

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Obor: Jaderné inženýrství

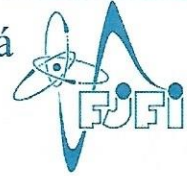
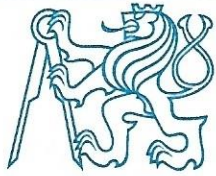


**Homogenizace konstant s použitím Monte Carlo SW
SERPENT**

Homogenisation using Monte Carlo code SERPENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Rostislav Kubín
Vedoucí práce: Ing. Radim Vočka, Ph.D.
Rok: 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Rostislav Kubín**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Homogenizace konstant s použitím Monte Carlo SW SERPENT**

Název práce anglicky: Homogenisation using Monte Carlo code SERPENT

Pokyny pro vypracování:

1. Verifikace procesu homogenizace pomocí programu SERPENT: proveďte srovnání výpočtu integrálních i lokálních parametrů 2D modelu aktivní zóny, přepočteného
 - a) pomocí programu SERPENT
 - b) pomocí programu ANDREA s daty načtenými z celozónového výpočtu programem SERPENT
 - c) pomocí programu ANDREA s daty připravenými programem SERPENT ve standardní 2D “nekonečné” mříži. Konstanty pro reflektor použijte z celozónového výpočtu b.)
2. Výběr vhodného přístupu pro výpočet difúzního koeficientu: na vybrané úloze (např. 2D celozónový výpočet) srovnajte výsledky výpočtů v difúzním přiblížení s různou definicí pro stanovení difúzního koeficientu [1].
3. Výběr metody homogenizace periferních kazet: s využitím výsledků získaných v bodě 1 oceňte přínos přesnější homogenizace periferních kazet provedením difúzního výpočtu s použitím periferních kazet z 1b), ostatních z 1c). Vyhodnoťte výsledky.
4. Vliv spektra pro vyhořívání na výsledky výpočtů (řešeno s ohledem na fakt, že program SERPENT prozatím neumožňuje provádět výpočet vyhoření v kritickém spektru): Proveďte ocenění vlivu vyhořívání v nekonečném vs. kritickém spektru pomocí programu HELIOS.
5. Sestavení knihoven a jejich použití v praxi: Sestavte standardní knihovny pro program ANDREA s využitím SW QUADRIGA. Přepočtete reálné vsázky energetických reaktorů, vyhodnoťte shodu predikcí s experimentem.

Doporučená literatura:

- [1] Sooyoung Choi et al.: On the diffusion coefficient calculation in two-step light water reactor core analysis. J. Nucl. Sci. Tech., 2017 VOL. 54, No. 6, 705–715
- [2] J. Hejzlar a spol.: Kvalifikace výpočetního programu ANDREA verze 2.3. Zpráva ÚJV Z-5158, srpen 2019
- [3] F. Havlůj, R. Vočka: QUADRIGA tutorial, ÚJV Řež, 2020
- [4] Uživatelská dokumentace k programu HELIOS (manuál, metodika)

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. Radim Vočka, Ph.D.

ÚJV Řež, a. s.

Jméno a pracoviště konzultanta:

Datum zadání diplomové práce:

Datum odevzdání diplomové práce:

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 9. 10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

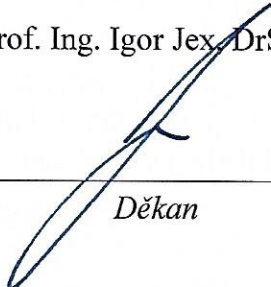
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Radimu Vočkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Janu Frýbortovi, Ph.D. za vstřícnost, pomoc při získání potřebných informací a za podnětné konzultace.

Bc. Rostislav Kubín

Název práce:

Homogenizace konstant s použitím Monte Carlo SW SERPENT

Autor: Bc. Rostislav Kubín

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Radim Vočka, Ph.D.
ÚJV Řež a.s.

Abstrakt: Práce se v první části zabývá verifikací procesu homogenizace palivových souborů v kódu Serpent. Proces již byl na ORF ÚJV Řež navržen, ale nedával uspokojivé výsledky. V druhé části je řešena alternativní metoda homogenizace periferních palivových souborů a oceněn její přínos vůči výpočetní náročnosti. Poté následuje volba vhodné metody přípravy difuzního koeficientu a opravy na kritické spektrum pomocí 2D celozónových výpočtů v kódech Serpent a ANDREA. Ve čtvrté části jsou oceněny odchylky výpočtů kódem ANDREA v závislosti na typu použitého spektra (nekonečné či kritické) během vyhořívání při přípravě homogenizovaných dat. Tato problematika je řešena v kódu Helios, který nabízí obě možnosti. Poslední částí je návrh metodiky pro sestavení kompletní knihovny makroskopických účinných průřezů pro kód ANDREA, její příprava a částečná validace proti provozním datům z druhého bloku Jaderné elektrárny Temelín.

Klíčová slova: Serpent, ANDREA, homogenizace, JE Temelín

Title:

Homogenisation using Monte Carlo code SERPENT

Author: Bc. Rostislav Kubín

Abstract: The first part of this thesis deals with the verification of the process of homogenization of fuel assemblies in the Serpent lattice code. The process has already been developed at ORF ÚJV Řež, but did not give satisfactory results. The second part deals with an alternative method of homogenization of peripheral fuel assemblies and evaluates its contribution to computational complexity. This is followed by the selection of a suitable method for the preparation of the diffusion coefficient and correction to the critical spectrum using 2D fullcore calculations in the Serpent and ANDREA codes. In the fourth part, the deviations of the calculations by the ANDREA code are evaluated depending on the type of spectrum used (infinite or critical) during burnup during the preparation of homogenized data. This problem is solved in the Helios code, which offers both options. The last part is the design of a methodology for creating a complete library of macroscopic cross-sections for the ANDREA code, its preparation and partial validation against operational data from the second unit of the Temelín Nuclear Power Plant.

Key words: Serpent, ANDREA, Homogenisation, Temelín NPP

Obsah

Úvod	15
1 Verifikace procesu homogenizace	17
1.1 Proces homogenizace	17
1.2 Použité výpočetní nástroje	19
1.2.1 Nástroj SFullcore	19
1.2.2 Nástroj Quadriga3	20
1.2.3 ANDREA a datacase	21
1.3 Metodika verifikace	22
1.3.1 Názvy palivových souborů	27
1.4 Vyhodnocení výsledků	28
1.5 Shrnutí výsledků verifikace procesu homogenizace	30
2 Homogenizace periferních souborů	32
2.1 Metodika	32
2.2 Vyhodnocení	33
2.3 Závěr	35
3 Srovnání výpočtů difuzních koeficientů	36
3.1 Cíle	36
3.2 Úvod k přípravě dat Serpentelem	37
3.2.1 Nekonečné spektrum - INF	37
3.2.2 Metoda B1 (fum1)	39
3.2.3 Metoda P1 (fum2)	41
3.2.4 Metoda CMM - cumulative migration method	41
3.2.5 Metoda TRC	42
3.3 Metodika srovnání	43
3.4 Vyhodnocení výsledků	43
3.5 Závěr	44
4 Vliv kritického spektra	46
4.1 Motivace a cíle	46
4.2 Rozdíly v izotopickém složení	47
4.3 Verifikace výpočtů s restartem	49
4.4 Metodika ověření	51
4.5 Vyhodnocení	52
4.6 Závěr	56
5 Knihovna pro kód ANDREA	57
5.1 Úvod	57
5.1.1 Co je třeba dořešit	57
5.2 Knihovny programu ANDREA	58
5.2.1 Obecný popis knihovny	58
5.2.2 Nástroj AKIKO	59
5.3 Příprava dat pro palivové soubory	60

5.4	Příprava dat pro radiální reflektory	61
5.4.1	Discontinuity faktory	62
5.4.2	Úprava modelů reflektorů v SFullcore	64
5.4.3	Ocenění vlivu radiálních reflektorů na rozložení výkonu	68
5.5	Příprava dat pro axiální reflektory	70
5.5.1	Model palivového souboru v kódu Serpent	71
5.5.2	Vliv na axiální rozložení výkonu	72
5.6	Příprava knihovny	75
5.6.1	Úprava Akiko	75
5.6.2	Metodika sestavení knihovny	76
5.6.3	Použité vyhoření a odskoky	78
5.7	Validace knihoven: srovnání s provozní historií	79
5.7.1	Odchylka koncentrace kys. borité a axiálního offsetu	82
5.7.2	Odchylky v axiálním rozložení výkonu	84
5.7.3	Odchylky v rozložení výkonů palivových souborů	84
5.8	Shrnutí srovnání vůči provozním datům	93
	Závěr	94
	Literatura	97

Seznam zkratek

Zkratka	Název
AO	Axiální offset
ARO	Všechny RO v horní koncové poloze -175 kroků (All Rods Out)
AZ	Aktivní zóna
BOC	Začátek kampaně (Beginning of Cycle)
diff	Rozdíl koeficientů násobení
efpd	Effective power days
EOC	Konec kampaně (End of Cycle)
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
F5	Fyzikální test 5 - stanovení ARO endpoint koncentrace H_3BO_3
FHA	Radiální rozložení výkonu v reaktoru
HFP	Horký výkonový stav (Hot full power)
HZP	Horký nevýkonový stav (Hot zero power)
HZP-ARO	Horký nevýkonový stav s tyčemi v horní koncové poloze
MOC	Střed kampaně (Middle of Cycle)
N_{nom}	nominální výkon
ORF ÚJV	Oddělení reaktorové fyziky ÚJV Řež a.s.
PO	Primární okruh
P_0	Hustota toku neutronů z P_n metody řešení pro $n = 0$
P_1	Hustota toku neutronů z P_n metody řešení pro $n = 1$
RO	Regulační orgán klastrového typu
SFullcore	Serpent fullcore automated processing
tveg	Palivový proutek s obsahem Gd_2O_3
TVSA-T	Palivo společnosti TVEL pro ETE
U1C9	Devátá kampaň prvního bloku ETE
U1C13	Třináctá kampaň prvního bloku ETE
U1C15	Patnáctá kampaň prvního bloku ETE
U2C9	Devátá kampaň druhého bloku ETE
U2C13	Třináctá kampaň druhého bloku ETE
U2C14	Čtrnáctá kampaň druhého bloku ETE
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
WEC	Westinghouse Electric Company

Seznam veličin a jednotek

Název	Označení	Jednotka
Buckling	B	1/cm ²
Difuzní koeficient	D	cm
Diskontinuity faktor	DF	-
Energie	E	MeV či J
Energie uvolněná ze štěpení · Σ_f	$\kappa\Sigma_f$	J/cm
Hustota proudu neutronů	\bar{J}	1/cm ² s
Hustota toku neutronů	ϕ	1/cm ² s
Imaginární jednotka	i	-
Koeficient násobení	keff	-
Koncentrace H ₃ BO ₃	c_b	g/kg
Makroskopický účinný průřez pro absorpci	Σ_a	1/cm
Makroskopický účinný průřez pro štěpení	Σ_f	1/cm
Makroskopický účinný průřez pro transport	Σ_{tr}	1/cm
Objem	V	cm ³
Počet neutronů ze štěpení	ν	-
Počet neutronů ze štěpení · Σ_f	$\nu\Sigma_f$	1/cm
Průměrný cosinus úhlu rozptylu	$\bar{\mu}$	-
Reaktivita	ρ	pcm
Rozptylová matice	Σ_s	-
Štěpné spektrum	χ	-
Teplota	T	K či °C
Tlak	p	MPa
Vyhoření	BU	MWd/kgU či efpd

Seznam obrázků

1.1	Příklad homogenizace palivového souboru	18
1.2	Schema metody verifikace	24
1.3	Geometrie z kódu Serpent pro vsázku U1C9	25
1.4	Čtvrtá šestina aktivní zóny kampaně U1C9	26
1.5	Čtvrtá šestina aktivní zóny kampaně U1C15	26
1.6	Příklad profilace palivového souboru	27
1.7	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(SFullcore) pro kampaně U1C9	29
1.8	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro kampaně U1C9	29
1.9	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(SFullcore) pro kampaně U1C15	31
1.10	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro kampaně U1C15	31
2.1	Schema metody verifikace	33
2.2	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro U1C9 s modifikovanou periferní řadou PS	34
2.3	Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro U1C15 s modifikovanou periferní řadou PS	34
3.1	Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(INF) pro U1C15	45
3.2	Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(FUM1) pro U1C15	45
3.3	Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(FUM2) pro U1C15	45
3.4	Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(CMM) pro U1C15	45
4.1	Relativní odchylky izotopického složení během vyhořívání	47
4.2	Schema způsobu verifikace výpočtů s restartem	49
4.3	Schema způsobu ocenění vlivu spektra při vyhořívání: v horní části vyhořívání pomocí kritického spektra, v dolní části vyhořívání pomocí nekonečného spektra	51
4.4	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 BOC	52
4.5	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 MOC	53
4.6	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 EOC	53
4.7	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 BOC	54
4.8	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 MOC	55

4.9	Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 EOC	55
5.1	Geometrie modelu PS a44E6 v kódu Helios	60
5.2	Geometrie modelu PS a44E6 v kódu Serpent	60
5.3	Číslování radiálních reflektorů v AZ	62
5.4	Geometrie modelu radiálního reflektoru 1 v kódu Helios	63
5.5	Geometrie modelu radiálního reflektoru 2 v kódu Helios	63
5.6	Geometrie modelu radiálního reflektoru 3 v kódu Helios	63
5.7	Geometrie modelu radiálního reflektoru 4 v kódu Helios	63
5.8	Geometrie modelu radiálního reflektoru 5 v kódu Helios	63
5.9	Univers, ve kterém doposud byla počítána data pro reflektor R2 . . .	64
5.10	Univers, ve kterém jsou po úpravě počítána data pro reflektor R2 . .	64
5.11	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s původním modelem radiálních reflektorů pro U1C9	67
5.12	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s upraveným modelem radiálních reflektorů pro U1C9	67
5.13	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s původním modelem radiálních reflektorů pro U1C15	67
5.14	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s upraveným modelem radiálních reflektorů pro U1C15	67
5.15	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C9 BOC	69
5.16	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C9 EOC	69
5.17	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C12 BOC	69
5.18	Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C12 EOC	69
5.19	Geometrie modelu dolního axiálního reflektoru v kódu Helios	70
5.20	Geometrie modelu horního axiálního reflektoru v kódu Helios	70
5.21	Geometrie modelu PS v kódu Serpent	71
5.22	Axiální rozložení relativního výkonu pro U2C9 pro modely v kódu Helios a Serpent a relativní odchylky mezi modely	73
5.23	Axiální rozložení relativního výkonu pro U2C14 pro modely v kódu Helios a Serpent a relativní odchylky mezi modely	74
5.24	Flowchart sestavení knihovny pro kód ANDREA	77
5.25	Maximální rozdíl vypočtené koncentrace H_3BO_3 v BOC	81
5.26	Maximální rozdíl vypočtené koncentrace H_3BO_3 v EOC	81

5.27	Odchylka vypočtené koncentrace H_3BO_3 od provozních dat pro kampaň U2C9	82
5.28	Odchylka vypočtené koncentrace H_3BO_3 od provozních dat pro kampaň U2C13	83
5.29	Odchylka vypočteného axiálního offsetu od provozních dat pro kampaň U2C9	83
5.30	Odchylka vypočteného axiálního offsetu od provozních dat pro kampaň U2C13	83
5.31	Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C9 BOC	84
5.32	Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C9 EOC	84
5.33	Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C13 BOC	84
5.34	Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C13 EOC	84
5.35	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 BOC - knihovna připravená kódem Serpent	85
5.36	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 BOC - knihovna připravená kódem Helios	86
5.37	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 EOC - knihovna připravená kódem Serpent	87
5.38	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 EOC - knihovna připravená kódem Helios	88
5.39	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 BOC - knihovna připravená kódem Serpent	89
5.40	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 BOC - knihovna připravená kódem Helios	90
5.41	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 EOC - knihovna připravená kódem Serpent	91
5.42	Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 EOC - knihovna připravená kódem Helios	92

Seznam tabulek

1.1	Rozdělení palivového souboru po výšce na nody	18
1.2	Střední parametry během vyhořívání	20
1.3	Seznam dat pro datacase	21
1.4	Stav reaktoru při testu F5 pro U1C9 [9]	24
1.5	Stav reaktoru při testu F5 pro U1C15 [10]	24
3.1	Stav reaktoru při testu F5 pro U1C15 [10]	43
3.2	Srovnání hodnoty difuzního koeficientu pro PS v centru AZ	44
4.1	Tabulka relativních odchylek pro vybrané veličiny	48
4.2	Tabulka relativních odchylek pro vybrané veličiny	50
5.1	Tabulka vybraných dat pro model PS TVSA-T mod.1 v kódu Serpent pro stav HFP-REF	61
5.2	Tabulka dat pro radiální reflektor R2 pro U1C15 BOC	65
5.3	Tabulka dat pro radiální reflektor R5 pro U1C15 BOC	65
5.4	Globalní metriky pro kampaně U2C9 až U2C14	80
5.5	Odchylky axiálního rozložení výkonu (RMS všech absolutních odchy- lek $C - M$ relativních výkonů po výšce) pro kampaně U2C9 až U2C14	80
5.6	Odchylky radiálního rozložení výkonu (RMS všech absolutních od- chylek $C - M$ relativních výkonů) pro kampaně U2C9 až U2C14	80
5.7	Rozdíl H_3BO_3 (absolutní odchylky $C - M$ v g/kg) pro kampaně U2C9 až U2C14	81

Úvod

Cílem práce je demonstrovat použití kódu Serpent k přípravě makroskopických dat pro knihovnu účinných průřezů a to včetně kvantitativního vyhodnocení výsledků při použití knihoven makrokódem ANDREA se zaměřením na palivo TVSA-T reaktoru VVER-1000 Jaderné elektrárny Temelín. Reaktor VVER-1000 byl zvolen, protože jde o standardní tlakovodní reaktor, zkoumaná metoda přípravy dat bude snadno přenositelná např. i na západní PWR (ovšem nikoli na reaktor VVER-440, ten je specifický kvůli regulačním kazetám i obálkám paliva) a na pracovišti Oddělení reaktorové fyziky ÚJV Řež byl zájem o výsledky pro tento typ reaktoru.

Vyhodnocení bude provedeno srovnáním výsledků přímo s provozními daty a také srovnáním s výsledky dosaženými s použitím produkčních knihoven připravených v současnosti rutinně používaném kódu Helios. Myšlenka na použití kódu Serpent pro přípravu knihoven není v Oddělení reaktorové fyziky ÚJV Řež, kde jsem svou diplomovou práci řešil, nová. Řada věcí tedy již byla rozpracovaná a mohlo na ně být navázáno. Přesto, jak uvidíme v následujících kapitolách, zbývalo ještě dost zajímavých úkolů k dopracování. Na základě získaných výsledků byla sestavena kompletní metodika pro přípravu celé knihovny, vytvořen software pro její sestavení a v souladu s cílem práce došlo k otestování vůči provozním datům z Jaderné elektrárny Temelín. Práce je členěna do pěti kapitol. V prvních čtyřech kapitolách jsou všechny výpočty prováděny pomocí vsázek U1C9 a U1C15. Ty byly zvoleny jako reprezentativní, U1C9 je čerstvá vsázka s palivem TVSA-T a U1C15 již obsahuje několik kampaní používané palivové soubory a má tu vlastnost, že je šestinově symetrická, tento požadavek kladen pouze vzhledem k zobrazení výsledků výpočtů. V poslední kapitole, jsou voleny vsázky druhého bloku Jaderné elektrárny Temelín, protože dostupná provozní data jsou zde úplnější, než v případě prvního bloku, srovnání tedy bude průkaznější.

V první kapitole je rozebrána verifikace procesu homogenizace pomocí kódu Serpent pro palivové soubory. Tento proces byl již navržený na ORF ÚJV Řež s ohledem na některé neuspokojivé výsledky bylo rozhodnuto jej důkladně ověřit a také verifikovat správnost šablon v nástroji Quadriga3. Během verifikace jsou vzaty určité předpoklady - druh korekce na kritické spektrum, homogenizace periferních PS a v dalších kapitolách jsou tyto předpoklady zkoumány do větších podrobností a je hledána cesta, jak proces homogenizace zlepšit.

Ve druhé kapitole je řešena přesnější metoda homogenizace periferních palivových souborů pomocí 2D celozónového výpočtu v kódu Serpent. Výpočty kódem ANDREA ukazují, že dochází v některých případech k odchylkám na periférii aktivní zóny od provozních dat či Monte Carlo výpočtů a cílem této části je prozkoumat vliv homogenizace periferních palivových souborů na výpočty, kvantifikovat odchylky a určit vhodnou korekci.

Ve třetí kapitole jsou rozebrány různé metody přípravy hodnoty difuzního koeficientu a jejich vliv na výpočty pomocí kódu ANDREA. Tato problematika již byla částečně na oddělení řešena, ale bylo třeba detailní srovnání různých metod a vyhodnocení vlivu na výpočty kódem ANDREA podle jasné metodiky. V kapitole je teoretický popis přípravy difuzního koeficientu a homogenizovaných dat v kódu Serpent a následné možnosti korekcí na kritické spektrum. V závěru kapitoly jsou pomocí celozónových výpočtů srovnány různé možnosti korekcí a vybrán nejvhodnější přístup.

Ve čtvrté kapitole je rozebrán vliv spektra během vyhořívání na připravená homogenizovaná data a oceněn vliv na výpočty pomocí kódu ANDREA. Tato problematika se stala aktuální s otázkou použití kódu Serpent k přípravě knihoven účinných průřezů pro kód ANDREA a bylo potřeba kvantifikovat jakých odchylek dosahuje schéma přípravy dat v Serpentu (nekonečné spektrum během vyhořívání a kritické během přípravy dat) od schématu, které používá kód Helios (kritické spektrum během vyhořívání a přípravy dat). Vliv spektra bude prozkoumán pomocí kódu Helios, který umožňuje počítat pomocí obou schemat. Tato problematika nebyla doposud nijak řešena a je třeba pro ni navrhnout vhodnou metodiku a kvantifikovat vliv na výpočty kódem ANDREA.

Všechny předchozí kapitoly vedou k sestavení kompletní knihovny makroskopických účinných průřezů pro kód Andrea. Zde bylo možné využít již hotové šablony pro palivové soubory, ale bylo třeba vytvořit metodiku přípravy dat pro nepalivové části aktivní zóny a napsat pomocné skripty v jazyce Ruby. Součástí páté kapitoly je popis metodiky přípravy dat pro palivové i nepalivové části aktivní zóny a na konci práce je provedena částečná validace knihovny srovnáním predikcí kódu ANDREA s provozními daty a srovnání vůči produkční knihovně připravené kódem Helios.

1 Verifikace procesu homogenizace

Tato kapitola je věnována ověření procesu homogenizace palivových souborů pro reaktor VVER-1000 Jaderné elektrárny Temelín v kódu Serpent. Tento kód se v ORF ÚJV Řež dosud rutinně k homogenizaci palivových souborů nepoužíval, dosud získané výsledky navíc vzbuzovaly jisté otázky. Proto jsme se rozhodli provést důkladnou verifikaci procesu homogenizace v kódu Serpent (ani ne tak z pohledu implementace metod v programu, ale především pro ověření, že jej pro tento účel používáme správně). Pro ověření tohoto procesu budou vzaty určité předpoklady, bude použita korekce na kritické spektrum B1 (v současnosti se v ORF ÚJV Řež používá při přípravě dat kódem Helios) a data pro periferní palivové soubory budou připravována ve 2D nekonečné mříži. Tyto předpoklady jsou dále blíže řešeny v kapitolách 2 a 3. Verifikace bude provedena na dvou reálných vsázkách U1C9 a U1C15 a bude srovnáno rozložení výkonu a koeficient násobení mezi referenčním výpočtem pomocí kódu Serpent a výpočtem s homogenizovanými daty pomocí kódu ANDREA. Provedené práce jsou popsány v této kapitole. V následujících podkapitolách je popsán teoreticky proces homogenizace palivových souborů, metodika verifikace, použité výpočetní kódy a pomocný software napsaný v jazyce Ruby. Závěrem kapitoly je vyhodnocení verifikace tohoto procesu a získané výsledky.

1.1 Proces homogenizace

Aktivní zóna jaderného reaktoru je velmi složitý a komplexní systém. Při jejím návrhu musí být provedeny řádově až stovky výpočtů ve 3D geometrii. Je totiž třeba prověřit chování rozložení výkonu pro různé stavy jaderného reaktoru během provozu. Proto je potřeba, aby byl co nejkratší čas potřebný k provedení jednoho výpočtu a zároveň nevznikaly příliš velké nároky na hardware, především na operační paměť. Aktivní zóna je velmi komplexní systém sestávající se z mnoha různých palivových a nepalivových komponent s velmi složitou geometrií. Pokud by byla během výpočtů zachována přesná 3D geometrie a nebyla by použita různá zjednodušení, každý výpočet by trval velmi dlouho. Je tedy snaha tyto výpočty nějakým způsobem urychlit a snížit výpočetní náročnost. Prvním zjednodušením je přechod k difuznímu přiblížení, kdy se místo transportní rovnice řeší rovnice difuzní. Ta vychází z difuzní teorie a dobře se aplikuje na homogenní materiály, kde nedochází k velkým změnám neutronických vlastností. Je tedy snaha složitou aktivní zónu, která obsahuje mnoho různých prostředí s materiály o různých vlastnostech a mnoho hranic mezi materiály,

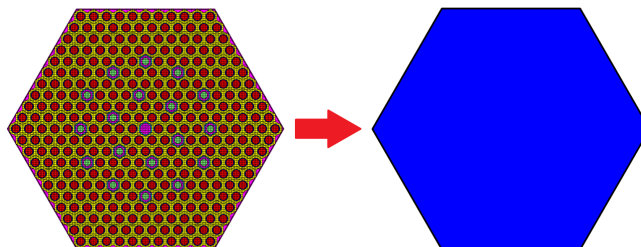
zjednodušit do homogenního materiálu, který je reprezentován sadou homogenizovaných dat. Dalším zjednodušením je snížení počtu energetických grup používaných během výpočtů, v případě kódu ANDREA na rychlou a tepelnou.

Homogenizace palivového souboru si klade za cíl určit konstanty reprezentující danou komponentu tak, aby při výpočtu aktivní zóny mohla být nahrazena blokem z homogenního materiálu se stejnými neutrono-fyzikálními vlastnostmi. Tento blok bývá zpravidla axiálně rozdělen na jednotlivé menší části (nódy). Příklad, jak je možné rozdělit palivový soubor na jednotlivé nódy, je v následující tabulce 1.1 a grafické znázornění homogenizace palivového souboru je na obrázku 1.1.

Tabulka 1.1: Rozdělení palivového souboru po výšce na nódy

Název	Počet nódů	Výška nódu [cm]
Horní reflektor	1	15
Horní blanket	2	7,5
Palivo	44	7,68
Dolní blanket	2	7,5
Dolní reflektor	1	15

Každý nód má pak vlastnosti definované právě vypočtenými konstantami, které jsou uloženy v knihovně použitého makrokódu. Výpočetní kód tedy již nepotřebuje počítat s velmi složitou detailní geometrií, ale pracuje pouze s homogenním materiálem vyplňujícím daný nód. Celý jaderný reaktor je pak místo detailní geometrie rozdělen na jednotlivé nódy a pro tyto nódy jsou předem připravená data v knihovnách. Ty obsahují všechny požadované parametry pro různé palivové soubory v potřebných vyhořeních a odskocích od nominálního stavu. Přípravu parametrů (homogenizovaných dat) zvládá řada výpočetních kódů a jedná se o velmi složitou disciplínu a je jí třeba věnovat pečlivou pozornost [12].



Obrázek 1.1: Příklad homogenizace palivového souboru

V této práci je využit pro přípravu homogenizovaných dat výpočetní kód Serpent 2.1.31 s knihovnou jaderných dat ENDF/B-VII.1.. Tento kód je založený na metodě Monte Carlo umožňující použití jak 2D, tak i 3D geometrie k výpočtům a vývoj tohoto kódu začal právě kvůli přípravě homogenizovaných dat. Hlavní výhodou metody Monte Carlo u přípravy homogenizovaných dat je možnost výpočtů interakcí neutronů s jádry bez aproximací, tedy kód je schopen statisticky počítat každou jadernou reakci, kterou zrovna simuluje za využití knihovny účinných průřezů. Další velkou výhodou této metody možnost namodelovat libovolně složitou 3D geometrii a lze ji použít k výpočtům. To umožňuje tvorbu velmi detailních modelů a dosahovat vysokých přesností výpočtů. Na druhou stranu značnou nevýhodou oproti deterministickým výpočetním kódům je značně delší doba trvání výpočtů a větší paměťové nároky [13] [1].

