

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů



**Ověření deterministického provozního kódu REBUS pro plánování  
vsázek na reaktoru LVR-15**

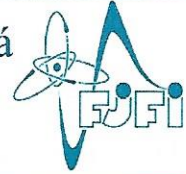
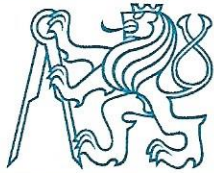
**Validation of the deterministic operational code REBUS for active  
core loads planing at the LVR-15 reactor**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vypracoval: Bc. Jan Pinta

Vedoucí: Ing. Jaroslav Šoltés, Ph.D.

Praha, 2021



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Pinta**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Ověření deterministického provozního kódu REBUS pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15**

Název práce anglicky: Validation of the deterministic operational code REBUS for active core loads planing at the LVR-15 reactor

### Pokyny pro vypracování:

1. V návaznosti na zpracování výzkumného úkolu prozkoumejte možnosti výpočetního kódu REBUS-PC k modelování vsázek a průběhu kampaní na výzkumném reaktoru LVR-15.
2. Seznamte se s konfigurací základního kritického experimentu (ZKE) realizovaného na reaktoru LVR-15 s palivem IRT-4 a s kritickými stavy dosaženými v průběhu ZKE. V kódu REBUS vytvořte zjednodušené modely komponent aktivní zóny reaktoru LVR-15 použitých u konfigurace ZKE.
3. V souvislosti se závěry výzkumného úkolu se zaměřte na přípravu jaderných dat pro kód REBUS-PC. Pokuste se pomocí jiného výpočetního kódu připravit jaderná data založená na novějších verzích mezinárodně standardizovaných knihoven než ENDF/B-VI použité ve výzkumném úkolu. Následně v kódu REBUS-PC porovnejte vhodně zvolenou násobící soustavu využívající data z ENDF/B-VI připraveny pomocí WIMS-ANL s geometricky stejnou soustavou využívající novější knihovnu jaderných dat.
4. Za použití připravených souborů jaderných dat a zjednodušených modelů komponent, namodelujte kritickou konfiguraci aktivní zóny dle ZKE a v modelu stanovte násobící koeficient.
5. Po úspěšné validaci výpočetního modelu na konfiguraci ZKE se pokuste v kódu REBUS-PC s modulem vyhořívání spočítat potřebnou zásobu reaktivity a kritické stavy pro jednu modelovou kampaň reaktoru LVR-15.

### Doporučená literatura:

- [1] Předprovozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR-15. Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2016
- [2] Kolečka M.; Juříček V. - Vyhodnocení ZKE 1 v průběhu výstavby konfigurace AZ K132 reaktoru LVR-15, řízený dokument, Centrum výzkumu Řež s.r.o., září 2011
- [3] Olson A.P. – A users guide for the REBUS-PC code, Version 1.4, Argone National Laboratory, 2001

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Jaroslav Šoltés, Ph.D.**  
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jméno a pracoviště konzultanta: **Ing. Ondřej Huml, Ph.D.**  
KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání diplomové práce: 19. 10. 2020

Datum odevzdání diplomové práce: 3. 5. 2021

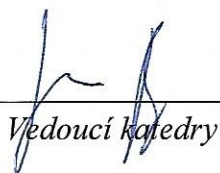
Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 19. 10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

  
\_\_\_\_\_  
Garant oboru

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.

  
\_\_\_\_\_  
Děkan

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením svého vedoucího diplomové práce Ing. Jaroslava Šoltése, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu literatury.

V Praze dne 19. 5. 2021

.....  
Bc. Jan Pinta

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Šoltésovi, Ph.D. za neocenitelné rady a pomoc a za ochotu konzultovat všechny problémy vzniklé při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi Ing. Ondřeji Humlovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc s přípravou jaderných dat v kódu Serpent. Další poděkování patří Ing. Jaroslavu Ernestovi z oddělení Neutronová fyzika v CVŘ s.r.o. za poskytnutí cenných informací zejména o přípravě jaderných dat pro nepalivové komponenty reaktoru LVR-15. Zároveň bych rád poděkoval Ing. Janu Frýbortovi, Ph.D. z KJR FJFI ČVUT za vytvoření aplikační knihovny kódu Serpent na základě knihovny ENDF/B-VI pro účely přípravy jaderných dat v diplomové práci. Na závěr bych rád poděkoval doktoru Ching-Sheng Linovi z Idaho National Laboratory za klíčové rady při tvorbě datového formátu ISOTXS potřebného pro kód REBUS-PC pro jaderná data z kódu Serpent.

Jan Pinta

*Název práce:*

**Ověření deterministického provozního kódu REBUS pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15**

*Autor:* Bc. Jan Pinta

*Studijní program:* Aplikace přírodních věd

*Obor:* Jaderné inženýrství

*Druh práce:* Diplomová práce

*Vedoucí práce:* Ing. Jaroslav Šoltés, Ph.D.  
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

*Konzultant:* Ing. Ondřej Huml, Ph.D.  
KJR FJFI ČVUT v Praze

*Abstrakt:*

Hlavním smyslem této diplomové práce je ověřit použití deterministického provozního kódu REBUS-PC pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15. V první fázi jsou nejprve popsány metody přípravy jaderných dat v uvažovaných kódech WIMS-ANL a Serpent. Součástí přípravy jaderných dat je porovnání hodnot účinných průřezů pro materiály 8trubkového palivového souboru typu IRT-4M. Další fáze je zaměřena na zjednodušení detailní geometrie palivových souborů pro účely celozónových výpočtů reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC. V rámci navazující části je zkoumán model vyhořívání palivových souborů v kódu REBUS-PC a Serpent s cílem určit izotopické složení u částečně vyhořelých palivových souborů. Následně je provedena příprava jaderných dat pro nepalivové komponenty reaktoru LVR-15, včetně porovnání získaných hodnot. Na základě podkladů z předchozích částí jsou dále provedeny celozónové výpočty reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC pro konfigurace dvou základních kritických experimentů. Výsledné hodnoty koeficientů násobení založené na odlišných sadách jaderných dat jsou porovnány s experimentálním měřením a s výpočty v aktuálně využívaném kódu NODER pro návrhy vsázek reaktoru LVR-15. V závěrečné fázi jsou celozónové výpočty doplněny o výpočet modelové kampaně reaktoru LVR-15 s cílem určit požadované provozní parametry. Hlavním výstupem diplomové práce je rozhodnutí o tom, zda je kód REBUS-PC vhodným nástrojem pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15.

*Klíčová slova:* REBUS-PC, WIMS-ANL, Serpent, příprava jaderných dat, plánování vsázek, reaktor LVR-15

*Title:*

**Validation of the deterministic operational code REBUS for active core loads planning at the LVR-15 reactor**

*Author:* Bc. Jan Pinta

*Abstract:*

The main aim of this thesis is to verify the use of the deterministic operational code REBUS-PC for cycle planning for the LVR-15 research reactor. In the first stage, methods for cross section data preparation with two of the considered codes WIMS-ANL and Serpent are described. The cross section data are consequently compared for the materials of a standard IRT-4M fuel assembly. In the next stage, there is a focus on simplification of detailed fuel assembly's geometry for use in full core REBUS-PC calculations of LVR-15 reactor. Based on the simplification, the burnup REBUS-PC and Serpent models of IRT-4M fuel assemblies are created with aim to determine isotopic composition of fuel materials for fuel assemblies with initial nonzero burnup. Furthermore, the cross section data of nonfuel components of the LVR-15 reactor are prepared with the comparison of the obtained values. With the use of the data from previous stages, full core REBUS-PC calculations of two critical experiments of the LVR-15 reactor are carried out. The results from REBUS-PC code are then compared with the real experimental values as well as with the computed results from currently used code NODER. In the final stage, full core REBUS-PC calculations for the model fuel cycle of the LVR-15 reactor are performed with aim to get demanded operational parameters. The major outcome of this thesis is a determination of whether the REBUS-PC code is an appropriate tool for cycle planning for the LVR-15 research reactor.

*Key words:* REBUS-PC, WIMS-ANL, Serpent, cross section preparation, cycle planning, reactor LVR-15

# Obsah

Seznam zkratk	ix
Seznam veličin a jednotek	x
Seznam obrázků	xiii
Seznam tabulek	xvi
Úvod	1
<b>1 Příprava účinných průřezů</b>	<b>4</b>
1.1 Použité metody . . . . .	6
1.2 Porovnání metod a vliv knihoven . . . . .	15
<b>2 Homogenizace paliva</b>	<b>24</b>
<b>3 Model vyhoření paliva</b>	<b>29</b>
<b>4 Příprava dat pro nepalivové komponenty</b>	<b>41</b>
<b>5 Základní kritický experiment na reaktoru LVR-15</b>	<b>55</b>
5.1 ZKE1 . . . . .	57
5.2 ZKE2 . . . . .	62
<b>6 Modelová kampaň reaktoru LVR-15</b>	<b>67</b>
Závěr	74
Seznam použité literatury	77
A. Datový soubor ISOTXS/A.ISO	80
B. Přehled 69 grup v kódu WIMS-ANL	84
C. Srovnání účinných průřezů pro palivo IRT-4M	85



## Seznam zkratek

AZ	Aktivní zóna
CVŘ	Centrum výzkumu Řež s.r.o.
DSN	Discrete Ordinates Method
ENDF	Evaluated Nuclear Data File (Formát jaderných dat)
IRT-4M	Palivo výzkumného reaktoru LVR-15
LVR-15	Lehkovodní výzkumný reaktor v Řeži
PS	Palivový soubor
REBUS	REactor BUrnup System
WIMS	Winfrith Improved Multigroup Scheme
ZKE	Základní kritický experiment

## Seznam veličin a jednotek

$B$	Vyhoření	$\text{MWd kg}_U^{-1}$ ( $\text{Wskg}_U^{-1}$ )
$E$	Energie	eV (J)
$k_{\text{ef}}$	Efektivní koeficient násobení	–
$k_{\infty}$	Koeficient násobení nekonečné soustavy	–
$N$	Atomová hustota (počet jader)	$\text{b}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ( $\text{m}^{-3}$ )
$m$	Hmotnost	g (kg)
RO	Relativní odchylka	% (–)
RSO	Relativní statistická odchylka	% (–)
$t$	Čas	s
$T$	Teplota	K
$\nu$	Počet neutronů ze štěpení	–
$\rho$	Reaktivita	pcm (–)
$\sigma$	Mikroskopický účinný průřez	b ( $\text{m}^2$ )
$\Sigma$	Makroskopický účinný průřez	$\text{cm}^{-1}$ ( $\text{m}^{-1}$ )
$\phi$	Hustota toku neutronů	$\text{n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

## Seznam obrázků

1.1	Schéma procesu přípravy dat v kódu WIMS-ANL . . . . .	6
1.2	Závislost účinného průřezu pro štěpení $^{235}\text{U}$ na energii . . . . .	8
1.3	Základní buňka . . . . .	9
1.4	Geometrie 8trubkového PS . . . . .	15
1.5	Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro štěpení $\sigma_f$ pro $^{235}\text{U}$ . .	17
1.6	Počet neutronů ze štěpení $\nu$ pro $^{235}\text{U}$ . . . . .	18
1.7	Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro radiační záchyt $\sigma_\gamma$ na $^{238}\text{U}$ . . . . .	19
1.8	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro moderátor . . . . .	19
1.9	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v moderátoru mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	20
2.1	Geometrie PS IRT-4M v kódu WIMS-ANL . . . . .	24
2.2	2D řez reálnou geometrií PS IRT-4M . . . . .	25
2.3	Homogenizace PS IRT-4M . . . . .	26
3.1	Radiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu REBUS-PC . . . . .	29
3.2	Radiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu Serpent . . . . .	29
3.3	Axiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu REBUS-PC . . . . .	30
3.4	Axiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu Serpent . . . . .	30
3.5	Radiální prostorové rozložení celkové hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS určené kódy REBUS-PC a Serpent . . . . .	31
3.6	2D mapa radiálního rozložení celkové hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS určená kódy REBUS-PC a Serpent . . . . .	32
3.7	Axiální rozložení jader uranu $^{235}\text{U}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření . . . . .	34
3.8	Axiální rozložení jader jódu $^{135}\text{I}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření	36

3.9	Axiální rozložení jader xenonu $^{135}\text{Xe}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření . . . . .	37
3.10	Hmotnost uranu $^{235}\text{U}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření . . . . .	39
4.1	Konfigurace AZ LVR-15 bez paliva . . . . .	41
4.2	Beryliový blok . . . . .	42
4.3	Beryliový kanál . . . . .	43
4.4	Vodní vytěsňitel . . . . .	44
4.5	Vzduchový vytěsňitel . . . . .	45
4.6	Potrubní pošta . . . . .	46
4.7	Řez reaktorem LVR-15 . . . . .	47
4.8	Desková geometrie vodního vytěsňitele v kódu Serpent . . . . .	48
4.9	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro beryliový blok . . . . .	49
4.10	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v beryliovém bloku mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	50
4.11	Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů $\sigma_t$ pro $^9\text{Be}$ v beryliovém bloku . . . . .	50
4.12	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro vodní vytěsňitel . . . . .	51
4.13	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl ve vodním vytěsňiteli mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	52
4.14	Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů $\sigma_t$ pro vodík ve vodním vytěsňiteli . . . . .	52
5.1	Radiální řez modelem reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC v rovině $x, y$	56
5.2	Axiální řez modelem reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC v rovině $x, z$ .	56
5.3	Schéma základního kritického experimentu ZKE1 . . . . .	57
5.4	Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 .	59
5.5	Schéma základního kritického experimentu ZKE2 . . . . .	62
5.6	Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 .	64
6.1	Konfigurace AZ modelové kampaně reaktoru LVR-15 . . . . .	67
6.2	Krátkodobý vývoj koeficientu násobení modelové kampaně reaktoru LVR-15 . . . . .	70

6.3	Dlouhodobý vývoj koeficientu násobení modelové kampaně reaktoru	
	LVR-15 . . . . .	70
6.4	Charakteristika vybraných absorpčních tyčí . . . . .	72

## Seznam tabulek

1.1	Regiony základní buňky . . . . .	9
1.2	Materiálové složení paliva . . . . .	16
1.3	Parametry použitých grup . . . . .	16
1.4	Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro štěpení $\sigma_f$ pro $^{235}\text{U}$ . . . . .	18
1.5	Počet neutronů ze štěpení $\nu$ pro $^{235}\text{U}$ . . . . .	18
1.6	Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro radiační záchyt $\sigma_\gamma$ na $^{238}\text{U}$ . . . . .	19
1.7	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro moderátor . . . . .	20
1.8	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v moderátoru mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	20
1.9	Hodnoty koeficientu násobení $k_\infty$ pro 8trubkový PS typu IRT-4M . . . . .	21
1.10	Vliv jaderných dat na výpočet $k_\infty$ v kódu REBUS-PC . . . . .	22
2.1	Rozměry zhomogenizovaných regionů paliva IRT-4M . . . . .	26
2.2	Objemové zastoupení materiálů ve zhomogenizovaných regionech paliva IRT-4M . . . . .	27
2.3	Koeficient násobení zhomogenizovaných PS IRT-4M . . . . .	28
3.1	Základní posloupnost kroků vyhoření . . . . .	31
3.2	Střední hodnoty hustoty toku neutronů v jednotlivých grupách ve středu 8trubkového PS . . . . .	32
3.3	Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader uranu $^{235}\text{U}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent . . . . .	35
3.4	Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader jódu $^{135}\text{I}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent . . . . .	35
3.5	Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader xenonu $^{135}\text{Xe}$ v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent . . . . .	38
4.1	Materiálové složení beryliového bloku . . . . .	42
4.2	Materiálové složení beryliového kanálu . . . . .	43
4.3	Materiálové složení vodního vytěsňitele . . . . .	44
4.4	Materiálové složení vzduchového vytěsňitele . . . . .	45

4.5	Materiálové složení potrubní pošty . . . . .	46
4.6	Materiálové složení vodního reflektoru . . . . .	46
4.7	Materiálové složení hliníkového bloku . . . . .	46
4.8	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro beryliový blok . . . . .	49
4.9	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v beryliovém bloku mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	50
4.10	Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů $\sigma_t$ pro ${}^9\text{Be}$ v beryliovém bloku . . . . .	51
4.11	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport $\Sigma_{tr}$ pro vodní vytěsňitel . . . . .	51
4.12	Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl ve vodním vytěsňiteli mezi zvolenými grupami $\Sigma_{g,g'}$ . . . . .	52
4.13	Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů $\sigma_t$ pro vodík ve vodním vytěsňiteli . . . . .	53
5.1	Vlastnosti PS v jednotlivých krocích ZKE1 . . . . .	58
5.2	Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 .	59
5.3	Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 mezi experimentem a výpočty . . . . .	60
5.4	Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 mezi kódy NODER a REBUS-PC . . . . .	60
5.5	Vlastnosti PS v jednotlivých krocích ZKE2 . . . . .	63
5.6	Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 .	64
5.7	Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 mezi experimentem a výpočty . . . . .	65
5.8	Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 mezi kódy NODER a REBUS-PC . . . . .	65
6.1	Pozice a počáteční vyhoření PS v modelové kampani reaktoru LVR-15 .	68
6.2	Posloupnost časových kroků vyhoření pro modelovou kampaň reaktoru LVR-15 . . . . .	69
6.3	Koeficient násobení modelové kampaně z kódu REBUS-PC pro vybrané časové kroky . . . . .	71

6.4	Kritické polohy absorpčních tyčí v počáteční fázi modelové kampaně reaktoru LVR-15 . . . . .	71
6.5	Váhy havarijních tyčí v kritické konfiguraci modelové kampaně reaktoru LVR-15 . . . . .	72



# Úvod

Pro neutronické výpočty aktivních zón reaktorů je obecně možné využít deterministický nebo stochastický přístup. Zatímco deterministický přístup je založen na matematickém řešení difuzní, resp. transportní rovnice, použitím stochastických metod je pohyb neutronů v daném prostředí simulován s využitím pravděpodobnostních rozdělení a generování náhodných čísel. Hlavní výhodou stochastického přístupu je možnost vytvářet modely o libovolné geometrii spolu se spojitým neutronovým spektrem oproti nutným zjednodušením při použití deterministických metod. Na druhou stranu jednou z nevýhod stochastických kódů je poměrně velká časová náročnost výpočtů. Pro neutronické výpočty, které jsou součástí plánování vsázek na výzkumném reaktoru LVR-15 je zapotřebí provádět velké množství výpočtů v relativně krátkém časovém intervalu s ohledem na standardní délku provozu reaktoru v rámci jedné kampaně. Z tohoto důvodu je pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15 nutné, navzdory všem zjednodušením, využívat výpočetní kódy založené na deterministických metodách.

Tato diplomová práce je založena na přímé návaznosti na bakalářskou práci [1] a na výzkumný úkol [2]. Smyslem bakalářské práce bylo nalezení možného alternativního neutronově-fyzikálního kódu pro návrhy vsázek výzkumného reaktoru LVR-15. Výstupem práce bylo vybrání dvojice výpočetních kódů WIMS-ANL [3] a REBUS-PC [4]. Podstatou transportního kódu WIMS-ANL je příprava jaderných dat v předem definovaných energetických grupách pro použití v difuzním kódu REBUS-PC za účelem výpočtu požadovaných neutronických parametrů. Hlavním cílem výzkumného úkolu navazujícího na bakalářskou práci bylo provedení neutronických výpočtů paliva typu IRT-4M v kódech WIMS-ANL a REBUS-PC spolu s porovnáním získaných hodnot koeficientů násobení s kódy WIMS-4DM [5] a NODER [6], které jsou v současné době využívány na reaktoru LVR-15. Jaderná data připravovaná pro kód NODER v kódu WIMS-4DM jsou založena na evaluované knihovně ENDF/B-V [7] z roku 1979. Na základě závěrů výzkumného úkolu byl diskutován vliv použité verze knihovny ENDF/B jako možná příčina vzniklých odchylek mezi uvažovanými výpočetními kódy.

Hlavním cílem diplomové práce je ověřit použití deterministického provozního kódu REBUS-PC pro plánování vsázek na reaktoru LVR-15 prostřednictvím provedení celozónových výpočtů. Za tímto účelem je, v návaznosti na výzkumný úkol, nejprve věnována pozornost přípravě jaderných dat pro použití v neutronických výpočtech.

Součástí této problematiky je popis použitých postupů pro přípravu jaderných dat s využitím deterministických metod v kódu WIMS-ANL a stochastických metod v kódu Serpent [8] s aplikací novějších verzí knihovny ENDF/B. Následně jsou v obou kódech připravena jaderná data pro detailní model standardního 8trubkového palivového souboru typu IRT-4M. Výsledné hodnoty jsou porovnány se zaměřením na jejich přímý vliv na koeficient násobení zvolené soustavy.

Vzhledem k provádění celozónových výpočtů reaktoru LVR-15 je v dalším kroku nutné zjednodušit detailní geometrii paliva IRT-4M do zhomogenizované geometrie se zachováním koeficientu násobení. Takto připravené modely palivových souborů je následně možné použít v modelu celé aktivní zóny reaktoru LVR-15.

V důsledku přítomnosti částečně vyhořelých PS v počátečních konfiguracích AZ je potřeba určit izotopické složení paliva v těchto stavech. Za tímto účelem jsou vytvořeny modely 8trubkových a 6trubkových PS v kódu REBUS-PC a pro případ standardního 8trubkového PS je tento model srovnáván s odpovídajícím modelem v kódu Serpent. Pro zajištění reálného izotopického složení částečně vyhořelých PS jsou dále oba kódy porovnány s validovaným modelem v kódu MCNP [9].

Dalším krokem v procesu uskutečnění celozónového výpočtu výzkumného reaktoru LVR-15 je příprava jaderných dat pro nepalivové komponenty. Mezi standardně využívané nepalivové komponenty v reaktoru LVR-15 lze zařadit např. beryliový blok, vodní vytěsnitel a potrubní poštu. Analogicky jako v případě paliva jsou jaderná data připravena pomocí kódů WIMS-ANL a Serpent na základě různých verzí knihovny ENDF/B. Určené hodnoty účinných průřezů nepalivových komponent jsou v další části porovnávány s cílem analyzovat jejich vliv na celozónové výpočty.

Po přípravě jaderných dat pro palivo a pro vybrané nepalivové komponenty je možné přistoupit k celozónovým výpočtům reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC. Nejprve jsou zkoumány konfigurace AZ pro základní kritické experimenty ZKE1 a ZKE2, pro které jsou určeny efektivní koeficienty násobení na základě rozdílných sad jaderných dat z kódů WIMS-ANL a Serpent. Uvedené hodnoty jsou porovnány s experimentálním měřením a s výpočty v aktuálně využívaném kódu NODER.

Následně je v kódu REBUS-PC proveden výpočet modelové kampaně reaktoru LVR-15 vycházející z kritické konfigurace základního kritického experimentu ZKE2. Součástí výpočtu je určení časového vývoje efektivního koeficientu násobení z důvodu

ověření dostatečné zásoby reaktivity v průběhu trvání kampaně. V rámci dalších výpočtů je dále určen kritický stav v počáteční fázi modelové kampaně spolu s vahami a charakteristikami vybraných absorpčních tyčí.

# 1 Příprava účinných průřezů

Klíčovou součástí provádění analýz neutronově-fyzikálních vlastností aktivních zón reaktorů jsou jaderná data. Tyto hodnoty založené na experimentech a následném zpracování přímo charakterizují, s jakou mírou fyzikální reality jsou určovány potřebné parametry. Zhodnocená jaderná data jsou uchovávána ve standardizovaném formátu ENDF-6 (Evaluated Nuclear Data File) a v této striktně dané struktuře i uložena do knihoven. Příkladem takových knihoven je ENDF/B [10], JEFF [11], JENDL [12] a další. Obsahem knihoven ve formátu ENDF-6 jsou mimo jiné účinné průřezy pro reakce s neutrony, výtěžky štěpných produktů, konstanty související s přeměnou radionuklidů a další data mimo reaktorové aplikace jako např. účinné průřezy pro fotonové reakce. Samotná jaderná data obsažená v diskutovaných evaluovaných knihovnách není ve většině případů možné použít přímo pro neutronické výpočty, ale je nutné tato data zpracovat pomocí k tomu určených kódů.

Zpracování dat ve standardizovaném formátu ENDF-6 je prováděno za účelem přípravy aplikačních knihoven, které obsahují jaderná data v požadovaném formátu pro daný výpočetní kód. Příkladem kódu pro přípravu aplikačních knihoven je široce využívaný kód NJOY [13]. Například modul ACER kódu NJOY je určen pro přípravu knihoven ve formátu ACE pro stochastické kódy Serpent a MCNP. Součástí kódu NJOY je také modul WIMSR, který zahrnuje přípravu aplikační knihovny pro kód WIMS-ANL. Na základě aplikačních knihoven pro některé výpočetní kódy je s využitím těchto kódů dále možné připravovat jaderná data pro neutronově-fyzikální výpočty prováděné návaznými deterministickými kódy.

Samotná příprava jaderných dat má tedy zásadní vliv na výsledky získané prostřednictvím matematického řešení difuzní, resp. transportní rovnice. Stejná závislost je platná i pro řešení transportu neutronů pomocí stochastické Monte Carlo simulace. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím neutronické řešení je také výběr evaluované knihovny, který lze provést s ohledem na ověřené benchmarkové experimenty.

V rámci nastavení výpočtů použitých ve výzkumném úkolu [2] byl pro přípravu jaderných dat pro deterministický výpočetní kód REBUS-PC použit transportní lattice kód WIMS-ANL, který je ve spojení s kódem REBUS-PC standardně využíván [14], [15], [16]. Hlavním cílem výzkumného úkolu bylo provedení série výpočtů paliva IRT-4M se zaměřením na analýzu použitelnosti obou kódů v procesu plánování vsázek na

reaktoru IVR-15. Na základě výsledků v závěru výzkumného úkolu byl diskutován vliv připravených jaderných dat jako jeden z potenciálně významných důvodů vzniklých nepřesností a odchylek mezi jednotlivými výpočetními kódy založenými na rozdílných knihovnách jaderných dat.

Pro generování jaderných dat pro přímé využití v kódu REBUS-PC je v kódu WIMS-ANL standardně využívána aplikační vícegrupová knihovna založená na evaluované knihovně ENDF/B-VI [17] z roku 1992, a proto je vhodné prozkoumat možnosti provedení přípravy jaderných dat pro kód REBUS-PC s využitím novějších standardizovaných knihoven ve formátu ENDF-6 a novějších výpočetních kódů. Pro přípravu účinných průřezů pomocí novějších knihoven byl vybrán stochastický výpočetní Monte Carlo kód Serpent, který je pro tyto účely využíván celosvětově v rámci celé řady institucí [18]. Pro kód Serpent byly využity knihovny ve formátu ACE založené na evaluovaných knihovnách ENDF/B-VI [17], ENDF/B-VII.1 [19] a ENDF/B-VIII.0 [10].

Pro výpočetní kód REBUS-PC je nutné zajistit sadu mikroskopických účinných průřezů ve formátu ISOTXS, resp. A.ISO [20]. Obsahem dat ve formě ISOTXS jsou účinné průřezy pro každý z izotopů, které jsou přítomné v konkrétní modelované soustavě. Tyto hodnoty jsou závislé na energii prostřednictvím rozdělení do předem definované grupové struktury. Zároveň jsou hodnoty účinných průřezů funkcemi vyhoření a prostorového rozložení řešeného systému. Informace o formátu ISOTXS, resp. A.ISO pro přímé použití v kódu REBUS-PC jsou k dispozici v příloze A, včetně ukázky konkrétní sady jaderných dat pro srovnávací výpočet provedený ve druhé části kapitoly.

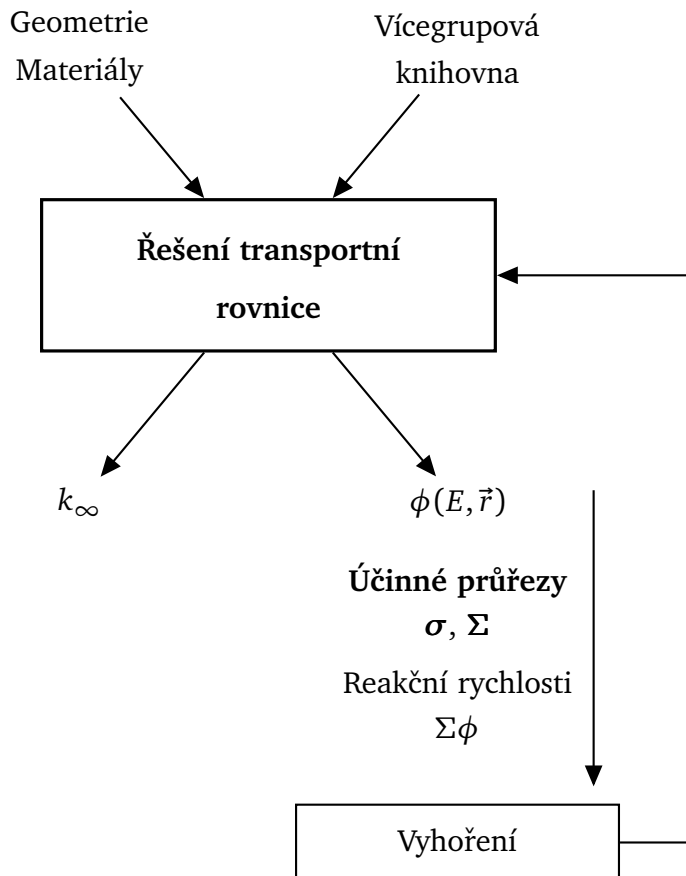
Obsahem této kapitoly je nejprve popis metod, použitých pro generování mikroskopických účinných průřezů, které jsou implementovány v kódech WIMS-ANL a Serpent. Ve druhé části je představeno srovnání výsledků z kódu REBUS-PC pro zvolený model 8trukového palivového souboru využívajícího mikroskopické účinné průřezy připravené na základě vybraných knihoven jaderných dat.

## 1.1 Použité metody

Pro získání energeticky středovaných účinných průřezů charakterizujících řešenou soustavu je důležité znát odpovídající rozložení hustoty toku neutronů  $\phi$ , které lze vypočítat pomocí deterministických nebo stochastických metod. Ve zvoleném způsobu přípravy jaderných dat pro kód REBUS-PC je získávání hustoty toku neutronů s využitím deterministických metod reprezentováno kódem WIMS-ANL [3], zatímco stochastické metody neutronického řešení jsou implementovány v kódu Serpent [8]. Cílem následující části kapitoly 1 je poskytnout popis metod použitých v procesu generování mikroskopických účinných průřezů jak v kódu WIMS-ANL, tak v kódu Serpent.

### WIMS-ANL

WIMS-ANL je deterministický transportní lattice kód určený pro analýzu aktivních zón výzkumných a energetických reaktorů. Pro výpočet rozložení hustoty toku neutronů  $\phi$  a koeficientu násobení  $k_\infty$ , resp.  $k_{ef}$  je využíváno řešení zjednodušené formy transportní rovnice [21].



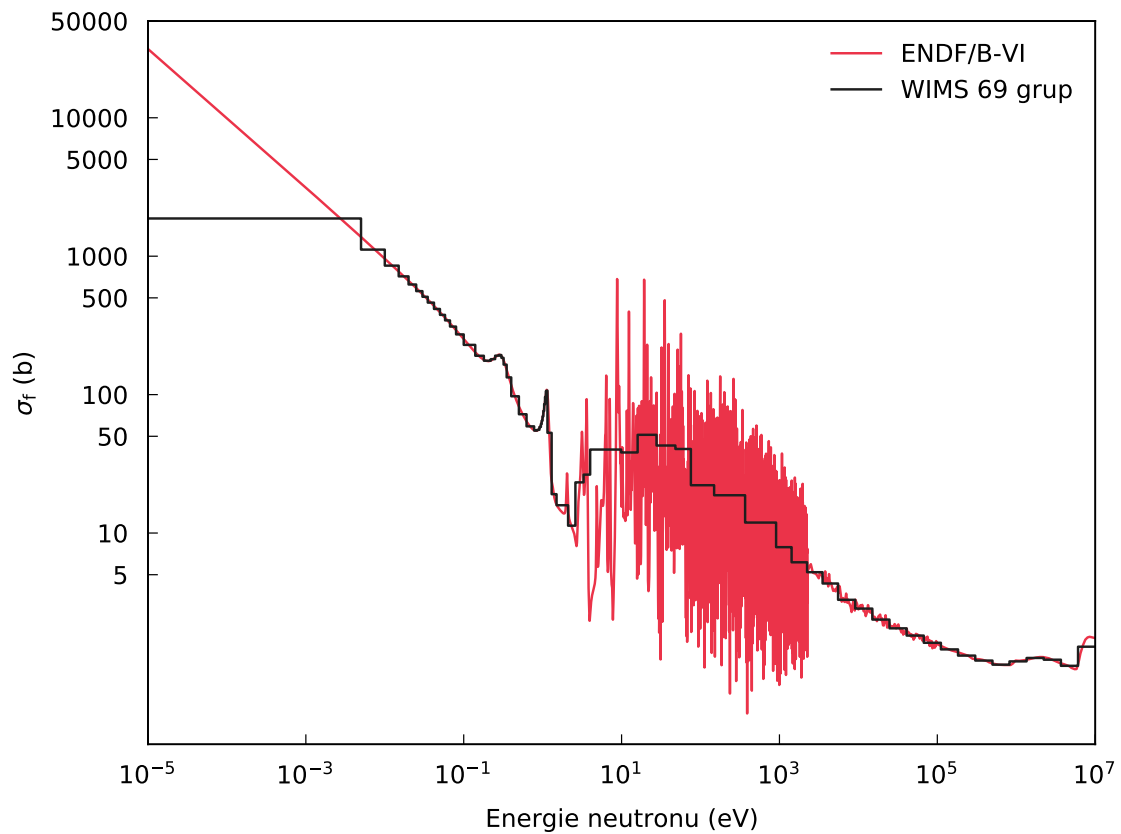
Obr. 1.1: Schéma procesu přípravy dat v kódu WIMS-ANL [21]

Na Obr. 1.1 je znázorněno schéma procesu přípravy jaderných dat v kódu WIMS-ANL. Součástí schématu jsou dva typy vstupů a hlavní počítané výstupy. Prvním vstupem, společným pro řešení všech úloh, je vícegrupová knihovna obsahující teplotně závislé mikroskopické účinné průřezy pro nuklidy standardně využívané v reaktorové fyzice. Knihovna účinných průřezů pro kód WIMS-ANL je rozdělena do jemné grupové struktury obsahující 69 grup. V rámci knihovny je pokryt interval energií od  $1 \times 10^{-5}$  eV do 10 MeV a její součástí je 14 rychlých, 13 rezonančních a 42 tepelných grup. Podrobný přehled použitých grup, včetně hranic energií jednotlivých grup je uveden v příloze B. V případě kódu WIMS-ANL jsou účinné průřezy založeny na zhodnocené knihovně jaderných dat ENDF/B-VI. Přiřazení odpovídajícího mikroskopického účinného průřezu  $\sigma$  pro reakci  $x$  pro danou teplotu a materiál do každé z 69 grup je provedeno vážením podle vztahu [22]:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\int_{E_d}^{E_h} \sigma_x(E) \phi(E) dE}{\int_{E_d}^{E_h} \phi(E) dE} \quad (1.1)$$

kde  $E_d$  a  $E_h$  představuje dolní, resp. horní hranici energie grupy. Protože hustota toku neutronů  $\phi(E)$  pro konkrétní problém není v době přípravy vícegrupové knihovny známa, při aplikaci vztahu (1.1) je použit odhadnutý průběh hustoty toku neutronů. Hustota toku neutronů v oblasti energií rychlých neutronů je odhadnuta na základě štěpného spektra uranu  $^{235}\text{U}$ . V oblasti rezonancí je hustota toku neutronů aproximována v závislosti na energii podle  $1/E$  a pro tepelné spektrum je použito Maxwellovo rozdělení.

