

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru jako stínící materiál tělesa
obalového souboru pro vyhořelé jaderné palivo

Autor práce: **Bc. Jan Forgáč**
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lovecký Ph.D.**
Konzultant práce: -

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan FORGÁČ**
Osobní číslo: **E21N0008P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru jako stínící materiál tělesa obalového souboru pro vyhořelé jaderné palivo**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Se zvyšující se efektivitou využívání jaderného paliva se zvyšují nároky na jeho skladování v obalových souborech. Jedním z perspektivních materiálů je beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru. Cílem práce je srovnání stávajících betonových a litinových materiálů s novým betonem.

1. Proveďte rešerši na téma obalových souborů pro vyhořelé jaderné palivo se zaměřením na tlakovodní reaktory a materiály těles.
2. Seznamte se s metodikou výpočtů stínění fotonů a neutronů v kódu Serpent.
3. Proveďte výpočet stínění pro různé varianty materiálů tělesa obalového souboru.
4. Srovnajte výsledný příkon prostorového dávkového ekvivalentu pro neutrony a oceňte možnosti využití betonu s příměsí polyetylénu a karbidu bóru v designu stínění obalového souboru

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, T. Kaltiaisenaho: The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013, Annals of Nuclear Energy 82 (2015) 142-150.
2. D. D. DiJulio, C. P. Cooper-Jensen, I. Llamas-Jansa, S. Kazi, P. M. Bentleyac: Measurements and Monte-Carlo simulations of the particle self-shielding effect of B4C grains in neutron shielding concrete, Radiation Physics and Chemistry 147 (2018) 40-44

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Lovecký, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**





Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Cílem této práce je nastínit způsoby nakládání s vyhořelým jaderným palivem a druhy obalových souborů, které se za tímto účelem používají. Dále je porovnán nově navržený stínící materiál na bázi *betonu s příměsí polyetylénu a karbidu bóru* s používanou tvárnou litinou. Za účelem porovnání byl použit existující obalový soubor Škoda 440/84. Tento soubor je dále nasimulován z pohledu stínění pomocí transportního Monte Carlo softwaru Serpent. Na závěr byly výsledné hodnoty příkonu dávkového ekvivalentu zanalyzovány a porovnány, a to za účelem určení, zda by měl beton s příměsí karbidu perspektivní využití jako stínící materiál u tohoto druhu obalových souborů. V poslední řadě je určen jaký vliv má použití homogenního materiálu místo nehomogenního materiálu na výsledky výpočtů.

Klíčová slova

Vyhořelé jaderné palivo, obalové soubory, Monte Carlo, Serpent, mezisklad jaderného paliva, dávkový příkon

Abstract

The aim of this work is to outline the methods of handling spent nuclear fuel and the types of spent fuel casks used for this purpose. Furthermore, a newly designed shielding material based on concrete with the addition of polyethylene and boron carbide is compared with the commonly used cast iron. For the purpose of comparison, the existing Škoda 440/84 dry storage cask was used as a base. This dry storage cask is further simulated in terms of shielding using the Serpent Monte Carlo transport software. Finally, the resulting values of the dose rate equivalent were analyzed and compared in order to determine whether concrete with the addition of carbide has prospective use as a shielding material for this type of packaging assembly. Lastly, the influence of using a homogeneous material instead of a non-homogeneous material on the calculation results is determined.

Keywords

Spent nuclear fuel, dry storage cask, Monte Carlo, Serpent, nuclear fuel intermediate storage, dose rate

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma:

Beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru jako stínící materiál tělesa obalového souboru pro vyhořelé jaderné palivo

vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce za použití pramenů uvedených v příložené bibliografii.

Plzeň dne

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkovat vedoucímu této práce, panu Ing. Martinu Loveckému Ph.D. za jeho rady, poznámky a kritiku při vypracování této práce.

Dále bych rád poděkoval svému středoškolskému učiteli elektrotechniky panu Ing. Miloslavu Hubáčkovi, který ve mě probudil zájem o elektroenergetiku a motivoval mě ke studiu na vysoké škole.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vii
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Vyhořelé jaderné palivo a způsoby s jeho nakládáním	2
1.1 Vznik vyhořelého paliva	2
1.2 Způsoby nakládání s vyhořelým palivem	6
1.2.1 Bazén vyhořelého paliva	7
1.2.2 Mezisklad paliva	8
1.2.2.1 Mokrý mezisklad	8
1.2.2.2 Suchý mezisklad	9
1.2.3 Dlouhodobé řešení	9
1.2.3.1 Hlubinné uložení	9
1.2.3.2 Přepřacování paliva	10
2 Obalové soubory, druhy a jejich realizace	11
2.1 Obecné vlastnosti obalových souborů	11
2.1.1 Doba konstrukce	11
2.1.2 Přemístitelnost	12
2.1.3 Bezpečnost	12
2.2 Modulární kobky - MVDS	13
2.2.1 Popis	13
2.2.2 Výhody	13
2.2.3 Nevýhody	14
2.2.4 Příklad 1 - MASTOR	14
2.2.5 Příklad 2 - ISFSF	14
2.3 Kontejnerové obalové soubory - kovové	15
2.3.1 Popis	15
2.3.2 Požadavky	16
2.3.3 Výhody	16
2.3.4 Nevýhody	17
2.3.5 Příklad 1 - CASTOR [®] 440/84 mvK	17
2.3.6 Příklad 2 - Škoda 440/84	18

2.4	Obalové soubory - betonové	19
2.4.1	Popis	19
2.4.2	Výhody	20
2.4.3	Nevýhody	20
2.4.4	Příklad 1 - CONSTOR [®]	20
2.4.5	Příklad 2 - HI-STORM 100	21
3	Počítačová simulace za účelem určení dávkového příkonu	24
3.1	Software Serpent	24
3.1.1	Simulace Monte Carlo	24
3.1.2	Serpent	24
3.1.2.1	Popis	24
3.1.2.2	Příklad použití	25
3.2	Základní geometrie	29
3.3	Varianty simulací	30
3.3.1	Varianta 1 - Obalový soubor Škoda 440/84	30
3.3.2	Varianta 2 - Upravený obalový soubor ŠKODA 440 s homogenním betonem	31
3.3.3	Varianta 3 - Upravený obalový soubor ŠKODA 440 s nehomogenním betonem	33
3.4	Zdroj	37
3.4.1	Zdroj neutronů	37
3.4.2	Zdroj fotonů	37
3.5	Detektor	38
3.6	Výsledky simulací	39
3.6.1	Oblast detektoru 1 a 2	39
3.6.2	Oblast detektoru 3	40
4	Závěr	52
	Seznam použité literatury	55

Seznam použitých symbolů a zkratek

g	Gram - jednotka hmotnosti
cm	Centimetr - Jednotka délky rovna jedné setině metru
Sv	Sievert - Jednotka dávkového ekvivalentu a ekvivalentní dávky
h	Hodina - Jednotka času
VVER	Tlakovodní reaktor (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)
b	Barn - Jednotka účinného průřezu. Rovna $1.0^{-28} m^2$
JEFF	JEFF - Joint Evaluated Fission and Fusion. Knihovna jaderných dat
σ_t	Celkový účinný průřez (Total). Jednotka barny (b)
σ_f	Účinný průřez pro štěpení (Fission). Jednotka barny (b)
σ_c	Účinný průřez pro radiační záchyt (Capture). Jednotka barny (b)
$T_{\frac{1}{2}}$	Poločas rozpadu. Jednotka roky (r)
BVP	Bazén vyhořelého paliva
JE	Jaderná Elektrárna
JENDL-4.0 [1]	Japanese Evaluated Nuclear Data Library
ATABOR	Ocel s příměsí bóru
OS	Obalový soubor
ρ	Reaktivita
AR	At reaktor - V blízkosti reaktoru
AFR	Away from reaktor - Vzdálen od reaktoru
VJP	Vyhořelé palivo
MVDS	Modular Vault Dry Storage - Modulární kobkový systém suchého skladování
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
MOX	Mixed oxid fuel - Paliva které je složeno z více než jednoho oxidu štěpného materiálu. Obvyklá kombinace je uran a plutonium
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport Code - Software vyvinutý národní laboratoří Los Alamos
PDE	Příkon dávkového ekvivalentu. Jednotka $\mu\text{Sv/h}$
VTT	Technical Research Centre of Finland
VHTR	Very High Temperature Reactor, Vysokoteplotní reaktor
UO ₂	Oxid uraničitý

Seznam obrázků

1	Kumulativní pravděpodobnost vzniku štěpných produktů štěpením ^{235}U o daném počtu neutronů a protonů (Knihovna JENDL-4.0 [1])	4
2	Výtěžek štěpných produktů o daném počtu neutronů a protonů štěpením ^{239}Pu (Knihovna JENDL-4.0 [1])	5
3	Etapy vyhořelého paliva	6
4	Bazén vyhořelého paliva v <i>JE</i> Temelín [7]	7
5	Hlubinné úložiště a transmutační reaktor	10
6	Vlivy na palivový článek [12]	13
7	Kobky typu MASTOR	14
8	MVDS systém typu ISFSF v <i>JE</i> Paks	15
9	CASTOR [®] 440/84 mvK	17
10	Kovové kontejnery Škoda 440/84 a 1000/19	18
11	Betonové OS typu CONSTOR [®]	20
12	Systém HI-STORM 100	22
13	Řezy geometrií z příkladu použití Serpentu	27
14	Intenzita tepelných neutronů vygenerována pomocí karty <i>mesh</i>	28
15	Definovaný palivový soubor VVER-440 a jedné prostorové oblasti koše obalového souboru	30
16	Řez X-Y koše obalového souboru i s palivovými soubory	30
17	Řezy geometrií varianty 1. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7	31
18	Řezy geometrií varianty 2. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7	33
19	Řezy geometrií varianty 3. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7	34
20	Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 1	49
21	Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 2	50
22	Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 3	51

Seznam tabulek

2	Aktinoidy obsažené v palivu reaktoru VVER 1000 po 1 roce provozu [3] a jejich poločas rozpadu. Účinné průřezy z knihovny JEFF-3.1.2	4
3	Důležité štěpné produkty ^{235}U . Knihovna JENDL-4.0 [1] (kumulativní výtěžek) a knihovna JEFF (poločasy rozpadu)	6
4	Rozdělení OS dle účelu [10] [11]	12
5	Komponenty a materiály CASTOR [®] 440/84 mvK [21]	18
6	Komponenty a materiály Škoda 440/84 [19]	19
7	Obecné vysvětlivky k materiálům v řezech geometrií	29
8	Materiál betonu s příměsí polyetylénu a karbidu bóru [28]	32
9	Výsledné hodnoty PDE pro oblasti 1 a 2 ze softwaru Serpent	39
10	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 1	40
11	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 1	41
12	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 1	42
13	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 2	43
14	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 2	44
15	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 2	45
16	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 3	46
17	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 3	47
18	Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 3	48
19	Vliv použití nehomogenního materiálů místo materiálu homogenního ve variantě 3	52

Úvod

Cílem této práce je provedení výpočtu stínění obalového souboru Škoda 440/90 s použitím dvou různých stínících materiálů. Problematika nakládání s vyhořelým jaderným palivem je přítomna tak dlouho, jako jaderná energetika sama. Vyhořelé palivo může být ještě dlouhé desítky let po jeho využití nebezpečné, jak pro člověka, tak pro životní prostředí. Z tohoto důvodu musí být kladeny vysoké nároky na jeho bezpečné uskladnění. Je tedy důležité, aby obalové soubory zabránily vlivu paliva na okolní prostředí po co možná nejdelší dobu.

V první části této práce je uvedena fyzikální podstata vyhořelého jaderného paliva a způsoby s jeho nakládáním.

V druhé kapitole jsou uvedeny druhy a konstrukce obalových souborů používaných v meziskladech jaderného paliva. Mezi uvedené obalové soubory patří modulární kobky, a ocelové a betonové kontejnerové obalové soubory.

Třetí kapitola je zaměřena na software Serpent a samotné použité simulace za účelem určení příkonu dávkového ekvivalentu pro různé varianty provedení obalového souboru Škoda 440/84. Obalový soubor je nasimulován pro jeho klasické uspořádání s použitím stanovených materiálů podle existující výrobku, a poté je nasimulován s nahrazením snícího materiálu za homogenní a nehomogenní beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru. Dále jsou zde uvedeny výsledky simulací pro všechny zmíněné varianty v různých detekovaných oblastech.

V závěru jsou výsledné hodnoty zanalyzovány a porovnány za účelem určení, zda by měl beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru perspektivní využití jako stínící materiál u tohoto druhu obalových souborů. Také je zde uvedeno, zda má použití homogenního materiálu místo nehomogenního vliv na výsledné hodnoty simulace.

1 Vyhořelé jaderné palivo a způsoby s jeho nakládáním

V jaderném palivu používaném v jaderných elektrárnách probíhá po celou dobu jeho životnosti řetězová štěpná reakce. Při této reakci se uvolňuje teplo, které je dále Carnotovo cyklem převedeno na mechanickou energii, která pohání generátor. Jako vedlejší produkt těchto reakcí ovšem vzniká v palivu množství izotopů, které se dříve v reaktoru nenacházeli. Většina těchto izotopů je velice nestabilní, a dále se rozpadají na další prvky. Při těchto rozpadech již vyhořelé palivo stále produkuje nezanedbatelné množství tepla a radiace. Musí být tedy kladeny vysoké nároky na bezpečné a dlouhodobé uložení tohoto paliva v obalových souborech.

1.1 Vznik vyhořelého paliva

Obecně lze říci o materiálu, že je použitelný jako jaderné palivo pokud splňuje následující podmínky.

- **Materiál je štěpitelný** - Aby byl materiál štěpitelný, tak musí mít dostatečně vysoký účinný průřez pro štěpení σ_b při co nejnižší energii neutronu.
- **Životnost materiálu** - Řada materiálu splňuje předchozí podmínku, avšak kvůli jejich nízkému poločasu rozpadu jsou v energetických reaktorech nepoužitelné. Je tedy důležité, aby měla palivo dostatečně dlouhou životnost na to, aby se do konce palivového cyklu nesnížila jeho koncentrace pod mez potřebnou pro udržení štěpné řetězové reakce.
- **Dostupnost** - Pouze malé množství štěpitelných materiálů je přírodního původu. Některé štěpitelné izotopy, které se v přírodě nenacházejí, je možné vytvořit pomocí množivých reaktorů (^{239}Pu z ^{238}U , ^{233}U , ^{232}Th)

V případě tlakovodních reaktorů VVER se používá jako jaderné palivo obohacený uran ve formě oxidu UO_2 . Obohacení se většinou pohybuje v rozmezí 3 - 5 %. Obohacením se rozumí hmotnostní poměr mezi ^{235}U a ^{238}U . Pokud by bylo palivo složeno pouze z uranu ^{235}U , tak by bylo jeho obohacení 100%.

Používáním paliva v jaderném reaktoru dochází v palivu vlivem štěpných reakcí ke vzniku štěpných produktů, které se dříve v palivu nenacházeli. Za celou životnost jaderného paliva se koncentrace těchto prvků neustále mění, a proto bude finální rozložení prvků závislé na vyhoření, které udává kolik tepelné energie bylo z paliva vyextrahováno.

$$BU = \frac{P_{th} \cdot t_{days}}{m_{MTU}} \quad (1)$$

Kde:	BU	- Vyhoření paliva	(GWd/MTU ¹)
	P_{th}	- Tepelný výkon reaktoru	(GW)
	t_{days}	- Doba provozu	(dny)
	m_{MTU}	- Celková hmotnost paliva v reaktoru	(t)

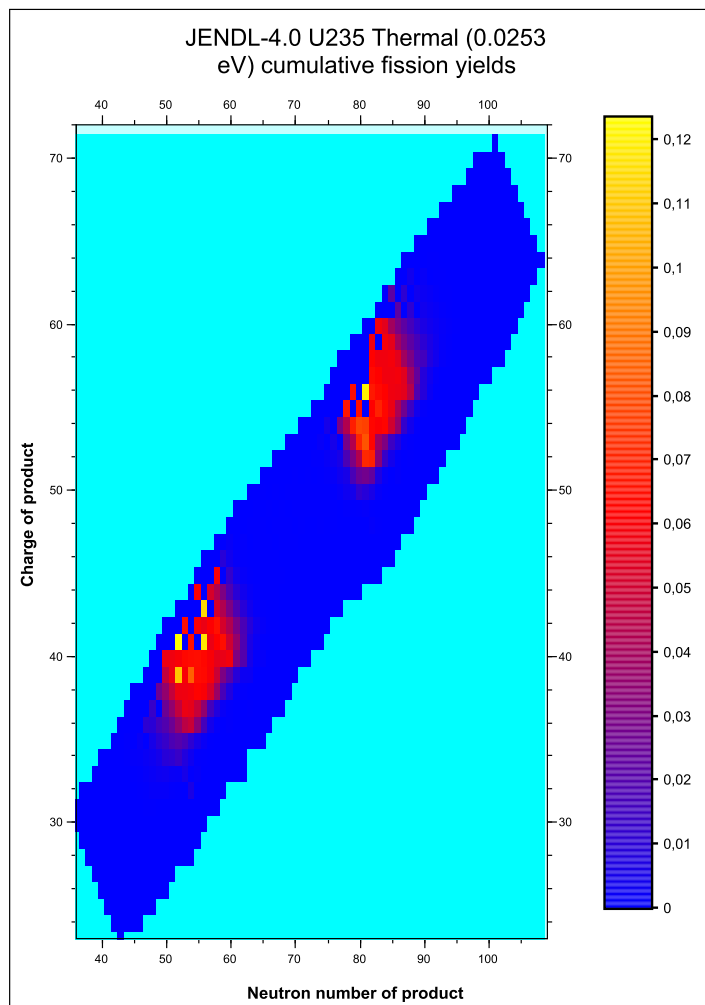
Vyhoření tedy nepřímou udává, jak velké množství štěpných produktů v palivu vznikne. Štěpné produkty vždy musí mít součet protonů a neutronů štěpeného materiálu stejný, jako počet u štěpných produktů.

Z řady měření a analýz je prokázáno, že v případě ^{235}U vzniká více než 100 různých štěpných produktů [2]. Z průběhu 1 lze vidět, že tuto množinu můžeme rozdělit na dvě samostatné podskupiny

- Lehká skupina - Prvky v této skupině mají hmotnostní číslo v rozmezí 80 až 110. Nejpravděpodobnějšími štěpnými produkty v této skupině jsou **zirkon**, stroncium, **rubidium**, yttrium a krypton.
- Těžká skupina - Prvky v této skupině mají hmotnostní číslo v rozmezí 125 až 155. Nejpravděpodobnějšími štěpnými produkty této skupiny jsou tellur, **jod**, **xenon**, **cesium** a baryum.

Vlivem neutronové toku v reaktoru dochází k radiačním záchytům jádru paliva a vznikají další těžká jádra (aktinoidy). Množství aktinoidů vznikajících v reaktoru VVER lze vidět v tabulce 2. Z této tabulky je zřejmé, že většina těchto prvků má vysoký σ_c a nízký σ_f . Výjimka jsou pouze ^{239}Pu a ^{241}Pu . Vlivem vysokého σ_c dochází ke snižování velikosti neutronového toku, protože tyto jádra neutrony absorbují. Nuklidy s vysokým radiačním zachytem mají tedy negativní vliv na reaktivitu paliva, a tedy celého reaktoru. Při poklesu reaktivity dochází ke zpomalení štěpné řetězové reakce ($\rho < 0$). Pokud by byl reaktor v tomto stavu provozován po delší dobu, tak dojde k úplnému zastavení štěpné reakce a dojde tedy k odstavení reaktoru. Palivo, které tedy má negativní vliv na reaktivitu reaktoru musí být v časových intervalech odstraňováno (obvykle 1, popřípadě 1.5 roku). O tomto palivu hovoříme jako o **vyhořelém** (Burned, Spent). Vzhledem k tomu, že některé takto vzniklé štěpné produkty mají nízký poločas rozpadu, je třeba analyzovat konečné složení paliva až po delším časovém úseku. Za jeden rok provozu vyprodukuje reaktor VVER1000 množství těžkých prvků dle tabulky 2. Je třeba podotknout, že se nejedná pouze aktinoidy, které vznikly zachytem neutronu, ale také dalším rozpadem těchto nuklidů.