1.2 Použité výpočetní nástroje

1.2.1 Nástroj SFullcore

SFullcore (Serpent **fullcore** automated processing) je nástroj ke snadné tvorbě vstupů celozónových výpočtů pro kód Serpent. Je vyvíjen na ORF ÚJV Řež a je psán v jazyce Ruby. Nástroj umožňuje připravovat vstupy pro reaktory VVER-440 a VVER-1000 pro jeden konkrétní počítaný stav. Účelem tohoto nástroje jsou benchmarkové výpočty pro vývoj kódu ANDREA a je jím možné připravovat jak 2D, tak 3D výpočty aktivní zóny.

Hlavní výhodou tohoto nástroje je jeho jednoduchost pro uživatele, po kterém je požadován pouze vstupní soubor obsahující kartogram aktivní zóny, parametry výpočtu (teploty paliva a chladiva, tlak, výkon a další) a také knihovnu dat, která obsahuje informace o izotopickém složení PS v závislosti na vyhoření. SFullcore je založen na nodálním přístupu, kde vyhoření a teploty v každém samostatném nódu jsou konstantní a je třeba je tedy nějakým způsobem dodat. To je realizováno tak, že pomocí kódu ANDREA je spočteno předpokládané vyhoření jednotlivých souborů nacházejících se v aktivní zóně a poté je tato mapa vyhoření načtena do SFullcore. Následně jsou na základě těchto vyhoření získány informace o izotopickém složení jednotlivých palivových souborů pomocí předem napočtené a zpracované knihovny kódem Scale. Tato izotopická složení jsou pak součástí vstupního souboru pro Serpent a je s nimi počítáno [2].

1.2.2 Nástroj Quadriga3

Nástroj Quadriga slouží pro přípravu vstupních souborů pro kódy Helios a Serpent. V tomto nástroji jsou již předdefinované různé druhy palivových souborů. Samotné zadávání požadavku na přípravu vstupů probíhá přes textový vstupní soubor, který obsahuje především název paliva a případné volitelné parametry. Výstupem je vstupní soubor pro předem zvolený výpočetní kód a také *.info* soubor obsahující informace o geometrii modelu, odskocích a teplotním modelu. Vygenerovaný vstupní soubor umožňuje připravit všechna potřebná homogenizovaná data pro následnou tvorbu knihovny, kterou využívá kód ANDREA. V případě vstupů pro kód Serpent je použita knihovna jaderných dat ENDF/B-VII.1.

Vstupní soubor obsahuje 2D nekonečnou mříž obsahující jeden typ palivového souboru. Po spuštění výpočtů nejprve kód Serpent spočte izotopické složení v různých krocích vyhoření mezi 0,005 až 64 MWd/kgU. Pro vyhořívání jsou použity střední parametry paliva během provozu a jsou uvedeny v tabulce 1.2. Po napočtení izotopického složení v jednotlivých krocích vyhoření je proveden výpočet homogenizovaných dat v odskokových stavech a výsledky jsou zapsány do výstupního souboru [3] [4].

Tabulka 1.2: Střední parametry během vyhořívání

Název	Hodnota
Teplota moderátoru	305 °C
Teplota paliva	610 °C
Koncentrace kyseliny borité	2,8 g/kg
Výkon	39,69 kW/g

1.2.3 ANDREA a database

ANDREA je deterministický kód vyvíjený v ORF ÚJV Řež od roku 2005 umožňující řešit neutronově fyzikální charakteristiky reaktorů. Jeho základem je nodální metoda řešení dvougrupové difúzní rovnice. Umožňuje pracovat s libovolnou axiální nodalizací, výpočty je možno provádět alternativně v jedné šestině aktivní zóny nebo celozónově. Nódem je zde uvažován objem, na který je rozdělen po výšce celý palivový soubor. Pro použití kódu ANDREA je nezbytná knihovna dat, která obsahuje především účinné průřezy v závislosti na vyhoření, teplotě systému, koncentraci kyseliny borité a výkonu. Tyto knihovny se připravují standardně pomocí transportního kódu Helios [5].

Database v kódu ANDREA umožňuje zadat makroskopické účinné průřezy a další požadovaná data uvedená v tabulce 1.3 o jednotlivých palivových souborech či reflektorech přímo do vstupního souboru pro kód ANDREA. Hlavním účelem database jsou benchmarkové úlohy ve 2D a velkou výhodou je jednoduchost jeho tvorby a přípravy dat pro tento typ úloh, kdy není třeba připravovat kompletní knihovnu, ale stačí napočítat pouze některé požadované veličiny [5] [6] [7].

Tabulka 1.3: Seznam dat pro database

Název	Klíčové slovo	Označení
Difúzní koeficient	d	D^{12}
Rozptylová matice	ss	Σ_s^{12}
Diskontinuity faktor	df	DF^{12}
Štěpné spektrum	ch	χ^{12}
Hustota toku neutronů	fx	ϕ^{12}
Makroskopický účinný průřez pro absorpci	sa	Σ_a^{12}
Makroskopický účinný průřez pro štěpení	sf	Σ_f^{12}
Počet neutronů ze štěpení	nu	ν^{12}
Počet neutronů ze štěpení $\cdot \Sigma_f$	nf	$\nu \Sigma_f^{12}$
Energie uvolněná ze štěpení $\cdot \Sigma_f$	kf	$\kappa \Sigma_f^{12}$

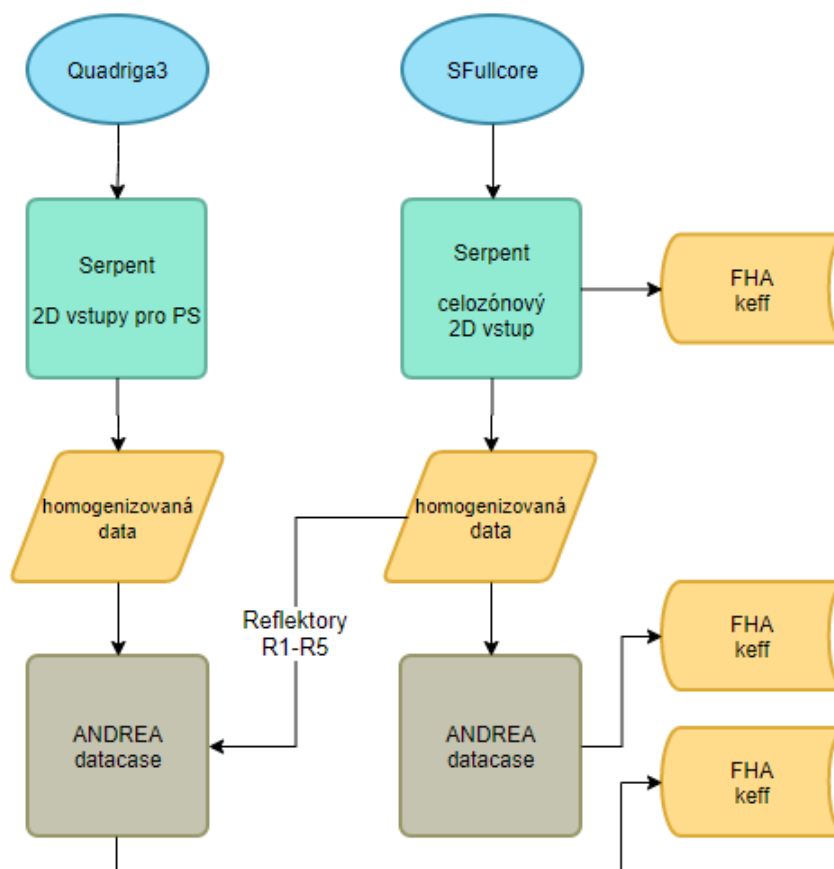
1.3 Metodika verifikace

K samotné verifikaci byla zvolena dvě různá rozložení aktivní zóny. Prvním případem je vsázka U1C9 s čerstvým palivem TVSA-T, jejíž kartogram je níže na obrázku 1.4. Jako druhá vsázka byla zvolena zóna obsahující již částečně vyhořelé palivové soubory TVSA-T a to U1C15, jejíž kartogram je níže na obrázku 1.5. Byla použita 2D geometrie všech výpočetních modelů v kódech Serpent a ANDREA. Nastavení všech vstupních parametrů výpočtů bylo zvoleno podle stavu, který byl dosažen během fyzikálního testu F5 při spouštění bloku, při kterém bylo třeba stanovit kritickou koncentraci kyseliny borité. Tento stav je označován jako HZP-ARO. Během tohoto testu se všechny tyče nachází v horní koncové poloze, reaktor se nachází na zlomku procenta nominálního výkonu, chladivo je ohřáto na teplotu studené smyčky primárního okruhu $278,6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlak v primárním okruhu má hodnotu $15,6\text{ MPa} \pm 0,2\text{ MPa}$. V HZP stavu se teplota paliva rovná teplotě chladiva. Konkrétní parametry stavu při tomto testu pro zónu U1C9 jsou v tabulce 1.4 a pro zónu U1C15 jsou v tabulce 1.5 [8].

Verifikace procesu homogenizace byla provedena pomocí nástrojů SFullcore, Quadriga3 a datacase v kódu ANDREA (datacase slouží k výpočtům bez nutnosti tvořit celou knihovnu a homogenizovaná data jsou zadávána ve vstupním souboru). Všechny použité nástroje jsou detailněji popsány výše v sekci 1.2. Samotný postup sestává celkem ze tří samostatných částí a je také pro přehlednost zpracován do podoby flowchartu na obrázku 1.2. Nejprve byl pomocí nástroje SFullcore připraven vstup pro kód Serpent pro vybranou kampaň a stav HZP-ARO. Tento vstup představuje kompletní 2D geometrii počítané vsázky reaktoru VVER-1000 - grafický výstup ze Serpentu je na obrázku 1.3. Byl použit dostatečný počet historií, aby odchylka koeficientu násobení byla maximálně 10 pcm a také byla použita B1 korekce na kritické spektrum. Výstupem tohoto výpočtu jsou referenční data pro koeficient násobení a rozložení výkonu, a dále homogenizovaná data ve dvou energetických grupách pro každý palivový soubor a ta jsou následně dále zpracována pro potřeby datacase kódu ANDREA. Také je vypočteno relativní rozložení výkonů v aktivní zóně a efektivní koeficient násobení. Z toho výpočtu byla navíc získána homogenizovaná data pro radiální reflektory.

Druhou částí tohoto procesu je příprava homogenizovaných dat pomocí nástroje Quadriga3. Tento nástroj připraví vstupní soubor pro kód Serpent zvláště pro každý palivový soubor v nekonečné 2D mříži (použita opakující okrajová podmínka). Dále je k výpočtu použito kritické spektrum, díky čemuž mohou být připravená data použita na jakémkoli místě v aktivní zóně, kde se nachází příslušný typ palivového souboru. Nezáleží pak, zda se palivový soubor nachází na periférii či v centru aktivní zóny, je možné použít jednu a tu samou sadu homogenizovaných dat. Vyhořívání probíhá na středních parametrech paliva v předem definovaných krocích mezi 0,005 až 64 MWd/kgU a pro výpočet homogenizovaných dat je definován příslušný odskok s odpovídající teplotou moderátoru, paliva a koncentrací kys. borité tak, jak je uvedeno v tabulce 1.4, respektive 1.5. Vlastní získání dat do datacase pro kód ANDREA bylo provedeno pomocí načtení reálné hodnoty vyhoření PS a následné interpolace napočtených dat kódem Serpent z příslušného intervalu, kam spadá hodnota vyhoření.

Posledním krokem je vyhodnocení sledovaných parametrů. K samotnému vyhodnocení je vhodné použít datacase pro kód ANDREA. Datacase obsahuje informace o jednotlivých palivových souborech načítané právě z výpočtů provedených v Serpentu a následně se kódem ANDREA provede výpočet aktivní zóny a je možné díky tomu porovnat relativní rozložení výkonu a efektivní koeficient násobení. Celkem je možné mezi sebou tedy srovnávat tři sady výstupních parametrů. První sadou jsou data získaná přímo z výstupu 2D celozónového výpočtu kódem Serpent. Druhou sadou jsou parametry načtené z výstupů kódu ANDREA, který použil homogenizovaná vstupní data z 2D celozónového výpočtu a poslední variantou jsou parametry z výstupů kódu ANDREA, kde byla použita homogenizovaná data načtená z výpočtů ve 2D nekonečné mříži (Quadriga3), viz levá větev ve flowchartu 1.2. Bude provedeno porovnání sledovaných parametrů načtených z 2D celozónového výpočtu (referenční) proti parametrům z datacase kódu ANDREA s použitými vstupními daty z 2D celozónového výpočtu a druhým porovnáním bude srovnání referenčních parametrů a datacase kódu ANDREA s použitými vstupními daty z 2D nekonečné mříže (Quadriga3).



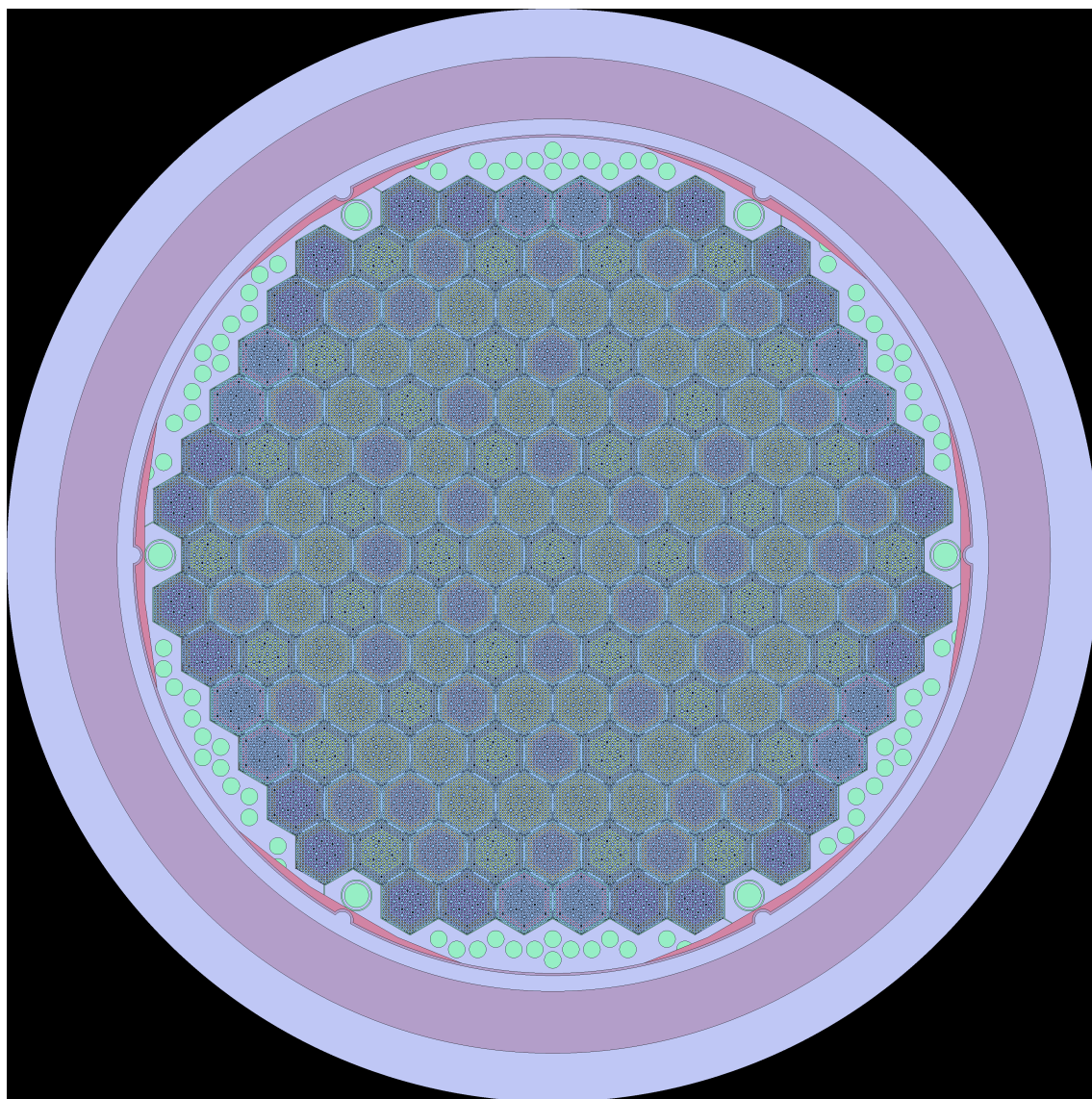
Obrázek 1.2: Schema metody verifikace

Tabulka 1.4: Stav reaktoru při testu F5 pro U1C9 [9]

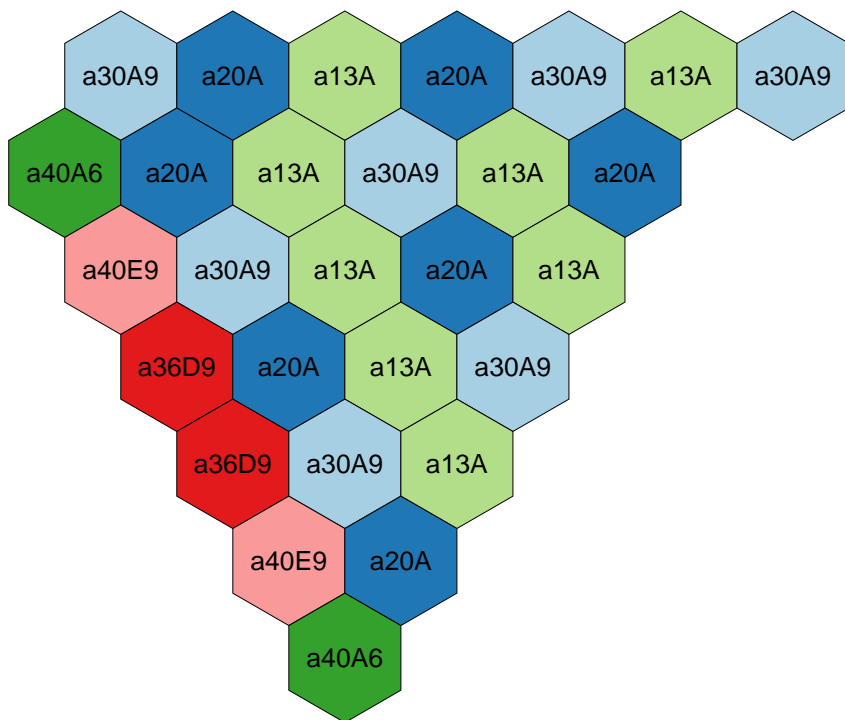
Výkon [% N_{nom}]	Tlak [MPa]	Vstupní teplota [°C]	Koncentrace kys. borité [g/kg]
5,31E-3	15,65	278,6	6,591

Tabulka 1.5: Stav reaktoru při testu F5 pro U1C15 [10]

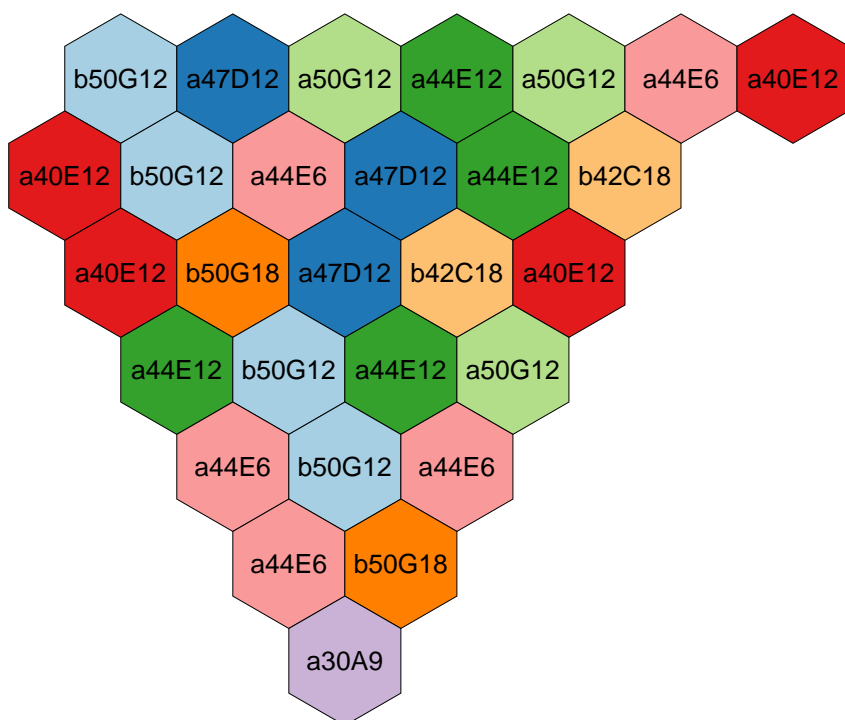
Výkon [% N_{nom}]	Tlak [MPa]	Vstupní teplota [°C]	Koncentrace kys. borité [g/kg]
5,4E-3	15,60	280,4	10,61



Obrázek 1.3: Geometrie z kódu Serpent pro vsázku U1C9



Obrázek 1.4: Čtvrtá šestina aktivní zóny kampaně U1C9



Obrázek 1.5: Čtvrtá šestina aktivní zóny kampaně U1C15

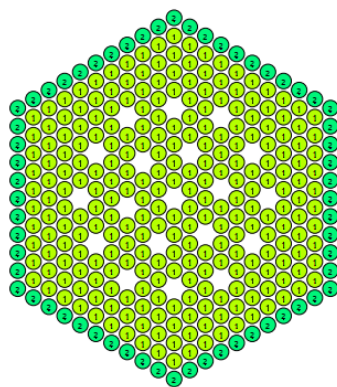
1.3.1 Názvy palivových souborů

Pro poznačení palivových souborů (PS) byla vytvořena v ORF ÚJV Řež jednotná konvence sestávající se ze 4 až 7 znaků pro standardní PS (používané pro 12-měsíční kampaně). Je předpokládána běžná profilace PS (viz. obrázek 1.6), tedy vnější prstenec palivových proutků má jiné obohacení než ostatní proutky.

Takovým označením je například:

a47D12a

1. První znak označuje design paliva (a - originální TVEL, b - mod1, c - mod2, d - WEC lta)
2. Druhý a třetí znak je obohacení paliva. Na výše zmíněném příkladu je palivo obohaceno na 4,7 %.
3. Čtvrtý znak je profilování paliva. Pozice písmene v abecedě snižená o jedničku značí o kolik desetín procenta mají vnější proutky nižší obohacení než ostatní palivové proutky. Na výše zmíněném příkladu má vnější prstenec obohacení 4,4 %.
4. Pátý a volitelně šestý znak udávají počet tvegů (proutky s vyhořívajícím absorbatorem) v PS.
5. Poslední volitelný znak udává rozložení tvegů a jejich obohacení. To záleží na obohacení PS a má hodnoty 2,4 %, 3,3 % a 3,6 %.



Obrázek 1.6: Příklad profilace palivového souboru

Výše zmíněná metodika pojmenování PS je detailně rozepsaná v citované literatuře [11].

1.4 Vyhodnocení výsledků

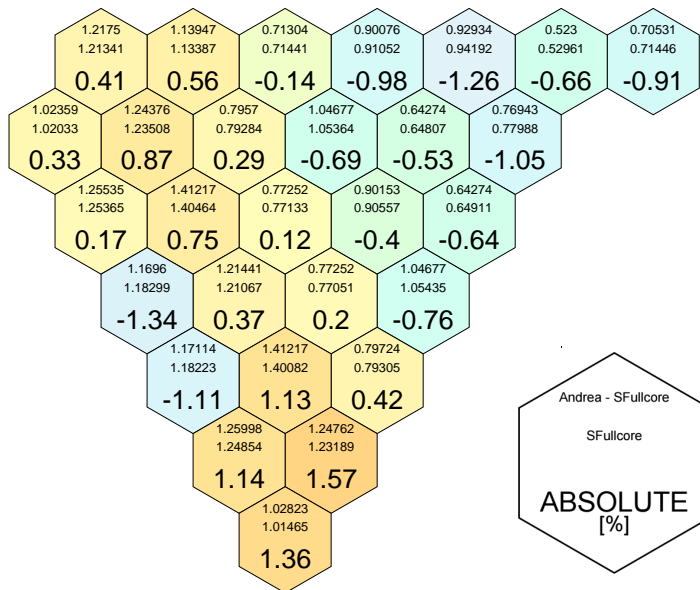
Na úvod je třeba poznamenat, že zde uvádím až výsledky finální. Celkově se díky provedené verifikaci podařilo odhalit dílčí chyby v implementaci modelů (viz např. kap. 5.4.2). Tato část práce tedy v důležité míře přispěla k jejímu celkovému úspěchu.

Nejprve je však třeba stanovit kritéria přijatelnosti jednotlivých parametrů a podle nich následně vyhodnotit výsledky. Pro koeficient násobení bylo kritérium stanoveno na 400 pcm (plyne z přijatelné shody predikce kyseliny borité 0,3 g/kg proti měřené hodnotě při váze 1300 pcm na g/kg) a pro relativní rozložení výkonů je kritériem 3%. V této kapitole je počítán ideální stav (žádné dodatečné neurčitosti z deformace palivových souborů, materiálového složení apod.), tak by se získané výsledky měly orientačně vejít do těchto kritérií [6].

U1C9

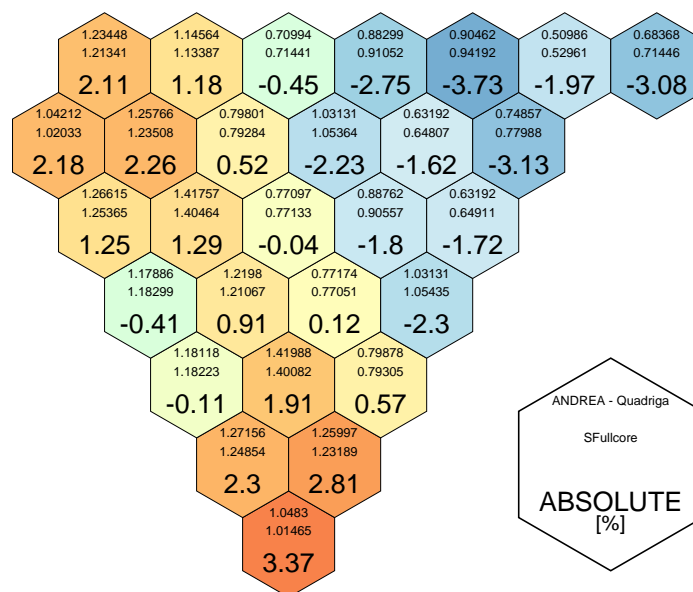
Nejprve je vyhodnocena kampaň U1C9. Na obrázku 1.7 je vidět srovnání relativních výkonů jednotlivých palivových souborů mezi SFullcore a datacase ANDREA s daty z SFullcore pomocí absolutních odchylek v % a také spočtené koeficienty násobení a jejich rozdíl v pcm. Výpočet rozložení výkonů s kódu Serpent velmi dobře odpovídá rozložení výkonů, které vypočte kód ANDREA. Maximální odchylka se pohybuje do 1,57 %. Ve většině palivových souborů je nižší. Rozdíl v koeficientech násobení je v tomto případě 85 pcm.