Obecně lze konstatovat, že mikroskopické účinné průřezy jsou komplikovanými funkcemi energií neutronů, viz příklad na Obr. 1.2. Rozdělení energetického spektra do diskretních intervalů proto představuje jedno z nejdůležitějších zjednodušení při řešení transportní rovnice. Na Obr. 1.2 je demonstrováno zjednodušení energetické závislosti hodnot mikroskopických účinných průřezů pro štěpení uranu  $^{235}\text{U}$   $\sigma_f$ . Prezentované zjednodušení pro 69 grup je použito ve vícegrupové aplikační knihovně kódu WIMS-ANL.



Obr. 1.2: Závislost účinného průřezu pro štěpení  $^{235}\text{U}$  na energii [3], [10]

Nejčastěji využívanou metodou pro řešení zjednodušené stacionární transportní rovnice je metoda  $S_N$  [23], která je v terminologii související s kódem WIMS-ANL označována jako metoda DSN (*Discrete Ordinates Method*). Základním principem metody je řešení transportní rovnice v několika směrech pro neznámé úhlové hustoty toku neutronů. S využitím Legendrových polynomů a sférických harmonických funkcí je možné transportní rovnici formulovat ve známém tvaru pro 1-D deskovou geometrii:

$$\begin{aligned} \left( \mu \frac{d}{dx} + \Sigma_t(x) \right) \phi(x, \mu) = \\ = \sum_{l=0} \frac{2l+1}{2} \Sigma_{s,l}(x) P_l(\mu) \int_{-1}^1 d\mu' P_l(\mu') \phi(x, \mu') + Q(x, \mu) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Významem levé strany rovnice (1.2) v celkové bilanci soustavy je ztráta neutronů. První člen představuje únik neutronů ze systému a druhý ztrátu neutronů absorpcí, resp. rozptylem. Významem pravé strany rovnice je naopak zisk neutronů, přičemž prvním členem je popsán zisk neutronů prostřednictvím rozptylu. Vznik neutronů ze štěpení je v rovnici (1.2) zastoupen členem  $Q(x, \mu)$ , jehož součástí je také externí zdroj



neutronů, pokud takový zdroj existuje. Podstatou  $S_N$  metody je diskretizace úhlového prostoru do  $N$  směrů, což odpovídá nahrazení integrálu v rovnici (1.2) výrazem:

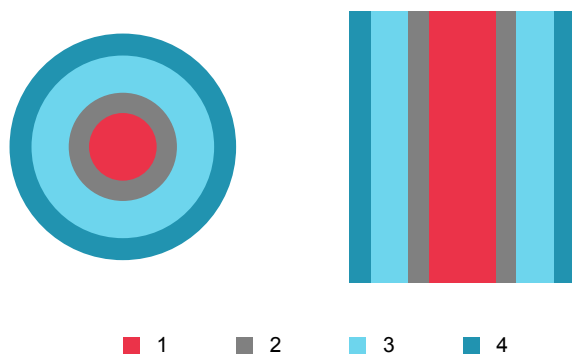
$$\int_{-1}^1 d\mu P_l(\mu) \phi(x, \mu) \cong \sum_n w_n P_l(\mu_n) \phi_n(x) \quad (1.3)$$

kde  $\phi_n \equiv \phi(\mu_n)$  a  $w_n$  jsou váhové konstanty, pro které standardně platí  $\sum_{n=1}^N w_n = 2$ . Další rozšiřující informace k metodě SN, resp. DSN, včetně použití metody ve sférické geometrii, je možné nalézt v literatuře [24].

V kódu WIMS-ANL je pro řešení zjednodušené transportní rovnice implementována také metoda pravděpodobnosti srážek (*Collision Probability Method*) [25]. Tato metoda je založena na rozdělení celé soustavy do určitého počtu objemů, ve kterých jsou předpokládány konstantní účinné průřezy a stejné materiálové složení. Pro případ 1-D deskové geometrie jsou dílčí objemy buněk  $V_i$  reprezentovány intervaly o šířce  $\Delta_i$ . Pro každý takový interval je možné vyjádřit bilanci hustoty toku neutronů:

$$\Sigma_{t,i} \Delta_i \phi_i = \sum_j P^{ji} \frac{[(\Sigma_{s,j} + \nu \Sigma_{f,j}) \phi_j + S_{0,j}]}{\Sigma_{t,j}} \quad (1.4)$$

Počet interakcí v buňce  $\Delta_i$  odpovídá neutronům získaným rozptylem, štěpením nebo externím zdrojem  $S_0$  ve všech buňkách  $\Delta_j$ . Pravděpodobnost přechodu neutronů z buňky  $\Delta_j$  do buňky  $\Delta_i$  je dána výrazem  $P^{ji}$ . Podrobné odvození této pravděpodobnosti je uvedeno v literatuře [24].



Obr. 1.3: Základní buňka; válec (vlevo) a deska (vpravo)

Tab. 1.1: Regiony základní buňky

Index	Region
1	Palivo
2	Pokrytí
3	Chladivo
4	Moderátor

Zjednodušená forma transportní rovnice je v kódu WIMS-ANL řešena v několika výpočtových úrovních, které jsou odlišné v geometrii, grupových strukturách, vstupních parametrech a v dalších předpokladech. Základní schéma výpočtů je rozděleno do následujících čtyř úrovní [21]:

1. Výpočet základní buňky v jemné grupové struktuře pro 69 grup
2. Výpočet detailní geometrie ve zkondenzované hrubé grupové struktuře
3. Řešení vlivu úniku neutronů
4. Výpočet vyhoření

V první úrovni je proveden výpočet základní buňky pro vícegrupovou jemnou strukturu pro 69 grup. Základní buňka je složena ze čtyř typů regionů označených příslušným indexem, viz Tab. 1.1. Ke každému materiálu definovanému v počátečním vstupu je přiřazen jeden z možných indexů regionu. Všechny materiály jsou před zahájením výpočtu sloučeny do jedné základní buňky, viz Obr. 1.3. Základní buňka je tvořena soustavou válců, koulí nebo deskou s vrstvami, kterými je zachováno poměrové zastoupení jednotlivých typů definovaných materiálů. Vybrané materiály, zejména silné absorbátory, je možné z výpočtu základní buňky vyloučit. Jednorozměrná transportní rovnice je následně řešena v prvních třech regionech základní buňky, přičemž rozložení hustoty toku neutronů v moderátoru je určeno na základě difuzní teorie s použitím hraniční podmínky svazující hustotu proudu a toku neutronů:

$$\vec{J}(E, r_c) = 2\pi r_c D_M \frac{\partial \phi}{\partial r}(E, r_c) \quad (1.5)$$

kde  $\vec{J}$  je hustota proudu neutronů,  $\phi$  hustota toku neutronů,  $r_c$  poloměr hranice chladivo-moderátor a  $D_M$  je difuzní koeficient moderátoru. Hustota toku neutronů v moderátoru je tedy určena jako funkce řešení transportní rovnice v prvních třech regionech základní buňky. Po ukončení první úrovně výpočtu jsou k dispozici celkem tři hlavní výstupy:

- vícegrupové rozložení hustoty toku neutronů ve všech regionech základní buňky,
- koeficient násobení nekonečné soustavy  $k_\infty$ ,
- makroskopické účinné průřezy pro zvolenou hrubou grupovou strukturu.

V rámci druhé výpočtové úrovně je transportní rovnice řešena v podrobnější zadané geometrii s použitím menšího počtu grup ve zvolené hrubé grupové struktuře. Konstanty potřebné k řešení rovnice jsou převzaty z výstupu předchozí úrovně. V tomto případě je k řešení transportní rovnice možné využít jak metodu DSN, tak metodu pravděpodobnosti srážek. Řešení transportní rovnice v uvedené formě je provedeno v každé z definovaných buněk soustavy. Použitím většího počtu buněk je tak možné popsat detailní prvky geometrie a dílčí výsledky uplatnit při závěrečném výpočtu celkové buňky. Pro tyto účely je určena metoda SUPERCELL, ve které je zahrnuta celková buňka SUPERCELL spolu s doplňkovými buňkami. Prostřednictvím doplňkových buněk je možné modelovat detailní části soustavy, jejichž spektrum lze použít při výpočtu SUPERCELL buňky. Příklady použití metody SUPERCELL jsou uvedeny v příloze F manuálu kódu WIMS-ANL [26].

Třetí úroveň výpočtu v kódu WIMS-ANL je zaměřena na řešení vlivu úniku neutronů. V této úrovni je provedena korekce s využitím geometrických faktorů  $B_r$  a  $B_z$  v radiálním i axiálním směru. Geometrické faktory  $B_r$ ,  $B_z$  je možné zadat manuálně ve vstupním souboru. V opačném případě jsou obě hodnoty vypočítány pro ekvivalentní kritický deskový systém v hrubé a ve 2grupové struktuře s použitím difuzního přiblížení. Výstupem třetí úrovně je tedy efektivní koeficient násobení soustavy  $k_{ef}$ .

Výpočet vyhoření, který je součástí čtvrté úrovně, je prováděn pro předem stanovený výkon a pro zadaný počet časových kroků. Účelem výpočtu vyhoření je mimo jiné příprava mikroskopických účinných průřezů závislých na izotopických změnách v palivu. Tato závislost je určena rozložením hustoty toku neutronů, která odpovídá řešení transportní rovnice s danými makroskopickými účinnými průřezy, které jsou funkcemi atomových hustot. Pro určení časového vývoje koncentrací izotopů v uvažované buňce je nutné řešit sadu  $I$  kinetických rovnic pro každou grupu  $g$  z jemné grupové struktury:

$$\frac{dN_i}{dt}(t) = \sum_{j=1}^I \left[ \lambda_j \alpha_{j \rightarrow i} + \sigma_{j,x}^g \beta_{j \rightarrow i,x} \phi^g(t) \right] N_i(t) \quad (1.6)$$

kde  $N_i(t)$  je hledaná atomová hustota izotopu  $i$  v čase  $t$ ,  $\lambda_j$  je rozpadová konstanta izotopu  $j$ ,  $\sigma_{j,x}^g$  je mikroskopický účinný průřez pro reakci  $x$  pro izotop  $j$  a konstanty  $\alpha_{j \rightarrow i}$ , resp.  $\beta_{j \rightarrow i,x}$  pro  $j \neq i$  představují výtěžky produkce izotopu  $i$  z rozpadu resp. z neutronové interakce s izotopem  $j$ . Pro  $i = j$  platí, že  $\alpha_{i \rightarrow i} = \beta_{i \rightarrow i,x} = -1$  [27].

Na základě znalosti rozložení hustoty toku neutronů v každém časovém kroku vyhoření je možné generovat mikroskopické účinné průřezy ve výchozí hrubé grupové struktuře pro nuklid  $i$  a pro reakci  $x$ , které jsou dále závislé na prostorovém uspořádání a izotopických změnách:

$$\sigma_{i,x}^G(t) = \frac{\sum_z V_z \sum_{g \in G} \sigma_{i,x}^g \phi_z^g(t)}{\sum_z V_z \sum_{g \in G} \phi_z^g(t)} \quad (1.7)$$

kde každá grupa  $G$  je tvořena různým počtem grup  $g$  z jemné grupové struktury a výraz  $V_z$  představuje objem materiálu v části geometrie  $z$ , obsahující nuklid  $i$ .

## Serpent

Druhým způsobem přípravy účinných průřezů pro deterministické analýzy aktivních zón je použití stochastických Monte Carlo kódů. Hlavní motivací pro přípravu účinných průřezů pomocí těchto kódů je možnost vytvářet modely komponent o libovolné geometrii. Tím je zajištěno, že vypočítané rozložení hustoty toku neutronů bude co nejvíce odpovídat reálné distribuci neutronů v systému. S reálnějším rozložením hustoty toku neutronů jsou následně připravovány i reálnější hodnoty účinných průřezů. Na druhou stranu nevýhodou přípravy jaderných dat pomocí stochastických kódů, oproti kódům deterministickým, může být poměrně velká závislost výsledků na statistické neurčitosti a také větší výpočetní náročnost.

Pro přípravu účinných průřezů je standardně využívána celá řada stochastických výpočetních kódů, např. kód McCARD [28], OpenMC [29] nebo MCNP [9], který byl v minulosti přímo využíván společně s výpočetním kódem REBUS-PC [30]. Dalším kódem, který byl pro účely generování účinných průřezů z velké části přímo vyvinut, je výpočetní kód Serpent [18].

Serpent je ve většině případů využíván zpravidla pro generování makroskopických účinných průřezů pro zhomogenizované části aktivních zón reaktorů. Na druhou stranu je místo makroskopických dat možné připravit i odpovídající hodnoty mikroskopických účinných průřezů, které jsou potřebné pro výpočty v kódu REBUS-PC.

Pro generování mikroskopických účinných průřezů v kódu Serpent je možné využít detektory zprostředkované kartou *det*. Detektory jsou obecně určeny k výpočtům hustoty toku neutronů ve zvoleném objemu, buňce, universu nebo materiálu. Použitím parametru *dr* je možné detektory využít i k výpočtu reakčních rychlostí integrovaných přes definovaný prostor objemů a energií [31]:

$$R = \frac{1}{V} \int_V \int_{\Delta E} f(E, \vec{r}) \phi(E, \vec{r}) dE dV \quad (1.8)$$

Prostřednictvím funkce  $f(E, \vec{r})$  je výpočtu přiřazeno číslo MT odpovídající typu reakce podle formátu ENDF. Reakční rychlost  $R$  pro zvolený typ reakce je tedy závislá na určené hustotě toku neutronů  $\phi(E, \vec{r})$  a počtu odpovídajících interakcí neutronů. Hodnotu účinného průřezu pro vybraný nuklid  $i$  a reakci  $x$  v definovaném prostoru

lze následně vypočítat jako podíl reakční rychlosti a celkové hustoty toku neutronů:

$$\Sigma_{i,x} = \frac{\int_V \int_{\Delta E} f_{i,x}(E, \vec{r}) \phi(E, \vec{r}) dE dV}{\int_V \int_{\Delta E} \phi(E, \vec{r}) dE dV} \quad (1.9)$$

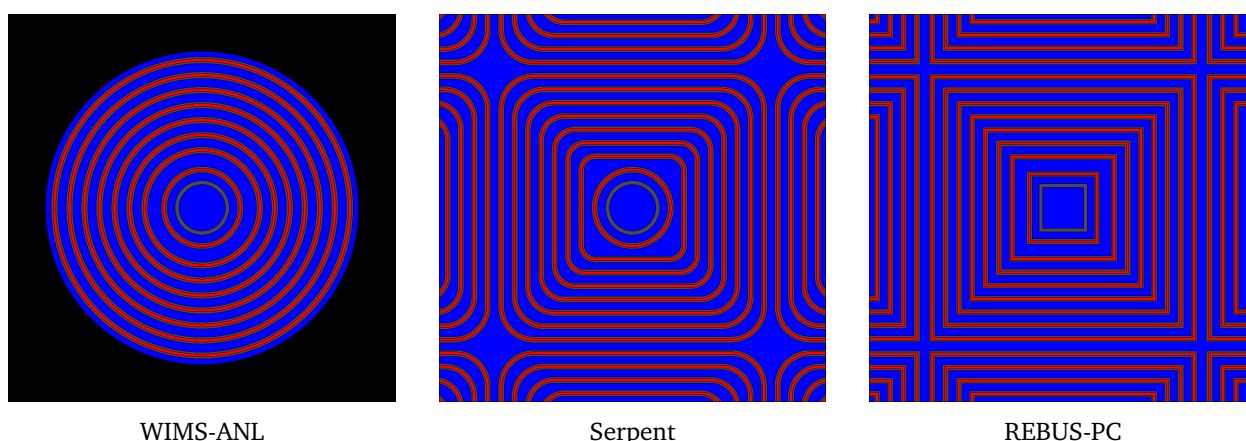
Makroskopický účinný průřez je definován jako součin mikroskopického účinného průřezu a atomové hustoty, tj.  $\Sigma = \sigma N$ . Proto lze vztah (1.9) použít pro výpočet mikroskopického účinného průřezu, pokud je reakční rychlost, daná funkcí  $f_{i,x}(E, \vec{r})$ , určována pro nuklid o jednotkové atomové hustotě. Kromě mikroskopických účinných průřezů potřebných pro kód REBUS-PC je s využitím uvedené teorie možné nalézt další požadovaný parametr  $\nu$ , kterým je označen počet neutronů ze štěpení. V takovém případě je potřeba zvolit odpovídající funkce  $f_{i,x}(E, \vec{r})$  a určit podíl makroskopických účinných průřezů pro celkovou produkci neutronů ze štěpení a štěpení pro uvažovaný nuklid:

$$\nu = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_f} \quad (1.10)$$

Výpočetní kód Serpent byl pro přípravu mikroskopických účinných průřezů pro kód REBUS použit již v minulosti [32]. Na základě této skutečnosti bylo možné předpokládat proveditelnost přípravy všech potřebných parametrů pro formát ISOTXS, resp. A.ISO. Podstatným omezením výpočetního kódu Serpent z hlediska generování jaderných dat pro kód REBUS-PC je absence možnosti přípravy mikroskopických rozptylových matic pro jednotlivé nuklidy přítomné v systému [33]. Možným řešením uvedeného omezení je vygenerování makroskopické rozptylové matice v kódu Serpent prostřednictvím parametru `set gcu` pro požadovaný materiál a její následné zapsání do karty 7D souboru ISOTXS, viz příloha A, jako rozptylové matice pro fiktivní izotop, jehož ostatní účinné průřezy jsou nulové. Karty 7D pro ostatní nuklidy uvažovaného materiálu jsou v tomto případě tvořeny nulovými mikroskopickými rozptylovými maticemi. Vytvořený fiktivní izotop je dále nutné přidat k požadovanému materiálu ve vstupním souboru kódu REBUS-PC s jednotkovou atomovou hustotou [34].

## 1.2 Porovnání metod a vliv knihoven

S využitím metod popsaných v předchozí části této kapitoly je možné zahájit přípravu jaderných dat pro kód REBUS-PC jak v kódu WIMS-ANL, tak v kódu Serpent. Cílem je provést porovnání hodnot mikroskopických účinných průřezů a dalších parametrů připravených pomocí obou kódů na základě rozdílných verzí evaluovaných knihoven jaderných dat ENDF/B pro výpočet vhodné modelové soustavy. Pro deterministický kód WIMS-ANL je k dispozici pouze vícegrupová knihovna vstupních dat založená na knihovně ENDF/B-VI. V případě stochastického kódu Serpent je možné účinné průřezy generovat na základě knihoven ENDF/B-VI, ENDF/B-VII a ENDF/B-VIII. V důsledku je tedy možná příprava a porovnání celkem 4 sad účinných průřezů. Použitím těchto 4 sad v odpovídajících výpočtech v kódu REBUS-PC lze dále diskutovat jejich vliv na výslednou hodnotu koeficientu násobení soustavy.



Obr. 1.4: Geometrie modelu 8trubkového PS; palivo – červeně, pokrytí – šedě, moderátor – modře

Pro účely porovnání přípravy jaderných dat pro výpočetní kód REBUS-PC byl zvolen detailní 3D model 8trubkového palivového souboru typu IRT-4M v nekonečné mříži. Výchozím podkladem pro vytvoření tohoto modelu je výpočet paliva IRT-4M, který byl proveden v rámci výzkumného úkolu [2]. Na Obr. 1.4 je zobrazen řez geometrií modelu 8trubkového PS v rovině  $x, y$  jak pro kódy pro přípravu jaderných dat, tak pro kód REBUS-PC pro hlavní neutronický výpočet. Transformace geometrie mezi jednotlivými kódy je provedena při zachování objemů všech regionů soustavy. Tím je následně zachováno i poměrové zastoupení paliva, pokrytí a moderátoru. Všechny využití informace o geometrických a materiálových charakteristikách 8trubkového PS

jsou obsahem 4. kapitoly výzkumného úkolu [2]. Jediným rozdílem mezi současným modelem 8trubkového PS IRT-4M oproti výzkumnému úkolu je úprava materiálového složení palivového jádra tak, aby co nejvíce odpovídalo složení, které je použité v aktuálně využívaném výpočetním modelu reaktoru LVR-15 v kódu NODER. Aktualizované materiálové složení palivového jádra je uvedeno v Tab. 1.2.

Tab. 1.2: Materiálové složení paliva

Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )	
	původní	aktualizovaná
$^{235}U$	$1,41408e-3$	$1,39383e-3$
$^{238}U$	$5,66173e-3$	$5,60969e-3$
$^{16}O$	$1,42980e-2$	$1,40067e-2$
$^{27}Al$	$4,22670e-2$	$4,17923e-2$

Tab. 1.3: Parametry použitých grup

Grupa	Horní energie (eV)	Dolní energie (eV)
1	$1,000e+7$	$5,000e+6$
2	$5,000e+6$	$9,118e+3$
3	$9,118e+3$	$1,123e+0$
4	$1,123e+0$	$6,250e-1$
5	$6,250e-1$	$2,500e-1$
6	$2,500e-1$	$5,800e-3$
7	$5,800e-3$	$1,000e-5$

Kromě nuklidů, z Tab. 1.2, obsažených v palivové matici jsou součástí modelu PS ještě další tři nuklidy – hliník  $^{27}Al$  obsažený v pokrytí a izotopy vodíku a kyslíku, kterými je tvořen vodní moderátor. Jaderná data byla tedy generována pro celkem 7 nuklidů. V případě kódu Serpent byla navíc připravována data pro jeden fiktivní pseudoizotop pro každý materiál. Sada dat pro každý pseudoizotop, pro palivo, pokrytí a moderátor, je tvořena makroskopickými rozptylovými maticemi a makroskopickými účinnými průřezy pro transport. Hodnoty ostatních účinných průřezů jsou nulové. Protože rozptyl je při přípravě dat pomocí kódu Serpent zahrnut v pseudoizotopech jednotlivých materiálů, mikroskopické rozptylové matice a mikroskopické účinné průřezy pro transport jsou u reálných nuklidů nulové. Při neutronickém výpočtu v kódu REBUS-PC jsou uvedené pseudoizotopy zastoupeny s jednotkovou atomovou hustotou v každém ze tří materiálů. Tím je dosažena správnost neutronického řešení.

Všechna jaderná data byla připravována pro 7 energetických grup, které jsou popsány v Tab. 1.3. Počet grup spolu s šířkou energetických intervalů byl zvolen na základě analýzy provedené ve výzkumném úkolu [2]. Pro každý nuklid obsažený v modelu PS a pro každou ze sedmi grup byla připravována zaprvé společná data a zadruhé data, která jsou významná pro jednotlivé nuklidy. Mezi společná jaderná data je zařazen celkový mikroskopický účinný průřez  $\sigma_t$ , mikroskopické účinné průřezy pro

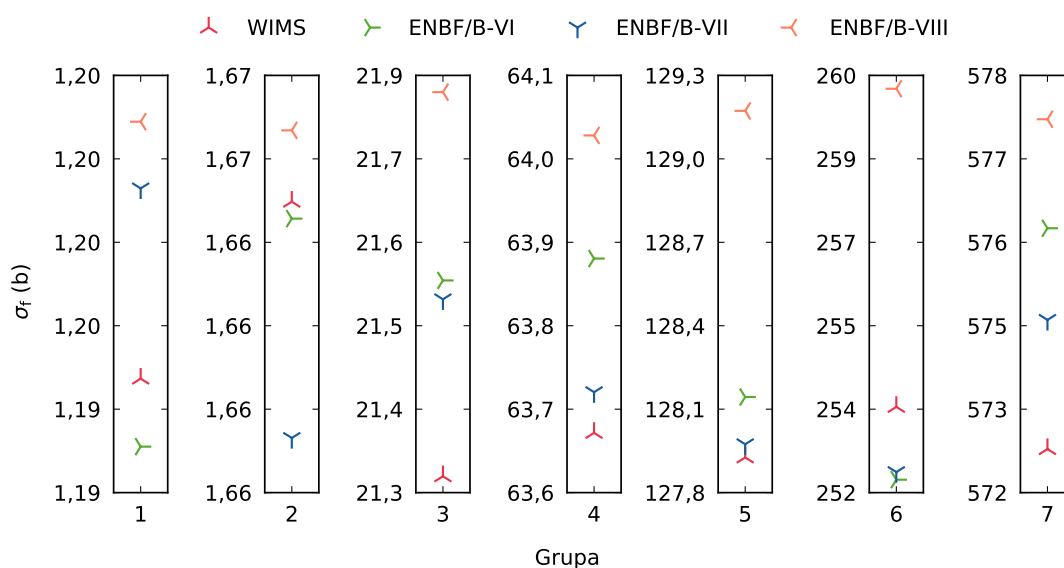


radiační záchyt  $\sigma_\gamma$  a pro transport  $\sigma_{tr}$  a mikroskopické rozptylové matice. Ve druhé skupině jaderných dat jsou obsažena data generovaná pouze pro vybrané nuklidy jako např. mikroskopický účinný průřez pro štěpení  $\sigma_f$  a počet neutronů ze štěpení  $\nu$  nebo mikroskopické účinné průřezy pro reakce  $(n, 2n)$ ,  $(n, \alpha)$  a  $(n, p)$ .

V následující části je provedeno porovnání vybraných účinných průřezů a dat připravených pomocí kódu WIMS-ANL a knihovny ENDF/B-VI a kódu Serpent s využitím knihoven ENDF/B-VI, VII a VIII. Konkrétně jsou zde srovnány mikroskopické účinné průřezy pro štěpení  $^{235}\text{U}$  a příslušný počet neutronů ze štěpení a mikroskopické účinné průřezy pro reakci  $(n, \gamma)$  na  $^{238}\text{U}$ . Dále jsou zde uvedeny makroskopické účinné průřezy pro transport a pro rozptyl mezi vybranými grupami pro moderátor. Uvedená data jsou zobrazena graficky na Obr. 1.5 – Obr. 1.9. Číselné hodnoty jsou zapsány v Tab. 1.4 – Tab. 1.8. Tyto hodnoty jsou navíc doplněny o relativní odchylky mezi kódy WIMS-ANL a Serpent, které jsou určeny podle vztahu:

$$RO = \frac{y_s - y_w}{y_w} \times 100 \quad (1.11)$$

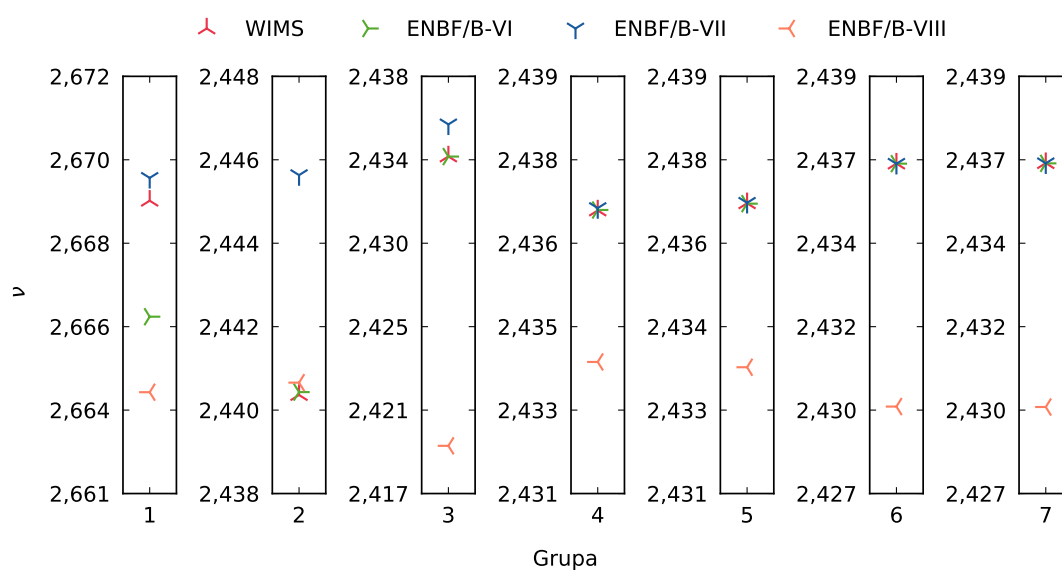
kde  $y_s$  je veličina určená kódem Serpent pro uvažované evaluované knihovny jaderných dat a  $y_w$  je veličina vypočítaná kódem WIMS-ANL na základě knihovny ENDF/B-VI. Doplnující analýza jaderných dat pro model 8trubkového PS je obsahem přílohy C. Součástí této přílohy jsou rozšiřující data pro zbylé nuklidy a materiály.



Obr. 1.5: Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro štěpení  $\sigma_f$  pro  $^{235}\text{U}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 1.4: Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro štěpení  $\sigma_f$  pro  $^{235}\text{U}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

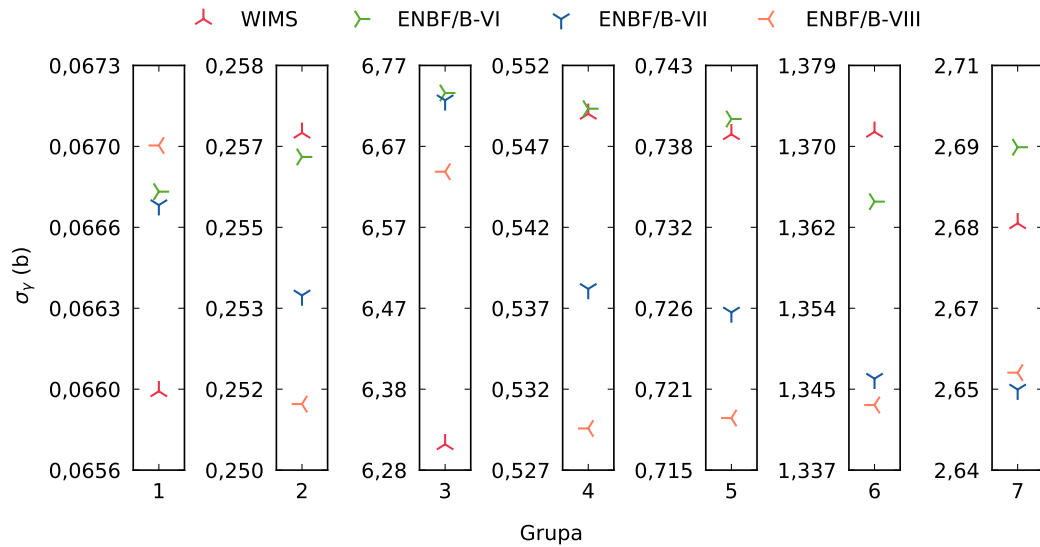
Grupa	$\sigma_f^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_f^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_f^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_f^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	1,19	1,19	-0,1	1,20	+0,4	1,20	+0,6
2	1,67	1,67	0,0	1,66	-0,4	1,67	+0,1
3	21,33	21,59	+1,2	21,56	+1,1	21,83	+2,4
4	63,70	63,88	+0,3	63,74	+0,1	64,01	+0,5
5	127,9	128,1	+0,2	127,9	0,0	129,1	+1,0
6	253,7	252,3	-0,6	252,4	-0,5	259,9	+2,4
7	572,9	575,8	+0,5	574,6	+0,3	577,2	+0,8



Obr. 1.6: Počet neutronů ze štěpení  $\nu$  pro  $^{235}\text{U}$  určený kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 1.5: Počet neutronů ze štěpení  $\nu$  pro  $^{235}\text{U}$  určený kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

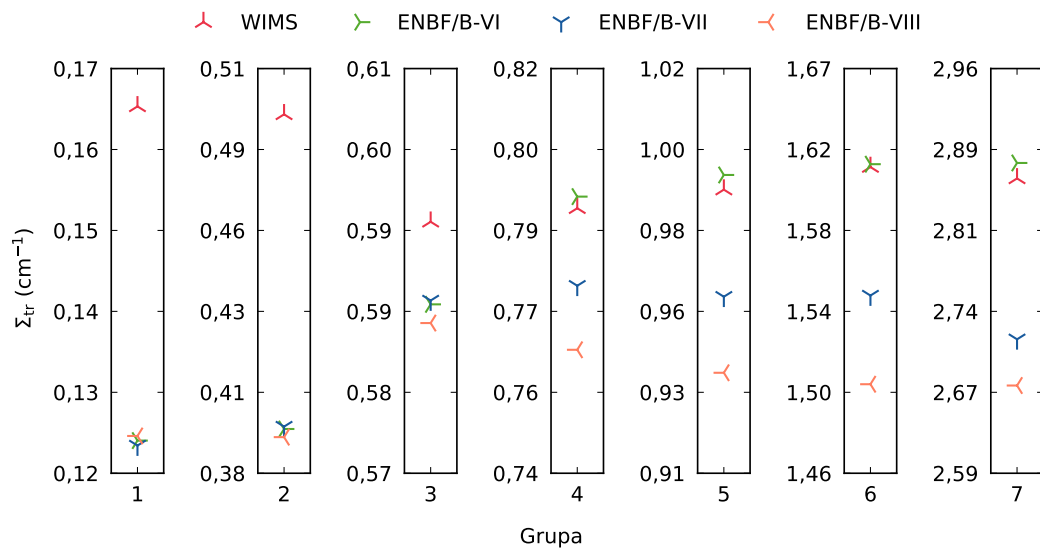
Grupa	$\nu^{\text{wims}}$	$\nu^{\text{VI}}$	RO (%)	$\nu^{\text{VII}}$	RO (%)	$\nu^{\text{VIII}}$	RO (%)
1	2,669	2,666	-0,1	2,670	0,0	2,664	-0,2
2	2,440	2,440	0,0	2,445	+0,2	2,440	0,0
3	2,434	2,434	0,0	2,436	+0,1	2,419	-0,6
4	2,437	2,437	0,0	2,437	0,0	2,434	-0,1
5	2,437	2,437	0,0	2,437	0,0	2,434	-0,1
6	2,437	2,437	0,0	2,437	0,0	2,430	-0,3
7	2,437	2,437	0,0	2,437	0,0	2,430	-0,3



Obr. 1.7: Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro radiační záchyt  $\sigma_\gamma$  na  $^{238}\text{U}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 1.6: Hodnoty mikroskopických účinných průřezů pro radiační záchyt  $\sigma_\gamma$  na  $^{238}\text{U}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

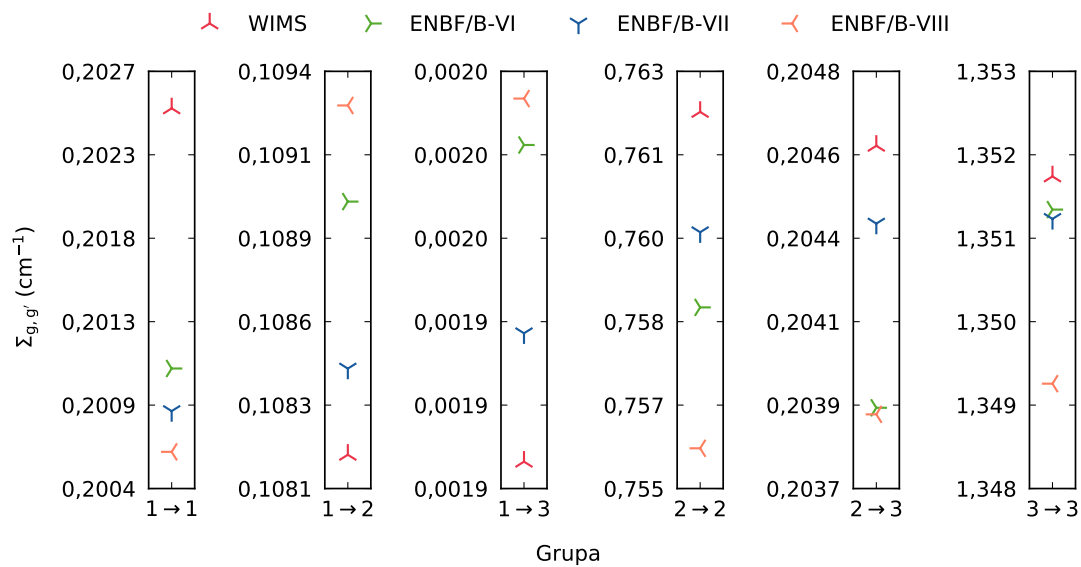
Grupa	$\sigma_\gamma^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_\gamma^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_\gamma^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_\gamma^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	0,0660	0,0668	+1,3	0,0667	+1,2	0,0670	+1,6
2	0,257	0,256	-0,2	0,253	-1,2	0,252	-2,0
3	6,31	6,74	+6,8	6,73	+6,7	6,64	+5,3
4	0,549	0,550	+0,1	0,538	-2,0	0,529	-3,6
5	0,738	0,740	+0,1	0,726	-1,7	0,719	-2,7
6	1,372	1,365	-0,5	1,346	-1,9	1,344	-2,1
7	2,68	2,69	+0,5	2,65	-1,0	2,66	-0,9



Obr. 1.8: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro moderátor připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 1.7: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro moderátor připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Grupa	$\Sigma_{tr}^{wims}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{tr}^{VI}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VIII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
1	0,17	0,12	-26,5	0,12	-26,9	0,13	-26,1
2	0,50	0,40	-20,6	0,40	-20,5	0,39	-21,1
3	0,60	0,59	-1,6	0,59	-1,5	0,58	-2,0
4	0,79	0,79	+0,3	0,78	-1,8	0,77	-3,3
5	0,99	0,99	+0,4	0,96	-3,0	0,94	-5,2
6	1,62	1,62	+0,1	1,55	-4,0	1,51	-6,8
7	2,86	2,88	+0,5	2,71	-5,1	2,67	-6,6



Obr. 1.9: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v moderátoru mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

Tab. 1.8: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v moderátoru mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

Grupa	$\Sigma_{g,g'}^{wims}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{g,g'}^{VI}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{VII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{VIII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
1 → 1	0,2025	0,2011	-0,7	0,2009	-0,8	0,2006	-0,9
1 → 2	0,1082	0,1090	+0,7	0,1085	+0,3	0,1093	+1,0
1 → 3	0,0019	0,0020	+1,2	0,0019	+0,5	0,0020	+1,4
2 → 2	0,762	0,759	-0,5	0,760	-0,3	0,756	-0,8
2 → 3	0,2046	0,2039	-0,4	0,2044	-0,1	0,2039	-0,4
3 → 3	1,352	1,352	0,0	1,351	0,0	1,349	-0,2

Z porovnání jaderných dat připravených pomocí kódů WIMS-ANL a Serpent z Obr. 1.5 – Obr. 1.9 a Tab. 1.4 – Tab. 1.8 a z rozšiřujících dat v příloze C je možné vidět, že relativní odchylky mezi oběma kódy jsou nejčastěji v řádu desetin procent. Na druhou stranu lze pozorovat i odchylky v řádu jednotek procent a ve specifických případech, jako např. u makroskopických účinných průřezů pro transport v moderátoru v rychlých grupách, i relativní odchylky dosahující až  $-26\%$ . Relativní odchylky jsou obecně větší mezi daty z kódu Serpent založenými na knihovně ENDF/B-VIII než na starší verzi knihovny ENDF/B-VI a VII. Převážná většina všech hodnot připravených pomocí kódu Serpent byla určena s relativní statistickou odchylkou (RSO) v řádu  $10^{-4}$ . Výjimkou jsou hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl mezi některými grupami, kdy relativní statistická odchylka byla pozorována v nižších jednotkách procent. Relativní statistická odchylka je v kódu Serpent určena jako podíl druhé odmocniny variance  $\sigma_{\bar{x}}$  a střední hodnoty počítané veličiny  $\bar{x}$ , [35] tj.

$$RSO = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \quad (1.12)$$

Relativní statistická odchylka tedy nemá zásadní vliv na určování hodnot účinných průřezů a dalších veličin. Mimo odlišnou metodu určování hustoty toku neutronů a vliv rozdílného energetického spektra mezi kódy WIMS-ANL a Serpent je hlavním zdrojem odchylek mezi určenými jadernými daty základní skutečnost, že jednotlivé výpočty jsou založeny na různých verzích evaluovaných knihoven ENDF/B.