¹MTU = *Metric Tuns of Fuel* (*UO₂ v tomto případě*). Někdy také označováno jako MWd/tHM, kde tHM značí *tuns of Heavy Metal*



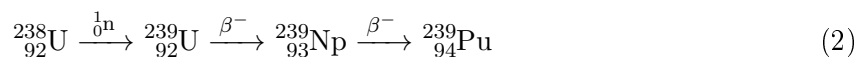
Obrázek 1: Kumulativní pravděpodobnost vzniku štěpných produktů štěpením ^{235}U o daném počtu neutronů a protonů (Knihovna JENDL-4.0 [1])

Tabulka 2: Aktinoidy obsažené v palivu reaktoru VVER 1000 po 1 roce provozu [3] a jejich poločas rozpadu. Účinné průřezy z knihovny JEFF-3.1.2

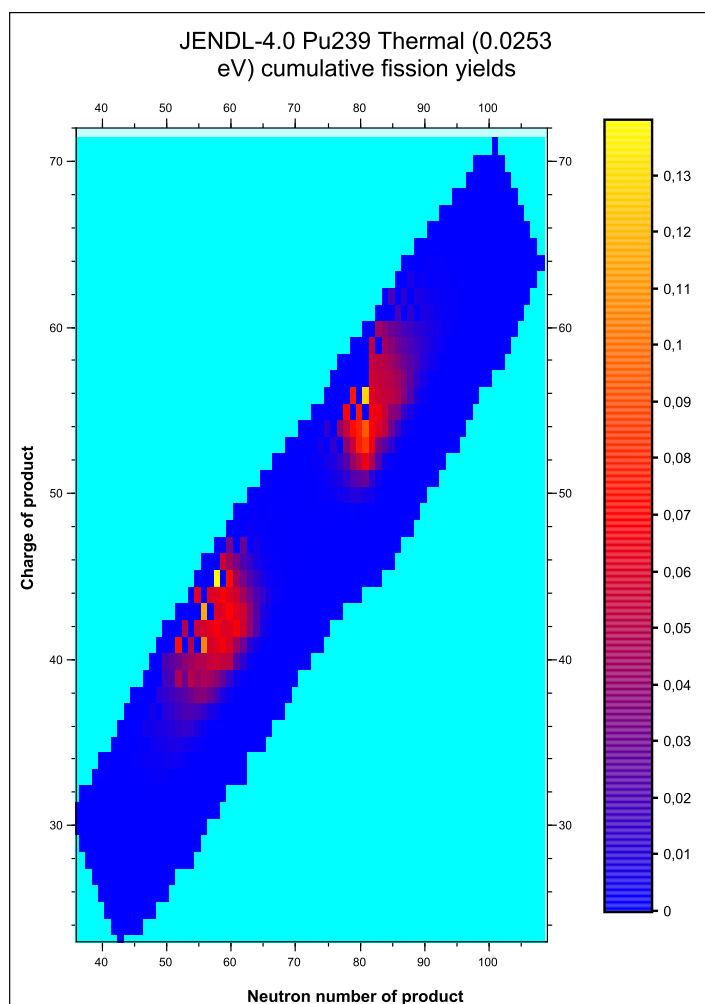
Nuklid	Produkce (kg/rok)	$T_{1/2}$ (r)	σ_t (b)	σ_f (b)	σ_c (b)
^{238}Pu	4.52	88	586.537	17.882	540.077
^{239}Pu	166	24 000	1.027e3	746.994	272.782
^{240}Pu	76.7	6 600	288.566	0.059	285.840
^{241}Pu	25.4	14.4	1.386e3	1.0122e3	363.028
^{242}Pu	15.5	380 000	27.134	0.002	18.795
^{237}Np	14.5	2 100 000	195.81	0.018	181.032
^{241}Am	16.6	432	662.549	3.150	647.141
^{242}Am	0.022	141	2.3215	2.0948	218.995
^{243}Am	2.99	7 400	84.295	0.0813	76.73
^{243}Cm	0.011	28.5	757.659	617.562	130.151
^{244}Cm	0.58	18.1	17.966	0.603	10.367

Vyhořelé palivo tohoto druhu tedy ještě stále obsahuje velké množství nuklidů, které mohou být nyní a nebo v budoucnu využity. Z tohoto důvodu není vyhořelé jaderné palivo skladováno pouze za účelem bezpečnosti, ale také z důvodů možného budoucího využití. Z prvků obsažených ve

vyhořelém palivu je nejužitečnější plutonium 239, které vzniká dle jaderné reakce 2



Radiačním záchytem neutronu jádrem ${}_{92}^{238}\text{U}$ vzniká jádro ${}_{92}^{239}\text{U}$. Tento atom je vysoce nestabilní, a po 23 minutách se β^- rozpadem rozpadá na ${}_{93}^{239}\text{Np}$. Ten se nadále po 2.3 dnech dalším β^- rozpadem rozpadá právě na ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Jak lze vidět, tak samotná doba tvorby ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ je velice krátká, a proto se také společně s uranem účastní štěpné řetězové reakce. Až třetina výstupního tepelného výkonu reaktoru je právě tvořena štěpením ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Alternativně lze plutonium z paliva vyseparovat a použít pro tvorbu takzvaného MOX paliva (Mixed Oxide). Je ovšem třeba podotknout, že velké množství plutonia používaného pro MOX palivo nepochází z vyhořelého paliva, ale z vyřazených jaderných zbraní. Ve vyhořelém palivu je také stále přítomno až 96 % původního uranu [3], které může být nadále použito pro tvorbu nového paliva.



Obrázek 2: Výtěžek štěpných produktů o daném počtu neutronů a protonů štěpením ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (Knihovna JENDL-4.0 [1])

V případě štěpení ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ vzniká obdobně jako pro ${}_{92}^{235}\text{U}$ lehká a těžká skupina štěpných produktů. Následující tabulka 3 zobrazuje nejdůležitější štěpné produkty ${}_{92}^{235}\text{U}$, které mají největší vliv na

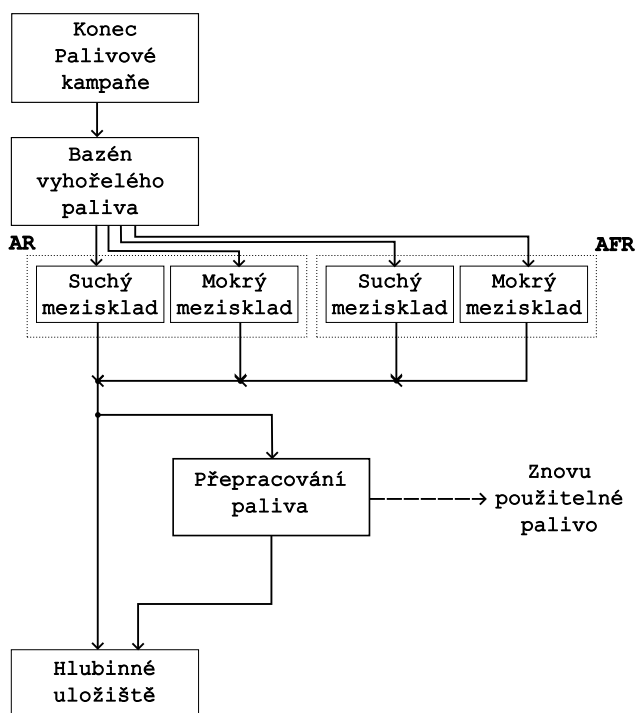
radioaktivitu vyhořelého paliva.

Tabulka 3: Důležité štěpné produkty ^{235}U . Knihovna JENDL-4.0 [1] (kumulativní výtěžek) a knihovna JEFF (poločasy rozpadu)

Produkty	Kumulativní výtěžek (%)	$T_{\frac{1}{2}}$
^{93}Zr	6.33	1.53e6 let
^{90}Tc	5.77	28.79 let
^{99}Tc	6.13	2.14e5 let
^{134}Te	6.96	41.8 minut
^{135}Cs	6.52	2.3e6 let
^{137}Cs	6.17	30.04 let
^{138}Cs	6.7	33.41 minut
^{133}Xe	6.6	5.244 dnů
^{129}I	0.5	1.61e7 let
^{133}I	6.6	20.8 hodin
^{134}I	7.8	52.5 minut

1.2 Způsoby nakládání s vyhořelým palivem

Tato podkapitola se nadále bude zabývat způsoby nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Palivo od svého odstavení projde řadou různých etap, které se můžou lišit jak podle použitého paliva, tak i podle země, která se o palivo musí starat. Pro naše účely se opět zaměříme na způsoby nakládání s využitým palivem v českých *JE*.

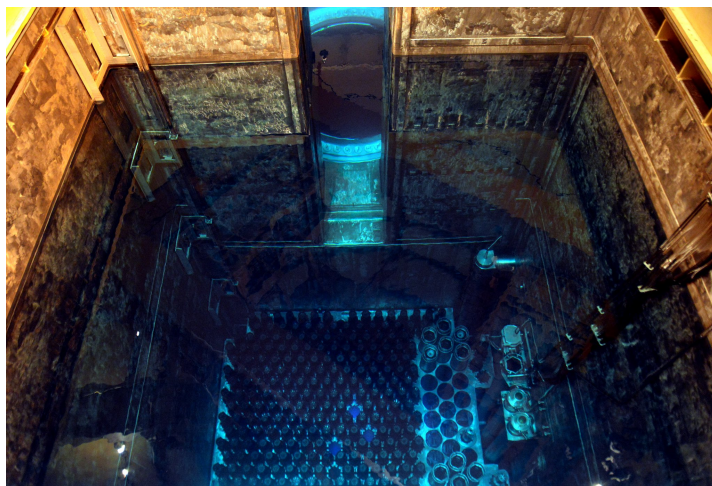


Obrázek 3: Etapy vyhořelého paliva

1.2.1 Bazén vyhořelého paliva

Jako první krok po extrakci vyhořelého paliva z reaktoru je jeho umístění do bazénu vyhořelého paliva (BVP). V tomto bazénu je palivo necháno dále chladit. V palivu je po odstavení vysoké množství velice nestabilních nuklidů, které mají relativně krátký poločas rozpadu (obzvláště ^{139}Cs a ^{90}Sr , které mají $T_{\frac{1}{2}}$ kolem 30 let [4]). Z tohoto důvodu je palivo vysoce radioaktivní, což má za následek generaci vysokého množství radiace a tepla. Po dostatečném časovém úseku se poměr těchto nuklidů značně zredukuje a tedy i velikost radiace a tepla generované palivem se sníží na přijatelnou mez. Poté se palivo přesouvá do meziskladu paliva, kde bude uskladněno do doby než se pro něj najde další využití.

V případě VVER se používá jako skladovací kapalina voda s příměsí bóru (11,44 g/l v Temelíně). Voda kvalitně odstiňuje okolí od radiace a přitom efektivně odvádí vzniklé teplo. Zároveň musí být palivo za všech okolností udrženo v podkritickém stavu, a k tomu slouží bór obsažený ve vodě. Samotné palivové soubory jsou ukládány do speciální mříže z ATABORU (nerezová ocel s 1 % příměsí bóru). Až 80% celkového množství paliva v meziskladech je skladováno mokrým způsobem. [5] [6]



Obrázek 4: Bazén vyhořelého paliva v *JE* Temelín [7]

Vyhořelé palivo je po skončení palivové kampaně přesunuto z reaktoru právě do BVP. Bazén a reaktor jsou navzájem propojeny kanálem, který se při výměně paliva zaplaví. Palivo je poté pod vodní hladinou přemístěno do meziskladu. Tímto způsobem nedochází téměř k žádnému úniku radiace, kterou by jinak palivo vyzářilo do okolí pokud by bylo přeneseno vzduchem.

Základní bariérou, která má zabránit uniku radiace do okolí je palivová tyč samotná. Z tohoto důvodu je nezbytné aby BVP neměl na spolehlivost tyče negativní vliv. Z těchto důvodů je nezbytné neustále kontrolovat zásaditost a vodivost vody, aby se zabránilo nechtěné korozi palivových souborů. I minimální korozi paliva se do vody uvolňují mikroskopické částičky radioaktivních kovů. Tyto částičky je třeba neustále odstraňovat filtry. Zásaditost vody se obvykle udržuje kolem 4.5 - 5 pH (určeno tím, zda je do vody přidán bór). [8]

1.2.2 Mezisklad paliva

V tomto skladu bude palivo umístěno po dobu až 60 let [6], ovšem přesný čas stále není zcela stanovený. Tato doba se dříve předpokládala kratší, protože bylo zamýšleno všechno palivo recyklovat. Bylo předpokládáno, že VJP na bázi uranu bude v množivých reaktorech využito a přepracováno na znovu použitelné palivo na bázi plutónia. Postupem času se ovšem ukázalo, že náklady na přepracování paliva jsou tak vysoké, že se mnohem více vyplatí vytvořit nové palivo. Dnešní situace je tady taková, že stále zcela není jasno, jak s tímto palivem po jeho vyhoření nakládat. Obecně existují 2 možnosti, přepracování a nebo trvalé uložení paliva. Za předpokladu, že nedojde k značnému pokroku na poli přepracování paliva, tak se bude palivo nejspíše ukládat do hlubinných úložišť a bude tedy bráno jako jaderný odpad.

Momentálně se uplatňují strategie "**počkej a uvidíš**" (**Wait and See**). Tedy, že palivo bude po co nejdelší možnou dobu skladováno v meziskladech. V závislosti na budoucím pokroku buď na poli uložení VJP a nebo přepracování paliva se rozhodne, která z metod dostane přednost.

V závislost na tom, kde se sklad nachází se dělí na sklady u reaktoru (AR - AT REACTOR) a sklady vzdálené (AFR - AWAY FROM REACTOR). Důvodem vzniku AFR skladů je možnost centralizace vyhořelého paliva. Starší druhy jaderných elektráren také nemusí mít AR sklad uzpůsobený pro vyšší výkony, na které mohl být reaktor upraven. Z tohoto důvodu je také potřeba palivo přesunout do AFR skladu.

Mezisklady se dělí na 2 druhy, mokrý a suchý mezisklad.

V případě českých jaderných elektráren se palivo skladuje v prvních 3-12 letech v BVP, kde dojde k zásadnímu snížení aktivit nejvíce radioaktivních prvků. Palivo je poté přesunuto do suchého meziskladu, kde je palivo uloženo ve speciálních obalových souborech.

1.2.2.1 Mokrý mezisklad

Mokrým způsobem se rozumí sklad ve formě bazénu naplněného kapalinou, a je tedy podobný a nebo i totožný s BVP. Oproti suchému způsobu má tu výhodu, že lze snadno opticky kontrolovat stav paliva. Nevýhodou jsou větší investiční náklady a také menší kompaktnost.

Jelikož jak lehká voda, tak bór, jsou prvky s nízkým účinným průřezem pro absorpci, tak za ideální čistoty je kapalina neradioaktivní. V reálném prostředí se ovšem do bazénu uvolňuje koroze a únikem netěsnostmi pokrytí paliva malé množství radioaktivních částic VJP. Vzhledem k tomu, jak malý vliv toto má na celkovou radioaktivitu vody se tento vliv většinou zanedbává.

Dalším problémem je vodík, který vzniká radiolýzou lehké vody. Zasažením molekuly vody H_2O neutronem dochází k rozkladu na vodík H a hydroxid OH. Vodík se poté z bazénu uvolňuje do okolního prostředí. Vodík je ve vysoké koncentraci výbušný, a proto musí být místnost s bazémem neustále odvětrávána.

1.2.2.2 Suchý mezisklad

V případě suchého meziskladu se palivo ukládá do takzvaných obalových souborů. Obalové soubory jsou veliké a odolné nádoby, které mají za cíl opět palivo co nejlépe odstínit od okolí a zároveň kvalitně odvést teplo vznikající radioaktivními pochody v palivu.

Pro snížení reaktivity paliva na podkritickou mez slouží obdobně jako pro BVP mříž z ATABORu, ve které jsou palivové články uloženy. Nádoba je dále naplněna inertním plynem, který zlepšuje odvod tepla. Jako inertní plyn se ve většině případů používá hélium. Teplo z paliva je dále odváděno vedením přes nádobu do okolního prostředí. OS je z tohoto důvodu žebrovaný za účelem získání co největší chladicí plochy. Na obrázku 10 lze vidět příklad obalového souboru Škoda 1000/19. Na obrázku 10.b lze vidět detail koše s hexagonálními mřížemi. Lze si povšimnout ATABOR plechů, které se nachází mezi těmito mřížemi. Poslední vrstva pláště obalového souboru ještě obvykle obsahuje množství válcových otvorů, které obsahují polyetylen. Ten má za úkol zachytit neutrony a zabránit tak jejich průniku do okolí.

V případě českých JE se vyhořelé palivo přesouvá do obalových souborů následujícím způsobem. Otevřený prázdný obalový soubor je ponořen do BVP. Pomocí manipulačního zařízení jsou palivové soubory vloženy do obalového souboru. Po skončení ukládání paliva je soubor hermeticky uzavřen a vyndán z BVP. V poslední řadě je ze souboru odstraněna přebytečná voda, a do souboru je vložen inertní plyn. Za celou dobu manipulace tedy nedochází ke kontaktu paliva s vnějším okolím BVP.

Více se bude o druzích a specifikacích některých obalových souborů zabývat kapitola 2.

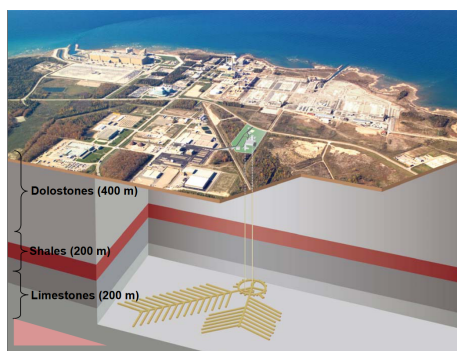
1.2.3 Dlouhodobé řešení

Po uplynutí značně dlouhého časového období (60-120 let) lze vyhořelé palivo přesunout do finální etapy jeho skladování. V této etapě palivo obsahuje snížené množství radioaktivních nuklidů a tedy produkuje méně radiace a tepla. Z tohoto důvodu se již nemusí klást tak extrémní nároky na jeho skladování jako v případě BVP a meziskladu. Generované radiace je ovšem stále škodlivá pro biosféru a proto musí být od biosféry odizolováno, a nebo přepracováno tak, aby nebylo nebezpečné. Otázka co s vyřazeným jaderným palivem v dlouhodobém hledisku je řešena již od doby, kdy byla postavena první jaderná elektrárna. Dříve se zamýšleli některé dosti originální plány, jako třeba vystřelení tohoto paliva do vesmíru. Dnešní výzkum se soustředí pouze na dvě varianty, palivo bude bezpečně uloženo do hlubinného úložiště, a nebo bude přepracováno.