Na obrázku 1.8 je vidět srovnání relativních výkonů v jednotlivých palivových souborech mezi SFullcore a datacase ANDREA s daty počítanými v nekonečné mříži. Některé palivové soubory vykazují větší odchylky než 3 %. Pro 1. kampaň mají velkou váhu radiální reflektory - tedy kvůli radiálnímu tiltu mohou být odchylky větší než udávaná 3 %, což je tento případ. Vzhledem k tomu, že se nejedná o nijak zásadní rozdíly (zde jsou v řádu desetin procenta), je možné říct, že kritérium bylo splněno. Rozdíl koeficientu násobení je v tomto případě -64,65 pcm.



keff Serpent: 1.004, keff Andrea: 1.00315
diff: 85.0 pcm

Obrázek 1.7: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(SFullcore) pro kampaň U1C9



keff SFullcore: 1.004, keff Andrea (Quadriga): 1.00465
diff: -64.65 pcm

Obrázek 1.8: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro kampaň U1C9

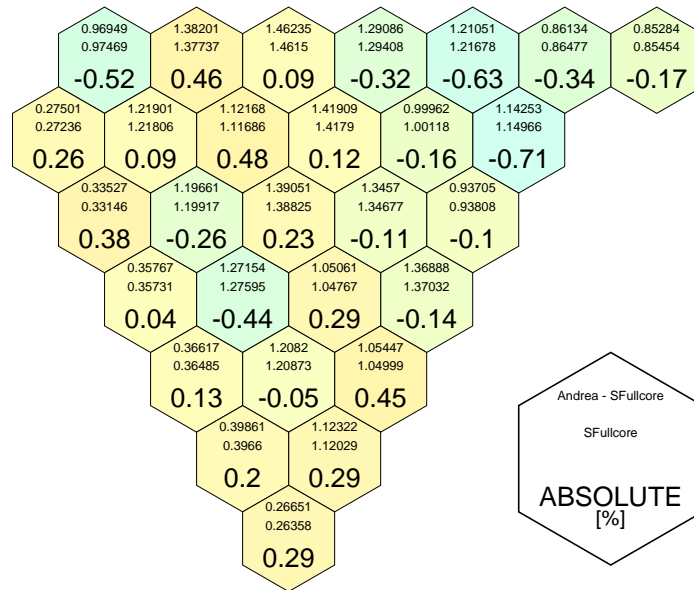
U1C15

Dále je vyhodnocena kampaň U1C15. Na obrázku 1.9 je vidět srovnání relativních výkonů v jednotlivých PS mezi SFullcore a datacase ANDREA s daty z SFullcore pomocí absolutních odchylek v % a také spočtené koeficienty násobení a jejich rozdíl v pcm. Absolutní odchylky jsou pro všechny PS pod 0,71 %. Rozdíl v koeficientech násobení je v tomto případě 145 pcm.

Na obrázku 1.10 je vidět srovnání relativních výkonů v jednotlivých PS mezi SFullcore a datacase ANDREA s daty počítanými v nekonečné mříži. V případě této kampaně jsou absolutní odchylky u všech PS do 2,24 %. Rozdíl koeficientu násobení je v tomto případě 110,83 pcm.

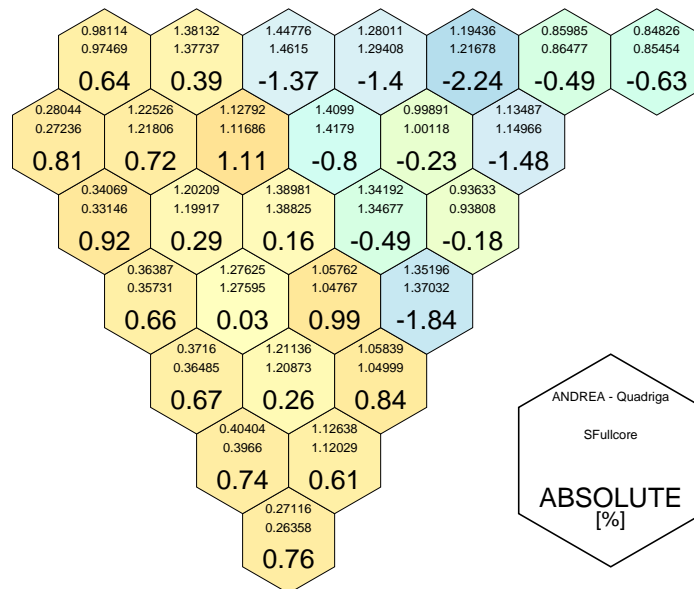
1.5 Shrnutí výsledků verifikace procesu homogenizace

Z provedené verifikace procesu homogenizace pomocí výše uvedených výsledků srovnání kampaní je možné vyvodit, že naše použití homogenizace jednotlivých palivových souborů v nekonečné 2D mříži pomocí kódu Serpent je korektní. Ve všech případech bylo dodrženo kritérium na kritičnost s velkou rezervou, odchylky jsou vždy výrazně menší než je 400 pcm. Kritérium rozložení výkonu taktéž bylo splněno pro všechny případy (případ srovnání z obrázku 1.8 je diskutován v příslušné sekci výše). Ze srovnání koeficientů násobení a relativního rozložení výkonu palivových souborů pro kampaně U1C9 a U1C15 plyne, že došlo k dobré shodě mezi referenčním výpočtem pomocí kódu Serpent a výpočty kódem ANDREA s různě připravenými daty pro palivové soubory. Dále bylo prokázáno, že nástroj Quadriga3 generuje správně vstupní soubory pro kód Serpent. Proces homogenizace je navržen správně a Serpent je vhodným nástrojem pro přípravu homogenizovaných dat pro palivové i nepalivové součásti aktivní zóny a bude dále využit na přípravu kompletní knihovny pro kód ANDREA.



keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.01382
diff: 145.0 pcm

Obrázek 1.9: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(SFullcore) pro kampaň U1C15



keff SFullcore: 1.01527, keff Andrea (Quadriga): 1.01416
diff: 110.83 pcm

Obrázek 1.10: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro kampaň U1C15

2 Homogenizace periferních souborů

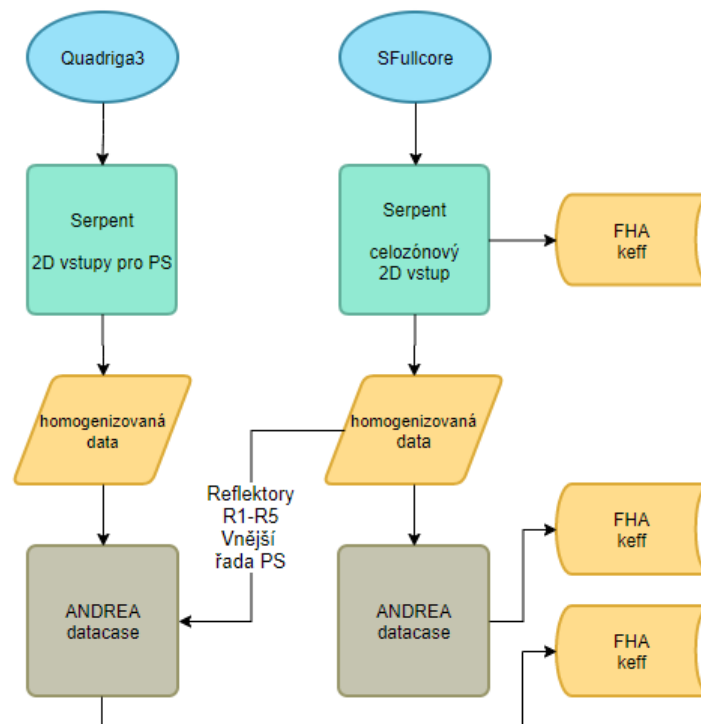
Motivací pro tuto kapitolu je ocenění chyby, ke které dochází při homogenizaci periferních palivových souborů v nekonečné 2D mříži. K nim v reálné vsázce přiléhá radiální reflektor, který má vliv na chování hustoty toku neutronů. Cílem je tedy ověřit a porovnat dva různé způsoby homogenizace a ocenit vliv přesnější homogenizace periferních palivových souborů. Tato souvisí s kapitolou 1, kde je popsán první způsob homogenizace periferních palivových souborů - 2D nekonečná mříž. Je tedy dobré se s ní nejprve seznámit, protože následující text a jeho závěry na ni přímo navazují, ale pro přehlednost dokumentu je tato problematika zařazena do vlastní kapitoly.

2.1 Metodika

Metodika je velmi podobná metodice v kapitole 1. Nejprve byl pomocí nástroje SFullcore připraven vstup pro kód Serpent pro vybranou kampaň U1C9 či U1C15 ve stavu HZP-ARO. Výstupem tohoto výpočtu jsou homogenizovaná data ve dvou energetických grupách pro každý palivový soubor a radiální reflektory a ta jsou dále zpracována pro potřeby datacase kódu ANDREA.

Druhou částí tohoto procesu je příprava homogenizovaných dat pomocí nástroje Quadriga3. Tento nástroj připraví vstupní soubor pro kód Serpent zvláště pro každý palivový soubor v nekonečné 2D mříži (použita opakující okrajová podmínka) a k výpočtu je použito kritické spektrum. Vyrořívání probíhá na středních parametrech paliva v předem definovaných krocích mezi 0,005 až 64 MWd/kgU a pro výpočet homogenizovaných dat je definován příslušný odskok.

Posledním krokem je vyhodnocení sledovaných parametrů. K samotnému vyhodnocení je vhodné použít datacase pro kód ANDREA. Ten obsahuje informace o jednotlivých palivových souborech načítané právě z výpočtů provedených v Serpentu a následně se kódem ANDREA vypočte relativní rozložení výkonu a efektivní koeficient násobení. Výpočet kódem ANDREA používá data připravená ve 2D nekonečné mříži s výjimkou periferní řady palivových souborů. Ty jsou převzaty z 2D celozónového výpočtu vygenerovaného nástrojem SFullcore. Takto připravená data pro periferní palivové soubory lépe odrážejí vliv pozice na kraji AZ blízko radiálních reflektorů. Schematicky tento proces je popsán ve flowchartu na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Schema metody verifikace

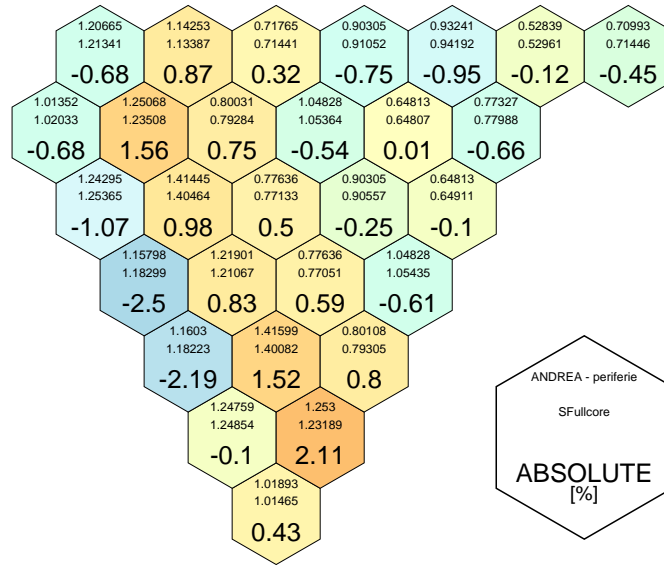
2.2 Vyhodnocení

U1C9

Srovnání rozložení relativních výkonů a jejich absolutní odchylky jsou vidět na obrázku 2.2. Srovnání výkonů z datacase je provedeno vůči stejnému referenčnímu výpočtu kódem Serpent jako v kapitole 1. Je vidět, že úprava periferie způsobila vyrovnání rozložení výkonu a odstranila extrémní hodnoty v centru AZ na periférii. Rozdíl koeficientů násobení se snížil z -64,65 pcm na 15,46 pcm.

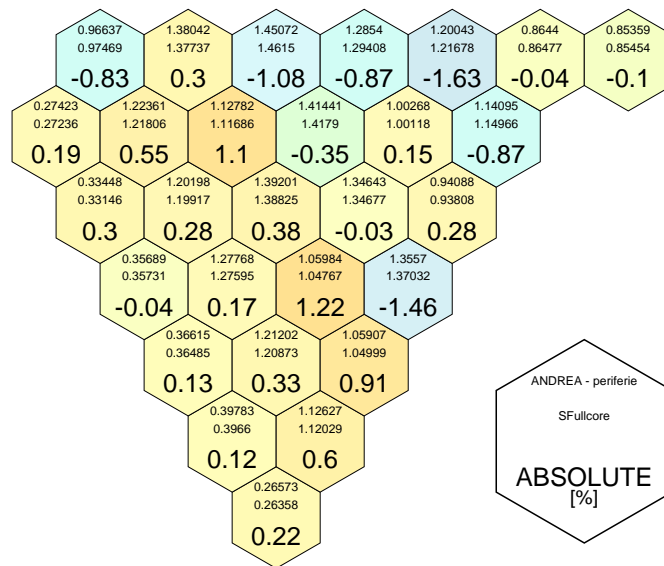
U1C15

Srovnání rozložení relativních výkonů a jejich absolutní odchylky jsou vidět na obrázku 2.3. Je vidět, že úprava periferie způsobila vyrovnání výkonů v AZ a došlo ke snížení extrémů. Celkově došlo k lepší shodě rozložení výkonů, než pouze s daty čistě připravenými pomocí 2D nekonečné mříže. Rozdíl koeficientů násobení se zvýšil z 110,83 pcm na 123,94 pcm.



keff SFullcore: 1.004, keff Quadriga + periferie: 1.00385
diff: 15.46 pcm

Obrázek 2.2: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro U1C9 s modifikovanou periferní řadou PS



keff SFullcore: 1.01527, keff Quadriga + periferie: 1.01403
diff: 123.94 pcm

Obrázek 2.3: Srovnání relativních výkonů PS SFullcore - ANDREA(Quadriga) pro U1C15 s modifikovanou periferní řadou PS

2.3 Závěr

Po nahrazení periferní řady palivových souborů bylo vypočteno srovnání relativních výkonů z referenčního 2D celozónového výpočtu kódem Serpent a datacase ANDREA s daty z 2D nekonečné mříže s periferní řadou PS převzatých z 2D celozónového výpočtu. V obou případech tato úprava vedla ke zlepšení oproti výsledkům při homogenizaci v nekonečné mříži, představeným v předchozí kapitole 1. A oba srovnání splnila kritéria přijatelnosti definovaná v kapitole 1, v úvodu sekce 1,4 (odchylka kritičnosti 400 pcm a výkonu 3 %). Došlo k vyrovnání odchylek v celé zóně a výpočet lépe odpovídá referenčnímu výpočtu. V jednom případě došlo ke zmenšení rozdílů koeficientů násobení. Celkově je tak možné vyvodit, že homogenizace periferních palivových souborů pomocí přesnějšího modelu PS, kdy k němu přiléhá reflektor, dává celkově lepší výsledky při přepočtech celé aktivní zóny. Ale na druhou stranu je tento způsob značně nepraktický, protože takováto příprava dat, při splnění všech požadavků knihovny pro kód ANDREA, by znamenala přepočet celkem 360 stavů - 30 vyhoření a 12 odskoků pro každý palivový soubor. Navíc by se musela uvažovat i pozice tohoto souboru na periférii, to by také zvyšovalo časové nároky, které by byly velmi vysoké, v řádu stovek hodin. Celkově tedy tento způsob homogenizace je přesnější, ale jeho přínos nepřeváží nevýhodu ve výpočetní náročnosti.

3 Srovnání výpočtů difuzních koeficientů

Chování neutronů v jaderném reaktoru z makroskopického hlediska je možné popsat pomocí difuzní teorie. Z jiných oblastí fyziky, jako například difuze molekul plynu či difuze tepla, známe jev, kdy dochází k přenosu z místa s větší hustotou molekul do míst s menší hustotou molekul, respektive z teplejšího místa do chladnějšího místa. Neutrony se v jaderném reaktoru chovají podobným způsobem. V oblastech s větší hustotou toku neutronů dochází k většímu počtu srážek za jednotku času, díky čemuž se neutrony více vzdalují od místa srážky, tedy přechází do míst, kde byla nižší hustota toku neutronů. Pro popis je vhodné využít Fickův zákon (3.1), který udává počet neutronů, který projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr proudu neutronů [15].

$$\vec{J} = -D\nabla\vec{\phi} \quad (3.1)$$

Kde \vec{J} je hustota proudu neutronů, $\vec{\phi}$ je hustota toku neutronů a D je konstanta úměrnosti nazývaná jako *difuzní koeficient*. Tento zákon neplatí za následujících podmínek:

1. Neutrony se pohybují v silně absorpčním prostředí.
2. Ve vzdálenosti menší než tři střední volné dráhy pro transport od zdrojů neutronů nebo vnějšího rozhraní difuzního prostředí.
3. Rozptyl neutronu v laboratorní soustavě je silně anizotropní.

3.1 Cíle

Difuzní koeficient je velmi důležitý parametr pro tepelné reaktory. Jeho hodnotu je třeba znát pro výpočty pomocí makrokódu při návrzích AZ či výpočtech jednotlivých stavů AZ. Jeho hodnota se za provozu mění v závislosti na vyhořívání paliva. Různé výpočetní kódy nabízí různé způsoby výpočtu difuzního koeficientu. V této práci použitý kód Serpent ve verzi 2.1.31 nabízí několik způsobů, které jsou popsány v podkapitolách níže. Cílem této kapitoly je porovnat mezi sebou různé přístupy k výpočtu difuzního koeficientu při přípravě homogenizovaných dat v kódu Serpent a ocenit vliv na rozložení výkonu pomocí přepočtu AZ kódem ANDREA. Na závěr bude zvolena nejvhodnější metoda k přípravě dat.

3.2 Úvod k přípravě dat Serpentelem

Příprava homogenizovaných dat probíhá v nekonečné mříži palivových souborů, ale reálně je PS umístěn v konečné mříži v jaderném reaktoru a dochází tak k únikům neutronů z PS. Avšak je možné předpokládat, že PS bude součástí kritické aktivní zóny, tedy je možné provést během výpočtu homogenizovaných dat pro PS korekci na kritické spektrum škálováním hustoty toku neutronů. Toto škálování má vliv na spektrum hustoty toku neutronů a používá se pro připravované účinné průřezy a také pro difuzní koeficient. Před samotnou korekcí na kritické spektrum jsou výpočetním kódem připraveny všechny homogenizované makroskopické účinné průřezy za použití P_0 hustoty toku neutronů z transportního výpočtu podle následující rovnice (3.2) do zvolených energetických grup.

$$\Sigma_{x,g} = \frac{\sum_{\text{buňky}}^i \Sigma_{x,g,i} \phi_{g,i}^0 V_i}{\sum_{\text{buňky}}^i \phi_{g,i}^0 V_i} \quad (3.2)$$

Kde g je index energetické grupy, i je index buňky, $\phi_{g,i}^0$ je P_0 hustota toku neutronů (vychází z P_n metody řešení rovnic pro $n = 0$), V_i je objem buňky, x je index typu reakce, $\Sigma_{x,g,i}$ je makroskopický účinný průřez a $\Sigma_{x,g}$ je homogenizovaný makroskopický účinný průřez pro danou energetickou grupu g a reakci x , kterou může být t(total), tr(transport), f(štěpení) či a(absorpce). Tímto krokem jsou vypočtena homogenizovaná data za použití nekonečného spektra, v Serpente označeno *INF*. Pokud je zvolena korekce na kritické spektrum, navazuje přímo jedna z následujících metod pro určení hodnoty difuzního koeficientu [18].

3.2.1 Nekonečné spektrum - INF

Kód Serpent používá při homogenizaci dat defaultní 70 grupovou energetickou strukturu pro výpočet jednotlivých požadovaných konstant, ale uživatel si může nastavit i svoji strukturu. V metodice pro kód Serpent z roku 2016 je uveden postup výpočtu difuzního koeficientu v energetické grupě g , kde g je jedna energetická grupa z energetického rozdělení v kódu Serpent, který vychází ze vztahu pro D_g z transportní teorie.

Tento vztah je uveden v (3.3)

$$D_g = \frac{\int_V d^3r \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \frac{1}{3\Sigma_{tr}(\vec{r}, E)} \phi(\vec{r}, E)}{\int_V d^3r \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \phi(\vec{r}, E)}, \quad (3.3)$$

kde V je objem buňky, E_g a E_{g-1} jsou hranice grupy g , ϕ je hustota toku neutronů a Σ_{tr} je transportní účinný průřez definovaný jako

$$\Sigma_{tr}(\vec{r}, E) = \Sigma_t(\vec{r}, E) - \Sigma_{s1}(\vec{r}, E), \quad (3.4)$$

kde Σ_{s1} je P_1 makroskopický účinný průřez pro rozptyl a je definován jako

$$\Sigma_{s1}(\vec{r}, E) = \bar{\mu}\Sigma_s(\vec{r}, E), \quad (3.5)$$

kde $\bar{\mu}$ je průměrný cosinus úhlu rozptylu a Σ_s je totální makroskopický účinný průřez pro rozptyl.

Kód Serpent nejprve během transportního výpočtu vypočte makroskopický transportní účinný průřez homogenizovaný přes geometrii

$$\Sigma_{tr,h} = \Sigma_{t,h} - \Sigma_{s1,h}, \quad (3.6)$$

kde $\Sigma_{s1,h}$ je obdrženo součtem přes všechny sloupce rozptylové matice P_1 .

Samotná hodnota difuzního koeficientu v grupě g je vypočtena podle rovnice (3.7).

$$D_g = \frac{\sum_{h \in g} \frac{1}{3\Sigma_{t,h}} \phi_h}{\sum_{h \in g} \phi_h} \quad (3.7)$$

Tento způsob výpočtu difuzního koeficientu podle rovnice (3.7) je zvolen z důvodu použití hodnoty $\bar{\mu}$ při výpočtu P_1 makroskopického účinného průřezu pro rozptyl v rovnici (3.5). Hodnota tohoto cosinu není ve spojitě závislosti na energii v knihovných jaderných dat v ACE formátu, které kód Serpent využívá. V jaderných datech se nachází hodnota pro účinný průřez pro rozptyl a pravděpodobnostní rozdělení pro úhel rozptylu. Proto není možné přímo řešit rovnici (3.3) pro spjitě spektrum energií, ale nejprve je nutno připravit v definované energetické struktuře rozptylovou matici a střední hodnotu $\bar{\mu}$ v uvažované energetické grupě a nakonec

makroskopický účinný průřez pro transport, ze kterého se pak vypočte difuzní koeficient podle rovnice (3.7) v grupě g , kde g je index grupy rozdělení, se kterým pracuje Serpent. Takto získaný difuzní koeficient D_g se nyní ještě musí převést do výstupního energetického rozdělení, které je požadováno. V případě kódu ANDREA jde o rozdělení do dvou grup, rychlé a tepelné s hranicí 0,625 eV. To je provedeno podle následující rovnice (3.8), kde D_G je difuzní koeficient v energetické grupě G z výstupního rozdělení a ϕ_g je hustota toku neutronů v grupě g . Celý tento výpočet je proveden v nekonečném spektru [13] [16].

$$D_G = \frac{\sum_{g \in G} D_g \phi_g}{\sum_{g \in G} \phi_g} \quad (3.8)$$

3.2.2 Metoda B1 (fum1)

První korekcí na kritické spektrum je B1 přístup. V kódu Serpent je zadán pomocí karty:

set fum [struktura energetických grup] 1

Jak je popsáno v metodice, Serpent nejprve vypočte homogenizované makroskopické účinné průřezy v nekonečném spektru. Ty jsou nyní použity v sadě B1 rovnic pro hledání parametru B - buckling, se kterým je počítaný palivový soubor kritický, tedy $k_{eff} = 1$. Rovnice použité v této metodě, zapsány v (3.9), jsou homogenní, nezávislé na prostoru a jsou zapsány pro grupu g z vnitřní energetické struktury Serpentu.

$$\begin{aligned} \Sigma_{t,g} \phi_g \pm iB J_g &= \chi_g + \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^0 \phi_{g'} \\ 3a_g(B) \Sigma_{t,g} J_g \pm iB \phi_g &= 3 \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^1 J_{g'} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Kde ϕ_g a J_g je hustota toku a proudu neutronů v grupě g , B je buckling, χ_g je štěpné spektrum, $\Sigma_{s,g' \rightarrow g}^0$ a $\Sigma_{s,g' \rightarrow g}^1$ jsou P_0 a P_1 rozptylové matice. Člen $a_g(B)$ je definován v (3.10).

$$a_g(B) = \begin{cases} \frac{1}{3}x^2 \left(\frac{\operatorname{arctg}(x)}{x - \operatorname{arctg}(x)} \right), & \text{pro } x^2 = \left(\frac{B}{\Sigma_{t,g}} \right)^2 > 0 \\ \frac{1}{3}x^2 \left(\frac{\ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right)}{\ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) - 2x} \right), & \text{pro } x^2 = - \left(\frac{B}{\Sigma_{t,g}} \right)^2 > 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Výsledkem výpočtu těchto rovnic jsou hodnoty J_g a ϕ_g . Hustota neutronového toku se využije v výpočtu koeficientu násobení a podle jeho hodnoty se hledá kritický B - buckling. Ten je počítán z výchozích rovnic pomocí iteračního postupu. Nejprve je do rovnic dosazeno $B^2 = 0$. Je vypočten koeficient násobení. Poté je vypočten pro druhý odhad $B^2 = 10^{-6}$. Tyto dvě hodnoty a výsledky v podobě koeficientu násobení se použijí k extrapolaci nové hodnoty B . Takto je provedeno několik iterací, dokud není dosaženo kritického koeficientu násobení, který je definován následujícím vztahem (3.11).

$$k_{eff} = \sum_g \nu \Sigma_{f,g} \phi_g \quad (3.11)$$

Pomocí získané hodnoty B je pro každou energetickou grupu g vypočten difuzní koeficient D_g podle vzorce (3.12).

$$D_g = \frac{iJ_g}{|B|\phi_g} \quad (3.12)$$

Hledaný difuzní koeficient metodou B1 s korekcí na kritické spektrum v energetické grupě G , kde G značí jednu z energetických grup výstupního rozdělení, nejčastěji rychlou a tepelnou, je zapsán v rovnici (3.13).

$$D_G = \frac{\sum_{g \in G} D_g \phi_g}{\sum_{g \in G} \phi_g} \quad (3.13)$$

Všechny ostatní generované homogenizované účinné průřezy jsou připraveny do energetických grup stejným způsobem jako difuzní koeficient D_G za použití vážení pomocí kritické hustoty toku neutronů [17] [18].

3.2.3 Metoda P1 (fum2)

Tato metoda se od B1 metody popsané výše liší pouze v sadě použitých rovnic pro výpočet kritického bucklingu. V kódu Serpent je P1 přístup zadán pomocí karty:

```
set fum [struktura energetických grup] 2
```

Místo sady rovnic (3.9) je použita následující sada rovnic (3.14).

$$\begin{aligned}\Sigma_{t,g}\phi_g \pm iBJ_g &= \chi_g + \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^0 \phi_{g'} \\ 3\Sigma_{t,g}J_g \pm iB\phi_g &= 3 \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^1 J_{g'}\end{aligned}\tag{3.14}$$

Výsledkem je opět kritický buckling, který je použit pro výpočet difuzního koeficientu, dle rovnice (3.13). Další postup je shodný s B1 metodou [18].

3.2.4 Metoda CMM - cumulative migration method

Tato metoda se také liší pouze způsobem výpočtu kritického bucklingu. V kódu Serpent je CMM zadán pomocí karty:

```
set cmm 1
```

Použitá transportní rovnice je zapsána v (3.15).

$$\Sigma_{tr,g}\phi_g + D_g B^2 \phi_g = \chi_g + \sum_{g'} \Sigma_{s,g' \rightarrow g}^0 \phi_{g'}\tag{3.15}$$

Kde $\Sigma_{tr,g}$ je makroskopický účinný průřez pro transport v grupě g a D_g je definován pomocí transportního účinného průřezu podle následujícího vzorce (3.16).

$$D_g = \frac{1}{3\Sigma_{tr,g}}\tag{3.16}$$

Narozdíl od B1 a P1 metody, kde dochází k výpočtu difuzního koeficientu za pomoci kritického bucklingu, hustoty toku a proudu neutronů se v CMM metodě používá homogenizovaný makroskopický účinný průřez pro transport z výpočtu v nekonečném energetickém spektru, které je použito během transportního výpočtu, jak je uvedeno v úvodu B1 metody. V této metodě je kritické spektrum dále použito na výpočet všech grupových konstant, stejně jako v B1 a P1 metodě. A poté je

difuzní koeficient vypočten za pomoci Σ_{tr} s úpravou na kritické spektrum z CMM metody podle rovnice (3.16) a následně je provedena kondenzace do výstupního energetického rozdělení shodně s B1 metodou v rovnici (3.12). Ovšem u této metody je nutno říct, že difuzní koeficienty mají smysl, jen když jsou vypočtené v celé geometrii, ideálně konečné. Není tedy vhodné tuto metodu využívat při výpočtu s periodickou okrajovou podmínkou či pro výpočet celozónových výpočtů, kde jsou data generována zvlášť pro každý palivový soubor [19] [20].