Tab. 1.9: Hodnoty koeficientu násobení  $k_{\infty}$  pro 8trubkový PS typu IRT-4M

Kód/ ENDF/B-	$k_{\infty}^{W/S}$	$k_{\infty}^R$	$\Delta k_{\infty}^{W/S, R}$ (pcm)	$\Delta k_{\infty}^R$ (pcm)
WIMS-ANL (VI)	1,662 18	1,663 97	179	0
Serpent (VI)	1,654 04	1,656 35	231	-762
Serpent (VII)	1,656 98	1,659 54	256	-443
Serpent (VIII)	1,651 42	1,654 07	265	-990

V další části je zkoumán vliv analyzovaných odchylek v hodnotách účinných průřezů na určení koeficientu násobení v kódu REBUS-PC. V Tab. 1.9 jsou zapsány hodnoty koeficientu násobení  $k_{\infty}$  pro nekonečnou soustavu tvořenou 8trubkovým PS typu IRT-4M určené kódem REBUS-PC na základě jaderných dat připravených kódy

WIMS-ANL a Serpent při použití rozdílných verzí knihoven ENDF/B. Hodnoty  $k_{\infty}^{W/S}$  představují koeficient násobení vypočítaný kódy WIMS-ANL a Serpent, kterými byly připraveny účinné průřezy pro kód REBUS-PC. Koeficient násobení z kódu REBUS-PC je označen  $k_{\infty}^R$ . Obsahem Tab. 1.9 jsou dále odchylky mezi koeficienty násobení z kódu WIMS-ANL, resp. Serpent a z kódu REBUS-PC. Tyto odchylky jsou označeny jako  $\Delta k_{\infty}^{W/S, R}$ . Zbýlými hodnotami jsou odchylky mezi koeficientem násobení určeným kódem REBUS-PC na základě jaderných dat z kódu WIMS-ANL a koeficienty násobení vypočítanými na základě dat z kódu Serpent pro odpovídající knihovny.

Vliv připravených jaderných dat, z nichž některé jsou prezentovány na Obr. 1.5 – Obr. 1.9, v Tab. 1.4 – Tab. 1.8 anebo v příloze C, na výpočet koeficientu násobení v kódu REBUS-PC je podrobně rozebrán v Tab. 1.10. Jako výchozí hodnota  $k_{\infty}$  je uvažován koeficient násobení určený na základě dat z kódu WIMS-ANL a knihovny ENDF/B-VI z Tab. 1.9, tj. 1,66397. V Tab. 1.10 jsou uvedeny odchylky od této výchozí hodnoty při nahrazení vybraných jaderných dat pro konkrétní nuklidy nebo materiály za data určená kódem Serpent. Změna jaderných dat je provedena pro mikroskopické účinné průřezy pro všechny nuklidy a pro makroskopické účinné průřezy pro transport a pro rozptyl mezi grupami pro palivo, pokrytí a moderátor.

Tab. 1.10: Vliv jaderných dat na výpočet  $k_{\infty}$  v kódu REBUS-PC

Změna	$\Delta k_{\infty}$ (pcm)		
	ENDF/B-VI	ENDF/B-VII	ENDF/B-VIII
$\sigma$ pro $^{235}\text{U}$ v palivu	26	28	-500
$\sigma$ pro $^{238}\text{U}$ v palivu	-757	-684	-538
$\sigma$ pro $^{16}\text{O}$ v palivu	4	20	3
$\sigma$ pro $^{27}\text{Al}$ v palivu	8	21	21
$\sigma$ pro $^{27}\text{Al}$ v pokrytí	12	36	36
$\sigma$ pro $^1\text{H}$ v moderátoru	-21	-4	-34
$\sigma$ pro $^{16}\text{O}$ v moderátoru	27	146	24
$\Sigma_{\text{tr}}$ v palivu	-5	-5	-4
$\Sigma_{\text{tr}}$ v pokrytí	0	-1	-1
$\Sigma_{\text{tr}}$ v moderátoru	-2	18	25
$\Sigma_{g,g'}$ v palivu	-1	0	-1
$\Sigma_{g,g'}$ v pokrytí	-1	1	1
$\Sigma_{g,g'}$ v moderátoru	-50	-15	-22

Podle výsledných koeficientů násobení z Tab. 1.9 jsou odchylky  $\Delta k_{\infty}^{W/S,R}$  mezi kódem pro přípravu dat a kódem REBUS-PC od 179 do 265 pcm. Tento rozdíl v přechodu od kódu pro přípravu dat ke kódu REBUS-PC může být založen na odlišném geometrickém rozložení modelu v rámci různých výpočetních kódů. Na druhou stranu větší odchylky lze pozorovat v případě koeficientu násobení určeného kódem REBUS-PC na základě dat z odlišných knihoven ENDF/B. Odchylky  $\Delta k_{\infty}^R$  představují rozdíl  $-443$  až  $-990$  pcm. Velikost těchto odchylek je ovlivněna přímo verzí knihovny ENDF/B, a také spojitým energetickým spektrem použitým při neutronických výpočtech ve stochastickém kódu Serpent.

Při podrobném rozboru vlivu jaderných dat na koeficient násobení v kódu REBUS-PC z Tab. 1.10 je možné pozorovat největší odchylku v případě změny mikroskopických účinných průřezů pro uran  $^{238}\text{U}$  v palivu. Velikost odchylky je v tomto případě od  $-538$  do  $-757$  pcm, což představuje významný podíl z odchylek  $\Delta k_{\infty}^R$  v Tab. 1.9. Tato odchylka je převážně způsobena mikroskopickým účinným průřezem pro radiační záchyt  $\sigma_{\gamma}$ , jehož hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 1.7, resp. v Tab. 1.6. Zde je největší rozdíl v grupě 3, kde jsou relativní odchylky mezi jednotlivými účinnými průřezy až  $+6,8\%$ . Dalším významným rozdílem v koeficientu násobení je odchylka  $-500$  pcm pro mikroskopické účinné průřezy pro uran  $^{235}\text{U}$  s využitím knihovny ENDF/B-VIII, která je výrazně odlišná od obou předchozích verzí. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena přímo verzí knihovny. Obdobně je tento rozdíl možné pozorovat i u mikroskopických účinných průřezů pro kyslík v moderátoru pro data z knihovny ENDF/B-VII. Odchylky v koeficientu násobení způsobené zbývajícími změnami mikroskopických účinných průřezů dosahují maximálně nižších desítek pcm. V případě makroskopických účinných průřezů pro palivo a pokrytí jsou odchylky v koeficientu násobení zanedbatelné. Rozdíly v řádu nižších desítek pcm lze nalézt u změn obou hodnot makroskopických účinných průřezů pro moderátor.

## 2 Homogenizace paliva

Pro deterministické 3D výpočty aktivních zón reaktorů není v současné době, vzhledem k mimořádné výpočetní náročnosti, možné přímé použití detailně namodelovaných palivových souborů, viz Obr. 1.4 v kapitole 1. Z tohoto důvodu je nutné před zahájením celozónových výpočtů provést zjednodušení geometrie paliva. Tento proces je označován jako homogenizace a spočívá ve sloučení všech materiálů tvořících PS do jedné či více homogenních oblastí. Při výpočtech takto zjednodušených komponent jsou použity účinné průřezy připravené pro původní podrobné rozložení geometrie.

Hlavním obsahem této kapitoly je provedení homogenizace tří typů palivových souborů IRT-4M pro 3D výpočet aktivní zóny reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC. V rámci kampaní na výzkumném reaktoru LVR-15 jsou standardně využívány 8trubkové PS a 6trubkové PS, které obsahují absorbátory v podobě regulačních tyčí. V případě vytažené regulační tyče je volný prostor zastoupen hliníkovým vytěsňitelem.

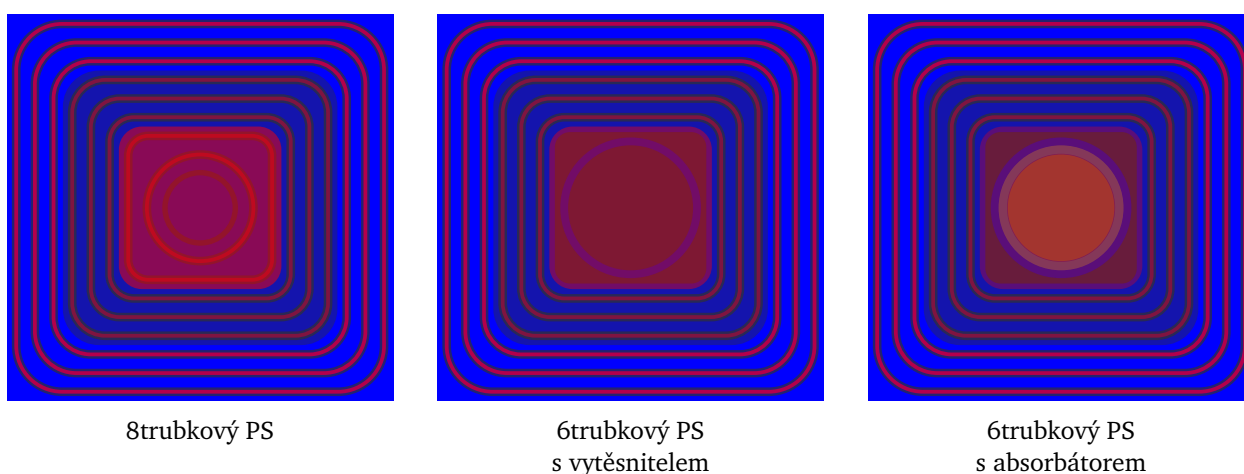


Obr. 2.1: Geometrie PS IRT-4M v kódu WIMS-ANL; palivo – červeně, pokrytí – šedě, moderátor – modře, absorbátor – žlutě

Homogenizace PS IRT-4M je založena na podrobných modelech, které jsou součástí výzkumného úkolu [2], přičemž je opět použito aktualizované složení palivového jádra, viz Tab. 1.2 v kapitole 1. Původní výpočet detailní geometrie všech PS uskutečněný za účelem přípravy mikroskopických účinných průřezů pro kód REBUS-PC je proveden v kódu WIMS-ANL. Na Obr. 2.1 jsou zobrazeny podrobné modely třech uvažovaných typů PS IRT-4M v kódu WIMS-ANL.

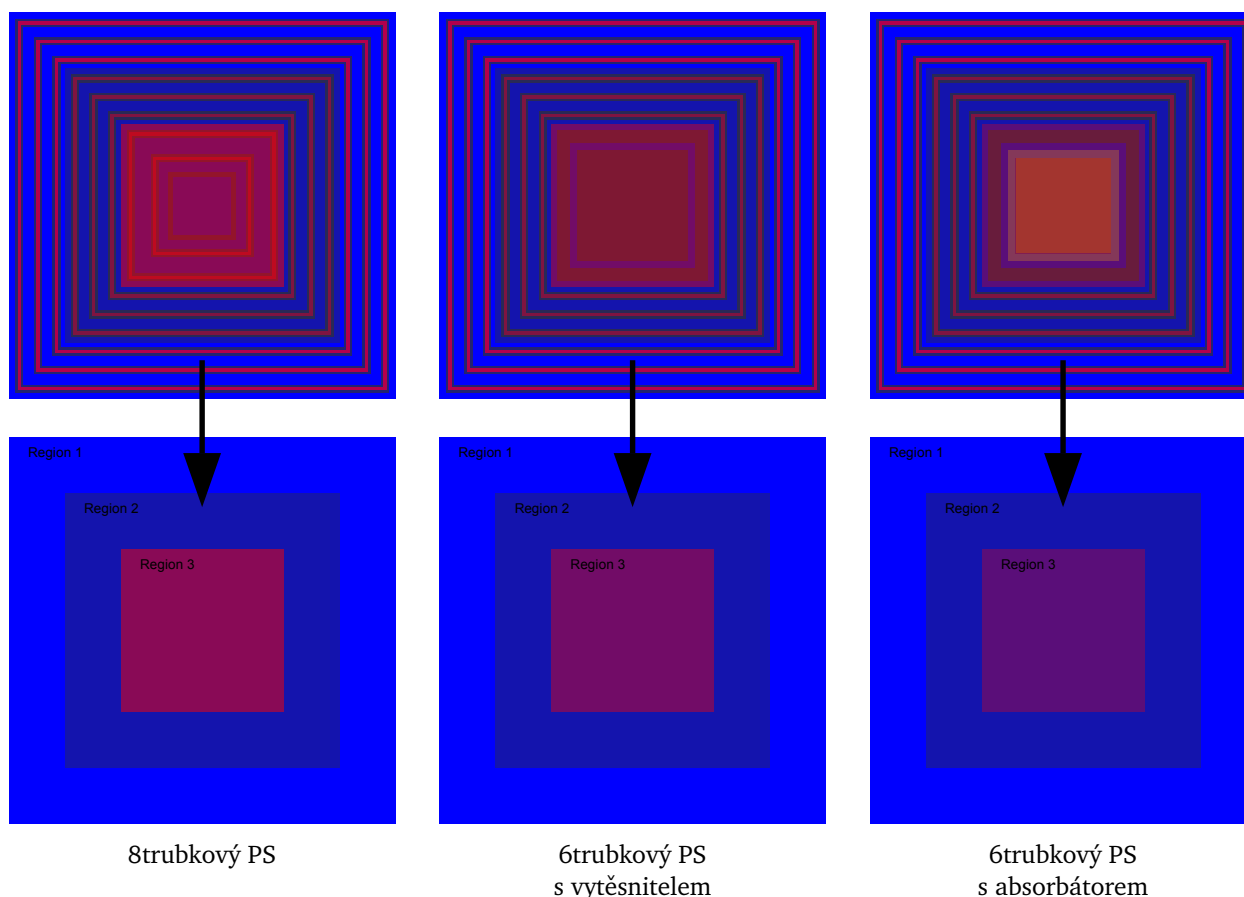


Zjednodušení geometrie PS pro účely celozónových 3D výpočtů je provedeno sloučením všech odpovídajících materiálů do tří regionů. Počet regionů byl zvolen s ohledem na homogenizaci PS v kódu NODER [36], který je na reaktoru LVR-15 v současnosti využíván pro plánování vsázek. V kódu NODER je použito podobné rozdělení představující 3 regiony. Hlavním důvodem pro volbu více než jednoho regionu je zachování alespoň částečného prostorového rozložení v rámci celozónového výpočtu. Na Obr. 2.2 jsou znázorněny 2D řezy v rovině  $x, y$  reálnou geometrií uvažovaných typů PS. Součástí jednotlivých vizualizací je i naznačení tří oblastí, z jejichž materiálů jsou vytvořeny zhomogenizované regiony pro každý z typů PS.



Obr. 2.2: 2D řez v rovině  $x, y$  reálnou geometrií PS IRT-4M

Z Obr. 2.2 je možné pozorovat, že první dvě oblasti z vnějšího okraje jsou totožné pro každý ze tří typů PS. Obě tyto oblasti jsou tvořeny třemi palivovými trubkami a odpovídajícím množstvím moderátoru. Na druhou stranu vnitřní oblasti PS jsou pro každý typ rozdílné. Pro případ standardního 8trubkového PS je vnitřní oblast kromě moderátoru tvořena zbylou dvojicí palivových trubek, z nichž jedna je válcová, a centrálním hliníkovým vytěsňitelem. U 6trubkových PS je součástí vnitřní oblasti hliníkové vodítko a hliníkový vytěsňitel nebo absorpční tyč tvořená karbidem bóru, mezerou a pokrytím z korozivzdorné oceli. Zbylý prostor je v obou případech vyplněn vodním moderátorem. Přejít od detailní geometrie PS v kódu REBUS-PC do zjednodušené geometrie ve formě zhomogenizovaných regionů je zobrazen na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Homogenizace PS IRT-4M pro přechod od detailní ke zjednodušené geometrii

Tab. 2.1: Rozměry zhomogenizovaných regionů paliva IRT-4M

Region	$r_1$ (cm)	$r_2$ (cm)	Objem	
			(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>3</sup> )
1	2,519 396	3,575 000	25,733	1 543,980
2	1,490 135	2,519 396	16,507	990,420
3	–	1,490 135	8,882	532,920

V Tab. 2.1 jsou uvedeny informace o geometrii jednotlivých regionů PS z Obr. 2.3. Pro každý region je zde zapsána vzdálenost od středu k vnitřní hranici regionu  $r_1$ , resp. k vnější hranici  $r_2$ . Dalšími představenými parametry je objem regionu v cm<sup>2</sup> a také celkový objem v cm<sup>3</sup> vzniklý vynásobením 2D plochy regionu aktivní délkou PS v axiálním směru, která je rovna 60 cm. Vlivem zjednodušení geometrie na základě Obr. 2.3 je v důsledku změněn také koeficient násobení nově vzniklého modelu PS. Protože tento koeficient násobení je odlišný od koeficientu násobení pro detailní model PS, je nutné vytvořený model upravit tak, aby byl zachován původní koeficient násobení.

V opačném případě by tato změna v koeficientu násobení mohla ovlivnit neutronovou bilanci ve výsledném výpočtu celé aktivní zóny reaktoru. Zachování stejného koeficientu násobení PS bylo v daném případě dosaženo pomocí změny zastoupení hliníku v homogenní směsi v každém ze tří regionů. Odlišný postup byl zvolen u 6trubkového PS s absorbátorem, kde byly provedeny úpravy pouze v materiálovém složení regionu 3. Konkrétně byla změněna pouze koncentrace  $B_4C$  a obsah hliníku byl zachován. Zastoupení materiálů, které jsou obsaženy v jednotlivých regionech pro každý z typů PS, je popsáno v Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Objemové zastoupení materiálů ve zhomogenizovaných regionech paliva IRT-4M

8trubkový PS			
Region	Palivo	Pokrytí	Moderátor
1	0,188 66	0,296 70	0,568 78
2	0,194 01	0,355 80	0,556 56
3	0,127 62	0,372 00	0,662 30
6trubkový PS s vytěsňitelem			
Region	Palivo	Pokrytí	Moderátor
1	0,188 66	0,276 56	0,568 78
2	0,194 01	0,315 83	0,556 56
3	–	0,851 16	0,250 84
6trubkový PS s absorbátorem			
Region	Palivo	Pokrytí	Moderátor
1	0,188 66	0,242 56	0,568 78
2	0,194 01	0,249 43	0,556 56
3	–	0,277 31	0,250 84
Region	$B_4C$	Ocel	Vzduch
3	0,144 91	0,118 15	0,010 53

Použitím změn v objemovém zastoupení materiálů v regionech PS, viz Tab. 2.2, je zachována hodnota koeficientu násobení po přechodu od detailní ke zjednodušené geometrii. Homogenizací materiálů regionu 3 u 6trubkového PS s absorbátorem bylo způsobeno rozptýlení bóru v rámci celého regionu, čímž byla zvýšena absorpce neutronů a snížena hodnota koeficientu násobení. Proto musela být koncentrace  $B_4C$

snížena. U obou ostatních typů PS byla pro zachování koeficientu násobení naopak zvýšena koncentrace hliníku v pokrytí v každém ze tří regionů. V Tab. 2.3 jsou uvedeny hodnoty koeficientu násobení z výpočtu v kódu WIMS-ANL a v kódu REBUS-PC před a po provedení změn v objemovém zastoupení materiálů v regionech. Koeficient násobení z kódu WIMS-ANL je označen jako  $k_{\infty}^W$ . Změna koeficientu násobení po sloučení všech materiálů do homogenních regionů v kódu REBUS-PC je reprezentována označením  $k_{\infty}^{R,H}$ . Po provedení úprav v objemovém zastoupení materiálů v regionech na základě Tab. 2.2 je výsledný koeficient násobení z kódu REBUS-PC  $k_{\infty}^R$  shodný s hodnotou  $k_{\infty}^W$ .

Tab. 2.3: Koeficient násobení zhomogenizovaných PS IRT-4M

Typ PS	$k_{\infty}^W$	$k_{\infty}^{R,H}$	$k_{\infty}^R$
8trubkový	1,662 53	1,674 44	1,662 53
6trubkový s vytěsnitelem	1,645 18	1,653 59	1,645 18
6trubkový s absorbatorem	1,046 58	0,850 18	1,046 58

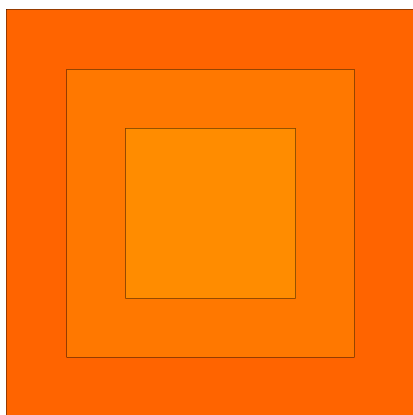
Palivové soubory představují obecně velmi významnou součást aktivní zóny reaktoru. Pro umožnění deterministických výpočtů aktivních zón v přijatelném čase je nutné, s ohledem na poměrně komplexní geometrii PS, použít řadu zjednodušení. Zjednodušení detailní geometrie spolu s homogenizací materiálů v představené podobě je dále využíváno v rámci celozónových 3D výpočtů reaktoru LVR-15, které jsou obsahem kapitoly 5 a 6.

### 3 Model vyhoření paliva

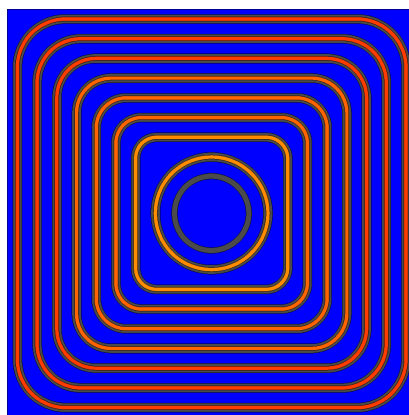
Zásadním problémem při vytváření modelů pro celozónové výpočty reaktoru LVR-15, které jsou součástí kapitoly 5 a 6, je přítomnost částečně vyhořelých palivových souborů v konfiguracích AZ v průběhu kampaní. Počáteční vyhoření některých PS je až  $85 \text{ MWd kg}_U^{-1}$ . Proto je nutné s co možná nejlepším přiblížením určit množství štěpného materiálu a dalších nuklidů v palivových souborech s nenulovým počátečním vyhořením. Cílem této kapitoly je tedy určení izotopického složení částečně vyhořelých PS, které jsou potřebné pro celozónové výpočty v rámci kapitoly 5 a 6.

Pro výpočet izotopického složení částečně vyhořelých standardních 8trubkových i kontrolních 6trubkových PS jsou použity 3D modely těchto PS vytvořené v kódu REBUS-PC. Jaderná data pro neutronické výpočty jsou pro oba případy připravena v kódu WIMS-ANL. Modely PS v kódu REBUS-PC jsou založeny na homogenizaci provedené v kapitole 2 s identickým materiálovým složením. V radiálním směru je soustava rozdělena do tří regionů, viz Obr. 3.1, přičemž je v tomto směru aplikována reflexní okrajová podmínka. V axiálním směru je aktivní část paliva o délce 60 cm rozdělena do 12 regionů a z obou stran obklopena hliníkovou koncovkou o tloušťce 10 cm a 15 cm silnou vrstvou vodního reflektoru. Řez v axiálním směru pro případ 8trubkového PS je zobrazen na Obr. 3.3.

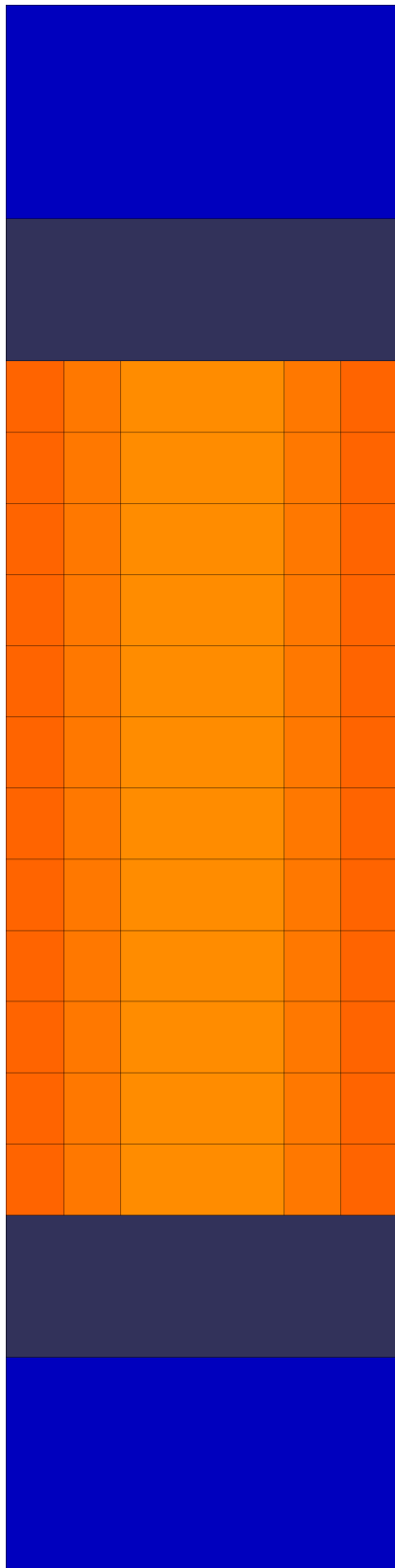
Za účelem provedení porovnání získaných hodnot je k oběma typům PS dále vytvořen paralelní výpočetní model vyhoření v kódu Serpent, který je založen na reálné geometrii PS typu IRT-4M, viz Obr. 3.2 a Obr. 3.4.



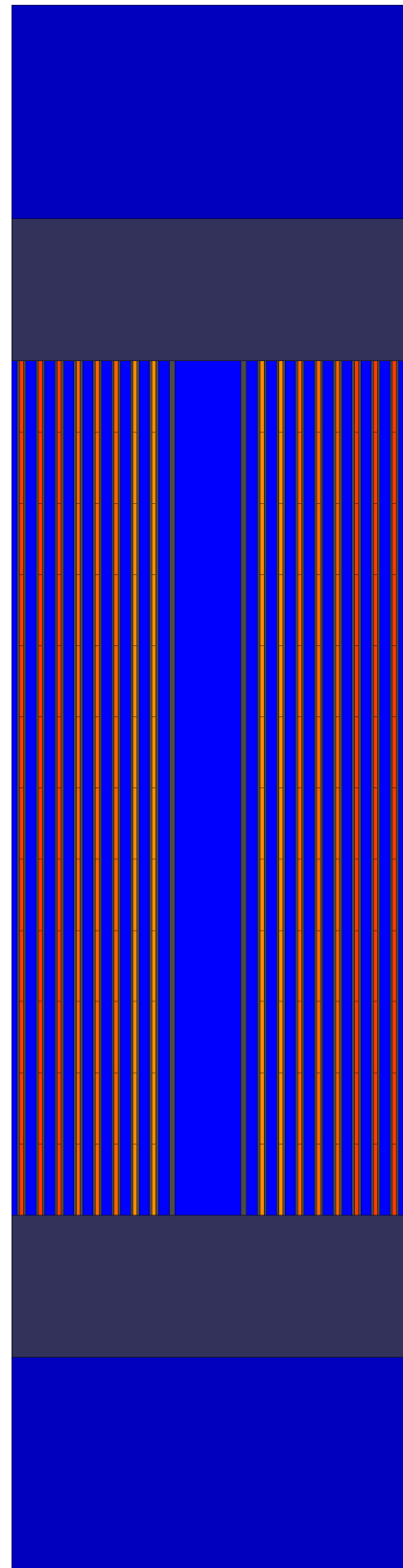
Obr. 3.1: Radiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu REBUS-PC; homogenní směs paliva, pokrytí a moderátoru – oranžově



Obr. 3.2: Radiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu Serpent; palivo – oranžově, pokrytí – šedě, moderátor – modře



Obr. 3.3: Axiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu REBUS-PC; homogenní směs paliva, pokrytí a moderátoru – oranžově, hliníkové koncovky – šedě, axiální vodní reflektor – modře



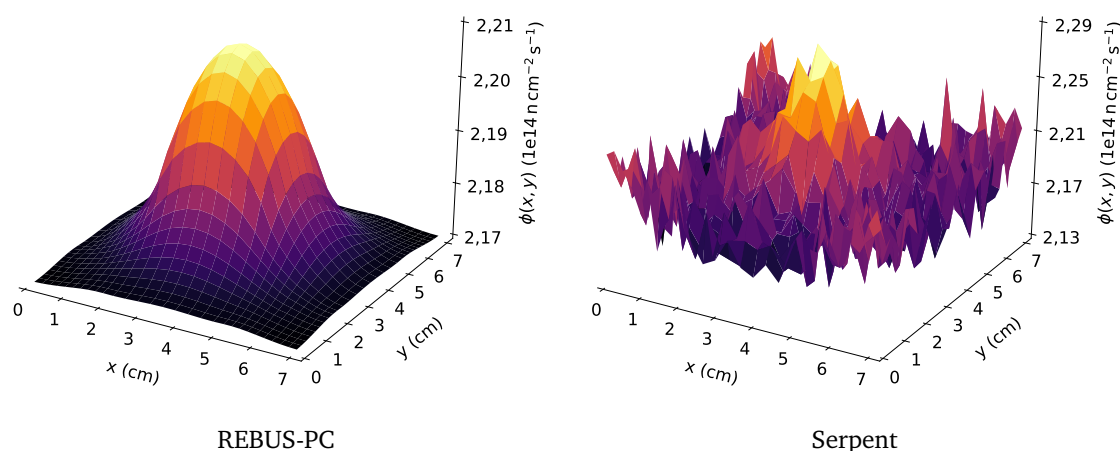
Obr. 3.4: Axiální řez modelem 8trubkového PS pro výpočet počátečního vyhoření v kódu Serpent; palivo – oranžově, pokrytí a hliníkové koncovky – šedě, moderátor a axiální vodní reflektor – modře

Výpočet vyhoření obou typů PS je proveden pro celkový výkon soustavy 0,3 MW. Tento výkon je srovnatelný s průměrným výkonem jednoho PS souboru v rámci celé konfigurace AZ reaktoru LVR-15. Kroky vyhoření použité při výpočtech jsou určeny s ohledem na vývoj xenonu a ostatních štěpných produktů, jejichž význam je zásadní v počáteční krátkodobé fázi výpočtu. Základní posloupnost kroků vyhoření je uvedena v Tab 3.1, přičemž tyto kroky jsou doplněny o požadované hodnoty vyhoření jednotlivých PS z kapitoly 5 a 6.

