynikající tažnost za studena a dobrou svařitelnost. Obrobitelnost je ztížená, protože za studena zpevňuje. Dlouhodobě ji lze bez problémů vystavit teplotám do 350 °C. Jako nosný materiál koše se velice hodí právě díky dobrým pevnostním vlastnostem a stálosti za vyšších teplot oproti hliníku, u kterého se za zvýšených teplot výrazně zhoršují pevnostní vlastnosti a mimo to je náchylný ke creepu a to již za relativně nízkých teplot. Na druhou stranu je kvalitní austenitická korozivzdorná ocel ve srovnání s hliníkovými slitinami dražší a má horší tepelnou vodivost. Ocel má relativně dobré stínící vlastnosti a lze ji sytit bórem kolem cca 1,5 % (max. 2,2%), u hliníku je to kolem 5% (max. 10%) [25]. Zde záleží na technologii výroby, například hliníkové plechy vyráběné práškovou metalurgií je možné vyrobit až s 30% koncentrací bóru v základním materiálu.

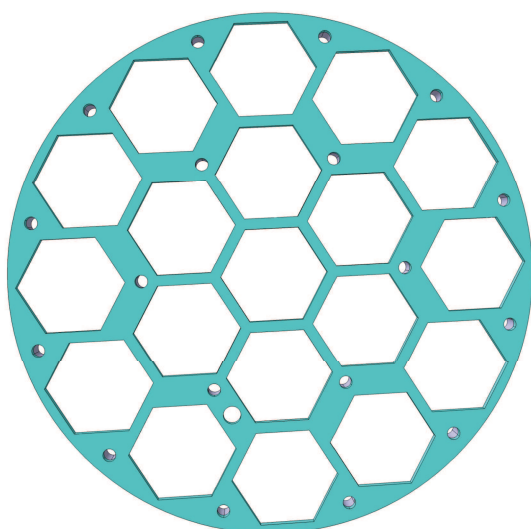
Při výběru materiálu je důležité brát ohled zejména na náročnost výroby a další opracování. Konstrukce nemusí být nutně vyrobena z jednoho materiálu, naopak je vhodné tyto materiály díky různým vlastnostem kombinovat. V dnešní době existuje velké množství speciálních slitin a materiálů vykazujících mimořádné vlastnosti, ovšem jejich limitujícím faktorem je vysoká cena.

5.4 Návrh konstrukčních variant

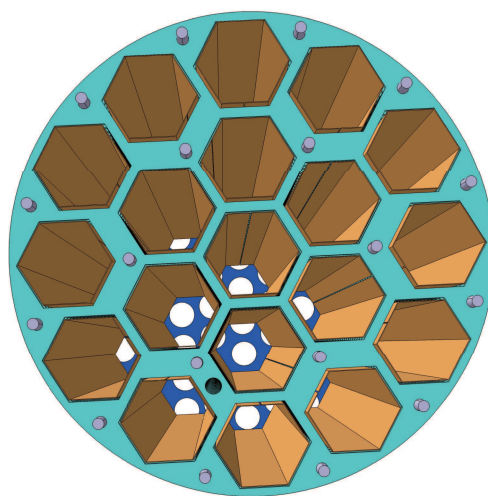
5.4.1 Popis varianty 1

Tato konstrukční varianta je v podstatě založena na podobném principu jako současné řešení koše kontejneru pro jadernou elektrárnu Temelín (viz strana 33.). Koš se skládá ze spodní a horní desky spojené svornými tyčemi, kde prostor mezi těmito deskami je vyplněn kruhovými žebry, které jsou určeny k odvodu tepla a také jako nosné prvky při havarijních situacích, zejména pak při horizontálním pádu. Spodní deska je tvořena ze dvou spolu šroubově spojených částí, kde horní část spodní desky je tvarovaná tak, aby k ní bylo možné pomocí šroubů připojit tvarované plechy (případně profily) sloužící jako úložná místa pro palivové soubory. Svorné tyče budou ve spodní části speciálně zakončeny a rozloženy tak aby rovnoměrně zatěžovaly spodní desku a aby byly dobře zajištěny. Na tyto svorné tyče budou postupně nasouvána jednotlivá žebra, kde mezi jednotlivá žebra budou umístěny distanční trubice s patřičnou tloušťkou, které budou vymezovat vzdálenost jednotlivých žebírek. Horní deska bude masivnější než jednotlivá žebra a bude sloužit jako styková plocha pro utažení matice na koncích svorných tyčí opatřených závitem. Tato horní deska bude tvarována tak, aby bylo možné dobře navést jednotlivé palivové soubory na patřičné pozice. Jednotlivé plechy budou k horní desce také spojeny šrouby. Celý koš bude vyroben převážně z austenitické oceli, případně pro zlepšení odvodu tepla bude využito jiných materiálů pro jednotlivá žebra. Podkritičnost bude zajištěna nasycením plechových trubic bórem.

Na obrázcích 42, 43, 44, 45 a 46 jsou zobrazeny jednotlivé pohledy základního návrhu varianty 1, doplněny krátkým popisem. Na obrázku 47 je pak stručný schématický výkres pro rozměrovou představu popisované varianty.

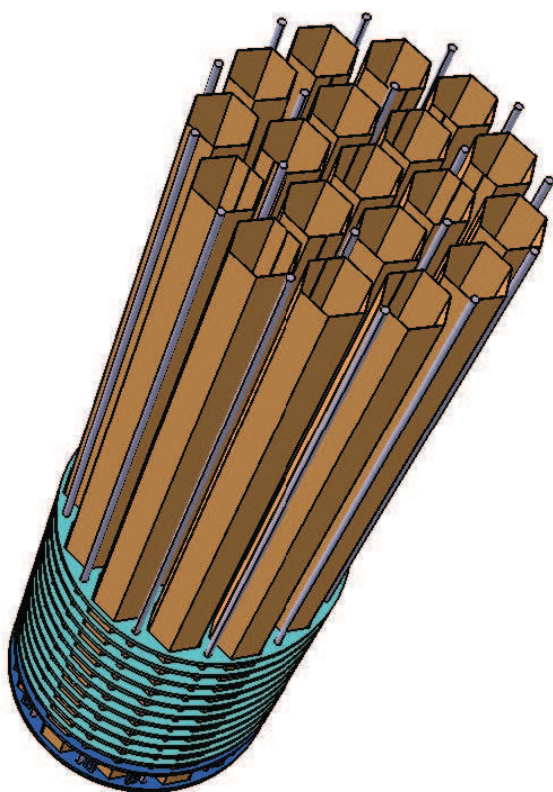


Obr.: 42 – Varianta 1 – žebro

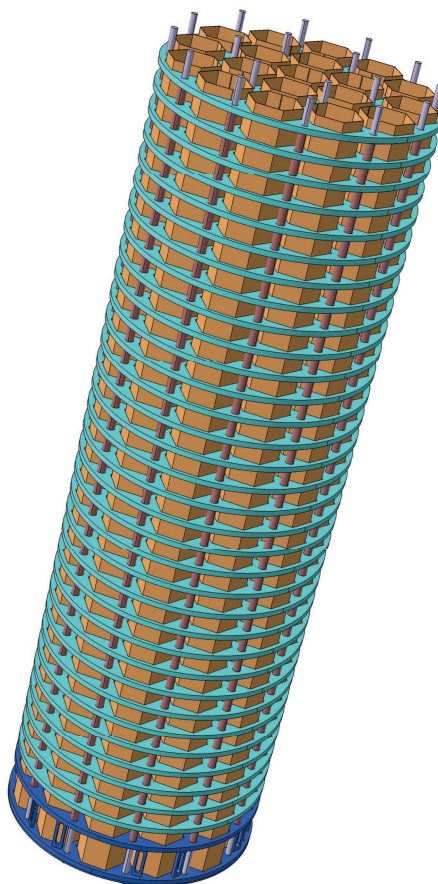


Obr.: 43 – Varianta 1 – pohled shora

Jednotlivá žebra musí být dimenzována na přenos zatížení při zmíněném horizontálním pádu. Pevnostní zhodnocení by se dalo namodelovat pomocí výpočtových softwarů MKP na poměrné části koše. Pokud by tato varianta nevycházela pevnostně s dostatečnou rezervou do meze kluzu, je zde relativně velký prostor pro dimenzování a to buď zesílením jednotlivých žebor nebo zvýšením jejich počtu po výšce koše. Hodně zde záleží na výběru materiálu, kde se kromě pevnosti musí zohlednit i součinitel tepelné vodivosti. Případná možnost je také střídání různých typů žebor z různých materiálů, kdy část žebor bude nosná a část bude sloužit k odvodu tepla. V každém žeboru pak musí být na stejném místě ještě jeden otvor o průměru cca 50 mm aby po naplnění koše bylo možno odsát vodu z jeho dna.



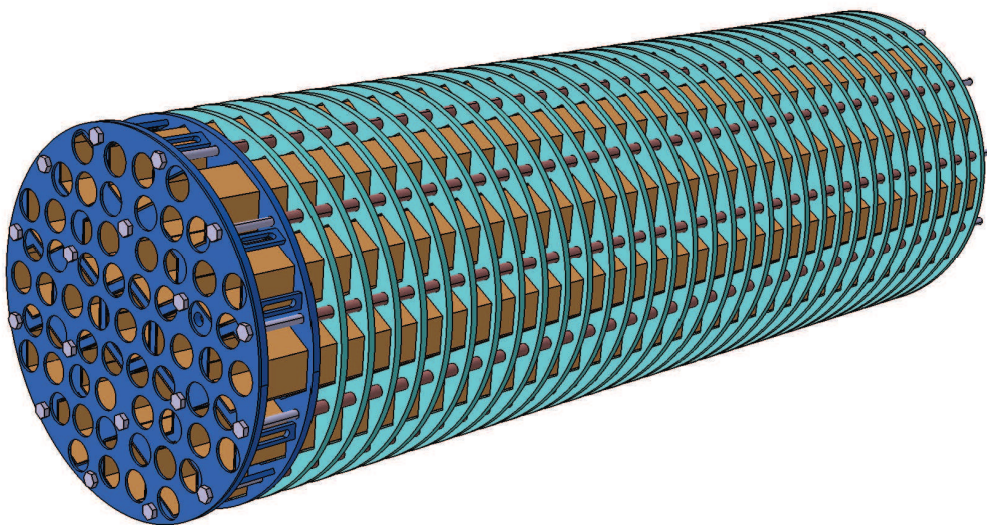
Obr.: 44 – Varianta 1



Obr.: 45 – Varianta 1

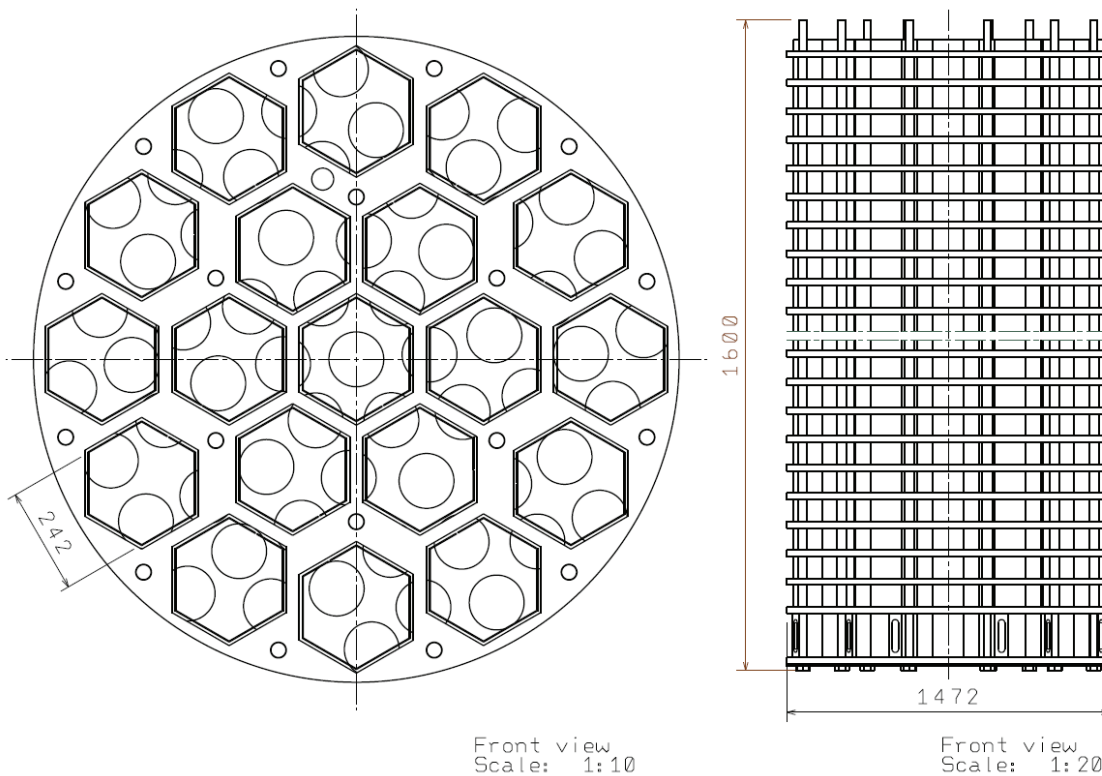
Svorných tyčí je použito celkem 18, z toho 12 tyčí je pravidelně rozmístěno po obvodu koše a 6 prochází meziprostorem středních a krajních otvorů pro palivové soubory. Náročná zde bude zřejmě montáž, kde bude zapotřebí nejprve zajistit všechny plechy a svorné tyče ve spodním dvoudílném dnu (postupně od středu k vnější straně). Volné konce komponent budou přidrženy pomocí přípravku a postupně pak budou „navlékána“ jednotlivá žebra a distanční trubky. U prvních žebor nebude žádný problém vlivem pružnosti volných konců svorných tyčí a plechů. S růstem počtu žebor bude konstrukce „tuhnout“ a proto je nutná relativně přesná výroba otvorů jednotlivých žebor, kde se sice musí počítat s určitou vůlí,

ovšem jen nezbytně nutnou pro montáž, protože velké vůle by zhoršovaly účinnost odvodu tepla jednotlivých žebér.



Obr.: 46 – Varianta 1

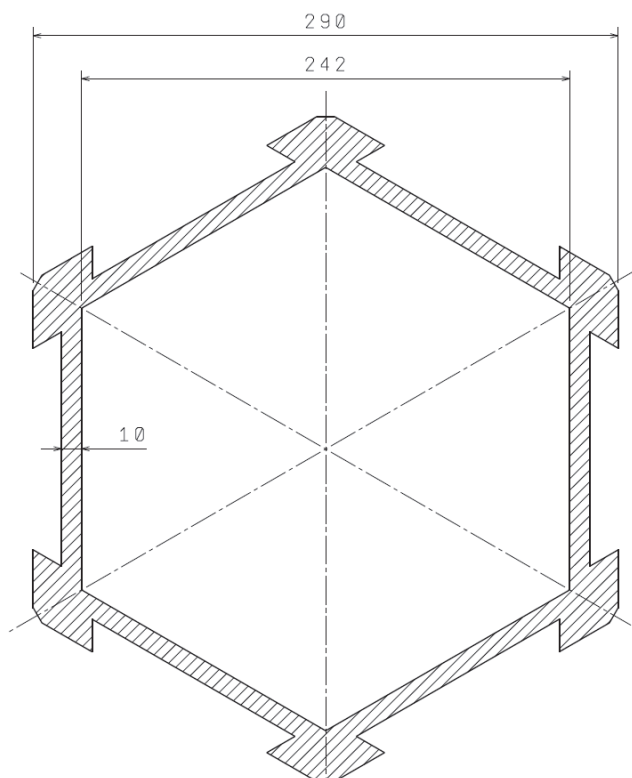
Varianta 1 není kompletně propracována. Návrh slouží pro určité posouzení technologické náročnosti výroby, hrubé ekonomické zhodnocení a celkové posouzení funkčnosti konstrukce. Na následujícím obrázku je výkresové schéma s maximálními rozměry.



Obr.: 47 – Výkresové schéma varianty 1

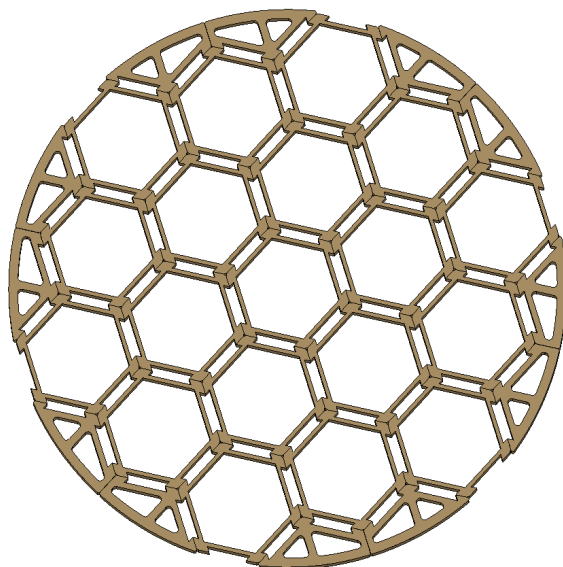
5.4.2 Popis varianty 2

Tato varianta využívá technologie protlačovaných hliníkových profilů, podobně jako například koš Škoda 440/84M. Tyto profily jsou však větší a mají silnější stěny, je zde ale omezení maximálního průtláčného průřezu, o kterém byla zmínka v kapitole 5.3. Proto je návrh průřezu profilu téměř na hraně limitu vyrobitelnosti. Při poptávce výroby obdobných typů profilů byla poptávána firma schopna vyrobit profily o hmotnosti cca 36 kg/m délky profilu relativně geometricky jednoduchého průřezu [25]. U vyšší hmotností nebo velmi tvarově komplikovaných profilů je protlačování již problematické. Pro navrhovanou variantu můžeme tedy brát hodnotu 36 kg/m délky jako limitující kritérium. Předběžný návrh profilu je na obrázku 48.



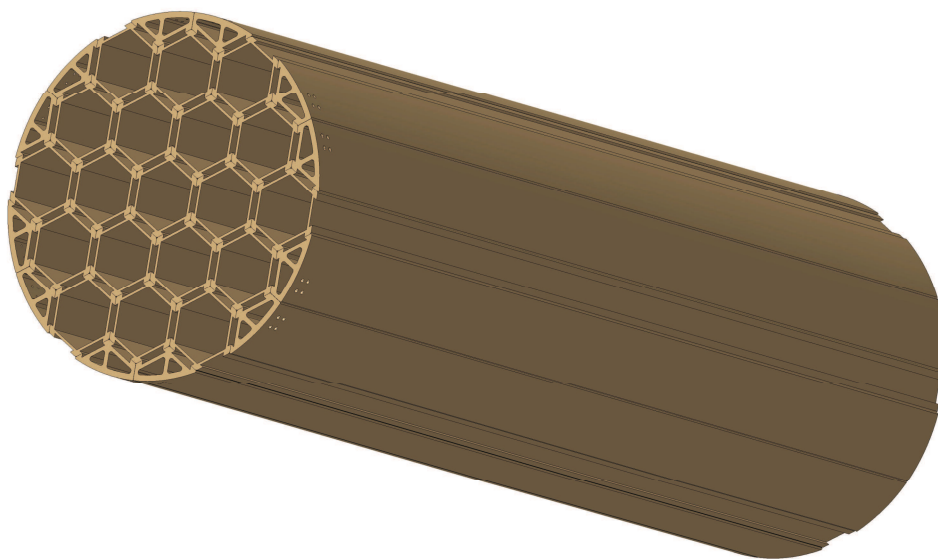
Obr.: 48 – Profil trubky – varianta 2

Rozložení takovýchto trubek bude odpovídat rozmístění podle obrázku 39, které je zde velice výhodné, protože díky symetričnosti lze vyrobit všechny trubky stejného profilu. Vyplnění okrajových míst bude řešeno krajními profily, které mohou být masivnější, protože zde není nutné sytit hliníkovou slitinu karbidem bóru a lze protlačovat i více členité a těžší profily. Okrajové profily jsou celkově kompaktnější oproti trubkám, protože jejich maximální rozměry jsou menší. Jejich stěny je ale potřeba navrhnout masivnější, protože při uvažovaných hypotetických haváriích jsou okrajové profily nejvíce zatěžovány. Dalším úkolem je navrhnut spojení jednotlivých vnitřních profilů mezi sebou a také k jednotlivým okrajům. To bude realizováno pomocí zámků, které budou držet profily u sebe pomocí klínů rozpíraných šroubovým spojem. Tyto klínové zámky budou umístěny ve vybraných patrných z obrázku navrženého profilu. Spojení pak bude ve výšce horní roviny koše, případně v různých vzdálenostech po výšce koše.