3.2.5 Metoda TRC

Posledním způsobem, jakým je možné v Serpentu připravit hodnotu difuzního koeficientu, je aplikování uživatelem zvoleného korekčního faktoru. Tato korekce může být definována pro každý materiál zvlášť. Dále platí, že je definována pro každou energetickou grupu z energetické struktury, se kterou počítá Serpent a dále také může být zadána zvlášť pro různé teploty. Takto může tedy vzniknout matice o rozměrech $M \times N$, kde M je počet energetických grup a N je počet teplot, pro které je korekce zadána. V kódu Serpent je tato korekce ve vstupním souboru zadána pomocí příkazu:

```
set trc MAT FILE Emin [ZAIn]
```

Korekční faktor zadaný uživatelem je funkcí od energie podle rovnice (3.17) a tato korekce je využita při výpočtu makroskopického transportního účinného průřezu a to tak, že hodnota korekce v příslušné energetické grupě se vynásobí s odpovídajícím totálním makroskopickým účinným průřezem.

$$f(E) = \frac{\Sigma_{tr}}{\Sigma_t} \quad (3.17)$$

Takto připravený makroskopický transportní účinný průřez je poté využit na výpočet difuzního koeficientu v energetické grupě g pomocí následující rovnice.

$$D_g = \frac{1}{3\Sigma_{tr,g}} \quad (3.18)$$

Následně je provedeno převedení do výstupního energetického rozdělení stejně jako je popsáno v metodách výše, například v rovnici (3.13).

Jak uvádí [21], tato metoda zatím není využitelná pro vyhořívající materiály, proto dále není uvažována a je zde uvedena pouze pro úplnost.

3.3 Metodika srovnání

Srovnání různých definic výpočtu difuzního koeficientu v kódu Serpent bude provedeno pomocí 2D modelu aktivní zóny reaktoru VVER-1000 kampaně U1C15 ve stavu HZP-ARO, parametry jsou níže v tabulce 3.1. Tímto modelem, připraveným nástrojem SFullcore (nástroje jsou detailněji popsány v sekci 1.2) jsou vypočteny referenční hodnoty výkonu a koeficientu násobení. Při výpočtu je použito grupové rozdělení *wms172* (WIMS 172-group structure) a dostatečný počet historií, aby statistická neurčitost v případě k_{eff} byla okolo 10 pcm. Postupně jsou připravena homogenizovaná data pomocí nekonečného spektra - INF a oprav na kritické spektrum - B1, P1 a CMM pomocí modelů palivových souborů v nekonečné mříži připravených pomocí nástroje Quadriga3. Vyhořívání probíhá na středních parametrech paliva v krocích mezi 0,005 až 64 MWd/kgU a pro výpočet homogenizovaných dat je definován odskok na parametry uvedené v tabulce 3.1. Takto získaná data jsou následně použita k přepočtu AZ pomocí kódu ANDREA, reflektory jsou dodány z referenčního výpočtu. Pro porovnání jednotlivých metod mezi sebou bude využito srovnání vypočteného rozložení výkonu, k_{eff} a relativní odchylky difuzního koeficientu od referenčních hodnot. Bude oceněn vliv použité metody jako celek. Každá metoda totiž připraví i trochu jinak grupová data (zejména makroskopické účinné průřezy), která vstupují poté do datacase.

Tabulka 3.1: Stav reaktoru při testu F5 pro U1C15 [10]

Výkon [% N_{nom}]	Tlak [MPa]	Vstupní teplota [°C]	Koncentrace kys. borité [g/kg]
5,4E-3	15,60	280,4	10,61

3.4 Vyhodnocení výsledků

Srovnání různých metod pro výpočet difuzního koeficientu je na následujících obrázcích 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4. Na těchto obrázcích jsou vidět absolutní odchylky výkonů v jednotlivých PS a rozdíl koeficientů násobení v pcm vůči referenčnímu výpočtu v kódu Serpent. V tabulce 3.2 jsou relativní odchylky difuzního koeficientu oproti B1 metodě (počítané podle rovnice (3.19), kde *xxx* značí srovnávanou metodu) pro palivový soubor v centru aktivní zóny. Hodnoty difuzního koeficientu jsou uvedeny v rychlé a tepelné grupě.

$$\left(1 - \frac{xxx}{fum1}\right) \cdot 100 \quad (3.19)$$

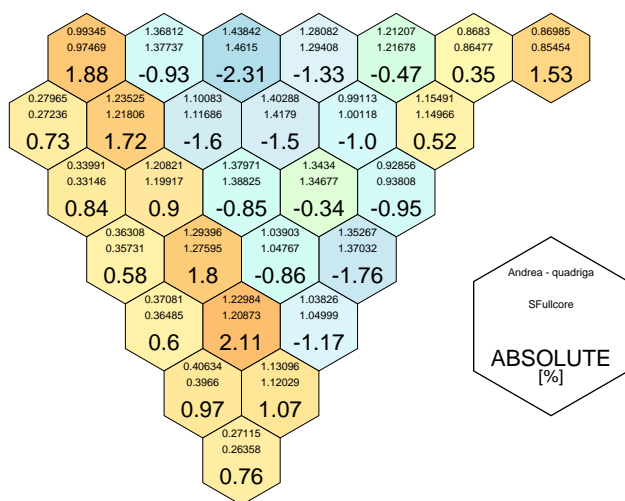
Tabulka 3.2: Srovnání hodnoty difuzního koeficientu pro PS v centru AZ

	D [cm] rychlá	D [cm] tepelná	relat. odchylka [%] rychlá	relat. odchylka [%] tepelná
fum1	1,37425	0,39549	-	-
inf	1,48600	0,36063	-8,13109	8,81381
fum2	1,37229	0,39595	0,14297	-0,11555
cmm	1,39086	0,40604	-1,20807	-2,66785

Ze srovnání výkonů spočtených pomocí kódu ANDREA oproti referenčnímu výpočtu v kódu Serpent je vidět, že nejméně vhodné je využití metody CMM. Zde dochází k odchylkám až přes 4 % a k odchylce koeficientu násobení 33 pcm. Další metodou, která není vhodná, je metoda INF, tedy použití nekonečného spektra. Z odchylek je vidět, že dosahují 2 % a rozdíl koeficientů násobení je 94 pcm. Následující dvě metody - B1 a P1 jsou již vhodné pro přípravu difuzního koeficientu a celkově homogenizovaných dat pro výpočty. Ze srovnání výkonů na obrázku 3.3 pro metodu P1 je vidět, že dochází k velmi malým odchylkám pod 2 %, až na centrální palivový soubor, kde je rozdíl větší. Odchylka koeficientů násobení je zde již jen 101 pcm. Nejlépe vychází metoda B1, která je na obrázku 3.2. Zde dochází opět k velmi malým odchylkám jako v případě P1 metody, ale nedochází zde k velké odchylce v centrálním PS. Rozdíl koeficientů násobení je o něco lepší, činí 111 pcm.

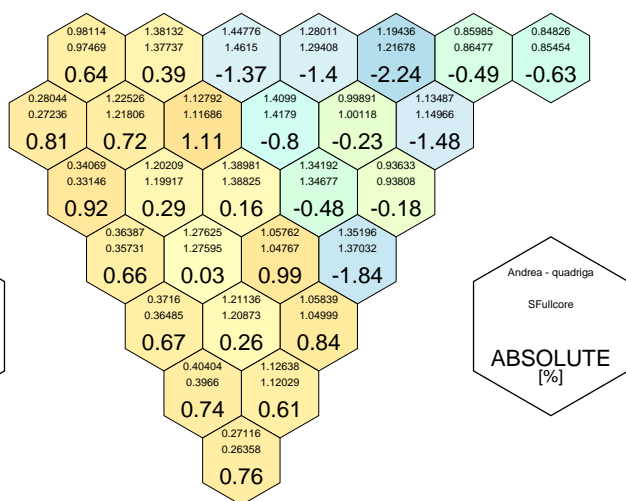
3.5 Závěr

Závěrem k této kapitole se dá říci, že metody INF a CMM nejsou vhodné pro přípravu difuzních koeficientů pro jednotlivé PS pomocí nástroje Quadrize3. Metody B1 a P1 dávají obě srovnatelné výsledky a jsou vhodné k použití jak pro přípravu dat v Quadrize3. Jako doporučená metoda je zvolena B1(fum1) metoda. Ze srovnání s referenčním výpočtem vychází nejlépe a navíc pro ni mluví fakt, že se již na ORF ÚJV k přípravě dat používala a kód Helios, který slouží k přípravě knihoven pro ANDREU, také využívá B1 metodu. Tato metoda bude v kapitole 5 použita k přípravě knihoven a výsledky budou srovnány s provozními daty.



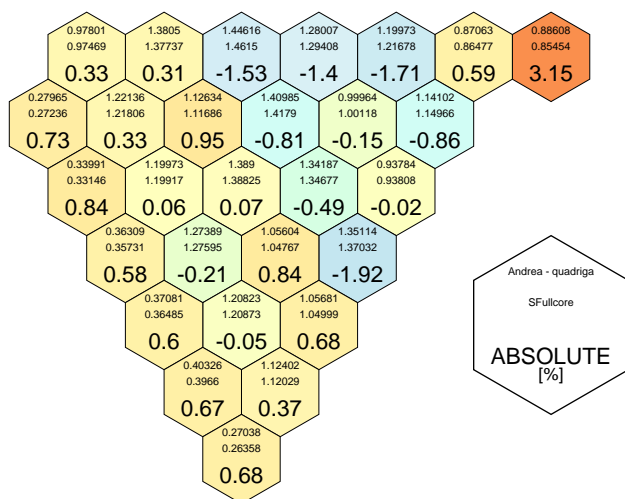
keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.01433
diff: 94.0 pcm

Obrázek 3.1: Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(INF) pro U1C15



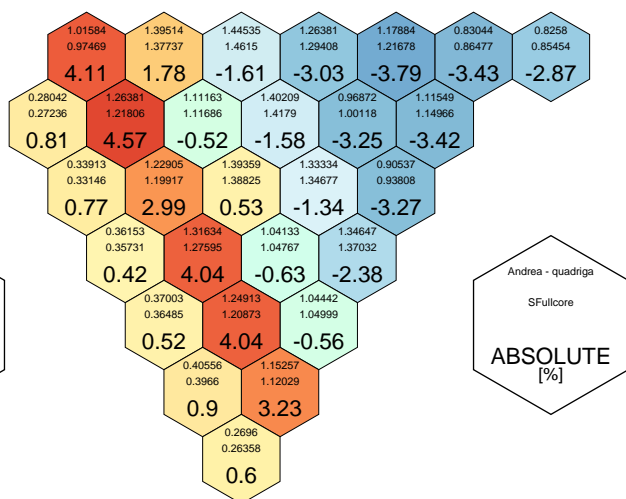
keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.01416
diff: 111.0 pcm

Obrázek 3.2: Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(FUM1) pro U1C15



keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.01426
diff: 101.0 pcm

Obrázek 3.3: Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(FUM2) pro U1C15



keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.0156
diff: -33.0 pcm

Obrázek 3.4: Srovnání relativních výkonů PS Serpent - ANDREA(CMM) pro U1C15

4 Vliv kritického spektra

Při přípravě homogenizovaných dat hraje významnou roli spektrum hustoty toku neutronů pro rovnice popisující časový vývoj složení paliva v použitém modelu. Během výpočtu se používá dvoukrokové schema. Nejprve dochází k výpočtům vyhoření a poté k dojde k přípravě samotných homogenizovaných dat. V každém z těchto dvou kroků výpočetní kód používá zadané spektrum hustoty toku neutronů a to může být buď nekonečné nebo kritické.

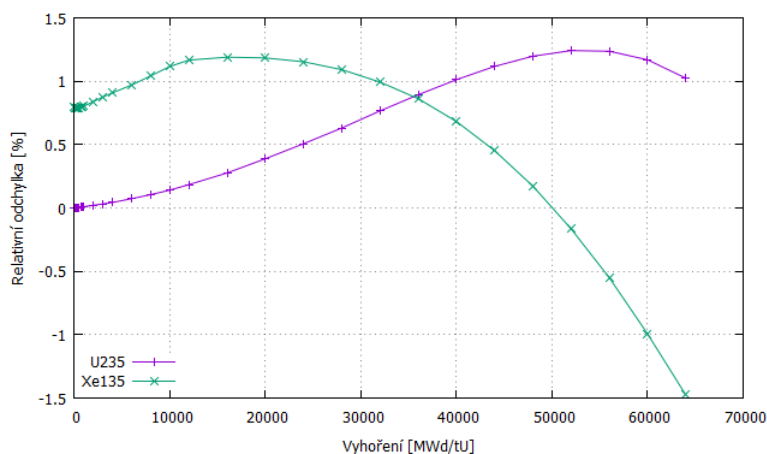
Příprava dat standardně probíhá v nekonečné mříži palivových souborů, ale reálně je PS umístěn v konečné mříži v jaderném reaktoru a dochází tak k únikům neutronů. Avšak je možné předpokládat, že PS bude součástí kritické aktivní zóny, tedy je možné provést během výpočtu homogenizovaných dat pro PS korekci na kritické spektrum škálováním hustoty toku neutronů tak, aby koeficient násobení byl roven jedné.

4.1 Motivace a cíle

Motivací pro zkoumání vlivu kritického spektra během vyhořívání na generovaná homogenizovaná data je to, že kód Serpent prozatím neumožňuje vyhořívání v kritickém spektru a používá nekonečné spektrum. Cílem je určit jakých odchylek dosahují počítaná data v závislosti na změně izotopického složení mezi nekonečným spektrem a kritickým spektrem při vyhořívání. K analýze byl využit deterministický kód Helios, který umožňuje vyhořívání pomocí obou spekter. Nejprve byl prostudován vliv spektra na samotné izotopické složení během vyhořívání, následně byla pro kód verifikována metodika výpočtů s restartem a nakonec byl oceněn vliv spektra při vyhořívání na homogenizovaná data a na přepočty aktivní zóny [13] [22].

4.2 Rozdíly v izotopickém složení

Nejprve je nutné se podívat na rozdíly v izotopickém složení (brána atomová hustota [at/bcm]) během vyhořívání v kritickém (B1 korekce) a nekonečném spektru. Pro ukázkou této problematiky byl zvolen palivový soubor a47D12 a pomocí SW Quadriga3 byly připraveny vstupy pro kód Helios 2.1.4a. Pro srovnání rozdílů izotopického složení jsou důležité izotopy U235 a Xe135. Koncentrace těchto izotopů v palivovém souboru má největší vliv na jeho neutronické vlastnosti. Na následujícím grafu 4.1 jsou vyneseny relativní odchylky zastoupení jednotlivých izotopů v palivovém souboru během vyhořívání od 0 MWd/tU do 64 000 MWd/tU mezi vyhořením v kritickém spektru a nekonečném spektru.



Obrázek 4.1: Relativní odchylky izotopického složení během vyhořívání

Na výše uvedených odchylkách je vidět, že dochází k relativní odchylce přes 1 % u U235 během vyhořívání. Kladná odchylka zde značí, že při vyhořívání v nekonečném spektru dochází k rychlejšímu vyhoření U235 než v kritickém spektru, tedy hodnota koncentrace U235 v daném kroku pro nekonečné spektrum má nižší hodnotu než pro kritické. Taktéž dochází k odchylkám, a to vysokým, v koncentraci Xe135. Ten je v obou případech počítán jako rovnovážný. Tyto změny izotopického složení se projeví především na koeficientu násobení tohoto palivového souboru. V následující tabulce 4.1 jsou relativní odchylky vybraných veličin mezi vyhořením v nekonečném a kritickém spektru. Je dobré si povšimnout hned v prvním kroku, že dochází k rozdílu v koncentraci Xe135. To je způsobeno rozdílnou hustotou toku neutronů pro vyhořívání v kritickém spektru, která je ovlivněna opravou na kritické spektrum. Veličiny jsou spočteny pomocí výpočtů s restartem, který je popsán níže. Relativní odchylka je počítána podle:

$$\left(1 - \frac{\text{nekonečné}}{\text{kritické}}\right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Rozdíl koeficientů násobení je počítán na jako:

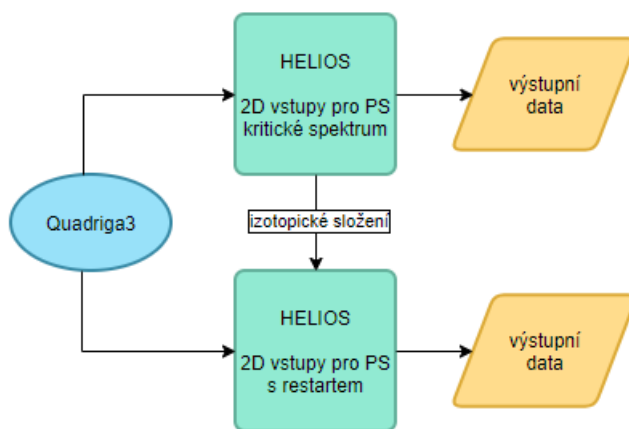
$$(k_{\text{kritické}} - k_{\text{nekonečné}}) \quad (4.2)$$

Tabulka 4.1: Tabulka relativních odchylek pro vybrané veličiny

Vyhoření [MWd/tU]	U235 [%]	Xe135 [%]	keff [pcm]	$\Sigma_f^{\text{tepelný}}$ [%]	$\Sigma_a^{\text{tepelný}}$ [%]
0	0,000	0,793	-25,460	-0,008	0,021
50	0,000	0,791	-24,250	-0,008	0,020
100	0,003	0,791	-24,570	-0,006	0,022
150	0,000	0,791	-24,470	-0,004	0,025
267	0,003	0,787	-23,030	0,002	0,030
383	0,003	0,789	-23,260	0,008	0,038
500	0,003	0,789	-23,260	0,014	0,045
667	0,007	0,793	-21,430	0,022	0,053
833	0,010	0,798	-21,560	0,029	0,063
1000	0,010	0,803	-21,810	0,038	0,073
2000	0,021	0,840	-25,020	0,085	0,133
3000	0,032	0,875	-23,710	0,129	0,183
4000	0,044	0,909	-26,550	0,170	0,232
6000	0,073	0,970	-31,570	0,248	0,325
8000	0,105	1,043	-41,640	0,320	0,418
10000	0,141	1,117	-56,340	0,389	0,507
12000	0,185	1,167	-26,850	0,465	0,560
16000	0,277	1,189	60,190	0,619	0,625
20000	0,389	1,184	100,290	0,732	0,690
24000	0,508	1,153	132,990	0,811	0,728
28000	0,631	1,091	156,350	0,861	0,738
32000	0,766	0,993	175,180	0,878	0,719
36000	0,894	0,861	184,240	0,858	0,671
40000	1,012	0,682	181,510	0,796	0,591
44000	1,118	0,451	165,510	0,687	0,479
48000	1,198	0,171	135,840	0,526	0,333
52000	1,242	-0,165	89,930	0,309	0,154
56000	1,236	-0,552	29,590	0,036	-0,057
60000	1,169	-0,994	-45,520	-0,289	-0,296
64000	1,024	-1,476	-131,400	-0,664	-0,558

4.3 Verifikace výpočtů s restartem

Další částí ocenění vlivu spektra při vyhořívání bylo vytvoření šablon pro SW Quadriga3 tak, aby umožňovaly přípravu vstupu s restartem pro kód Helios. To znamená, že Helios nebude počítat vyhoření, ale načte izotopické složení z dumpu z nějakého předchozího výpočtu, v tomto případě z výpočtu s nekonečným spektrem a napočte homogenizovaná data s korekcí na kritické spektrum v jednom definovaném kroku vyhoření a stavu. Bohužel není možné napočítat v jednom výpočtu všechny kroky vyhoření najednou, protože Helios neumožňuje v rámci restartu načíst všechny požadované kroky vyhoření s různým izotopickým složením (to je způsobeno vnitřním omezením na paměť). Pro ověření správnosti šablon a verifikaci výpočtu s restartem bylo provedeno srovnání pro palivový soubor a30A9. Bylo spočteno izotopické složení s kritickým spektrem a v tom samém výpočtu i homogenizovaná data. Následně byly vytvořeny restarty pro každý krok vyhoření s izotopickým složením načteným z předchozího výpočtu s nekonečným spektrem a vypočtena homogenizovaná data. Tento postup by měl ukázat, že vypočtená data se od sebe neliší víc než o odchylky způsobené v rámci výpočtu v Heliosu (podmínky pro konvergenci iterací). Schematicky je postup naznačen na následujícím flowchartu 4.2.



Obrázek 4.2: Schema způsobu verifikace výpočtů s restartem

Pro vyhodnocení je vhodné srovnat odchylky homogenizovaných dat mezi sebou, především koeficient násobení. V následující tabulce 4.2 jsou relativní odchylky pro vybrané veličiny mezi výpočtem přímo a výpočtem s restartem. Jak je z této tabulky vidět, v obou výpočtech se pracuje se stejným izotopickým složením, což ukazuje sloupec s relativní odchylkou U235 a Xe135. Relativní odchylky makroskopických účinných průřezů jsou v řádu tisícín procenta. Rozdíly koeficientů násobení jsou v jednotkách pcm. To je způsobeno konvergencí během iterací v Heliosu.

Bylo navíc potvrzeno, že když dojde ke zvýšení přesnosti iterací, tak tyto odchylky více přiblíží nule a dalším zvyšováním přesnosti by bylo tyto rozdíly možné téměř odstranit. Celkově je vidět, že restarty jsou připraveny dobře a dávají očekávané výsledky. Metodika a šablony jsou tedy připraveny korektně.

Tabulka 4.2: Tabulka relativních odchylek pro vybrané veličiny

Vyhoření [MWd/tU]	U235 [%]	Xe135 [%]	keff [pcm]	$\Sigma_f^{tepelny}$ [%]	$\Sigma_a^{tepelny}$ [%]
0	0	0	-0,690	0,000	0,001
50	0	0	1,220	0,000	-0,001
100	0	0	1,470	0,000	-0,001
150	0	0	1,530	0,000	0,000
267	0	0	2,070	0,001	0,000
383	0	0	3,920	0,002	-0,001
500	0	0	3,910	0,001	-0,001
667	0	0	2,320	0,001	0,000
833	0	0	2,580	0,002	0,001
1000	0	0	3,200	0,002	0,001
2000	0	0	4,340	0,000	0,000
3000	0	0	6,380	0,001	0,000
4000	0	0	6,120	0,000	-0,001
6000	0	0	8,060	0,000	-0,001
8000	0	0	10,240	-0,001	-0,002
10000	0	0	6,440	0,000	-0,002
12000	0	0	9,240	-0,001	-0,002
16000	0	0	9,680	0,000	-0,002
20000	0	0	7,250	-0,001	-0,002
24000	0	0	8,640	-0,001	-0,003
28000	0	0	7,150	-0,001	-0,003
32000	0	0	8,530	0,000	-0,002
36000	0	0	7,020	-0,001	-0,003
40000	0	0	7,280	-0,001	-0,002
44000	0	0	6,620	-0,001	-0,003
48000	0	0	6,390	-0,001	-0,003
52000	0	0	6,350	-0,001	-0,003
56000	0	0	6,280	-0,001	-0,003
60000	0	0	6,470	-0,002	-0,003
64000	0	0	7,080	-0,001	-0,003

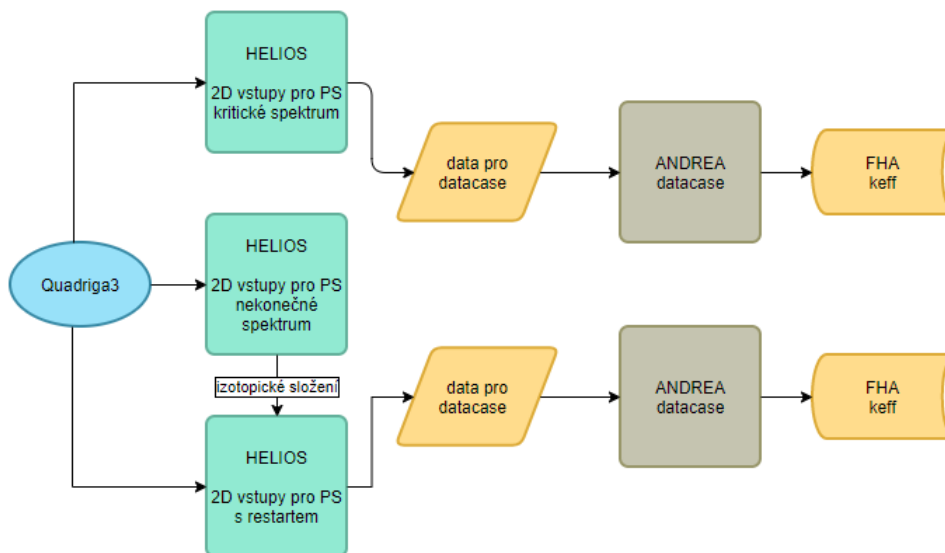
4.4 Metodika ověření

Ocenění vlivu spektra při vyhořívání v kódu Helios bylo provedeno pomocí datacase ANDREA pro vybrané vsázky U1C9 a U1C15 ve stavech na začátku kampaně (BOC), uprostřed kampaně (MOC) a konec kampaně (EOC). Stavy byly pouze vybrány jako modelové kvůli načtení vyhoření palivových souborů. Avšak není nijak v těchto přepočtech řešena kritická koncentrace kyseliny borité a také zde nejsou zahrnuty regulační tyče. Proto stav BOC je nadkritický a EOC podkritický.

Datacase umožňuje jednoduchým způsobem určit vliv napočtených homogenizovaných dat na rozložení výkonů v palivových souborech a koeficient násobení.

Samotná metodika je znázorněna na flowchartu na obrázku 4.3, byly připraveny vstupy pro kód Helios s vyhoříváním v kritickém spektru, spočtena homogenizovaná data s korekcí na kritické spektrum a ta použita k výpočtu datacase. Dále byly připraveny identické vstupy, s tím rozdílem, že vyhořívání bylo provedeno v nekonečném spektru. Z tohoto výpočtu bylo načteno izotopické složení do vstupů s restartem, který na základě načteného izotopického složení přepočte pouze jednotlivé stavy a připraví homogenizovaná data s korekcí na kritické spektrum.

Následně jsou data zpracována pro potřeby datacase a u vypočtených dat dojde k úpravě makroskopického účinného průřezu pro absorpci, je od něj odečtena absorpce na xenonu. Výstupem obou výpočtu v kódu ANDREA jsou rozložení relativních výkonů palivových souborů (FHA) a koeficient násobení.

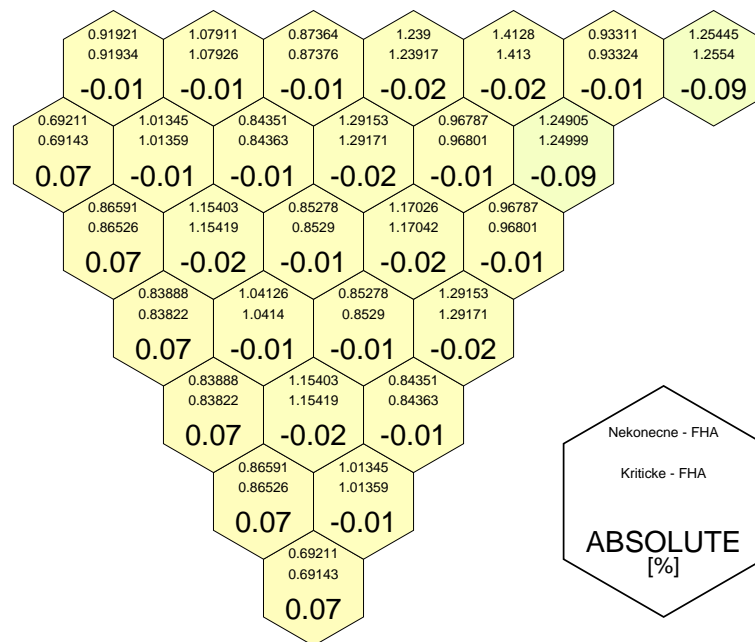


Obrázek 4.3: Schema způsobu ocenění vlivu spektra při vyhořívání: v horní části vyhořívání pomocí kritického spektra, v dolní části vyhořívání pomocí nekonečného spektra

4.5 Vyhodnocení

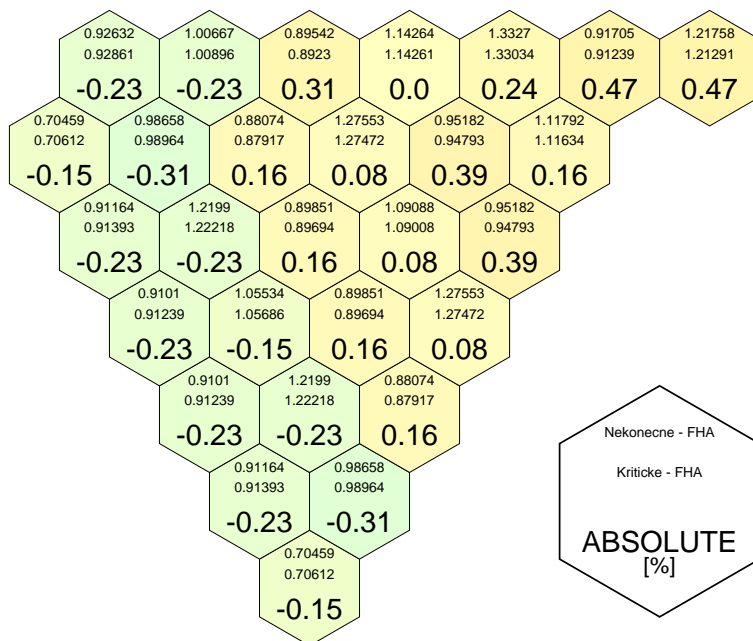
U1C9

Nejprve byla zhodnocena kampaň U1C9. Ta obsahuje na začátku pouze čerstvé palivové soubory. Relativní rozložení výkonů v jednotlivých palivových souborech, koeficienty násobení a odchylka koeficientu násobení v pcm je pro BOC na obrázku 4.4, pro MOC na 4.5 a pro EOC na 4.6. Jak je vidět, tak v BOC jsou odchylky výkonů velmi malé a rozdíl koeficientů násobení je -1,15 pcm, tyto rozdíly jsou způsobeny iteracemi v kódu Helios, jak bylo prokázáno v sekci 2.3, když se zpřísní podmínka na konvergenci iterací, tak dojde ke snížení odchylek. Jak dochází k vyhoření palivových souborů během kampaně, tak rozdíl koeficientů násobení přejde na 14,33 pcm ve stavu EOC. Srovnání relativních rozložení výkonů je uvedeno v absolutní odchylce a v BOC je pod 0,09 %. Zde se výkony velmi dobře shodují a největší odchylky jsou ve stavu EOC, kde dosahují až 1,04 %.