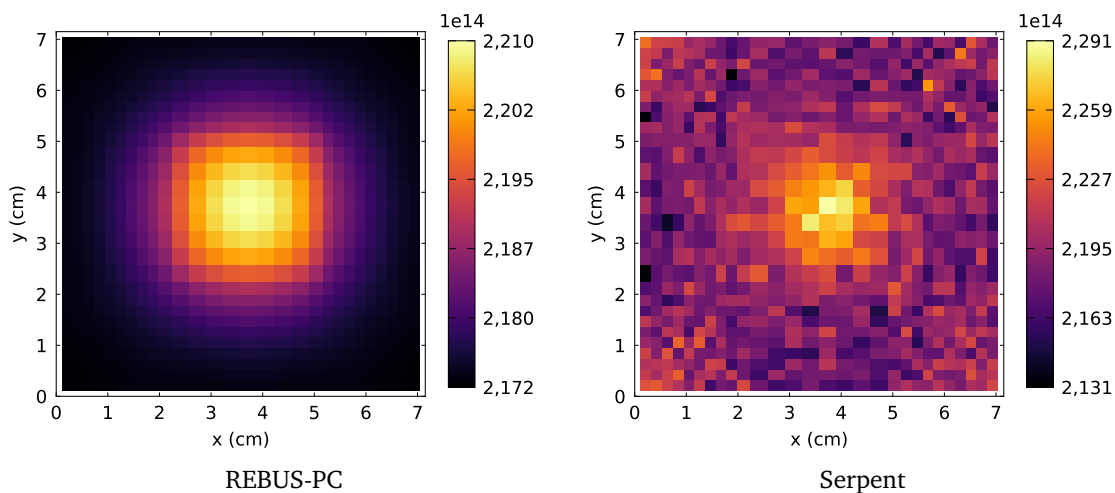
Tab. 3.1: Základní posloupnost kroků vyhoření v  $\text{MWd kg}_U^{-1}$

0,00	$5,0e-6$	0,01	0,05	0,10	0,15	0,26	0,38	0,50	0,66
0,83	1	2	3	4	6	8	10	12	16
20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
60	64	68	72	76	80	84	88	92	96

V souvislosti s výpočty vyhoření je provedeno také srovnání prostorového rozložení hustoty toku neutronů. Rozložení hustoty toku neutronů v soustavě PS má reálný vliv na výslednou distribuci vyhoření a izotopické složení paliva. Na Obr. 3.5 je znázorněno radiální rozložení celkové hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS určené kódy REBUS-PC a Serpent. Na Obr. 3.6 jsou doplněny odpovídající 2D mapy. Hustota toku neutronů je vypočítána ve 29, resp. 12 nódech v radiálním, resp. v axiálním směru. Uvedené srovnání prostorového rozložení hustoty toku neutronů je určeno v počátečním kroku vyhoření celkového výpočtu. V Tab. 3.2 jsou dále zapsány střední hodnoty hustoty toku neutronů v jednotlivých grupách.



Obr. 3.5: Radiální prostorové rozložení celkové hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS určené kódy REBUS-PC a Serpent



Obr. 3.6: 2D mapa radiálního rozložení celkové hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS určená kódy REBUS-PC a Serpent

Tab. 3.2: Střední hodnoty hustoty toku neutronů v jednotlivých grupách ve středu 8trubkového PS; v grupě s označením 1 jsou zahrnuty neutrony s nejvyšší energií, naopak grupa 7 je tvořena neutrony s nejnižšími energiemi

Grupa	Hustota toku neutronů ( $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	
	REBUS-PC	Serpent
1	7,244 e+13	(7,243 ± 0,094) e+13
2	4,671 e+13	(4,644 ± 0,063) e+13
3	5,802 e+13	(5,764 ± 0,079) e+13
4	3,750 e+12	(3,641 ± 0,189) e+12
5	6,136 e+12	(5,932 ± 0,235) e+12
6	1,670 e+13	(1,770 ± 0,039) e+13
7	1,409 e+13	(1,561 ± 0,035) e+13
Celková	2,178 e+14	(2,194 ± 0,015) e+14

Na základě dat z Obr. 3.5 a Obr. 3.6 lze porovnat rozdíly v radiální distribuci hustoty toku neutronů ve středu 8trubkového PS mezi kódy REBUS-PC a Serpent. Rozložení hustoty toku neutronů z kódu REBUS-PC je tvořeno hladkým a symetrickým průběhem hodnot, který je typický pro deterministické výpočty. Na druhou stranu průběh hustoty toku neutronů z kódu Serpent je reprezentován nepravidelnou funkcí odpovídající stochastické Monte Carlo simulaci v podrobné geometrii PS, viz Obr. 3.2 a Obr. 3.4. Celkově je hustota toku neutronů z kódu Serpent určena pro širší spektrum hodnot než v případě kódu REBUS-PC. Dále je v kódu Serpent také možné pozorovat nárůst hustoty toku neutronů v rozích PS oproti kódu REBUS-PC. Podle porov-

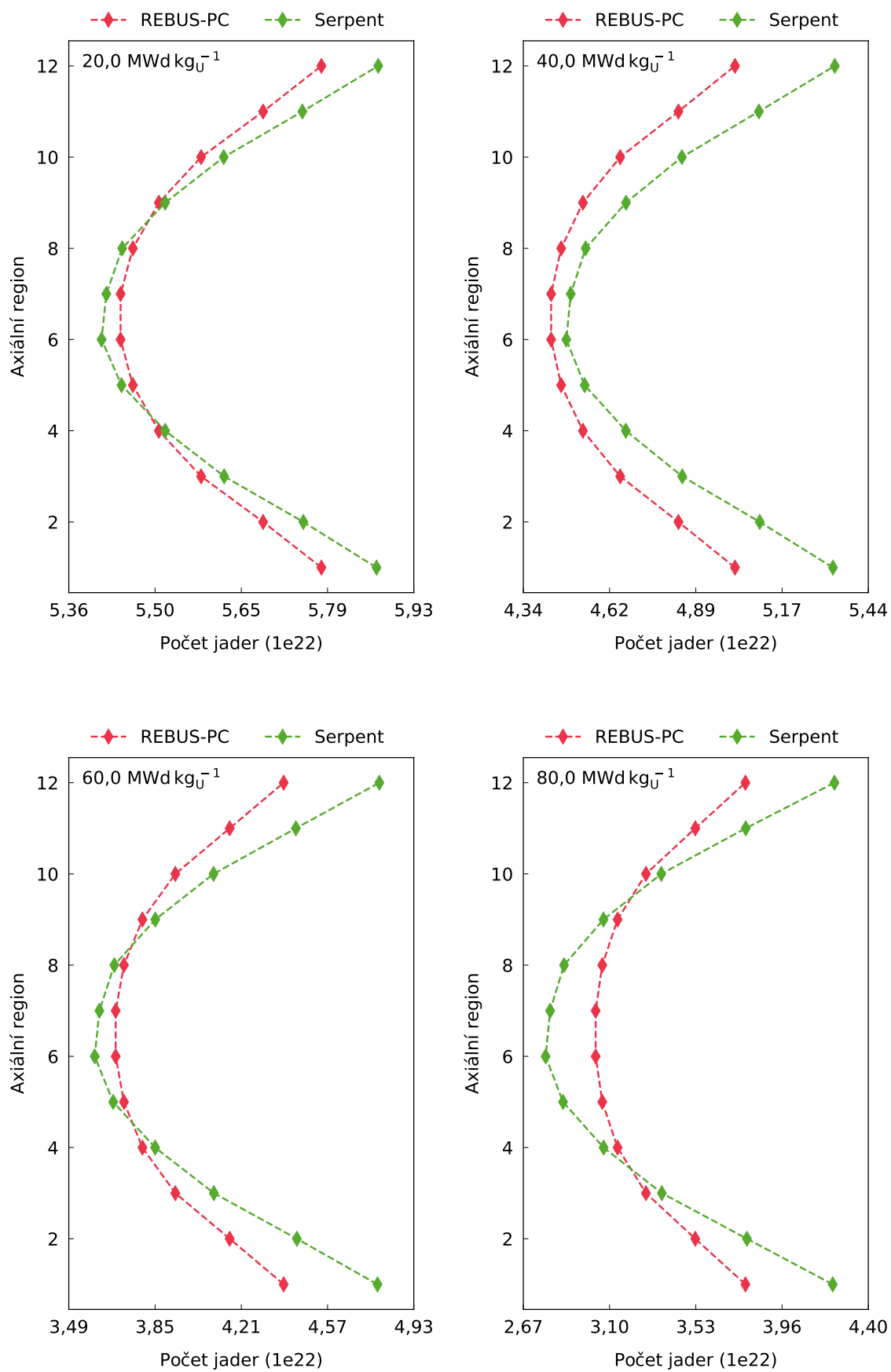


nání střední hustoty toku neutronů v jednotlivých energetických grupách v Tab. 3.2 jsou v případě tepelných grup 6 a 7 pozorovány rozdíly nad rámec statistické odchylky z kódu Serpent. Podobný rozdíl lze následně pozorovat i pro hodnoty celkové hustoty toku neutronů, přičemž tyto hodnoty jsou pro oba kódy řádově srovnatelné. V důsledku provedeného srovnání radiálního rozložení hustoty toku neutronů je tedy ověřena správnost určování hustoty toku neutronů v modelu 8trubkového PS v kódu REBUS-PC zejména s ohledem na normalizaci výkonu, který je použit při výpočtu.

V rámci dalšího porovnání obou modelů PS pro určení počáteční koncentrace izotopů je v následující části uvedeno axiální rozložení počtu jader pro vybrané nuklidy v závislosti na celkovém vyhoření PS. Konkrétně jsou prezentovány výsledky pro axiální rozložení koncentrací uranu  $^{235}\text{U}$  v dlouhodobějším časovém intervalu pro vyhoření 20, 40, 60 a 80 MWd kg $_{\text{U}}^{-1}$ . Rozložení počtu jader uranu  $^{235}\text{U}$  v axiálním směru je zobrazeno na Obr. 3.7. V Tab. 3.3 jsou znázorněné hodnoty doplněny o relativní odchylky mezi kódy REBUS-PC a Serpent. Obdobně je uvedeno také axiální rozložení jódu  $^{135}\text{I}$  viz Obr. 3.8 a Tab. 3.4 a xenonu  $^{135}\text{Xe}$  viz Obr. 3.9 a Tab. 3.5. V případě jódu a xenonu je srovnání provedeno pro krátkodobější časový horizont pro vyhoření 0, 05, 0, 10, 0, 15 a 0, 26 MWd kg $_{\text{U}}^{-1}$ . Tato posloupnost kroků vyhoření je při použitém výkonu ekvivalentní s dobou přibližně 6, 12, 18 a 32 h. Relativní odchylky v Tab. 3.3 – Tab. 3.5 mezi kódy REBUS-PC a Serpent jsou vypočítány podle vztahu:

$$\text{RO} = \frac{n_r - n_s}{n_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Výrazem  $n_r$ , resp.  $n_s$  je označen počet jader určený kódem REBUS-PC, resp. Serpent. Počty jader zkoumaných nuklidů v axiálním směru jsou ve všech případech uvažovány jako sumy počtu jader ze všech tří radiálních regionů, které jsou naznačeny na Obr. 3.1, resp. Obr. 3.2.



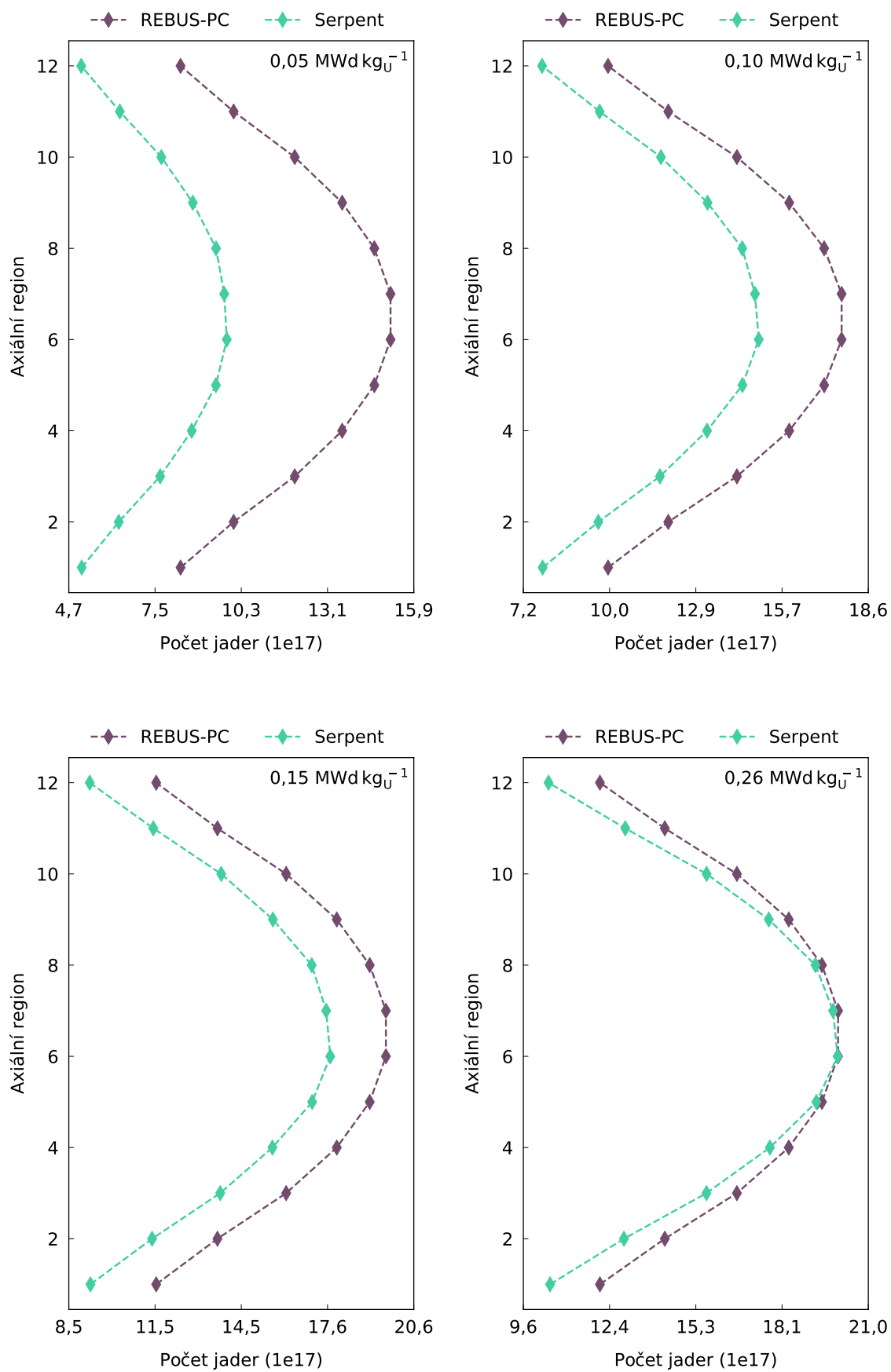
Obr. 3.7: Axiální rozložení jader uranu  $^{235}\text{U}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření

Tab. 3.3: Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader uranu  $^{235}\text{U}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent

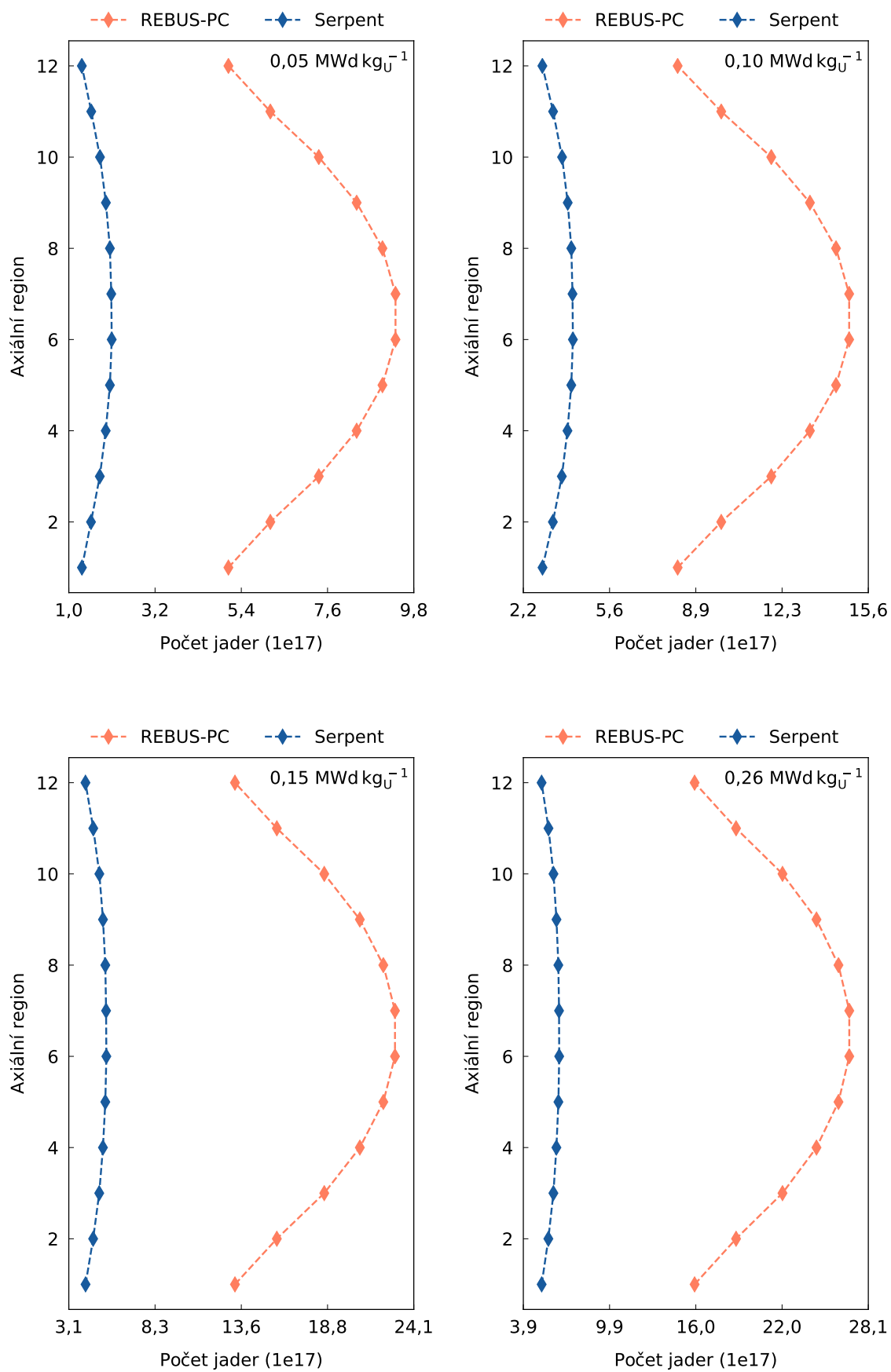
Axiální region	Relativní odchylka (%)			
Vyhoření ( $\text{MWd kg}_U^{-1}$ )	20,0	40,0	60,0	80,0
12	-1,55	-5,85	-8,18	-10,34
11	-1,16	-5,08	-6,30	-6,80
10	-0,68	-4,07	-3,92	-2,36
9	-0,19	-2,92	-1,38	+2,27
8	+0,35	-1,65	+1,22	+6,83
7	+0,58	-1,08	+2,43	+8,97
6	+0,43	-1,39	+1,87	+8,10
5	+0,32	-1,72	+1,09	+6,64
4	-0,19	-2,94	-1,39	+2,29
3	-0,67	-4,05	-3,89	-2,28
2	-1,13	-5,03	-6,21	-6,65
1	-1,60	-5,96	-8,33	-10,52

Tab. 3.4: Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader jódu  $^{135}\text{I}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent

Axiální region	Relativní odchylka (%)			
Vyhoření ( $\text{MWd kg}_U^{-1}$ )	0,05	0,10	0,15	0,26
12	+63,3	+27,9	+25,1	+15,7
11	+59,4	+24,1	+20,2	+10,5
10	+57,4	+21,8	+16,8	+6,4
9	+56,5	+20,6	+14,5	+3,5
8	+54,5	+18,8	+11,9	+1,0
7	+54,4	+18,4	+11,1	+0,1
6	+55,7	+19,4	+12,0	+0,8
5	+54,5	+18,8	+12,0	+1,1
4	+55,9	+20,4	+14,4	+3,7
3	+56,6	+21,5	+16,5	+6,4
2	+58,6	+23,5	+19,7	+10,1
1	+63,8	+28,1	+25,4	+16,3



Obr. 3.8: Axiální rozložení jader jódu  $^{135}\text{I}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření



Obr. 3.9: Axiální rozložení jader xenonu <sup>135</sup>Xe v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření

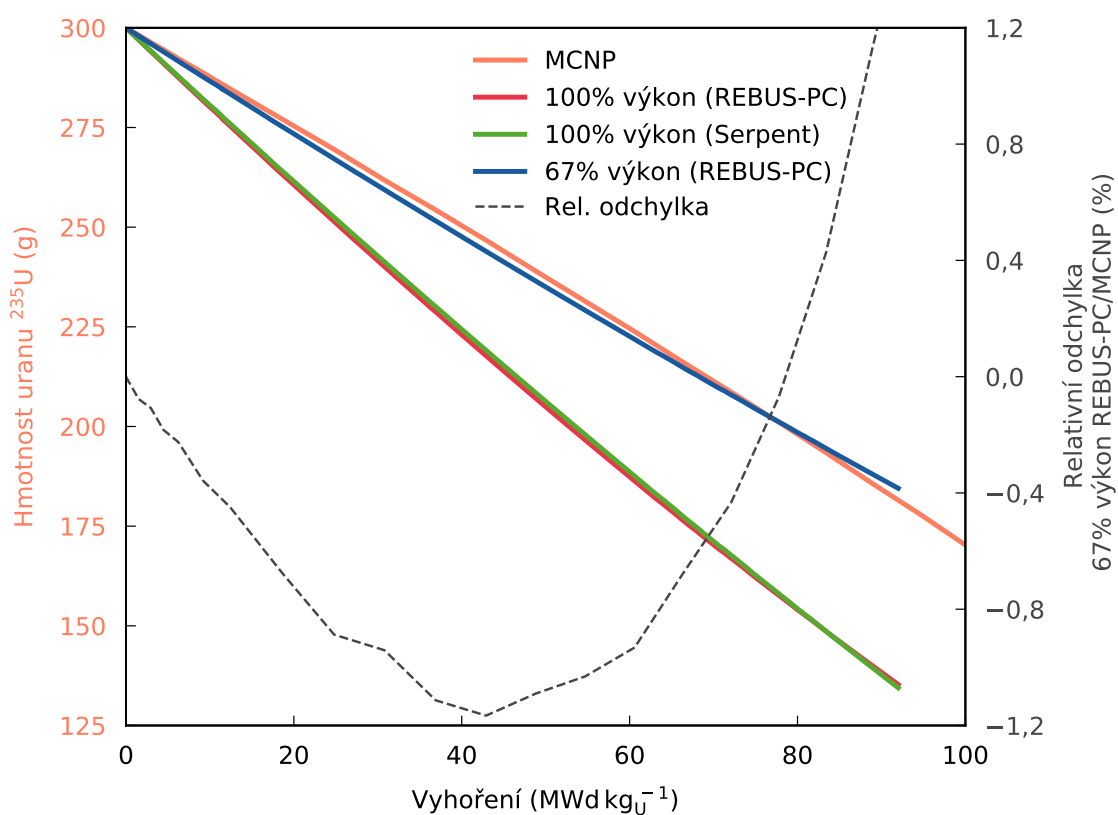
Tab. 3.5: Relativní odchylky v axiálním rozložení počtu jader xenonu  $^{135}\text{Xe}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření mezi kódy REBUS-PC a Serpent

Axiální region	Relativní odchylka (%)				
	Vyhoření ( $\text{MWd kg}_U^{-1}$ )	0,05	0,10	0,15	0,26
12		+ 280	+ 176	+ 223	+ 209
11		+ 292	+ 194	+ 247	+ 235
10		+ 312	+ 218	+ 279	+ 269
9		+ 329	+ 239	+ 305	+ 295
8		+ 339	+ 251	+ 321	+ 311
7		+ 345	+ 258	+ 329	+ 319
6		+ 348	+ 260	+ 331	+ 320
5		+ 339	+ 251	+ 321	+ 311
4		+ 328	+ 238	+ 305	+ 295
3		+ 311	+ 218	+ 279	+ 269
2		+ 290	+ 193	+ 246	+ 234
1		+ 280	+ 177	+ 224	+ 209

Axiální rozložení jader uranu  $^{235}\text{U}$  v závislosti na vyhoření z Obr. 3.7 je určeno s relativními odchylkami až  $-10,52\%$ , viz Tab. 3.3. Z uvedeného průběhu hodnot je zřejmé, že pro všechna vyhoření jsou odchylky v určení vývoje koncentrací uranu  $^{235}\text{U}$  větší v okrajových částech PS. V případě koncentrací jódu  $^{135}\text{I}$  zobrazených na Obr. 3.8 je možné pozorovat poměrně velké odchylky v řádech desítek procent v počátečních hodinách výpočtu. Po ustálení množství jódu v palivu lze podle Tab. 3.4 pozorovat konečné snížení relativních odchylek v řádu nižších jednotek procent ve středu PS. Na okraji PS jsou dosaženy odchylky o velikosti až  $+16,3\%$ . Na druhou stranu u axiálního rozložení jader xenonu  $^{135}\text{Xe}$  z Obr. 3.9 jsou prezentovány výsledky určené s relativní odchylkou blízkou  $+300\%$  i po dosažení ustálené koncentrace, viz Tab. 3.5. Množství jader xenonu  $^{135}\text{Xe}$  v kódu REBUS-PC je větší o jeden řád oproti zastoupení xenonu v kódu Serpent. Při aplikaci získaného počátečního složení paliva na celozónové výpočty v kódu REBUS-PC v kapitole 5 a 6 jsou počáteční koncentrace  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  uvažovány jako nulové. Tento postup je zvolen s ohledem na poločasy rozpadu obou nuklidů.

Po provedení srovnání výpočtů počátečního vyhoření PS v kódech REBUS-PC a Serpent byly v první fázi celozónových výpočtů reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC zaznamenány poměrně velké rozdíly v hodnotách efektivního koeficientu násobení. Koeficient násobení AZ reaktoru LVR-15 s obsahem velkého počtu částečně vyhoře-

lých PS s vyhořením přesahujícím  $50 \text{ MWd kg}_U^{-1}$  byl při těchto výpočtech menší řádově o tisíce pcm, než v případě jeho výpočtu ve standardně využívaném kódu NODER. Na základě těchto výpočtů bylo zkoumáno množství štěpného materiálu konkrétně uranu  $^{235}\text{U}$  v PS v závislosti na vyhoření. Pro palivo IRT-4M byl v minulosti vytvořen validovaný model vyhoření [37], na jehož základě je možné porovnat množství vybraných nuklidů v palivu. Na Obr. 3.10 je zobrazeno porovnání hmotností uranu  $^{235}\text{U}$  v 8trubkovém PS pro případ validovaného výpočtu v kódu MCNP a pro výpočet počátečního vyhoření v kódech REBUS-PC a Serpent.



Obr. 3.10: Hmotnost uranu  $^{235}\text{U}$  v 8trubkovém PS v závislosti na vyhoření [37]

Podle srovnání závislosti hmotnosti uranu  $^{235}\text{U}$  na vyhoření v PS z Obr. 3.10 je možné pozorovat rozdíl mezi validovaným modelem v kódu MCNP a výpočty v kódech REBUS-PC a Serpent, které byly provedeny v rámci této kapitoly. Z důvodu prezentovaného rozdílu v určení hmotnosti uranu je v modelu určení počátečního složení PS v kódu REBUS-PC pro celozónové výpočty reaktoru LVR-15 snížen výkon na 67% při zachování stejných časových kroků vyhoření jako v původním výpočtu pro 100% výkon. Tímto postupem je dosaženo relativních odchylek v určení hmotnosti uranu  $^{235}\text{U}$

v rozptylu  $\pm 1,2\%$  mezi validovaným modelem v MCNP a modelem určování počátečního vyhořívání PS pro účely výpočtů AZ reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC.






Popsaný model vyhořívání PS v kódu REBUS-PC, který je optimalizovaný podle validovaného modelu vyhoření je tedy dále použit při určování počátečních koncentrací jednotlivých nuklidů v palivu pro požadované vyhoření pro každý z PS v AZ reaktoru LVR-15. Celozónové výpočty využívající prezentovaný model jsou součástí kapitoly 5 a 6.

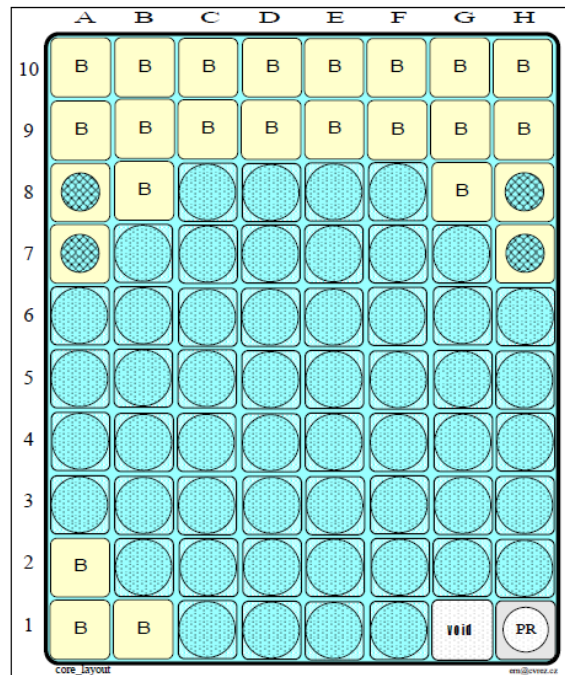


## 4 Příprava dat pro nepalivové komponenty

U výzkumných reaktorů může být významná část aktivní zóny tvořena celou řadou nepalivových komponent, mezi kterými jsou např. ozařovací kanály, terče pro produkci radioizotopů, potrubní pošta a další experimentální zařízení. Proto je nutné, stejně jako v případě paliva, připravit pro tyto komponenty sadu účinných průřezů a dalších jaderných dat tak, aby bylo možné uskutečnit odpovídající celozónové výpočty.

V rámci této kapitoly je představena příprava jaderných dat pro nepalivové komponenty aktivní zóny výzkumného reaktoru LVR-15, které jsou součástí celozónových výpočtů v kódu REBUS-PC v kapitole 5 a 6. Pro přípravu mikroskopických účinných průřezů je použit transportní kód WIMS-ANL. Ve druhé části kapitoly je navíc provedena příprava těchto dat pomocí kódu Serpent. Jaderná data pro nepalivové komponenty jsou připravena ve studeném a horkém stavu, přičemž studený stav odpovídá teplotě 294 K a horký stav teplotě 313 K. Zjednodušené modely všech nepalivových komponent v kódu WIMS-ANL a Serpent jsou založeny na geometrických a materiálových charakteristikách [38] a provozní zkušenosti s aktuálně využívanými výpočetními prostředky na reaktoru LVR-15. Konkrétně jsou mezi představené komponenty zařazeny následující součásti aktivní zóny reaktoru LVR-15:

- beryliový blok 
- beryliový kanál 
- vodní vytěsňitel 
- vzduchový vytěsňitel 
- potrubní pošta 
- vodní reflektor
- hliníkový blok – horní
- hliníkový blok – dolní

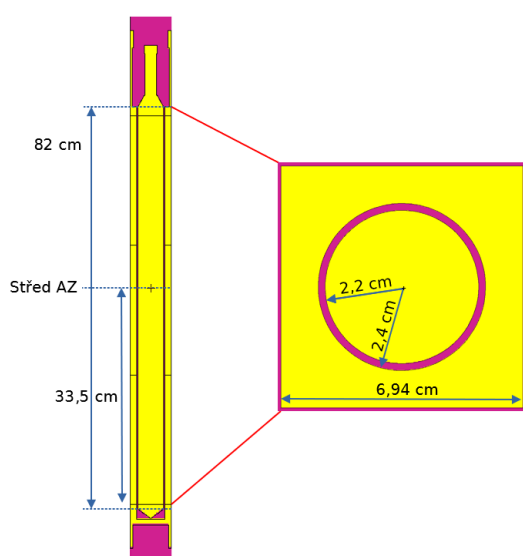


Obr. 4.1: Konfigurace AZ reaktoru LVR-15 bez paliva [39]

Na Obr. 4.1 je zobrazen příklad kartogramu AZ reaktoru LVR-15 bez přítomnosti palivových souborů. Součástí této konfigurace jsou všechny uvedené nepalivové komponenty. Hliníkovými bloky je tvořen prostor nad a pod aktivní zónou reaktoru v axiálním směru. Celá AZ spolu s hliníkovými bloky je obklopena vodním reflektorem. Komponenty, které jsou přímou součástí AZ reaktoru LVR-15 jsou v celozónových výpočtech v kódu REBUS-PC v kapitole 5 a 6 reprezentovány homogenními bloky  $7,15 \times 7,15 \times 60 \text{ cm}^3$  s materiálovým složením identickým s modelem v kódu WIMS-ANL a Serpent, na jejichž základě jsou připraveny mikroskopické účinné průřezy. Podrobný popis modelů všech uvedených komponent AZ reaktoru LVR-15 v kódu WIMS-ANL a Serpent je předmětem následující části kapitoly.

### Beryliový blok

Zjednodušený model beryliového bloku v kódu WIMS-ANL je vytvořen v deskové geometrii, která je analogická jako geometrie základní buňky kódu WIMS-ANL z Obr. 1.3 v kapitole 1. Ve vnitřním plátu desky o tloušťce 7 cm je obsažena palivová směs, jejíž složení je identické jako v případě paliva IRT-4M z Tab. 1.2 v kapitole 1. Vnější pláty desky o tloušťce 3,5 cm jsou tvořeny materiálem beryliového bloku, který je v rámci zjednodušení uvažován jako čisté berylium o hustotě  $1,85 \text{ g cm}^{-3}$  bez zastoupení vody, viz materiálové složení v Tab. 4.1. Oproti reálné geometrii beryliového bloku zobrazené na Obr. 4.2 je tedy zanedbána přítomnost vodního prstence.