Obr.: 49 - Návrh - varianta 2

Poskládané profily k sobě by mohli vypadat jako na obrázku 49. Krajiní profily jsou po dvou kusech na šesti stranách konstrukce koše. Velkou výhodou je, že jsou oba stejné, stačí je pouze otočit. Z toho vyplývá, že v této variantě by byly použity pouze 2 typy profilů, a to středový profil trubky po 19-ti kusech na koš a jeden typ krajního profilu po 12-ti kusech na koš. Předpokládaná délka profilů bude do maximálně 4,5 metru. Celý trubkový koš bude upevněn na spodní nosnou, desku na které budou sedět palivové kazety. Tato deska bude přišroubována k profilům a bude sloužit jako nosný prvek celého koše při transportu do tělesa kontejneru. Profily budou vyrobeny ze slitiny AlMg1.8 popřípadě z jiné slitiny hliníku a hořčíku. Obsah bóru se předpokládá kolem 5%. Výhodou koše by měla být dobrá tepelná vodivost, proto bude třeba zajistit dobrý kontakt mezi jednotlivými trubkami. Pevnostně nepříznivý stav se předpokládá při horizontálním pádu na tuhou podložku.



Obr.: 50 – Návrh varianta 2

Varianta 2 je relativně jednoduchá. Nebude zde použito mnoho komponent a technologická náročnost není velká. Výhodou je, že metoda protlačování je dosti přesná, a proto nebude potřeba povrch protlačovaných profilů dále obrábět či jinak upravovat. Hliníkové slitiny jsou relativně cenově dostupné, proto by celá konstrukce měla vycházet z ekonomického hlediska přijatelně.

5.5 Technicko-ekonomické zhodnocení variant

5.5.1 Posouzení variant

	POZITIVNÍ ASPEKTY +	NEGATIVNÍ ASPEKTY -
Varianta 1	Široká možnost dimenzování, malá výrobní omezení použitých polotovarů	Náročnější montáž, důraz na přesnou výrobu
	Dobré pevnostní vlastnosti	Relativně velké náklady na materiály a polotovary
	Stálost konstrukce i za vysokých teplot	Velká členitost konstrukce → předpoklad horší vakuace po plnění
	Konstrukce je montovaná, neobsahuje svary	Větší předpokládaná hmotnost konstrukce
Varianta 2	Výhodná výrobní technologie, přesné protlačované profily bez nutnosti dalšího opracování	Výrobní omezení (maximální průřez protlačovaného profilu, nutná jednoduchost profilu)
	Relativně nízké náklady na materiály a polotovary	Předpokládané horší pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot
	Předpoklad dobrého vedení tepla konstrukcí (Al – slitina)	
	Jednoduchá montovaná konstrukce (bez svarových spojů)	
	Malá celková hmotnost konstrukce	

Tab.: 6 – Posouzení variant

5.5.2 Výběr varianty

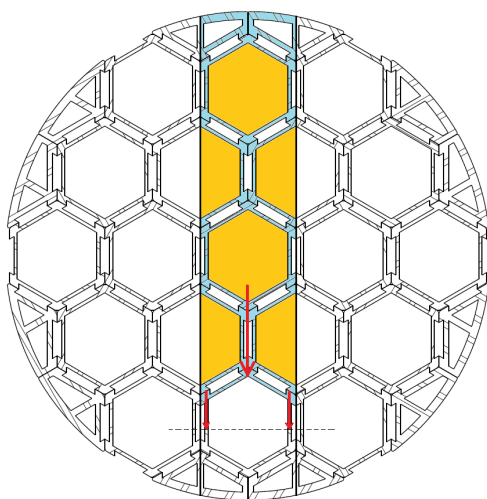
Na základě srovnání kladných a záporných stránek jednotlivých variant byla vybrána varianta 2, která bude podrobněji zpracována. Bude vytvořen již kompletní model celé sestavy koše s jednotlivými výkresy a budou provedeny příslušné informativní výpočty. Ke konci práce bude proveden komplexnější tepelný výpočet na řezu koše s geometrií navržené varianty 2.

5.6 Výpočet zatížení při horizontálním pádu

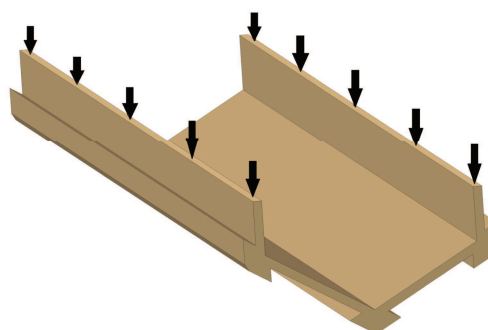
U navržené konstrukce se jako nejnepříznivější hypotetická situace předpokládá nehoda při transportu, kdy OS havaruje s cizím tuhým tělesem (např. mostová konstrukce) a to bokem OS. Tato situace je modelově odpovídající horizontální pádové zkoušce z 9 m na tuhou podložku. Jako informativní výpočet nosnosti poslouží analytické zhodnocení síly působící na zaplněnou konstrukci koše při daném zrychlení. Protože je konstrukce symetrická, bude výpočet proveden pro 2 polohy a to pro 0° a natočení koše o 30° . Při uvažovaném pádu budou nejvíce zatíženy okrajové profily koše, ty však lze snadno předimenzovat a i v této uvažované konstrukci budou podstatně masivnější než vnitřní trubky. Proto budeme jako kritické místo posuzovat nosný průřez stěn okrajové trubky, kdy tento průřez bude v případě nehody nést zatížení hmotností palivových souborů nad sebou včetně hmotnosti profilů a to s daným uvažovaným zrychlením. Kritická místa jsou patrná z obrázků.

parametry:

- | | |
|---|----------------------------|
| • Hmotnost palivového souboru | $m_{PS} = 766$ [kg] |
| • Hmotnost vnitřní trubky | $m_p = 158$ [kg] |
| • Hmotnost krajního profilu | $m_{kp} = 176$ [kg] |
| • Uvažované zrychlení | $a = 100.g$ [m/s^2] |
| • Výška stěny | $h = 0,106$ [m] |
| • Rozměry zatěžovaného řezu | $l = 4,5$ [m] |
| | $t = 0,01$ [m] |
| • Vlastnosti hliníku Al-6061 +5% B ₄ C (při 150°C) * | $R_{p0,2} = 49$ [MPa] |
| | $R_m = 92,8$ [Mpa] |
| • Vlastnosti AlMg1.8 (150°C) | $R_{p0,2} = 64$ [MPa] |
| | $E = 5,5 \cdot 10^4$ [Mpa] |



Obr.: 51 – Uvažovaná hmotnost natočení A



Obr.: 52 – Uvažovaný řez

Vybarvená plocha na obrázku představuje veškerou hmotnost nad uvažovaným řezem. Tu můžeme vyjádřit následovně:

* $R_{p0,2}$ a R_m závisí na typu slitiny. Uvedené hodnoty jsou pro čistý hliník s příměsí 5% B₄C a jsou získány z [24]. Uvažovaná teplota konstrukce v okrajové části koše je uvažována 150°C. $R_{p0,2}$ pro slitinu AlMg1.8 je známa opět pouze jako verbální informace z [24]. Pro informativní výpočet tedy bude brána tato hodnota.

$$m_{cA} = 4 \cdot m_{PS} + 4,5 \cdot m_p + 2 \cdot 0,6 \cdot m_{kp} \quad (5.1)$$

$$m_{cA} = 4 \cdot 766 + 4,5 \cdot 158 + 2 \cdot 0,6 \cdot 176 = 3986 \text{ [kg]}$$

Nyní můžeme vyjádřit působící sílu:

$$F_A = m_{cA} \cdot a \quad (5.2)$$

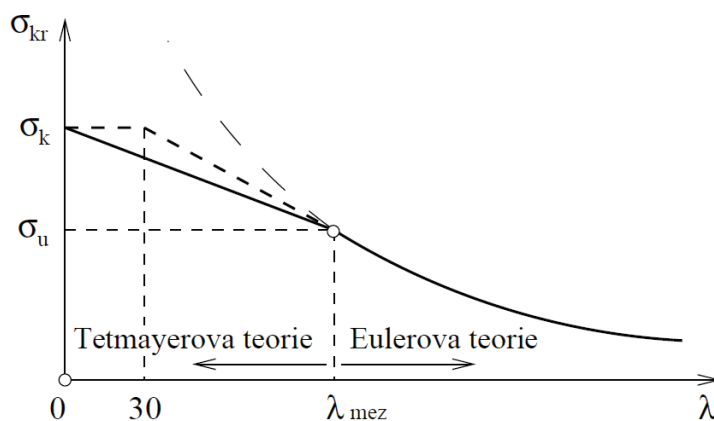
$$F_A = m_{cA} \cdot 100 \cdot g = 3986 \cdot 100 \cdot 9.81 = 3,91 \cdot 10^6 \text{ [N]}$$

Tlakové napětí působící v uvažovaném řezu je pak:

$$\sigma_A = \frac{F}{A} \quad (5.3)$$

$$\sigma_A = \frac{F_A}{2 \cdot l \cdot t} = \frac{3,91 \cdot 10^6}{2 \cdot 4,5 \cdot 0,01} = 4,34 \cdot 10^7 \text{ [Pa]} = 43,4 \text{ [MPa]}$$

Výsledná hodnota napětí vyšla s velkou rezervou do meze pevnosti i do meze kluzu, pak v tomto případě s takto natočeným košem při uvažovaném zrychlení 100g konstrukce vydrží bez problémů. Pro konzervativní přístup je však potřeba posoudit také vzpěrnou pevnost štíhlé stěny. Při posuzování únosnosti štíhlých konstrukčních prvků se vyskytují stabilitní problémy. Mezi ně patří vzpěr přímých prutů, klopení nosníků nebo boulení stěn. K zjištění kritického napětí se využívá Eulerova teorie vzpěru, popřípadě Tetmayerova teorie pro nepružnou oblast, kdy kritické napětí roste lineárně od meze úměrnosti do meze kluzu. To v této oblasti věrněji popisuje reálný stav oproti Eulerově teorii, kde v této oblasti hyperbolická Eulerova křivka rychle vzrůstá a kritické napětí zde neodpovídá skutečnosti. Proto v této oblasti Eulerova teorie neplatí.



Obr.: 53 - Teorie vzpěru [31]

Výpočet štíhlostního poměru podle [31]:

$$\lambda = \frac{l}{i_{\min}} \quad (5.4)$$

Kde
$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} \quad (5.5)$$

Po vyčíslení je:

$$\lambda = h \cdot \sqrt{\frac{A}{J_{\min}}} = h \cdot \sqrt{\frac{l \cdot t}{l \cdot t^3}} = 0,106 \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 0,01}{4,5 \cdot 0,01^3}} = 36,7$$

Pro srovnávací mezní štíhlost platí následující vztah, případ vzpěru je uvažován pro $n=1$:

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{n \cdot E}{R_{p0,2}}} \quad (5.6)$$

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 5,5 \cdot 10^{10}}{6,4 \cdot 10^7}} = 92,1$$

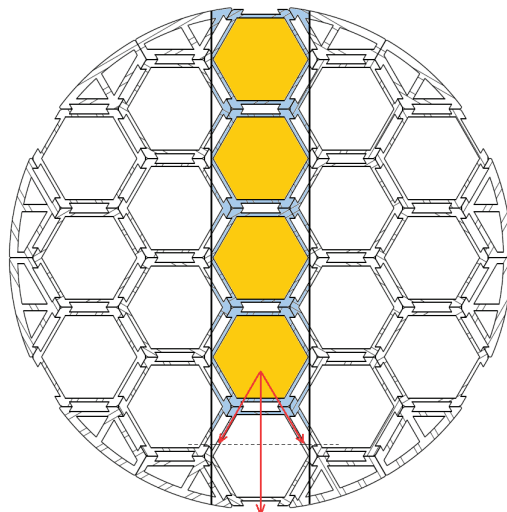
Při porovnání je zjištěna následující nerovnost:

$$\lambda < \lambda_m \quad (5.7)$$

Protože štíhlostní poměr je menší než mezní štíhlostní poměr, nelze použít Eulerovu teorii vzpěru. Pro použití Tetmayerovy teorie je potřeba znát experimentálně zjištěné konstanty k danému materiálu. Z obrázku je však zřejmé, že pro štíhlostní poměry menší než 30 mají kritická napětí hodnotu rovnou mezi kluzu a není proto nutné posuzovat konstrukci na vzpěr, pouze na prostý tlak. Podle námi zjištěného štíhlostního poměru s hodnotou 36,7 lze předpokládat, že kritická hodnota nebude výrazně nižší než mez kluzu, přesto je dobré uvažovat při návrhu k této mezi určitou rezervu, protože jisté malé snížení kritického napětí vlivem vzpěru zde existuje. Pro přesné zhodnocení vlivu vzpěru štíhlých stěn, by bylo nutné použít příslušné normy, pravděpodobně stavební normy, kde je předepsáno jak hodnotit kovové konstrukce tohoto typu.

Pro řez natočený o 30° přepočítáme celkovou zátěžnou sílu z rozkladu sil na 2 síly F_{B1} působící kolmo na průřez stěny profilu.

$$F_{B1} = \frac{F_B}{2 \cdot \cos 30} \quad (5.7)$$



Obr.: 54 – Uvažovaná hmotnost natočení B

Opět vyjádříme hmotnost nad uvažovaným řezem:

$$m_{cB} = 4 \cdot m_{PS} + 4,5 \cdot m_p + 2 \cdot 0,2 \cdot m_{kp} \quad (5.8)$$

$$m_{cB} = 4 \cdot 766 + 4,5 \cdot 158 + 2 \cdot 0,2 \cdot 176 = 3845,4 \text{ [kg]}$$

Následně vyjádříme působící sílu F_B , kterou rozložíme na 2 stejně velké působící síly F_{B1}

$$F_B = m_{cB} \cdot 100 \cdot g = 3845,4 \cdot 100 \cdot 9,81 = 3,77 \cdot 10^6 \text{ [N]} \quad (5.9)$$

$$F_{B1} = \frac{3,77 \cdot 10^6}{2 \cdot \cos 30} = 2,177 \cdot 10^6 \text{ [N]}$$

Tlakové napětí působící na kritická místa konstrukce při natočení B je pak:

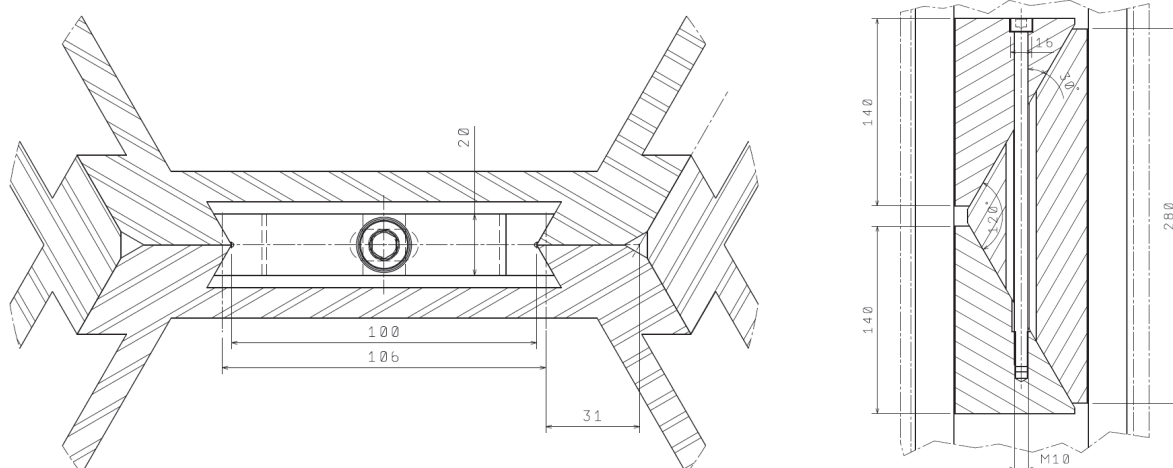
$$\sigma_B = \frac{F}{l \cdot b} = \frac{2,177 \cdot 10^6}{4,5 \cdot 0,01} = 4,84 \cdot 10^7 \text{ [Pa]} = 48,4 \text{ [MPa]}$$

Síly působící do jednotlivých průřezů profilu vychází o něco vyšší než při prvním natočení, přesto jsou tlaková napětí nižší než mez kluzu. Je potřeba zdůraznit, že tyto výpočty jsou čistě orientační a slouží k prvotnímu přiblížení tlakového napětí v kritických místech konstrukce. Pro úplné zhodnocení napěťového stavu při uvažovaném horizontálního pádu by bylo potřeba vytvořit numerický model a aplikovat výpočty pomocí MKP. Tato úloha je značně náročná kvůli nutnosti definování velkého množství kontaktů navzájem dotýkaných profilů a okrajových podmínek zejména u kontaktů okrajových profilů koše s tělesem kontejneru.

5.7 Spojení jednotlivých trubíc

5.7.1 1. typ zámku (nepoužit)

Spojení jednotlivých šestihřanných trubek bude realizováno pomocí klínových svěrných spojů utahovaných šrouby. V prvním uvažovaném typu zámků mají být tyto zámky umístěny na více místech po výšce koše. Na obrázku 55 konstrukční uzel, kde po utažení předepsaným utahovacím momentem vyvodíme sílu v ose šroubu, kterým bude zámek předeprnut a to způsobí rozklad sil v klínech a transformaci osové síly na vodorovnou sílu působící směrem do šestihřanných profilů. Montáž těchto spojů bude probíhat při normální teplotě, ovšem po zaplnění kontejneru palivovými soubory se změní teplota v místech některých zámků blízko středu koše až o 150 °C oproti teplotě při montáži. Protože zámek je z materiálu, který má menší teplotní roztažnost než hliníkové profily, mohlo by při malém utažení dojít k uvolnění spoje a propadnutí zámku na dno koše kontejneru. Musíme tedy šroub utáhnout takovým utahovacím momentem, který ve spoji vyvodí větší pružnou deformaci a tedy větší Δl_p než rozdíl teplotních dilatací Δl_t .



Obr. 55 – Detail svěrného spoje a zámku

Celý koš bude teplotně zatížen. Toto teplotní zatížení bude nerovnoměrné vlivem různého rozložení teploty po poloměru koše. Pro výpočet je uvažován řez na obrázku 55, kde budeme pro zjednodušení uvažovat stejnou teplotu. Šestihřanné hliníkové trubky budou po utažení zámků vůči sobě mírně tlačeny a po tepelném zatížení se celá konstrukce bude roztahovat směrem od středu koše.

- | | |
|--|--|
| • teplotní roztažnost hliníku (profil) | $\alpha_{Th} = 25 \cdot 10^{-6} [1/K]$ |
| • teplotní roztažnost austenitické oceli (zámek) | $\alpha_{To} = 17 \cdot 10^{-6} [1/K]$ |
| • teplotní rozdíl | $\Delta T = 150 [^{\circ}C]$ |
| • délka otvoru (zámku) | $l_0 = 0,106 [m]$ |
| • modul pružnosti hliníku [24] | $E = 5,5 \cdot 10^{10} [Pa]$ |

Nejprve zjistíme teplotní dilatace jednotlivých částí:

$$\Delta l_h = l_0 \cdot \alpha_{Th} \cdot \Delta T \quad (5.10)$$

$$\Delta l_h = 0,106 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 150 = 3,98 \cdot 10^{-4} [m] \Rightarrow 0,398 [mm]$$

$$\Delta l_h = l_0 \cdot \alpha_{Th} \cdot \Delta T \quad (5.11)$$

$$\Delta l_h = 0,106 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 150 = 2,7 \cdot 10^{-4} [\text{m}] \Rightarrow 0,27 [\text{mm}]$$

Celkový rozdíl dilatací, který vytvoří mezeru mezi zámkem a otvorem hliníkového profilu je pak:

$$\Delta l_c = \Delta l_h - \Delta l_o \quad (5.12)$$

$$\Delta l_c = 0,398 - 0,27 = 0,128 [\text{mm}]$$

Výpočet minimální síly vyvozené zámkem na hliníkové profily.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \Rightarrow F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta l_c}{l_0} \quad (5.13)$$

Jestliže za plochu A dosadíme dotykovou plochu klínů zámku s profilem a za l_0 nyní dosadíme celou vzdálenost hrany profilu, můžeme vyjádřit minimální působící sílu potřebnou k předepnutí (Výpočet je informativní, je uvažována pouze pružná deformace hliníkového profilu).

$$F = \frac{5,5 \cdot 10^{10} \cdot (0,02 \cdot 0,28) \cdot 1,28 \cdot 10^{-4}}{0,168} = 2,35 \cdot 10^5 [\text{N}]$$

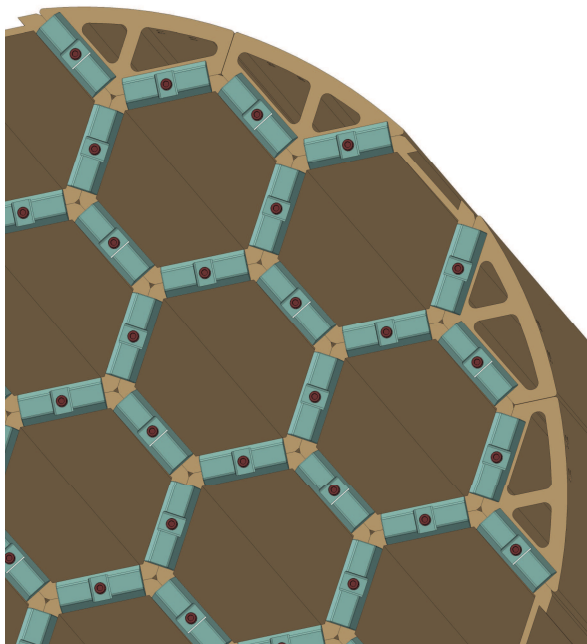
Již na první pohled jsou potřebné síly od klínů na boky profilů velmi vysoké. Řádově přes 200 kN, což je zcela mimo maximální dovolené síly ve šroubech (velikosti M8 nebo M10) a tedy i mimo klasické utahovací momenty.