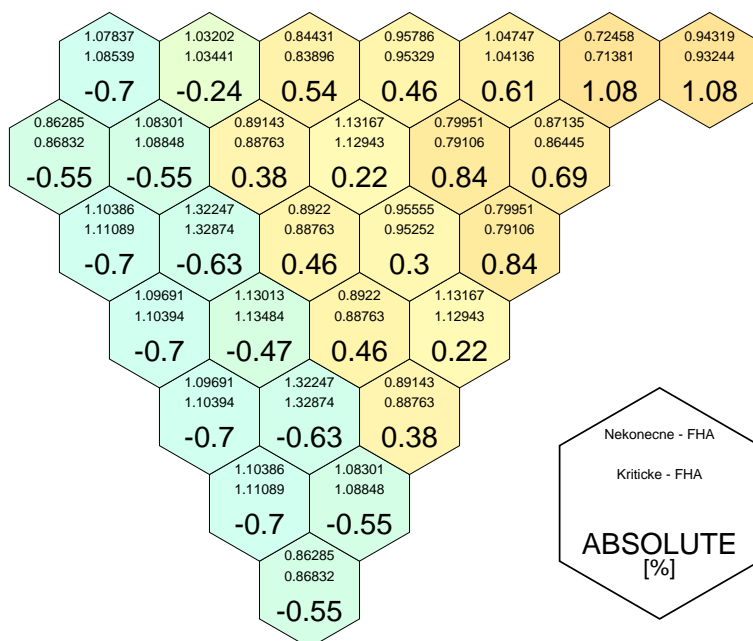
keff Kriticke: 1.07279, keff Nekonecne: 1.0728
diff: -1.15 pcm

Obrázek 4.4: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 BOC



keff Kritické: 1.04213, keff Nekonečné: 1.04202
diff: 10.45 pcm

Obrázek 4.5: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 MOC

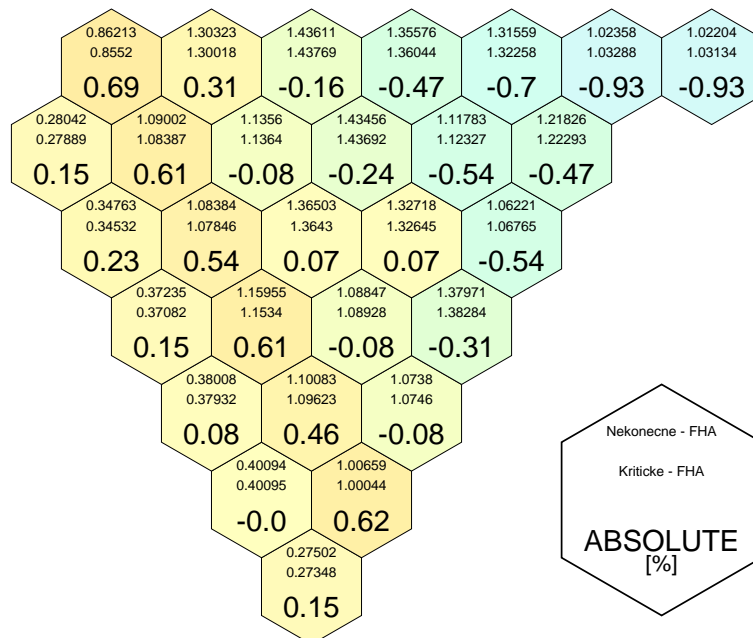


keff Kritické: 1.00519, keff Nekonečné: 1.00504
diff: 14.33 pcm

Obrázek 4.6: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C9 EOC

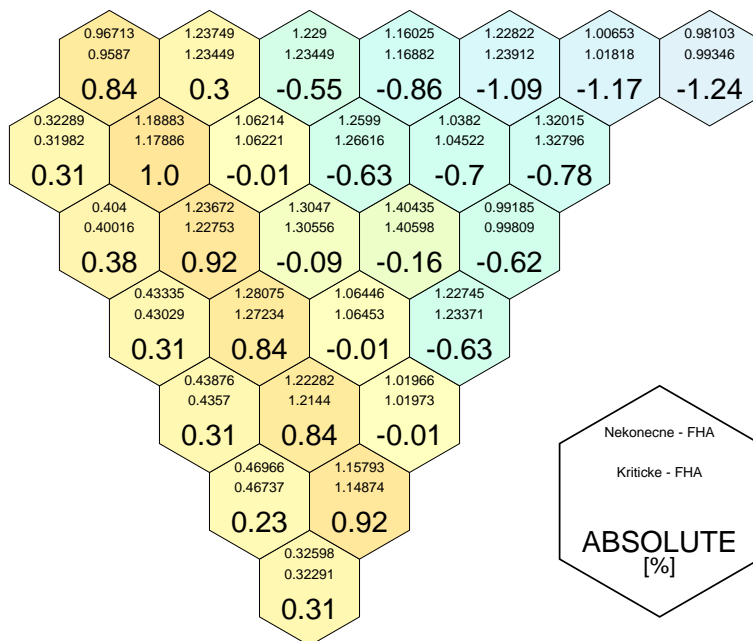
U1C15

Poté byla zhodnocena kampaň U1C15. Ta obsahuje již více použité palivové soubory, které již absolvovaly jednu či více kampaní a dosahují tak vyšších hodnot vyhoření. Relativní rozložení výkonů v jednotlivých palivových souborech, koeficienty násobení a odchylka koeficientu násobení v pcm je pro BOC na obrázku 4.7, pro MOC na 4.8 a pro EOC na 4.9. V kampaní U1C15 rozdíl koeficientů násobení již dosahují větších hodnot. Pro BOC 87 pcm a pro EOC se zvýší tento rozdíl na 111 pcm. Ve všech třech vyhodnocovaných bodech - BOC, MOC a EOC již odchylky relativního rozložení výkonu dosahují hodnot okolo 1 % a v případě MOC až 1,24 %. Tato hodnota již není zanedbatelná a jde o značný rozdíl.



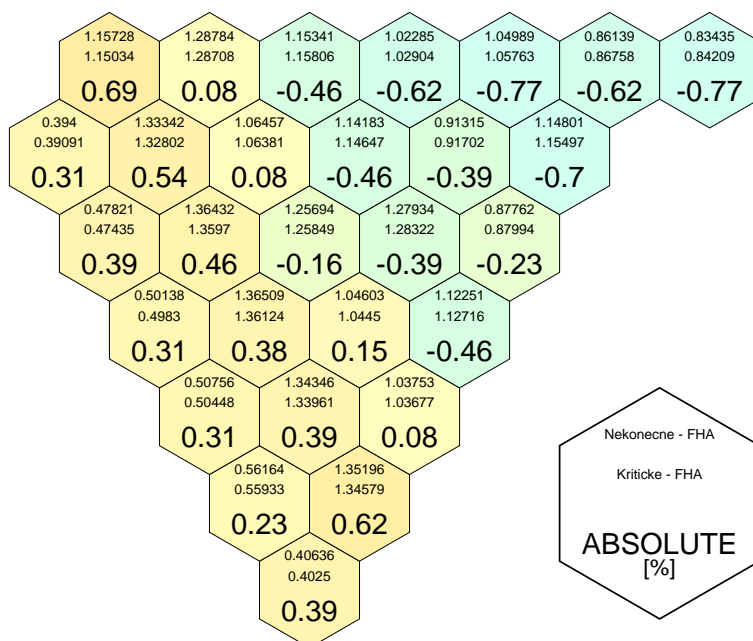
keff Kritické: 1.10116, keff Nekonečné: 1.10029
diff: 87.31 pcm

Obrázek 4.7: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 BOC



keff Kritické: 1.06084, keff Nekonečné: 1.05999
diff: 84.71 pcm

Obrázek 4.8: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 MOC



keff Kritické: 1.01203, keff Nekonečné: 1.01092
diff: 110.92 pcm

Obrázek 4.9: Srovnání relativních výkonů PS Kritické - Nekonečné pro U1C15 EOC

4.6 Závěr

Celkově z výše rozebrané a vyhodnocené problematiky vlivu spektra během vyhořívání v kódu Helios plyne, že vliv na koeficient násobení je možné očekávat v řádu stovky pcm. Také je možné vyvodit trend rozdílu mezi k_{eff} v kritickém a nekonečném spektru a ten je stejný pro kampaně U1C9 a U1C15, kdy se tento rozdíl během vyhořívání během kampaně zvyšuje. Pro relativní rozložení výkonů (FHA) je možné očekávat možné absolutní odchylky v maximu 1,24 %. Celkově je možno konstatovat, že chyba výpočtů v důsledku vyhořívání v nekonečném spektru nepřevyšuje chyby vzniklé v důsledku ostatních aproximací ve výpočetním řetězci (homogenizace v nekonečné mříži apod.). Proto je kód Serpent s jeho výpočetním schématem (vyhoření v nekonečném spektru, homogenizace v kritickém spektru) použitelný pro přípravu knihoven účinných průřezů pro výpočty v difúzním přiblížení.

5 Knihovna pro kód ANDREA

5.1 Úvod

Cílem této kapitoly je sestavit kompletní knihovnu pro kód ANDREA, provést částečnou validaci vůči provozním datům a na základě těchto výsledků rozhodnout, zda kód Serpent je v konečném pohledu vhodný k přípravě homogenizovaných dat pro knihovnu. Před samotnou tvorbou knihovny bylo třeba nejprve vyřešit několik souvisejících témat. V první kapitole této práce bylo ukázáno, že kód Serpent je vhodný nástroj k přípravě homogenizovaných dat v nekonečné 2D mříži pro kód ANDREA a zvolený postup homogenizace palivových souborů je správný. Z problematiky řešené v kapitole 3 vyplývá vhodný způsob přípravy difuzního koeficientu, respektive vhodná korekce na kritické spektrum, kterou má kód Serpent během výpočtů používat. V kapitole 4 byl prozkoumán vliv spektra během vyhořívání na celozónové výpočty, zde bylo ukázáno, že kód Serpent s jeho výpočetním schématem (vyhoření v nekonečném spektru a homogenizace s korekcí na kritické spektrum) je použitelný pro přípravu knihoven a byly zde i ukázány možné odchylky způsobené tímto schématem vyhoření od postupu s pouze kritickým spektrem. Poznatky ze všech předchozích kapitol se využijí v této kapitole a poslouží k co nejpřesnější přípravě knihoven pro kód ANDREA.

5.1.1 Co je třeba dořešit

Před samotnou přípravou knihovny bylo ještě třeba dořešit několik důležitých úkolů. Prvním byla příprava dat pro axiální reflektory. Touto problematikou se v kódu Serpent na ORF ÚJV ještě nikdo nezabýval. Bylo potřeba navrhnout a otestovat metodiku přípravy dat. Dalším úkolem bylo vyřešit přípravu dat pro radiální reflektory. Opět tato problematika byla řešena od úplných základů a bylo třeba navrhnout a otestovat způsob přípravy dat. Poslední částí byla příprava softwarových nástrojů pro přípravu knihovny. Popis řešení uvedených úkolů je uveden v podkapitolách 5.3-5.6. V podkapitole 5.7 jsem provedl srovnání predikcí kódu ANDREA s mnou vytvořenou knihovnou s experimentálními daty. Nejprve však uvedu stručný popis knihovny programu ANDREA a nástroje používaného pro její sestavení.

5.2 Knihovny programu ANDREA

5.2.1 Obecný popis knihovny

Knihovna pro kód ANDREA obsahuje předem připravena homogenizovaná data v textovém, pro uživatele čitelném formátu. Současná verze knihovny je 13.5. Ta obsahuje v prvním bloku informaci o verzi, počtu energetických grup, použitém výpočetním kódu pro přípravu dat, informaci o použitých korekcích aplikovaných na některé veličiny, zahrnuté stavy (např. HFP, HZP) včetně rozsahů výkonů a teplot, následuje informace o verzování jednotlivých šablon Quadrigy, které byly použity při přípravě dat a blok je zakončen kinetickými parametry.

Po obecných informacích knihovna obsahuje bloky pro jednotlivé palivové soubory, blankety, axiální a radiální reflektory. Každý blok obsahuje v úvodu obecné informace o typu (F - palivo, R - reflektor) a následně jsou data rozdělena pro každý krok vyhoření zvlášť. Obsahuje-li knihovna 1 typ palivového souboru s daty ve 30 krocích vyhoření, v knihovně je celkem 30 záznamů s daty o palivovém souboru pod jednou úvodní hlavičkou.

Za úvodem následují obecné údaje o geometrii palivového souboru. Těmi jsou například: plocha a rozteč PS, obohacení, podíl paliva, podíl moderátoru, podíl moderátoru se zasunutým regulačním orgánem. Po tomto bloku nyní následuje blok s informacemi o poloze, počtu palivových proutků a o symetrii záznamu (šestinový či třetinový). Pro každý proutek jsou v zde obsaženy informace o číslování, souřadnicích, úhlu mezi osou symetrie, obohacení, označení a případně o obsahu vyhořívajících absorbátorů. Dále je blok s teplotním modelem palivového souboru pro různá vyhoření. Po teplotním modelu následuje záznam dat - účinné průřezy, atomové hustoty a další důležité parametry. Celé je to zakončeno částí s parametrizací získanou pomocí odskoků.

Vzhledem k velkému množství těchto veličin není vhodné do této práce zařadit jejich detailní soupis. Seznam veličin je k nalezení v jakékoli knihovně pro kód ANDREA, případně také je možné najít detailnější informace ke knihovnám v interním dokumentu ORF ÚJV Řež *Lattice code methodology* [24].

5.2.2 Nástroj AKIKO

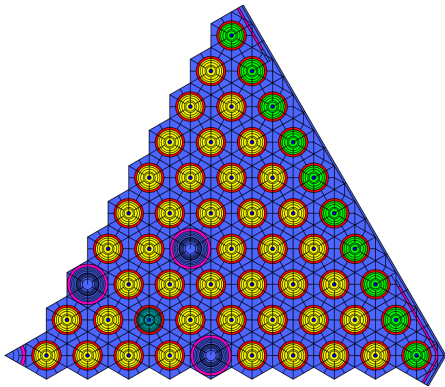
Vzhledem k velkému množství parametrů a typů palivových souborů je rozsah knihovny obrovský, v řádu statisíců až milionů řádků. Proto není možné takovou knihovnu tvořit ručně a je nutné ji připravit pomocí nějakého programu. Ten je standardní součástí distribuce kódu ANDREA a je nazván Akiko.

Pomocí tohoto nástroje je možné připravit kompletní knihovnu z různých druhů vstupních dat. Akiko umí zpracovat data z kódu Helios, Scale, či formátu souboru JSON nebo jistého typu textových tabulek. V případě zpracování dat z kódu Helios či Scale Akiko přímo načítá výstupní soubory a infosoubor vygenerovaný Quadrigou3. Vstup dat přes formát JSON umožňuje načítat data připravená nějakým preprocessingem z naprosto libovolného zdroje, JSON jen musí obsahovat všechny důležité informace pro zapsání knihovny. Načítání dat přímo ze Serpentu nebylo doposud implementováno a jeden z mých úkolů v této práci bylo právě napsat tuto část Akiko (tato část je detailněji popsána v kap. 5.6.1). Vstup dat přes tabulky je mnohem více do detailu popsán v mém výzkumném úkolu [25].

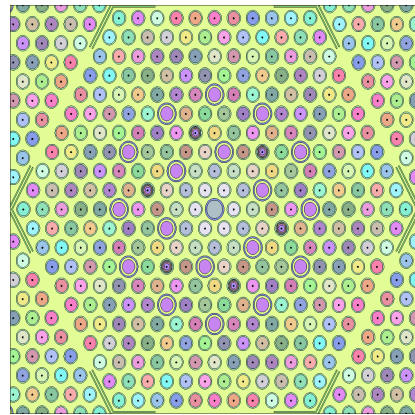
5.3 Příprava dat pro palivové soubory

Příprava homogenizovaných dat pro palivový soubor je provedena v kódu Serpent s využitím knihovny jaderných dat ENDF/B-VII.1. Po technické stránce byla příprava dat pro palivové soubory hotová již před započítím mé diplomové práce - text je zde uveden pro úplnost. Vstupy pro výpočetní kód jsou připravovány pomocí nástroje Quadriga3, který byl popsán v první kapitole a již obsahuje připravené šablony. V produkční verzi SW jsou data připravována pomocí kódu Helios, model v tomto kódu obsahuje jednu šestinu palivového souboru s opakující okrajovou podmínkou na hranicích, příklad geometrie pro palivový soubor a44E6 je na obrázku 5.1.

Model v kódu Serpent obsahuje 2D geometrii celého palivového souboru a ta je zobrazena na obrázku 5.2. Na hranicích je aplikována periodická okrajová podmínka, je tak vytvořena nekonečná mříž. Každý palivový proutek je vyplněn unikátním materiálem představujícím palivo, takže během vyhořívání je možné získat informaci o každém jednotlivém proutku zvlášť. Vybraná důležitá data o geometrii modelu, použitých teplotách v nominálním stavu HFP-REF jsou uvedena v následující tabulce 5.1 [14] [23].



Obrázek 5.1: Geometrie modelu PS a44E6 v kódu Helios



Obrázek 5.2: Geometrie modelu PS a44E6 v kódu Serpent

Tabulka 5.1: Tabulka vybraných dat pro model PS TVSA-T mod.1 v kódu Serpent pro stav HFP-REF

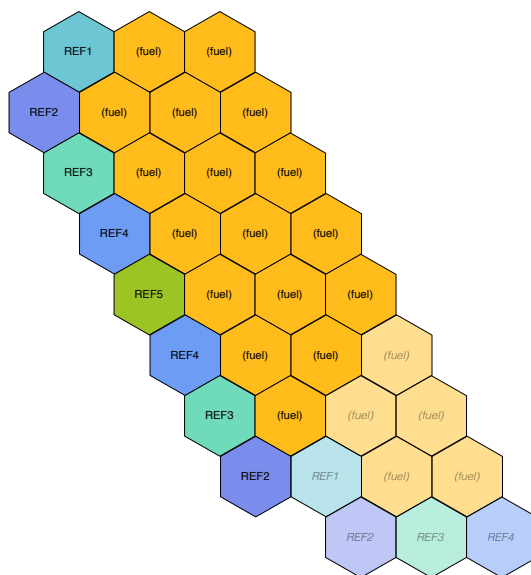
Název	Hodnota
Hustota výkonu	39,69 W/g
Počet neaktivních/aktivních cyklů	20/300
Počet historií	25 000
Teplota paliva	884.24 K
Teplota moderátoru	579.95 K
Hustota moderátoru	7,15E-01 g/cm ³
Koncentrace H ₃ BO ₃	2,8 g/kg
Xenon	rovnovážný
Vnější průměr pokrytí	9,1 mm
Vnitřní průměr pokrytí	7,73 mm
Rozteč palivových proutků	12,75 mm

5.4 Příprava dat pro radiální reflektory

Radiální reflektor v jaderném reaktoru slouží ke snížení hustoty toku neutronů na nádobu reaktoru, lepšímu vyrovnání výkonu v aktivní zóně, především má efekt na palivové soubory, které mu přímo přiléhají. Vzhledem k symetrii reaktoru VVER-1000 je možné všechny reflektory shrnout do pěti skupin se stejnými vlastnostmi (značeno R1 až R5) a namodelovat je pomocí pěti unikátních geometrií. Data pro radiální reflektory R1 až R5 se v produkční verzi knihovny připravují pomocí modelů pro kód Helios. Tyto modely jsou na obrázcích 5.4 až 5.8. Pozice reflektorů R1-R5 jsou naznačeny na obrázku 5.3, kde je vyznačena čtvrtá šestina AZ. Pro přípravu homogenizovaných dat radiálních reflektorů v kódu Serpent jsem zvolil způsob pomocí 2D celozónového výpočtu vsázky U1C9. Během tohoto výpočtu jsou připravena homogenizovaná data pro všechny pozice radiálních reflektorů okolo aktivní zóny a následně během zpracování jsou tato data zprůměrována - vždy příslušné reflektory mezi sebou a výstupem je soubor ve formátu JSON obsahující homogenizovaná data pro R1 až R5.

Samotný vstup pro kód Serpent je připraven pomocí programu SFullcore. Je-li takto připravený vstup umožňuje počítat pouze jeden stav a úprava tak komplexního modelu na zahrnutí všech požadovaných odskoků do jednoho výpočtu by byla velmi náročná, byl vytvořen skript, který připraví pro každý odskok samostatný vstupní soubor. Celkem je tedy připraveno deset (aktuální počet požadovaných odskoků bez -ROD1 a -ROD2) vstupních souborů pro výpočet.

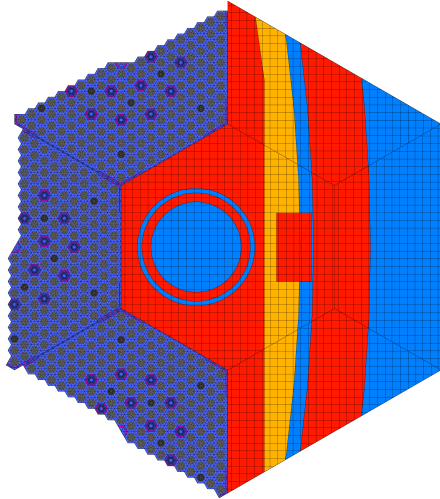
Po doběhnutí výpočtů následuje postprocessing dat. Zde jsou pomocí skriptu v jazyce Ruby načteny výstupy ze všech deseti výpočtů. K tomu je také načten soubor obsahující informace o odskocích (teploty, koncentrace kys. borité) a také číslování hran pro diskontinuity faktory radiálních reflektorů. Výstupem je JSON soubor obsahující všechny požadované informace a ten je pak možné načíst programem AKIKO a zahrnout tak radiální reflektory připravené kódem Serpent do knihovny.



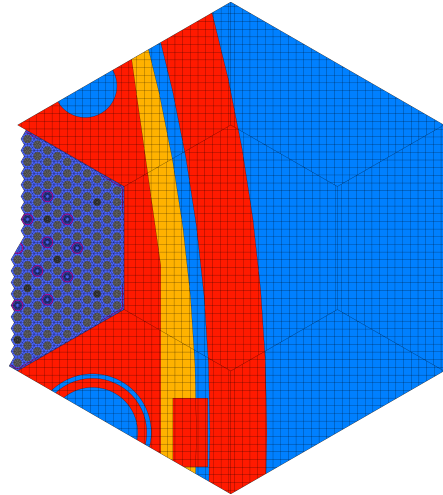
Obrázek 5.3: Číslování radiálních reflektorů v AZ

5.4.1 Discontinuity faktory

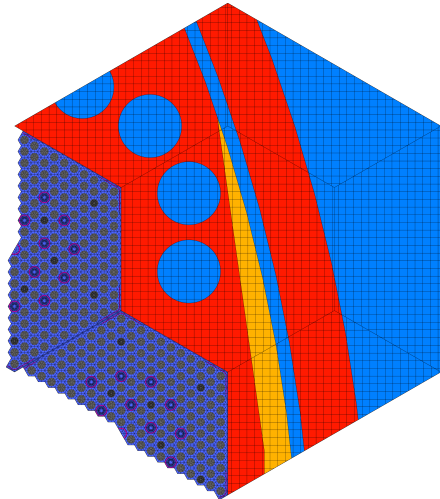
V předchozím odstavci byla zmínka o číslování hran pro diskontinuity faktory. Důležitým krokem, který probíhá během postprocessingu dat je zpracování diskontinuity faktorů. Kód Serpent je počítá pro každou hranu. Výstupem je tedy 12 hodnot (6 hran, 2 energetické grupy). Požadavek pro kód ANDREA je mít diskontinuity faktory pro celou počítanou geometrii (nód), tedy jednu hodnotu pro tepelnou grupu a jednu hodnotu pro rychlou grupu. V případě palivových souborů dochází k průměrování hodnot na hranách, protože se hodnoty mezi sebou moc neliší. Avšak v případě radiálních reflektorů se velmi významně liší hrany přiléhající k palivu oproti hranám vzdáleným od paliva. V tomto případě se berou pouze hrany přiléhající palivu a mezi nimi je udělán průměr, hodnoty na hranách nepřiléhajících k palivu nejsou uvažovány.



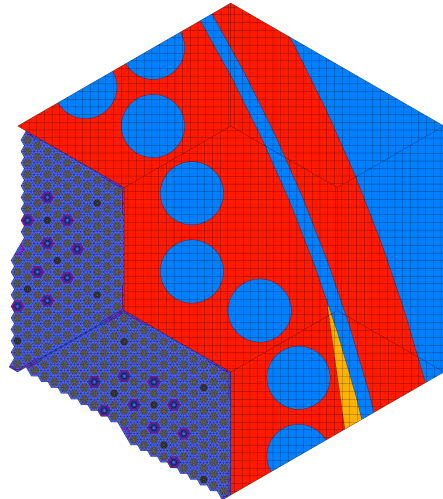
Obrázek 5.4: Geometrie modelu radiálního reflektoru 1 v kódu Helios



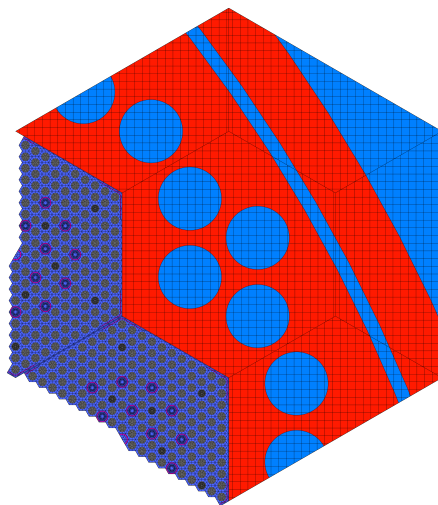
Obrázek 5.5: Geometrie modelu radiálního reflektoru 2 v kódu Helios



Obrázek 5.6: Geometrie modelu radiálního reflektoru 3 v kódu Helios



Obrázek 5.7: Geometrie modelu radiálního reflektoru 4 v kódu Helios

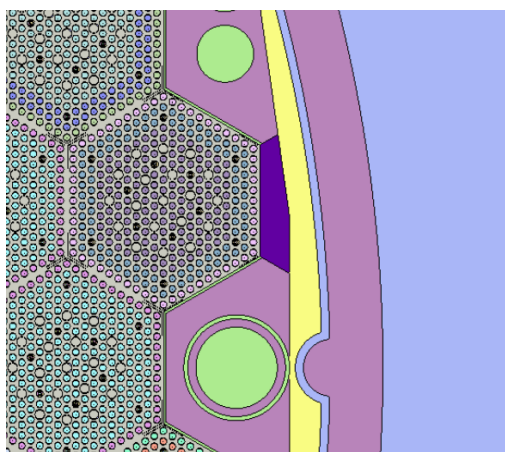


Obrázek 5.8: Geometrie modelu radiálního reflektoru 5 v kódu Helios

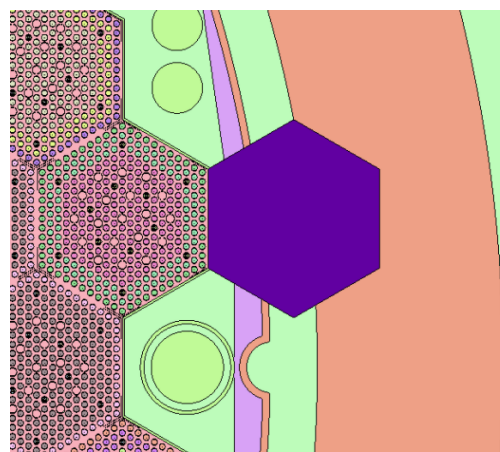
5.4.2 Úprava modelů reflektorů v SFullcore

Během vypracování práce jsem zjistil, že radiální reflektory způsobují velké odchylky při výpočtech s kódem ANDREA. Po zkoumání různých možností jsem došel k poznatku, že rozdíly byly způsobeny namodelováním reflektorů v programu SFullcore, který připravuje vstupy pro 2D celozónové výpočty. Odchylky tedy nebyly způsobeny chybnou homogenizací, ale způsobem namodelování radiálních reflektorů. Model reflektorů je vytvořen správně při pohledu na celou AZ, ale bohužel nejsou jednotlivé radiální reflektory rozlišeny do vlastních universů, ve kterých se generují data. Tento jev je vidět na následujícím příkladu reflektoru R2 v původním provedení na obrázku 5.9, kde dochází k největšímu rozdílu - označen fialovou barvou. Zde je vidět, že v modelu je vše, to tam má být, ale univers samotného reflektoru je velmi malý a značnou část neobsahuje.