Obr. 4.2: Beryliový blok [38]; berylium – žlutě, voda – fialově

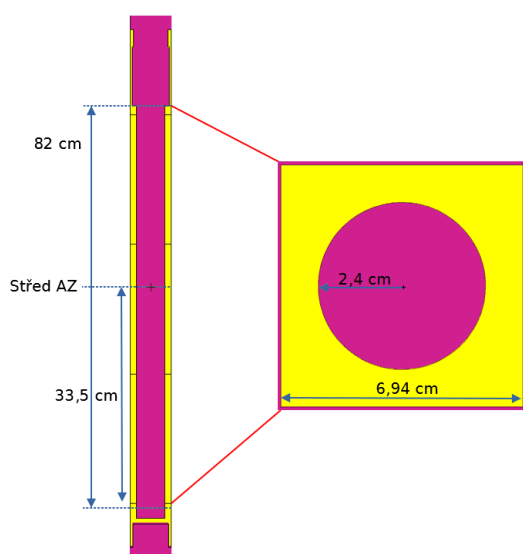
Tab. 4.1: Materiálové složení beryliového bloku

Nuklid	Atomová hustota ( $\text{b}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )
$^9\text{Be}$	$1,23786 \text{ e}-1$

Pro přípravu účinných průřezů beryliového bloku byla použita vstupní data z aplikační knihovny kódu WIMS-ANL pro berylium pro oblast  $1/E$  v tepelném spektru. Desková geometrie s materiálem paliva uprostřed je použita s cílem o dosažení co možná nejpřesnější aproximace neutronového spektra v beryliovém bloku při celozónovém výpočtu. Tento přístup je využit i u dalších nepalivových komponent.

### Beryliový kanál

Beryliový kanál je v AZ reaktoru LVR-15 vytvořen vyjmutím válcového středu beryliového bloku, viz průřez bloku na Obr. 4.2. Tím je změněno materiálové složení a zvýšeno zastoupení vody. Materiál beryliového kanálu je v tomto případě uvažován jako homogenní směs berylia a vody s koncentracemi zapsanými v Tab. 4.2. Objemový podíl jednotlivých nuklidů je určen na základě geometrických charakteristik z Obr. 4.3. Pro přípravu účinných průřezů pro beryliový kanál je v kódu WIMS-ANL použita desková geometrie stejně jako v případě beryliového bloku. I zde jsou využita data pro berylium v tepelném spektru.



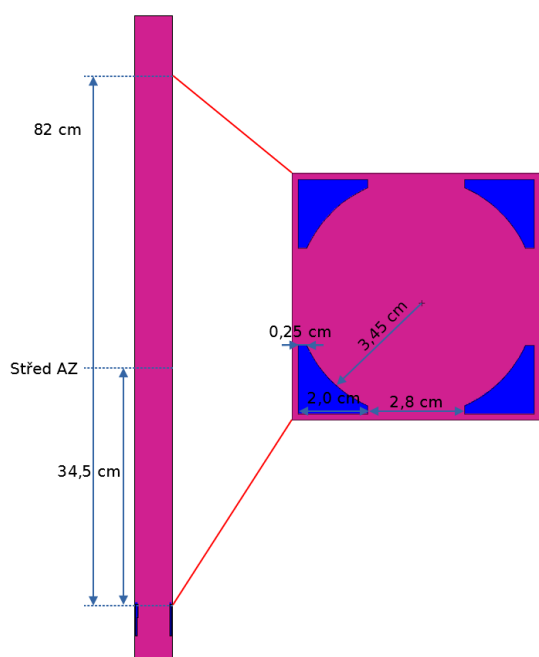
Obr. 4.3: Beryliový kanál [38];  
beryllium – žlutě, voda – fialově

Tab. 4.2: Materiálové složení beryliového kanálu

Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
$^9Be$	$7,28053e-2$
$^1H$	$2,74867e-2$
$^{16}O$	$1,37433e-2$

## Vodní vytěsňitel

V případě vodního vytěsňitele je výpočet v kódu WIMS-ANL proveden opět v deskové geometrii s vnitřním plátem tvořeným palivem obsahujícím štěpný materiál. Ve vnějším plátu desky je obsažena voda o složení uvedeném v Tab. 4.3. Podobně jako u beryliového bloku je použito materiálové zjednodušení se zanedbáním přítomnosti hliníku, který je součástí reálného vodního vytěsňitele, viz Obr. 4.4. Analogicky jako u předchozích nepalivových komponent jsou data pro vodík připravena pro tepelné spektrum v oblasti  $1/E$ .



Obr. 4.4: Vodní vytěsňitel [38]; hliník – modře, voda – fialově

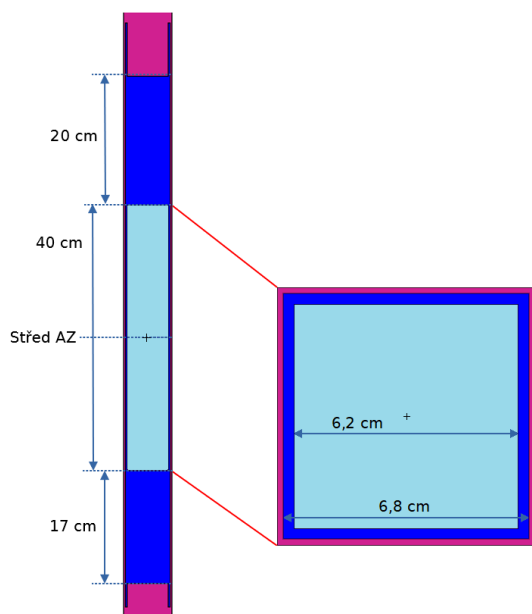
Tab. 4.3: Materiálové složení vodního vytěsňitele

Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
$^1H$	$6,67406e-2$
$^{16}O$	$3,33703e-2$

## Vzduchový vytěsňitel

Zjednodušený model vzduchového vytěsňitele v kódu WIMS-ANL je tvořen válcovou soustavou tří materiálů – vzduchu, hliníku a vody. Transformace z reálné čtvercové geometrie, viz Obr. 4.5, do válcové je provedena při zachování objemů jednotlivých materiálů. Kompletní zastoupení nuklidů v každém materiálu je uvedeno v Tab. 4.4. Pro účely výpočtu v kódu WIMS-ANL bylo do vnitřního válce soustavy přidáno stopové zastoupení štěpného materiálu v podobě  $1,0e-13b^{-1}cm^{-1}$  uranu  $^{235}U$ . Tímto přístupem je zajištěno úspěšné provedení výpočtu v kódu WIMS-ANL [26]. Absence použití deskové geometrie, na které jsou založeny modely předchozích komponent,

byla zvolena s ohledem na pozici vzduchového vytěsnitele v celozónových výpočtech reaktoru LVR-15 v obou kapitolách 5 a 6, kde je vzduchový vytěsnitel spolu s potrubní poštou zastoupen pouze jednou a navíc je umístěn na periférii AZ. Obě pozice jsou ilustrovány na kartogramu AZ na Obr. 4.1.



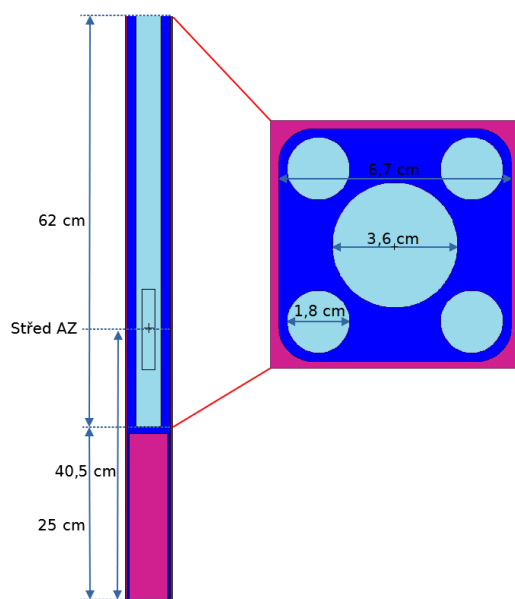
Tab. 4.4: Materiálové složení vzduchového vytěsnitele

Materiál	Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
Vzduch	$^{14}N$	$2,03778 e-5$
	$^{16}O$	$5,46697 e-6$
Hliník	$^{27}Al$	$6,02371 e-2$
Voda	$^1H$	$6,67406 e-2$
	$^{16}O$	$3,33703 e-2$

Obr. 4.5: Vzduchový vytěsnitel [38];  
vzduch – světle modře, hliník – tmavě modře,  
voda – fialově

### Potrubní pošta

Model potrubní pošty je v kódu WIMS-ANL vytvořen na základě obdobného zjednodušeného modelu jako v předchozím případě vzduchového vytěsnitele. Složení materiálů potrubní pošty je uvedeno v Tab. 4.5. Vnitřní válec modelu, podle Obr. 4.6, je tvořen homogenní směsí vzduchu a hliníku. Vnější prstenec modelu potrubní pošty je vyplněn vodou.



Obr. 4.6: Potrubní pošta [38];  
vzduch – světle modře, hliník – tmavě modře,  
voda – fialově

### Vodní reflektor

Mikroskopické účinné průřezy pro vodní reflektor AZ reaktoru LVR-15 jsou v kódu WIMS-ANL připraveny v deskové geometrii analogicky jako u předchozích nepalivových komponent. Použité atomové hustoty vodíku a kyslíku jsou zapsány v Tab. 4.6.

Tab. 4.6: Materiálové složení vodního reflektoru

Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
$^1H$	$6,67406e-2$
$^{16}O$	$3,33703e-2$

Tab. 4.5: Materiálové složení potrubní pošty

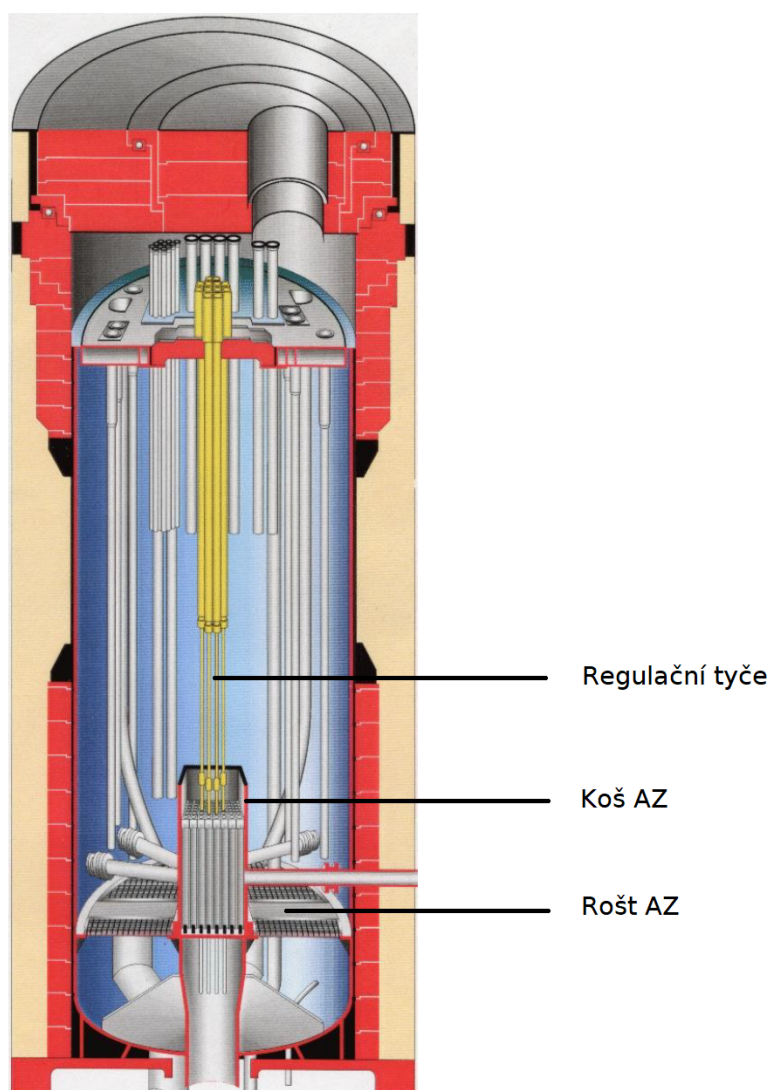
Materiál	Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
Vzduch a hliník	$^{14}N$	$9,24131e-6$
	$^{16}O$	$2,47926e-6$
	$^{27}Al$	$3,29197e-2$
Voda	$^1H$	$6,67406e-2$
	$^{16}O$	$3,33703e-2$

Tab. 4.7: Materiálové složení hliníkového bloku

Nuklid	Atomová hustota ( $b^{-1}cm^{-1}$ )
$^{27}Al$	$5,62034e-2$
$^1H$	$4,46918e-3$
$^{16}O$	$2,23459e-3$

## Hliníkový blok

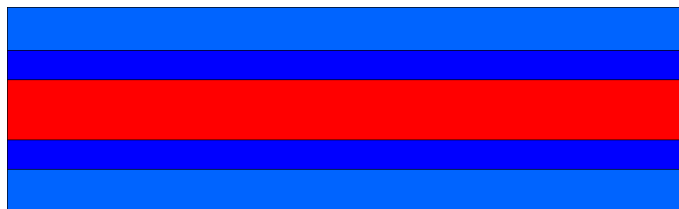
Hliníkový blok, kterým je v modelu reaktoru LVR-15 vyplněn prostor nad a pod AZ je rozdělen na horní a dolní blok. Materiál bloku je tvořen homogenní směsí hliníku a vody s množstvím odpovídajícím vodním mezerám mezi palivem v mříži AZ. Přesné materiálové složení hliníkového bloku je uvedeno v Tab. 4.7. Hodnota atomové hustoty hliníku  $^{27}\text{Al}$  z Tab. 4.7 je v případě dolního hliníkového bloku zvýšena o 10%. Důvodem je snaha o zahrnutí spodního roštu AZ, viz Obr. 4.7, ve výpočetním modelu.



Obr. 4.7: Řez reaktorem LVR-15 [40]

Jaderná data pro představené nepalivové komponenty reaktoru IVR-15 jsou dále připravena i s využitím kódu Serpent. Pro přípravu těchto dat jsou použity aplikační ACE knihovny kódu Serpent založené na třech dostupných verzích evaluované knihovny ENDF/B – konkrétně VI, VII a VIII. Na rozdíl od modelů nepalivových komponent v kódu WIMS-ANL jsou všechny modely v případě kódu Serpent tvořeny deskovou geometrií. Změna v použité geometrii je tedy provedena pro vzduchový vytěsňitel a potrubní poštu.

Příklad deskové geometrie v kódu Serpent pro vodní vytěsňitel je zobrazen na Obr. 4.8. Jaderná data jsou ve všech případech připravována pro materiál desky přímo sousedící s deskou paliva, který je definován samostatně. Z důvodu zamezení umělého poklesu hustoty toku neutronů na okraji desky vlivem použité černé okrajové podmínky je do modelu navíc přidána vnější deska tvořená materiálem nepalivové komponenty o totožném složení. Tento postup je ilustrován na Obr. 4.8. Toušťka celé palivové desky je uvažována jako 7 cm, tloušťka desek materiálu nepalivových komponent, pro které jsou počítány hodnoty účinných průřezů je 3,5 cm a tloušťka okrajových desek je 5 cm.

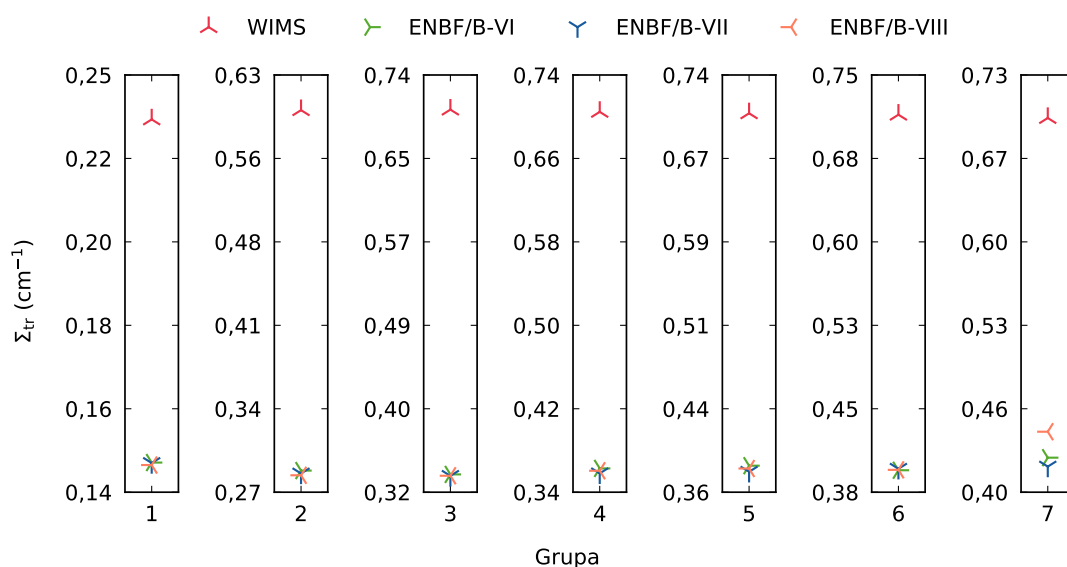


Obr. 4.8: Desková geometrie vodního vytěsňitele v kódu Serpent; palivo – červeně, materiál vodního vytěsňitele, pro který jsou připravena jaderná data – tmavě modře, materiál vodního vytěsňitele, kterým je tvořen vnější okraj modelu – světle modře

Oproti změnám v geometrii některých modelů je v kódu Serpent ponecháno identické materiálové složení, které odpovídá informacím v Tab. 4.1 – Tab. 4.7. Jedinou výjimkou je příprava jaderných dat pro berylium s využitím knihovny ENDF/B-VI. Pro tuto knihovnu nebyly v době provádění výpočtů k dispozici data pro berylium v tepelné oblasti. Proto jsou v tomto případě použita vstupní data pro standardní berylium.



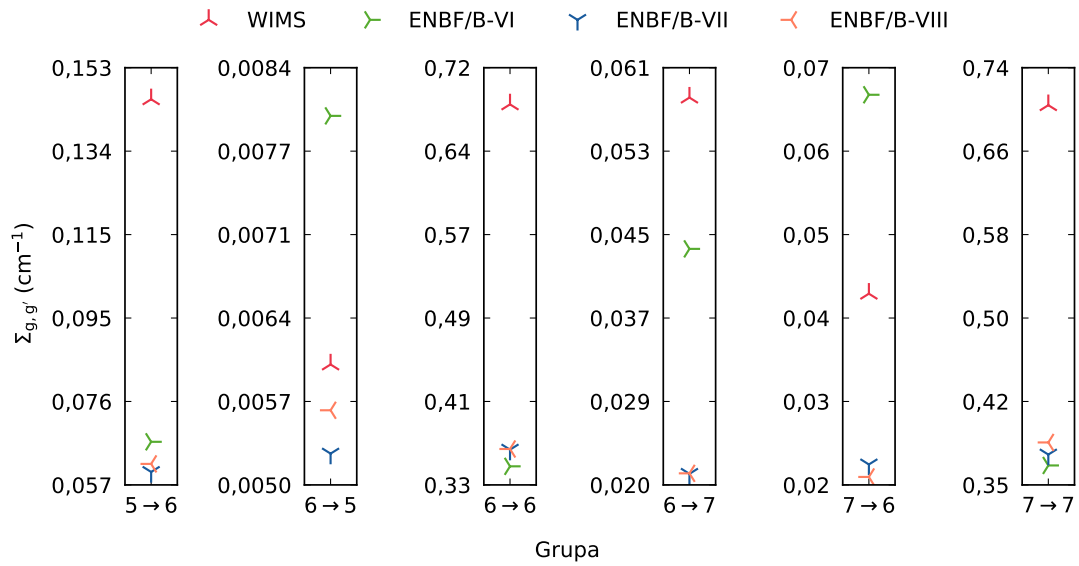
V následující části je provedeno porovnání některých účinných průřezů připravených kódy WIMS-ANL a Serpent pro beryliový blok a vodní vytěsňitel. Tyto dvě nepalivové komponenty jsou zvoleny na základě významného zastoupení v konfiguracích AZ reaktoru LVR-15. Součástí porovnání jsou hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport, makroskopické účinné průřezy pro rozptyl mezi vybranými teplotními grupami a celkové mikroskopické účinné průřezy. Srovnání je znázorněno graficky na Obr. 4.9 – Obr. 4.14. Číselné hodnoty včetně relativních odchylek hodnot z kódu Serpent od hodnot z kódu WIMS-ANL jsou uvedeny v Tab. 4.8 – Tab. 4.13.



Obr. 4.9: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro beryliový blok připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 4.8: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro beryliový blok připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

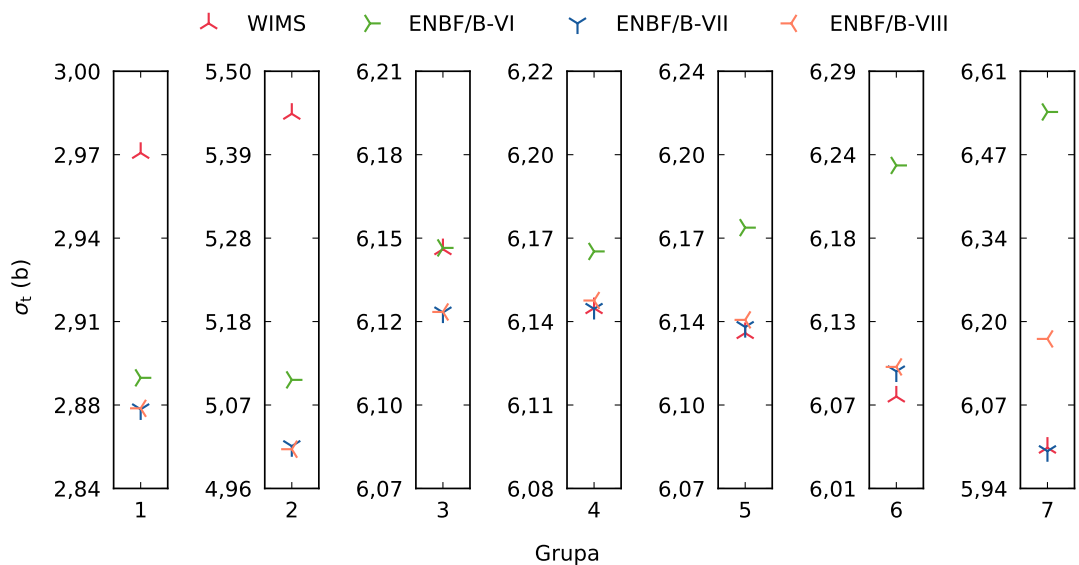
Grupa	$\Sigma_{tr}^{wims}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{tr}^{VI}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VIII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
1	0,234	0,144	-38,6	0,143	-38,7	0,143	-38,9
2	0,596	0,291	-51,3	0,288	-51,7	0,287	-51,9
3	0,705	0,333	-52,7	0,332	-52,9	0,332	-52,9
4	0,707	0,365	-48,3	0,360	-49,0	0,363	-48,6
5	0,708	0,383	-46,0	0,377	-46,8	0,380	-46,3
6	0,718	0,396	-44,8	0,398	-44,6	0,397	-44,7
7	0,700	0,423	-39,5	0,416	-40,5	0,445	-36,5



Obr. 4.10: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v beryliovém bloku mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

Tab. 4.9: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl v beryliovém bloku mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

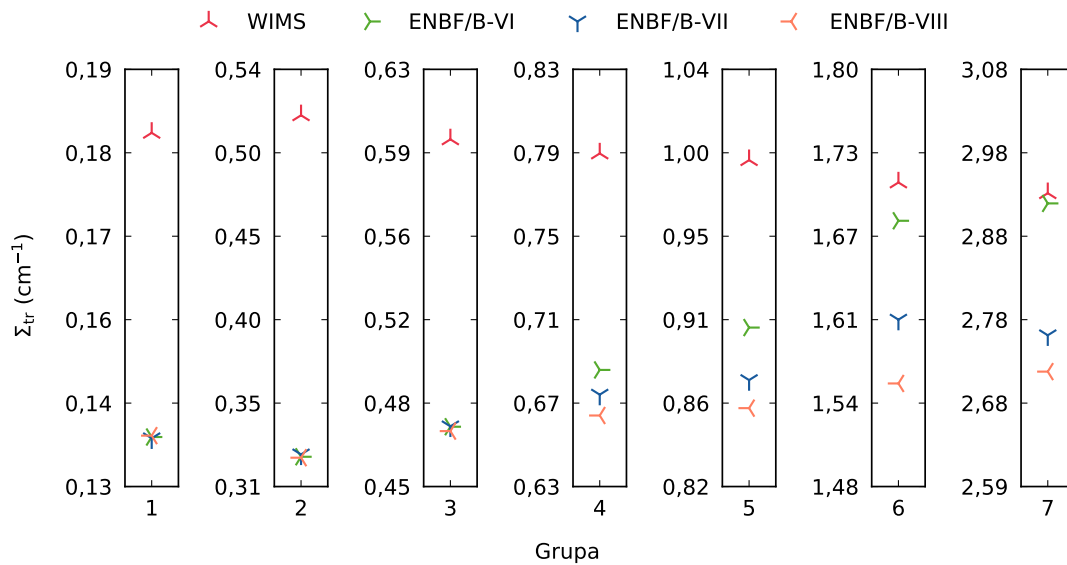
Grupa	$\Sigma_{g,g'}^{\text{wims}}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VI}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VIII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
5 → 6	0,146	0,067	-54,2	0,060	-59,0	0,062	-57,7
6 → 5	0,006	0,008	+34,8	0,005	-12,5	0,006	-6,4
6 → 6	0,688	0,348	-49,3	0,364	-47,1	0,365	-47,0
6 → 7	0,058	0,043	-25,3	0,021	-62,9	0,022	-62,9
7 → 6	0,042	0,066	+58,1	0,021	-49,9	0,019	-53,5
7 → 7	0,700	0,364	-48,1	0,374	-46,6	0,385	-45,0



Obr. 4.11: Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů  $\sigma_t$  pro <sup>9</sup>Be v beryliovém bloku připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 4.10: Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů  $\sigma_t$  pro  $^9\text{Be}$  v beryliovém bloku připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

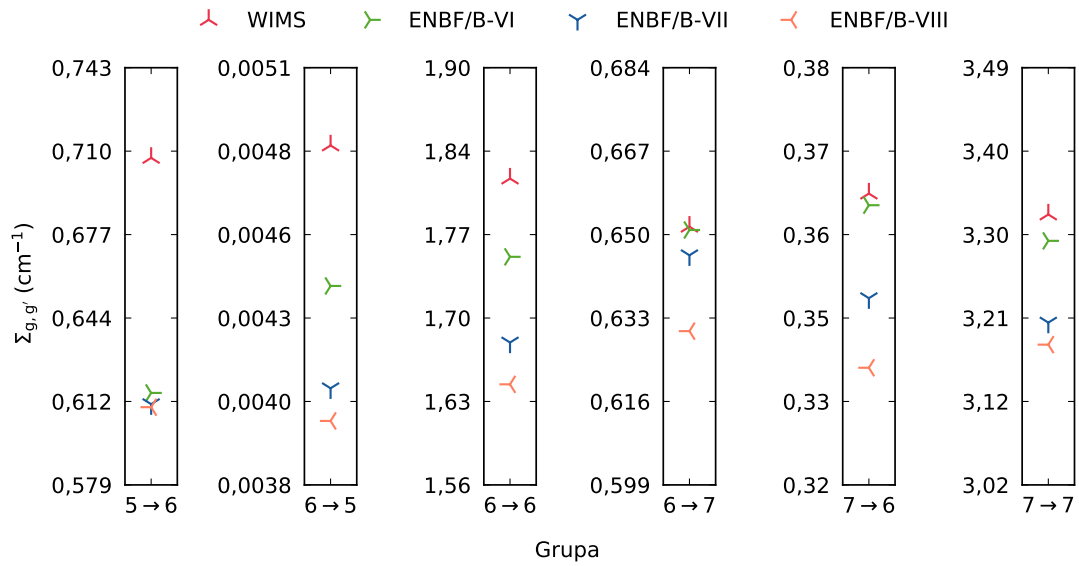
Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	2,967	2,885	-2,8	2,874	-3,1	2,874	-3,1
2	5,442	5,102	-6,2	5,018	-7,8	5,014	-7,9
3	6,150	6,150	+0,0	6,128	-0,4	6,128	-0,4
4	6,143	6,162	+0,3	6,143	-0,0	6,145	+0,0
5	6,133	6,175	+0,7	6,135	+0,0	6,138	+0,1
6	6,075	6,228	+2,5	6,092	+0,3	6,095	+0,3
7	6,001	6,540	+9,0	5,995	-0,1	6,175	+2,9



Obr. 4.12: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro vodní vytěsňitel připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 4.11: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport  $\Sigma_{tr}$  pro vodní vytěsňitel připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

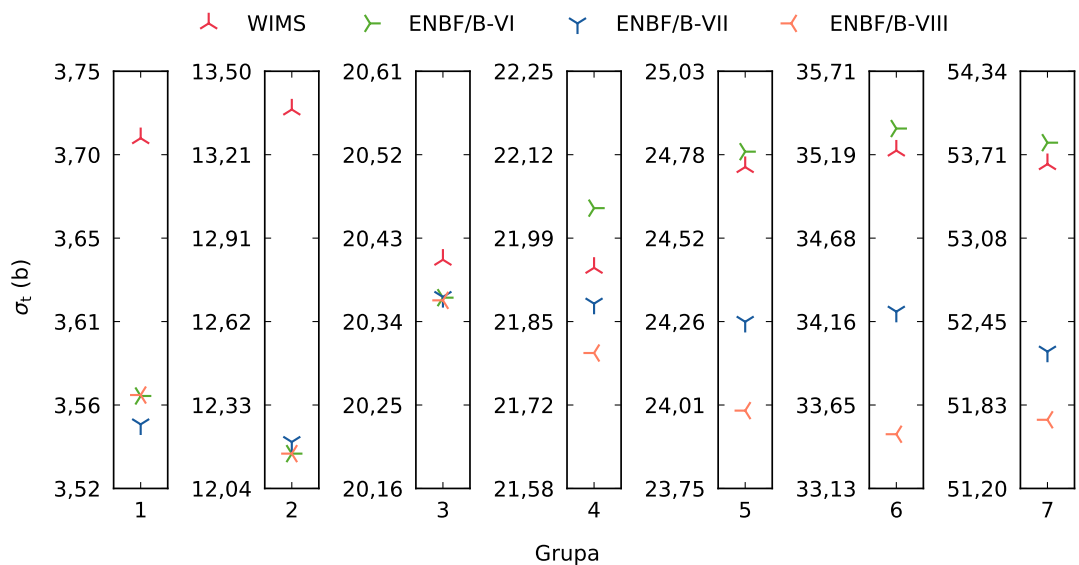
Grupa	$\Sigma_{tr}^{\text{wims}}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{tr}^{\text{VI}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{\text{VII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{\text{VIII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
1	0,184	0,140	-23,9	0,140	-24,1	0,140	-23,8
2	0,517	0,325	-37,2	0,326	-36,9	0,324	-37,3
3	0,596	0,474	-20,5	0,474	-20,5	0,472	-20,8
4	0,792	0,690	-12,9	0,678	-14,3	0,668	-15,6
5	0,994	0,903	-9,2	0,874	-12,1	0,858	-13,7
6	1,711	1,682	-1,7	1,608	-6,1	1,559	-8,9
7	2,933	2,921	-0,4	2,765	-5,7	2,722	-7,2



Obr. 4.13: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl ve vodním vytěsniteli mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

Tab. 4.12: Hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl ve vodním vytěsniteli mezi zvolenými grupami  $\Sigma_{g,g'}$  připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven

Grupa	$\Sigma_{g,g'}^{\text{wims}}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VI}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VIII}}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
5 → 6	0,707	0,615	-13,0	0,611	-13,7	0,609	-13,8
6 → 5	0,005	0,004	-9,0	0,004	-15,6	0,004	-17,7
6 → 6	1,813	1,749	-3,5	1,679	-7,4	1,645	-9,3
6 → 7	0,651	0,651	-0,1	0,646	-0,9	0,630	-3,3
7 → 6	0,365	0,363	-0,5	0,349	-4,2	0,339	-6,9
7 → 7	3,327	3,297	-0,9	3,205	-3,7	3,180	-4,4



Obr. 4.14: Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů  $\sigma_t$  pro vodík ve vodním vytěsniteli připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Tab. 4.13: Hodnoty celkových mikroskopických účinných průřezů  $\sigma_t$  pro vodík ve vodním vytěsniteli připravené kódy WIMS-ANL a Serpent při použití vybraných knihoven ENDF/B

Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	3,710	3,567	-3,9	3,551	-4,3	3,567	-3,8
2	13,364	12,162	-9,0	12,203	-8,7	12,162	-9,0
3	20,408	20,367	-0,2	20,368	-0,2	20,364	-0,2
4	21,938	22,035	+0,4	21,881	-0,3	21,801	-0,6
5	24,738	24,786	+0,2	24,262	-1,9	23,988	-3,0
6	35,216	35,352	+0,4	34,222	-2,8	33,465	-5,0
7	53,639	53,801	+0,3	52,227	-2,6	51,714	-3,6

V případě beryliového bloku je možné pozorovat relativní odchylky v určení hodnot účinných průřezů v řádu desítek procent. Největší rozdíly pro všech 7 grup jsou zaznamenány u makroskopických účinných průřezů pro transport, viz Tab. 4.8, které jsou v kódu WIMS-ANL větší až o 52,9%. Pro hodnoty makroskopických účinných průřezů pro rozptyl mezi tepelnými grupami v beryliovém bloku z Tab. 4.9 jsou rozdíly opět tvořeny především relativními odchylkami odpovídajícími desítkám procent. Pravděpodobně zde lze diskutovat zmíněné použití vstupních dat pro berylium s absencí korekce na tepelné spektrum pro knihovnu ENDF/B-VI. Při rozptylu z grupy 6 do grupy 5 a při rozptylu z grupy 7 do grupy 6 jsou tyto hodnoty větší o 34,8 a 58,1% než hodnoty z kódu WIMS-ANL. Makroskopické účinné průřezy pro ostatní knihovny z kódu Serpent jsou v těchto rozptylových grupách mešni stejně tak jako ve zbývajících rozptylech z Tab 4.9. Na druhou stranu pro celkové mikroskopické účinné průřezy na beryliu jsou relativní odchylky řádově menší. Podle Tab. 4.10 je velikost těchto odchylek od 0,0% až po 9,0%. U hodnot pro tepelné grupy je patrně opět možné pozorovat vliv použitých vstupních dat pro berylium pro knihovnu ENDF/B-VI. Všechny hodnoty účinných průřezů z kódu Serpent pro beryliový blok jsou určeny s relativní statistickou odchylkou o maximální velikosti v řádu nižších desetín procent.

Podobně jako u dat pro beryliový blok jsou pro účinné průřezy vodního vytěsnitele zaznamenány poměrně velké rozdíly mezi kódem WIMS-ANL a kódem Serpent. Největšími relativními odchylkami disponují makroskopické účinné průřezy pro transport o velikosti až -37,2%, viz Tab. 4.11. V tepelných grupách jsou odchylky menší řádově v jednotkách procent. U hodnot makroskopických účinných průřezů pro rozptyl z Tab. 4.12 jsou relativní odchylky menší než v předchozím případě s maximální

hodnotou až  $-17,7\%$ . Celkové mikroskopické účinné průřezy pro vodík ve vodním vytěsniteli z Tab. 4.13 jsou určeny s maximálními odchylkami v řádu jednotek procent. U všech hodnot pro vodní vytěsnitel lze zejména v tepelných grupách pozorovat větší shodu mezi kódem WIMS-ANL a knihovnou ENDF/B-VI při použití kódu Serpent. Všechny účinné průřezy vypočítané kódem Serpent jsou určeny s relativní statistickou odchylkou do setin procent.