Z předchozího výpočtu vyplývá, že použití takto navržených klínů nemá velký smysl, protože po zvýšení teploty v konstrukci po zaplnění koše dojde velmi pravděpodobně k propadnutí těchto zámků na dno koše (minimálně u středových profilů nejvíce zatížených teplotou). Možným řešením by bylo zmenšení dotykové plochy zámku, což by zase vedlo k vysokému lokálnímu namáhání a možné lokální deformaci profilu. Lepším řešením by bylo vyrobit zámkové spoje z materiálů s podobnou teplotní roztažností. Ovšem například z hliníku by spoj již nebyl rozebíratelný a hliníkové klíny by se „zakousávaly“ do hliníkových profilů.

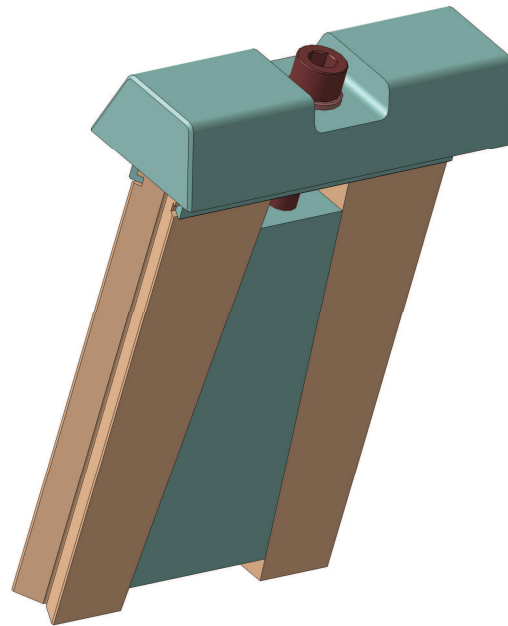
Nakonec tedy nebude použito výše popsaného typu spojení a bude navržen jiný typ zámku, kde tyto zámkové spoje budou umístěny na horní rovině koše a nebude tak hrozit propadnutí při jejich případném uvolnění. Na horní rovině koše budou také menší teploty a lepší přístup při montáži.

5.7.2 2. typ zámku

Následující typ zámku bude umístěn do všech otvorů na horní rovině koše a bude spojovat všechny profily (včetně krajních) k sobě. Výhoda spočívá v přístupnosti k zámkům a snadná možnost jejich utažení. Navržené šrouby jsou velikosti M10 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Horní díl zámku je navržen tak, aby zároveň plnil funkci navedení palivového souboru do určeného otvoru koše při jeho plnění.



Obr.: 56 – Spojení profilů na horní rovině koše

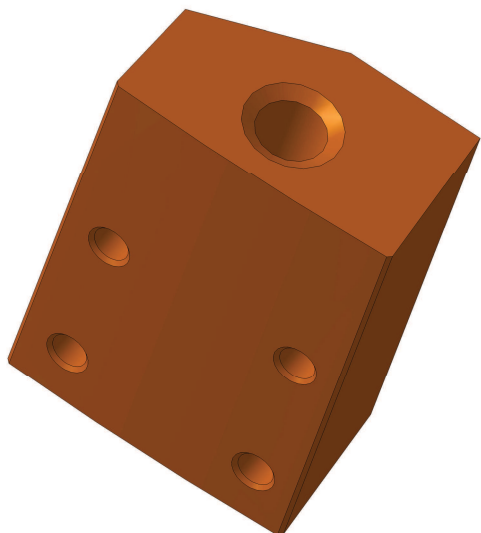


Obr.: 57 – Konstrukce 2. typu zámku

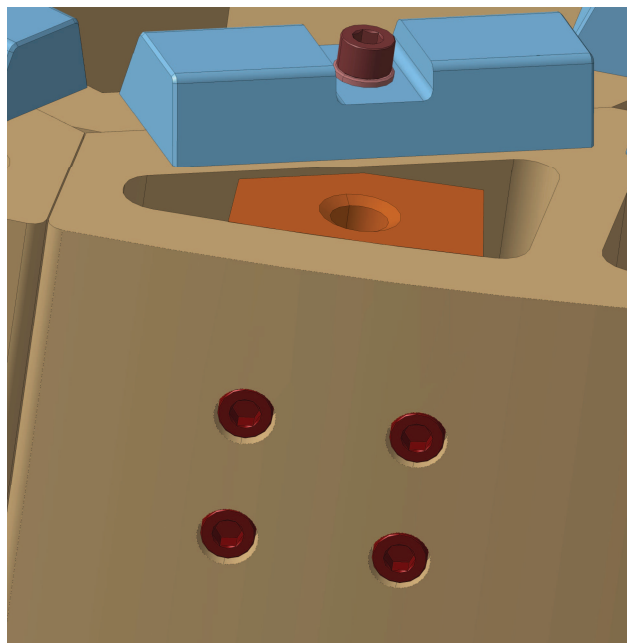
Funkce zámku spočívá v rozepření bočních klínů, které budou spojovat jednotlivé profily. Síla bude vyvozena utažením šroubu, který posouvá středový klín, do kterého je vyroben závit, směrem vzhůru. Klín se pod úhlem 5° po výšce rozšiřuje a tím při jeho zdvihu rozpírá boční klíny. Ty jsou na stykových plochách s profily upraveny ve tvaru „V“ se stejným úhlem jako tvar jednotlivých profilů. Zároveň jsou tyto boční klíny v horní části opatřeny drážkami, pomocí kterých jsou volně přidrženy k hornímu dílu tak, aby při montáži byly rozepřeny ve stejné úrovni. Výkres tohoto zámku je v příloze na konci práce.

5.8 Transport koše

Po smontování konstrukce musí být celý koš možno jeřábem transportovat do připraveného kontejneru. K tomuto transportu slouží hranoly, opatřeny průchozími závitovými otvory o velikosti M20 připravenými pro závěsná oka. Tyto hranoly jsou přišroubovány do krajních profilů. Toto provedení je navrženo z toho důvodu, aby závitové otvory v hranolech pro oka mohly být z oceli a lépe přenesly zatížení. V případě, že by byly otvory vrtány přímo do hliníkových profilů, musely by být menší, aby příliš nezeslabovaly stěny profilů, a musely by být hlouběji vrtány, protože hliník je „měkký“ materiál. Celé zvednutí konstrukce bude realizováno přes roznášecí jeřábovou desku, aby síly na závity ok působily co nejvíce kolmo. Detail upevnění hranolu ke krajnímu profilu je na obrázku 59. Hranol je připevněn čtyřmi šrouby M10 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, které jsou šroubovány z vnější strany profilu do děr se zahloubením pro hlavy šroubů, aby nevyčnívali přes vnější průměr koše.



Obr.: 58 – Hranol se závitovým otvorem

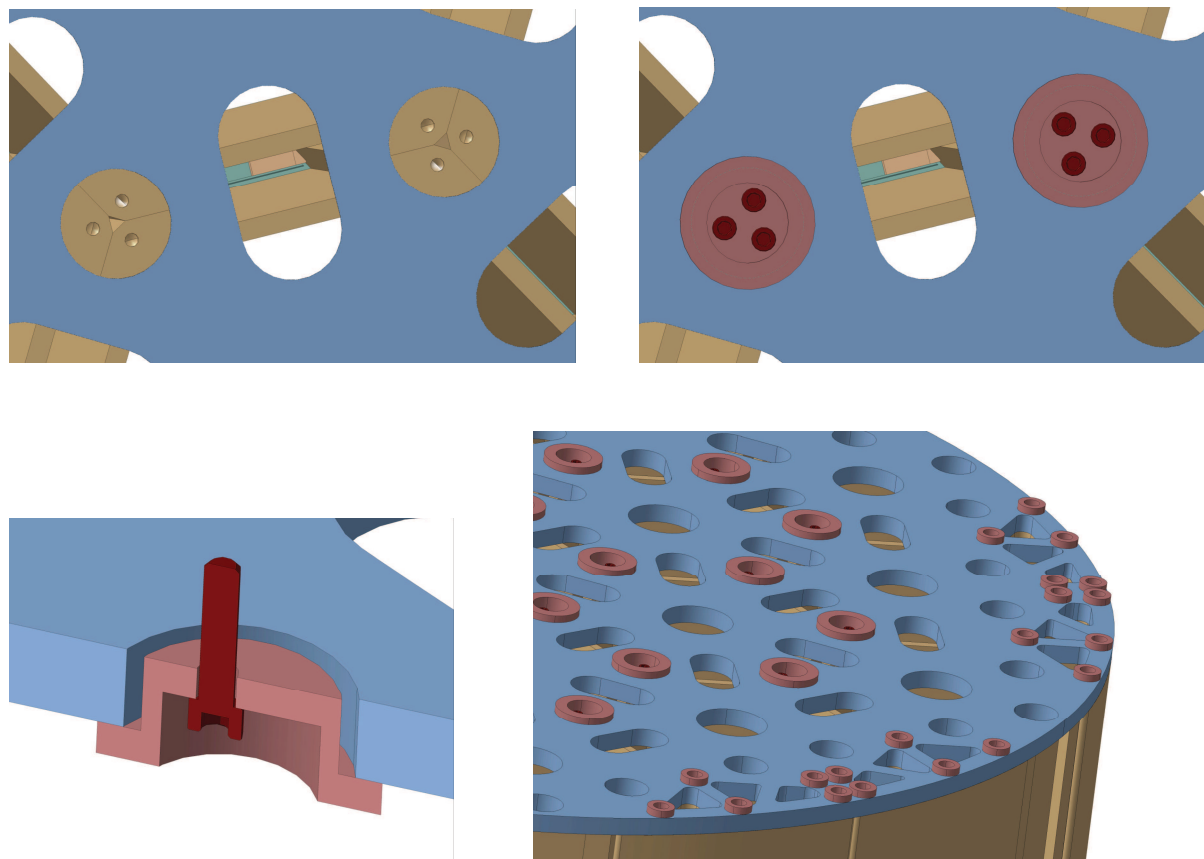


Obr.: 59 – Upevnění hranolu

Všechny profily v horní části jsou k sobě spojené popsány klínovými zámky a ve spodní části budou spojeny deskou, do které budou přišroubovány pomocí speciálně tvarovaných podložek a válcových šroubů velikosti M8. Každý krajní profil pak bude připevněn pěti šrouby M10. Protože síly od hmotnosti celého koše při jeho zdvihu budou přenášeny pouze pomocí hranolů v jednotlivých krajních profilech bude nutno spodní desku nadimenzovat na patřičnou tloušťku tak, aby přenesla váhu celé konstrukce. Profily uvnitř koše budou působit svojí vahou na spodní desku, která bude nesena pouze okrajovými profilem. Tato deska je navržena na tloušťku 20mm a bude proveden kontrolní numerický výpočet pomocí výpočtového modulu softwaru CATIA V5 R19, který využívá MKP. Tvar desky s jednotlivými šrouby a podložkami je podrobně popsán dále.

5.8.1 Nosná spodní deska

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, nosná deska je přišroubována ke všem profilům, jak je patrné z následujících obrázků. Jsou zde použity 2 druhy podložek, kde 1. slouží najednou pro 3 šrouby, které spojují vždy 3 vnitřní trubky v jejich rozích. Kvůli možným nepřesnostem při výrobě nebo při montáži je mezi podložkou a deskou patřičná vůle. Podobně tvarovaná je i 2. podložka, která je pouze pro jeden šroub M10, kde takovýto podložek se šrouby je vždy 5 na jeden krajní profil. Vnitřní podložky se třemi šrouby slouží pouze ke spojení profilů, krajní podložky se šrouby přenáší sílu od hmotnosti konstrukce při transportu koše do kontejneru.



Obr.: 60 – Detaily šroubových spojení na spodní desce

Oba druhy podložek mají tloušťku dosedací části 8mm a válcové hlavy šroubů jsou schovány ve vybrání podložek. Díky tomu vznikne po usazení koše na dně kontejneru prostor, ze kterého bude možno odsát vodu při sušících pracích po naplnění kontejneru palivovými soubory. Proto má také deska větší množství volných rovnoměrně rozložených otvorů, aby voda dobře protékla ze všech trubic a krajních profilů. Odsátí vody bude možné jedním z krajních profilů a to druhým otvorem, než v jakém jsou připevněny hranoly pro oka. Tento menší otvor je dostatečný, protože do něj lze opsat kružnici o průměru 50mm což zcela postačuje pro zavedení odsávací trubice.

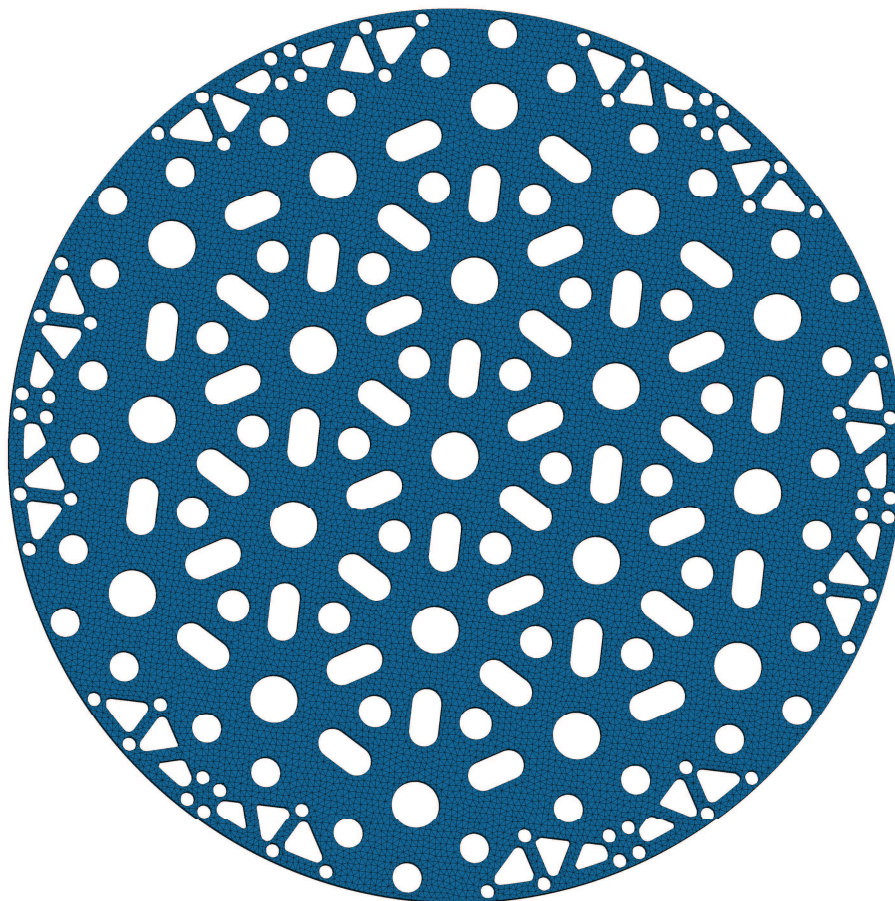
5.8.2 Hmotnost koše

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| • Hmotnost vnitřních trubek | $m_p = 19 \cdot 158 = 3002$ [kg] |
| • Hmotnost krajních profilů | $m_{kp} = 12 \cdot 176 = 2112$ [kg] |
| • Hmotnost spodní desky | $m_d = 190$ [kg] |
| • Hmotnost zámků | $m_z = 66 \cdot 0,44 = 29$ [kg] |
| • Hmotnost hranolů | $m_h = 12 \cdot 4,3 = 51,6$ [kg] |

Celková hmotnost je pak po součtu 5384kg, což po započítání spojovacího materiálu můžeme zaokrouhlit na 5400kg. Výpočet byl prováděn na větší zatížení a to 70 kN.

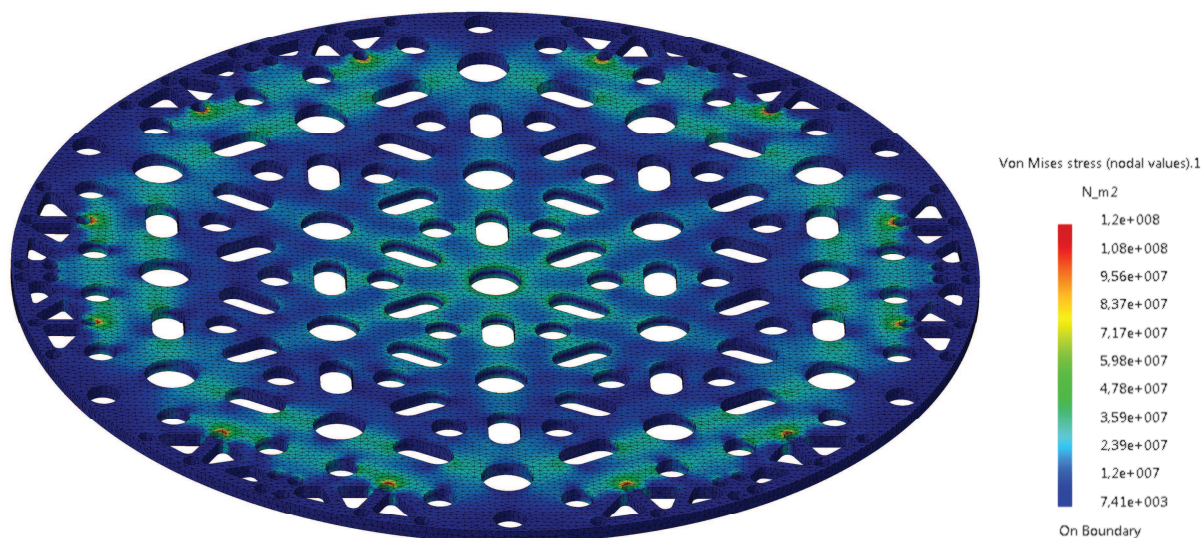
5.8.3 MKP Model spodní desky

Koš se bude do kontejneru transportovat prázdný. Jestliže nyní známe přibližnou hmotnost celého koše, můžeme touto tíhou spodní desku rovnoměrně zatížit, protože hmotnost jednotlivých profilů koše je také relativně rovnoměrně rozložena. Protože deska je pomocí krajních šroubů spojena s profily, přes které bude realizován zdvih, zavedeme podmínku pevného ukotvení do míst těchto šroubů.