Všechny radiální reflektory jsem rozlišil do svých vlastních universů a upravil jsem celý model reaktoru tak, aby se data opravdu počítala v celém rozlišeném universu. Po řádném otestování, zda výpočet doběhne a vygeneruje požadovaná data, jsem upravil samotný program SFullcore, aby tam byly zahrnuty moje rozlišené modely radiálních reflektorů. Nynější plocha, kde se počítají data pro R2, jako příklad, je znázorněna na 5.10 - označena fialovou barvou. Model se v pohledu na celou AZ nezměnil, je identický, je změněn způsob namodelování, aby radiální reflektory byly rozlišené. Všechny doposud počítané výpočty s tímto programem byly správně, pokud nešlo explicitně o přípravu homogenizovaných dat pro radiální reflektory.



Obrázek 5.9: Univers, ve kterém doposud byla počítána data pro reflektor R2



Obrázek 5.10: Univers, ve kterém jsou po úpravě počítána data pro reflektor R2

Vliv nového modelu

Pro srovnání vlivu nových radiálních reflektorů byly vybrány zóny U1C9 a U1C15 na začátku kampaně. Vybraný stav byl spočten pro původní model reflektorů a poté i pro nový. V následujících tabulce 5.2 jsou hodnoty pro vybrané veličiny a jejich relativní odchylky v % pro reflektor R2, kde došlo k největší úpravě v modelu. Jak je z této tabulky vidět, došlo opravdu k významným změnám, především u difuzních koeficientů pro tepelnou grupu (g1 značí rychlou, g2 tepelnou). Dále došlo k velkým změnám u makroskopických účinných průřezů. Naopak v tabulce 5.3 jsou relativní odchylky pro reflektor R5, který byl v původním modelu rozlišený téměř celý, změna v geometrii nebyla nijak zásadní. Zde je vidět, že došlo jen k velmi malé změně počítaných dat pro tento reflektor oproti původnímu modelu.

Tabulka 5.2: Tabulka dat pro radiální reflektor R2 pro U1C15 BOC

Název -	Původní model	Upravený model	relat. odchylka [%]
Dg1	1,03	1,03	0,019
Dg2	0,33	0,292	-13,082
$\Sigma_a g1$	0,004	0,004	-8,183
$\Sigma_a g2$	0,107	0,078	-37,43
$\Sigma_t g1$	0,581	0,634	8,272
$\Sigma_t g2$	1,135	1,585	28,388
$\Sigma_s g1 g1$	0,573	0,618	7,266
$\Sigma_s g1 g2$	0,004	0,012	64,053
$\Sigma_s g2 g1$	0,005	0,003	-79,242
$\Sigma_s g2 g2$	1,024	1,505	31,996

Tabulka 5.3: Tabulka dat pro radiální reflektor R5 pro U1C15 BOC

Název -	Původní model	Upravený model	relat. odchylka [%]
Dg1	1,079	1,077	-0,181
Dg2	0,289	0,289	0,022
$\Sigma_a g1$	0,004	0,004	0,14
$\Sigma_a g2$	0,077	0,077	-0,005
$\Sigma_t g1$	0,63	0,631	0,16
$\Sigma_t g2$	1,617	1,616	-0,014
$\Sigma_s g1 g1$	0,611	0,612	0,163
$\Sigma_s g1 g2$	0,015	0,015	0,368
$\Sigma_s g2 g1$	0,002	0,002	-1,281
$\Sigma_s g2 g2$	1,537	1,537	-0,022

Metodika ocenění vlivu rozlišených reflektorů

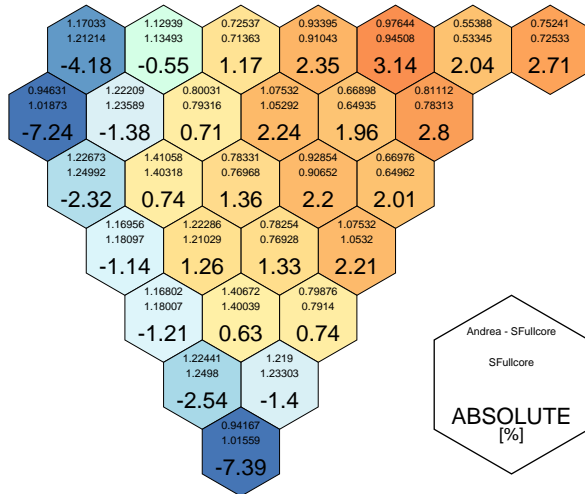
Pro ocenění vlivu nových modelů radiálních reflektorů byla použita rozložení aktivních zóny U1C9 a U1C15 na začátku kampaně (BOC). Pomocí 2D celozónového výpočtu byly získány referenční koeficienty násobení, relativní rozložení výkonu v AZ a homogenizovaná data. Pomocí těchto napočtených dat byl vytvořen datacase pro kód ANDREA a bylo vypočteno relativní rozložení výkonu a koeficient násobení. Následně došlo ke srovnání dat mezi sebou.

Výsledky

Výsledky srovnání FHA a rozdíl koeficientů násobení pro U1C9 s původním modelem radiálních reflektorů jsou na obrázku 5.11. Zde je vidět, že na periférii AZ jsou absolutní odchylky oproti referenčním výsledkům ve výkonech velmi vysoké, dosahující 8 %. Zrovna k těmto palivovým souborům, kde dochází k velkým extrémům, přiléhá reflektor značený jako R2, tedy ten, u kterého byla výše pozorovaná největší změna ve vypočtených homogenizovaných datech. Na obrázku 5.12 je vidět srovnání FHA a rozdíl koeficientů násobení pro U1C9 pro nový model radiálních reflektorů. Je zde patrné, že došlo k odstranění extrémních rozdílů ve výkonech na periférii AZ. Také došlo ke snížení odchylky v koeficientu násobení z 213 pcm na 85 pcm. V tomto případě nový model reflektorů vedl k významnému zlepšení při výpočtech FHA kódem ANDREA.

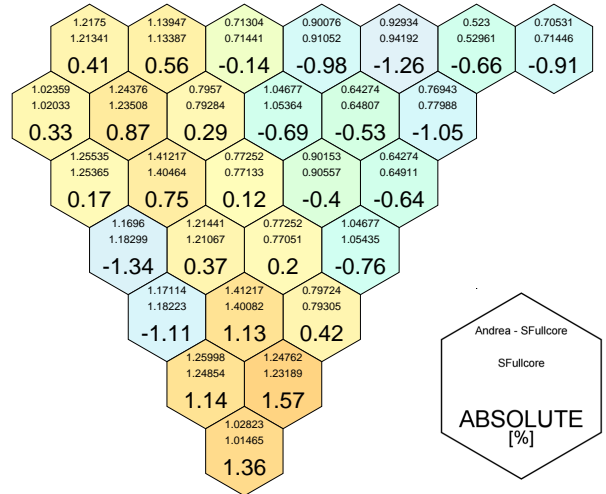
Výsledky srovnání FHA a rozdíl koeficientů násobení pro U1C15 s původním modelem radiálních reflektorů jsou na obrázku 5.13. Zde je možné pozorovat mnohem menší odchylky ve výkonech a to proto, že tato vsázka obsahuje na periférii již několik kampaní používané palivové soubory a tedy vliv reflektorů je mnohem menší než v případě U1C9, přesto je zde patrné, že na periférii dochází k odchylkám opět v PS blízko reflektoru R2. Na obrázku 5.14 je vidět srovnání FHA a rozdíl koeficientů násobení pro U1C9 pro nový model radiálních reflektorů. Zde je možné pozorovat zlepšení na periférii AZ a také zlepšení v rozdílu koeficientu násobení z 161 pcm na 145 pcm. V tomto případě také došlo ke zlepšení, ale ne tak výraznému, jako v případě U1C9.

Celkově tedy rozlišení vedlo ke zlepšení výpočtu homogenizovaných dat pro radiální reflektory.



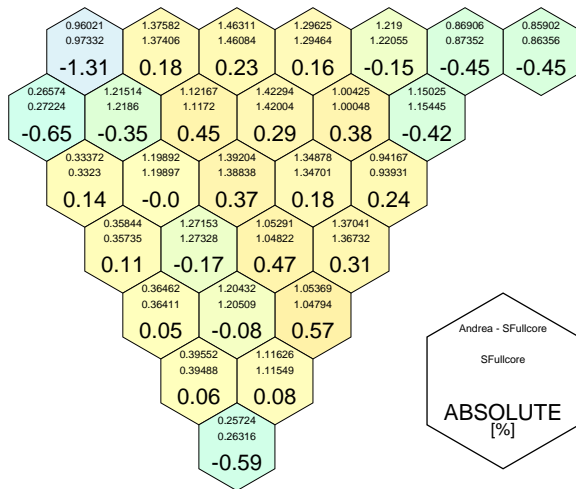
keff Serpent: 1.00405, keff Andrea: 1.00193
diff: 212.0 pcm

Obrázek 5.11: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s původním modelem radiálních reflektorů pro U1C9



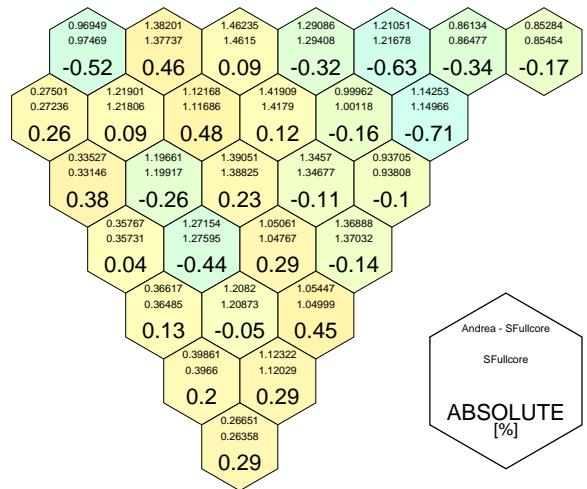
keff Serpent: 1.004, keff Andrea: 1.00315
diff: 85.0 pcm

Obrázek 5.12: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s upraveným modelem radiálních reflektorů pro U1C9



keff Serpent: 1.01521, keff Andrea: 1.0136
diff: 161.0 pcm

Obrázek 5.13: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s původním modelem radiálních reflektorů pro U1C15



keff Serpent: 1.01527, keff Andrea: 1.01382
diff: 145.0 pcm

Obrázek 5.14: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS s upraveným modelem radiálních reflektorů pro U1C15

5.4.3 Ocenění vlivu radiálních reflektorů na rozložení výkonu

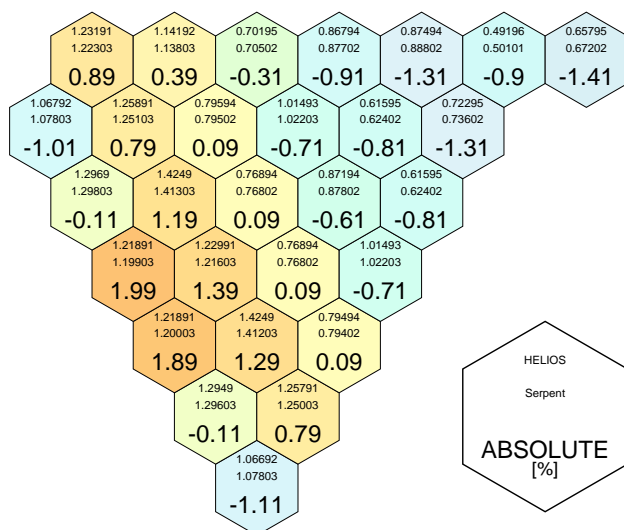
V následující části je uvedeno srovnání rozložení výkonu AZ s různými daty pro radiální reflektory. Cílem je určit, jakých odchylek dosahuje rozložení výkonu s reflektory z kódu Serpent oproti reflektorům z kódu Helios.

Metodika

Vliv dat pro radiální reflektory byl vyhodnocen pomocí přepočtů vsázek U2C9 a U2C12 pomocí kódu ANDREA. Vsázka U2C9 byla zvolena proto, že jde o čerstvou vsázku. U2C12 byla zvolena proto, že již obsahuje použité palivové soubory a zároveň je stále šestinově symetrická - tento požadavek na symetrii je jen kvůli zobrazení výsledků. Došlo ke srovnání rozložení výkonů mezi dvěma knihovnamí, kde byly vzaty shodné sady dat pro palivové soubory a ostatní prvky, pouze se během přípravy lišil zdroj dat pro radiální reflektory. V jednom případě byla použita data napočtená kódem Helios a v druhém případě byla použita data napočtená kódem Serpent. Následně byla přepočtena provozní historie U2C9 až U2C14 pomocí těchto dvou knihoven a z výsledků kódu ANDREA získáno radiální rozložení výkonu. To bylo zpracováno v podobě absolutních odchylek výkonů pro stavy na začátku kampaně (BOC) a na konci kampaně (EOC).

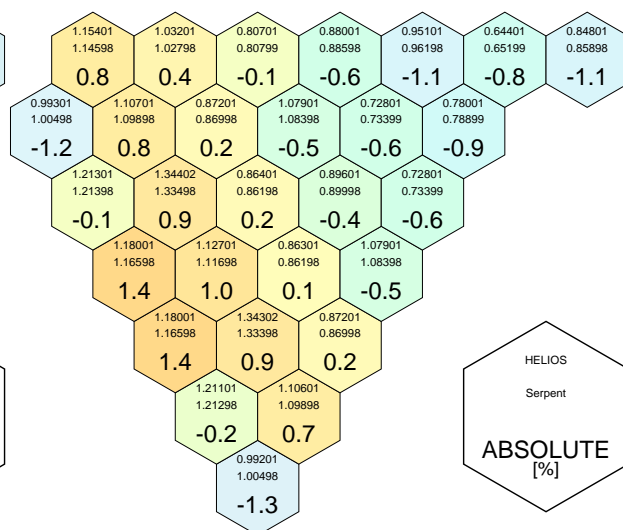
Vyhodnocení

Na obrázcích 5.15 a 5.16 jsou absolutní odchylky pro začátek a konec kampaně U2C9. Dochází zde v obou případech k absolutním odchylkám až 2 % a to především na periferii AZ. V případě vsázky U2C12 je na obrázcích 5.17 a 5.18 patrné zvýšení výkonů periferních palivových souborů při použití reflektorů z kódu Serpent o maximálně 1,31 %. Reflektory mají vliv především na rozložení výkonu v čerstvé vsázce a s rostoucím vyhořením PS v AZ se jejich vliv snižuje, což je ostatně vidět na zobrazených výsledcích. Celkově tedy reflektory připravené kódem Serpent způsobují odchylky v rozložení výkonu, ale ty jsou v řádu jednotek procent a je tedy možné takto připravená data pro radiální reflektory použít.



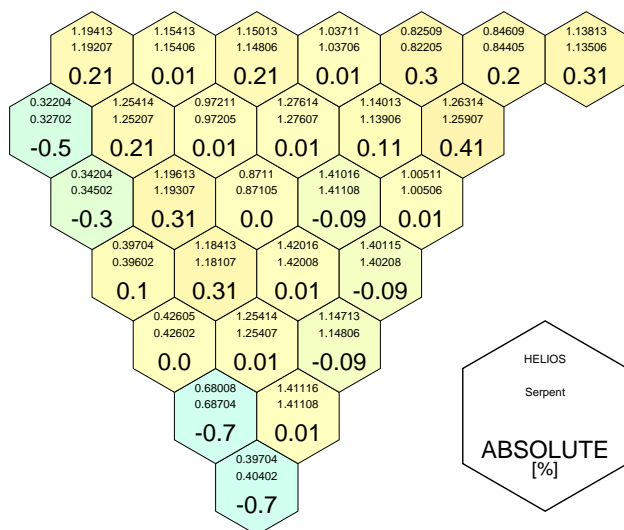
FHA: Helios - Serpent

Obrázek 5.15: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C9 BOC



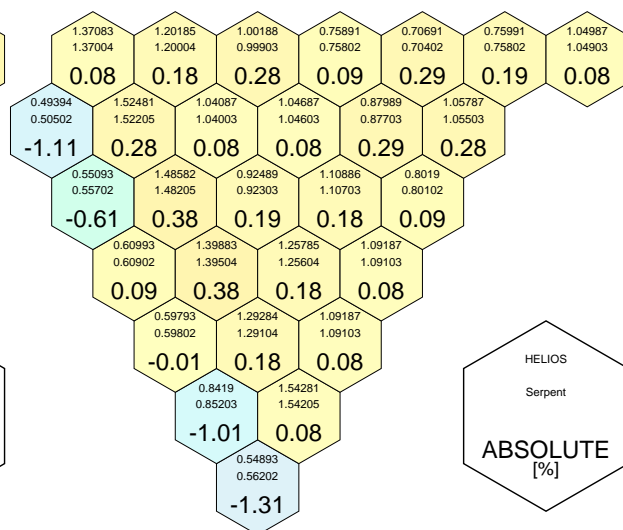
FHA: Helios - Serpent

Obrázek 5.16: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C9 EOC



FHA: Helios - Serpent

Obrázek 5.17: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C12 BOC

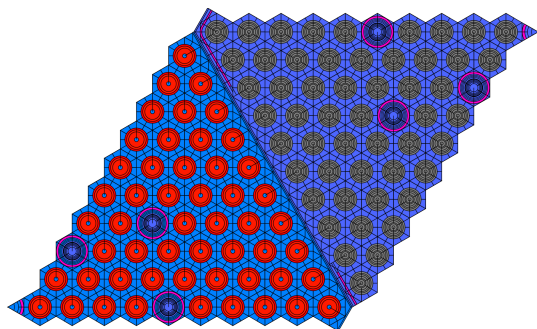


FHA: Helios - Serpent

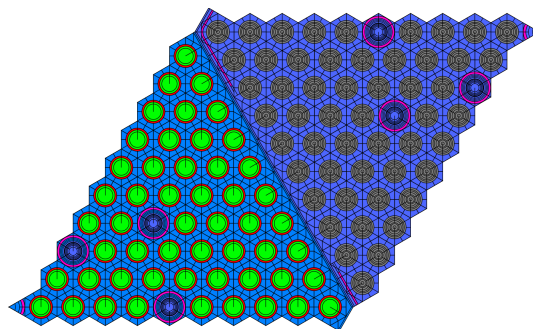
Obrázek 5.18: Rozdíly v relativním rozložení výkonu v PS pro U2C12 EOC

5.5 Příprava dat pro axiální reflektory

Homogenizovaná data pro axiální reflektory (horní a dolní) se v produkční verzi SW připravují pomocí 2D modelu v kódu Helios. Jde o přípravu dat pro ne-palivovou část aktivní zóny, je tedy nutné pro výpočet mít v modelu pro přípravu dat nějaký štěpný materiál přiléhající namodelovanému reflektoru, jinak není možné využít transportní výpočetní kódy. Současný model využívá jedné šestiny palivového souboru v kódu Helios, které přiléhá šestina představující reflektor. Toto uspořádání je na obrázku 5.19 pro dolní axiální reflektor a na obrázku 5.20 pro horní axiální reflektor. Samotný reflektor v palivovém souboru představuje 15 cm vysokou část, která v případě dolního reflektoru je pod dolním axiálním blanketem a zahrnuje zde umístěné konstrukční části. V případě horního axiálního reflektoru jde o 15 cm nad horním axiálním blanketem, která zahrnuje především palivové proutky obsahující pružiny.



Obrázek 5.19: Geometrie modelu dolního axiálního reflektoru v kódu Helios

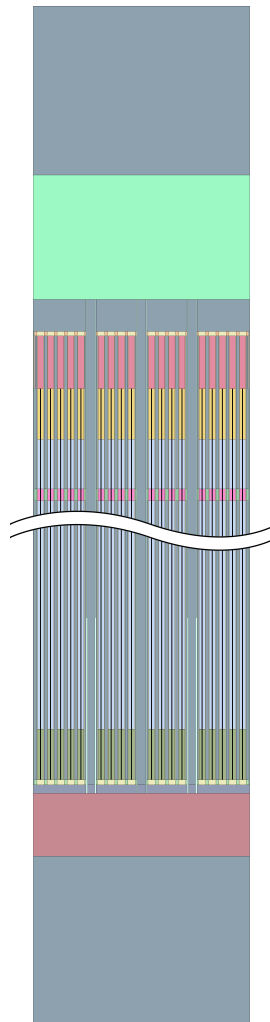


Obrázek 5.20: Geometrie modelu horního axiálního reflektoru v kódu Helios

Pro samotnou přípravu dat v kódu Serpent byla využita jeho schopnost počítat i s 3D geometrií. Byla využita knihovna jaderných dat ENDFB/VII.I a výpočet probíhal v nekonečné mříži v radiálním směru a s černou okrajovou podmínkou v axiálním směru pro stavy HFP a HZP. Počet neaktivních cyklů byl nastaven na 200, počet aktivních cyklů na 400 a počet neutronů na 100 000. Následně jsou připravená data zpracována do struktury JSON pomocí skriptu v jazyce Ruby, který byl napsán za tímto účelem. Vytvořený JSON obsahuje všechny požadované parametry pro Akiko a díky tomu mohou být axiální reflektory přidány do knihovny. V tomto případě byly ručně nastaveny discontinuity faktory na hodnotu 1 pro obě grupy. Kód ANDREA tuto hodnotu vyžaduje a není nyní jasné jak metodicky počítat tyto hodnoty v 3D modelu v axiálním reflektoru. S ohledem na přítomnost axiálních blanketů nebude mít hodnota zásadní vliv na výsledky výpočtu.

5.5.1 Model palivového souboru v kódu Serpent

Pro přípravu dat pro axiální reflektory pomocí kódu Serpent byla zvolena 3D geometrie, ve které jsem značně upravil již existující model palivového souboru a40E6. Byly zde provedeny úpravy, aby model umožňoval přípravu dat pro axiální reflektory, bylo třeba v těchto oblastech předělat již vytvořené buňky a universy. Dále bylo provedeno rozlišení teplot moderátoru v oblasti axiálních reflektorů, kdy moderátor v dolním reflektoru má teplotu 286 °C a v horním reflektoru 321 °C. Tyto teploty odpovídají teplotám použitým v modelu pro kód Helios. Model má také namodelovány po výšce i distanční mřížky, moderátor má v části s palivem střední teplotu 305 °C. Také do modelu byly přidány odskoky, které jsou popsány v sekci 5.6.3. Geometrie modelu je ve zkrácené podobě na obrázku 5.21.



Obrázek 5.21: Geometrie modelu PS v kódu Serpent

5.5.2 Vliv na axiální rozložení výkonu

Metodika

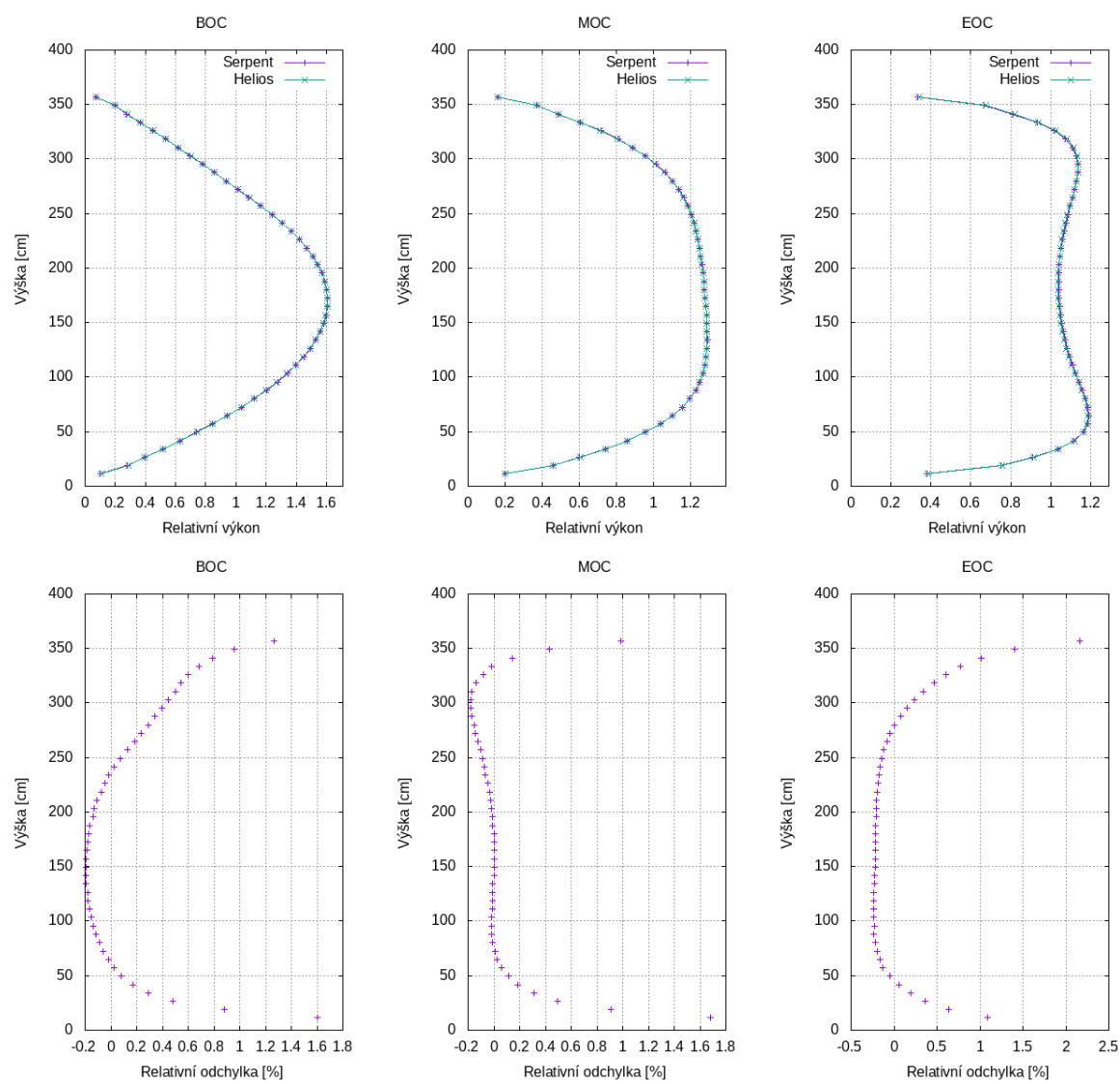
Důležitým srovnáním je ocenění vlivu na axiální rozložení výkonu v aktivní zóně. To bylo provedeno výpočtem kódem ANDREA pro vsázky U2C9 a U2C14 vždy na začátku kampaně (BOC), uprostřed kampaně (MOC) a na konci kampaně (EOC). Knihovna pro kód ANDREA byla připravena tak, že byly vzaty shodné sady dat pro palivové soubory a ostatní prvky, pouze se během přípravy lišil zdroj dat pro axiální reflektory. V jednom případě byla použita data napočtena kódem Helios a v druhém případě byla použita data napočtena kódem Serpent pomocí výše popsaného modelu palivového souboru. Následně byla přepočtena provozní historie U2C9 až U2C14 pomocí těchto dvou knihoven a z výsledků kódu ANDREA získáno axiální rozložení výkonu pro celou AZ.