Jaderná data připravená kódy WIMS-ANL a Serpent pro všechny uvedené nepalivové komponenty jsou využita v celozónových výpočtech v kódu REBUS-PC. Modely uvedených komponent v kódu REBUS-PC jsou tvořeny bloky  $7, 15 \times 7, 15 \times 60 \text{ cm}^3$  s materiálovým složením odpovídajícím homogenní směsi materiálů z Tab. 4.1 – Tab. 4.7.

## 5 Základní kritický experiment na reaktoru LVR-15

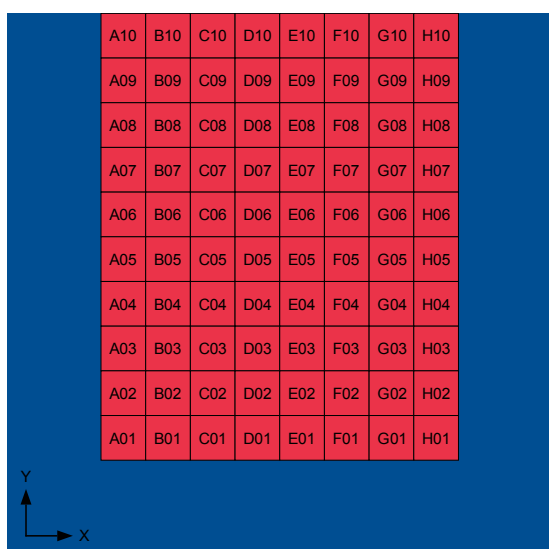
V souladu s požadavky udávanými platnou legislativou České republiky v rámci zákona č. 263/2016 Sb., atomového zákona [41] a vyhlášky č. 21/2017 Sb., o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení [42] je možné definovat základní kritický experiment jako předem stanovenou posloupnost kroků, jejímž cílem je experimentální stanovení určujících parametrů prvního kritického stavu výpočtem ověřené aktivní zóny [43].

Obsahem této kapitoly jsou kritické výpočty konfigurací AZ dvou základních kritických experimentů ZKE1 a ZKE2, které byly provedeny v roce 2011 na výzkumném reaktoru LVR-15. Neutronické výpočty jsou uskutečněny v kódu REBUS-PC a porovnány s experimentálně naměřenými hodnotami a s výsledky z aktuálně využívaného kódu NODER, který je založen na datech z evaluované knihovny ENDF/B-V. Jaderná data pro palivo i pro nepalivové komponenty jsou připravena pomocí dvou výpočetních kódů. Za prvé jsou hodnoty účinných průřezů určeny transportním kódem WIMS-ANL na základě aplikační knihovny s hodnotami z evaluované knihovny ENDF/B-VI. Druhým způsobem přípravy jaderných dat jsou výpočty v kódu Serpent s využitím evaluovaných knihoven ENDF/B-VI, ENDF/B-VII a ENDF/B-VIII. Všechny uvedené možnosti přípravy jaderných dat, včetně srovnání, jsou podrobně popsány v předchozích kapitolách. Jaderná data pro výpočty obou kritických experimentů jsou vzhledem k podmínkám experimentů uvažována ve studeném stavu o teplotě 300 K.

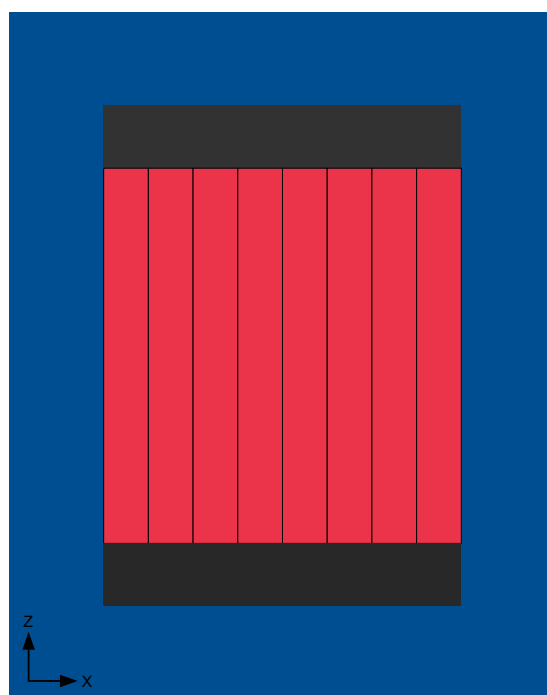
Výpočetní model reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC je tvořen aktivní zónou, která je v rovině  $x, y$  sestavena z  $8 \times 10$  buněk o velikosti  $7,15 \times 7,15 \text{ cm}^2$ . Součástí těchto buněk jsou palivové soubory nebo nepalivové komponenty v závislosti na dané konfiguraci AZ. Nepalivové komponenty jsou tvořeny pouze jedním radiálním regionem, jehož velikost je rovna velikosti buňky. Na druhou stranu buňky obsahující PS jsou vždy rozděleny do tří radiálních regionů, viz kapitola 2. Následně je v rovině  $x, y$  AZ obklopena vrstvou vodního reflektoru o tloušťce 15 cm s výjimkou horní části modelu ve směru  $y$ . Řez modelem reaktoru LVR-15 rovinou  $x, y$  je zobrazen na Obr. 5.1. Absence reflektoru v horní části modelu je dána obsazením prvních dvou řad buněk AZ, které jsou ve většině případů vyplněny beryliovými bloky nebo vodními vytěsniteli.

V axiálním směru modelu reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC je AZ vysoká 60 cm. Nad a pod AZ je umístěn hliníkový blok o tloušťce 10 cm, přičemž spodní blok obsa-

huje o 10% více hliníku, viz informace o nepalivových komponentách v kapitole 4. AZ s hliníkovými bloky je následně v axiálním směru obklopena 15 cm vodního reflektoru. Řez modelem reaktoru LVR-15 v rovině  $x, z$  je ilustrován na Obr. 5.2. Palivo, které je součástí buněk AZ, je v axiálním směru rozděleno do 12 ekvivalentních regionů. Všechny regulační tyče jsou v průběhu obou kritických experimentů ZKE1 i ZKE2 umístěny v horní koncové poloze.



Obr. 5.1: Radiální řez modelem reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC v rovině  $x, y$



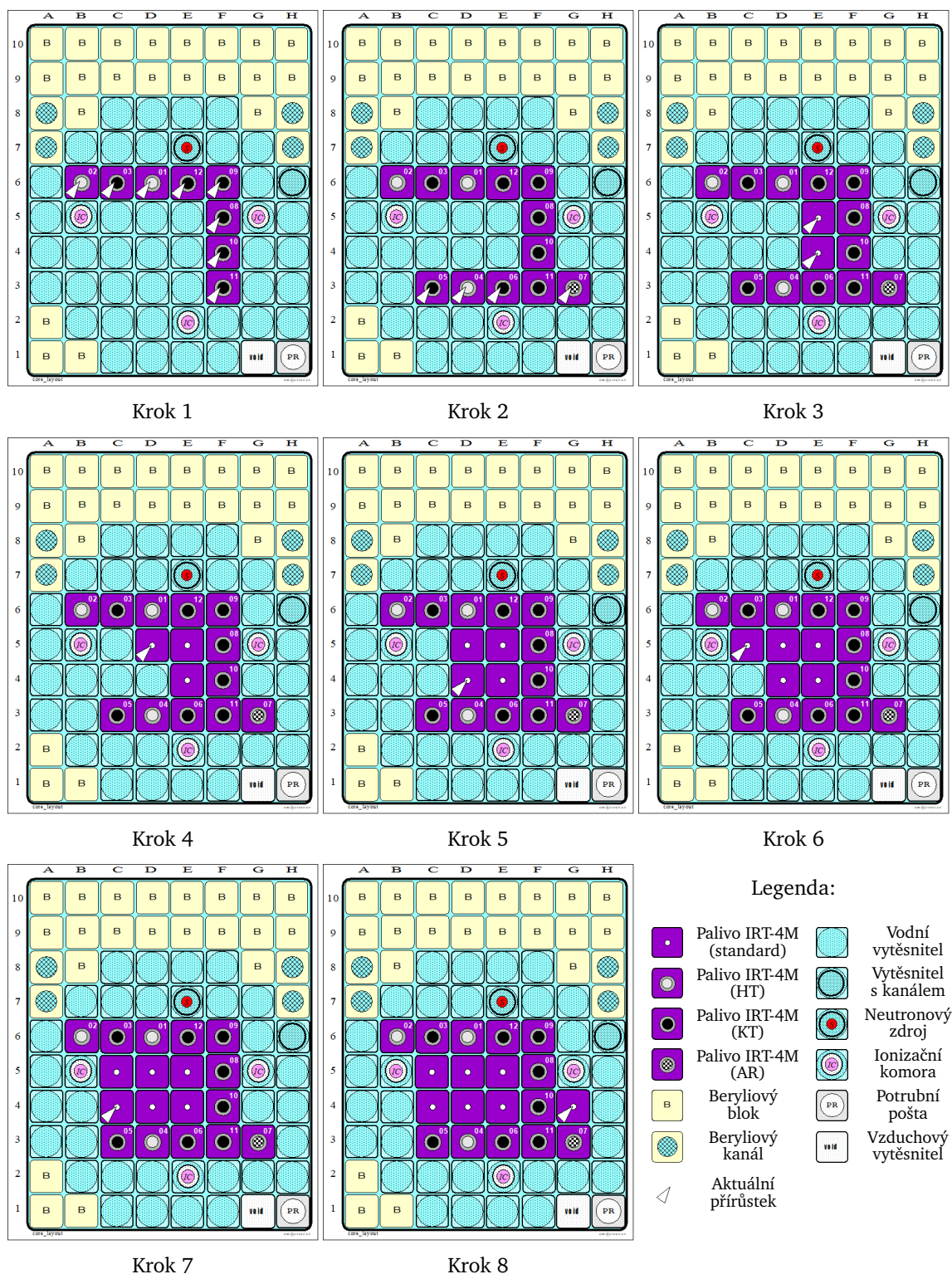
Obr. 5.2: Axiální řez modelem reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC v rovině  $x, z$

Pro výpočty obou základních kritických experimentů jsou za účelem zjednodušení řešených konfigurací AZ reaktoru LVR-15 všechny beryliové kanály nahrazeny beryliovými bloky. Získané výsledky, včetně podrobných informací o výpočtech ZKE1 a ZKE2 jsou prezentovány v následující části.



## 5.1 ZKE1

Základní kritický experiment na reaktoru LVR-15 s označením ZKE1 je tvořen posloupností 8 kroků, pomocí kterých je definován přírůstek vybraných PS do AZ. Konfigurace AZ pro jednotlivé kroky jsou zobrazeny na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Schéma základního kritického experimentu ZKE1 [39]

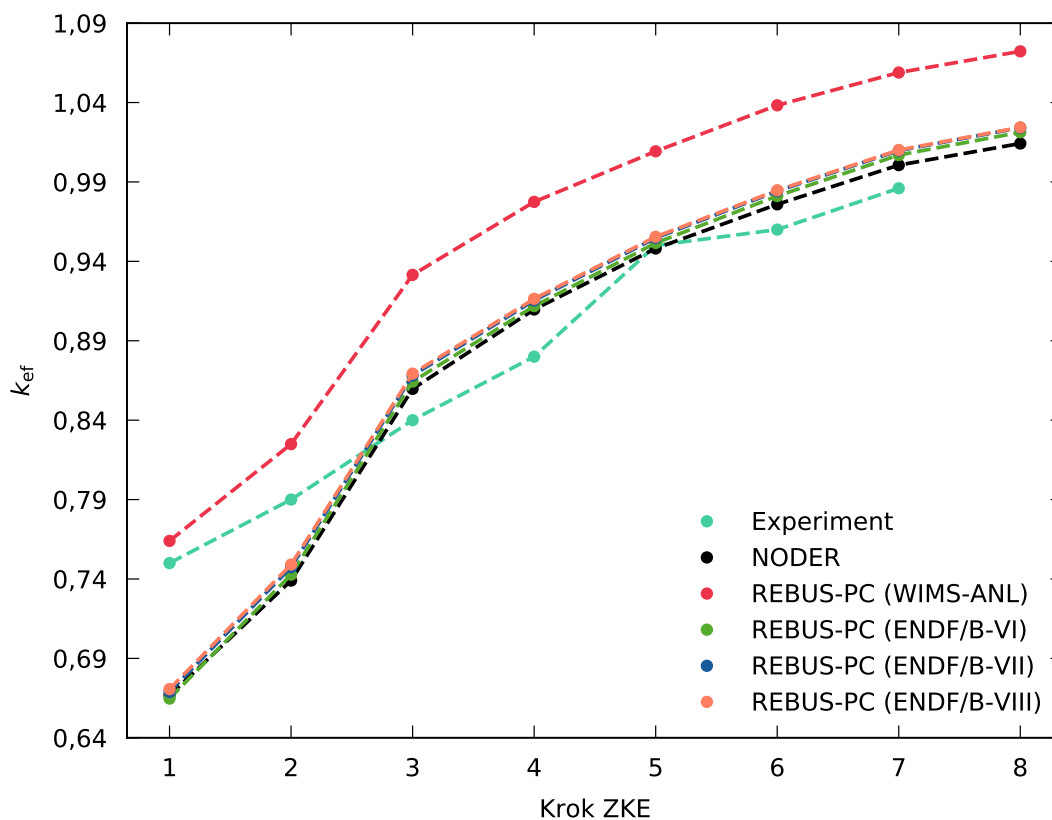
Podle Obr. 5.3 jsou v případě ZKE1 v AZ přítomny 4 typy PS označené fialovou barvou. Prvním typem je standardní 8trubkový PS a zbylé tři typy jsou zastoupeny 6trubkovými PS, ze kterých 3 disponují havarijnými tyčemi, 8 kompenzačními tyčemi a 1 automatickým regulátorem. V Tab. 5.1 je uveden seznam PS, které jsou přidány v jednotlivých krocích základního kritického experimentu ZKE1 v souladu s Obr. 5.3. Součástí Tab. 5.1 je označení PS, počáteční vyhoření v  $\text{MWd kg}_U^{-1}$  a pozice v AZ. PS s označením začínajícím číslovkou 6 jsou 6trubkové. 8trubkové PS jsou označeny počátečním číslem 8. Součástí ZKE1 je celkem 6 PS s nenulovým počátečním vyhořením. Minimální vyhoření je v tomto případě  $3,75 \text{ MWd kg}_U^{-1}$ . Na druhou stranu je zde dosaženo maximálního počátečního vyhoření PS o velikosti  $34,53 \text{ MWd kg}_U^{-1}$ . Všechny PS s počátečním vyhořením jsou v rámci ZKE1 tvořeny skupinou 6trubkových PS.

Tab. 5.1: Vlastnosti PS v jednotlivých krocích ZKE1 [39]

Krok ZKE	Označení PS	Vyhoření ( $\text{MWd kg}_U^{-1}$ )	Pozice v AZ
1	69A563	0,0	B06
1	69A564	0,0	C06
1	69A559	16,92	D06
1	69A465	30,63	E06
1	69A561	3,75	F06
1	69A560	11,87	F05
1	69A566	0,0	F04
1	69A562	4,12	F03
2	69A568	0,0	C03
2	69A565	0,0	D03
2	69A567	0,0	E03
2	69A464	34,53	G03
3	89A462	0,0	E05
3	89A463	0,0	E04
4	89A531	0,0	D05
5	89A532	0,0	D04
6	89A533	0,0	C05
7	89A534	0,0	C04
8	89A535	0,0	G04

Na Obr. 5.4 jsou znázorněny hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat. Obr. 5.4 je dále doplněn o hodnoty koeficientu násobení vypočítané kódem NODER a výsledky z experimentálního měření s využitím ionizačních komor prováděného

v průběhu ZKE1. Číselné hodnoty koeficientů násobení v jednotlivých krocích jsou uvedeny v Tab. 5.2. Rozdíly v určení koeficientu násobení jsou prezentovány v Tab. 5.3, resp. v Tab. 5.4. Jsou zde uvedeny rozdíly mezi experimentem a výpočetními kódy a aktuálně využívaným kódem NODER a kódem REBUS-PC.



Obr. 5.4: Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat [44]

Tab. 5.2: Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat [44]

Krok	Experiment	NODER	REBUS-PC			
			(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
1	0,75000	0,66670	0,76399	0,66471	0,66890	0,67066
2	0,79000	0,73900	0,82491	0,74273	0,74742	0,74908
3	0,84000	0,85970	0,93150	0,86428	0,86812	0,86931
4	0,88000	0,90970	0,97744	0,91180	0,91544	0,91641
5	0,95000	0,94810	1,00930	0,95154	0,95474	0,95547
6	0,96000	0,97590	1,03826	0,98112	0,98419	0,98474
7	0,98600	1,00060	1,05888	1,00692	1,00975	1,01012
8	–	1,01420	1,07223	1,02127	1,02411	1,02439

Tab. 5.3: Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 mezi experimentem a výpočty v kódech NODER a REBUS-PC pro rozdílná jaderná data

Krok	$\Delta k^{\text{Exp}}$ (pcm)				
	NODER	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)	
1	-8330	1399	-8529	-8110	-7934
2	-5100	3491	-4727	-4258	-4092
3	1970	9150	2428	2812	2931
4	2970	9744	3180	3544	3641
5	-190	5930	154	474	547
6	1590	7826	2112	2419	2474
7	1460	7288	2092	2375	2412
8	-	-	-	-	-

Tab. 5.4: Odchyly v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE1 mezi kódy NODER a REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat

Krok	$\Delta k^{\text{NODER}}$ (pcm)			
	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
1	9729	-199	220	396
2	8591	373	842	1008
3	7180	458	842	961
4	6774	210	574	671
5	6120	344	664	737
6	6236	522	829	884
7	5828	632	915	952
8	5803	707	991	1019

Na základě výsledků prezentovaných na Obr. 5.4 a v Tab. 5.2 je možné pozorovat poměrně velký rozdíl v určení koeficientu násobení v případě výpočtů v kódu REBUS-PC s jadernými daty připravenými pomocí kódu WIMS-ANL. Rozdíl mezi výpočtem v kódu REBUS-PC s účinnými průřezy z kódu Serpent je více než 4000 pcm. Velikost této odchyly je velmi pravděpodobně způsobena rozdíly v přípravě jaderných dat pro vodní vytěsňitel a beryliový blok v kódech WIMS-ANL a Serpent, viz porovnání jaderných dat pro nepalivové komponenty v kapitole 4. Hodnoty efektivních koeficientů násobení, které jsou určeny kódem REBUS-PC s použitím jaderných dat z kódu Serpent, jsou tedy bližší výsledkům z aktuálně využívaného kódu NODER společně

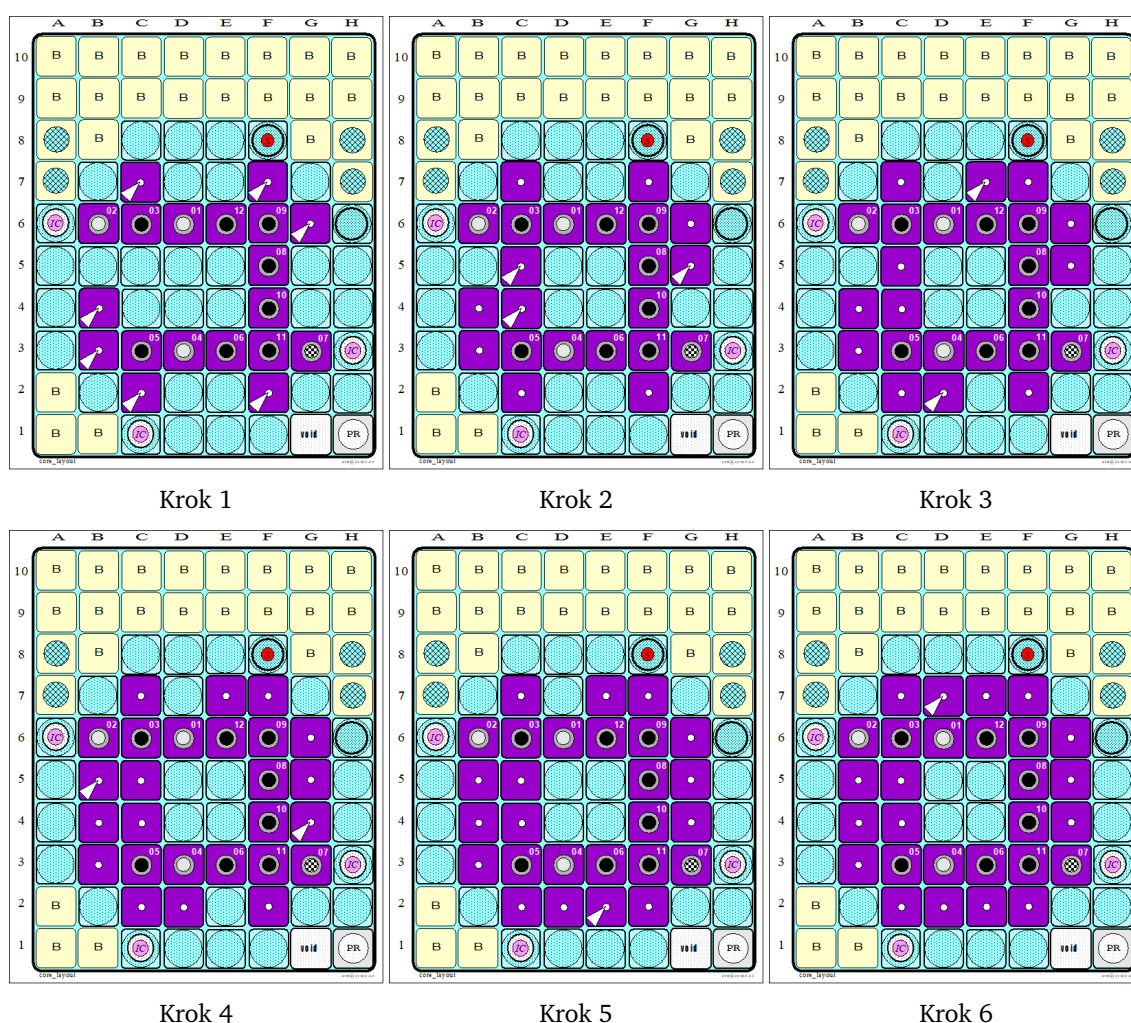
s experimentálními hodnotami. Podle Tab. 5.3 je v předposledním kroku ZKE1 odchylka mezi kódem NODER a experimentem 1 460 pcm. Rozdíly mezi experimentem a kódem REBUS-PC mimo jaderná data z kódu WIMS-ANL jsou téměř dvojnásobné. Experimentální hodnoty koeficientu násobení jsou určeny jako střední hodnoty ze tří nezávislých ionizačních komor. Zejména pro velkou podkritičnost AZ jsou tyto hodnoty naměřeny s poměrně velkou neurčitostí. Při provádění ZKE1 byl počínaje 5. krokem koeficient násobení ve třetí ionizační komoře měřen se systematickou chybou, a proto tyto hodnoty nebyly započítávány do celkové střední hodnoty experimentálně určeného koeficientu násobení [44].

V případě Tab. 5.4 pro odchylky mezi kódem REBUS-PC a NODER je možné pozorovat obdobné rozdíly jako v Tab. 5.3 pro porovnání z experimentem. Odchylky mezi kódem REBUS-PC a NODER jsou pro ZKE1 přibližně 1 000 pcm. Další rozdíly lze srovnat i pro výsledky z kódu REBUS-PC, které jsou založeny na účinných průřezech z kódu Serpent pro různé verze knihovny ENDF/B. Hodnoty určené na základě knihovny ENDF/B-VI jsou o přibližně 300 pcm menší než hodnoty určené s využitím knihoven ENDF/B-VII a ENDF/B-VIII. Tento rozdíl je možné vysvětlit s využitím jaderných dat pro vodní vytěsňatel pro tepelné grupy z Tab. 4.11 – Tab. 4.13, viz kapitola 4. Dalším možným vysvětlením je mimo jiné i absence korekce na tepelné spektrum pro berylium v aplikační knihovně kódu Serpent založené na evaluované knihovně ENDF/B-VI. Uvedený problém je rovněž diskutován při přípravě jaderných dat pro nepalivové komponenty v kapitole 4.

## 5.2 ZKE2

Základní kritický experiment ZKE2 byl proveden v přímé návaznosti na ZKE1 a je tvořen posloupností 6 navazujících kroků. Konfigurace AZ pro každý z kroků kritického experimentu ZKE2 je znázorněna na Obr. 5.5. Ve všech šesti konfiguracích AZ jsou přítomny stejné komponenty jako u předchozího kritického experimentu.

Podobně jako v případě ZKE1 je v Tab. 5.5 uveden seznam PS přidáných v jednotlivých krocích experimentu ZKE2. Aktivní zóna je v případě ZKE2 tvořena větším počtem PS než u předchozího experimentu. Počáteční vyhoření PS je celkově větší, se třemi PS přesahujícími  $70 \text{ MWd kg}_U^{-1}$ . Vyhořelé PS zde patří jak do skupiny 6trubkových, tak 8trubkových PS.

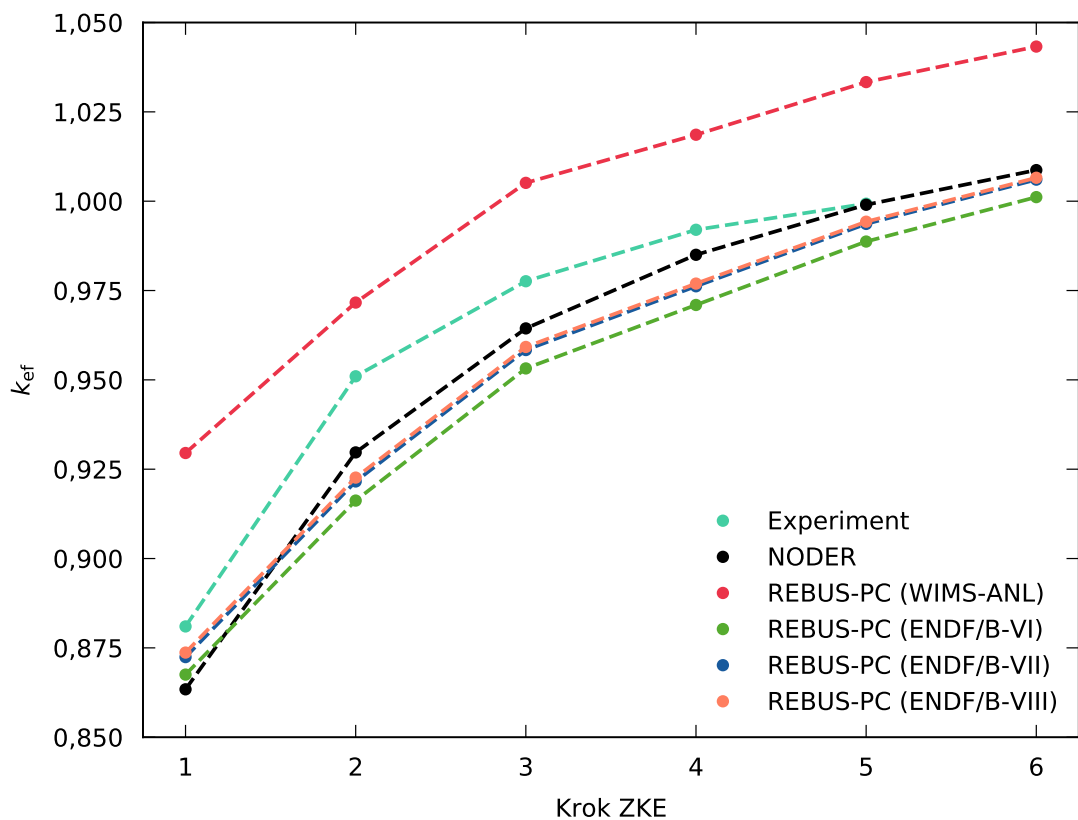


Obr. 5.5: Schéma základního kritického experimentu ZKE2 [39]; význam jednotlivých komponent v AZ je popsán v legendě na Obr. 5.3

Tab. 5.5: Vlastnosti PS v jednotlivých krocích ZKE2 [39]

Krok ZKE	Označení PS	Vyhoření (MWd kg <sub>U</sub> <sup>-1</sup> )	Pozice v AZ
1	89A531	0,0	C07
1	89A462	0,0	F07
1	69A563	0,0	B06
1	69A564	0,0	C06
1	69A559	16,92	D06
1	69A465	30,63	E06
1	69A561	3,75	F06
1	89A535	0,0	G06
1	69A560	11,87	F05
1	89A533	0,0	B04
1	69A566	0,0	F04
1	89A534	0,0	B03
1	69A568	0,0	C03
1	69A565	0,0	D03
1	69A567	0,0	E03
1	69A562	4,12	F03
1	69A464	34,53	G03
1	89A532	0,0	C02
1	89A463	0,0	F02
2	89A454	74,71	C05
2	89A458	17,94	G05
2	89A455	70,74	C04
3	89A457	27,32	E07
3	89A536	0,0	D02
4	89A459	10,65	B05
4	89A456	74,08	G04
5	89A461	1,95	E02
6	89A460	11,53	D07

Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat jsou zobrazeny na Obr. 5.6. Stejně jako v předchozím případě jsou získané hodnoty z Obr. 5.6 dále doplněny o hodnoty koeficientu násobení vypočítané kódem NODER a výsledky z experimentálního měření. Číselné hodnoty koeficientů násobení v jednotlivých krocích ZKE2 jsou uvedeny v Tab. 5.6. V Tab. 5.7 jsou uvedeny odchylky mezi všemi provedenými výpočty a experimentálním měřením z ionizačních komor. Porovnání aktuálně využívaného kódu NODER s kódem REBUS-PC pro rozdílné možnosti přípravy jaderných dat je zapsáno v Tab. 5.8.



Obr. 5.6: Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat [45]

Tab. 5.6: Hodnoty efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 určené kódem REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat [45]

Krok	Experiment	NODER	REBUS-PC			
			(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
1	0,881 00	0,863 40	0,929 53	0,867 52	0,872 42	0,873 68
2	0,951 00	0,929 70	0,971 63	0,916 22	0,921 57	0,922 65
3	0,977 60	0,964 40	1,005 13	0,953 20	0,958 35	0,959 21
4	0,992 00	0,985 00	1,018 60	0,970 96	0,976 19	0,976 94
5	0,999 30	0,999 00	1,033 33	0,988 71	0,993 64	0,994 26
6	-	1,008 70	1,043 27	1,001 14	1,006 03	1,006 56



Tab. 5.7: Odchylky v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 mezi experimentem a výpočty v kódech NODER a REBUS-PC pro rozdílná jaderná data

Krok	$\Delta k^{\text{Exp}}$ (pcm)				
	NODER	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)	
1	-1 760	4 853	-1 348	-858	-732
2	-2 130	2 063	-3 478	-2 943	-2 835
3	-1 320	2 753	-2 440	-1 925	-1 839
4	-700	2 660	-2 104	-1 581	-1 506
5	-30	3 403	-1 059	-566	-504
6	-	-	-	-	-

Tab. 5.8: Odchylky v hodnotách efektivního koeficientu násobení pro jednotlivé kroky ZKE2 mezi kódy NODER a REBUS-PC na základě rozdílných jaderných dat

Krok	$\Delta k^{\text{NODER}}$ (pcm)			
	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
1	6 613	412	902	1 028
2	4 193	-1 348	-813	-705
3	4 073	-1 120	-605	-519
4	3 360	-1 404	-881	-806
5	3 433	-1 029	-536	-474
6	3 457	-756	-267	-214

Z výsledných hodnot efektivního koeficientu násobení AZ reaktoru LVR-15 pro jednotlivé kroky základního kritického experimentu ZKE2 z Obr. 5.6 je zřejmé, že rozdíl v přípravě jaderných dat pomocí kódu WIMS-ANL je, podobně jako u ZKE1, opět poměrně velký. I v rámci výpočtu ZKE2 je tento efekt připisován rozdílům v účinných průřezích mezi kódem WIMS-ANL a Serpent pro vodní vytěsňitel a beryliový blok z kapitoly 4. Stejně jako v případě ZKE1 jsou výsledné hodnoty koeficientu násobení z kódu REBUS-PC s využitím jaderných dat z kódu Serpent na základě evaluovaných knihoven ENDF/B-VII a ENDF/B-VIII poměrně stejné s odchylkou v řádu desítek pcm. Znovu je zde možné pozorovat rozdíl u knihovny ENDF/B-VI, kde jsou koeficienty násobení menší o několik stovek pcm oproti novějším verzím knihovny ENDF/B. Tyto odchylky je možné vysvětlit rozdílem v přípravě jaderných dat kódem Serpent pro vodní vytěsňitel v tepelných grupách, viz Tab. 4.11 – Tab. 4.13 v kapitole 4. Dalším

částečným vlivem může být chybějící korekce na tepelné spektrum pro berylium z aplikační knihovny kódu Serpent odvozené z evaluované knihovny ENDF/B-VI. Na druhou stranu vliv berylia je vzhledem k zastoupení beryliových bloků na periférii AZ v obou případech ZKE méně významný.

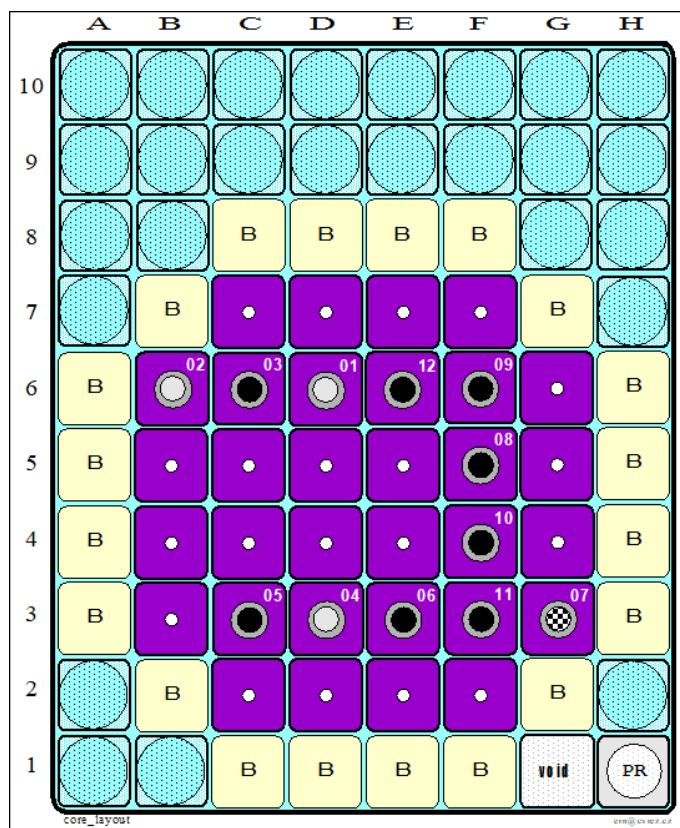
Podle Tab. 5.7 lze u předposledního kroku ZKE2 pozorovat rozdíl mezi výpočtem v kódu NODER a experimentem o velikosti  $-30$  pcm. Této shodě jsou nejbližší rozdíly z kódu REBUS-PC na základě knihoven ENDF/B-VII a ENDF/B-VIII. Přesto jsou tyto odchylky větší o několik stovek pcm. Ve zbylých případech jsou koeficienty násobení určeny s rozdíly, které jsou násobně větší. Obdobné rozdíly a velikosti odchylek je možné pozorovat i mezi kódem NODER a REBUS-PC, viz Tab. 5.8.