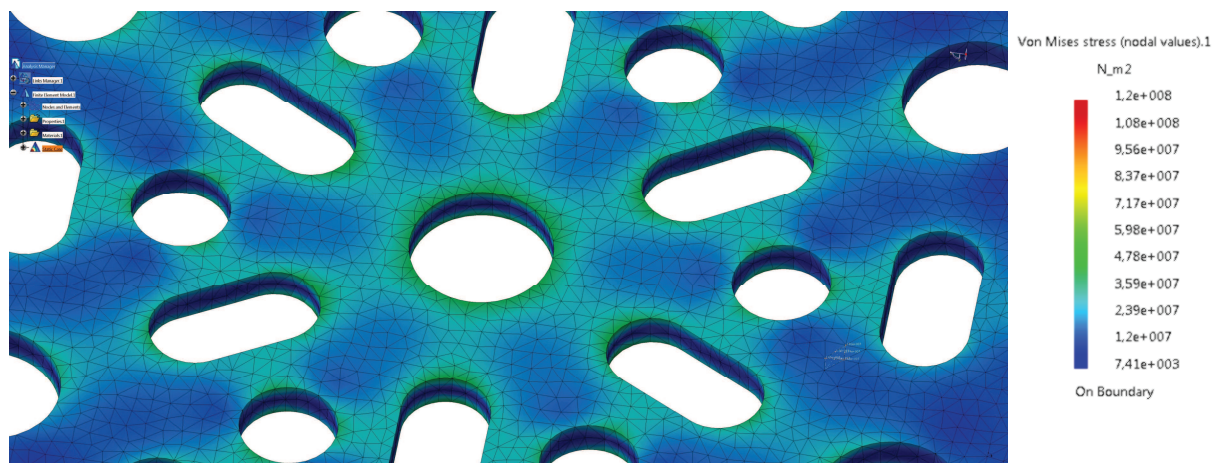
Obr.: 61 – Síť modelu desky

Ve výpočtovém modulu softwaru CATIA byla vytvořena síť parabolických objemových elementů a následně bylo nastaveno uchycení desky v místech okrajových otvorů. Rozložená síla působící na desku byla nastavena na 70 kN. Napětí v desce po výpočtu pak vypadá následovně.



Obr.: 62 – Napětí v desce

Z obrázku je patrné že největší napětí je v místech otvorů pro šrouby, kde je ovšem tato hodnota ovlivněna okrajovými podmínkami nastavenými v těchto místech, skutečná hodnota napětí je nižší, protože napětí není takto lokálně soustředěno na hrany otvorů. Ve středu desky a v okolí volných otvorů je pak napětí kolem 50 MPa. Z toho vyplývá, že dimenzování desky na tloušťku 20 mm je dostatečné, protože mez kluzu oceli za normálního teplotního stavu je mnohem vyšší.



Obr.: 63 – Napětí ve středu desky

5.9 Posouzení podkritičnosti a stínění

V této kapitole budou nastíněny základní principy fyzikálních výpočtů a posuzování paliva z hlediska skladování v OS. Při návrhu konstrukce OS lze velice těžko jednoduše posoudit do jaké míry je OS schopen stínit neutrony a zajišťovat podkritičnost, bez použití složitých výpočtových systémů. Proto v této práci není možné navrženou konstrukci z hlediska této problematiky relevantně zhodnotit. Avšak zajištění dobrého stínění a zejména pak podkritičnosti OS za všech možných nejnepríznivějších havarijních situacích je jedna z nejdůležitějších podmínek při návrhu obalového souboru. Výše popsaná konstrukční varianta koše je vyrobena převážně z hliníkové slitiny nasycené relativně velkým množstvím absorbátoru B^{10} ve formě karbidu bóru, kde podle zkušeností z předchozích výpočtů na obdobných konstrukcích bude hodnota podkritičnosti pravděpodobně vycházet ještě s velkou rezervou do požadované hodnoty $k_{ef} = 0.95$. Aby bylo toto tvrzení průkazné, je zapotřebí podložit ho kompletní výpočtovou analýzou s několika kroky a za použití různých softwarů. K tomu je zapotřebí znát hodně informací o palivu jako je obohacení, vyhoření, doba chlazení OS v bazénu a také konkrétní složení a geometrické uspořádání paliva a samozřejmě také přesné chemické složení všech slitin v konstrukci OS. V konkrétním chemickém složení paliva pak hraje roli zejména přítomnost různých aktinidů a štěpných produktů, kterých je velké množství. Všechny tyto informace nejsou jednoduše dostupné a výpočty jsou velice náročné jak na výpočetní techniku tak časově. Proto bude v následujícím textu stručně uvedena alespoň metodika výpočtů, která je využívána ve firmě Škoda JS. V následujícím textu jsou použity informace z interních materiálů Škoda JS, které byly poskytnuty k nahlédnutí. (uvedený zdroj [32])

5.9.1 Metodika výpočtů

Výpočty se provádí v několika krocích. Nejprve se na 2D modelu provádí úvodní výpočty izotopického složení paliva s uvážením hodnot technologických parametrů provozu aktivní zóny a provádí se doprovodné výpočty kritičnosti. Zde se zhodnocuje změna izotopického složení paliva v důsledku vyhoření (redukce počátečních koncentrací štěpných izotopů, redukce vyhořívajících absorbátorů a nárůst aktinidů a štěpných produktů) [32]. Jsou to zejména izotopy: U^{234} , U^{235} , U^{236} , U^{238} , Np^{237} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , Pu^{242} , Am^{243} , Ag^{109} , Cs^{133} , Eu^{152} , Gd^{155} , Mo^{95} , Nd^{143} , Nd^{145} , Rh^{103} , Ru^{101} , Sm^{147} , Sm^{149} , Sm^{150} , Sm^{151} , Sm^{152} a Tc^{99} . Koncentrace těchto izotopů musí být ve výpočtu zohledněna. Výpočet se provádí programem WIMS9, což je produkt určený k řešení problémů v oblasti transportu neutronů a systémech s tepelnými neutrony. Pro konzervativní přístup se u jednotlivých koncentrací izotopů vždy vybírají minima hodnot u izotopů, které snižují násobící schopnost PS. U izotopů, které násobící schopnost zvyšují, se vybírají maxima jejich koncentrací.

Páteří výpočtové analýzy kritičnosti jsou pak 3D výpočty speciálním systémem Monte Carlo (program MCNP4B), který byl vyvinut v LANL a je široce využíván v této oblasti. [32]. Pro výpočty je nutné vždy definovat počáteční podmínky a předpoklady tak, aby byl model konzervativní. Tento 3D model uvažuje již celou strukturu kontejneru i s efekty úniku neutronů a proto poskytuje již výsledek efektivního multiplikačního faktoru k_{ef} .

Dále se u soustavy posuzuje stínící schopnost. Zde se uvažují zdroje neutronů, gama záření a zbytkový výkon vyhořelého PS. Využívá se opět různých softwarů (např. program SCALE 5.1). Zde jsou výsledkem příslušná spektra gama záření a neutronů opět závislá na vlastnostech paliva. [32]

5.10 Tepelný výpočet

Účelem tepelného výpočtu je zjistit rozložení teploty v celém zaplněném kontejneru, a to při nejvyšším tepelném zatížení od neustále vyvíjeného zbytkového tepla z palivových souborů. Analýza se provádí jak pro stav, kdy bude kontejner za normální situace v meziskladu, tak zejména pro stav nejnepříznivějších předpokládaných okrajových podmínek. Z rozložení teploty můžeme určit místo s nejvyšší hodnotou, která se u symetrického provedení koše a tělesa předpokládá ve vertikální ose kontejneru v určité výšce někde mírně pod polovinou kontejneru, protože kontejner bude stát dnem na betonovém podkladu v meziskladu a větší přenos tepla bude realizován v jeho horní polovině. Dalším úkolem je zjištění teplot na konstrukci koše a to zejména tam, kde jsou při potenciálních uvažovaných havarijních situacích nejvíce pevnostně namáhaná místa. Dále můžeme zjistit místa s největšími toky tepla, teplotní gradienty a teplotu na vnitřním a vnějším povrchu tělesa kontejneru, přičemž nesmí být překročeny stanovené hodnoty (viz kapitola 4). Takto získané informace slouží k prokázání schopnosti koše a tělesa kontejneru dobře odvádět teplo a dále jsou takto získané hodnoty využity k výpočtům jiného charakteru, kde většina používaných veličin je funkcí teploty.

V této práci bude výpočet omezen na nejvíce teplotně zatěžovaný řez. Nejprve budou uvedeny základní rovnice vedení tepla a stručný teoretický popis probíhajících tepelných procesů. Budou provedeny analytické výpočty pro zjištění vnitřního zdroje tepla a hodnoty součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu tělesa kontejneru. Při znalostech všech potřebných okrajových podmínek a geometrie zvolené konstrukční varianty vnitřního koše bude sestaven numerický model v softwaru ANSYS 14 APDL, který při numerickém řešení využívá metody konečných prvků.

5.10.1 Teorie k přenosu tepla

V této podkapitole není účelem věnovat se kompletní teorii přenosu tepla ale popsat základní tepelné procesy při odvodu tepla z OS a uvést základní vztahy, které budou dále používány pro konkrétní případ odvodu tepla z kontejneru s navrženou vnitřní vestavbou. Proto zde není uváděno odvození jednotlivých vztahů. Jednou ze základních rovnic vedení tepla je Biot-Fourierův zákon (5.1), který říká, že vektor hustoty tepelného toku je úměrný gradientu teploty a má opačný směr.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (5.1)$$

q tepelný tok [J/m².s]

λ součinitel tepelné vodivosti [J/m.s.K]

Součinitel tepelné vodivosti je veličina, která se zjišťuje experimentálně a je charakteristická pro každý materiál. Tato veličina závisí hlavně na typu látky, ale je také funkcí teploty. Pro následující výpočty musíme znát všechny hodnoty λ použitých materiálů. Další důležitou rovnicí je Newtonův vztah pro přestup tepla (5.2), který je definován pro rozhraní pevné látky a okolního tekutého prostředí.

$$q = \alpha \cdot (T_w - T_f) \quad (5.2)$$

T_w teplota na stěně [K]

T_f teplota okolí (tekutiny) [K]

a součinitel přestupu tepla [$J/m^2 \cdot s \cdot K$]

Součinitel přestupu tepla bude potřeba znát pro následný numerický výpočet, kde je jedním ze vstupních parametrů okrajové podmínky přestupu tepla ze stěny vnějšího tělesa kontejneru. Tento součinitel se určuje experimentálně, kde jsou výsledky zobecněny do tvaru kritériálních rovnic nebo různými výpočtovými metodami. V této práci bude proveden výpočet tohoto součinitele z příslušné kritériální rovnice a poté bude stanoven vliv žebrování vnějšího povrchu a také vliv sálání, kdy tyto vlivy budou v konečném součiniteli zohledněny.

Dalším důležitým vztahem je Fourier-Kirchhoffova rovnice vedení tepla, která je uvedena v obecném tvaru (5.3) [20].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p \rho} \cdot \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (5.3)$$

c_p tepelná kapacita [J/K]

ρ hustota [kg/m^3]

q_v vnitřní zdroj tepla [W/m^3]

Na levé straně rovnice se objevuje teplota, která je obecně funkcí polohy a času. Tedy $T(x,y,z,t)$. Rozepíšeme-li substacionární derivaci na levé straně rovnice (5.3), můžeme pak složky rychlosti položit rovny 0, protože v tuhém tělese nedochází k posuvům. Potom levou stranu rovnice můžeme psát jako parciální derivace teploty podle času. Uvažujeme-li pak $\lambda = konst$, divergenci gradientu formálně nahradíme Laplaceovým operátorem a člen $\lambda/c_p \rho$ nahradíme teplotovým součinitelem vodivosti a . Bude mít rovnice (5.3) následující tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (5.4)$$

a součinitel teplotové vodivosti [W/m^3]

Pro stacionární úlohu vedení tepla, kterou bude i případ ustáleného stavu rozložení teploty v koši a tělese kontejneru, bude levá strana rovnice (5.4) rovna nule. Tímto nám z rovnice zcela vypadne hustota i tepelná kapacita a rovnice bude mít tvar:

$$\nabla^2 T = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (5.5)$$

Zmíněným vnitřním zdrojem tepla bude v našem modelu zbytkový výkon palivových článků. Tento zdroj bude určen v následující kapitole. Při přenosu tepla sáláním mezi dvěma šedými povrchy platí následující vztah, kterého se využívá k přibližným výpočtům i pro reálná tělesa.

$$q = \varphi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (5.6)$$

- φ úhlový součinitel osálení [-]
 ε_n úhrnná relativní sálavost [-]
 C_0 Stefan-Boltzmanova konstanta [$W/m^2 \cdot K^4$]
 T Teploty sálavých povrchů [K]

Dále bude ve výpočtech věnována pozornost přestupu tepla z povrchu kontejneru do prostoru meziskladu. Je-li pohyb tekutiny vyvolán pouze rozdílem teplot, hovoříme o volné konvekci. Uvedený vztah (5.7) platí tehdy, pokud je prostor vyplněný tekutinou mnohem větší než rozměry teplosměnné plochy a pokud se teplota v tomto prostoru nemění. Velmi často se i v současné době pro výpočet koeficientu přestupu tepla používá jednoduchý vztah tvaru [21].

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (5.7)$$

Kde C a n jsou empirické konstanty. Protože rovnice (5.7) nevystihuje tvar závislosti $Nu=f\{GrPr\}$ v celém rozsahu, v tabulce 7 jsou uvedeny konstanty C a n pro různé součiny Grashfova a Prandtlova čísla. Různí autoři uvádějí odlišné soubory těchto konstant. V tabulce 7 jsou konstanty C a n doporučené Michejevem (převzato z[21]).

Tab.11-1 Konstanty vztahu (11-16) $Gr.Pr$	C	n	chyba [%]
<10-2	0,5	0	±15
1.102 - 5.102	1,18	0,125	±15
5.102 - 2.107	0,54	0,25	±15
2.107 - 5.1013	0,135	1/3	±8

Tab.: 7 – Hodnoty konstant C a n [21]

Použitá kritéria podobnosti mají svůj fyzikální význam a jsou bezrozměrná, zde je uvedeno jejich vyjádření příslušnými veličinami.

- Nusseltovo číslo:
$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (5.8)$$

- Grashofovo číslo:
$$Gr = g \cdot \gamma \cdot L^3 \cdot \frac{\Delta T}{\nu^2} \quad (5.9)$$

- Prandtlovo číslo:
$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5.10)$$

- L charakteristický rozměr [m]
 ν kinematická viskozita [m^2/s]
 g gravitační zrychlení [m/s^2]
 γ součinitel objemové roztažnosti [$1/K$]

Při jakémkoli definování úlohy je potřeba stanovit podmínky jednoznačnosti. Jedná se o podmínky geometrické, které udávají tvar a velikost prostoru. Fyzikální, které udávají

hodnoty všech fyzikálních veličin. Podmínky časové, udávající stav procesu v celé řešené oblasti ve svých časech. A významnou roli hrají podmínky okrajové, které udávají stav procesu na omezujících plochách řešené oblasti. Proto jsou zde uvedeny základní okrajové podmínky, které vycházejí z výše uvedených vztahů. Vypsání okrajové podmínky jsou převzaty ze zdroje [22].

Okrajová podmínka I. druhu:

(používá se při znalosti stálé teploty na povrchu)

$$T|_{n=0} = T_w \quad (5.11)$$

Okrajová podmínka II. druhu:

(jestliže známe tepelný tok)

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = q_w \quad (5.12)$$

Okrajová podmínka III. druhu:

(známe-li součinitel přestupu tepla a teplotu tekutiny)

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = \alpha \cdot [T|_{n=0} - T_f] \quad (5.13)$$

Okrajová podmínka pro kontakty:

(u kontaktních úloh)

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} \quad (5.14)$$

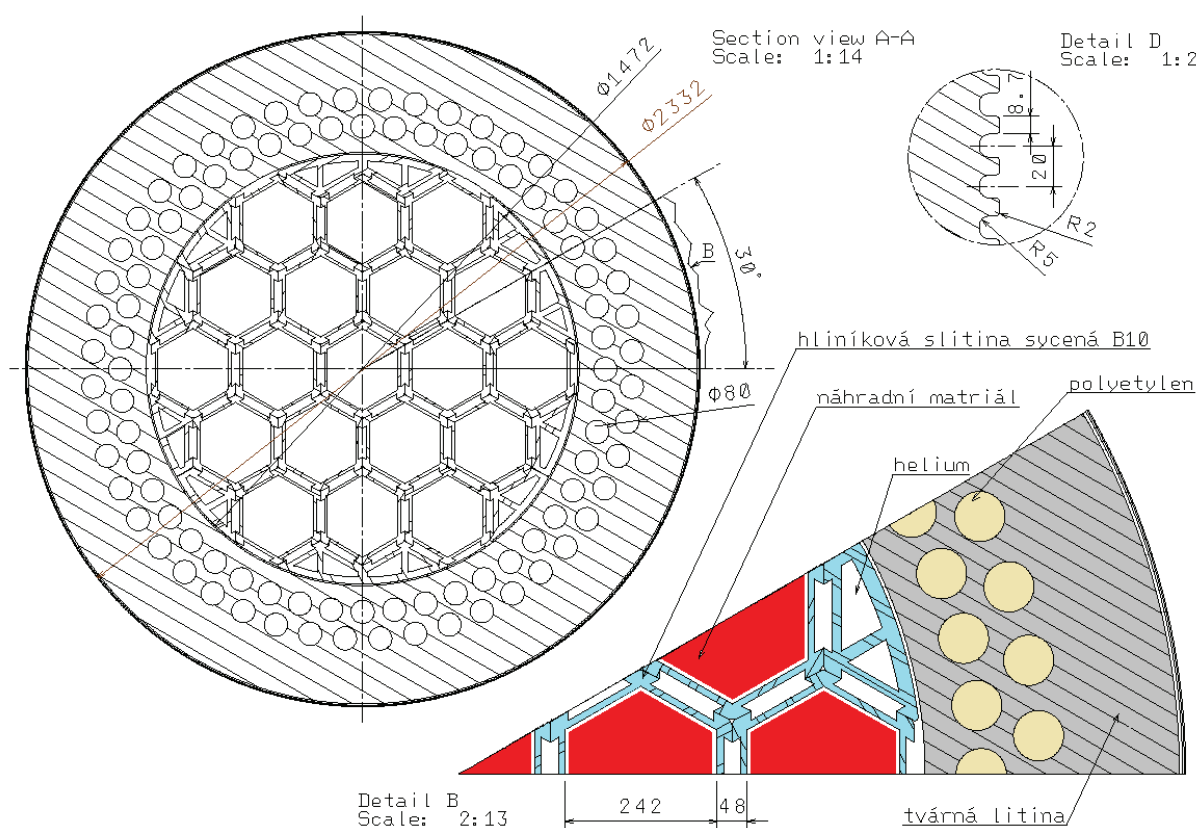
Okrajová podmínka sálání:

(úlohy se sáláním, nutno znát teplotu tekutiny a poměrnou sálavost)

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 \Big|_{n=0} - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (5.15)$$

5.10.2 Popis výpočtového modelu

Rozložení teploty v konstrukci koše bude řešeno numericky jako 2D úloha. Na obrázku 64 je znázorněn řez vnitřního koše a kontejneru, kde tento řez představuje místo největšího tepelného zatížení. Protože tento řez je periodicky a zrcadlově symetrický, stačí výpočet aplikovat na 30°-ti stupňové kruhové výseči, tedy na 1/12 řezu. Místa, kde budou uloženy palivové kazety jsou nahrazena náhradním materiálem, kterému bude přiřazen vypočtený objemový vnitřní zdroj tepla a bude zapotřebí správně určit jeho charakteristický součinitel tepelné vodivosti. Protože tento objem ve skutečnosti představuje soubor palivových článků s uranem, které mají pokrytí ze zirkonia a okolní prostor je vyplněn héliem, je přesné určení λ_{nm} relativně náročné, protože nelze zanedbat vliv sálání mezi jednotlivými palivovými proutky, který je značný a je potřeba ho do součinitele λ_{nm} zahrnout.



Obr.: 64 – Kruhová výseč řezu kontejnerem

Na zobrazené výseči je vidět rozložení jednotlivých materiálů. Mezi jednotlivými hexagonálními trubkami a náhradním materiálem palivových souborů je 4mm mezeru vyplněná héliem. Mezi vnějším průměrem koše a vnitřním průměrem tělesa je pak mezeru 5mm. Mezi jednotlivými hexagonálními trubkami je definován ideální kontakt, který nevnese do výpočtu velkou nepřesnost, protože po naplnění kontejneru vlivem teplotní roztažnosti zmizí jakékoli případné montážní vůle mezi trubkami a dokonce se celá konstrukce na některých místech začne dotýkat vnitřního povrchu tělesa. Mezeru v těchto místech však ponecháme konzervativně zmíněných 5mm.