Vyhodnocení

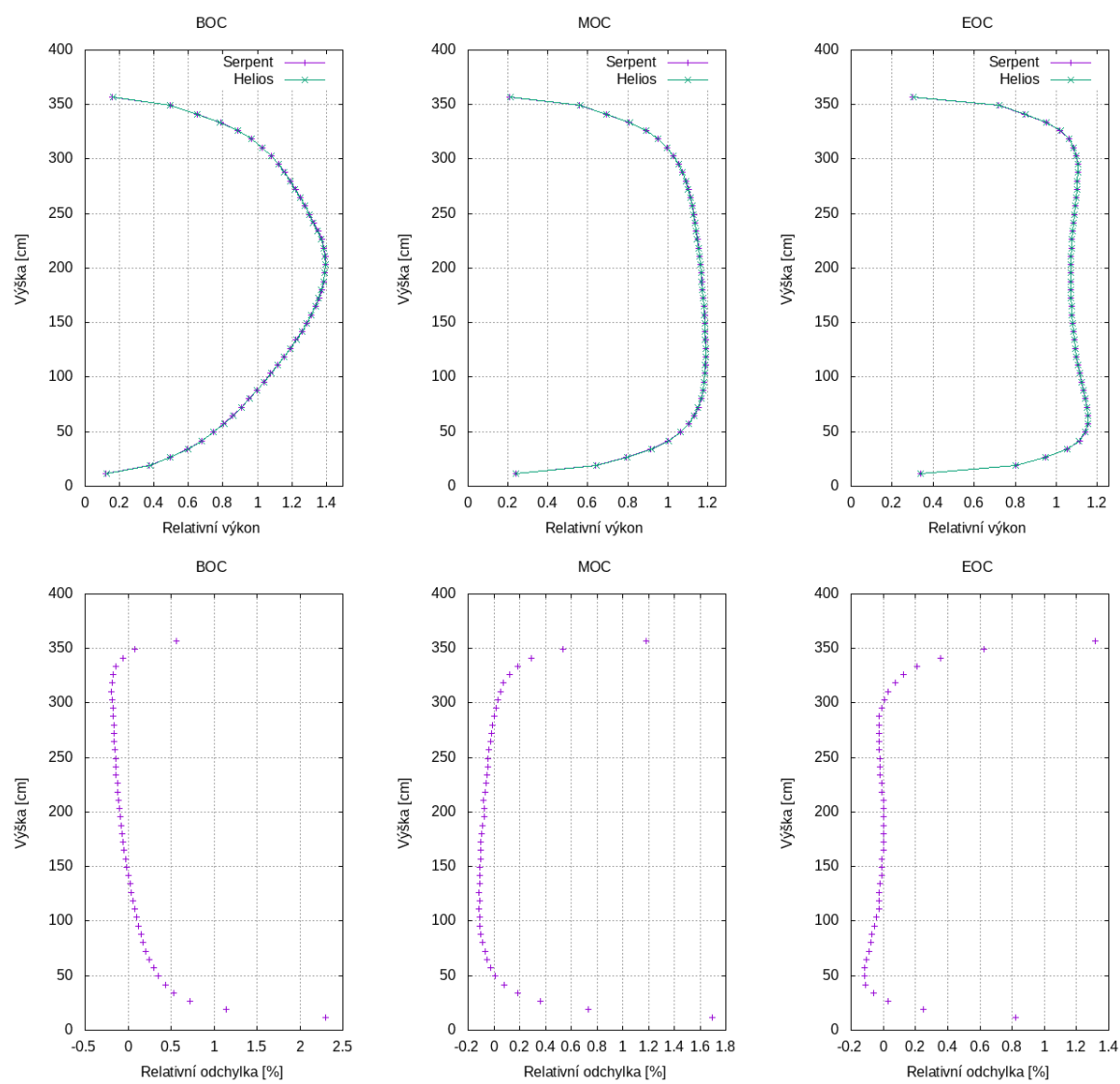
Na následujícím obrázku 5.22 je vidět axiální rozložení výkonu pro kampaň U2C9 ve stavu BOC, MOC a EOC a relativní odchylky mezi axiálním rozložením výkonu z výpočtu s reflektory ze Serpentu proti výpočtu s reflektory z kódu Helios pro tytéž stavy. Dále na obrázku 5.23 je vidět to samé srovnání pro kampaň U2C14. Relativní odchylka byla počítána jako:

$$\left(1 - \frac{\text{Serpent}}{\text{Helios}}\right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

Z uvedeného srovnání, především z relativních odchylek, je patrné, že trend odchylek je shodný pro obě vsázky. Následující komentář je vztažen k datům připravených kódem Serpent. Pro stav BOC - začátek kampaně dochází v dolní části zóny k podhodnocení výkonu o maximálně 2,5 %, totéž platí i o oblasti horní části AZ, kde dochází k podhodnocení výkonu o maximálně 2 %. Pro stav uprostřed kampaně - MOC dosahují odchylky maxima 1,8 % a v dolní i horní části AZ dochází k podhodnocení výkonu. Na konci kampaně - EOC se odchylky pohybují v maximu 1,1 % a opět v dolní i horní části AZ dochází k podhodnocení výkonu. Celkově tedy reflektory připravené v kódu Serpent způsobují podhodnocení výkonu v okrajových částech v axiálním směru oproti reflektorům připraveným v kódu Helios.



Obrázek 5.22: Axiální rozložení relativního výkonu pro U2C9 pro modely v kódu Helios a Serpent a relativní odchylky mezi modely



Obrázek 5.23: Axiální rozložení relativního výkonu pro U2C14 pro modely v kódu Helios a Serpent a relativní odchylky mezi modely

5.6 Příprava knihovny

Knihovna pro kód ANDREA je sestavována pomocí programu Akiko. S ním jsem pracoval již ve svém výzkumném úkolu, kdy jsem se věnoval přípravě dat pro axiální blankety. Sestavení knihoven probíhalo přes tabulkový vstup - to je jistý formát textových souborů, který obsahuje všechna potřebná data. Pro použití tohoto typu vstupu je potřeba provést preprocessing dat. To je v praxi velmi nepohodlná varianta a bylo tedy mým úkolem rozšířit Akiko o možnost přímého načítání dat z výstupních souborů z kódu Serpent.

5.6.1 Úprava Akiko

O načítání dat se v rámci kódu Akiko stará třída "data_source". Každý typ vstupních dat (Helios, Scale, JSON, tabulky) tvoří v programu samostatnou třídu a ta dědí vlastnosti z třídy "data_source". V každé této třídě je obsažena metoda "get", jejíž důležitými parametry jsou: stav, vyhoření a požadovaná veličina. Tato metoda má za úkol načíst a vrátit požadovanou veličinu, kterou pak Akiko zpracuje a zapíše do knihovny.

Důležitým úkolem bylo napsat celou novou třídu "Serpent_source", která obsahuje metodu "get" a umožňuje napřímo zpracovávat výstupní data z kódu Serpent. Ta jsou vypočtena pomocí vstupů připravenými programem Quadriga3 - nová třída je na něj plně navázána. To znamená, že přímé načítání neumožňuje načítat jinak připravené výpočty, k tomu je právě určen tabulkový vstup, protože je třeba mít shodné názvy detektorů.

Kód byl tvořen od nuly a jeho tvorba a testování zabralo značný čas. Třída je nyní plně funkční, obsahuje důležitou metodu "get" a metody pinwise a pinconf a umožňuje zpracovávat data pro VVER-1000, pro VVER-440 je toho teoreticky také schopná, ale to nebylo testováno. Během inicializace se načte do paměti *_res.m soubor, který obsahuje všechny výstupní parametry spočtené kódem Serpent. Také se načtou do paměti postupně výstupní soubory detektorů a také _dep.m soubor s izotopickým složením. Jelikož je potřeba i tak provést jistou míru preprocessingu dat předtím, než si o ně program požádá, bylo vytvořeno několik pomocných funkcí, které zpracovávají načtená data. Jde například o výpočet plochy moderátoru v geometrii a následné přenásobení příslušných veličin touto hodnotou.

V první funkční verzi přímé načítání umožňovalo zpracovávat data pouze pro VVER-1000 a bez poproutkových výkonů. Po ověření správnosti funkčnosti metody "get" byly připsány metody pinwise a pinconf a bylo provedeno zobecnění i pro VVER-440. Následovala optimalizace kódu z hlediska jeho přehlednosti, rychlosti a paměťové náročnosti. Taktéž po celou dobu průběžné probíhaly testy změn a jejich vliv na vygenerovanou knihovnu. Po otestování knihoven v závěru kapitoly se tato nová třída zařadí do hlavní vývojové větve kódu ANDREA a stane se jeho součástí.

Na závěr bylo přímé načítání dat otestováno a byla srovnána vytvořená knihovna s knihovnou připravenou pomocí tabulkového vstupu. Byla použita identická vstupní data cílem bylo prokázat, že vytvořené knihovny jsou identické. Ověření proběhlo pomocí nástroje "libcomp", který umožňuje vykreslovat průběhy libovolné zvolené veličiny v závislosti na kroku vyhoření pro zvolený palivový soubor ve vybraném stavu, který zahrnutý v knihovně. Otestování ukázalo, že nedochází k odchylkám v datech a knihovny jsou identické.

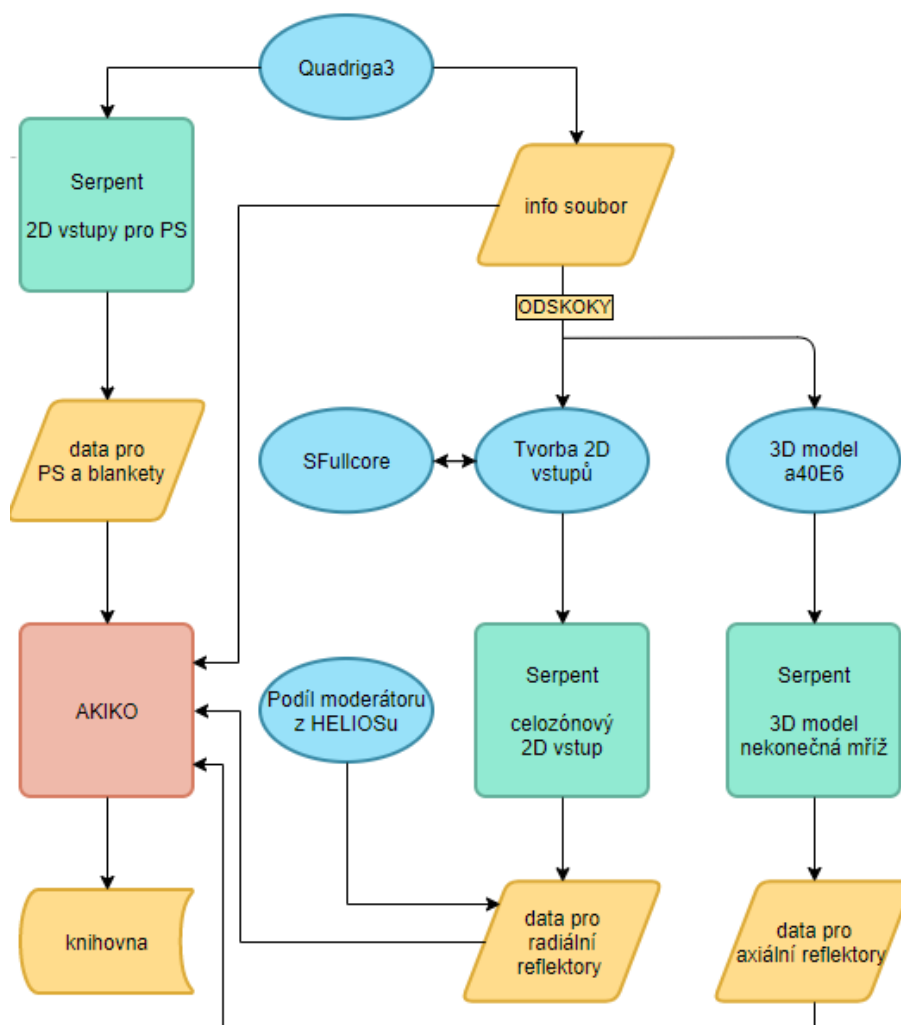
5.6.2 Metodika sestavení knihovny

Samotné sestavení kompletní knihovny s daty připravenými pouze kódem Serpent probíhá způsobem popsáním v následujícím flowchartu na obrázku 5.24.

Nejprve jsou pomocí nástroje Quadriga3 připraveny vstupy pro výpočet palivových souborů a axiálních blanketů (levá větev flowchartu). Ke každému vstupu je také vytvořen infosoubor obsahující informace o geometrii, odskocích, krocích vyhoření, teplotách v odskocích a další důležitá potřebná data. Pomocí těchto vstupů jsou připravena homogenizovaná data pro Akiko.

Druhým krokem je příprava dat pro radiální reflektory - střední větev flowchartu. O přípravu dat se stará samostatný skript, který si načte informace o odskocích z již připraveného infosouboru. Pomocí těchto odskoků poté připraví vstup pro 2D výpočet. Zde platí, že pro jeden odskok se používá jeden samostatný 2D výpočet. Po doběhnutí těchto výpočtů je k datům přidán podíl moderátoru v geometrii reflektoru převzatý z kódu Helios. Vzhledem k velké složitosti 2D modelu AZ není nyní možné získat podíl moderátoru přímo z kódu Serpent. Data jsou následně zpracována do podoby JSONu, který obsahuje všechny požadované informace. Posledním krokem je příprava dat pro axiální reflektory - pravá větev flowchartu. Z infosouboru jsou přebrány odskoky a ty jsou zpracovány do 3D modelu palivového

souboru a40E6. Výpočet se provádí v nekonečné mříži a data se počítají pro jedno konkrétní vyhoření 4 MWd/kg. V modelu jsou zahrnuty odskoky pomocí branche a data jsou připravována pro horní i dolní axiální reflektor zároveň. Po doběhnutí výpočtu jsou zpracována do formátu JSON. Po přípravě všech předchozích kroků stačí spustit program Akiko, který načte připravená data pro palivové soubory, blankety, JSON s reflektory a příslušné infosoubory a připraví celou knihovnu pro program ANDREA.



Obrázek 5.24: Flowchart sestavení knihovny pro kód ANDREA

5.6.3 Použité vyhoření a odskoky

Data pro palivové palivové soubory obsažené v mé knihovně byla připravována v celkem 30 krocích vyhoření mezi 0 až 64 MWd/kgU. Kroky jsou ze začátku kratší a poté se prodlužují. Odskokové stavy z referenčního stavu se používají pro parametrizaci dat. V mém případě bylo využito 12 stavů (základní referenční stav a 11 odskoků). Parametry pro referenční stav jsou:

$T_{\text{FUEL}} = 610 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{MOD}} = 305 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{MOD}} = 0,714$, $^{10}\text{B} = 2,8 \text{ g/kg}$, $P = 39,69 \text{ W/g}$.

Stejné vyhoření a stavy jsou používány i v případě přípravy knihoven kódem Helios, takže budou porovnatelné i v tomto pohledu. Odskokové stavy jsou následující:

REF - Referenční stav na středních parametrech během provozu.

POW05 - Odskok na poloviční výkon.

POW2 - Odskok na dvojnásobný výkon.

POW0 - Odskok na nulový výkon.

ROD0 - Odskok na zasunutou regulační tyč z Dy_2TiO_5 .

ROD1 - Odskok na zasunutou regulační tyč z B_4C .

MODM - Odskok na zvýšení hustoty moderátoru.

MODP - Odskok na snížení hustoty moderátoru.

MODTM - Odskok na snížení teploty moderátoru.

MODTP - Odskok na zvýšení teploty moderátoru.

B100 - Odskok na snížení koncentrace kyseliny borité.

B800 - Odskok na zvýšení koncentrace kyseliny borité.

5.7 Validace knihoven: srovnání s provozní historií

V rámci práce jsem provedl i částečnou validaci knihovny srovnáním predikcí kódu ANDREA s provozními daty. Toto srovnání je provedeno s využitím nástroje Adriena, který slouží pro porovnání proti provozním datům pro jednu či více knihoven. To bylo provedeno pro kampaně U2C9 až U2C14 a výstup byl dále zpracován do jednotlivých grafů a tabulek níže. Do srovnání byla také zahrnuta knihovna v7.0 připravená kódem Helios, která se nyní používá k výpočtům na Jaderné elektrárně Temelín. Detailní srovnání knihovny pro všechny výše uvedené kampaně je velmi obsáhlé. Z tohoto důvodu uvádím pouze souhrnná data a detailnější informace pro dvě reprezentativní kampaně - U2C9 a U2C13. Hlavními sledovanými veličinami v těchto kampaních byla kritická koncentrace H_3BO_3 , hodnota axiálního offsetu, axiální rozložení výkonu a radiální rozložení výkonu.

V tabulce 5.4 jsou metriky pro srovnání všech kampaní U2C9 až U2C14. První metrikou je odchylka koncentrace H_3BO_3 od provozních dat - dBC. Nejprve je uvedena pro stav BOC - tedy pro začátky kampaní. *Max* značí maximální odchylku, *avg* průměrnou odchylku. To samé je uvedeno pro stavy EOC a následně odchylka s percentilem 95 % pro celý průběh všech uvažovaných kampaní. Odchylky koncentrace od provozních dat jsou detailněji pro srovnávané kampaně v tabulce 5.7 a na obrázcích 5.25 a 5.26. Menší vzdálenost od nuly znamená lepší shodu s provozními daty, záporná hodnota značí podhodnocení výpočtu oproti provozní datům, kladná nadhodnocení. Dále jsou v tabulce 5.4 odchylky axiálního offsetu, radiálního a axiálního rozložení výkonu pro různé percentily. V tabulce 5.5 jsou uvedeny střední kvadratické odchylky všech rozdílů axiálního rozložení výkonů pro jednotlivé kampaně a v tabulce 5.6 jsou uvedeny střední kvadratické odchylky radiálního rozložení výkonu (FHA).

Tabulka 5.4: Globální metriky pro kampaně U2C9 až U2C14

Metrika		Serpent	Helios
dBC _{BOC} ^{HFP} [g/kg]	max	0,13	0,19
	avg	0,07	0,11
dBC _{EOC} ^{HFP} [g/kg]	max	-0,15	-0,14
	avg	0,11	0,09
dBC [g/kg]	(95%)	0,34	0,33
dAO [%]	(90%)	1,0	0,8
dFHA [%]	(A/95%)	2,8	2,4
dFHA [%]	(2,5%)	-2,5	-2,2
	RMS	1,46	1,23
dAXP [%]	(99%)	8,23	8,22
	RMS	2,59	2,53

Tabulka 5.5: Odchytky axiálního rozložení výkonu (RMS všech absolutních odchylek $C - M$ relativních výkonů po výšce) pro kampaně U2C9 až U2C14

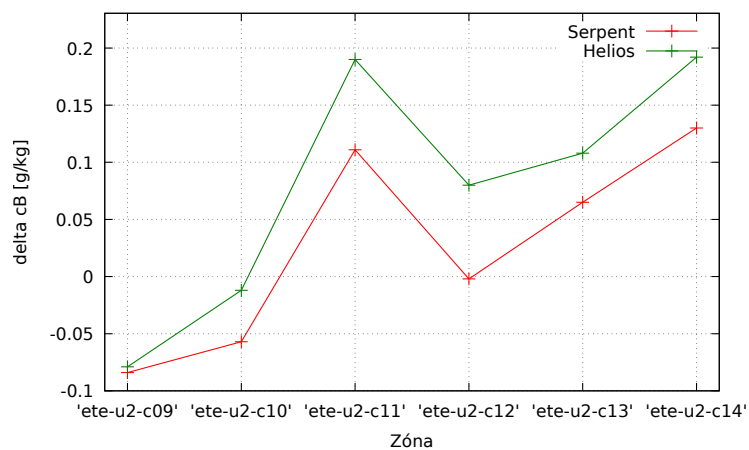
dAXP	Serpent	Helios
U2C09	2,61	2,51
U2C10	2,42	2,38
U2C11	2,40	2,32
U2C12	2,55	2,50
U2C13	2,71	2,64
U2C14	3,03	3,03

Tabulka 5.6: Odchytky radiálního rozložení výkonu (RMS všech absolutních odchylek $C - M$ relativních výkonů) pro kampaně U2C9 až U2C14

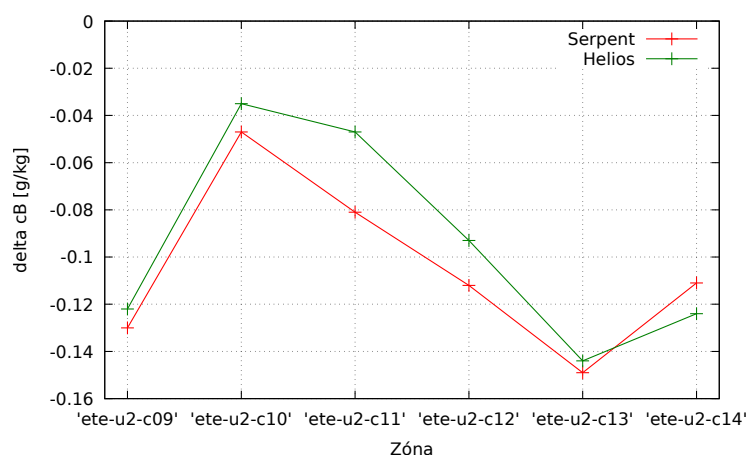
dFHA	Serpent	Helios
U2C09	1,87	1,56
U2C10	1,52	1,30
U2C11	1,45	1,10
U2C12	1,07	0,96
U2C13	1,26	1,14
U2C14	1,52	1,30

Tabulka 5.7: Rozdíl H_3BO_3 (absolutní odchylky $C - M$ v g/kg) pro kampaně U2C9 až U2C14

	dBC (HFP,BOC)		dBC (HFP,EOC)	
	Serpent	Helios	Serpent	Helios
U2C09	-0,08	-0,08	-0,13	-0,12
U2C10	-0,06	-0,01	-0,05	-0,04
U2C11	0,11	0,19	-0,08	-0,05
U2C12	-0,00	0,08	-0,11	-0,09
U2C13	0,06	0,11	-0,15	-0,14
U2C14	0,13	0,19	-0,11	-0,12



Obrázek 5.25: Maximální rozdíl vypočtené koncentrace H_3BO_3 v BOC

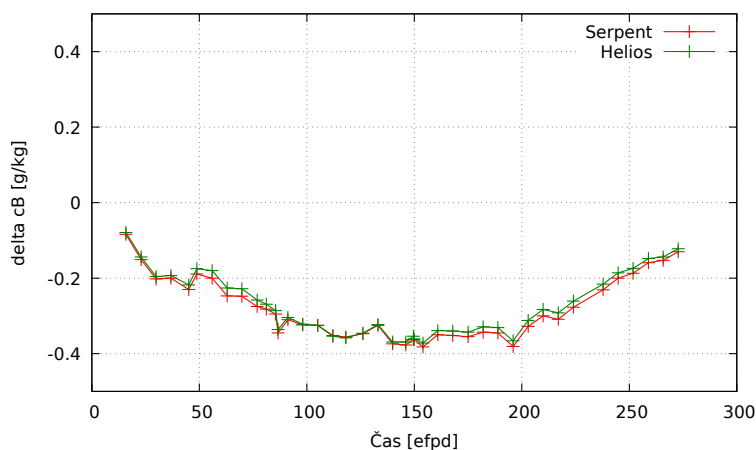


Obrázek 5.26: Maximální rozdíl vypočtené koncentrace H_3BO_3 v EOC

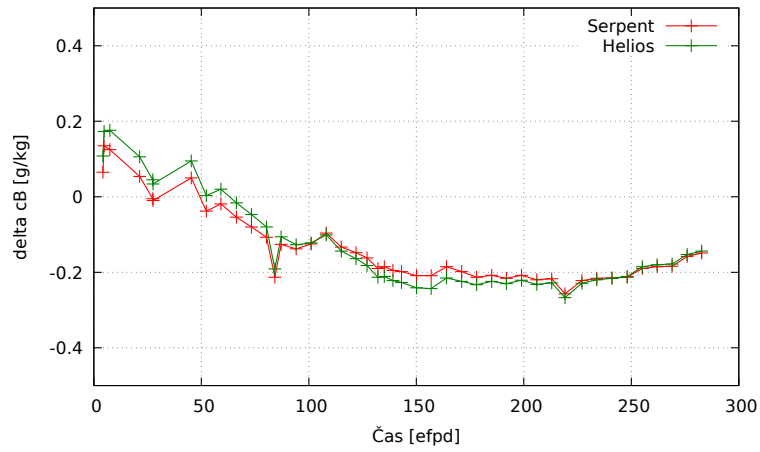
5.7.1 Odchylna koncentrace kys. borité a axiálního offsetu

Důležitým parametrem pro porovnání jsou výpočty kritické koncentrace kyseliny borité během kampaně a hodnoty axiálního offsetu. Obě vypočtené veličiny byly srovnány proti provozním datům pro kampaně U2C9 a U2C13. Koncentrace kyseliny borité je na obrázcích 5.27 a 5.28. Z těchto obrázků je vidět, že knihovna připravená kódem Serpent dosahuje odchylek v řádu maximálně 0,4 g/kg a v obou případech dosahuje obdobných či lepších výsledků, než knihovna připravená kódem Helios.

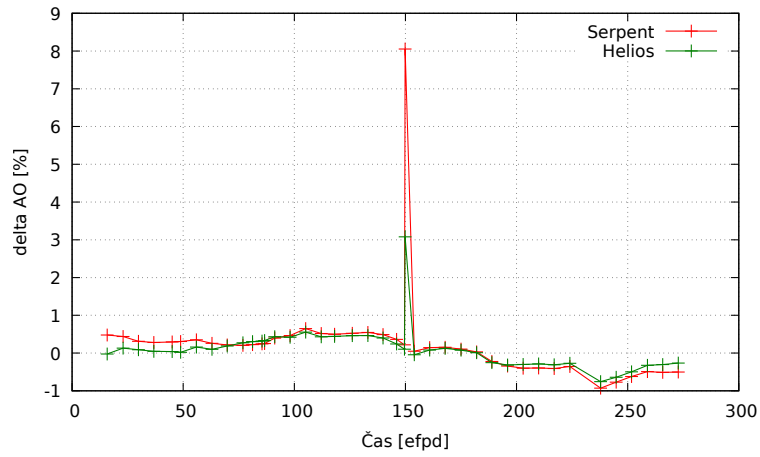
Absolutní odchylky hodnoty axiálního offsetu v % jsou na obrázcích 5.29 a 5.30. V případě U2C9 dosahují odchylky maximálně 1 % až na jeden extrém okolo cca 150 efpd, kdy došlo ke krátkodobému snížení výkonu reaktoru. V případě kampaně U2C13 nabývají odchylky většího rozptylu s maximem 1,5 %. Zde není možné jasně říci, která knihovna je přesnější, ale je možné konstatovat, že knihovna připravená kódem Serpent dává v případě axiálního offsetu smysluplné výsledky.