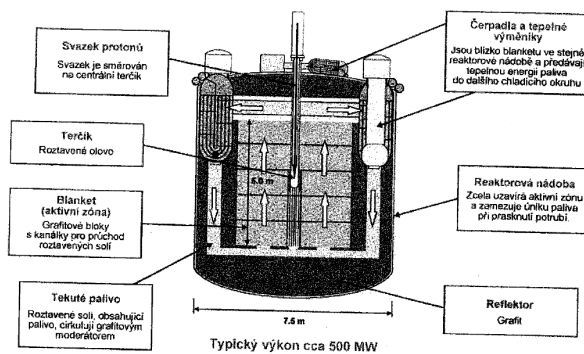
1.2.3.1 Hlubinné uložení

V případě ukládání paliva do hlubinného úložiště se již toto palivo bere jako jaderný odpad, a není tedy zamýšleno jeho budoucí využití. Vzhledem k tomu, že palivo musí v tomto stavu zůstat po co nejdelší dobu (tisíce až desetitisíce let), je třeba brát hlavně ohled na umístění tohoto úložiště. Musí být umístěno v takové hloubce, aby okolní stabilní horninové formace

tvořily neproniknutelnou bariéru od biosféry. Obecně se hloubka úložiště pohybuje v rozmezí 400 metrů až 1 kilometr. Palivo je umístěno ve speciálních obalových souborech pro hlubinné uložení. Existují také speciální víceúčelové obalové soubory pro mezisklady, které se dají také využít pro hlubinné uložení (viz. kapitola 2.1.2).



(a) Plánované hlubinné úložiště v oblasti Kanadské jaderné elektrárny Bruce [9]



(b) Příklad ADTT transmutačního reaktoru [3]

Obrázek 5: Hlubinné úložiště a transmutační reaktor

1.2.3.2 Přepřacování paliva

Přepřacováním vyhořelého paliva se rozumí extrakci užitečných prvků, jako například ^{235}U a ^{239}Pu . Po extrakci ovšem zůstává velké množství nebezpečných nuklidů stále v palivu, a proto i přepřacování je třeba se zbylého nezpracovaného paliva zbavit jeho hlubinným uložením. Proto se dá na přepřacování pohlížet pouze jako na redukování množství paliva, které bude potřeba uložit.



Vývojem urychlovačů se ovšem otevírají dveře k alternativní metodě přepřacování využitého paliva, a to pomocí přesné jaderné transmutace jader, označované jako ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies) nebo ADS (Accelerator Driven System). Celý princip této technologie je založen na tříštivé reakci odstřelovaných jader kovů. Při tříštivé reakci se uvolňuje mnohonásobně vyšší počet neutronů než při štěpné reakci. Vzhledem k množství neutronů je zvýšená šance jak na absorpci, tak na štěpení látek, které jsou obvykle málo štěpitelné. Tímto způsobem lze snížit koncentraci nebezpečných nuklidů, jako jsou ^{99}Tc , ^{129}I a ^{135}Cs . Absorpcí neutronu vzniká nový izotop, který může být stabilní, a nebo se může po několika krátkých přeměnách na izotop stabilní přeměnit. Příkladem může být transmutace již zmíněného technicia 99. Technicium 99 má poločas rozpadu 2.1 miliónu let a je tedy dlouhodobě pro životní prostředí nebezpečné. Absorpcí neutronu vzniká ^{100}Tc , které se dále rozpadá podle řady 3 na stabilní ^{100}Ru [3].

2 Obalové soubory, druhy a jejich realizace

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.2.2.2, tak suché mezisklady jsou moderní alternativou mokrých způsobů ukládání VJP. Základním modulem suchého meziskladu je takzvaný **obalový soubor**. V suchém meziskladě může být skladována celá řada těchto obalových souborů.

Obecně jsou na obalové soubory kladeny následující 3 požadavky

- **Chlazení** - Palivové soubory musí být dostatečně chlazeny, aby nedošlo k jejich poškození. V případě OS je chlazení vždy pasivní
- **Stínění** - OS musí dostatečně odstínit před účinky vyhořelého paliva z důvodu zajištění bezpečnosti pracovníků
- **Podkritičnost** - Za všech okolností musí být zajištěna podkritičnost palivového souboru ($k_{eff} < 0.95$), aby nedošlo k jeho nekontrolovatelnému roztavení

2.1 Obecné vlastnosti obalových souborů

2.1.1 Doba konstrukce

Doba plánování a konstrukce obalových souborů je značně nižší než doba výstavby mokrých meziskladů. To je způsobeno jejich modulárností, kompaktností a přemístitelností. V případě mokrého meziskladu, který se nachází AR je třeba plánovat jeho výstavbu značně dopředu, a ani tak nemusí být jisté, že lze bazén do areálu JE dostavět. V opačném případě lze obalové soubory konstruovat ve specializovaných závodech, a pouze po jejich konstrukci jsou do elektrárny přeneseny a zmontovány.

Doba konstrukce je klíčová také z hlediska, kdy by došlo na k naplnění AR meziskladu. V takovém případě bude muset buď dojít k rychlému zvýšení kapacity AR meziskladu, a nebo bude muset být palivo transportováno do meziskladu AFR. Výhodou je tedy, že rozšíření suchého meziskladu je značně jednodušší než rozšíření mokrého meziskladu. Je důležité ovšem podotknout, že je třeba tuto problematiku řešit dopředu s dostatečným časovým odstupem. Od požadavku elektrárny na první OS až po jeho dodání může uplynout i 10 let. Důvodem jsou zdlouhavé fáze projektování, schvalování SÚJB a výroby.

2.1.2 Přemístitelnost

V tomto ohledu lze obalové soubory rozdělit na 3 kategorie [10],[11]

- Jednoúčelové - Obalový soubor je použitelný pouze pro skladování VJP přímo v meziskladu v areálu elektrárny (AR). Nelze ho transportovat.
- Dvouúčelové - Obalový soubor lze použít jak pro skladování, tak pro transportování. Palivo lze tedy například transportovat do vzdáleného meziskladu paliva (AFR). Právě tento přístup je preferován Českou Republikou.
- Víceúčelové - Obalový soubor lze také po skončení skladovací doby použít k hlubinnému uložení paliva.

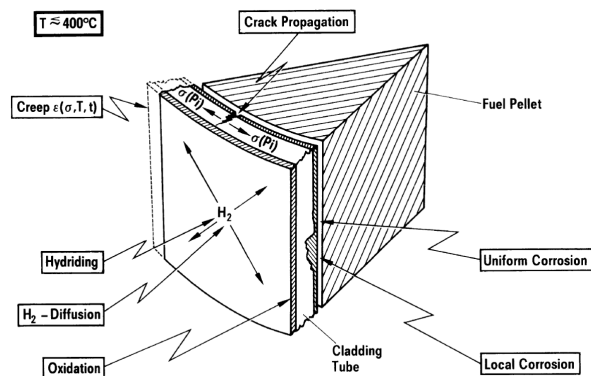
Tabulka 4: Rozdělení OS dle účelu [10] [11]

Druh	Skladování	Transportování	Hlubinné uložení
Jednoúčelové	ANO	NE	NE
Dvouúčelové	ANO	ANO	NE
Víceúčelové	ANO	ANO	ANO

2.1.3 Bezpečnost

Z hlediska bezpečnosti se hlavně řeší vliv obalového souboru na pokrytí palivových souborů, který tvoří základní ochranu před únikem paliva do okolního prostředí. Z tohoto hlediska byly zjištěny následující procesy, které mohou tento efekt vyvolat

- Tečení - Vlivem vysokých teplot palivových článků v počáteční fázi skladování může docházet k mechanické deformaci tyčí. Jelikož je tento vliv velice nízký, tak zatím nebylo prokázáno, že by tento efekt mohl vést ke zničení palivového článku. [8]
- Oxidace pokrytí - V případě použití suché inertní atmosféry je oxidace zanedbatelně nízká. [8]
- Vodíkem způsobené poškození - Zirkonium, které se používá v pokrytí palivových proutků, má tendenci za vysokých teplot reagovat s vodou, čímž vzniká vodík. Vodík dále reaguje se zirkoniem, čímž vzniká hydrid tohoto kovu. Po snížení teploty pod teplotu rozpustnosti dochází k rozložení těchto hydridů, čímž dochází ke zvýšení lokální koncentrace vodíků. Vodík v této lokální oblasti nadále zvyšuje křehkost. Tímto způsobem by mohlo za určitých podmínek dojít ke vzniku praskliny. Dosavadní výzkum ovšem neprokázal zda tyto podmínky mohou vzniknout. [8]



Obrázek 6: Vlivy na palivový článek [12]

Díky tomu, že je chlazení OS pasivní, tak není závislé na jiném zařízení a jeho spolehlivosti. V případě mokrého meziskladu je třeba vodu neustále cirkulovat pomocí elektrických čerpadel. Spolehlivost tohoto systému je tedy závislá na spolehlivosti daných čerpadel, a dalších pomocných zařízení.

2.2 Modulární kobky - MVDS

2.2.1 Popis

Jedná se o suchý mezisklad tvořený jako betonový monolit s množstvím otvorů do kterých se ukládají palivové soubory. Ty jsou chlazeny pasivně vzduchem, který se žene skrz úložný prostor přirozenou konvencí. Jedná se v podstatě o hybrid mezi kovovými obalovými soubory a betonovými obalovými soubory. Z toho také plynou jeho výhody, kterou jsou v podstatě kombinací dvou zmíněných technologií. [8]

2.2.2 Výhody

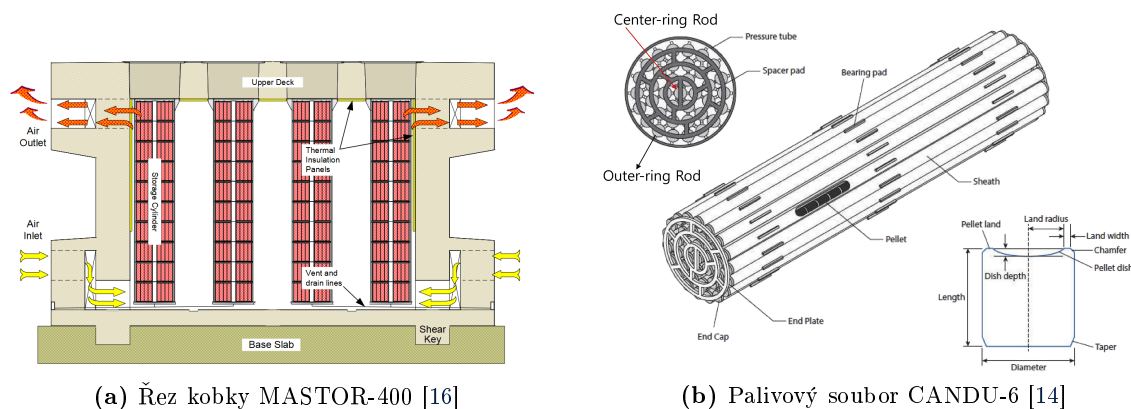
- Sklad zároveň slouží jako obalový soubor. Řešení je tedy více kompaktní a obsahuje všechny potřebné konstrukce potřebné pro skladování VJP [6]
- Snížená doba potřebná pro přesun VJP z AR, a to díky faktu, že lze přeskočit fázi sušení paliva. K sušení dojde až přímo v MVDS [6]
- V případě poruchy pláště otvoru lze palivo vysunout pomocí manipulačního zařízení, a plášť opravit [6]
- Nízká pořizovací a provozní náklady

2.2.3 Nevýhody

- Kvůli své velikosti horší podmínky pro transport
- Maximální teplota uloženého paliva je 150 °C [13]
- Kobky jsou vhodnější pro skladování paliva typu CANDU (reaktor typu PHWR), a to kvůli menšímu množství generovaného měrného tepla [14]

2.2.4 Příklad 1 - MASTOR

Jedním ze zástupců modulárních kobek je kobka typu MASTOR (**M**odular **A**ir **C**ooled **S**torage, Modulární vzduchem chlazený úložný prostor). MASTOR byl vyvinut v devadesátých letech minulého století společnostmi Atomic Energy of Canada Limited (AECL) a Transnuclear Inc. (TNI). Cílem bylo vytvořit takový obalový soubor pro skladování paliva typu CANDU, který bude co nejvíce efektivní a zároveň co nejlevnější. Celý systém je ovšem flexibilní i pro ukládání různých druhů paliva, a lze ho použít i pro skladování paliva z reaktorů VVER-440 a VVER-1000 [15].

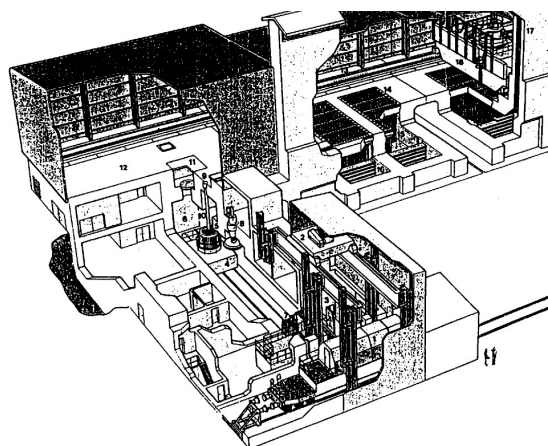


Obrázek 7: Kobky typu MASTOR

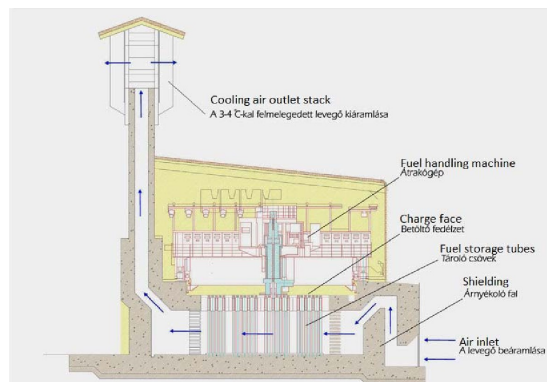
2.2.5 Příklad 2 - ISFSF

ISFSF, neboli Independent Spent Fuel Storage Facility je hlavní a jediný Maďarský mezisklad VJP z jaderné elektrárny Paks, která používá reaktor VVER-440. Je realizovaný jako MVDS, a přesněji se používá britský design GEC-ALSTHOM. V porovnání s předchozím příkladem je tento design mnohem robustnější, a není možné jej transportovat. Jedná se tedy pouze o jednoúčelový obalový soubor. Má ovšem mnohem vyšší kapacitu a tedy i vyšší skladovací hustotu. [17]

Postup při skladování paliva v ISFSF je následující. Nejdříve jsou palivové soubory přesunuty z BVP do transportních kontejnerů, které budou přesunuty pomocí kolejí. Transportní kontejnery budou přesunuty do budovy pro příjem transportních kontejnerů TCRB (Transfer Cask Reception Building), kterou lze vidět na obrázku 8 vlevo. Tato budova je přímou součástí celého



(a) MVDS mezisklad v JE Paks [17]



(b) Řez jedním skladem komplexu ISFSF [18]

Obrázek 8: MVDS systém typu ISFSF v JE Paks

meziskladu. V TCRB jsou palivové soubory vyndány z transportních kontejnerů a vysušeny. Poté jsou manipulačními zařízeními přesunuty do budovy skladu, která je na obrázku 8 vpravo. Palivové soubory jsou dále vloženy do skladovacích trubíc. Trubice budou nadále utěsněny a naplněny inertní dusíkovou atmosférou. [17], [18]

2.3 Kontejnerové obalové soubory - kovové

2.3.1 Popis

Kovové kontejnery jsou dalším z druhů obalových souborů, které jsou charakteristické jejich vysokou modulárností a bezpečností. Díky použití kovového pláště místo betonu je soubor mnohem více mechanicky odolný. Jako v případě 2.2.4, tak i v tomto případě je chlazení realizováno pasivně. Stěna tělesa OS je obvykle realizována kovanou ocelí, tvárnou litinou a nebo sendvičem z oceli a olova. [8]

Všechny realizace těchto obalových souborů jsou většinou tvořeny z následujících komponentů

- Koš na vyhořelé palivo - Tento koš má za úkol udržovat palivové soubory na svých místech a nedovolit, aby došlo k jejich přiblížení. Jedná se tedy o první způsob zabránění překročení kritičnosti paliva, a to polohou. Koš je většinou ještě vybaven dalšími materiály/plechy které reaktivitu paliva ještě dále snižují. Jedná se tedy o sekundární ochranu proti nad kritičnosti paliva. Koš musí být navržen tak, aby odolal dlouhodobému teplotnímu namáhání. Příklad koše lze vidět na obrázku 10
- Kanystr - Tvoří hranici mezi skladovaným palivem a okolním prostředím. Celý kanystr je hermeticky uzavřen primárním víkem, které je ke kanystru přišroubováno. Celý kanystr se vkládá do pláště obalového souboru. Mezi primárním víkem a kanystrem je ještě vloženo

kovové těsnění pro zvýšení těsnosti celého souboru. Existují ovšem i varianty kovových OS, které kanystr nemají, a místo toho mají koš přímo spojený s tělesem OS.

- Těleso - Slouží k odstínění palivem generovaných fotonů a neutronů od okolního prostředí a zvýšení mechanické odolnosti celého souboru. Pro zvýšení zachytu neutronů se do pláště vyvrtaří díry, které se naplní tyčemi z polyetylenu. Plášť je dále obvykle žebrovaný pro zvýšení odvodu tepla z paliva. Plášť je uzavřen sekundárním víkem, které je přišroubováno řadou svorníků. Mezi sekundárním víkem a pláštěm je ještě vloženo kovové těsnění pro zvýšení těsnosti celého souboru.
- Měřicí a manipulační zařízení - Teplotní čidla, tlaková čidla, manipulační čepy

2.3.2 Požadavky

V případě dvouúčelových a nebo víceúčelových OS jsou na kontejnery kladeny následující požadavky.

- Teplotní - OS musí trvale vydržet zápornou teplotu až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zároveň musí být schopen odolat teplotě $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut. [19]
- Mechanické - Mechanicky musí vydržet pád z 9 metrů na absolutně pevnou rovnou plochu, a pád z 1 metru na trn o průměru 20 centimetrů. Kontejner si musí udržet vodotěsnost po ponoření do 15 metrové hloubky pod vodní hladinu po dobu 8 hodin. Také musí být schopný odolat tlaku vody v hloubce 200 metrů pod vodní hladinou. [19]
- Fyzikální - Dávkový příkon vyzářený OS může být maximálně **2 mSv/h** na povrchu a **0,1 mSv/h** ve vzdálenosti 2 metry od povrchu. [19]

2.3.3 Výhody

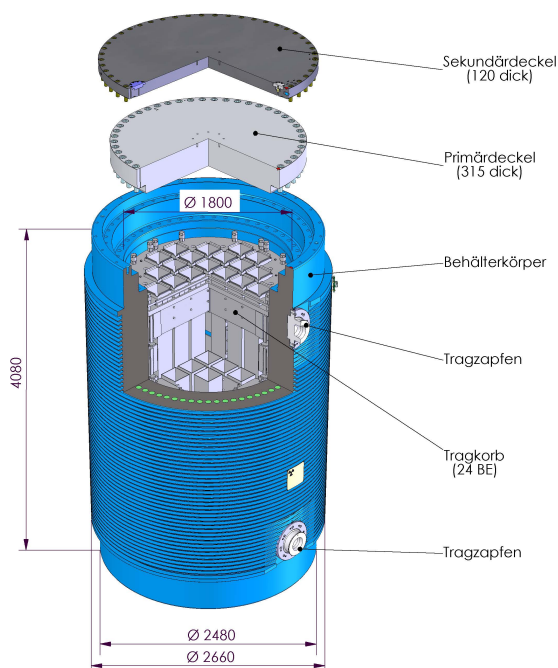
- Modulárnost
- Obalový soubor je uzavřený a zapečetěný aby nemohlo dojít k úniku radiace. Systém tedy velice dobře stíní okolí od VJP
- Slouží zároveň ke stínění a uložení paliva
- Pasivní chlazení. Provozní náklady jsou tedy minimální
- Lze použít jako dvouúčelový, či víceúčelový obalový soubor
- Přírůstkové úložiště - Množství obalových souborů přímo odpovídá potřebnému množství skladovaného paliva. Není tedy třeba předem platit velkou investici.