5.10.3 Teplo-fyzikální vlastnosti materiálů

V tabulce 8 jsou uvedeny vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě. Teplo-fyzikální vlastnosti náhradního materiálu jsou určeny výpočtem, jehož postup je popsán níže.

materiál	Teplota T [°C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]
Hélium	0	143	5203	0,1785
	100	0,179		0,1305
	200	0,213		0,103
	300	0,244		0,085
	400	0,276		0,0724
	500	0,305		0,0627
	600	0,333		0,0558
hliníková slitina	25	160,7	990	2700
	100	167		
	200	176,9		
	300	181,2		
	400	184,6		
	500	183,3		
	550	180,3		
těleso (tvárná litina)	20	43,5	451	7770
	100	42,5	482	
	200	42	526	
	300	41,9	569	
polyetylen (stínění)		0,65	1335,6	1760

Tab.: 8 – teplo-fyzikální vlastnosti materiálů – hodnoty převzaty z [23]

5.10.4 Teplo-fyzikální vlastnosti náhradního materiálu

Pro určení vlastností náhradního materiálu je potřeba znát geometrii paliva. Při výpočtech vlastností budeme uvažovat pouze činnou délku palivového souboru bez uvažování hlavice, patice a distančních mřížek. Vezmeme-li příčný řez palivovou kazetou VVER 1000, můžeme podle poměrů ploch, které zaujímají jednotlivé materiály a při znalosti hustot a měrných tepelných kapacit jednotlivých materiálů, určit součin hustoty a měrné tepelné kapacity náhradního materiálu.

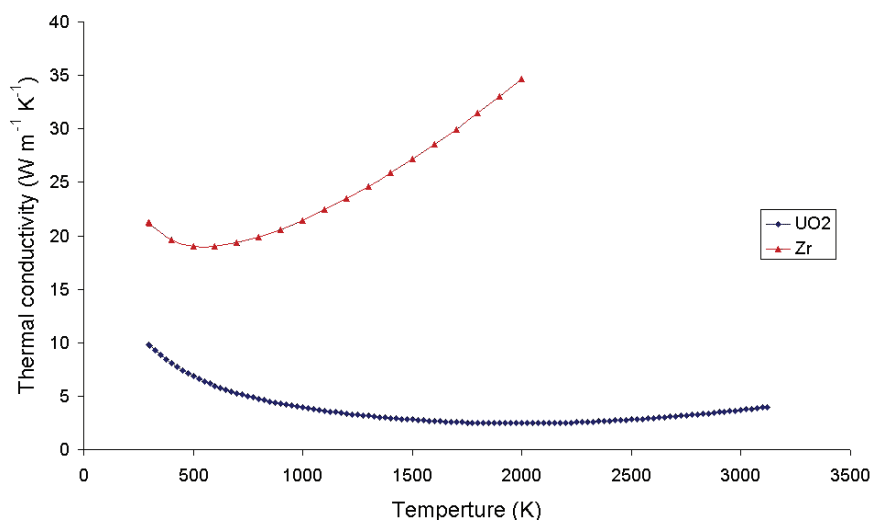
$$\rho_{nm} \cdot c_{nm} = \frac{S_{ZR} \cdot \rho_{ZR} \cdot c_{ZR} + S_{UO2} \cdot \rho_{UO2} \cdot c_{UO2}}{S_K} \quad (5.16)$$

$\rho_{nm}, \rho_{ZR}, \rho_{UO2}$ hustoty náhradního materiálu, zirkonia a uranu [kg/m³]

c_{nm}, c_{ZR}, c_{UO2} měrné tepelné kapacity náhradního materiálu, zirkonia a uranu [J/kg.K]

S_{nm}, S_{ZR}, S_{UO2} obsahy jednotlivých ploch [m²]

U náhradního materiálu je důležité stanovit jeho součinitel tepelné vodivosti, který bude odpovídat co nejvíce skutečnosti. Zde sice známe hodnoty jednotlivých materiálů palivového souboru (viz graf 1), ale obdobným způsobem jako zjištění součinu hustoty a tepelné kapacity můžeme tepelnou vodivost náhradního materiálu určit pouze ve směru osy z, tedy osy totožné s osou palivového souboru. Určení součinitele tepelné vodivosti ve směrech os x a y je složitější, ale právě tyto hodnoty potřebujeme znát pro 2D výpočtový model. Protože přestupy tepla z jednotlivých materiálů se navzájem ovlivňují a musí se zde uvažovat vliv sálání mezi jednotlivými palivovými proutky, musí se součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu určit numerickým výpočtem. Tyto výpočty palivového souboru se prováděly ve firmě Škoda JS. Zde bude nastíněn pouze postup výpočtu a výsledné hodnoty budou převzaty z poskytnutých materiálů uvedených v použité literatuře jako [23] a [24].



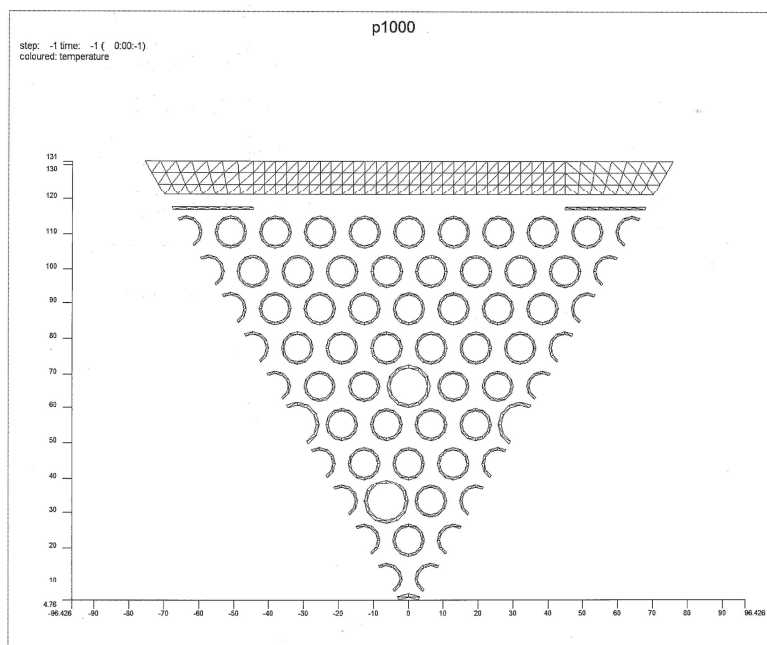
Graf: 1 - Hodnoty součinitele tepelné vodivosti Zr a UO_2 v závislosti na teplotě [25]

5.10.4.1 Postup stanovení součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu

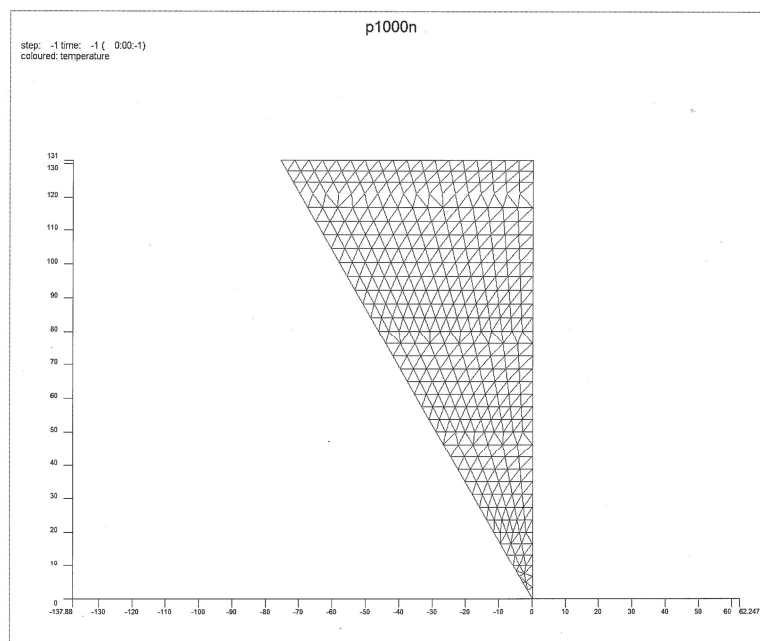
Součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu palivové kazety ve směru souřadných os x a y se určuje ve dvou krocích, tyto informace jsou získány ze zdroje [23] a jsou formulovány do následujících odstavců:

1. Na dvourozměrném výpočtovém modelu 1/6 příčného průřezu palivové kazety se nejprve stanovuje závislost rozdílu teplot vnitřního povrchu pokrytí centrálního palivového proutku a vnějšku palivové kazety. Tento výpočet se provádí řešením stacionárního nelineárního problému vedení tepla při konstantním zbytkovém výkonu kazety. Mezi jednotlivými palivovými proutky je uvažován přenos tepla vedením a sáláním a teplota okraje palivové kazety je uvažována konstantní. Výpočtový numerický model, na kterém byl tento výpočet realizován je znázorněn na obrázku 65.

2. Další výpočet se provádí na náhradním modelu, který je znázorněn na obrázku 66. Zde byla řešena inverzní úloha stacionárního vedení tepla pro dané teploty získané z prvního modelu. V podstatě se zde hledala taková hodnota součinitele tepelné vodivosti náhradního materiálu, která by při řešení 2. úlohy, kde za daných podmínek získáme hodnotu teploty na pokrytí centrálního palivového proutku, odpovídala tato zjištěná hodnota teplotě z prvního výpočtu.

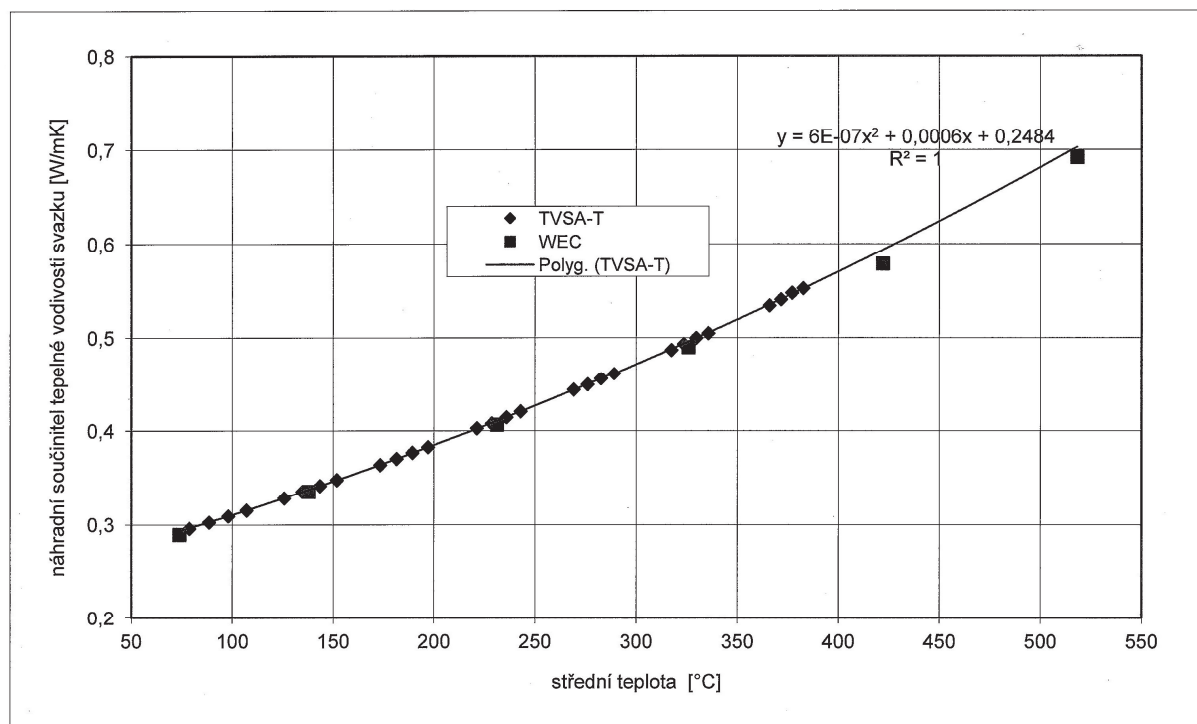


Obr.: 65 – Výpočtový model 1 (převzato z [24])



Obr.: 66 – Výpočtový model 2 (převzato z [24])

Výsledkem předchozích výpočtových modelů jsou hodnoty součinitelů tepelné vodivosti náhradního materiálu v osách x a y (hodnoty v obou směrech se rovnají), pro určité střední teploty. Tato závislost je na následujícím grafu 2.



Graf.: 2 - Součinitel tepelné vodivosti náhradního materiálu v závislosti na teplotě (převzato z[24])

Podle předpisu z grafu 2 můžeme sepsat hodnoty pro určité teploty do následující tabulky, hodnoty tepelné vodivosti jsou uvedené pro směry x a y.

materiál	Teplota T [°C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	Měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]
náhradní materiál palivové kazety: (Hélium, Zr – pokrytí, palivo UO ₂)	100	0,2799	4545.8	286.8
	150	0,3144		
	200	0,3519		
	250	0,4359		
	300	0,4824		
	350	0,5319		
	400	0,5844		

Tab.: 9 – Vlastnosti náhradního materiálu

5.10.4.2 Výpočet vnitřního zdroje tepla

Vnitřní zdroj tepla bude přiřazen k místům palivových kazet, která v modelu představují náhradní materiál. Tento vnitřní zdroj je potřeba vypočítat z objemu palivového souboru, kde bude uvažována pouze činná výška palivového souboru bez hlavice a patice. Potřebné veličiny jsou:

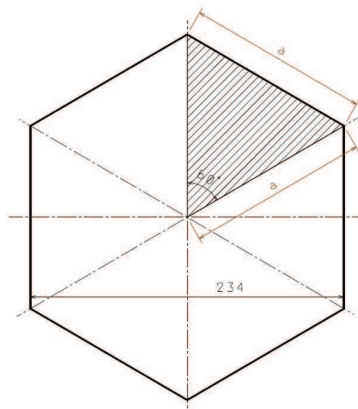
- Maximální (výpočtový) výkon kontejneru $Q = 22\,000$ [W]
- Počet palivových kazet $n = 19$ [ks]
- Rozměr palivové kazety (na klíč) $d = 234$ [mm]
- Aktivní výška palivové kazety $v = 3550$ [mm]

Telený výkon jedné kazety:

$$Q_1 = \frac{Q_{\max}}{n} = \frac{22000}{19} = 1158 \text{ [W]} \quad (5.17)$$

Náhradní objem:

$$V = 6 \cdot S_1 \cdot v \quad (5.18)$$



Obr.: 67 – Rozměry náhradního materiálu

$$V = 6 \cdot \frac{a \cdot d}{2} \cdot v = 6 \cdot \frac{d \cdot \cos 30^\circ \cdot d}{2} \cdot v = \frac{d^2}{8 \cdot \cos 30^\circ} \cdot v = 6 \cdot \frac{0,234^2}{8 \cdot \cos 30^\circ} \cdot 3,55 = 0,16834 \text{ [m}^3\text{]}$$

Vnitřní zdroj:

$$q_{v.stř} = \frac{Q_1}{V} = \frac{1158}{0,16834} = 6879 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (5.19)$$

Získaný vnitřní zdroj tepla je pouze střední hodnotou. V uvažovaném řezu s největším tepelným zatížením bude tento vnitřní zdroj tepla ještě o 15% větší [24].

$$q_v = q_{vstř} \cdot 1,15 = 6879 \cdot 1,15 = 7911 [\text{W/m}^3] \quad (5.20)$$

5.10.5 Výpočet součinitele přestupu tepla

U výpočtu přestupu tepla z povrchu kontejneru do okolí se aplikuje okrajová podmínka III. druhu (viz vzorec 14 kapitola 1.1.1), kde za teplotu okolí T_f budeme uvažovat hodnotu 38°C , což je nejvíce nepříznivá uvažovaná teplota z dlouhodobého hlediska. Do součinitele přestupu tepla pak musíme zahrnout vliv žebrování na vnějším povrchu kontejneru a vliv sálání tepla do okolí. Celkový součinitel přestupu tepla pak bude součtem přestupu tepla od konvekce a sálání.

$$\alpha_c = \alpha_K + \alpha_S \quad (5.21)$$

5.10.5.1 Součinitel přestupu tepla od konvekce

Tento součinitel se vypočítá z Nuseltova čísla pomocí kritériální rovnice pro volnou konvekci, která je uvedena v kapitole 1.1.1. Zde vyčíslíme součin Grashoffova a Prandtlova čísla a podle tabulky 1. zvolíme příslušné konstanty. Poté bude zahrnut vliv žebrování podle následujícího vzorce [24].

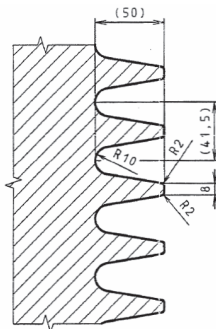
$$\alpha_K = k_z \cdot \eta_z \cdot \alpha \quad (5.22)$$

kde

k_z koeficient žebrování [-]

η_z účinnost žebrování [-]

α součinitel přestupu tepla pro hladkou stěnu [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]



Obr.: 68 – Žebrování

Koeficient žebrování je poměr plochy žebrovaného povrchu ku povrchu hladké plochy. Tento koeficient vychází přibližně (spočteno podle obr.68):

$$k_z = 3.15$$

Účinnost žebrování vyjadřuje nerovnoměrnost rozložení teploty oproti ideálnímu žeburu. Tato účinnost musí být vypočtena na daném typu žebra. Pro následující výpočet stanovíme tuto hodnotu na. (Přesně vysvětleno na straně 73).

$$\eta_z = 0.89$$

<i>Okolní teplota vzduchu je stanovena na:</i>	$T_f = 38$	$[^{\circ}\text{C}]$
<i>Odhad teploty na povrchu kontejneru je:</i>	$T_w = 80$	$[^{\circ}\text{C}]$
<i>Součinitel tepelné vodivosti tělesa při teplotě 80°C:</i>	$\lambda = 42,5$	$[\text{W/m.K}]$
<i>Charakteristický rozměr – výška žebrování</i>	$H = 3,58$	$[\text{m}]$

Výpočet určující teploty:

$$T_u = \frac{1}{2} \cdot (T_w - T_f) \quad (5.23)$$

$$T_u = \frac{1}{2} \cdot (80 + 38) = 59 [^{\circ}\text{C}]$$

Vyčíslení kritériálních čísel:

<i>Charakteristický rozměr – výška žebrování</i>	$H = 3,58$	$[\text{m}]$
<i>Kinematická viskozita vzduchu pro teplotu 59°C</i>	$\nu_{\text{vzd}} = 1,87 \cdot 10^{-5}$	$[\text{m}^2/\text{s}]$
<i>Gravitační zrychlení</i>	$g = 9,81$	$[\text{m/s}^2]$

Teplotní objemová roztažnost média při střední teplotě mezi teplotou stěny a okolí se vypočte ze vztahu (5.24). Poté můžeme vyjádřit Grashoffovo číslo.

$$\gamma = \frac{1}{T_u + 273,15} \quad (5.24)$$

$$Gr = g \cdot \gamma \cdot H^3 \cdot \frac{\Delta T}{\nu^2} \quad (5.25)$$

$$Gr = 9.81 \cdot \frac{1}{59 + 273,15} \cdot 3,58^3 \cdot \frac{(80 - 38)}{(1,87 \cdot 10^{-5})^2} = 1,6276 \cdot 10^{11}$$

Pro určení Prandtlova čísla platí vztah (5.10). Prandtlovo číslo můžeme odečíst také z tabulek pro plyny.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = 0,727 \quad (5.26)$$

Ověření použitelnosti dané kritériální rovnice a určení konstant:

Následně ověříme správnost použití kritériální rovnice (5.7) pro volnou konvekci i pro případ vertikální válcové stěny. Musí platit tato nerovnost

$$\frac{d}{H} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}} \quad (5.27)$$

$$\frac{2,332}{3,58} \geq \frac{35}{(1,6276 \cdot 10^{11})^{1/4}}$$

$$0,651 \geq 0,055$$

Nerovnost je splněna. Můžeme použít rovnici (5.7). Nyní vyčíslíme součin $Gr \cdot Pr$ pro určení konstant C a n :

$$Gr \cdot Pr = 1,6276 \cdot 10^{11} \cdot 0,727 = 1,1833 \cdot 10^{11}$$

Tato hodnota odpovídá podle tabulky 7 intervalu s konstantami $C=0,135$ a $n=1/3$. Nyní můžeme pomocí dané rovnice spočítat Nusseltovo číslo.

$$Nu = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (5.28)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (1,1833 \cdot 10^{11})^{1/3} = 662,774$$

Z Nusseltova čísla je vyjádřen součinitel přestupu tepla

$$Nu = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{H} \quad (5.29)$$

Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při teplotě 59°C: $\lambda=0,029$ [W/m.K]

Po vyčíslení můžeme stanovit hodnotu součinitele přestupu tepla:

$$\alpha = \frac{662,774 \cdot 0,029}{3,58} = 5,37 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Po zahrnutí vlivu žebrování můžeme stanovit celkový koeficient přestupu tepla konvekcí podle výše uvedeného vzorce (18).

$$\alpha_K = k_z \cdot \eta_z \cdot \alpha = 3,15 \cdot 0,89 \cdot 5,37 = 15,1$$

5.10.5.2 Zahrnutí vlivu sálání

Nyní je potřeba zahrnout vliv sálání z vnějšího povrchu tělesa. K tomu lze použít uvedenou okrajovou podmínku pro sálání (5.15), ze které vyjádříme tepelný tok a poté vyjádříme součinitel přestupu tepla od vlivu sálání pomocí znalosti teplot povrchu a okolního média.

$$q = \varphi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (5.3)$$

Kde součinitel osálání $\varphi=1$ a poměrná sálavost je podle [23] stanovena na hodnotu $\varepsilon=0,7$. Stefan-Boltzmanova konstanta je $C_0=5,6704$

$$q = 1 \cdot 0,7 \cdot 5,6704 \cdot \left[\left(\frac{80 + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{38 + 273,15}{100} \right)^4 \right] = 245,333 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Nyní můžeme určit součinitel přestupu tepla od sálání z následujícího vztahu

$$\alpha_s = \frac{q_s}{T_w - T_f} = \frac{245,333}{80 - 38} = 5,841 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (5.31)$$

5.10.5.3 Celkový koeficient přestupu tepla

Nyní můžeme stanovit celkový koeficient přestupu tepla od konvekce se zahrnutím vlivu žebrování a se zahrnutím sálání povrchu kontejneru.