Na základě porovnání obou základních kritických experimentů je možné konstatovat, že v případě ZKE2 jsou nově určené hodnoty koeficientů násobení bližší jak experimentálním hodnotám, tak hodnotám vypočítaným kódem NODER. V případě ZKE1 jsou tyto odchylky větší o stovky pcm. Obecně jsou všechny výsledky z kódu REBUS-PC zatíženy poměrně velkou nejistotou spojenou s modelem určování počátečního materiálového složení částečně vyhořelých PS. Navzdory této skutečnosti lze míru shody výsledků založených na jaderných datech z kódu Serpent s experimentálními hodnotami a s výsledky z kódu NODER v řádu nižších stovek pcm v případě ZKE2 považovat za velmi dobrou.

## 6 Modelová kampaň reaktoru LVR-15

V návaznosti na problematiku přípravy jaderných dat pro palivo IRT-4M a pro ne-palivové komponenty výzkumného reaktoru LVR-15 a na celozónové výpočty základních kritických experimentů ZKE1 a ZKE2 z předchozích kapitol, je možné přistoupit k výpočtům souvisejícím s plánování kampaní na reaktoru LVR-15 s využitím kódu REBUS-PC. Obsahem této kapitoly je určení zásoby reaktivity potřebné na provoz reaktoru v časovém horizontu 15 až 20 dní. Součástí výpočtů je také nalezení kritického stavu, ve kterém jsou vypočítány váhy některých absorpčních tyčí.

Pro určování uvedených parametrů byla zvolena modelová kampaň s počáteční vsázkou vycházející z konfigurace v posledním kroku základního kritického experimentu ZKE2 z kapitoly 4. Tato konfigurace je navíc doplněna o 4 standardní 8trubkové PS, kterými je nahrazena centrální neutronová past v AZ. Zároveň jsou místo reflektoru tvořeného vodními vytěsnitely použity beryliové bloky. Konfigurace AZ modelové kampaně je zobrazena na Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Konfigurace AZ modelové kampaně reaktoru LVR-15 [39]; význam jednotlivých komponent v AZ je identický jako v případě ZKE, viz legenda na Obr. 5.3

Modelová vsázka pro výpočty kampaně reaktoru LVR-15 byla vytvořena s ohledem na použití PS s nižším středním počátečním vyhořením, než jaké je standardně používáno při reálných kampaních. Cílem této skutečnosti je snížení nejistoty při kritických výpočtech v důsledku určování počátečního složení paliva pro PS s velkým vyhořením, viz kapitola 3.

Rozmístění palivových souborů v konfiguraci AZ modelové kampaně spolu s příslušným počátečním vyhořením je založeno na základním kritickém experimentu ZKE2 z kapitoly 4. Do středu AZ jsou navíc přidány 4 PS s nenulovým počátečním vyhořením s označením 89A011, 89A012, 89A021 a 89A022. Účelem navýšení počtu PS v AZ je zvýšení zásoby reaktivity potřebné pro požadovanou délku kampaně. V Tab. 6.1 jsou uvedeny informace o pozici a počátečním vyhoření jednotlivých PS.

Tab. 6.1: Pozice a počáteční vyhoření PS v modelové kampani reaktoru LVR-15

Označení PS	Vyhoření (MWd kg <sub>U</sub> <sup>-1</sup> )	Pozice v AZ	Označení PS	Vyhoření (MWd kg <sub>U</sub> <sup>-1</sup> )	Pozice v AZ
69A559	16,92	D06	89A535	0,0	G06
69A563	0,0	B06	89A459	10,65	B05
69A564	0,0	C06	89A454	74,71	C05
69A565	0,0	D03	89A458	17,94	G05
69A568	0,0	C03	89A533	0,0	B04
69A567	0,0	E03	89A455	70,74	C04
69A464	34,53	G03	89A456	74,08	G04
69A560	11,87	F05	89A534	0,0	B03
69A561	3,75	F06	89A532	0,0	C02
69A566	0,0	F04	89A536	0,0	D02
69A562	4,12	F03	89A461	1,95	E02
69A465	30,63	E06	89A463	0,0	F02
89A531	0,0	C07	89A011	12,0	D05
89A460	11,53	D07	89A012	32,0	E05
89A457	27,32	E07	89A021	40,0	D04
89A462	0,0	F07	89A022	64,0	E04

Analogicky jako u základních kritických experimentů ZKE1 a ZKE2 jsou pro neutronické výpočty v kódu REBUS-PC využita jaderná data připravená pomocí kódů WIMS-ANL a Serpent. Všechny výpočty jsou tedy provedeny při použití 4 různých sad jaderných dat. Za prvé jsou uvažována data z kódu WIMS-ANL a z knihovny ENDF/B-VI. Druhá skupina jaderných dat z kódu Serpent je tvořena na základě tří verzí evaluovaných knihoven ENDF/B-VI, VII a VIII. Na rozdíl od výpočtů základních kritických

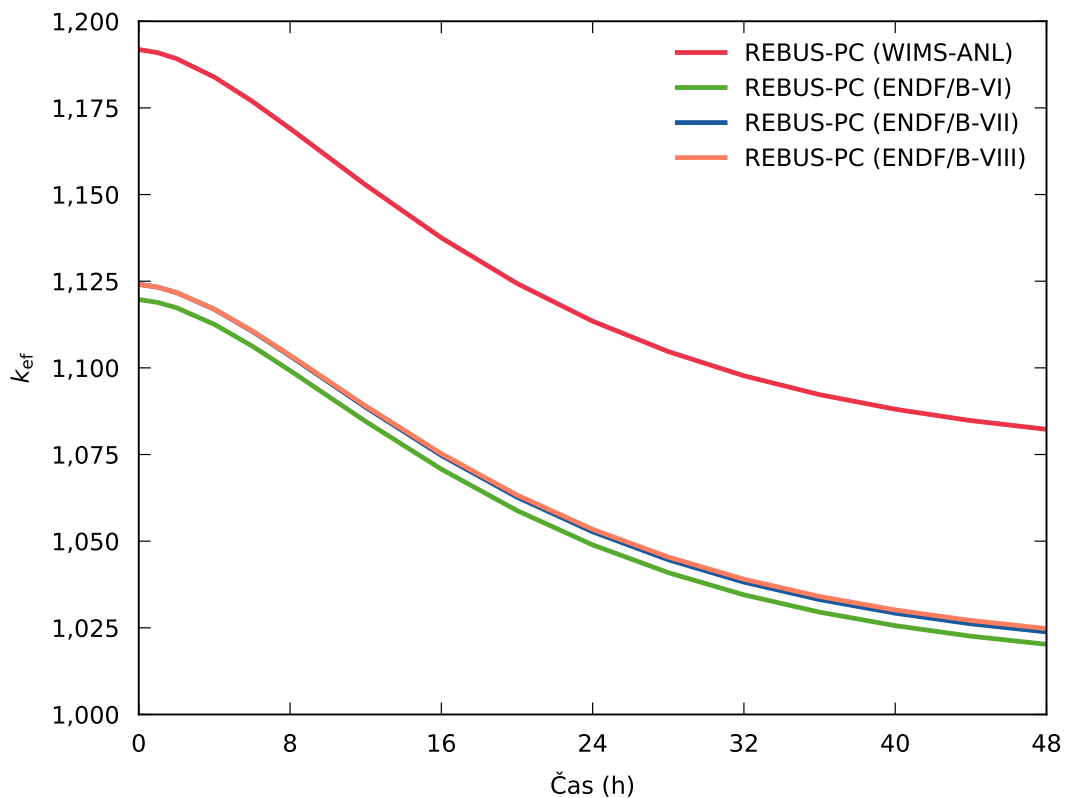
experimentů jsou v případě modelové kampaně reaktoru LVR-15 všechna jaderná data uvažována v horkém stavu. V rámci horkého stavu jsou jaderná data připravena pro teploty, které přibližně odpovídají provoznímu stavu reaktoru LVR-15. Data pro palivo jsou připravena pro teplotu 363 K. Teplota moderátoru, pokrytí a dalších nepalivových komponent je uvažována jako 313 K.

Tab. 6.2: Posloupnost časových kroků vyhoření pro modelovou kampaň reaktoru LVR-15

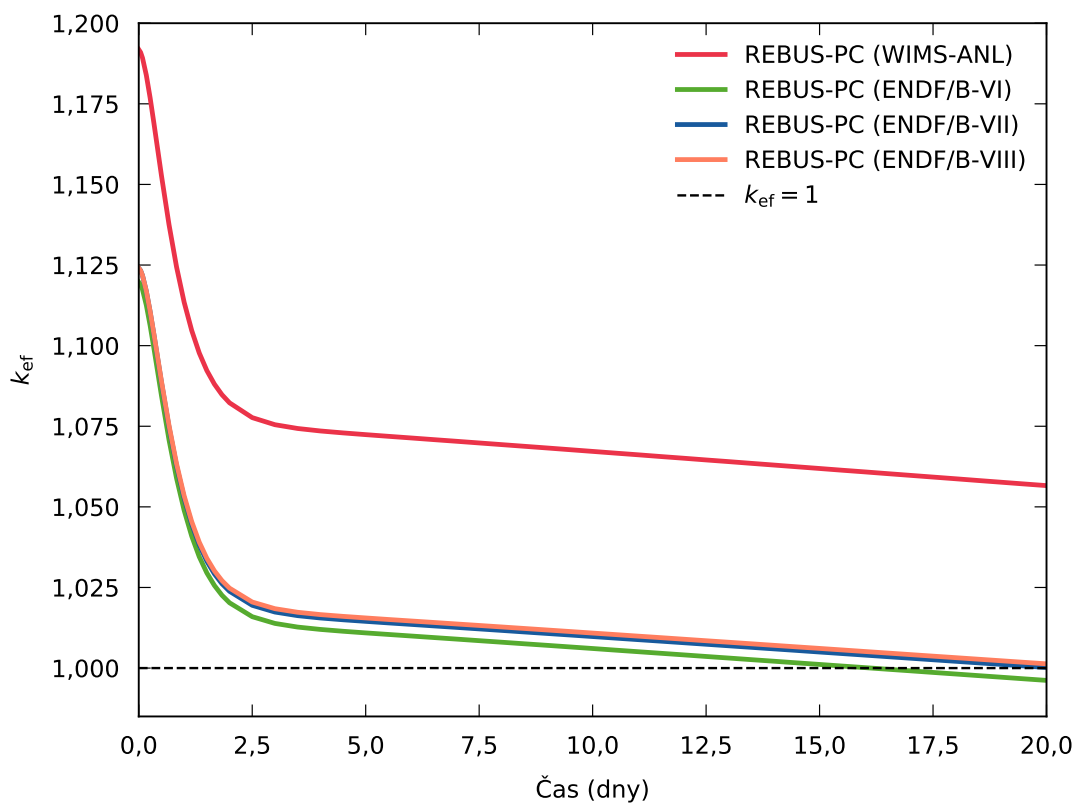
Čas (h)								
0	1	2	4	6	8	12	16	20
24	28	32	36	40	44	48	...	
Čas (dny)								
2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5
16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0

Na Obr. 6.2, resp. Obr. 6.3 je zobrazena krátkodobá, resp. dlouhodobá časová závislost efektivního koeficientu násobení modelové kampaně reaktoru LVR-15. Výpočet vyhoření je proveden se všemi absorpčními tyčemi v horní koncové poloze 60,0 cm. Celkový výkon AZ v kódu REBUS-PC je vzhledem k analýze ze 3. kapitoly snížen na 67% nominálního výkonu reaktoru LVR-15, tedy na 6,7 MW. Posloupnost časových kroků vyhoření je zapsána v Tab. 6.2. Do okamžiku ustálení hladiny xenonu  $^{135}\text{Xe}$  jsou použity kroky v řádu nižších jednotek hodin. Po ustálení koncentrace xenonu je koeficient násobení určen po každých 12 hodinách kampaně. Číselné hodnoty efektivních koeficientů násobení pro vybrané časové kroky vyhoření jsou uvedeny v Tab. 6.3.

Následně jsou v Tab. 6.4 zapsány zvolené kritické polohy absorpčních tyčí spolu s hodnotami efektivního koeficientu násobení. Tyto hodnoty jsou v Tab. 6.4 zapsány pro výpočty založené na jaderných datech z kódu Serpent pro všechny uvažované verze knihovny ENDF/B. V případě výpočtu s jadernými daty z kódu WIMS-ANL je přebytek reaktivity tak velký, že i při zasunutí všech tyčí do AZ je hodnota  $k_{\text{ef}}$  větší než 1. V Tab. 6.5 jsou zaznamenány váhy havarijních tyčí v kritických stavech z Tab. 6.4. Váhy tyčí jsou určeny jako rozdíl reaktivit pro tyč v horní a dolní koncové poloze. Na závěr kapitoly je na Obr. 6.4 prezentována charakteristika 3 vybraných absorpčních tyčí pro data z knihovny ENDF/B-VIII.



Obr. 6.2: Krátkodobý vývoj koeficientu násobení modelové kampaně reaktoru LVR-15



Obr. 6.3: Dlouhodobý vývoj koeficientu násobení modelové kampaně reaktoru LVR-15

Tab. 6.3: Koeficient násobení modelové kampaně z kódu REBUS-PC pro vybrané časové kroky

$k_{\text{ef}}$				
Čas (h)	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
0	1,19185	1,11971	1,12410	1,12409
2	1,18920	1,11734	1,12171	1,12173
6	1,17691	1,10629	1,11056	1,11070
12	1,15276	1,08454	1,08863	1,08900
24	1,11347	1,04893	1,05271	1,05343
36	1,09228	1,02952	1,03315	1,03405
48	1,08227	1,02025	1,02381	1,02479

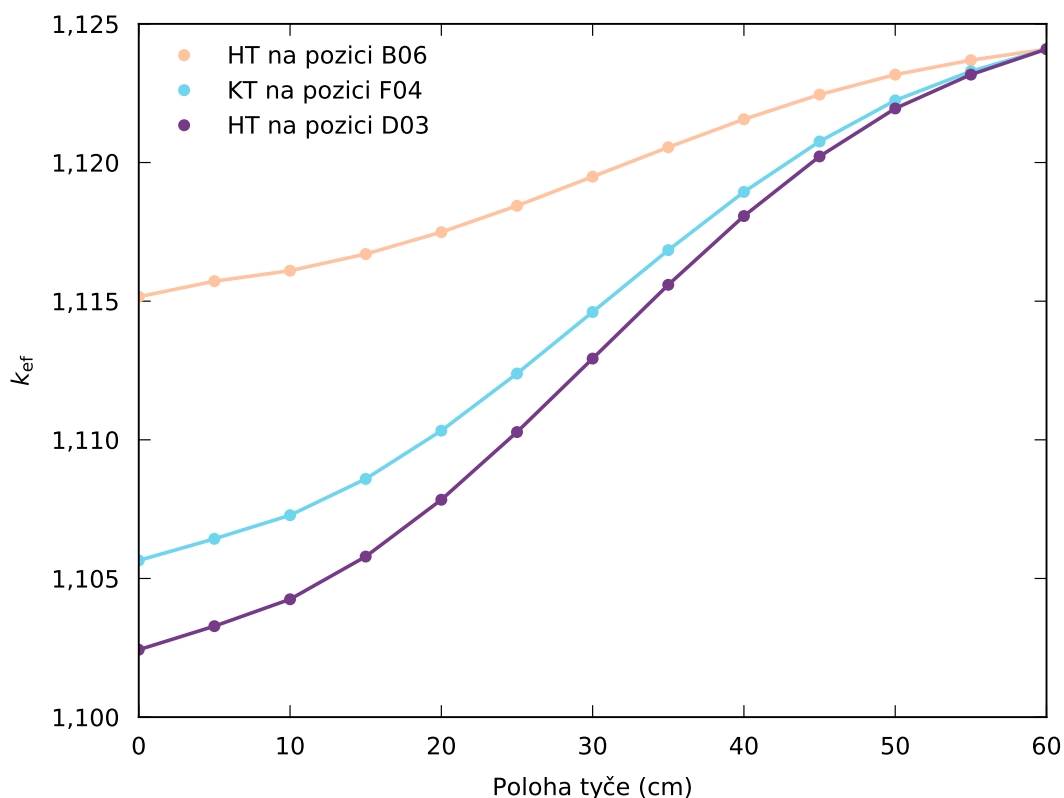
Čas (dny)	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
2,5	1,07768	1,01594	1,01947	1,02049
5	1,07240	1,01091	1,01449	1,01555
10	1,06720	1,00607	1,00978	1,01086
15	1,06190	1,00113	1,00498	1,00610
20	1,05659	0,99618	1,00018	1,00132

Tab. 6.4: Kritické polohy absorpčních tyčí v počáteční fázi modelové kampaně reaktoru LVR-15

Poloha tyče (cm)				
Pozice v AZ	REBUS-PC			
	(WIMS-ANL)	(ENDF/B-VI)	(ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
D06	–	60,0	60,0	60,0
B06	–	60,0	60,0	60,0
C06	–	0,0	0,0	0,0
D03	–	60,0	60,0	60,0
C03	–	0,0	0,0	0,0
E03	–	0,0	0,0	0,0
G03	–	50,0	40,0	40,0
F05	–	0,0	0,0	0,0
F06	–	60,0	0,0	60,0
F04	–	20,0	55,0	0,0
F03	–	0,0	0,0	0,0
E06	–	0,0	0,0	0,0
$k_{\text{ef}}$	–	1,00003	0,99992	1,00003

Tab. 6.5: Váhy havarijních tyčí v kritické konfiguraci modelové kampaně reaktoru LVR-15

Pozice v AZ	Váha tyče (pcm)		
	(ENDF/B-VI)	REBUS-PC (ENDF/B-VII)	(ENDF/B-VIII)
D06	1 797	1 682	1 839
B06	1 035	1 029	1 069
D03	1 889	2 075	1 884



Obr. 6.4: Charakteristika vybraných absorpčních tyčí pro výpočet v kódu REBUS-PC s daty z knihovny ENDF/B-VIII

Při porovnání krátkodobého, resp. dlouhodobého vývoje koeficientu násobení modelové kampaně z Obr. 6.2, resp. Obr. 6.3 je možné pozorovat zásadní rozdíl mezi výsledky založenými na jaderných datech z kódu WIMS-ANL a Serpent. Podobně jako při výpočtech základních kritických experimentů z kapitoly 5 je v případě kódu WIMS-ANL koeficient násobení AZ významně nadhodnocen. Oproti ZKE je rozdíl v hodnotách  $k_{ef}$  modelové kampaně dokonce ještě větší. Zvýšení tohoto rozdílu je velmi pravděpodobně způsobeno použitím beryliového reflektoru, viz Obr. 6.1. V porovnání účinných průřezů pro nepalivové komponenty z kapitoly 4 bylo ukázáno, že rozdíly pro be-



ryliový blok jsou násobně větší než pro vodní vytěsňitel, kterým jsou obklopeny PS v rámci konfigurací AZ pro ZKE. Na druhou stranu pro vývoj  $k_{ef}$  určený s využitím jaderných dat z kódu Serpent lze pozorovat odchylky, které jsou výrazně menší. Pro knihovny ENDF/B-VIII a ENDF/B-VII jsou rozdíly mezi hodnotami  $k_{ef}$  o velikosti od jednotek pcm na začátku kampaně až po přibližně 110 pcm po 20 dnech kampaně. Pro knihovnu ENDF/B-VI jsou hodnoty  $k_{ef}$  odlišné od obou novějších verzí knihovny o přibližně 400–500 pcm. Tento rozdíl je možné částečně vysvětlit absencí korekce na tepelné spektrum pro berylium v aplikační knihovně kódu Serpent pro knihovnu ENDF/B-VI, viz porovnání ve 4. kapitole.

Vzhledem k velkému koeficientu násobení pro jaderná data z kódu WIMS-ANL není na začátku modelové kampaně možné dosáhnout kritického stavu. Nalezení kritického stavu v ostatních případech, pro data z kódu Serpent, je v úvodní fázi kampaně možné pro polohy absorpčních tyčí z Tab. 6.4. Pro kritické stavy z Tab. 6.4 jsou v horní koncové poloze všechny 3 havarijní tyče a ve dvou případech i jedna tyč kompenzační. Automatický regulátor je zde vždy umístěn v poloze v horní polovině AZ. Prezentované polohy absorpčních tyčí v kritickém stavu na začátku modelové kampaně jsou obdobné jako polohy tyčí při dosahování prvního kritického stavu u reálných kampaní na reaktoru LVR-15.

Váhy havarijních tyčí z Tab. 6.5 určené pro vybraný kritický stav z Tab. 6.4 jsou vypočítány v řádu přibližně 1 000 pcm pro tyč v pozici B06 s menší vahou a v rozsahu od přibližně 1 600 až 2 000 pcm pro havarijní tyče s větší vahou. Uvedené váhy tyčí pro modelovou kampaň jsou blízké vahám tyčí pro standardní reálnou kampaň na reaktoru LVR-15 s odchylkou v řádu nižších stovek pcm [46]. Vypočítané váhy havarijních tyčí jsou v souladu s provedenou charakteristikou tyčí na pozici B06 a D03 z Obr. 6.4. Na Obr. 6.4 je navíc znázorněna charakteristika kompenzační tyče na pozici F04, jejíž poloha je různá při dosahování kritických stavů podle Tab. 6.4. Celkově tvar zobrazených křivek odpovídá daným pozicím tyčí v AZ, viz Obr. 6.1.

## Závěr

Pro plánování vsázek na výzkumném reaktoru LVR-15 v Řeži je v současné době využíván difuzní kód NODER, který je založen na jaderných datech z knihovny ENDF/B-V. Cílem této diplomové práce bylo ověřit aplikovatelnost deterministického provozního kódu REBUS-PC, v závislosti na různých sadách jaderných dat, pro návrhy vsázek reaktoru LVR-15.

Klíčovým krokem nutným pro splnění cíle diplomové práce byla příprava jaderných dat pro komponenty AZ reaktoru LVR-15. Pozornost byla věnována popisu metod pro přípravu jaderných dat pomocí deterministického kódu WIMS-ANL a stochastického kódu Serpent. V případě kódu WIMS-ANL byla použita aplikační knihovna založená na evaluované knihovně ENDF/B-VI. Při výpočtech v kódu Serpent byla jaderná data připravována na základě odlišných verzí knihovny ENDF/B – VI, VII a VIII. Pro účely porovnání obou kódů byla provedena příprava jaderných dat pro detailní model 8trubkového PS typu IRT-4M, který je standardně využíván na reaktoru LVR-15. V rámci výpočtu paliva IRT-4M byly porovnávány hodnoty účinných průřezů a dalších jaderných dat pro 4 různé sady z kódů WIMS-ANL a Serpent. V případě nuklidů v palivu byly ve většině případů relativní odchylky mezi hodnotami mikroskopických účinných průřezů s výjimkou mikroskopického účinného průřezu pro radiační záchyt na uranu  $^{238}\text{U}$  v řádu desetin procent. U hodnoty  $\sigma_\gamma$  pro  $^{238}\text{U}$  bylo možné pozorovat odchylky v řádu jednotek procent. Vliv těchto odchylek byl poměrně výrazný na určení koeficientu násobení modelu 8trubkového PS v kódu REBUS-PC v návazné citlivostní analýze. Na druhou stranu v případě vodního moderátoru vyplňujícího prostor mezi palivovými trubkami bylo dosaženo relativních odchylek o velikosti až  $-26,9\%$  pro hodnoty makroskopického účinného průřezu pro transport. Obecně byly odchylky od kódu WIMS-ANL menší pro použití knihovny ENDF/B-VI v kódu Serpent.

Pro umožnění 3D výpočtů AZ reaktoru LVR-15 bylo nutné zjednodušit detailní geometrii PS z předchozích výpočtů do zhomogenizované geometrie. Toto zjednodušení bylo provedeno pro 8trubkový PS a pro 6trubkový PS s hliníkovým vytěsňatelem a s absorbátorem. Při přechodu od detailní geometrie ke zjednodušeným modelům PS byly zachovány koeficienty násobení z důvodu rozdílné geometrie oproti reálným PS. Stejně hodnoty  $k_\infty$  bylo dosaženo snížením koncentrace bóru  $^{10}\text{B}$  u PS s absorbátorem a zvýšením koncentrace hliníku ve směsi paliva u zbylých typů PS.

Z důvodu přítomnosti částečně vyhořelých PS v počátečních konfiguracích AZ v kampaních reaktoru LVR-15 bylo nutné vytvořit model vyhořívání PS s cílem určit počáteční izotopické složení v palivu. Samostatný model vyhoření PS byl vytvořen v kódu REBUS-PC a následně byl srovnáván s odpovídajícím modelem v kódu Serpent. Zvláštní pozornost byla věnována axiálnímu rozložení nuklidů  $^{235}\text{U}$ ,  $^{135}\text{I}$  a  $^{135}\text{Xe}$  ve vybraných krocích vyhoření. I přes shodu v koncentraci  $^{135}\text{I}$  s relativní odchylkou v řádu jednotek procent v centru PS po ustálení hladiny xenonu, byly rozdíly v koncentraci  $^{135}\text{Xe}$  ve stejném kroku nesrovnatelně větší v řádu nižších stovek procent. Následně bylo provedeno porovnání množství uranu  $^{235}\text{U}$  v PS mezi modelem v kódu REBUS-PC a ve validovaném modelu v kódu MCNP. Na základě tohoto porovnání byl normalizován výkon v modelu v kódu REBUS-PC, aby množství štěpného materiálu, v podobě  $^{235}\text{U}$ , v PS bylo co nejvíce srovnatelné s reálným zastoupením.

Stejně jako pro palivo bylo potřeba připravit jaderná data i pro nepalivové komponenty, které jsou součástí AZ reaktoru LVR-15. Na rozdíl od hodnot účinných průřezů pro palivo, byly v případě jaderných dat pro nepalivové komponenty pozorovány násobně větší odchylky mezi kódy WIMS-ANL a Serpent. Největší relativní odchylky byly určeny pro hodnoty makroskopických účinných průřezů pro transport a pro rozptyl mezi zvolenými grupami na beryliovém bloku o velikosti až  $-62,9\%$ . Podobně významné rozdíly byly zaznamenány i v případě makroskopických účinných průřezů pro vodní vytěsňitel.

Po ukončení přípravy jaderných dat bylo možné přejít k celozónovým výpočtům reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC. Za prvé byly provedeny neutronické výpočty dvou základních kritických experimentů ZKE1 a ZKE2. V obou případech bylo možné pozorovat vliv přípravy jaderných dat pro nepalivové komponenty, zvláště pro vodní vytěsňitel, kterým jsou PS v AZ obklopeny. Hodnota koeficientu násobení z kódu REBUS-PC s použitím jaderných dat z kódu WIMS-ANL byla u ZKE1 nadhodnocena o přibližně 6 000, resp. 7 000 pcm oproti výpočtu v kódu NODER, resp. experimentálními hodnotám. U ZKE2 byly tyto odchylky poloviční. Na druhou stranu pro hodnoty  $k_{\text{ef}}$  založené na jaderných datech z kódu Serpent bylo dosaženo velmi dobré shody v případě ZKE2 s odchylkami až  $-214$  pcm mezi kódem REBUS-PC a NODER. U ZKE1 byly tyto odchylky větší o několik stovek pcm. Kromě hodnot účinných průřezů jsou uvedené výsledky zatíženy poměrně velkou nejistotou způsobenou určením izotopického složení paliva u PS s nenulovým počátečním vyhořením.

Za druhé byly v závěrečné části práce provedeny celozónové výpočty modelové kampaně reaktoru LVR-15. Stejně jako v případě ZKE byly hodnoty efektivního koeficientu násobení z kódu REBUS-PC s jadernými daty z kódu WIMS-ANL nadhodnoceny. Vlivem změny reflektoru v podobě použití beryliových bloků jsou vzniklé odchylky od hodnot  $k_{ef}$  založených na jaderných datech z kódu Serpent ještě větší než v případě ZKE. Pro výpočty v kódu REBUS-PC s jadernými daty z kódu Serpent byly dále určeny kritické stavy v počáteční fázi modelové kampaně. Nastavené polohy absorpčních tyčí při těchto stavech byly přibližně stejné jako polohy tyčí v počátečních fázích u reálných kampaní na reaktoru LVR-15. Váhy havarijních tyčí byly v případě modelové kampaně vypočítány s odchylkou nižších stovek pcm oproti hodnotám z reálných kampaní.

Závěrem diplomové práce lze konstatovat, že deterministický kód REBUS-PC je možné využít pro výpočty pro návrh vsázek na reaktoru LVR-15. Na základě výpočtů provedených v diplomové práci je pro přípravu jaderných dat vhodnější použití stochastického kódu Serpent s využitím evaluované knihovny ENDF/B-VIII nebo ENDF/B-VII. Zároveň je dále doporučeno věnovat zvýšenou pozornost přípravě jaderných dat pro nepalivové komponenty spolu s modelem určování izotopického složení PS s nenulovým počátečním vyhořením. Prostřednictvím obou uvedených součástí výpočetního modelu reaktoru LVR-15 jsou do značné míry ovlivněny výsledky celozónových výpočtů v kódu REBUS-PC.

Další možnou alternativní variantou k uvedeným výpočtům AZ reaktoru LVR-15 v kódu REBUS-PC je použití analogického způsobu přípravy jaderných dat v kódu Serpent s využitím novějších verzí knihovny ENDF/B ve spojení s aktuálně využívaným kódem NODER. Případným nahrazením kódu WIMS-4DM, který je standardně využíván pro přípravu jaderných dat pro kód NODER, kódem Serpent lze zajistit přechod od současně využívané knihovny ENDF/B-V k novějším verzím této knihovny. Uvedený výpočetní model je možné považovat za potenciální alternativu k navrženému použití kódu REBUS-PC v budoucím procesu plánování vsázek na reaktoru LVR-15.

## Seznam použité literatury

- [1] PINTA, J. *Provozní výpočetní neutronově-fyzikální kód pro návrhy vsázek reaktoru LVR-15*. Praha, 2019. Bakalářská práce. FJFI ČVUT v Praze, Katedra jaderných reaktorů.
- [2] PINTA, J. *Analýza použití alternativního neutronově-fyzikálního provozního kódu pro návrh vsázek reaktoru LVR-15*. Praha, 2020. Výzkumný úkol. FJFI ČVUT v Praze, Katedra jaderných reaktorů.
- [3] CCC-0698 WIMS-ANL 4.0, Deterministic Code System for Lattice Calculation. *Nuclear Energy Agency* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/ccc-0698/>
- [4] CCC-0708 REBUS-PC 1.4, Code System for Analysis of Research Reactor Fuel Cycles. *Nuclear Energy Agency* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/ccc-0708/>
- [5] DEEN, J. R. et al. *WIMS-4DM User Manual Rev.0*. Argonne National Laboratory, Illinois (USA), červenec 1995.
- [6] ERNEST, J. *Abstrakt výpočtového programu NODER - rev.1*. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., Divize reaktorových služeb, září 2006.
- [7] DEEN, J. R. et al. *New ENDF/B-V Nuclear Data Library for WIMSD4M*. Argonne National Laboratory, Illinois (USA), 1993.
- [8] LEPPÄNEN, J. et al. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear energy*. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>
- [9] A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code. *Los Alamos National Laboratory* [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://mcnp.lanl.gov/references.shtml>
- [10] BROWN, D. et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets*. 2018, 148, 1-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
- [11] CABELLO, Oscar et al. *JEFF-3.3 criticality benchmarking* NEA Nuclear Data Week & JEFF Meeting, November 2017.
- [12] SHIBATA, Keiichi et al. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *Journal of Nuclear Science and Technology*. Taylor & Francis, 2011, 48(1), 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675>
- [13] NJOY – Nuclear Data Processing Code. *Los Alamos National Laboratory* [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <http://www.njoy21.io>
- [14] NEWTON, T. et al. *Reactor Core Design and Modeling of the MIT Research Reactor for Conversion to LEU*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts (USA), červenec 2008.

- [15] ANDRZEJEWSKI, K. et al. *Computational Uncertainties in Neutron-Physics Analysis of MARIA Reactor Using WIMS Codes*. Institute of Atomic Energy, Polsko, červenec 2006.
- [16] APOSTOLOV, T. et al. *Progress in Joint Feasibility Study of Conversion from HEU to LEU Fuel at IRT-200, Sofia*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of Bulgarian Academy of Science, Bulharsko, listopad 2004.
- [17] DUNFORD, C. Evaluated Nuclear Data File, ENDF/B-VI. *Nuclear Data for Science and Technology*. 1992, 788-792. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-58113-7\\_222](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58113-7_222)
- [18] FRIDMAN, E. a J. LEPPÄNEN. On the use of the Serpent Monte Carlo code for few-group cross section generation. *Annals of Nuclear Energy*. 2011, 38(6), 1399-1405. DOI: [doi:https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.032](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.032)
- [19] CHADWICK, M. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. *Nuclear Data Sheets*. 2011, 112(12), 2887-2996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- [20] ISOTXS File Description. *Los Alamos National Laboratory* [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://t2.lanl.gov/nis/codes/transx-hyper/isotxs.html>
- [21] KULIKOWSKA, T. *Introduction to Reactor Lattice Calculations by the WIMSD Code*. IAEA Report. Institute of Atomic Energy, Polsko, 1998.
- [22] POWNEY, D. a T. NEWTON. *Overview of the WIMS 9 Resonance Treatment*. A Report produced for ANSWERS, září 2004.
- [23] CARLSON, B. *Solution of Transport Equation by Sn Approximations*. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, únor 1955.
- [24] STACEY, W. *Nuclear Reactor Physics*. 2nd ed., completely rev. and enlarged. Weinheim: Wiley-VCH, c2007. ISBN 978-3-527-40679-1.
- [25] LESLIE, D. *The SPECTROX Method for Thermal Spectra in Lattice Cells*. Atomic Energy Establishment, Winfrith, srpen 1967.
- [26] DEEN, J. R. et al. *WIMS-ANL User Manual Rev.4*. Argonne National Laboratory, Illinois (USA), leden 2001.
- [27] MARLEAU, G. a X. GRAMMONT. *Fewgroup Burnup Calculations Using Time Dependent Microscopic Cross Sections*. Institute de génie nucléaire, 1997.
- [28] PARK, H. J. et al. Generation of Few-Group Diffusion Theory Constants by Monte Carlo Code McCARD. *Nuclear Science and Engineering* [online]. 2017, 172(1), 66-77 [cit. 2020-12-28]. ISSN 0029-5639. DOI: 10.13182/NSE11-22
- [29] LEE, C. a Y. S. JUNG. *Generation of the Cross Section Library for PROTEUS*. Argonne National Laboratory, Illinois (USA), leden 2018.
- [30] STEVENS, J. G. *The REBUS-MCNP Linkage*. Argonne National Laboratory, Illinois (USA), duben 2008.