2.3.4 Nevýhody

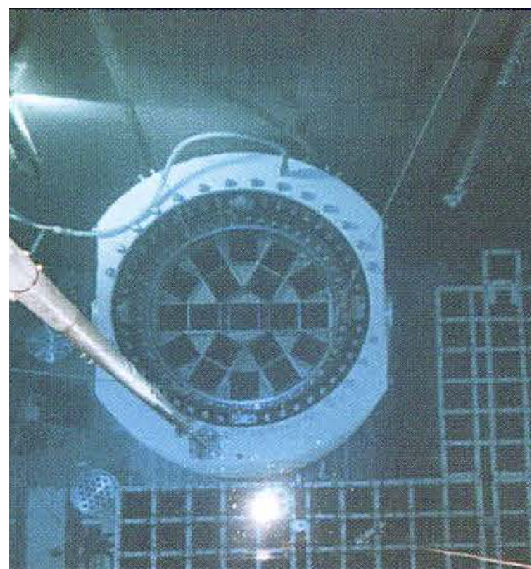
- Vysoká pořizovací cena - Nejdražší ze všech druhů obalových souborů

2.3.5 Příklad 1 - CASTOR[®] 440/84 mvK

CASTOR (z angličtiny **C**ask for **s**torage and transport of radioactive material) je kovový kontejner na vyhořelé palivo z reaktorů typu VVER/PWR. Byl vyvinutý společností GNS (*Gesellschaft für Nuklear-Service*). Jedná se o dvouúčelový OS, a lze ho tedy využít jak pro skladování, tak pro převoz. Koš je nadimenzován tak, aby mohl obsáhnout 24 palivových souborů Německé jaderné elektrárny *Obrigheim*. Plášť obalového souboru je žebrovaný pro zlepšení odvodu tepla. Celý soubor je utěsněný dvěma víky. Obě tyto víka jsou k plášti a kanystru přišroubována svorníky. Bez přídatných komponentů má soubor na výšku 4 metry a průměr 2,5 metru. Váha souboru bez paliva je 96 tun, s palivem 107 tun. [20]



(a) Rozměry CASTOR[®] 440/84 mvK [20]



(b) Nakládání palivových souborů do OS typu CASTOR[®] [21]

Obrázek 9: CASTOR[®] 440/84 mvK

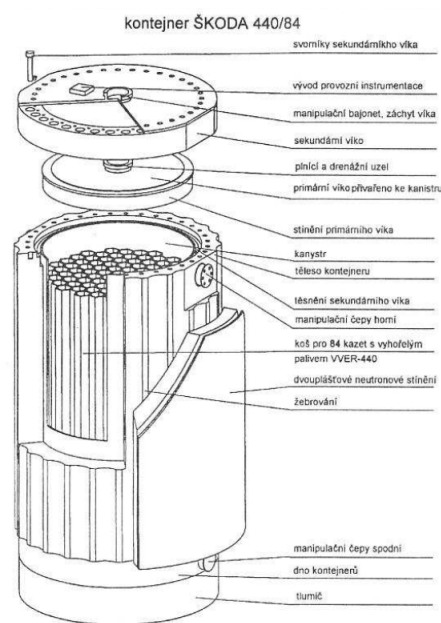
Pro účely českých elektráren vyrobila Škoda JS pod licencí GNS upravené CASTOR[®] 440/84 mvK. Tato verze má upravený koš tak, aby mohl pojmout palivové soubory z Dukovanských reaktorů VVER-440. [22]

Tabulka 5: Komponenty a materiály CASTOR[®] 440/84 mvK [21]

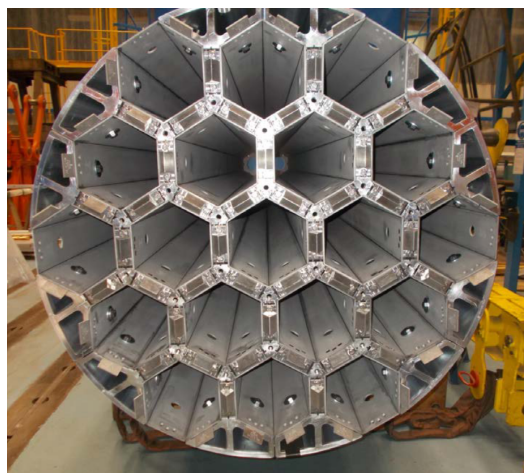
Komponent	Materiál	Použití
Materiál tělesa	Tvárná litina (GJS-400-15C)	Ochrana VJP, stínění fotonů
Primární a sekundární víko	Nerezová ocel	Uzavření VJP od okolí
Těsnění primárního víka	Stříbro	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Těsnění sekundárního víka	Hliník	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Zbylá těsnění	Elastomer	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Koš	Nerezová ocel s příměsí boru	Držení VJP ve stálé poloze, Snížení reaktivity VJP
Moderátor neutronů	Polyethylenové tyče	Stínění neutronů
Tlumič	Dřevo, ocel	Ochrana v případě nehody při transportu

2.3.6 Příklad 2 - Škoda 440/84

Jedná se o kovový kontejner vyvinutý společností Škoda JS. Jeho hlavním účelem je skladování paliva typu VVER440. Je navržený tak, aby mohl skladovat až 84 těchto palivových souborů. Hlavní výhodou tohoto OS je, že byl zcela navržen a vyvinut Škoda JS, a odpadá tedy nutnost licencování od jiné společnosti. První kus byl dodán teprve v roce 2021 do EDU. Celkem se předpokládá, že bude mezi lety 2021 až 2048 dodáno 91 kusů Škoda 400/84 do EDU. Kontejner Škoda 440/84 je založen na kontejneru Škoda 1000/19, který se používá pro skladování VJP z ETE. Liší se pouze rozměry a množstvím uložitelných palivových souborů. Materiálově jsou totožné. [19] [22]



(a) Škoda 440/84 [23]



(b) Detail koše Škoda 1000/19 [19]

Obrázek 10: Kovové kontejnery Škoda 440/84 a 1000/19

Bez přídavných komponentů má soubor na výšku 4,24 metry a průměr 2,48 metru (bez oblasti žebrování). Váha obalového souboru bez paliva je 116 tun a s palivovými soubory 135 tun.

Tabulka 6: Komponenty a materiály Škoda 440/84 [19]

Komponent	Materiál	Použití
Materiál pláště	Uhlíková ocel	Ochrana VJP, stínění fotonů
Primární a sekundární víko	Nerezová ocel	Uzavření VJP od okolí
Těsnění primárního víka	Stříbro	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Těsnění sekundárního víka	Hliník	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Zbylá těsnění	Elastomer	Zamezení interakce VJP s okolním prostředím
Koš	Slitina hliníku a hořčíku	Držení VJP ve stálé poloze
Absorpční plechy	ATABOR	Snížení reaktivity VJP
Moderátor neutronů	Polyethylenové tyče (2x60 kusů)	Stínění neutronů
Tlumič	Dřevo, hliník	Ochrana v případě nehody při transportu
Plnicí médium	Suchý vzduch	Odvod tepla od VJP

2.4 Obalové soubory - betonové

2.4.1 Popis

Betonové kontejnery jsou variantou OS, která jako primární materiál pláště používá klasický a nebo vysoko hustotní železobeton. Samotný soubor může obsahovat kovový kanystr, který dále slouží k zadržení radiace. Některé z těchto kanystrů jsou licencované pro transport ve speciálních transportních souborech. Chlazení je opět pasivní. Protože jsou tyto kontejnery vhodné pouze na skladování VJP o nižší teplotě, tak mohou některé mít v betonu ještě obsaženy pomocné ventilační trubky pro zlepšení odvodu tepla. Ve většině případů je prostor mezi kanystrem a pláštěm vyplněn inertním plynem (dusík, hélium), aby se zabránilo korozi. V případě, že je soubor pouze stacionární, tak se hovoří o takzvaných **silech**. [8]

V závislosti na účelu se dělí na dvě podkategorie

- **Kontejnerové** - Systém je dvouúčelový a nebo víceúčelový. Je tedy vhodný, jak pro skladování tak pro transport. Každý soubor je jeden modul meziskladu, a jedná se tedy o přírůstkové úložiště. Množství obalových souborů přímo odpovídá potřebnému množství skladovaného paliva. Investiční náklady jsou tedy nižší.
- **Sila** - Systém je jednoúčelový a vhodný tedy pouze pro skladování. Jsou to v podstatě monolitické stavby z železobetonu.

2.4.2 Výhody

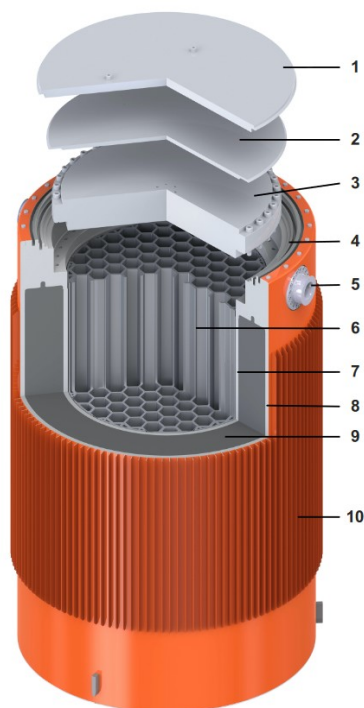
- Nízká pořizovací cena
- Vhodné pro dlouhodobé skladování paliva s nízkým vyhořením
- Obalový soubor je uzavřený a zapečetěný, aby nemohlo dojít k úniku radiace. Systém tedy velice dobře stíní okolí od VJP
- Slouží zároveň ke stínění a uložení paliva
- Pasivní chlazení. Provozní náklady jsou tedy minimální

2.4.3 Nevýhody

- Většinou pouze jed noučelové. Jen v ojedinělých případech jsou navrženy i na transport
- Nevhodné pro skladování VJP s vysokým vyhořením a nebo MOX paliva [6]

2.4.4 Příklad 1 - CONSTOR®

CONSTOR je dvouúčelový betonový kontejnerový obalový soubor vyvinutý opět společností GNS, která vyvinula systém CASTOR® (viz. kapitola 2.3.5).



(a) Řez systému CONSTOR® [24]



(b) CONSTOR® ve skladovací konfiguraci

Obrázek 11: Betonové OS typu CONSTOR®

Systém se skládá z následujících částí (obrázek 11a) [24]

1. Druhé sekundární víko. Víko je permanentně přivařeno ke konstrukci OS
2. První sekundární víko. Víko je permanentně přivařeno ke konstrukci OS
3. Primární víko, které je ke konstrukci OS přišroubováno
4. Manipulační čepy
5. Koš na VJP
6. Vnitřní kanystr z jemnozrnné oceli
7. Vnější kanystr z jemnozrnné oceli
8. Betonová výplň mezi kanystry. Jedná se druh betonu nazvaný CONSTORIT. Jedná se o těžký beton se speciálními stínícími vlastnostmi vyvinutý společností GNS.
9. Žebrování pro zlepšení odvodu tepla

Díky tomu, že má tento systém víka permanentně svařená, tak není třeba kontrolovat těsnost systému. Za celou dobu provozu se předpokládá, že je systém zcela vzduchotěsný. V kombinaci s pasivním chlazením má tento systém velice nízké provozní náklady.

Společnost GNS nabízí licence pro výrobu těchto OS. Každá společnost, která licenci pořídí může tedy tento OS postavit až na místě. Není třeba tedy řešit logistiku přepravy. Systém je zároveň velice jednoduchý na výrobu a je možné ho vyrobit v každé průmyslově vyvinuté zemi.

2.4.5 Příklad 2 - HI-STORM 100

Systém HI-STORM byl vyvinutý společností Holtec International. Jedná se o silo, které využívá přemístitelného kanystru. Celý systém je závislý na dvou dalších systémech vyvinutých stejnou společností, a to MPC a HI-TRAC.

MPC (Multi-Purpose Canister) je víceúčelový kanystr, který je základním prvkem každého HI-STORM. Skládá se z válcového pláště, víka a těsnění. Kanystr obsahuje koš na VJP z nerezové oceli. Koš má přihrádky ve tvaru čtverců, díky čemuž je velice odolný proti mechanickému poškození. Zároveň je zřejmé, že důvodem použití tohoto tvaru je i tvar palivových tyčí, který se v USA používá čtvercový. Existují různé varianty MPC, ovšem všechny mají fixní výšku a průměr. Po naplnění palivem se předpokládá, že palivo už nikdy nebude třeba z MPC odstranit. MPC se dá použít v kombinaci s dalšími systémy k transportu, skladování a uložení. Klasický MPC pojme až 24 palivových souborů PWR a 68 souborů typu BWR. [25]

HI-TRAC (Transfer Cask) je systém určený pro transport VJP. Využívá kanystru MPC, který lze dle libosti do HI-TRAC vložit a vyložit. V podstatě se tedy jedná o dutý dvouúčelový kontejnerový obalový soubor, který lze opakovaně využívat pro transport. [25]

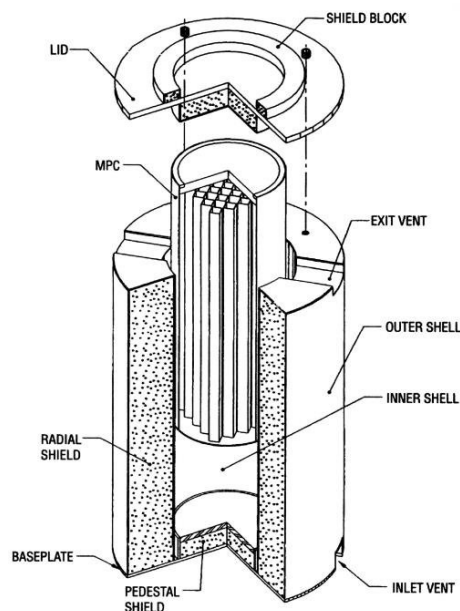
V poslední řadě, **HI-STORM** je betonové silo. Systém je navržený tak, aby ho bylo možné využít ve venkovním prostředí. Tím se značně snižuje riziko představené přírodními katastrofami, jako je zemětřesení, a nebo tornádo. Existuje také varianta pro podzemní uložení (HI-STORM 100U). Tato konfigurace má tu výhodu, že je značně odolnější proti vlivům okolního prostředí, jako jsou silné větry a tornáda. Systém musí být ovšem navrhnuty tak, aby dlouhodobě odolal zatopení (třeba v případě povodně nebo silných dešťů). Zároveň je díky podzemnímu uložení celkové stínění mnohem vyšší a tedy bezpečnější pro okolní personál. [25]

Kombinací těchto 3 systému vznikne komplexní řetězec

- Po vyhoření a zchlazení jaderného paliva v BVP je palivo přesunuto do systému MPC a následovně do systému HI-TRAC
- Palivo je pomocí systému HI-TRAC přesunuto do AFR meziskladu paliva, který obsahuje betonové kontejnery HI-STORM
- MPC s VJP je pomocí manipulačního zařízení přesunuto z HI-TRAC do HI-STORM. HI-TRAC lze po vyprázdnění dále použít pro transport dalších MPC



(a) Mezisklad se silo HI-STORM 100 [25]



(b) Detail OS HI-STORM 100 [26]

Obrázek 12: Systém HI-STORM 100

Z tohoto řetězce je zřejmé, že zásadní výhoda tohoto rozdělení je možnost zkombinovat výhody jak kovových, tak betonových OS. Kovové kontejnery jsou drahé, ovšem dají se použít jako

dvouúčelové. Naopak betonové OS jsou velice levné pokud jsou vybudovány jako stacionární (sila). Tím, že se bude opakovaně používat kovový kontejner pro transport VJP do betonových sil lze tedy značně snížit investice, protože pro skladování velkého množství paliva lze použít pouze pár drahých HI-TRAC systémů.

3 Počítačová simulace za účelem určení dávkového příkonu

3.1 Software Serpent

3.1.1 Simulace Monte Carlo

Simulace typu Monte Carlo je používána pro odhadnutí výstupu z těžko predikovatelného procesu. Tato metoda je založena na velkém množství generovaných náhodných vstupů v daném rozsahu, které dále použije definovaný model. Vzniká tedy množina výsledků, které je třeba nadále analyzovat a zpracovat. Výsledná hodnota je tím přesnější, čím více iterací výpočtu proběhne. Celkový zpracovaný výsledek se bude více aproximovat k reálnému výsledku, a statistická chyba se tedy bude snižovat. [27]

K použití metody Monte Carlo je třeba stanovit následující

- Matematický model a nebo transportní rovnici
- Stanovit vstupní hodnoty a jejich pravděpodobnostní rozdělení. Rozdělení může být bráno například z histogramu, nebo z tabulek. Je zřejmé, že námi přiložené hodnoty nikdy nepokryjí celý rozsah na podmnožině reálných čísel, v které Monte Carlo bude operovat. Z toho důvodu je třeba ještě stanovit, jakým způsobem budou aproximovány náhodná data právě mezi jednotlivými definovanými body.
- Množství iterací simulace, které by mělo být dostatečné, na to aby byla statistická chyba výsledku co nejmenší.
- Způsob agregace výsledků do jednoho uceleného výsledku. Příkladem jednoduchého způsobu zpracování výsledku může být prosté zprůměrování všech výsledných hodnot do jednoho průměrného výsledku.

3.1.2 Serpent

3.1.2.1 Popis

Program Serpent je vyvinut technickým výzkumným centrem VTT ve Finsku. Vývoj začal již roce 2004, a pokračuje stále do dnes, kde ke dni 08.05.2023 je poslední verze 2.2.1.

Serpent využívá Monte Carlo simulací pro výpočty energicky spojených neutronových a fotonových transportních rovnicích.

Licence pro použití je zdarma dostupná pod podmínkou nekomerčního použití. Licence se vztahuje pouze na jednoho uživatele a na výzkumné práce. V případě komerčního využití je možné koupit relevantní licenci přímo od VTT.

Momentálně nabízí software Serpent řadu funkcí, které byli použity právě pro účely této práce

- Transportní rovnice pro záření - Software dokáže počítat se zářením a lze ho tedy použít pro kontrolu odstínění fotonů obalovým souborem.
- Simulace spojeného transportu neutronů a fotonů - Software počítá s fotony vzniklými neutronovými reakcemi
- Možnost omezeného spojení dvou homogenních materiálu do nehomogenní směsi - Lze definovat dva homogenní materiály, a poté přidat jeden materiál ve formě kuliček do druhého materiálu. Tato technika byla použita pro vygenerování materiálu použitým ve variantě 3 (kapitola 3.3.3) této práce. Další příkladem použití je generování palivových kuliček vysokoteplotních reaktorů VHTR.

3.1.2.2 Příklad použití

Před použitím softwaru Serpent je třeba nadefinovat následující části simulace

Materiály - Předtím než začneme definovat samotný model, tak je třeba definovat materiály které budou použity. materiály se definují pomocí karty **surf**. Je potřeba stanovit název materiálu, jeho hustotu a poté hustotní poměry prvků a jejich izotopů v materiálu. Obecně lze materiál definovat pomocí dvou možných hustot, a to atomové hustoty a nebo hmotnostní hustoty.

- Atomová hustota - Definována jako g/mol . Je definována bez speciálního znaku.
- Hmotnostní hustota - Definována jako g/cm^3 . Přepnutí z atomové hustoty na hmotnostní se docílí přidáním znaménka mínus před hodnotu hustoty.

Je možné aby byl materiál definován zároveň atomovou i hmotnostní hustotou. Dále není třeba aby hodnota odpovídala reálnému předpokladu. Serpent interně hodnoty přepočítává s ohledem na celkovou hustotu. Z tohoto důvodu je možné hustotu také definovat jako relativní hodnotu k celkové hustotě látky.