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 15,1 + 5,841 = 20,941$$

Nyní můžeme stejným způsobem stanovit potřebné hodnoty pro stav za normálních podmínek, kdy bude kontejner uložen ve skladu při normálním průměrném tepelném výkonu. Jeho povrch nebude vystaven slunci a průměrná teplota okolí bude 25°C. Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 2.

Vstupní parametry	Výpočtové (konzervativní) hodnoty	Hodnoty za normálních podmínek
Q	22 000 W	(17 000 W) podle paliva
q_v (1 kazeta)	7900 [W/m ³]	(6150 [W/m ³])
T (okolí)	38 [°C]	25 [°C]

Tab.: 9 – vstupní parametry

Nyní stejným způsobem musíme určit součinitel přestupu tepla v závislosti na různých povrchových teplotách a vytvořit tak vstupní hodnoty tohoto součinitele pro nelineární řešení numerické úlohy. Velice zde záleží na zmíněném vlivu žebrování. Čím větší plocha žeber, tím větší je jejich vliv na zlepšení přestupu tepla. Výsledky uvedeme pro 2 druhy žeber vysokých 50mm. Z informací [24] známe hodnoty pro žebra z lité oceli (kontejner z lité oceli), kde podle provedených výpočtů ve škoda JS známe účinnost i koeficient žebrování pro žebro 50mm vysoké a velice úzké (u paty 5mm). To bude představovat koeficienty součinitele přestupu tepla v tabulce uvedené ve sloupci varianta 2. U varianty 1 jde o silnější žebra u paty, kde známe koeficient žebrování, který je menší. Neznáme však účinnost žebrování, proto je odhadnut na hodnotu 0,89 a tuto variantu je potřeba brát pouze jako informativní.

Uvažovali bychom žebra na kontejneru vyrobeného z tvárné litiny, pak by tvar těchto žeber byl jiný. Žebra by byla silnější, kratší a hustěji rozložená. Koeficient žebrování by zde byl pouze někde kolem hodnoty 2 a proto lze očekávat, že v takovém případě by hodnoty povrchu byli vyšší. Pokud by tyto hodnoty překročily hodnotu 85°C musel by být stanoven nižší celkový výkon (např. omezení max. 17kW), tak aby tyto hodnoty překročeny nebyly.

Numerický výpočet bude proveden pro 2 zmíněné varianty, kde parametry celkového součinitele jsou uvedeny v tabulce 10, kde jejich hodnoty byli vypočteny pomocí programu vytvořeném v tabulkového procesoru Excel. V přílohách pak budou uvedeny výstupy

jednotlivých variant, kde budeme uvažovat pouze výpočtový stav s konzervativními hodnotami. To znamená teplota okolí stanovena na 38° a max. výkon 22kW.

Hodnoty celkového součinitele přestupu tepla variant 1 a 2 jsou vypočteny podle vzorce (5.32) a výsledky jsou v tabulce 10.

$$\alpha_C = k_z \cdot \eta_z \cdot \alpha + \alpha_s \quad (5.32)$$

Teplota Povrchu[°C]	ALFA [W/m²K]	ALFA –Sálání [W/m²K]	VARIANTA 1, ALFA - celková (k _z = 3.15, η _z =0,89)	VARIANTA 2, ALFA - celková k _z = 5,600499 η _z =0,89113
40	1,972	4,829	10,357502	14,67080371
45	2,9846	4,947	13,3143261	19,84246012
50	3,562	5,067	15,053067	22,84413226
55	3,989	5,189	16,3721615	25,0971922
60	4,336	5,314	17,469976	26,95399031
65	4,63	5,442	18,422205	28,54927748
70	4,887	5,573	19,2737045	29,96290606
75	5,116	5,706	20,048706	31,238793
80	5,323	5,841	20,7640305	32,40688294
85	5,512	5,98	21,432892	33,48913898
90	5,687	6,121	22,0645045	34,5035242
95	5,849	6,265	22,6626715	35,45602937
100	6,001	6,411	23,2348035	36,36062682
105	6,143	6,561	23,7829005	37,21931654
110	6,276	6,714	24,308766	38,0360893
115	6,404	6,869	24,822614	38,8299082
120	6,524	7,027	25,317034	39,58680092
125	6,638	7,189	25,798633	40,31774901
130	6,747	7,353	26,2682145	41,02574323
135	6,851	7,52	26,7267785	41,71178359
140	6,95	7,691	27,175325	42,37687008

Tab.: 10 – vstupní parametry součinitele přestupu tepla

5.10.6 Výstupy numerického výpočtu

Na obrázcích v přílohách jsou uvedeny výsledky numerické simulace v softwaru Ansys APDL, kde byla použita „steady state“ anlyza pro nelineární stacionární úlohy tepelných výpočtů. Jsou zde uvedeny výsledky obou variant pro konzervativní hodnoty výpočtu s okolní teplotou 38 °C a vnitřní zdroj tepla odpovídající celkovému výkonu 22 kW. Všechny parametry tepelných vodivostí a součinitele přestupu tepla byli zadávány z tabule uvedených v této práci.

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce, bylo navrhnout funkční konstrukci vnitřního koše kontejneru typu Castor pro palivo typu VVER 1000 a podložit tento návrh patřičnými výpočty. Nutno poznamenat, že problematika suchého skladování je velice široká a komplexní návrh vnitřního koše transportního a skladovacího kontejneru, který bude schopen obstát ve složitém procesu licencování je náročný úkol. Jak bylo popsáno v kapitole 4, požadavky na tyto obalové soubory jsou velké a při návrhu musí být uvažovány i velmi nepravděpodobné stavy při hypotetických nehodách. Návrh koše, který průkazně splňuje všechna popsaná kritéria, by musel obsahovat komplexnější tepelnou, fyzikální a pevnostní analýzu a to i na kompletních 3D modelovaných simulacích. Přesto, že tyto analýzy práce neobsahuje v plném rozsahu, je zde pomocí informativních analytických (i numerických, viz MKP model spodní desky koše) výpočtů a úvah prokázána jistá pevnostní odolnost konstrukce a splnění základních funkcí koše.

V závěrečné části práce je provedena teplotní analýza na 2D numerickém modelu, pomocí které je zjištěno rozložení teploty v nejméně zatíženém řezu kontejneru při uvažování okolní teploty dle předpisů 38 °C. Celkový přenášený výkon je pro výpočet 22kW. Skutečný tepelný výkon však záleží na parametrech skladovaných palivových souborů, ten však u 19-ti palivových kazet s klasickým obohacením a s určitou dobou chlazení v bazénu skladování bude jistě nižší než hodnota 22kW. U popsaného současného konstrukčního řešení kontejneru pro jadernou elektrárnu Temelín (kapitola 3) je například uveden údaj 17kW. Touto teplotní analýzou byly zjištěny výsledky uvedené v příloze, kde maximální teplota palivového pokrytí se pohybuje okolo 250 °C a na povrchu pak 63 °C. Pro Variantu jedna kde bylo počítáno s „horšími“ parametry žebrování byly maximální teploty 270 °C na pokrytí a 81°C na povrchu kontejneru. Tyto hodnoty jsou pod limitními hodnotami, které jsou 350 °C na pokrytí paliva a 85° C na povrchu kontejneru. Pokud by byl proveden výpočet na „malém“ žebrování s nízkým koeficientem u kontejnerů s tělesy z tvárné litiny, lze předpokládat, že teplota na pokrytí by jistě byla pod stanovenou mezí, ovšem teplota na povrchu by pravděpodobně překročila maximální teplotu na povrchu kontejneru 85°C. V tomto případě by musel být omezen maximální tepelný výkon OS. Pomineme-li vliv žebrování, které má pro odvod tepla velký význam, můžeme v podstatě konstatovat, že navržená konstrukce odvádí teplo velice dobře, což dokládají výsledky s velkými rezervami do maximální teploty na pokrytí paliva i přes konzervativní uvažování jednotlivých mezer s héliem, které se po zvýšení teploty roztažením koše zmenší.

Součástí práce je také 3D model vytvořený v CAD systému CATIA V5R19. Teplotní výpočet byl proveden v softwaru ANSYS 14 APDL. Některé obrázky 3D modelu jsou rovněž součástí příloh této práce. Dále jsou přiloženy výkresy jako volné přílohy.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Bečvář J a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL Praha, 1981
- [2] SÚJB (www.sujb.cz), články týkající se legislativy pro přepravu VJP a typového schvalování OS. Typové schvalování, dostupné přímo z: <<http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/prepravy-radioaktivnich-materialu/typove-schvalovani/>>
- [3] VYHOŘELÉ PALIVO – článek(online) , [cit. 2013-05-03] dostupné z:<http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.4.1>
- [4] <http://www.jaderny-odpad.cz>
- [5] O tom jak se mění palivo na Temelíně, článek - temelinky, on-line časopis vydávaný elektrárnou Temelín, dostupná z <http://www.temelinky.cz/cs/clanky/o-tom-jak-se-meni-palivo-na-temeline-77.html>
- [6] Interim Spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility, Chernobylska AES [online]. 25 April 2013[cit.2013-05-10], dostupný z: <http://www.chnpp.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=32&lang=en>
- [7] Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/Containers. IAEA-TECDOC-1532, January 2007, dostupný z:<http://www-pub.iaea.org/MTCDC/publications/PDF/te_1532_web.pdf>
- [8] Nakládání s použitým palivem a odpady z provozu českých jaderných elektráren. Skupina ČEZ [cit. 2013-05-01], dostupné z: <<http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/spravavy-horelehojadernehopali-va-a-monitoring-je.html>>
- [9] ATOM INFO,. V JE Temelín převezli kontejner s vyhořelým palivem do skladu. 2010 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <<http://atominfo.cz/2010/09/v-je-temelin-prevezli-kontejner-s-vyhorelym-palivem-do-skladu/>>.
- [10] SÚRAO (<http://www.surao.cz>) [online]. Co je hlubinné úložiště [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <<http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Co-je-hlubinne-uloziste>>
- [11] The Joan Pye Project., Nuclear Waste Consultation Closes, 23 March 2012, dostupné z:<<http://joanpyeproject.org/nuclear-waste-consultation-closes/>>
- [12] Valenta, P.: Světlá budoucnost vyhořelého paliva, 15. 03. 2006 [cit.2013-05-10]. Dostupné z www: <<http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocianku=2006031402>>
- [13] VITOVSKÁ, Michaela. Nakládání s jaderným odpadem v jaderných elektrárnách a nemocničních zařízeních. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Andrea Tabasová, Ph.D.

- [14] Costing of spent fuel storage. - Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. (IAEA nuclear energy series, ISSN 1995-7807 ; no. NF-T-3.5) STI/PUB/1398 ISBN 978-92-0-104109-8.
- [15] Lamarsh J. R., Baratta A. J.: Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 2001
- [16] Industry Spent Fuel Storage Handbook, Final Report 1021048, EPRI, USA, July 2010
- [17] Zdebor, J., prezentace firmy Škoda JS a.s., Plzeň, listopad 2011.
- [18] Metal and concrete container “CONSTOR RBMK-1500”, 2011 [cit. 2013-05-03] Dostupné z <http://english.ckti.ru/Metal_and_concrete_container_CONSTOR_RBMK_1500.htm>
- [19] <http://www.ceei.sk/en/castor-containers.php>
- [20] Mareš, R., Kapitoly z termomechaniky, Plzeň 2008
- [21] Holeček, O., Šnita, D., 11 Sdílení tepla, dostupné z: <www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla.pdf>
- [22] Poznámky z předmětu – Přenos tepla a hmoty. Garant předmětu: Linhart, J., ZČU, FST-KKE, Plzeň 2010
- [23] Konečná, A., Riedl, P., Kodl, P., Šik, J. Transportní a skladovací kontejner na vyhořelé jaderbé palivo ŠKODA 440/84, Výpočet teplot, 1997 Škoda JS, 94 listů
- [24] Interní materiály Škoda JS a.s., informace z konzultací (konzultant - Šik, J., Mistera, J.)
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel
- [26] Diersch, R., Dreier, G., Stelzer, H., CASTOR V - THE PACKAGE SYSTEM FOR TRANSPORT AND STORAGE OF SPENT FUEL ASSEMBLIES, GNB mbH. D-45127 Essen, Germany. [cit. 2013-05-17], dostupný z: <http://www.wmsym.org/archives/1997/sess18/18-05.htm>
- [27] UNKE, Th; HENIG, Ch.; CASTOR[®] 1000/19: Development and Design of a New Transport and Storage Cask. [online]. 2008-09-25, [cit. 2013-05-18], dostupný z http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048126.pdf
- [28] Mechanické analýzy koše ŠKODA 440/84-M při pádové zkoušce, prezentace: ENERGETICKÉ FÓRUM - OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost. NTC – ZČU, Plzeň [cit. 2013-05-14]
- [29] Teplovydjeljajuščaja sborka, TVEL [cit. 2013-05-14], dostupné z <<http://www.nccp.ru/er/tvs.html>>

- [30] Bare, W. C., Torgerson, L. D., Dry Cask Storage Characterization Project-Phase I: CASTOR V/21 Cask Opening And Examination, August 2001, INEEL/EXT-01-00183
- [31] Zajíček, M., Adámek V., Podpůrné materiály pro studium předmětu Pružnost a pevnost 2 - Vzpěr přímých prutů. ZČU - FAV - KME, 2009. dostupné z [www: <http://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/>](http://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/)
- [32] Macák, P., Krupař, P., Mikoláš, P., Smutný, V., Švarný, J., Posouzení paliva vysokého obohacení z hlediska skladování v obalovém souboru CASTOR 440/84M, Škoda JS, říjen 2010, Plzeň, Ae 13681/Dok Rev. 0, 51 listů.
- [32] Radioaktivní odpady a skupina ČEZ, (informační leták), ČEZ, Praha, (www.cez.cz)

PŘÍLOHY

8 Seznam Příloh

Přílohy vázané v práci:

- Příloha 1 - Komerčně vyráběné kontejnery pro skladování VJP (Některé určeny i pro transport – dvou- účelové)
- Příloha 2 - Komerčně vyráběné kontejnery pro transport VJP
- Příloha 3 - výsledky tepelného výpočtu
- Příloha 4 - Spodní deska
- Příloha 5 - Koš kontejneru
- Příloha 6 - Koš v kontejneru CASTOR

Volně ložené přílohy:

- 1 výkres: A4 – PROFIL TRUBKY
- 1 výkres: A3 – SESTAVA ZÁMKU
- 1 výkres: A2 – SESTAVA KOŠE

Přiložené CD:

- CD obsahuje: - celou práci ve formátu PDF.
- soubory 3D modelu v softwaru CATIA V5R19
 - volně ložené přílohy v digitální podobě
 - obrázky z vytvořených modelů
 - Soubor tepelného výpočtu v softwaru ANSYS 14

Příloha 1

Komerčně vyráběné kontejnery pro skladování VJP (Některé určeny i pro transport - dvouúčelové)

(P=PWR, B=BWR, C=CANDU, W=VVER (440/1000), R=RBMK, H=HTR)

Supplier/Owner	Casks/Canister		Technical Requirements		
	Product Model	Number of Fuel Elements	Maximum Burnup (GW·d/t·HM)	Maximum Heat Load (KW)	Total Wt (MT)
AECL	Concrete Silo	360C	9	1.8	
		342C	9	1.71	
		486C	9	2.4	
		540C	9	2.7	
BNFL Fuel Solutions metal cask and concrete cask	TS-125	21P/64B	51.8/45	22	139
	VSC-24	24P		24	144
	W-150	21P/64B	15~60	24.8/25.1	160
	W-21 (Canister)	21P		22/25.1	
	W-74 (Canister)	64B		17.6/24.8	
ENSA	DPT	21P	40	27.3	113/114
GNS CASTOR family metal cask and	CASTOR 1C	16B	35	14.4	81.1
	CASTOR-V/19	19P	65	39	125.6
	CASTOR-V52	52B	65	40	123.4
	CASTOR-V/21A	24P	60	34	119
	CASTOR Va	21P	75	40	126.2
	CASTOR Vb	24P	75	34	110.4
	CASTOR X28	28P	37.5	17.2	133
	CASTOR V21 (Surry)	32B	60	32	107.9
	CASTOR X33F	33P	60	16.6	107.3
	CASTOR-440/84	84W440	42	21	116
	CASTOR RBMK	102	29	12.5	117
	CASTOR THTR/ CASTOR AVR	ca. 2,100H ca.1,900	114 115	Ca.0.2 Ca.0.2	32 30
CONSTOR family concrete cask	CONSTOR-440/84	84W440	41	20	120
	CONSTOR-1000/19	19W1000	49	21	125
	CONSTORRBMK	102R	30	7	84.4
H-Z	Metal cask for storage	61B	50	17	118
Holtec International metal cask and concrete cask	HI-STORM-24	24P	68.2	27.8	163
	HI-STORM-32	32P	68.2	28.7	163
	HI-STORM-68	68B	65	28.2	163
	HI-STAR -24	24P	42.1	19	114
	HI-STAR-68	68B	37.6	18.5	114
KSL	TN-24	32B/37B	33	28/20	113/100
MHI MSF family metal cask	MSF-21P	21B	60	41	121
	MSF-57B	57B	63	49	123
	MSF-69B	69B	40	19	119

Supplier/Owner	Casks/Canister		Technical Requirements				
	Product Model	Number of Fuel Elements	Maximum Burnup (GW·d/t·HM)	Maximum Heat Load (KW)	Total Wt (MT)		
NAC International metal cask and concrete cask	NAC-STC	26P (BF)	45	22.1	127		
	NAC-C28 S/T	56P (CF)	35	20			
	NAC-S/T	26P / 28P	45	17.4			
	NAC-MPC	36P / 26B	36/43	12.5 / 17.5			
	NAC-UMS	24P / 56B	50	23			
	MAGNASTOR	37P //87B	60	35(P)/ 33(B)			
OAO Izhora	TUK-104/M	57/114 R		5	95/93		
	TUK-108/1	72/144 W1000		6.3	39.6		
OPG	DSC (CIC)	384 C	9	4.4	70		
REA	REA-2023	24P/52B	33	24/20			
ACL (former TN) TN Family Europe (metal casks)	TN-24 DH	28P	55	33	112		
	TN-24XLH A/B	24P	55	33	111		
	TN-24SH	37P	55	30	96		
	TN24E	21P	75	40*	125		
	TN-52L	52B	53	40*	112.5		
	TN-68	68B	40	21.2	115		
	TN-97L	97B	26 (av.)	19	124.5		
	TN-24BH	69B	50	40	126		
Transnuclear NY TN Family USA NUHOMS Family Canister-based concrete module	TN-32	32P	45	32.7	115.5		
	TN-40	85B	45	32.7	113		
	TN-68	40	40	21.1	113.8		
	NUHOMS-07P	7P/18B		7	48.6		
	NUHOMS-24P	24P	45-62	24-40.8			
	NUHOMS 32P S	32P	45-62	24-34.8			
	NUHOMS-52B	52B	35	19.2			
	NUHOMS 61B	61B	40	15.8/18.3			
	NUHOMS-F	13-24P	40	9.9/13.5			
	NUHOMS-MP	21P/61B		9.9-15.8			
	NUHOMS 56V	56 WWER	42				
	NUHOMS RBMK	95 RBMK	25				
	Westinghouse	MC-10	24P/49B	35		13.5	?