- [31] LEPPÄNEN, J. *Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code – User’s Manual*. VTT Technical Research Centre of Finland, březen 2013.
- [32] LIN C. S. a W. S. YANG. An assessment of the applicability of multigroup cross sections generated with Monte Carlo method for fast reactor analysis. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020, 52(12), 2733-2742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.029>
- [33] LEPPÄNEN, J. Microscopic Scattering Matrix. *Discussion forum for Serpent users* [online]. [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://ttuki.vtt.fi/serpent/viewtopic.php?f=24&t=2284>
- [34] LIN C. S. Serpent XS preparation. In: *FJFI Webmail* [online] 30. 9. 2020, 12:09 [vid. 2021-02-08].
- [35] KALTIAISENAHO T. *Statistical Tests and the Underestimation of Variance in Serpent 2*. VTT Technical Research Centre of Finland, únor 2014.
- [36] ERNEST, J. a J. KYNCL *Verifikace trojrozměrného difúzního programu NODER určeného pro výpočty aktivních zón s palivem typu IRT-M*. ÚJV 9992 R, 1993.
- [37] KOLEŠKA, M. *The Fuel Burnup Determination Method Based on Gamma Spectrometric Measurement*. Praha, 2016. Disertační práce. FJFI ČVUT v Praze, Katedra jaderných reaktorů.
- [38] *Geometrické a materiálové charakteristiky komponent AZ reaktoru LVR-15*. Centrum výzkumu Řež s.r.o, říjen 2020.
- [39] ERNEST J. *Schéma základního kritického experimentu ZKE\_2011 s palivem IRT-4M a výstavba provozní konfigurace K132*. Centrum výzkumu Řež s.r.o, srpen 2011.
- [40] *Předprovozní bezpečnostní zpráva reaktoru LVR-15*. Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2016.
- [41] *Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon* [online]. 14. červenec 2016 [vid. 2021-04-27]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263\\_2016\\_AZ\\_20210101.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263_2016_AZ_20210101.pdf)
- [42] *Vyhláška č. 21/2017 Sb., o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení* [online]. 23. leden 2017 [vid. 2021-04-27]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/21\\_2017.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/21_2017.pdf)
- [43] RATAJ, Jan et al. *Experimentální neutronová a reaktorová fyzika - laboratorní cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05904-3.
- [44] KOLEŠKA M. a V. JUŘÍČEK. *Vyhodnocení ZKE 1 v průběhu výstavby konfigurace AZ K132 reaktoru LVR-15*. Centrum výzkumu Řež s.r.o, září 2011.
- [45] KOLEŠKA M. a V. JUŘÍČEK. *Vyhodnocení ZKE II v průběhu výstavby konfigurace AZ K132 reaktoru LVR-15*. Centrum výzkumu Řež s.r.o, září 2011.
- [46] JUŘÍČEK V. *Osvědčení o aktivní zóně K225*. Centrum výzkumu Řež s.r.o, duben 2021.

## A. Datový soubor ISOTXS/A.ISO

Obsahem této přílohy je představení datového formátu ISOTXS, resp. A.ISO který je využíván pro přímé poskytování jaderných dat pro výpočetní kód REBUS-PC. Část textové formy datového souboru ISOTXS pro srovnávací výpočet provedený ve druhé části kapitoly 1 je uvedena v následujícím příkladu. Jaderná data v 7grupovém přiblížení, která jsou v ukázce obsažena byla připravena kódem WIMS-ANL s využitím vícegrupové knihovny založené na evaluované knihovně ENDF/B-VI.

---

```
0V ISOTXS *ENDF/B-VI * 0
1D 7 10 6 6 2 1 4 1
2D *Supercell IRT-4M fuel (8s) *
* * SM01 0 SM02 0 SM03 0 U35A 0 U38A 0 O16A 0 AL7A 0 AL-A 0 HW-A 0
OW-A 0
8.7649482E-01 1.2316781E-01 3.3917950E-04 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
1.7223688E+09 3.7636339E+08 7.2557210E+06 1.2675572E+06 8.6822875E+05
4.4750672E+05 2.2383488E+05 1.0000000E+07 5.0000000E+05 9.1180000E+03
1.1230000E+00 6.2500000E-01 2.5000000E-01 5.7999998E-02 9.9999997E-06
0 3 6 9 12 15 18 21 24 27
4D SM01 0 ENDF/B
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
1.0000000E+00
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0
100 200 300 1 0 0 0 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
6 5 4 3 2 1 7 6 5 4 3 2
1 7 6 5 4 3 2 1 7 6 5 4
3 2 1
5D 1.4064703E-01 2.7831532E-01 3.3106218E-01 2.8300474E-01
3.9685226E-01 6.0698205E-01 1.1422272E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
7D 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 1.9937088E-01 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 3.2173776E-01 1.3015809E-02
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 1.0791325E-03 2.8273080E-01
1.8096418E-03 7.7847351E-06 0.0000000E+00 0.0000000E+00 2.1881936E-03
```



1.5806363E-01 1.2248930E-03 0.0000000E+00 0.0000000E+00 4.6677690E-09  
1.4010879E-03 1.6657615E-01 2.2101571E-02 1.3353320E-07 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 1.4199184E-02 1.6848574E-01 1.4031296E-02 6.2540148E-07  
1.5446293E-08 0.0000000E+00 0.0000000E+00 1.7333948E-01 1.4532667E-02  
1.5292806E-07 3.0599524E-08 8.6941122E-10 0.0000000E+00 0.0000000E+00

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

4D U35A 0 ENDF/B 2

2.3504420E+02 3.1037575E-11 1.0486638E-12 3.0000000E+02 1.2216000E+01  
1.3938299E-03

1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
100	200	300	1	0	0	0	7	7	7	7	7
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	5	4	3	2	1	7	6	5	4	3	2
1	7	6	5	4	3	2	1	7	6	5	4
3	2	1									

5D 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00

0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 7.3031111E+00 1.1715820E+01  
4.6021851E+01 8.6125351E+01 1.6616629E+02 3.1210660E+02 6.8572559E+02  
7.4153297E-02 4.5234588E-01 1.2867014E+01 9.0799608E+00 2.4169905E+01  
4.3686790E+01 9.7743660E+01 1.1948143E+00 1.6659936E+00 2.1331757E+01  
6.3695358E+01 1.2788371E+02 2.5370294E+02 5.7289587E+02 2.6691065E+00  
2.4400358E+00 2.4339464E+00 2.4366508E+00 2.4366999E+00 2.4367001E+00  
2.4366999E+00 1.0890611E-02 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00

7D 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00

0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00  
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

---

Jaderná data ve formátu ISOTXS pro kód REBUS-PC jsou rozdělena do několika bloků s označením 1D, 2D, 4D, 5D a 7D. Zatímco bloky 1D a 2D jsou v rámci celého datového souboru unikátní, bloky 4D, 5D a 7D jsou zahrnuty pro každý izotop v každém časovém kroku vyhoření. Každý blok je iniciován příslušným označením bloku, za kterým jsou dále uvedeny jednotlivé hodnoty.

Bloky 1D, 2D a 4D jsou převážně informativní a jejich podrobný popis lze vyhledat v literatuře [20]. Na druhou stranu obsahem bloků 5D a 7D jsou přímo hodnoty účinných průřezů. V bloku 5D jsou zapsány účinné průřezy pro uvažované reakce pro daný nuklid a časový krok vyhoření. Pořadí zápisu účinných průřezů pro každý typ reakce je od grupy s nejvyššími energiemi neutronů po grupy tepelné. V bloku 7D jsou obdobným způsobem zaznamenány rozptylové matice.

V prezentovaném příkladu jsou uvedena jaderná data pro uran  $^{235}\text{U}$  s označením U35A a pro fiktivní izotop SM01. Fiktivní izotop SM01 je součástí paliva a byl vytvořen za účelem porovnání přípravy jaderných dat v kódu WIMS-ANL s kódem Serpent, ve kterém není možné generovat mikroskopické rozptylové matice pro jednotlivé nuklidy. Na základě této skutečnosti je pro každý materiál modelované soustavy v kódu REBUS-PC vytvořen jeden fiktivní izotop s jednotkovou atomovou hustotou. Pro každý z fiktivních izotopů je následně připravena makroskopická rozptylová matice v kódu Serpent a její hodnoty jsou zapsány do bloku 7D. Použitím jednotkové atomové hustoty v kombinaci s makroskopickými účinnými průřezy je dosaženo správnosti neutronického řešení v kódu REBUS-PC. Identický postup založený na makroskopických datech je použit i v případě účinného průřezu pro transport, jehož hodnoty jsou zapisovány do prvních pozic bloku 5D.

Účelem fiktivního izotopu SM01 je tedy poskytnutí rozptylové matice a účinných průřezů pro transport v palivu. V bloku 5D izotopu SM01 je obsaženo 7 hodnot makroskopických účinných průřezů pro transport. Ostatní hodnoty bloku 5D jsou nulové. V následujícím bloku 7D je obsažena makroskopická rozptylová matice pro palivo. Pořadí zápisu hodnot matice je následující:

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{G,1} & \dots & \Sigma_{1,1} \\ \vdots & \ddots & \\ \Sigma_{G,G} & & \Sigma_{1,G} \end{bmatrix}$$

Výrazem  $\Sigma_{g,g'}$  je zastoupena hodnota makroskopického účinného průřezu pro rozptyl z grupy  $g$  do grupy  $g'$ . Celkový počet grup je dán symbolem  $G$ , přičemž grupa s označením 1 odpovídá grupě s nejvyššími energiemi neutronů.

Pro uran  $^{235}\text{U}$  s označením U35A jsou součástí bloku 5D tyto mikroskopické účinné průřezy a jiná data v 7grupovém přiblížení v uvedeném pořadí:

- nulové hodnoty účinného průřezu pro transport  
(transport v uranu  $^{235}\text{U}$  je zahrnut v datech pro fiktivní izotop SM01)
- $\sigma_t$  – celkový účinný průřez
- $\sigma_\gamma$  – účinný průřez pro radiační záchyt
- $\sigma_f$  – účinný průřez pro štěpení
- $\nu$  – výtěžek neutronů ze štěpení
- $\sigma_{2n}$  – účinný průřez pro reakci (n,2n)

Hodnoty mikroskopické rozptylové matice pro nuklid s označením U35A jsou v tomto případě nulové, protože rozptyl v rámci jednotlivých grup v uranu  $^{235}\text{U}$  je opět součástí makroskopické rozptylové matice pro fiktivní izotop SM01.

## B. Přehled 69 grup v kódu WIMS-ANL

Rychlé grupy (1–14):

Grupa	Horní energie (eV)	Dolní energie (eV)
1	1,000 E+07	6,066 E+06
2	6,066 E+06	3,679 E+06
3	3,679 E+06	2,231 E+06
4	2,231 E+06	1,353 E+06
5	1,353 E+06	8,210 E+05
6	8,210 E+05	5,000 E+05
7	5,000 E+05	3,025 E+05
8	3,025 E+05	1,830 E+05
9	1,830 E+05	1,110 E+05
10	1,110 E+05	6,734 E+04
11	6,734 E+04	4,085 E+04
12	4,085 E+04	2,478 E+04
13	2,478 E+04	1,503 E+04
14	1,503 E+04	9,118 E+03

Rezonanční grupy (15–27):

Grupa	Horní energie (eV)	Dolní energie (eV)
15	9,118 E+03	5,530 E+03
16	5,530 E+03	3,519 E+03
17	3,519 E+03	2,240 E+03
18	2,240 E+03	1,425 E+03
19	1,425 E+03	9,069 E+02
20	9,069 E+02	3,673 E+02
21	3,673 E+02	1,487 E+02
22	1,487 E+02	7,550 E+01
23	7,550 E+01	4,805 E+01
24	4,805 E+01	2,770 E+01
25	2,770 E+01	1,597 E+01
26	1,597 E+01	9,877 E+00
27	9,877 E+00	4,000 E+00

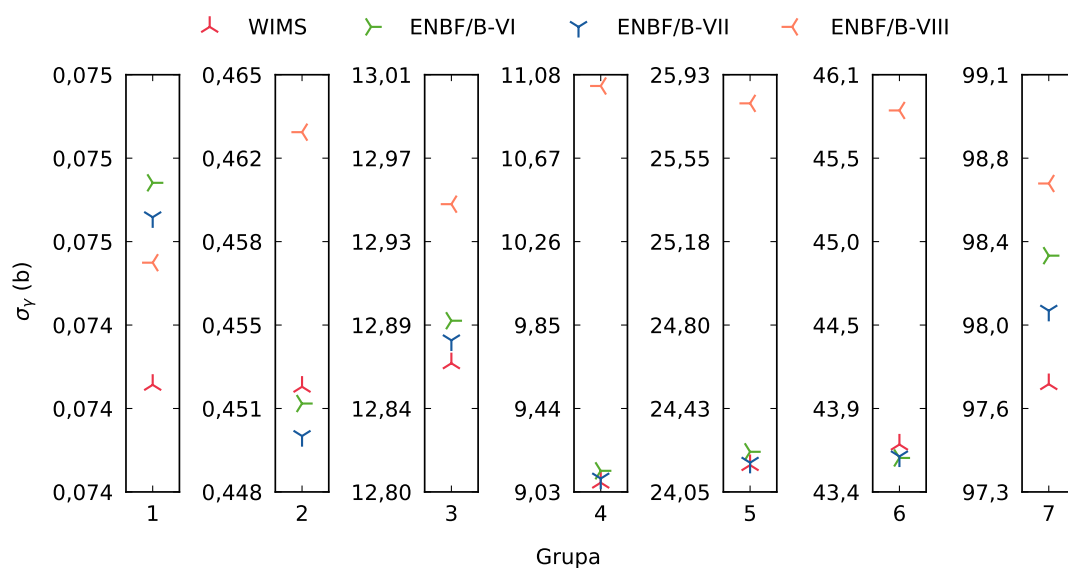
Tepelné grupy (28–69):

Grupa	Horní energie (eV)	Dolní energie (eV)
28	4,000 E+00	3,300 E+00
29	3,300 E+00	2,600 E+00
30	2,600 E+00	2,100 E+00
31	2,100 E+00	1,500 E+00
32	1,500 E+00	1,300 E+00
33	1,300 E+00	1,150 E+00
34	1,150 E+00	1,123 E+00
35	1,123 E+00	1,097 E+00
36	1,097 E+00	1,071 E+00
37	1,071 E+00	1,045 E+00
38	1,045 E+00	1,020 E+00
39	1,020 E+00	9,960 E−01
40	9,960 E−01	9,720 E−01
41	9,720 E−01	9,500 E−01
42	9,500 E−01	9,100 E−01
43	9,100 E−01	8,500 E−01
44	8,500 E−01	7,800 E−01
45	7,800 E−01	6,250 E−01
46	6,250 E−01	5,000 E−01
47	5,000 E−01	4,000 E−01
48	4,000 E−01	3,500 E−01
49	3,500 E−01	3,200 E−01
50	3,200 E−01	3,000 E−01
51	3,000 E−01	2,800 E−01
52	2,800 E−01	2,500 E−01
53	2,500 E−01	2,200 E−01
54	2,200 E−01	1,800 E−01
55	1,800 E−01	1,400 E−01
56	1,400 E−01	1,000 E−01
57	1,000 E−01	8,000 E−02
58	8,000 E−02	6,700 E−02
59	6,700 E−02	5,800 E−02
60	5,800 E−02	5,000 E−02
61	5,000 E−02	4,200 E−02
62	4,200 E−02	3,500 E−02
63	3,500 E−02	3,000 E−02
64	3,000 E−02	2,500 E−02
65	2,500 E−02	2,000 E−02
66	2,000 E−02	1,500 E−02
67	1,500 E−02	1,000 E−02
68	1,000 E−02	5,000 E−03
69	5,000 E−03	1,000 E−05

## C. Srovnání účinných průřezů pro palivo IRT-4M

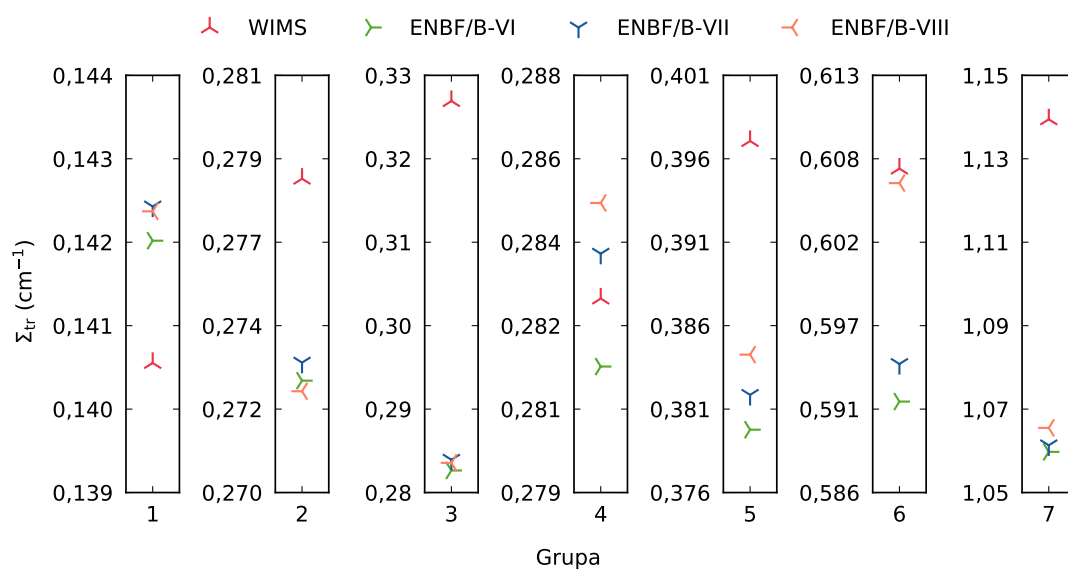
Obsahem této přílohy je rozšiřující srovnání jaderných dat pro model 8trubkového palivového souboru typu IRT-4M, které je diskutováno v rámci kapitoly 1. Srovnání hodnot účinných průřezů je provedeno pro vybrané nuklidy a reakce v palivu, pokrytí a moderátoru.

$\sigma_{\gamma}$  pro  $^{235}\text{U}$  v palivu



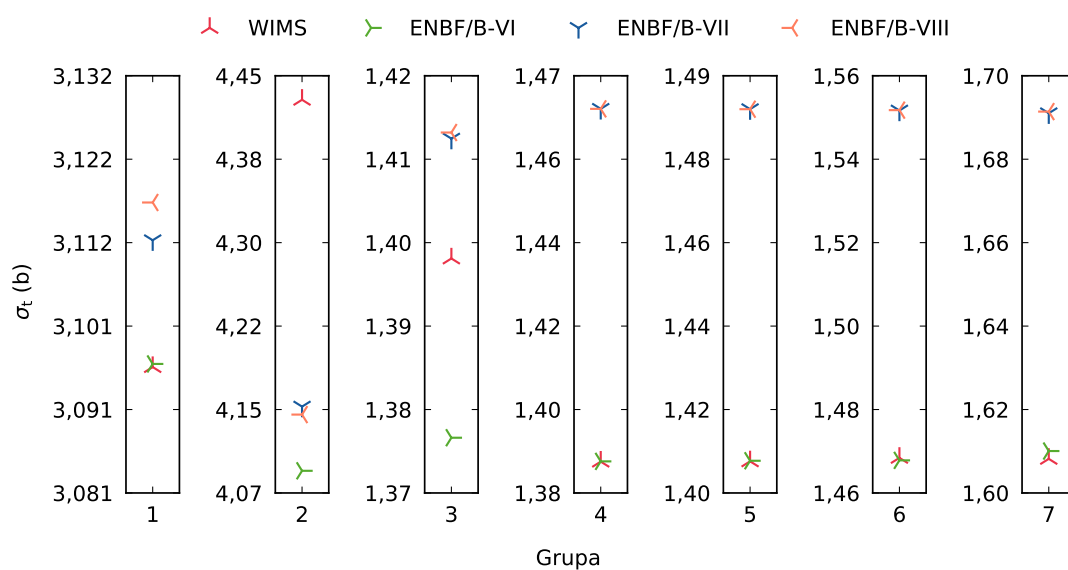
Grupa	$\sigma_{\gamma}^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_{\gamma}^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_{\gamma}^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_{\gamma}^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	0,07	0,07	+0,9	0,07	+0,8	0,07	+0,6
2	0,45	0,45	-0,1	0,45	-0,4	0,46	+2,3
3	12,87	12,89	+0,2	12,88	+0,1	12,95	+0,6
4	9,08	9,14	+0,6	9,10	+0,2	11,02	+21,4
5	24,17	24,23	+0,2	24,18	0,0	25,80	+6,7
6	43,69	43,60	-0,2	43,61	-0,2	45,83	+4,9
7	97,74	98,33	+0,6	98,08	+0,3	98,65	+0,9

### $\Sigma_{tr}$ v palivu



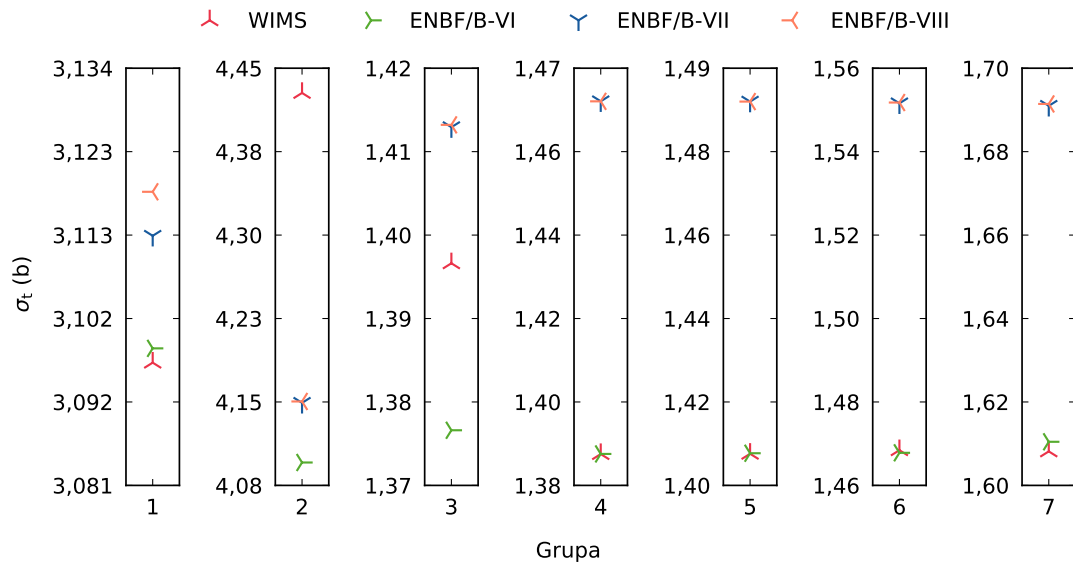
Grupa	$\Sigma_{tr}^{wims}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_{tr}^{VI}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)	$\Sigma_{tr}^{VIII}$ (cm <sup>-1</sup> )	RO (%)
1	0,141	0,142	+0,9	0,142	+1,2	0,142	+1,2
2	0,278	0,273	-2,0	0,273	-1,8	0,273	-2,1
3	0,331	0,284	-14,3	0,285	-13,9	0,285	-14,0
4	0,283	0,281	-0,5	0,284	+0,4	0,285	+0,8
5	0,397	0,379	-4,4	0,382	-3,9	0,384	-3,3
6	0,607	0,592	-2,5	0,594	-2,1	0,606	-0,2
7	1,142	1,056	-7,6	1,058	-7,4	1,062	-7,0

### $\sigma_t$ pro <sup>27</sup>Al v palivu



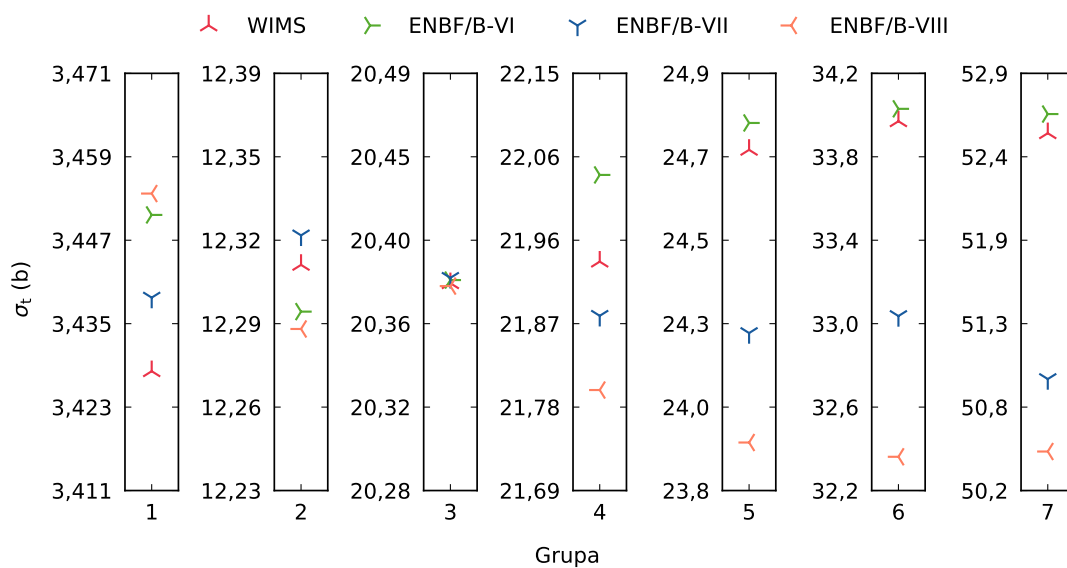
Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	3,10	3,10	0,0	3,11	+0,5	3,12	+0,7
2	4,43	4,09	-7,7	4,15	-6,4	4,14	-6,6
3	1,39	1,37	-1,6	1,41	+1,1	1,41	+1,1
4	1,39	1,39	0,0	1,47	+5,6	1,47	+5,6
5	1,41	1,41	0,0	1,49	+5,6	1,49	+5,6
6	1,47	1,47	0,0	1,55	+5,3	1,55	+5,3
7	1,61	1,61	+0,1	1,69	+5,1	1,69	+5,1

### $\sigma_t$ pro $^{27}\text{Al}$ v pokrytí



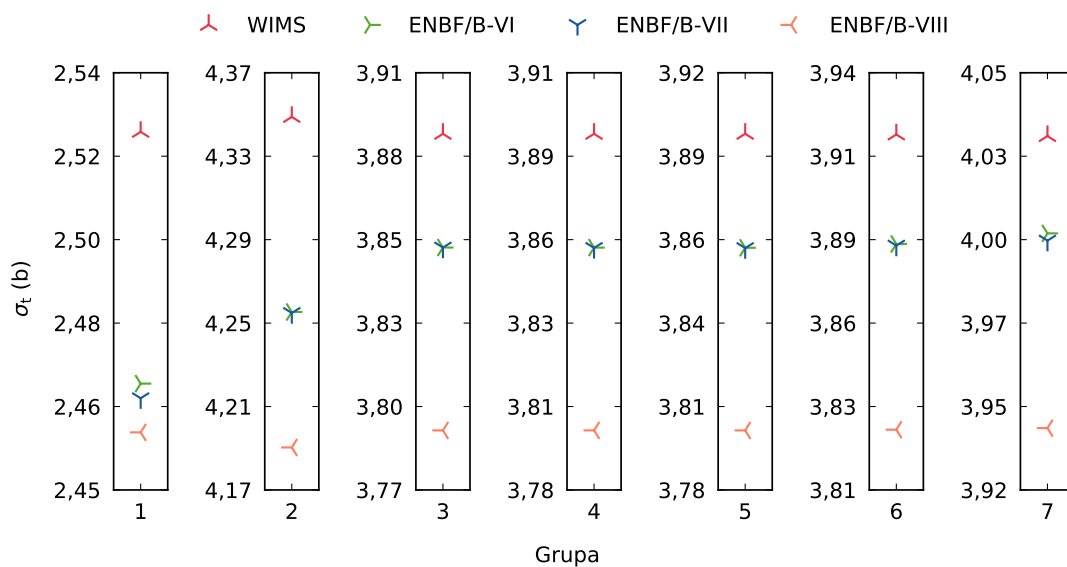
Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	3,10	3,10	+0,1	3,11	+0,5	3,12	+0,7
2	4,43	4,10	-7,5	4,15	-6,3	4,15	-6,2
3	1,39	1,37	-1,5	1,41	+1,2	1,41	+1,2
4	1,39	1,39	0,0	1,47	+5,6	1,47	+5,6
5	1,41	1,41	0,0	1,49	+5,6	1,49	+5,6
6	1,47	1,47	0,0	1,55	+5,3	1,55	+5,3
7	1,61	1,61	+0,1	1,69	+5,1	1,69	+5,1

### $\sigma_t$ pro $^1\text{H}$ v moderátoru



Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	3,43	3,45	+0,7	3,44	+0,3	3,45	+0,7
2	12,31	12,30	-0,1	12,32	+0,1	12,29	-0,2
3	20,38	20,38	0,0	20,39	0,0	20,38	0,0
4	21,94	22,04	+0,4	21,88	-0,3	21,80	-0,6
5	24,68	24,75	+0,3	24,23	-1,9	23,95	-3,0
6	33,99	34,05	+0,2	33,06	-2,7	32,38	-4,7
7	52,54	52,67	+0,2	50,95	-3,0	50,48	-3,9

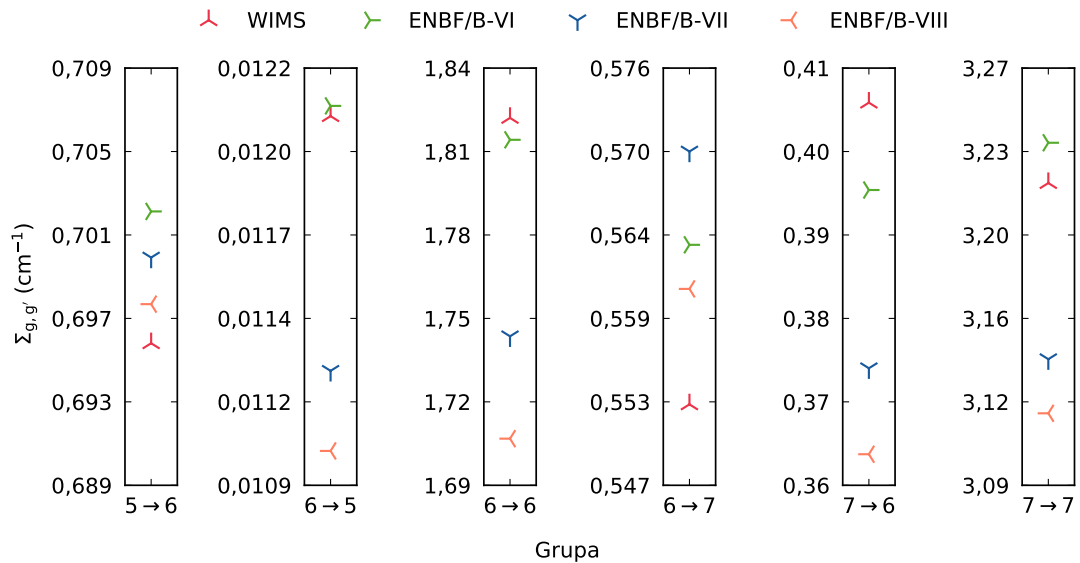
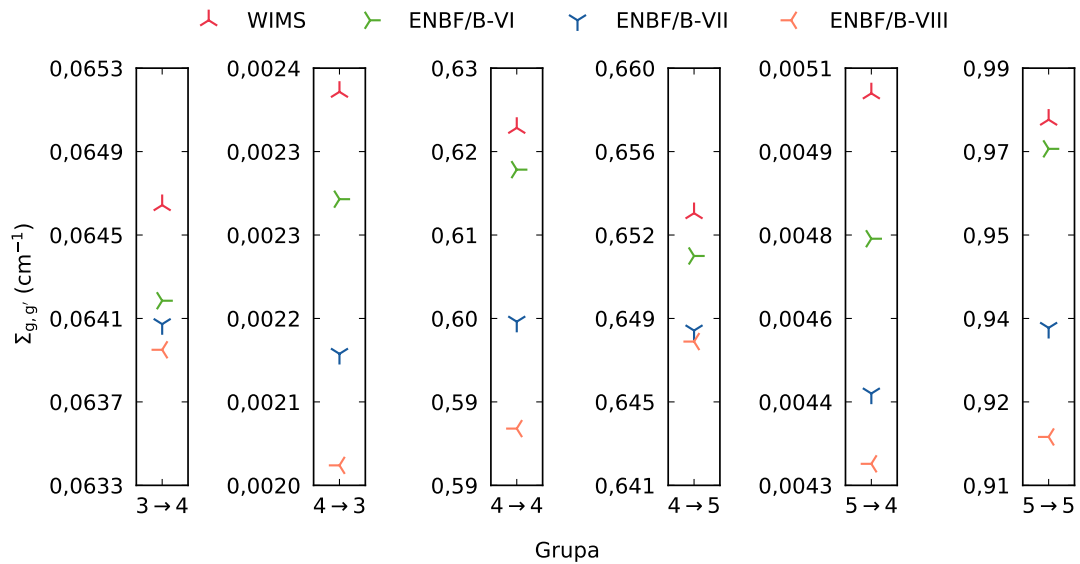
### $\sigma_t$ pro $^{16}\text{O}$ v moderátoru





Grupa	$\sigma_t^{\text{wims}}$ (b)	$\sigma_t^{\text{VI}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VII}}$ (b)	RO (%)	$\sigma_t^{\text{VIII}}$ (b)	RO (%)
1	2,52	2,47	-2,1	2,47	-2,3	2,46	-2,5
2	4,35	4,25	-2,2	4,25	-2,2	4,19	-3,7
3	3,89	3,85	-0,9	3,85	-0,9	3,79	-2,4
4	3,89	3,86	-0,9	3,86	-0,9	3,80	-2,4
5	3,90	3,86	-0,9	3,86	-0,9	3,80	-2,4
6	3,92	3,88	-0,9	3,88	-0,9	3,83	-2,4
7	4,03	4,00	-0,8	4,00	-0,8	3,94	-2,3

### $\Sigma_{g,g'}$ pro moderátor



Grupa	$\Sigma_{g,g'}^{\text{wims}} (\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VI}} (\text{cm}^{-1})$	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VII}} (\text{cm}^{-1})$	RO (%)	$\Sigma_{g,g'}^{\text{VIII}} (\text{cm}^{-1})$	RO (%)
3 → 4	0,065	0,064	-0,7	0,064	-0,9	0,064	-1,1
4 → 3	0,002	0,002	-4,5	0,002	-11,1	0,002	-15,8
4 → 4	0,623	0,619	-0,7	0,603	-3,2	0,592	-5,0
4 → 5	0,653	0,651	-0,3	0,648	-0,8	0,648	-0,9
5 → 4	0,005	0,005	-5,8	0,004	-11,9	0,004	-14,7
5 → 5	0,976	0,971	-0,6	0,937	-4,0	0,916	-6,1
5 → 6	0,696	0,702	+0,9	0,700	+0,6	0,698	+0,3
6 → 5	0,012	0,012	+0,3	0,011	-6,8	0,011	-8,9
6 → 6	1,824	1,816	-0,4	1,744	-4,4	1,706	-6,4
6 → 7	0,553	0,564	+2,0	0,570	+3,1	0,561	+1,4
7 → 6	0,401	0,391	-2,5	0,370	-7,7	0,360	-10,2
7 → 7	3,218	3,235	+0,5	3,141	-2,4	3,118	-3,1