Jaderné vlastnosti materiálů jsou definovány v knihovných účinných průřezů, z kterých poté Serpent při simulaci čerpá relevantní data. Užitečným nástrojem je funkce **rgb**, která Serpentu udává, aby vykreslil materiály v geometrii s určitou barvou. Pokud tato funkce není specifikována, tak bude při každém vykreslování geometrie použita jiná náhodná barva. Předpokládejme

například materiál jaderného paliva UO₂ s 5% obohacením. Definice takového materiálu by byla tedy následující. Jsou definovány dva stejné fyzikálně totožné materiály, ale s rozdílnou barvou. Byly použity hmotnostní hustoty.

```

1      %definuj material UO2 paliva s 5% obohacenim a zobraz ho v plotu svetle ...
      zelene
2      mat mFuel1    -10.3795 rgb 0 255 0
3          8016.00c -0.1344
4          92235.00c -0.0438
5          92238.00c -0.9562
6
7      %definuj material UO2 paliva s 5% obohacenim a zobraz ho v plotu tmave zelene
8      mat mFuel2    -10.3795 rgb 0 127 64
9          8016.00c -0.1344
10         92235.00c -0.0438
11         92238.00c -0.9562

```

Geometrii (buňky, prostorové oblasti) - Základním stavebním kamenem geometrie v Serpentu jsou buňky (anglicky *cell*). Každá buňka reprezentuje prostor, který je výsledek množinových operací na námi definovaných plochách (anglicky *surface*). Každá buňka má zároveň přiřazený materiál. Výsledné buňky se poté vkládají do prostorových oblastí (anglicky *universe*). Prostorová oblast je tedy v podstatě množina námi definovaných buněk. Z projektového hlediska je výhodné tvořit větší množství prostorových oblastí, které budou obsahovat ucelené části celého zařízení. Například projekt používaný v této práci obsahuje následující prostorové oblasti

- *uFuelLat* - Prostorová oblast tvořena palivovými proutky v hexagonální mřížce. Výsledek je tedy uspořádání paliva jako v palivovém souboru VVER 440.
- *uFuel* - Prostorová oblast, která tvoří jeden celý palivový soubor VVER 440. Je složen z předešlé prostorové oblasti *uFuelLat* a buněk které tvoří kryt souboru.
- *uBasket* - Prostorová oblast koše obalového souboru. Je složen z prostorové oblasti *uFuel*, který je poskládány do mřížky hexagonálního tvaru. Proto aby bylo možné vytvořit samotnou konstrukci koše, tak bylo třeba vytvořit pomocnou prostorovou oblast *uBF*, která obsahuje právě *uFuel* a zároveň buňky v uspořádány tak aby tvořily část konstrukce koše (tedy hliníkovou konstrukci a část ATABOR plechů).
- *Cask* - Prostorová oblast, který tvoří ucelený obalový soubor. Do této oblasti je přímo vložena prostorová oblast *uBasket*. Dále jsou zde vloženy buňky pro vytvoření tělesa obalového souboru, a případně přidání PE moderátoru (pouze v případě 1. varianty). Tato oblast je jediná, která mění napříč variantami. Ostatní oblasti jsou pro všechny varianty totožné.
- *0* - Základní prostorová oblast, s kterou pracuje Serpent. Všechny oblasti které chceme aby byly součástí finálního výpočtu musíme přidat do této oblasti. Obsahuje oblast *Cask* a buňky tvořící okolní prostředí ze suchého vzduchu.

Pokud například chceme definovat čtvercovou 2D buňku, tak toho docílíme tím že vytvoříme čtvercovou plochu a buňku definujeme jako plochu vně čtverce. Takovýto příklad by byl tedy implementován následovně.

```

1      % Delici roviny ktere budou pouzity pro vytvoreni rohu
2      surf sdp1 plane 1.0 1.0 0.0 8.0
3      surf sdp2 plane -1.0 1.0 0.0 8.0
4      surf sdp3 plane 1.0 -1.0 0.0 8.0
5      surf sdp4 plane -1.0 -1.0 0.0 8.0
6
7      % Ctverec o delce strany 10 cm se stredem v 0,0
8      surf sr rect -5.0 5.0 -5.0 5.0
9
10     % Vytvoreni bunek v zakladni prostorove oblasti
11     cell cCornerI 0 mFuel1 -sr -(sdp1:sdp2:sdp3:sdp4) -scube
12     cell cCornerO 0 mFuel2 -sr (sdp1:sdp2:sdp3:sdp4) -scube
13     cell cOut 0 outside scube

```

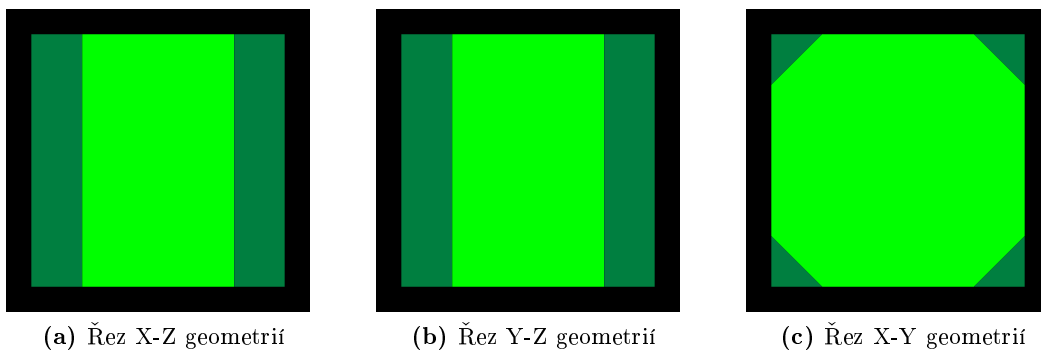
Aby bylo možné zkontrolovat zda model odpovídá našim předpokladům, tak je vhodné vykreslit geometrii pomocí karty **plot**. Je možné vykreslit pouze 2D geometrii a z tohoto důvodu je třeba vykreslit 3 řezy pro 3D geometrii.

```

1      % Vykresleni geometrie v rezu X-Z.
2      % Rez je posunut o 5 cm, a bude tedy vykreslen povrch nove geometrie
3      plot 1 1500 1500 5.0 -6.0 6.0 -6.0 6.0
4
5      % Vykresleni geometrie v rezu Y-Z.
6      % Rez je posunut o 5 cm, a bude tedy vykreslen povrch nove geometrie
7      plot 2 1500 1500 5.0 -6.0 6.0 -6.0 6.0
8
9      % Vykrasleni geometrie v rezu X-Y
10     plot 3 1500 1500 0.0 -6.0 6.0 -6.0 6.0

```

Výsledná geometrie tedy bude vypadat následovně



Obrázek 13: Řezy geometrií z příkladu použití Serpentu

Zdroj - Je možné ho definovat explicitně pomocí tabulky hodnot, a nebo implicitně pomocí různých funkcí. V případě explicitní definice je zdroj definován kartou *src*. Zdroj je třeba svázat s geometrií a nebo materiálem. Dále je třeba definovat hodnoty, dle kterých bude zdroj generovat částice.

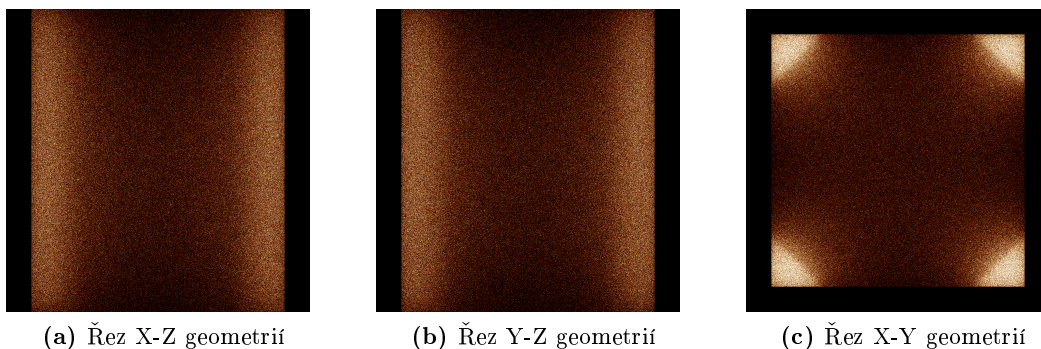
Příklad definice zdroje neutronů pomocí tabulky je uveden níže. Zdroj je tedy definován čtyřmi hodnotami které udávají poměr generovaných částic o daných energiích. Interpolace hodnot je realizována jako histogram.

```

1      % nastav okrajovou podminku
2      % v osach x, y a z je okrajova podminka void (nulova okrajova podminka)
3      set bc          1 1 1
4
5      % nastav pocet neutronovych generaci
6      set nps          1000000
7
8      % nastav kadenci zdroje za ucelem normalizace
9      set srcrate 1.7451e+09
10
11     % definuj zdroj neutronu pomoci histogramu
12     % zdrojem bude material mFuel2
13     src sN n sm mFuel2 sb 4 1
14     1.000E-11          0
15     3.670E-07 2.360859523809525e-04
16     7.810E-01 3.331131578947366e-01
17     2.000E+01 1.4659325000000005e-07
18
19     % vykresli graf zobrazujici intenzitu toku tepelnych neutronu
20     mesh 1 1500 1500 0 -6.0 6.0 -6.0 6.0
21     mesh 2 1500 1500 0 -6.0 6.0 -6.0 6.0
22     mesh 3 1500 1500 0 -6.0 6.0 -6.0 6.0

```

Výsledkem této simulace by tedy bylo že absolutní hodnota koeficientu násobení je 1.25073E-02.



Obrázek 14: Intenzita tepelných neutronů vygenerována pomocí karty *mesh*

3.2 Základní geometrie

Základní geometrie je založena na obalovém souboru Škoda 440/84. Jediným rozdílem v porovnání s reálným provedením je zjednodušená geometrie. Byly zanedbány manipulační čepy, tlumiče a přídatný plášť. Také byly vynechány měřicí zařízení a otvory pro ně. Celý soubor byl pouze simulován v omezené výšce, a proto také byly vynechány víka a těsnění. Pro simulaci byl nadefinován pouze 20 cm vysoký řez z celého souboru. Serpent následovně tento řez duplikovat do celé délky. Důvodem použití pouze 20 cm vysokého řezu místo celé výšky obalového souboru je zjednodušení při generaci nehomogenního betonu. Vzhledem k malé velikosti polyetylenových kuliček by bylo potřeba pro vygenerování nehomogenního materiálu do celé geometrie obalového souboru potřeba ohromné množství kuliček. Generace materiálu by tedy trvala nesmírně dlouho.

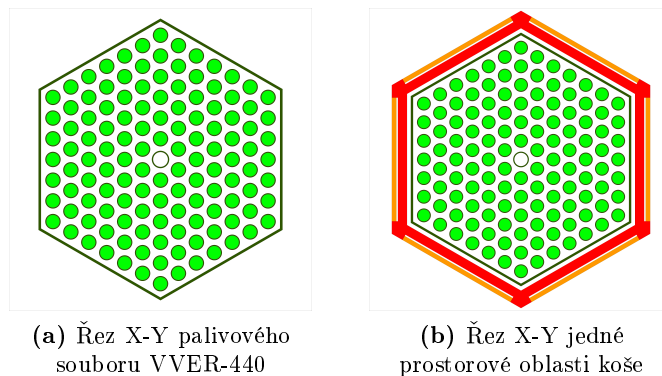
Vzhledem k tomu že se nadále v této práci bude objevovat množství vygenerovaných geometrií softwarem Serpent je nadále uvedena tabulka 7 s vysvětlivkami k jednotlivým materiálům.

Tabulka 7: Obecné vysvětlivky k materiálům v řezech geometrií

Barva	Materiál
Modrá	kokové těleso z materiálu
Tmavě Šedá	Homogenní beton
Světle Šedá / Běžová	Nehomogenní beton bez PE kuliček
Fialová	Polyethylen
Červená	Slitina hliníku a hořčíku
Oranžová	ATABOR
Světle zelená	Palivo ve formě UO ₂
Tmavě zelená	Palivový kryt
Žlutá	Oblasti detektorů

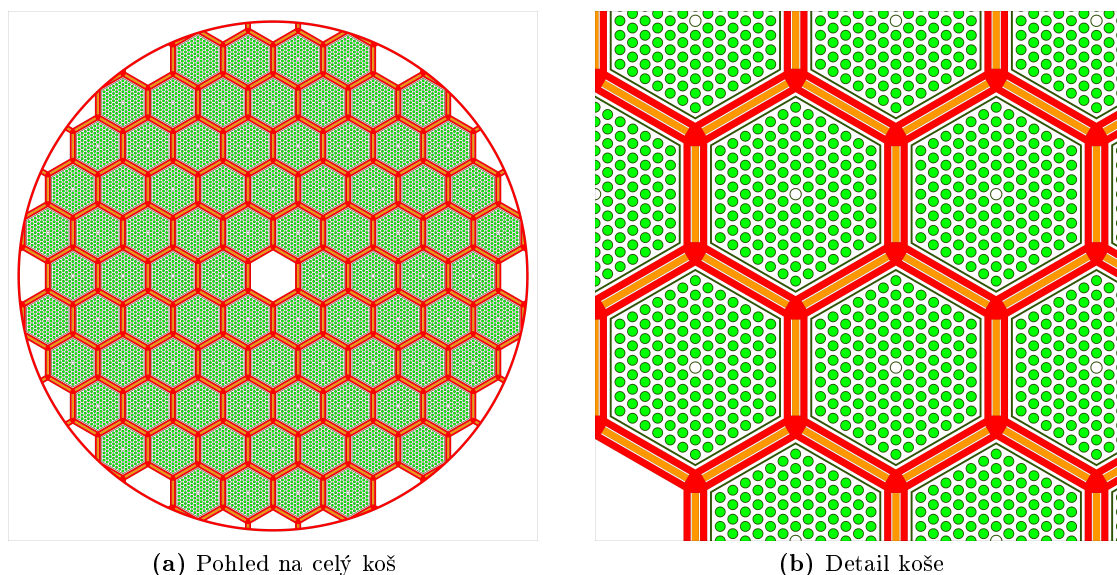
První byl definován palivový soubor VVER 440, a dále jedna prostorová oblast koše která je složená právě z palivového souboru, a části koše s polovinou ATABORového plechu.

Je třeba podotknout, že se jedná o palivo s nulovým vyhořením. Při simulaci je použit zdroj částic, který nahrazuje radioaktivitu paliva. Z tohoto důvodu je klíčové pouze jakým způsobem palivo ovlivňuje celkové stínění OS. Vyhoření paliva má ovšem pouze malý vliv na stínící vlastnosti paliva, a pro zjednodušení je použito právě pouze nevyhořelé palivo, které je složeno pouze z oxidu ^{238}U a ^{235}U .



Obrázek 15: Definovaný palivový soubor VVER-440 a jedné prostorové oblasti koše obalového souboru

Dále byl poskládán z prostorových oblastí koše celý koš a byla přidána stěna OS.



Obrázek 16: Řez X-Y koše obalového souboru i s palivovými soubory

3.3 Varianty simulací

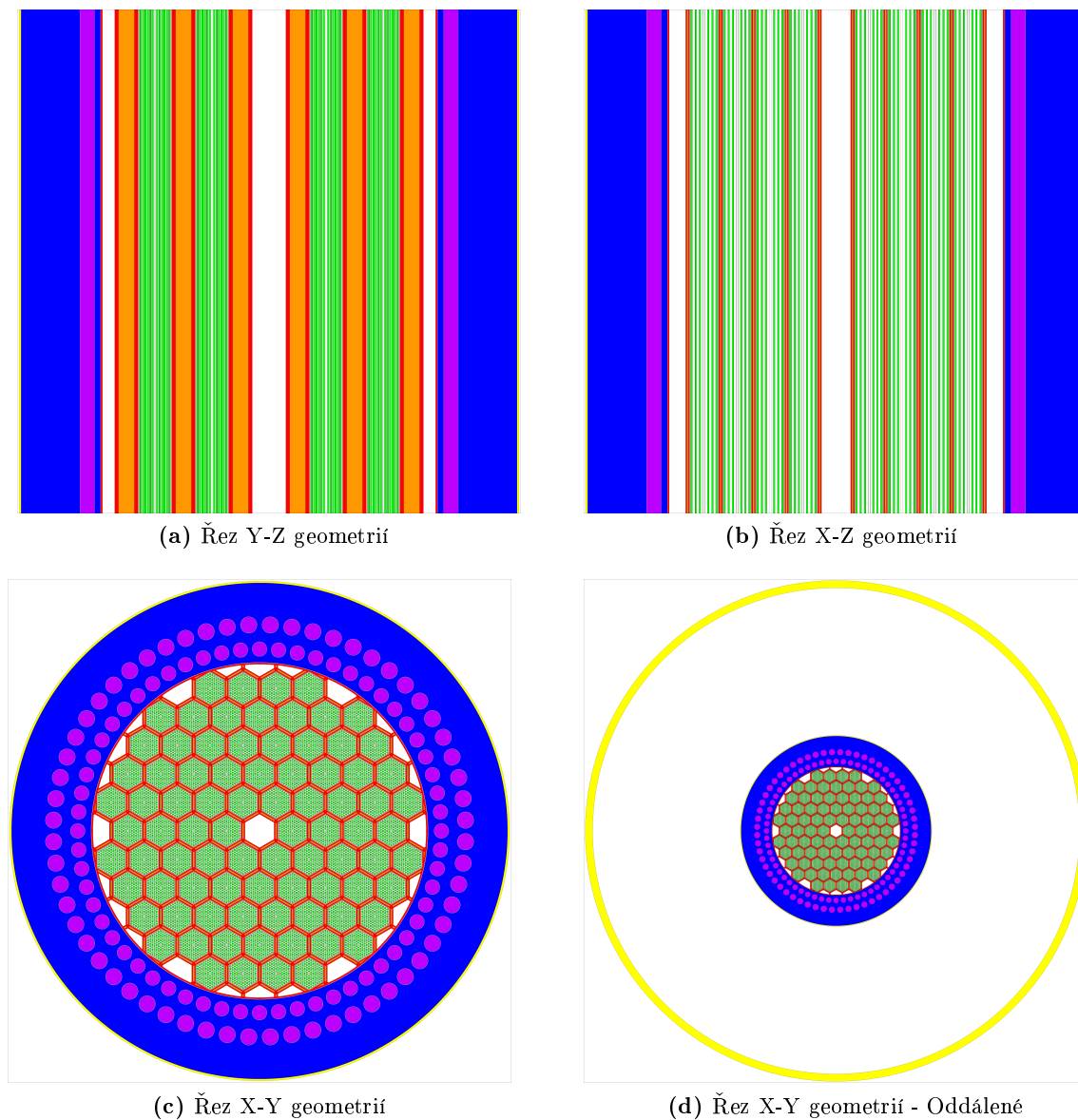
Byly stanoveny tři varianty, které se liší pouze materiálem a rozměry tělesa obalového souboru.

3.3.1 Varianta 1 - Obalový soubor Škoda 440/84

Těleso souboru je z plného materiálu. Materiál je totožný s materiálem použitým v reálném provedení. Tato varianta slouží pro kalibraci simulace, jelikož je nejbližší reálnému provedení. Je zároveň použita jako reference při porovnávání dalších dvou variant.

Kalibrace byla prováděna úpravami jednotlivých parametrů simulace, úpravami materiálů a i

úpravami samotných zdrojových kódů softwaru Serpent z důvodu chyb způsobených vývojáři. Celkově bylo cíleno na to, aby byly nasimulované hodnoty co nejbližší výstupu ze softwaru MCNP. Právě v tomto softwaru byl prvotně ověřován dávkový příkon obalového souboru Škoda 440/84.