Tabulka převzata ze zdroje [14] aktuálnost dat: 2005

Přehled firem:

ACL	Areva Cogema Logistics (former Cogema Logistics, Transnucléaire)
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
BNG	British Nuclear Group GA = General Atomics
GE	General Electric
GNS	Gesellschaft fuer Nukleaire Services
KSL	Kobe Steel Ltd.
MHI	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
NAC	Nuclear Assurances Corp.
NFT	Nuclear Fuel Transport Co. Ltd.
OCL	OCL Corporation
OPG	Ontario Power Generation
REA	Ridihalgh, Eggers and Associates

Příloha 2

Komerčně vyráběné kontejnery pro transport VJP

(P=PWR, B=BWR, C=CANDU, W=VVER (440/1000), R=RBMK, H=HTGR,
M=MOX, MA= MAGNOX, A=AGR)

Fuel Type	Casks		Technical requirements			Remark (References.)
	Owner	Model	Capacity (Fuel Assemblies)	Thermal Load (Kw)	Total Wt. (Mt)	
LWR	BNG	NTL-3M	7P	30	54	TRS-240 UK Report (G. Jones)
		NTL-3MA	10B	10	53	
		NTL-9	7B	25	36	
		NTL-11	7P	20	78	
		NTL-14	5P	45	85	
		NTL-15	10B	9	25	
		EXCELLOX-6	6P	20	95	
	GA	GA-4	4P	2.47	27.5	AI-582
		GA-9	9B	2.12	27	
	GE	IF-3000	7P/16B	68-70	60.7	
	GNS	CASTOR-S1	6P/17B	30	79-82	P. Dyck
	Holtec Int.	HI-STAR-24	24P	20	114	USNRC Docket No. 71-9261 Rev 4
		HI-STAR-68	68B	18.5	114	
	H-Z	NH-25	1P/2B	7	29	Yamamoto TRS-240
	Lehrer	LK-80	12P	100	100	
		LK-100	12P/24P	30	72	
	MHI	MSF-1	1P	6.7	45	
	NAC	NAC-LWT	1P/2B	11.5	25.6	Yamamoto
		NLI-1/2	1P/2B	10.6	23.1	
		NLI-10/24	10P/24B	70	97	
NFT	NFT-10P	10P	25	83		
	NFT-14P	14P	54	115		
	NFT-12B	12B	15	23		
	NFT-22B	22B	25	97		
	NFT-32B	32B	22	106		
NFT-38B	38B	26	119			
OCL	HZ-75T	7P/17B	40	82	Yamamoto	
PNTL	EXCELLOX-3				JAI-582 Yamamoto	
	EXCELLOX-3A	5P/14B	30	72		
	EXCELLOX-3B	14B	24	74		
	EXCELLOX-4	7P	40	92		
	EXCELLOX-7	17B	20	89		
	EXL-4MOX	8M	8	92		
TN	TN-8	3P	35.5	38	UK Report (G. Jones)	
	TN-9	7B	24.5	39		
	TN-10				TRS-240 JAI-582	
	TN-12	12P/32P	51.6/64	100/105		
	TN-12/2 (A/B)	12P	93/70	102/104		
	TN-13	12P/32P	64	105/115		
	TN-17	7P/17B	25 (35)	78		
TN-17/2	7P	43	81			

Fuel Type	Casks		Technical requirements			Remark (References.)
	Owner	Model	Capacity (Fuel Assemblies)	Thermal Load (Kw)	Total Wt. (Mt)	
WWER	GNS	CASTOR-84				TECDOC-1100
	BIZ	C-30	30/48 W440	9.21	120	F. Takats
	OAO Izhora	TK-6	30 W440	15	92	N. Tikhonov TRS-240 TECDOC-1100
		TK-10B	6 W1000	13	94.4	
		TK-13	12 W1000	20	116	
TK-8 TK-11 TK-104 TK-109		9 RBMK 51/102 57/114 72/144	NA 12 5 6.3	NA 105 120 126	IAEA-SM/294-9 CN-102/40 Atomtrans2003 (St.Petersburg)	
TK-11 BN	35 BN600	10.7	90			
CANDU	AECL	NOD-F1	2 C	NA	12	M.Rao (HASL)
	OPG	IFTC	192 C	1.5	39	
		DSCTP	364 C	3.0	100	
DAE	DAE India	220 C	70	63		
AGR	BNG	Mark A1/A2				TRS-240
		M-1/2	260 Magnox	6.5	49	
HTGR		FSV-1	6H	23-25.		JAI-582

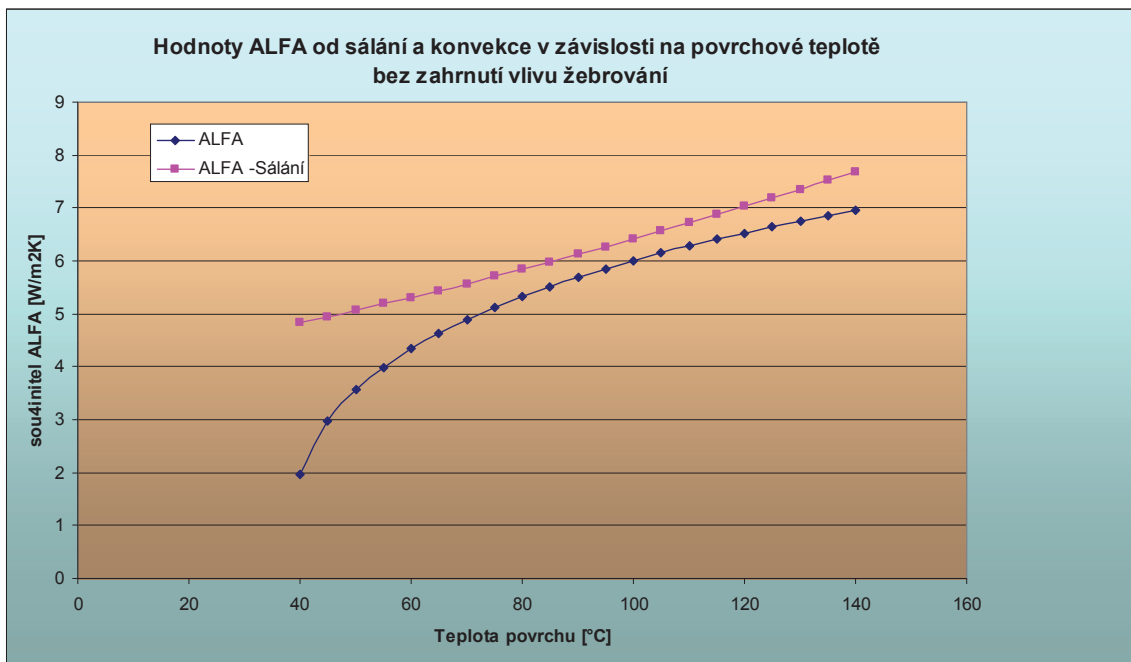
Tabulka převzata ze zdroje [14], aktuálnost dat: 2005

Přehled firem:

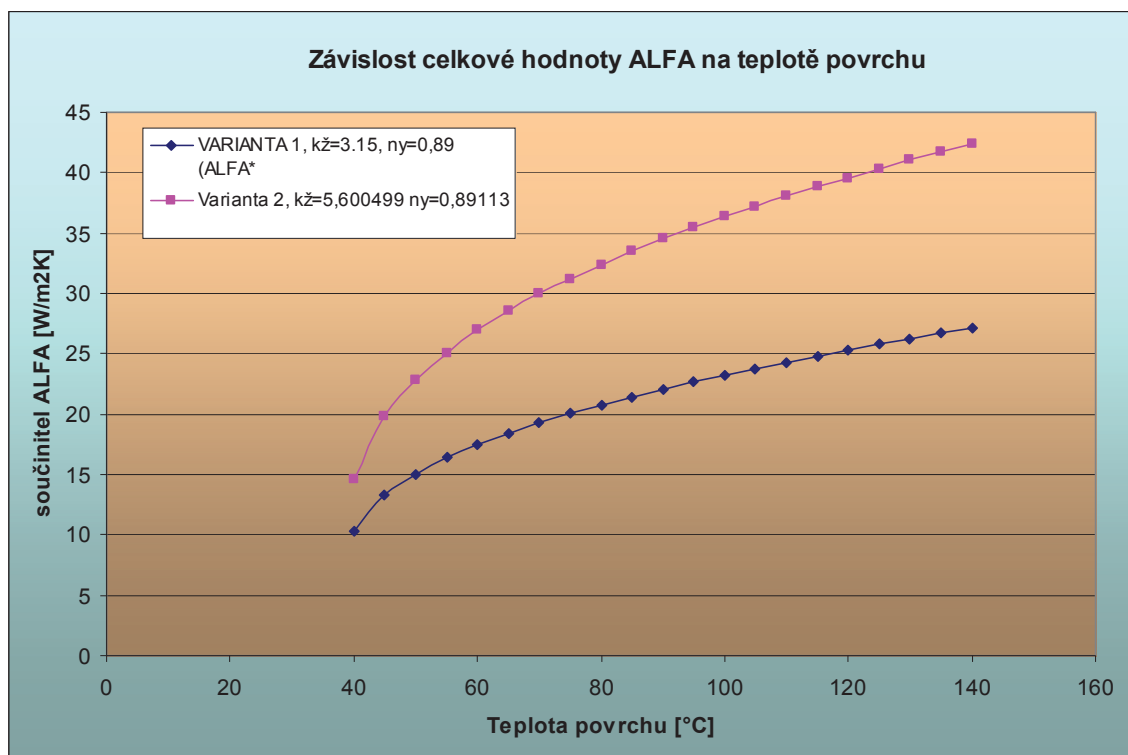
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
BIZ	(firma, která se podílela na výrobě kontejneru v bývalém východním Německu) [14]
BNG	British Nuclear Group
DAE	Department of Atomic Energy of India
DAE	Department of Atomic Energy of India
GA	General Atomics
GE	General Electric
GNS	Gesellschaft für Nukleaire Services
MHI	Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
NAC	Nuclear Assurances Corporation
NFT	Nuclear Fuel Transport Co. Ltd.
OAO Izhora	(Holdingová společnost působící v Rusku) [14]
OCL	OCL Corporation
OPG	Ontario Power Generation
PNTL	Pacific Nuclear Transport Limited
TN	Transnucleaire, Inc.