Obrázek 17: Řezy geometrií varianty 1. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7

3.3.2 Varianta 2 - Upravený obalový soubor ŠKODA 440 s homogenním betonem

Těleso souboru je duté a naplněno betonovou směsí s příměsí polyetylenu a karbidu bóru. Tloušťka stěn tělesa je 5 cm. Celková tloušťka kovové části tělesa je tedy 10 cm. Kovová část tělesa je tvořena materiálem **mCask** který je definován pro variantu 1.

Tabulka 8: Materiál betonu s příměsí polyetylenu a karbidu bóru [28]

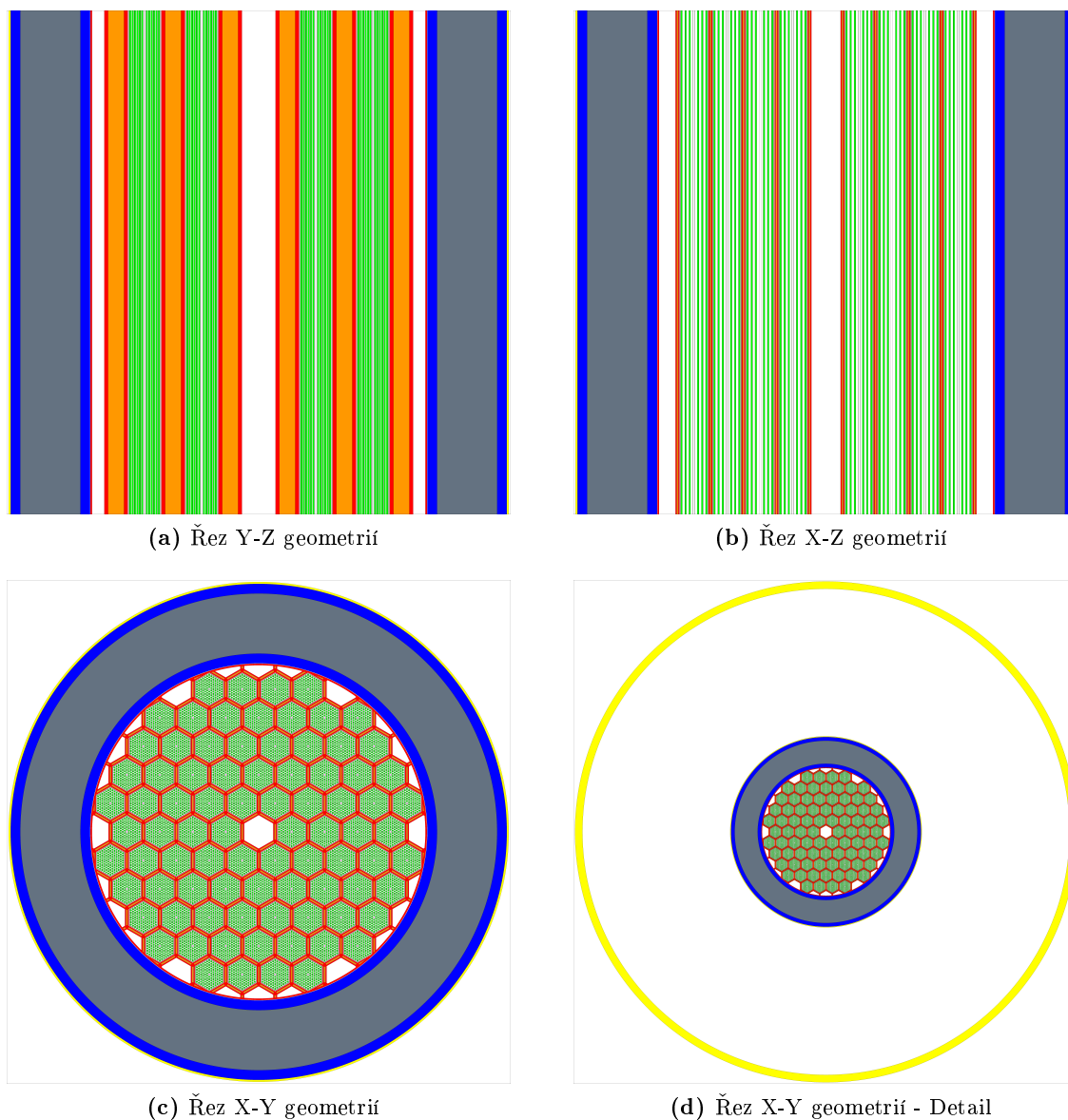
Prvek	Váhový poměr (-)
O	46.06 %
Ca	8.05 %
Si	28.4 %
Al	2.34 %
Fe	0.837 %
Mg	0.195 %
Na	0.613 %
K	1.25 %
S	0.276 %
Cl	0.00353 %
H	2.362 %
Ti	0.0517 %
P	0.0259 %
C	8.93 %
B	0.596 %

Celková hustota betonu s příměsí polyetylenu a karbidu bóru je dle článku [28] stanovena na **1.97 g/cm³**.

Pro potřeby softwaru Serpent musel být vstup upraven do následujícího formátu

```

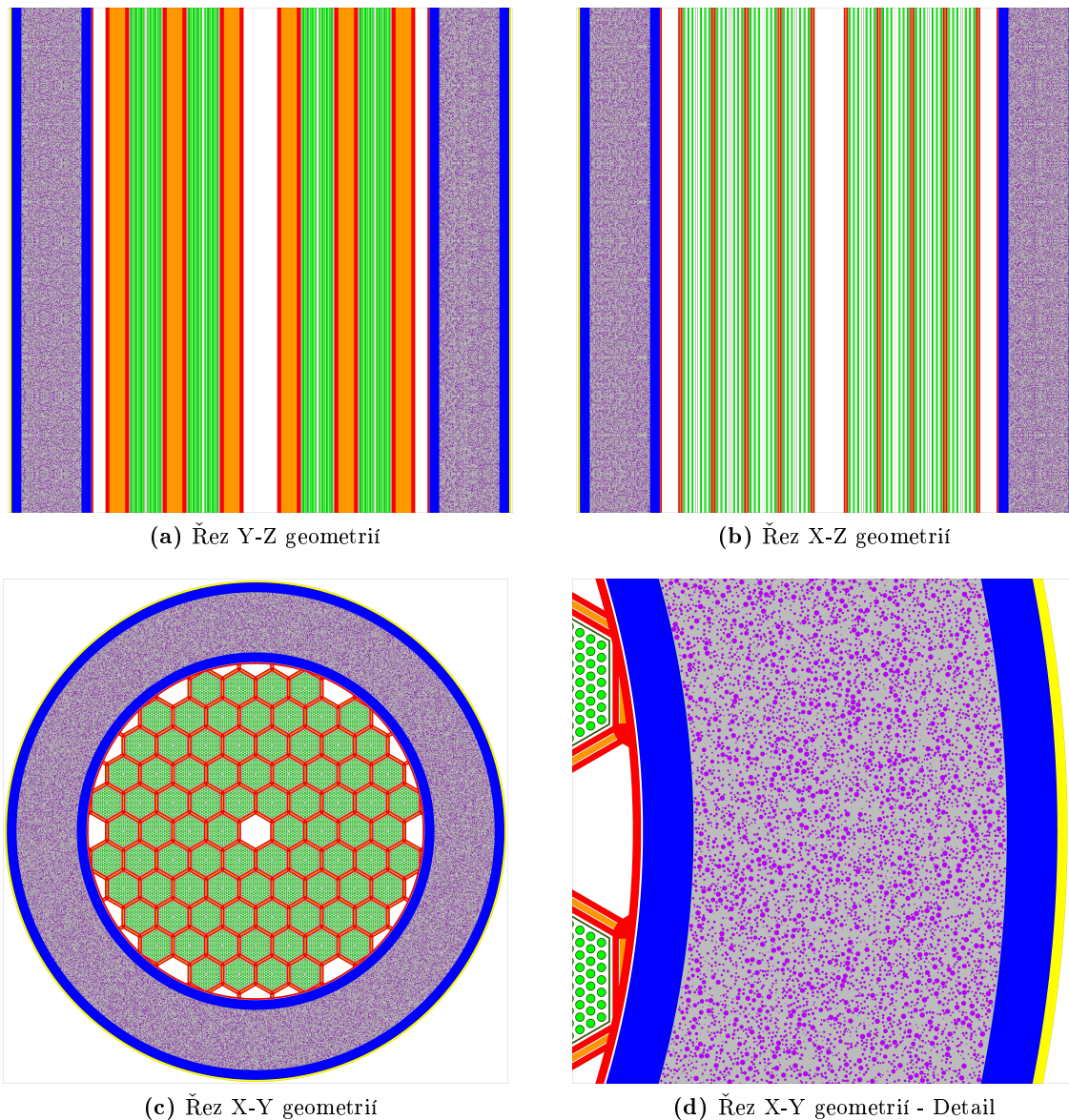
1      mat mCaskConcrete -1.97
2      8016.00c -4.606e-001
3      20040.00c -8.050e-002
4      14028.00c -2.840e-001
5      13027.00c -2.340e-002
6      26056.00c -8.370e-003
7      12024.00c -1.950e-003
8      11023.00c -6.130e-003
9      19039.00c -1.250e-002
10     16032.00c -2.760e-003
11     17035.00c -3.535e-005
12     1001.00c -2.362e-002
13     22048.00c -5.170e-004
14     15031.00c -2.590e-004
15     6012.00c -8.930e-002
16     5011.00c -5.960e-003
    
```



Obrázek 18: Řezy geometrií varianty 2. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7

3.3.3 Varianta 3 - Upravený obalový soubor ŠKODA 440 s nehomogenním betonem

Rozměry a materiál je obdobný jako ve variantě 2. Hlavní rozdíl je ovšem materiál betonu, který je v tomto případě nehomogenní. Beton je rozdělen na dva materiály, kde první materiál je betonová směs bez PE kuliček. Druhý materiál je poté samotný polyetylen. Pomocí softwaru Serpent byly tyto dva materiály spojeny dohromady tak, aby polyetylen vytvořil v betonové směsi kuličky o průměru 2.5 mm a 5.0 mm. Kuličky o těchto dvou velikostech jsou v poměru 50-50. Celkový váhový poměr stále odpovídá variantě 2, a PE tedy stále tvoří 10 wt% z celkové hmotnosti betonové směsi. Kovová část tělesa je tvořena stejným materiálem jako ve variantě 1.



Obrázek 19: Řezy geometrií varianty 3. Vysvětlivky k barvám v tabulce 7

Pro určení materiálu bylo třeba nejdříve materiál přepočítat beton bez PE kuliček. Nejdříve byla definována řada hmotnostních poměrů M , která odpovídá hodnotám definovaných v kapitole 3.3.2.

Dále bylo třeba určit hmotnost PE, která bude odstraněna. Dle článku [28] tvoří PE 10% z celkové hmotnosti betonu. Pro jednoduchost předpokládejme, že objem je 1 cm^3 a všechny hustoty mají tedy stejnou hodnotu jako hmotnosti.

$$\rho_T = 1.97 \text{ g/cm}^3 \quad (4)$$

$$m_T = 1.97 \cdot 1 = 1.97 \text{ g} \quad (5)$$

Kde: ρ_T - Celková hmotnostní hustota (g/cm^3)
 m_T - Hmotnost jednoho cm^3 (g)

Jako první se vypočítala hmotnost PE, které bylo odstraněno

$$m_{PE} = 1.97 \cdot 0.1 = 0.197 \text{ g} \quad (6)$$

Kde: m_{PE} - Hmotnost odebraného PE (g)

Dále určíme relativní hmotnost prvků v molekule PE. Toho dosáhneme pomocí celkové atomové hmotnosti. Z této hodnoty se dále vypočte hmotnostní poměr

$$M_{PE} = 2 \cdot 12.011 + 4 \cdot 01.007 = 28.05 \text{ g/mol} \quad (7)$$

$$a_H = \frac{M_{PE}}{4 \cdot 01.007} = \frac{28.05}{4 \cdot 01.007} = 0.143601 \quad (8)$$

$$a_C = \frac{M_{PE}}{2 \cdot 12.011} = \frac{28.05}{2 \cdot 12.011} = 0.856399 \quad (9)$$

Kde: M_{PE} - Celková atomová hustota PE (g/mol)
 a_H - Hmotnostní poměr vodíku v PE (-)
 a_C - Hmotnostní poměr uhlíku v PE (-)

Odstraněná hmotnost vodíku a uhlíku z cm^3 tedy bude

$$m'_H = a_H \cdot m_{PE} = 0.143601 \cdot 0.197 = 0.028289 \text{ g} \quad (10)$$

$$m'_C = a_C \cdot m_{PE} = 0.856399 \cdot 0.197 = 0.168711 \text{ g} \quad (11)$$

Kde: m'_H - Hmotnost odstraněného vodíku (g)
 m'_C - Hmotnost odstraněného uhlíku (g)

Hmotnost vodíku a uhlíku po odstranění PE tedy bude

$$m''_H = m_H - m'_H = 1.97 \cdot 0.02362 - 0.028289 = 0.01824 \text{ g} \quad (12)$$

$$m''_C = m_C - m'_C = 1.97 \cdot 0.08930 - 0.168711 = 0.00721 \text{ g} \quad (13)$$

Kde: m_H'' - Hmotnost vodíku po odstranění PE (g)
 m_C'' - Hmotnost uhlíku po odstranění PE (g)

Nový hmotnostní poměr všech prvků se dále vypočte jako

$$M_n = \frac{m_n}{\sum_{x=1}^{15} M_x} \quad (14)$$

$$M_{11} = M_H = \frac{m_H''}{\sum_{x=1}^{15} m_x} = \frac{0.01824}{1.77281} = 0.010276 \text{ g/cm}^3 \quad (15)$$

$$M_{14} = M_C = \frac{m_C''}{\sum_{x=1}^{15} m_x} = \frac{0.00721}{1.77281} = 0.00408 \text{ g/cm}^3 \quad (16)$$

Kde: M - Řada hmotnostních poměru materiálu betonu (-)
 n - index n-tého prvku řady (-)
 M_H - Hmotnostní poměr vodíku v materiálu betonu (-)
 M_C - Hmotnostní poměr uhlíku v materiálu betonu (-)

V poslední řadě je třeba přepočítat celkovou hustotu materiálu. Dle článku [28] tvoří PE 20 % z celkového objemu.

$$\rho = \frac{\sum_{x=1}^{15} M_x}{0.8} = \frac{1.77281}{0.8} = 2.21601 \text{ g/cm}^3 \quad (17)$$

Kde: ρ - Finální hustota betonu po odstranění PE (g/cm^3)

Po přepočítání byl tedy definován materiál betonu bez PE následovně

```

1      mat mCaskConcreteNoPE -2.21601
2      8016.00c -5.1183e-01
3      20040.00c -8.9454e-02
4      14028.00c -3.1559e-01
5      13027.00c -2.6003e-02
6      26056.00c -9.3010e-03
7      12024.00c -2.1669e-03
8      11023.00c -6.8119e-03
9      19039.00c -1.3890e-02
10     16032.00c -3.0670e-03
11     17035.00c -3.9282e-05
12     1001.00c -1.0276e-02
13     22048.00c -5.7451e-04
14     15031.00c -2.8781e-04
15     6012.00c -4.0808e-03
16     5011.00c -6.6229e-03
17

```


18	mat	mPE	-0.955
19		1001.00c	8.200460e-002
20		6012.00c	4.056358e-002

3.4 Zdroj

Aby bylo možné správně určit dávkový příkon, tak musel být definován samostatný zdroj neutronů a zdroj fotonů. Pro každý zdroj musela být provedena samostatná simulace, a to z důvodu nemožnosti softwaru Serpent pracovat zároveň se zdrojem fotonů a se zdrojem neutronů. Software by nedokázal rozlišit primární a sekundární fotony. Bylo tedy pro každou variantu nutné provést dvě simulace, a celkově bylo tedy třeba provést **6** simulací.

3.4.1 Zdroj neutronů

Zdroj neutronů je definován histogramem, který udává distribuci generovaných neutronů v jednotlivých energetických hladinách. Normalizace zdroje byla nastavena pomocí vydatnosti zdroje, která byla převzata ze simulace MCNP pro soubor Škoda 440/84. Ta činila $2.18134E+10$ neutronů za sekundu přes celou geometrii souboru. Jelikož je v našem případě nasimulována pouze část celé geometrie, tak musela být tato hodnota upravena. Výška obalového souboru Škoda 440/84 je přibližně 2.5 metru. Naše simulace počítá pouze s 20 cm vysoký řezem. Výsledná hodnota byla tedy vypočtena následovně.

$$\frac{0.2 \cdot 2.18134 \cdot 10^{10}}{2.5} = 1.7451 \cdot 10^9 \quad \text{n/s/model} \quad (18)$$

V poslední řadě byl zdroj nastaven tak, aby pracoval v režimu spojené transportní simulace pro neutrony a fotony. Zdroj tedy bude počítat i se sekundárními fotony, které vzniknou dalšími reakcemi neutronů s obalovým souborem.

3.4.2 Zdroj fotonů

Zdroj fotonů je také definován histogramem, který udává distribuci generovaných fotonů v jednotlivých energetických hladinách. Obdobně jako u zdroje neutronů byla i zde použita normalizace pomocí vydatnosti zdroje. Ta byla opět převzata ze simulace MCNP pro Škodu 440/84, která činila $1.55460E+17$ fotonů za sekundu přes celou geometrii souboru. Výsledná hodnota vydatnosti byla vypočtena obdobně jako pro zdroj neutronů.

$$\frac{0.2 \cdot 1.55460 \cdot 10^{17}}{2.5} = 1.2437 \cdot 10^{16} \quad \text{f/s/model} \quad (19)$$

Pro tento zdroj byla použita metoda váhových oken, která razantně zvyšuje přesnost simulace

při výpočtu stínících vlastností. Důvodem nepřesnosti je, že odstíněním pronikne do okolí OS pouze malé množství částic. Menší množství detekovaných částic má za následek menší přesnost výsledku. Metoda váhových oken zvyšuje přesnost právě tím že každá generována částice se při průchodu váhovým oknem rozdělí na více částic o menší hmotnosti. Součet těchto vzniklých částic musí dát energii prvotní částice. Aby tato metoda mohla být softwarem provedena, tak bylo třeba provést diskretizaci geometrie. Byla použita kartézská mřížka, o 200 buňkách ve směru osy x, 200 buňkách ve směru osy y, a jedné buňce ve směru osy z.

3.5 Detektor

Obdobně jako u zdrojů, tak i zde bylo potřeba definovat dva druhy detektorů. Jeden pro detekci neutronů, a jeden pro detekci fotonů. Oba detektory používají tabulku ICRP-74, z které jsou dále hodnoty interpolovány metodou log-log. Tyto interpolované hodnoty používají detektory pro přepočítání detekované energie částic na příkon dávkového ekvivalentu (dále pouze PDE) v $\mu\text{Sv/h}$.

Celkově byly ve výpočetní simulaci definovány 3 oblasti detektorů

- Oblast 1 - Na povrchu tělesa obalového souboru - Tloušťka detekční oblasti je 1 cm. Lze tuto oblast vidět na obrázku 19d žlutě vybarvenou.
- Oblast 2 - Ve vzdálenosti 2 m od povrchu tělesa obalového souboru - Tloušťka detekční oblasti je 10 cm. Lze tuto oblast vidět na obrázku 17d žlutě vybarvenou.
- Oblast 3 - Od povrchu tělesa do vzdálenosti 2 m. Oblast je pouze výseč kruhu o úhlu 90° . Celkově je tato oblast rozdělena na 100 podoblastí, kde každá podoblast funguje jako samostatný detektor. Rozměr poloměru r je rozdělen desetkrát. Rozměr úhlu θ je také rozdělen desetkrát. Rozměr výšky y není rozdělen a má pouze jednu buňku.