Příloha 3 – výsledky tepelného výpočtu

GRAFY

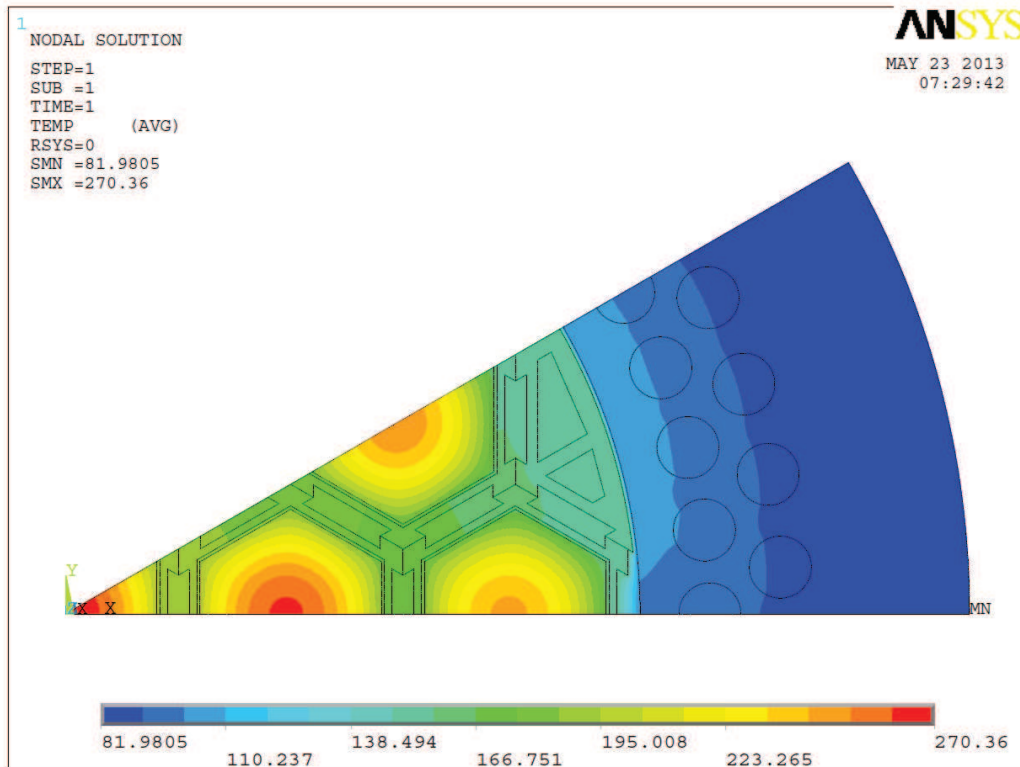


Graf: P1 – Hodnoty součinitele přestupu tepla bez vlivu žebrování

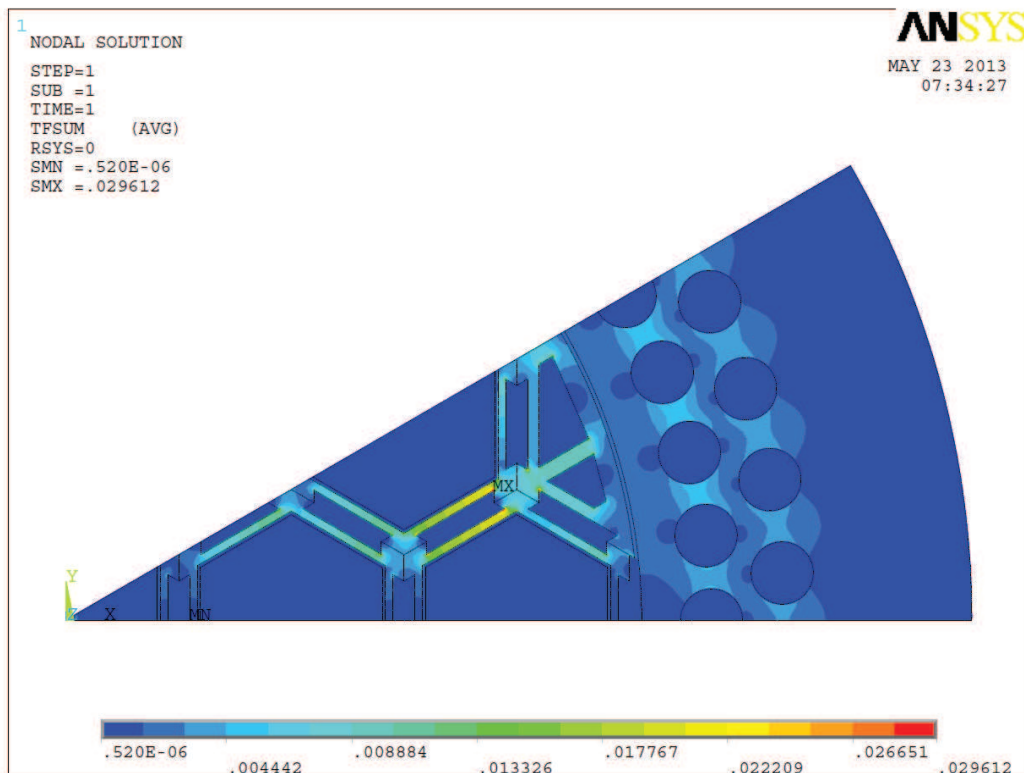


Graf: P2 – Hodnoty celkového součinitele přestupu tepla pro uvažované varianty

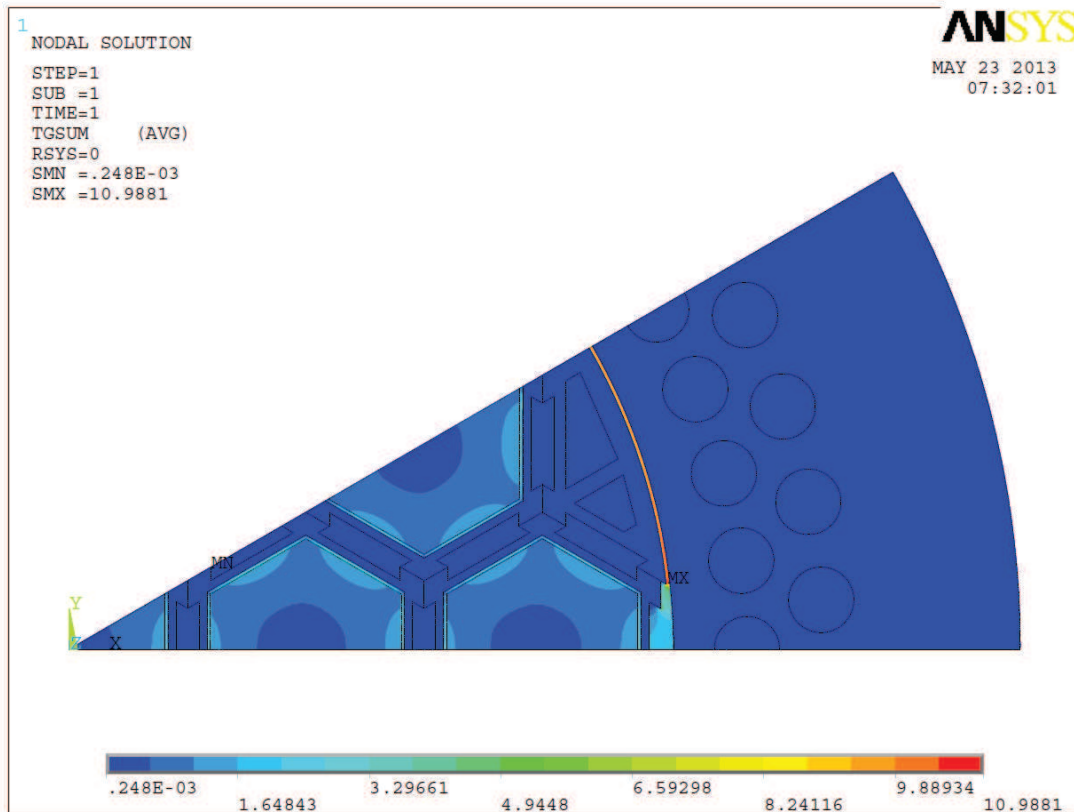
VARIANTA 1



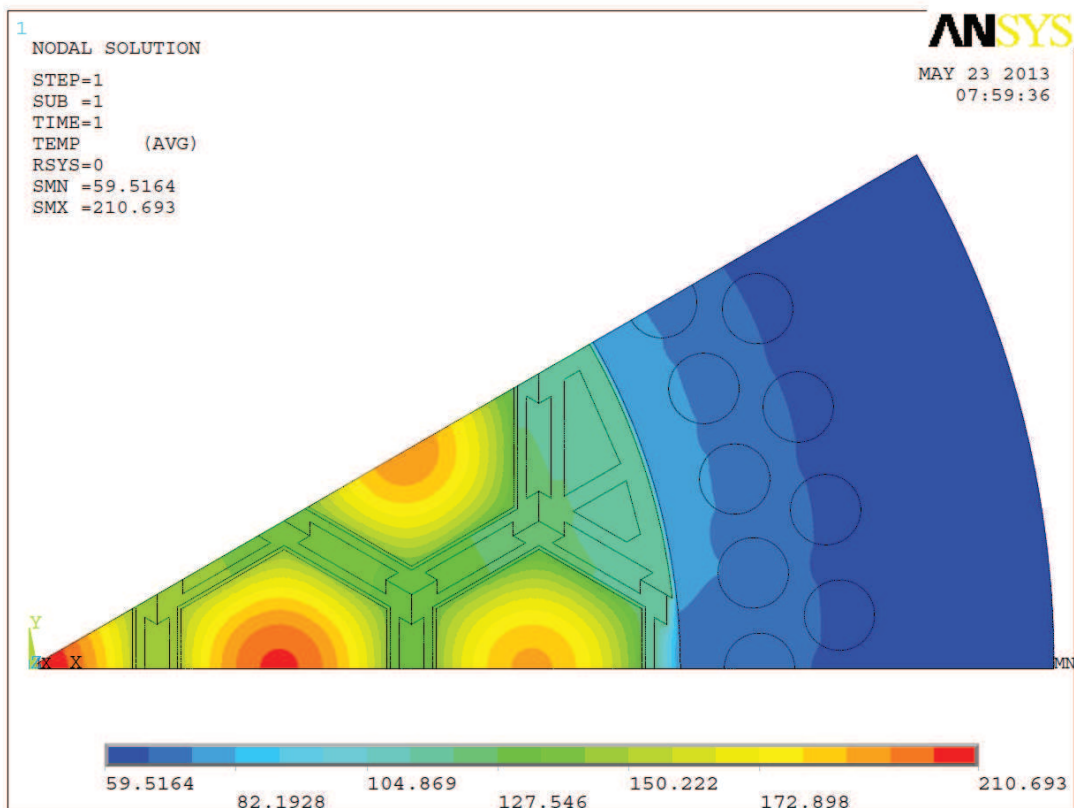
Obr.: P1 – Rozložení teploty VARIANTA 1



Obr.: P2 – Tepelný tok v konstrukci VARIANTA 1

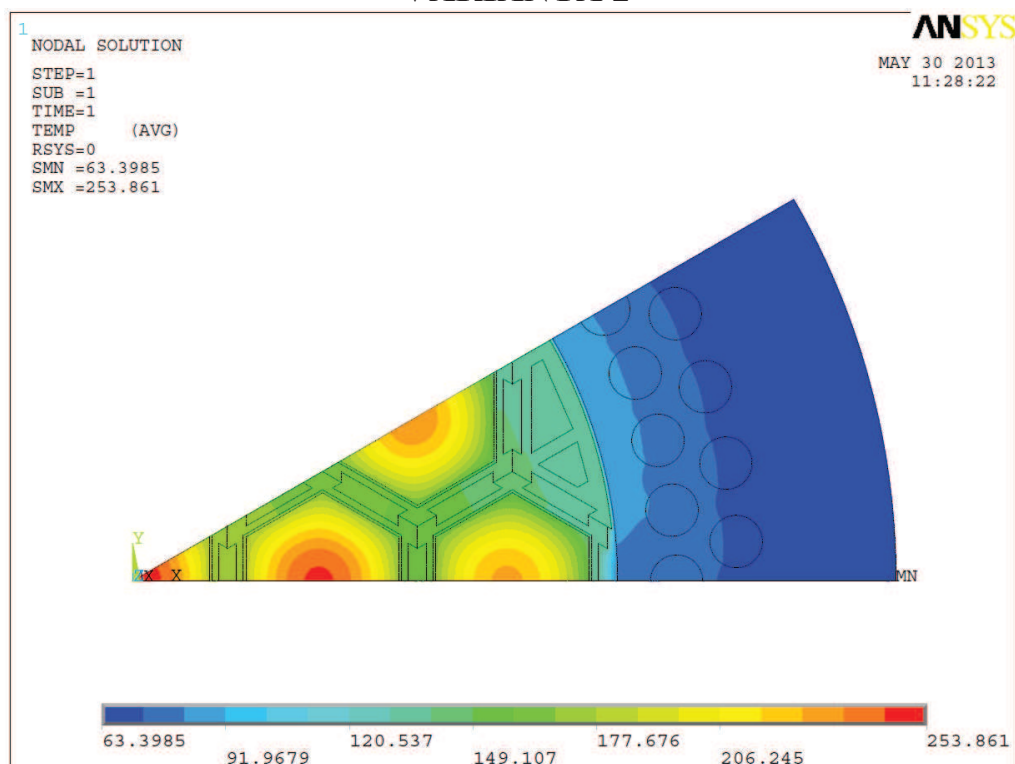


Obr.: P3 – Teplotní gradient VARIANTA 1

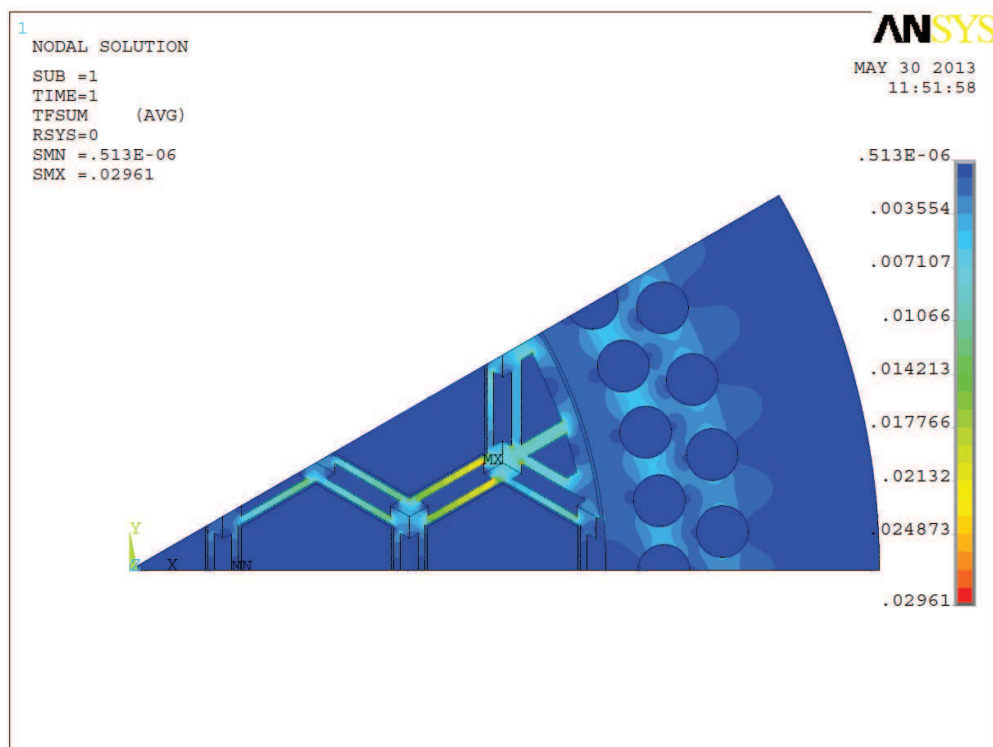


Obr.: P4 – Rozložení teploty (stav 2) VARIANTA 1 (teplota okolí 25°C, Q=17kW)

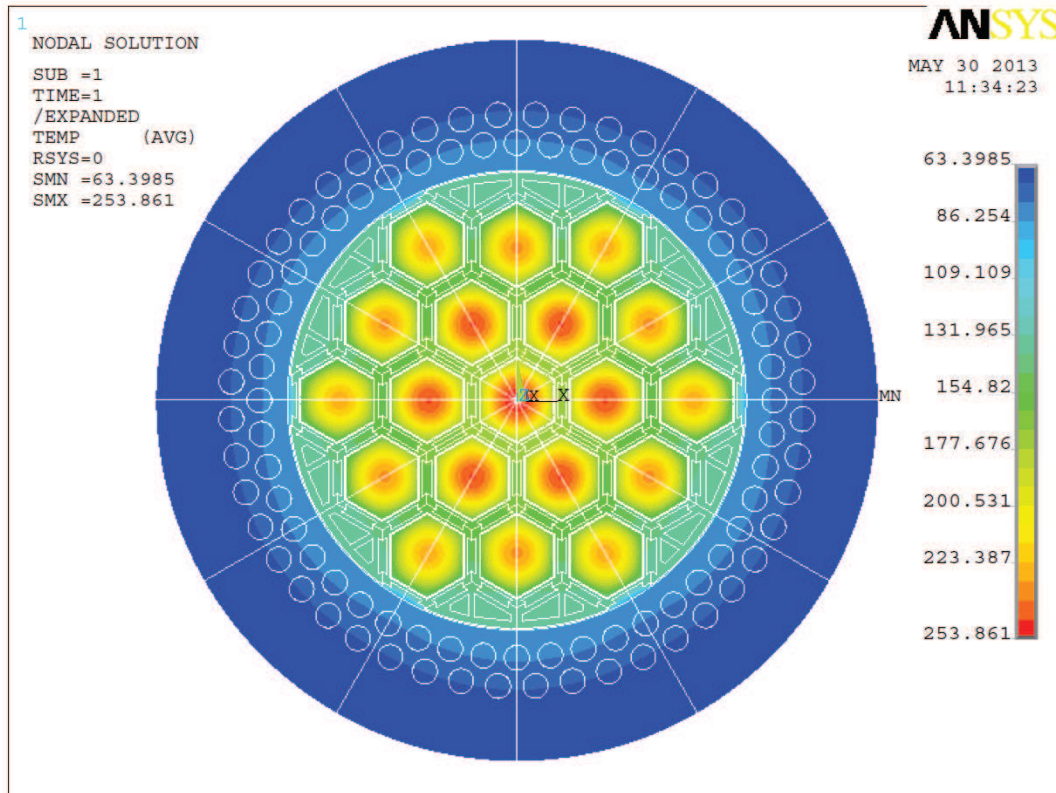
VARIANTA 2



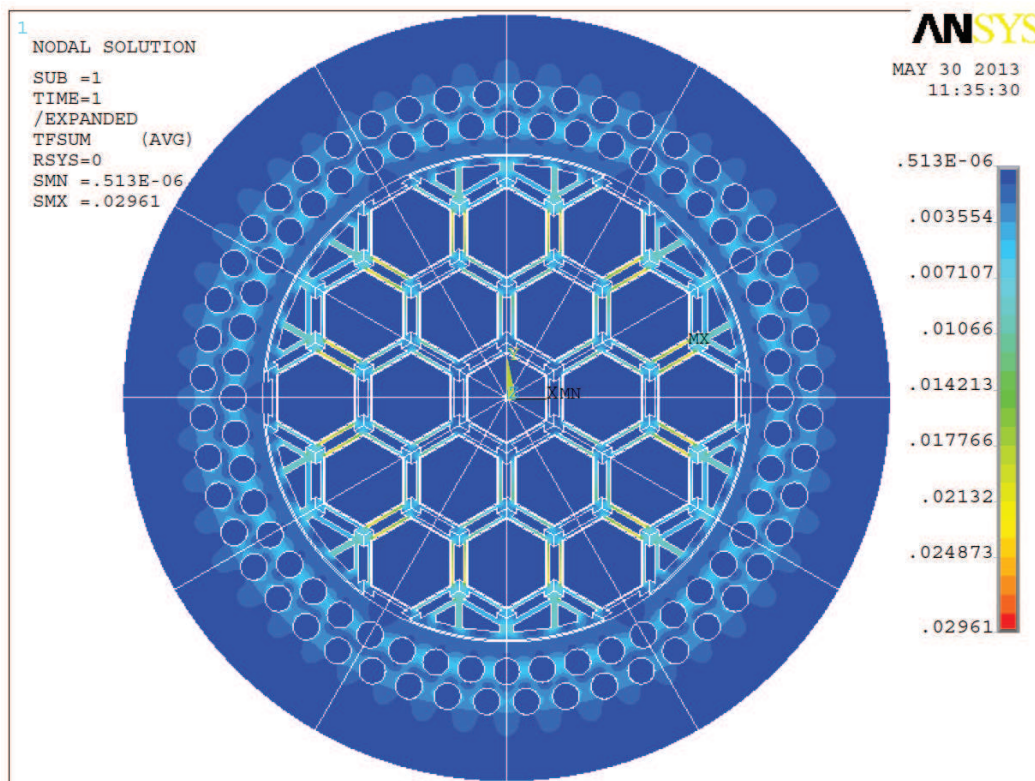
Obr.: P5 – Rozložení teploty VARIANTA 2



Obr.: P6 – Tok tepla VARIANTA 2

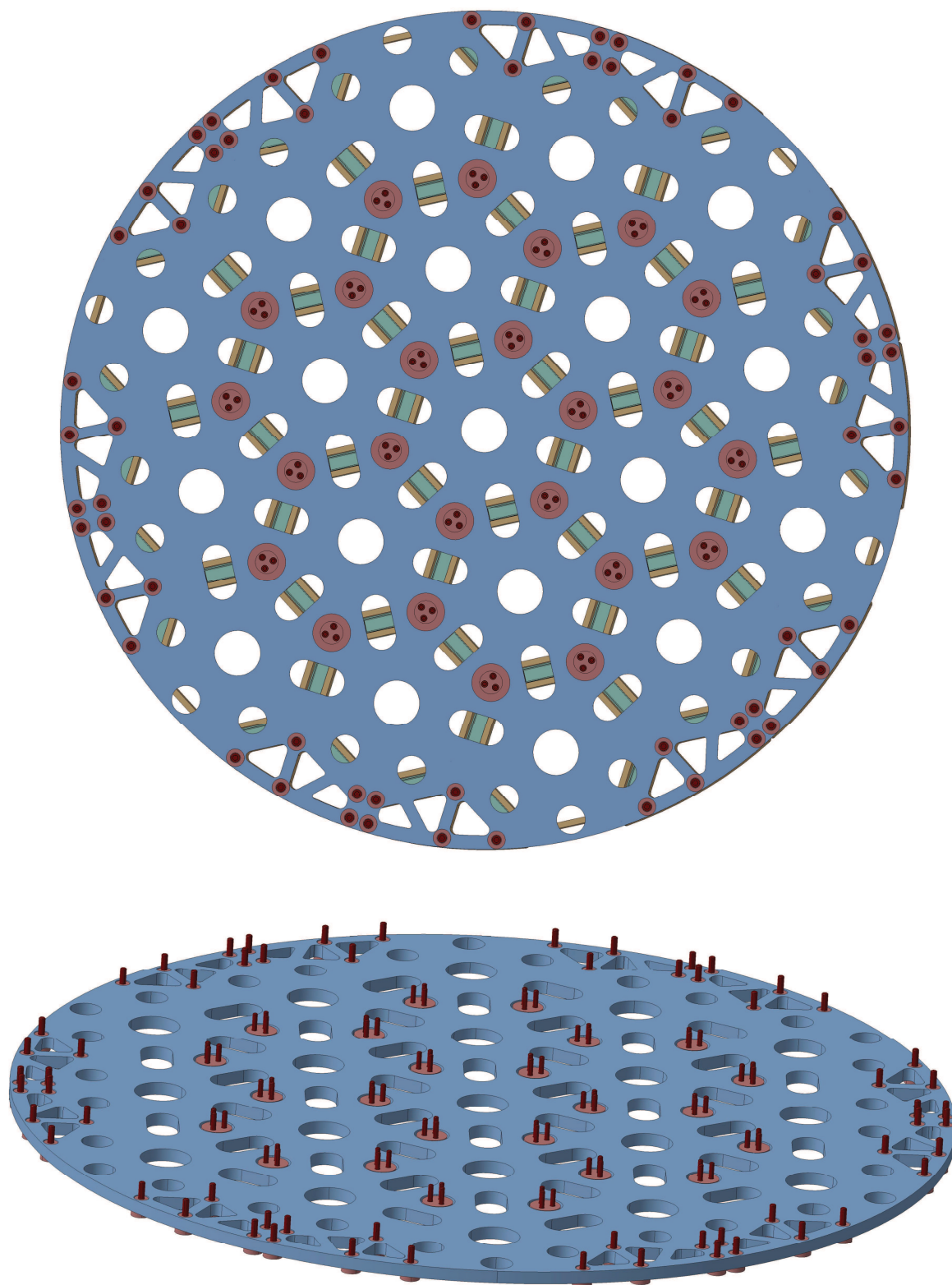


Obr.: P7 – Rozložení teploty VARIANTA 2

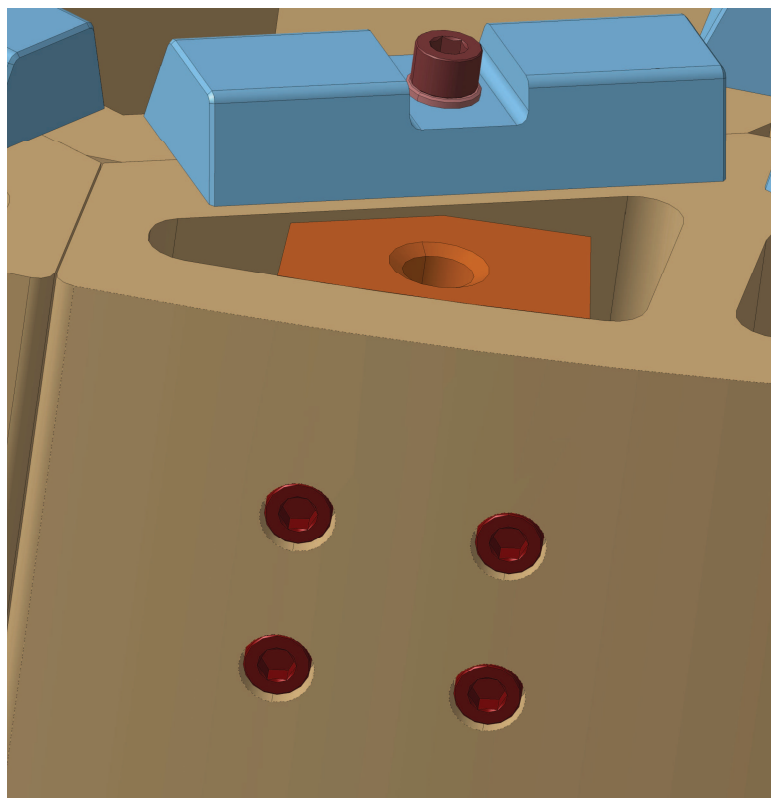
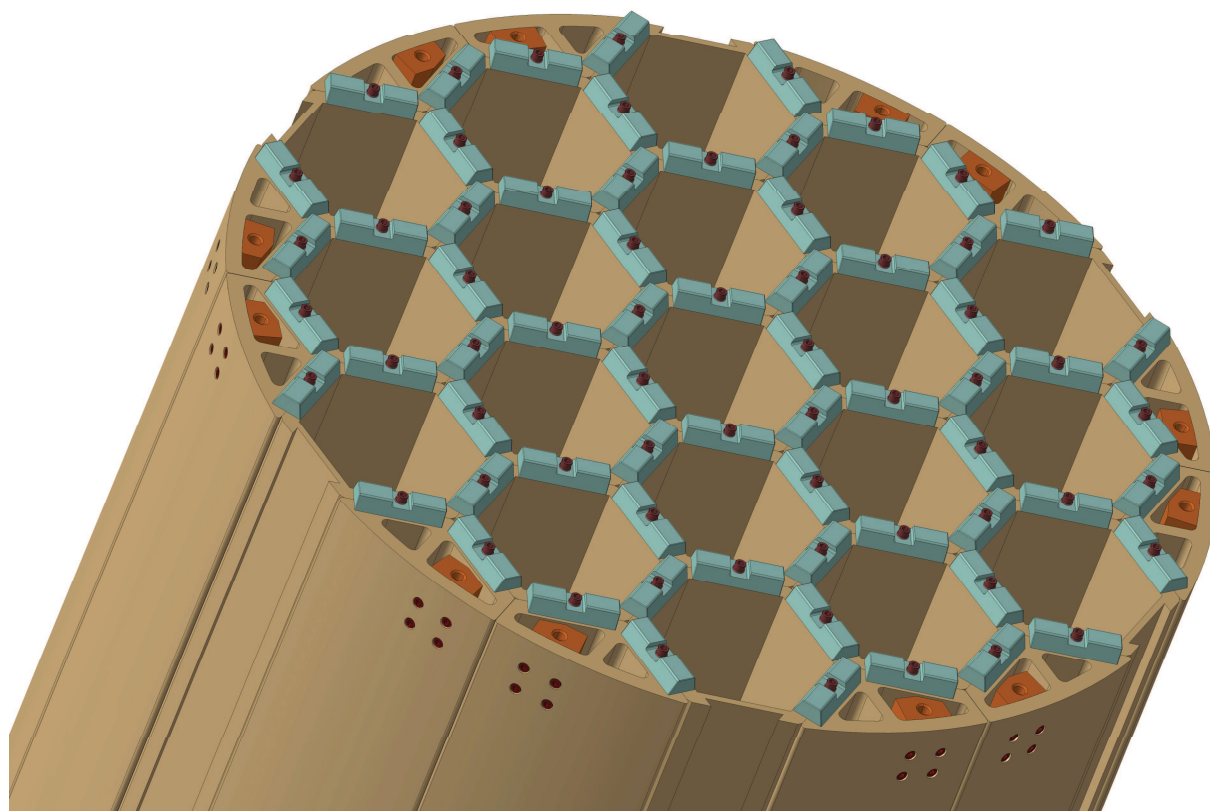


Obr.: P8 – Tok tepla VARIANTA 2

Příloha 4 - Spodní deska



Příloha 5 - koš kontejneru



Příloha 6 - koš v kontejneru CASTOR