Celkově jsou tedy všechny tyto detektory definovány v programu Serpent následovně. **fG** a **fN** jsou funkce vzniklé z tabulky konverzních hodnot ICRP-74. **cd1** a **cd2** jsou buňky definované přímo v geometrii modelu. Tyto buňky lze vidět na obrázku 19d a 17d vybarveně žlutě.

```

1      % detector at 1 cm wide layer of air outside of cask
2      det dN1 n dr -100 fN dc cd1 dv 1.6148e+04
3
4      % detector at 1 cm wide layer of air outside of cask
5      det dG1 p dr -100 fG dc cd1 dv 1.6148e+04
6
7      % detector at 10 cm wide layer of air 2m away from cask surface
8      det dN2 n dr -100 fN dc cd2 dv 4.1846e+05
9
10     % detector at 10 cm wide layer of air 2m away from cask surface

```

```

11  det dG2 p dr -100 fG dc cD2 dv 4.1846e+05
12
13  % Detector cylindrical matrix with 100 bins. Only uses quarter of module
14  det dN3 n dr -100 fN dn 1
15  128 338 10 %r
16  0 90 10 %Theta
17  -10 10 1 %z
18
19  % Detector cylindrical matrix with 100 bins. Only uses quarter of module
20  det dG3 p dr -100 fG dn 1
21  128 338 10 %r
22  0 90 10 %Theta
23  -10 10 1 %z

```

3.6 Výsledky simulací

Celkově bylo nasimulováno $5.0000\text{E}+08$ neutronů a $1.0000\text{E}+10$ fotonů. Výsledná statistická chyba při výpočtu PDE byla vždy menší než 1 % a průměrně se pohybovala kolem hodnoty 0.6 %.

3.6.1 Oblast detektoru 1 a 2

Tabulka 9: Výsledné hodnoty PDE pro oblasti 1 a 2 ze softwaru Serpent

Varianta	Škoda 440/84	Homogenní beton	Nehomogenní beton
Číslo varianty	1	2	3
<i>Příkon dávkového ekvivalentu v oblasti 1 ($\mu\text{Sv/h}$)</i>			
Detektor G	1.04E+02	1.75E+04	1.78E+04
Detektor N-N	3.65E+02	1.48E+02	1.55E+02
Detektor N-G	3.10E+00	7.90E+01	8.13E+01
Celkové	4.72E+02	1.77E+04	1.80E+04
Limit dle [29]	2.00E+03		
<i>Příkon dávkového ekvivalentu v oblasti 2 ($\mu\text{Sv/h}$)</i>			
Detektor G	3.50E+01	5.86E+03	5.95E+03
Detektor N-N	1.11E+02	4.41E+01	4.65E+01
Detektor N-G	1.04E+00	2.56E+01	2.63E+01
Celkové	1.47E+02	5.93E+03	6.02E+03
Limit dle [29]	1.00E+02		

Je třeba brát v úvahu konzervativnost výpočtu způsobenou zjednodušením modelu. V případě předchozí simulace v softwaru MCNP pro obalový soubor Škoda 440/84 byla výsledná hodnota

PDE přibližně o třetinu nižší než hodnota určené softwarem Serpent. Důvodem je limitace simulace pouze na 2D prostor, kdy rozdíl PDE mezi 2D a 3D je zhruba třetinový. Je zřejmé, že velká část částic bude z OS unikat také vrškem a spodkem modelu.

3.6.2 Oblast detektoru 3

Tabulka 10: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 1

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	89.519	90.695	82.888	78.53	86.919
9 - 18	74.547	73.202	69.659	67.298	72.116
18 - 27	64.209	62.48	60.571	59.179	62.23
27 - 36	56.5	54.884	53.69	52.789	54.903
36 - 45	50.445	49.034	48.262	47.628	49.187
45 - 54	45.567	44.355	43.858	43.361	44.56
54 - 63	41.627	40.537	40.181	39.77	40.781
63 - 72	38.318	37.321	37.079	36.748	37.516
72 - 81	35.481	34.597	34.45	34.127	34.782
81 - 90	33.053	32.24	32.146	31.844	32.454
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	92.795	91.039	90.271	90.081	81.582
9 - 18	75.449	75.639	75.35	73.317	68.992
18 - 27	64.45	65.185	64.775	62.91	60.23
27 - 36	56.487	57.351	56.956	55.327	53.468
36 - 45	50.376	51.283	50.814	49.519	48.062
45 - 54	45.527	46.405	45.864	44.83	43.73
54 - 63	41.558	42.396	41.865	40.964	40.111
63 - 72	38.282	38.993	38.54	37.722	37.018
72 - 81	35.451	36.078	35.697	34.955	34.393
81 - 90	33.012	33.602	33.24	32.589	32.098

Tabulka 11: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 1

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	299.05	291.12	292.24	293.35	294.27
9 - 18	239.62	234.7	236.79	235.55	237.48
18 - 27	202.09	199.95	200.93	200.52	204.07
27 - 36	175.82	177.17	175.5	177.2	178.59
36 - 45	158.03	159.45	158.48	160.44	157.95
45 - 54	143.25	142.98	143.91	141.44	143.78
54 - 63	129.68	130.63	131.22	130.93	131.34
63 - 72	120.23	120.69	120.29	118.98	119.73
72 - 81	110.62	110.84	111.6	110.27	111.18
81 - 90	102.47	103.33	104	103.05	103.51
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	298.77	299.62	300.8	293.98	286.05
9 - 18	239.87	240.65	237.67	232.42	233.4
18 - 27	202.24	201.57	201.98	200.24	200.17
27 - 36	179.35	177.13	178.47	176.39	178.12
36 - 45	158.56	156.99	157.9	159.62	157.59
45 - 54	143.74	142.85	142.56	143.38	143.92
54 - 63	128.78	129.79	130.83	132.19	131.36
63 - 72	120.06	118.68	120.04	121.57	119.96
72 - 81	110.7	111.01	112.57	111.98	110.96
81 - 90	102.76	103.94	103.97	104.58	103.46

Tabulka 12: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 1

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	2.6399	2.5875	2.5803	2.5614	2.5694
9 - 18	2.1766	2.1396	2.1288	2.1425	2.1312
18 - 27	1.8738	1.8537	1.8374	1.8156	1.8496
27 - 36	1.6463	1.6411	1.6208	1.6276	1.6338
36 - 45	1.476	1.464	1.4545	1.4544	1.451
45 - 54	1.3285	1.3229	1.3093	1.3253	1.3235
54 - 63	1.2259	1.2131	1.1979	1.2074	1.2131
63 - 72	1.1222	1.1153	1.1116	1.1023	1.1289
72 - 81	1.0387	1.0372	1.0265	1.0238	1.0447
81 - 90	0.9777	0.9629	0.9634	0.9575	0.9677
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	2.591	2.6315	2.6427	2.5935	2.574
9 - 18	2.1502	2.1675	2.1782	2.1646	2.1308
18 - 27	1.8583	1.8755	1.8727	1.8514	1.834
27 - 36	1.6301	1.6422	1.6484	1.6356	1.631
36 - 45	1.4592	1.4692	1.4741	1.4623	1.4503
45 - 54	1.327	1.3344	1.325	1.3265	1.3284
54 - 63	1.2252	1.2121	1.2235	1.2104	1.215
63 - 72	1.124	1.111	1.1145	1.1138	1.1203
72 - 81	1.0368	1.0359	1.0334	1.034	1.0368
81 - 90	0.9662	0.969	0.9666	0.9715	0.9708

Tabulka 13: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 2

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	1.52E+04	1.51E+04	1.39E+04	1.35E+04	1.43E+04
9 - 18	1.25E+04	1.23E+04	1.17E+04	1.14E+04	1.19E+04
18 - 27	1.08E+04	1.06E+04	1.01E+04	9.99E+03	1.03E+04
27 - 36	9.44E+03	9.27E+03	8.99E+03	8.88E+03	9.07E+03
36 - 45	8.42E+03	8.29E+03	8.08E+03	7.99E+03	8.14E+03
45 - 54	7.61E+03	7.50E+03	7.33E+03	7.27E+03	7.38E+03
54 - 63	6.94E+03	6.85E+03	6.71E+03	6.66E+03	6.76E+03
63 - 72	6.39E+03	6.31E+03	6.19E+03	6.15E+03	6.23E+03
72 - 81	5.91E+03	5.85E+03	5.75E+03	5.71E+03	5.78E+03
81 - 90	5.51E+03	5.45E+03	5.37E+03	5.33E+03	5.39E+03
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	1.53E+04	1.51E+04	1.53E+04	1.48E+04	1.37E+04
9 - 18	1.24E+04	1.26E+04	1.25E+04	1.21E+04	1.16E+04
18 - 27	1.06E+04	1.08E+04	1.07E+04	1.04E+04	1.01E+04
27 - 36	9.35E+03	9.47E+03	9.40E+03	9.19E+03	8.96E+03
36 - 45	8.35E+03	8.45E+03	8.40E+03	8.23E+03	8.06E+03
45 - 54	7.55E+03	7.64E+03	7.59E+03	7.46E+03	7.32E+03
54 - 63	6.90E+03	6.97E+03	6.92E+03	6.82E+03	6.71E+03
63 - 72	6.35E+03	6.41E+03	6.37E+03	6.28E+03	6.19E+03
72 - 81	5.88E+03	5.93E+03	5.90E+03	5.83E+03	5.75E+03
81 - 90	5.48E+03	5.52E+03	5.49E+03	5.43E+03	5.37E+03

Tabulka 14: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 2

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	118.605	122.729	112.848	115.431	116.762
9 - 18	95.832	95.381	92.837	91.093	94.289
18 - 27	79.341	80.516	77.057	79.929	80.213
27 - 36	69.823	69.384	68.416	71.046	70.056
36 - 45	61.438	61.887	62.068	62.487	61.128
45 - 54	57.346	56.929	56.651	55.469	57.555
54 - 63	51.020	51.964	50.664	51.550	51.513
63 - 72	47.173	47.379	48.127	46.650	46.656
72 - 81	43.821	46.042	43.628	43.383	43.965
81 - 90	40.875	42.147	40.532	40.392	41.203
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	118.277	120.809	118.073	116.954	116.464
9 - 18	95.609	96.271	96.361	93.554	93.441
18 - 27	79.802	79.686	80.770	79.737	78.862
27 - 36	69.925	69.754	71.247	70.213	70.633
36 - 45	62.898	60.782	61.985	62.323	61.503
45 - 54	55.894	55.517	55.915	56.589	56.917
54 - 63	52.117	50.368	52.524	51.517	52.363
63 - 72	46.986	46.689	48.094	47.878	48.518
72 - 81	43.675	43.497	44.339	42.889	44.738
81 - 90	41.261	41.091	42.047	39.916	41.482

Tabulka 15: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 2

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	65.993	65.498	65.155	65.233	65.184
9 - 18	54.02	53.829	53.628	53.566	53.63
18 - 27	46.213	46.098	46.082	45.919	46
27 - 36	40.619	40.461	40.513	40.407	40.519
36 - 45	36.219	36.155	36.201	36.131	36.136
45 - 54	32.801	32.723	32.721	32.703	32.71
54 - 63	29.934	29.871	29.887	29.826	29.917
63 - 72	27.553	27.5	27.506	27.447	27.506
72 - 81	25.535	25.471	25.466	25.455	25.489
81 - 90	23.772	23.742	23.783	23.693	23.721
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	65.705	66.031	65.733	65.321	65.106
9 - 18	53.861	53.98	53.838	53.596	53.591
18 - 27	46.067	46.223	46.14	45.949	46.014
27 - 36	40.492	40.511	40.511	40.513	40.453
36 - 45	36.159	36.169	36.141	36.185	36.168
45 - 54	32.658	32.705	32.743	32.705	32.715
54 - 63	29.897	29.833	29.874	29.877	29.892
63 - 72	27.473	27.472	27.485	27.538	27.52
72 - 81	25.451	25.452	25.479	25.457	25.446
81 - 90	23.704	23.681	23.772	23.735	23.718

Tabulka 16: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru G v oblasti 3 pro variantu 3

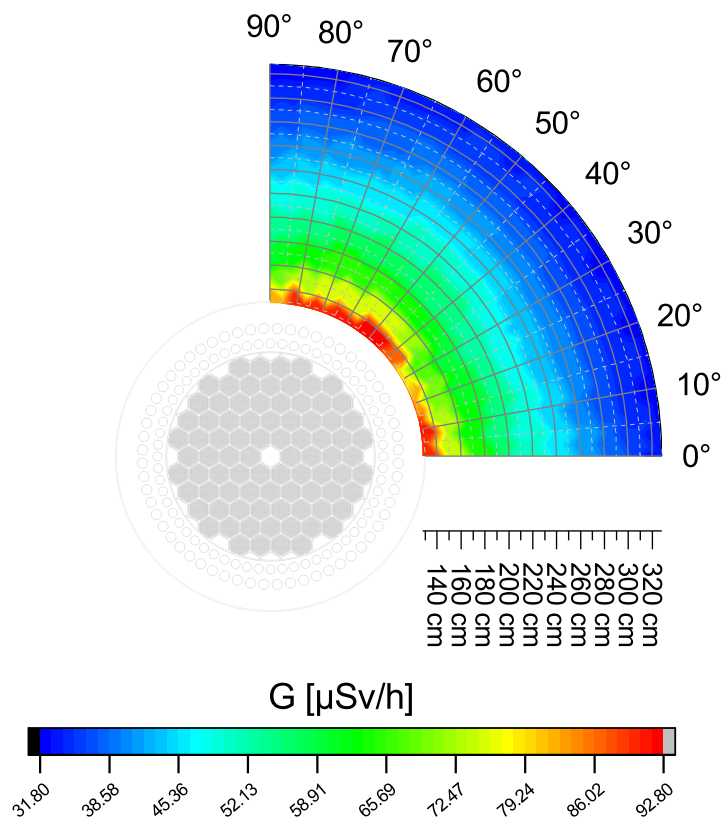
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	1.53E+04	1.53E+04	1.42E+04	1.38E+04	1.46E+04
9 - 18	1.27E+04	1.25E+04	1.19E+04	1.16E+04	1.21E+04
18 - 27	1.09E+04	1.07E+04	1.03E+04	1.02E+04	1.04E+04
27 - 36	9.57E+03	9.40E+03	9.13E+03	9.04E+03	9.21E+03
36 - 45	8.54E+03	8.41E+03	8.20E+03	8.13E+03	8.26E+03
45 - 54	7.72E+03	7.61E+03	7.44E+03	7.39E+03	7.50E+03
54 - 63	7.04E+03	6.96E+03	6.82E+03	6.78E+03	6.87E+03
63 - 72	6.48E+03	6.40E+03	6.29E+03	6.25E+03	6.33E+03
72 - 81	6.00E+03	5.94E+03	5.84E+03	5.81E+03	5.88E+03
81 - 90	5.59E+03	5.53E+03	5.45E+03	5.42E+03	5.48E+03
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	1.55E+04	1.54E+04	1.55E+04	1.50E+04	1.39E+04
9 - 18	1.26E+04	1.28E+04	1.27E+04	1.23E+04	1.17E+04
18 - 27	1.08E+04	1.10E+04	1.09E+04	1.06E+04	1.02E+04
27 - 36	9.49E+03	9.63E+03	9.55E+03	9.32E+03	9.08E+03
36 - 45	8.48E+03	8.59E+03	8.52E+03	8.35E+03	8.16E+03
45 - 54	7.67E+03	7.76E+03	7.70E+03	7.56E+03	7.42E+03
54 - 63	7.01E+03	7.08E+03	7.03E+03	6.92E+03	6.80E+03
63 - 72	6.45E+03	6.51E+03	6.47E+03	6.37E+03	6.28E+03
72 - 81	5.97E+03	6.03E+03	5.99E+03	5.91E+03	5.83E+03
81 - 90	5.56E+03	5.61E+03	5.58E+03	5.51E+03	5.44E+03

Tabulka 17: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-N v oblasti 3 pro variantu 3

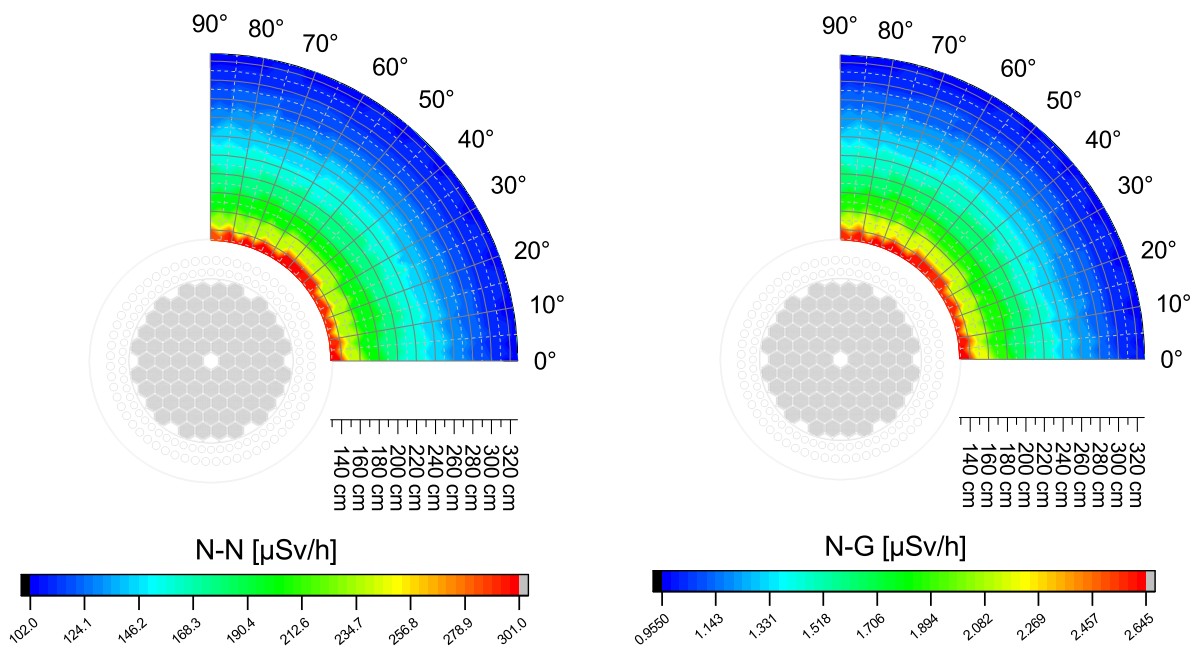
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	126.319	125.543	123.766	121.12	125.904
9 - 18	99.966	100.684	99.09	99.102	96.783
18 - 27	84.55	83.467	85.331	83.577	85.026
27 - 36	72.939	72.509	73.001	73.812	74.232
36 - 45	65.641	66.829	65.516	66.136	65.654
45 - 54	59.425	60.117	59.451	59.575	60.252
54 - 63	52.956	54.274	53.536	55.351	55.054
63 - 72	49.123	51.141	50.483	50.843	50.532
72 - 81	44.744	46.992	45.995	46.919	46.496
81 - 90	41.402	43.755	42.665	43.895	44.029
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	125.122	125.383	128.104	122.121	123.115
9 - 18	98.682	100.094	100.987	97.669	96.718
18 - 27	82.944	83.891	83.877	84.698	83.971
27 - 36	73.044	73.441	73.522	75.689	71.801
36 - 45	65.906	65.528	65.135	66.582	63.346
45 - 54	59.22	58.37	59.824	59.259	58.638
54 - 63	54.946	53.523	53.571	53.673	53.674
63 - 72	49.585	49.364	48.171	49.422	49.537
72 - 81	46.618	46.389	45.348	45.681	45.19
81 - 90	43.338	43.201	42.135	42.099	42.535

Tabulka 18: Výsledný PDE ($\mu\text{Sv/h}$) z detektoru N-G v oblasti 3 pro variantu 3

Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 9	67.889	67.275	66.915	66.957	67.161
9 - 18	55.487	55.256	55.029	54.957	55.118
18 - 27	47.498	47.441	47.231	47.19	47.289
27 - 36	41.704	41.628	41.496	41.526	41.472
36 - 45	37.235	37.232	37.018	37.171	37.097
45 - 54	33.654	33.624	33.501	33.625	33.551
54 - 63	30.719	30.774	30.662	30.7	30.709
63 - 72	28.225	28.261	28.206	28.222	28.245
72 - 81	26.178	26.13	26.144	26.174	26.131
81 - 90	24.422	24.37	24.359	24.378	24.387
Úhel θ (°)	Vzdálenost od povrchu tělesa (cm)				
	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	180 - 200
0 - 9	67.502	68.047	67.688	67.252	67.035
9 - 18	55.316	55.491	55.397	55.152	55.099
18 - 27	47.378	47.54	47.463	47.359	47.282
27 - 36	41.61	41.706	41.608	41.64	41.498
36 - 45	37.179	37.191	37.108	37.199	37.098
45 - 54	33.653	33.6	33.579	33.609	33.602
54 - 63	30.712	30.693	30.654	30.649	30.691
63 - 72	28.233	28.246	28.255	28.224	28.267
72 - 81	26.19	26.163	26.137	26.176	26.186
81 - 90	24.372	24.38	24.392	24.401	24.377



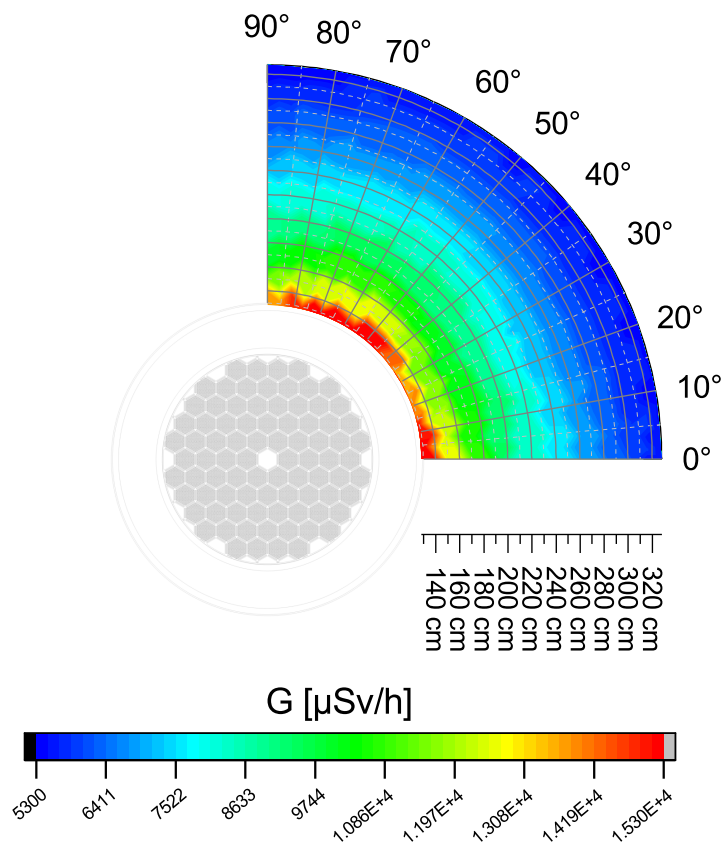
(a) Detektor G



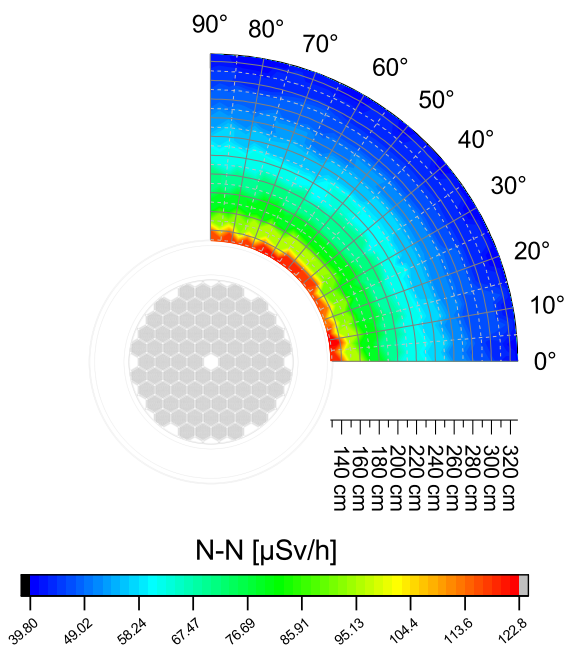
(b) Detektor N-N

(c) Detektor N-G

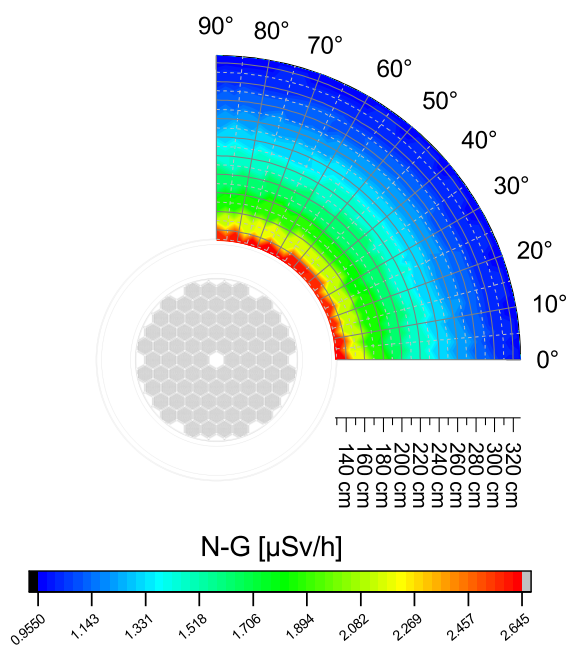
Obrázek 20: Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 1



(a) Detektor G

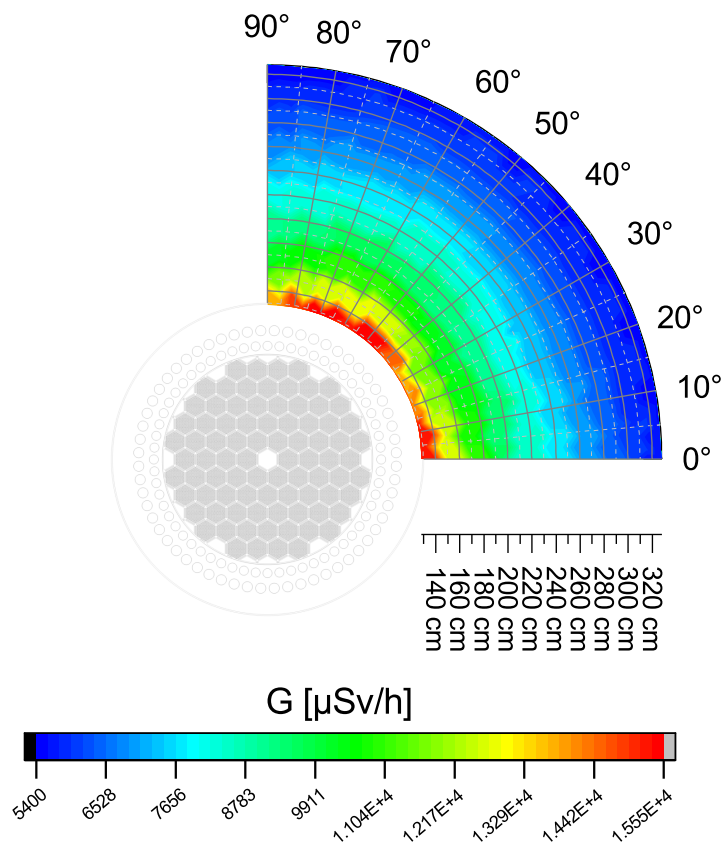


(b) Detektor N-N

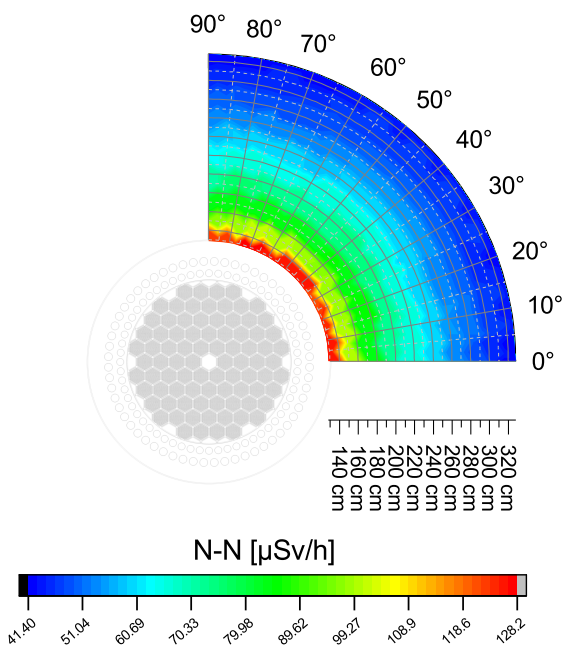


(c) Detektor N-G

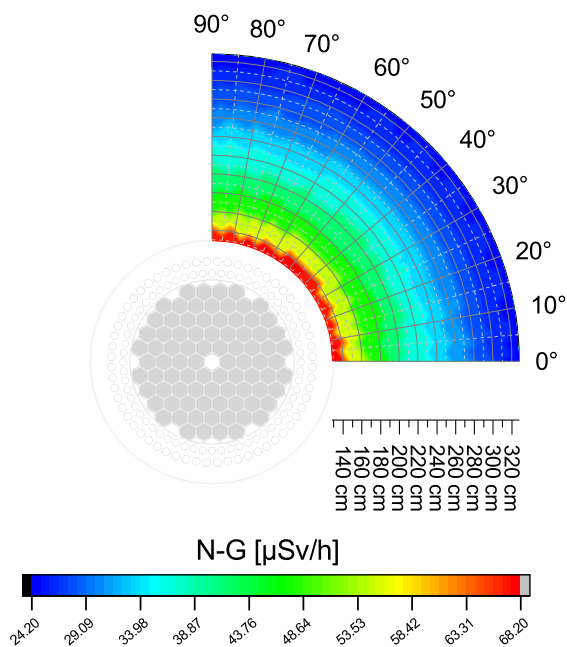
Obrázek 21: Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 2



(a) Detektor G



(b) Detektor N-N



(c) Detektor N-G

Obrázek 22: Výsledné PDE z detektoru v oblasti 3 pro variantu 3

4 Závěr

Pro úspěšné zanalyzování stínících vlastností betonu s příměsí polyetylénu a karbidu bóru byl použit obalový soubor Škoda 440/84. S pomocí Serpentu byly úspěšně nasimulovány hodnoty příkonů dávkových ekvivalentů celkem pro 3 varianty tohoto obalového souboru. Výsledné hodnoty PDE z těchto simulací jsou uvedeny v tabulce 9.

Dle vyhlášky SÚJB č. 379/2016 Sb. je maximální povolený PDE pro dvouúčelové obalové soubory **2000** $\mu\text{Sv/h}$ na povrchu a **100** $\mu\text{Sv/h}$ ve vzdálenosti 2 metrů od povrchu. [29]

- Varianta 1, tedy obalový soubor Škoda 440/84, **vyhovuje**. Jak na povrchu, tak ve vzdálenosti 2 metrů od povrchů je PDE v dovořených mezích. [19]
- Varianta 2, tedy obalový soubor Škoda 440/84, který používá jako stínící materiál homogenní beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru, **nevyhovuje**. Jak na povrchu, tak ve vzdálenosti 2 metrů od povrchu je velikost PDE nadlimitní. Z uvedených hodnot PDE lze ovšem pozorovat, že tato varianta má přibližně o 150 % lepší stínící vlastnosti pro stínění neutronů než varianta 1. Má ovšem zároveň značně horší schopnost stínit fotony. V případě primárních fotonů tato varianta odstíní přibližně 160x méně částic.
- Varianta 3, tedy obalový soubor Škoda 440/84, který používá jako stínící materiál *nehomogenní* beton s příměsí polyetylénu a karbidu bóru, **nevyhovuje**. Výsledné hodnoty jsou obdobné variantě 2, a nebudou zde tedy znovu opakovány. Primárním účelem této varianty bylo zjistit, jaký má vliv použití nehomogenního stínícího materiálu místo materiálu homogenního. Z tabulky 19 je patrné, že varianta 3 má v každé oblasti vyšší velikost PDE než varianta 2. Je také patrné, že největší vliv má použití homogenního materiálu na množství odstíněných neutronů (detektor N-N). Použitím homogenního materiálu tedy vychází neutronová složka PDE v průměru o 5 % nižší než v případě, kdy by byl použitý nehomogenní materiál.

Tabulka 19: Vliv použití nehomogenního materiálů místo materiálu homogenního ve variantě 3

	Detektor			
	G	N-N	N-G	Celkové
<i>Oblast 1 (povrch OS)</i>				
Zvýšení PDE ($\mu\text{Sv/h}$)	192.29	4.54	1.63	198.46
Zvýšení PDE (%)	1.57	4.37	2.94	1.60
<i>Oblast 2 (2 m od povrchu OS)</i>				
Zvýšení PDE ($\mu\text{Sv/h}$)	60.28	1.64	0.50	62.42
Zvýšení PDE (%)	1.47	5.32	2.77	1.50

Souhrnný výsledek této práce je tedy

- Beton s příměsí polyetylenu a karbidu bóru se nejeví jako perspektivní stínící materiál pro obalové soubory. Jeho schopnost stínit neutrony je lepší než v případě oceli. Schopnost stínit fotony je ovšem značně omezena a z toho důvodů je celkový příkon dávkového ekvivalentu větší než maximální povolená hodnota dle vyhlášky č. 379/2016 Sb. [29]
- Použitím homogenního stínícího materiálu místo stejného, ale heterogenního materiálu má negativní vliv na výslednou hodnotu příkonu dávkového ekvivalentu. S pomocí simulací a výpočtů bylo zjištěno, že výsledná hodnota PDE je nižší, než kdyby byl použitý materiál nehomogenní. Výpočty s homogenním materiálem jsou jednodušší, ale méně nepřesné a mírně podhodnocující hodnotu PDE. V případě, kdy je potřeba výpočtem co nejpřesněji simulovat realitu, se musí použít materiál heterogenní.

Tloušťka stěn tělesa v případě varianty 2 a 3 byla stanovena na konstantních 5 cm. Nebyly provedeny žádné další výpočty za účelem určení vlivu tloušťky stěny na výsledné PDE, a to z důvodů výpočetní náročnosti. Pro momentální projekt trvaly výpočty pro všechny varianty přibližně týden bez přestávky na vzdáleném serveru s 32 jádrovým CPU.

Tématem dalšího výzkumu by tedy mohl být vliv právě tloušťky stěn na výslednou hodnotu PDE, a pokus nalézt přesnou hodnotu tloušťky, při které by výsledné PDE bylo ve stanoveném limitu. Materiál samotný je vhodný pro stínění neutronů, a z toho důvodu může být tématem dalšího výzkumu naleznout takovou úpravu betonové směsi, aby bylo odstínění fotonů také dostačující.

Seznam použité literatury

- [1] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa et al., „JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering,“ *Journal of Nuclear Science and Technology*, roč. 48, č. 1, s. 1–30, 2011.
- [2] T. Jevremovic, *Nuclear principles in engineering*. Springer, 2009, sv. 2.
- [3] J. Zeman, *Reaktorová fyzika I*. ČVUT, 1999.
- [4] ČEZ, *Vyhořelé Palivo*. URL: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html (cit. 29. 11. 2022).
- [5] SÚJB, „Národní zpráva ČR ke Společné úmluvě o bezpečném nakládání s VP a o bezpečném nakládání s RAO,“ tech. zpr. 143, 2020.
- [6] *Spent Fuel Storage Operation — Lessons Learned* (TECDOC Series 1725). Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2013, ISBN: 978-92-0-113813-2. URL: <https://www.iaea.org/publications/10575/spent-fuel-storage-operation-lessons-learned>.
- [7] URL: https://twitter.com/bohdan_zronek/status/1519591962889883648/photo/1 (cit. 29. 11. 2022).
- [8] I. Crossland, *Nuclear fuel cycle science and engineering*. Elsevier, 2012.
- [9] R. Heystee, „Proposed deep geologic repository for low and intermediate-level radioactive waste at the Bruce site, Tiverton, Ontario,“ 2008.
- [10] M. J. Akins, „Spent fuel storage-dry storage options and issues,“ 2007.
- [11] J. Lee, „Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/-Containers,“ *IAEA TECDOC-1532, International Atomic Energy Agency, Vienna*, 2007.
- [12] M. Peehs a J. Fleisch, „LWR Spent Fuel Storage Behaviour,“ *Journal of Nuclear Materials*, roč. 137, č. 3, s. 190–202, 1986.
- [13] M. Vienna a J. Lian, „Integrity Assessment of CANDU Spent Fuel During Interim Dry Storage in MACSTOR,“ 2010.
- [14] E. ki Lee, „Determination of burnup limit for CANDU 6 fuel using Monte-Carlo method,“ *Nuclear Engineering and Technology*, roč. 53, č. 3, s. 901–910, 2021.
- [15] F Pare, „Dry spent fuel storage with the MACSTOR system,“ 1996.
- [16] J. Lian, „Integrity Assessment of CANDU Spent Fuel During Interim Dry Storage in MACSTOR,“ in *IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Power Reactors, Vienna, May*, 2010.
- [17] F Takats, „Spent fuel management in Hungary: Current status and prospects,“ 1998.
- [18] J Bencze, „Interim storage of spent nuclear fuel in Paks MVDS facility,“ 2017.

- [19] V. Svoboda, *Obalové soubory ŠKODA pro skladování a transport vyhořelého jaderného paliva pro elektrárny Temelín a Dukovany*. URL: <https://www.jadernedny.cz/#prezentace-2020> (cit. 04. 12. 2022).
- [20] *CASTOR® 440/84 mvK*. URL: <https://www.gns.de/language=en/29921/castor-440-84-mvk> (cit. 02. 04. 2023).
- [21] W. Steinwarz, R Huggenberg a E. P. Warnke, „CASTOR®, ein High-tech-Produkt aus duktilem Gusseisen,“ *KONSTRUIEREN UND GIESSEN*, roč. 31, č. 1, s. 2, 2006.
- [22] *Kontejnery pro transport a skladování použitého jaderného paliva*. URL: <https://www.skoda-js.cz/reference/kontejnery-pro-transport-a-skladovani-pouziteho-jaderneho-paliva/> (cit. 02. 04. 2023).
- [23] L. Sklenka, *Provozní reaktorová fyzika. 2. přepracované vydání*. České vysoké učení technické, 2016, ISBN: 978-80-01-05901-2.
- [24] *CONSTOR®*. URL: <https://www.gns.de/language=en/23336/constor> (cit. 07. 04. 2023).
- [25] *Dry Cask Storage and Transportation*. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/nuclear-fuel-and-waste-management/dry-cask-and-storage-transport/> (cit. 04. 04. 2023).
- [26] M. Shah, P. Co a A. Chowdhury, „Tip-Over Analysis of the HI-STORM Dry Storage Cask System,“ led. 2003.
- [27] *Monte Carlo Simulation*. URL: <https://www.ibm.com/topics/monte-carlo-simulation> (cit. 08. 05. 2023).
- [28] D. DiJulio, C. P. Cooper-Jensen, I Llamas-Jansa, S Kazi a P. M. Bentley, „Measurements and Monte-Carlo simulations of the particle self-shielding effect of B4C grains in neutron shielding concrete,“ *Radiation Physics and Chemistry*, roč. 147, s. 40–44, 2018.
- [29] *Vyhláška č. 379/2016 Sb. o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využití jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky*. URL: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-379> (cit. 19. 05. 2023).