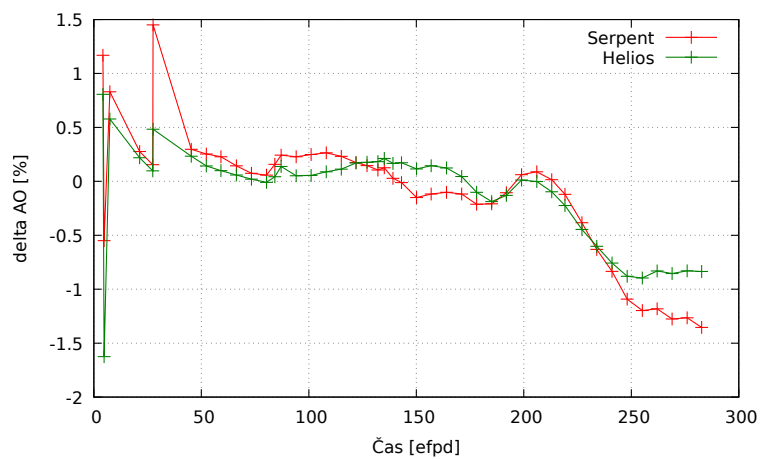
Obrázek 5.27: Odchylna vypočtené koncentrace H_3BO_3 od provozních dat pro kampaně U2C9



Obrázek 5.28: Odchylna vypočtené koncentrace H_3BO_3 od provozních dat pro kampaň U2C13



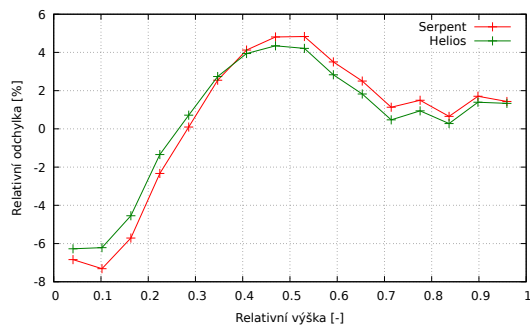
Obrázek 5.29: Odchylna vypočteného axiálního offsetu od provozních dat pro kampaň U2C9



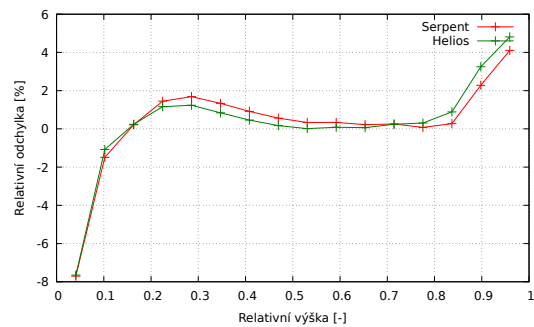
Obrázek 5.30: Odchylna vypočteného axiálního offsetu od provozních dat pro kampaň U2C13

5.7.2 Odchytky v axiálním rozložení výkonu

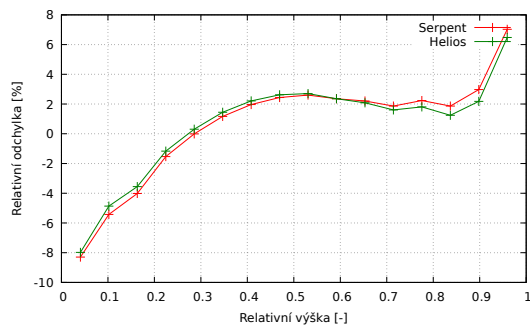
Dále byly sledované relativní odchytky v axiálním rozložení výkonu v celé AZ. Ty jsou zobrazeny pro kampaně U2C9 a U2C13 ve stavech BOC a EOC na obrázcích 5.31, 5.32, 5.33 a 5.34. Rozdíl mezi knihovnou připravenou kódem Serpent od provozních dat téměř kopíruje rozdíl mezi knihovnou připravenou kódem Helios od provozních dat. Knihovna ze Serpentu z tohoto srovnání vychází o něco hůř než knihovna z Heliosu, ale trend průběhů odchylek je shodný a velikosti odchylek se od sebe výrazně neliší.



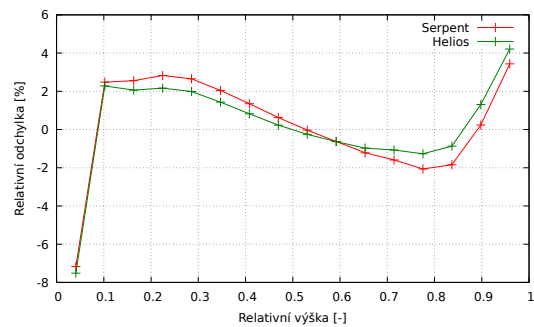
Obrázek 5.31: Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C9 BOC



Obrázek 5.32: Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C9 EOC



Obrázek 5.33: Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C13 BOC



Obrázek 5.34: Rozdíly v axiálním rozložení výkonu v AZ pro U2C13 EOC

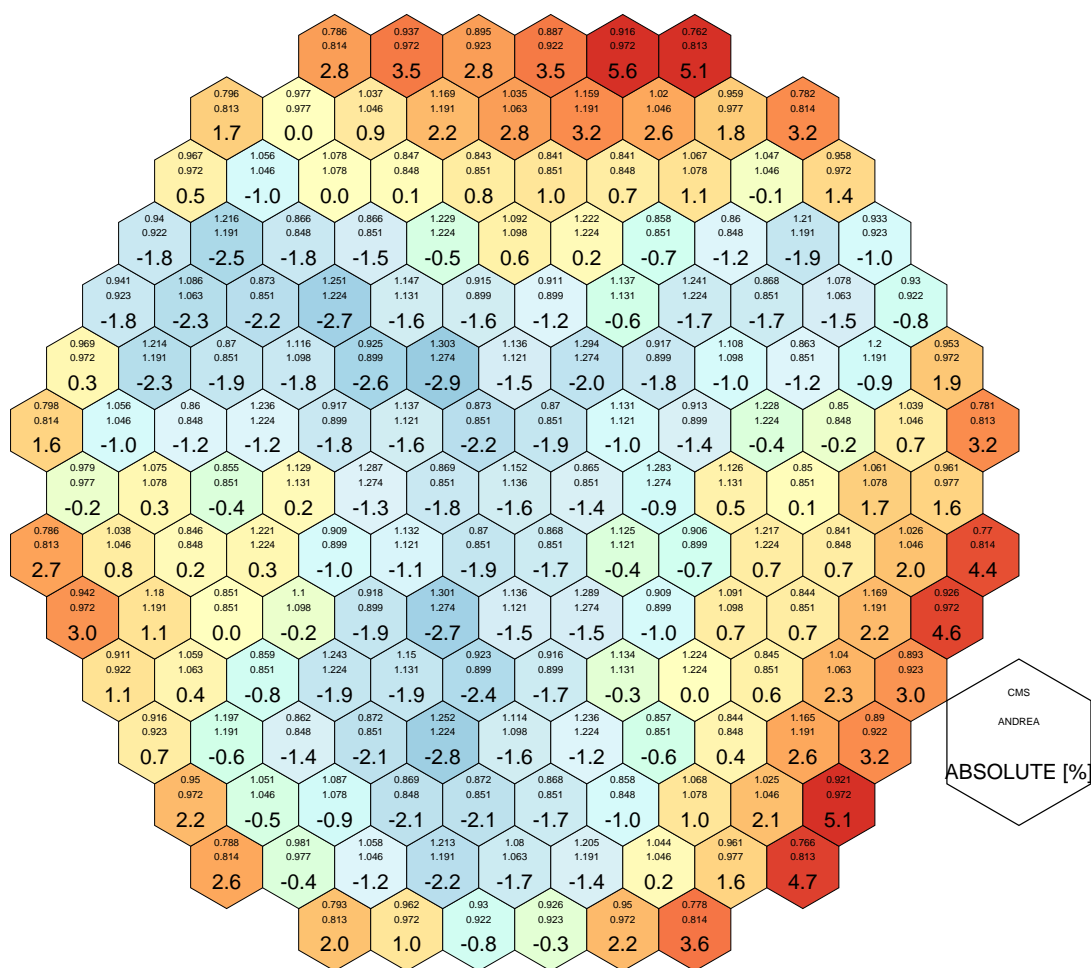
5.7.3 Odchytky v rozložení výkonů palivových souborů

Posledním srovnáním jsou absolutní odchylky výkonů palivových souborů od provozních dat pro kampaně U2C9 a U2C13 ve stavech BOC a EOC. Na obrázcích níže bude vždy srovnání vůči datům z monitorovacího systému aktivní zóny, nejprve pro knihovnu připravenou kódem Serpent a poté pro knihovnu připravenou kódem Helios.

Z obrázků 5.35, 5.36, 5.37 a 5.38 lze vyčíst, že odchylky pro kampaň U2C9 pro periferní palivové soubory jsou nižší ve výpočtech s knihovnou připravenou kódem Helios než s knihovnou připravenou kódem Serpent. Směrem do centra AZ jsou již pro obě knihovny odchylky od provozního měření srovnatelné.

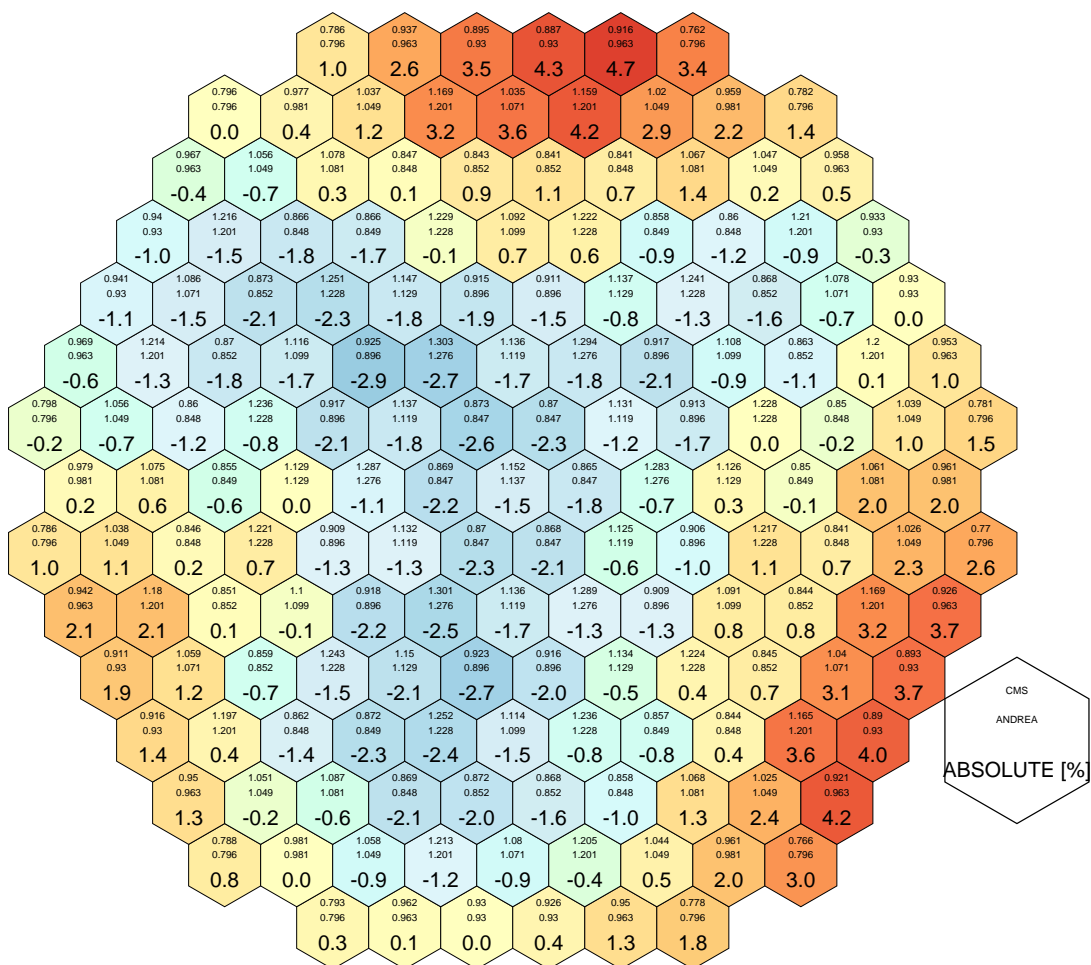
Pro odchylky v kampani U2C13 na obrázcích 5.39, 5.40, 5.41 a 5.42 lze říct, že obě knihovny dávají srovnatelné výsledky, knihovna připravená kódem Helios vychází o trochu lépe, odchylky se liší maximálně o 1 %.

U2C9 BOC



Zona: ete-u2-c09, Datum: 2011-08-12 12:00:01 UTC, EFPD 15.82

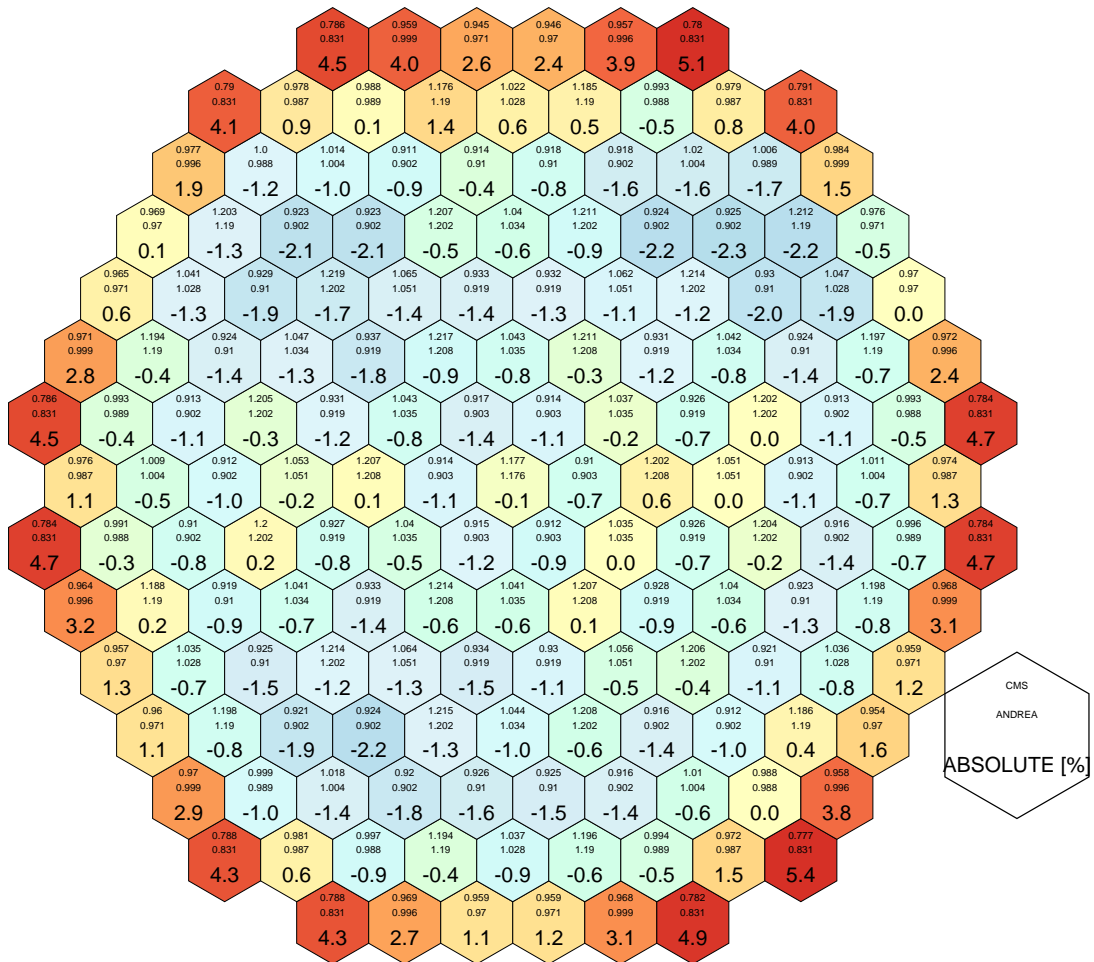
Obrázek 5.35: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 BOC - knihovna připravená kódem Serpent



Zona: ete-u2-c09, Datum: 2011-08-12 12:00:01 UTC, EFPD 15.82

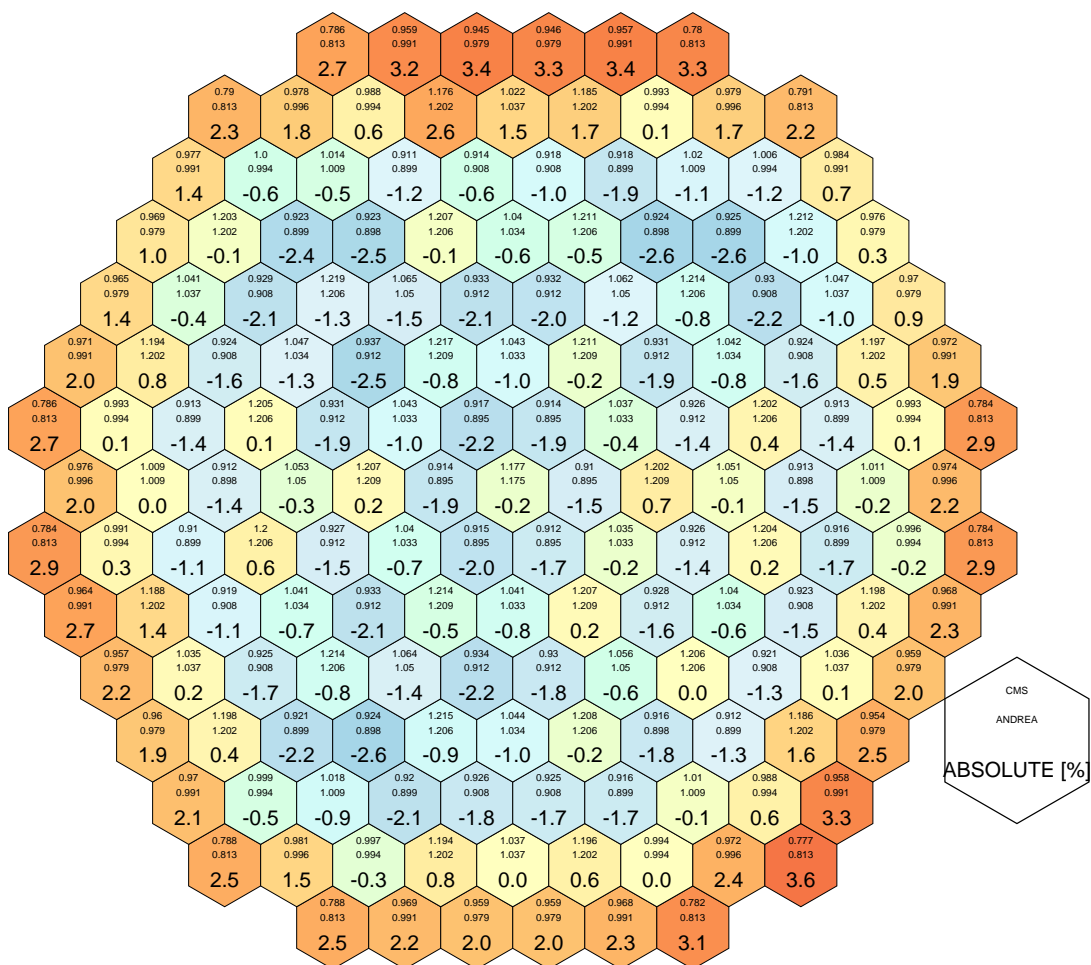
Obrázek 5.36: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 BOC - knihovna připravená kódem Helios

U2C9 EOC



Zona: ete-u2-c09, Datum: 2012-05-04 11:56:23 UTC, EFPD 272.76

Obrázek 5.37: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 EOC - knihovna připravená kódem Serpent

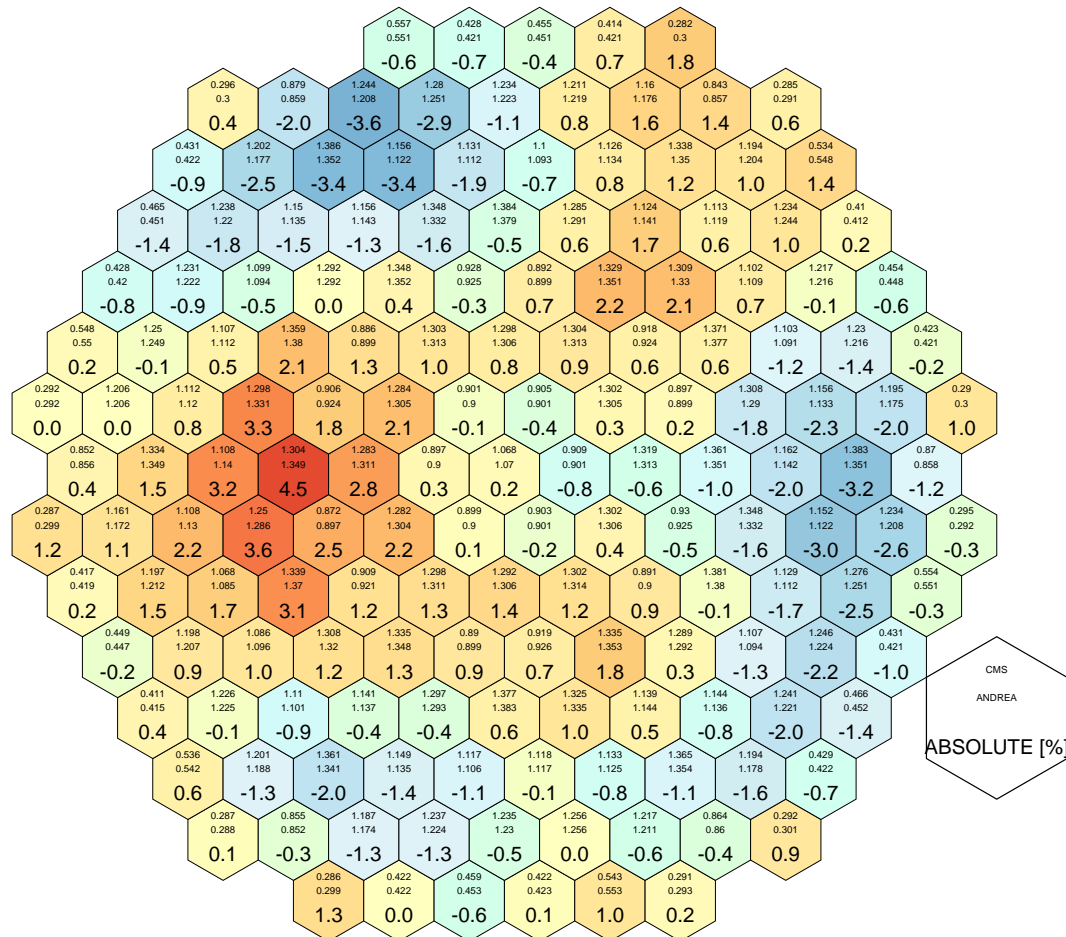


Zona: ete-u2-c09, Datum: 2012-05-04 11:56:23 UTC, EFPD 272.76

Obrázek 5.38: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C9 EOC - knihovna připravená kódem Helios

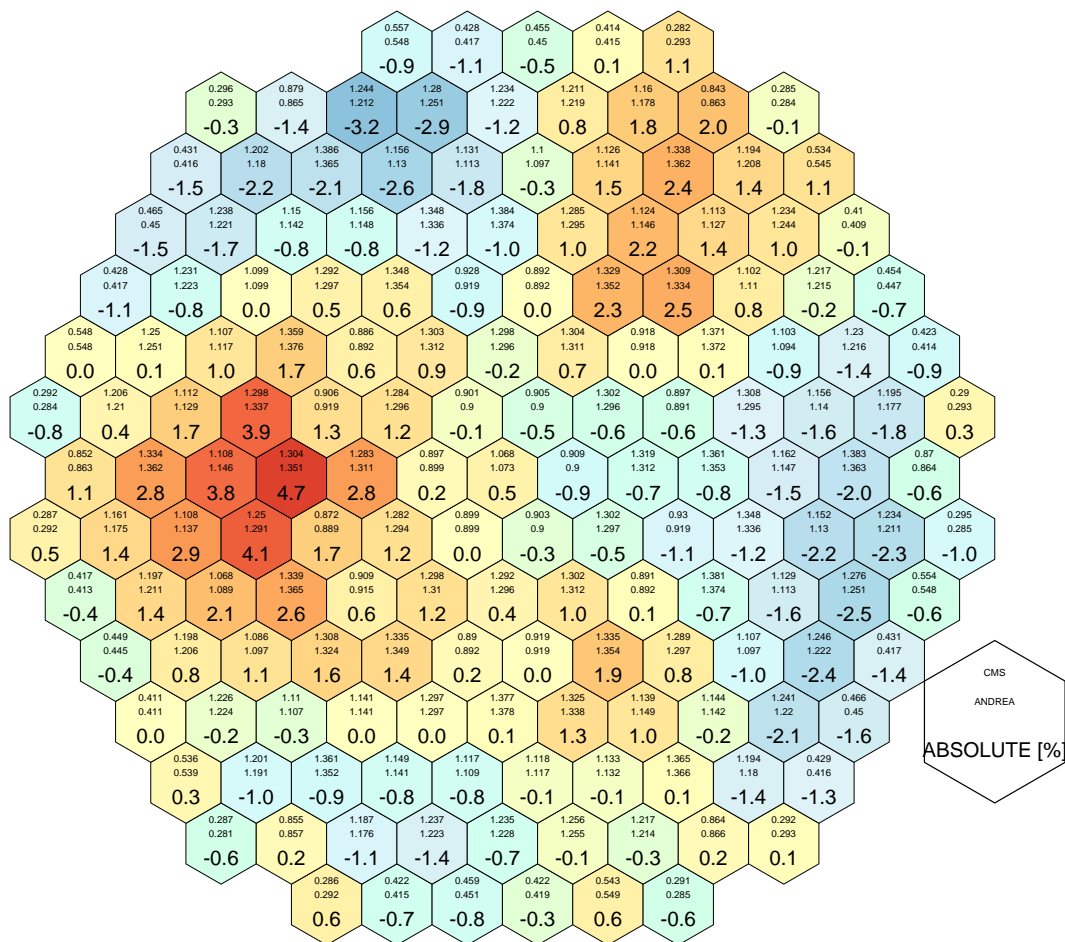
U2C13 BOC

Zde v obrázcích chybí jeden palivový soubor, to je tím, že pro něj nejsou k dispozici data z provozního měření.



Zona: ete-u2-c13, Datum: 2015-08-07 08:07:18 UTC, EFPD 7.45

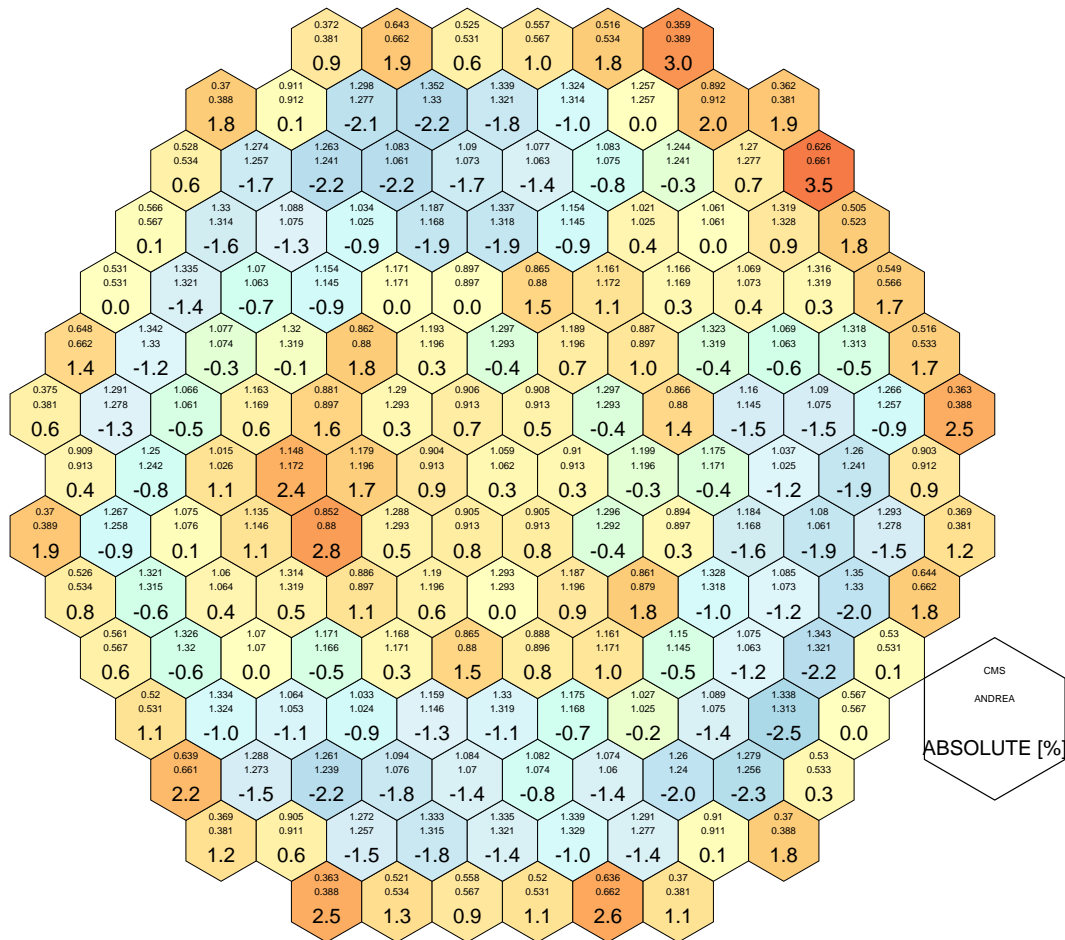
Obrázek 5.39: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 BOC - knihovna připravená kódem Serpent



Zona: ete-u2-c13, Datum: 2015-08-07 08:07:18 UTC, EFPD 7.45

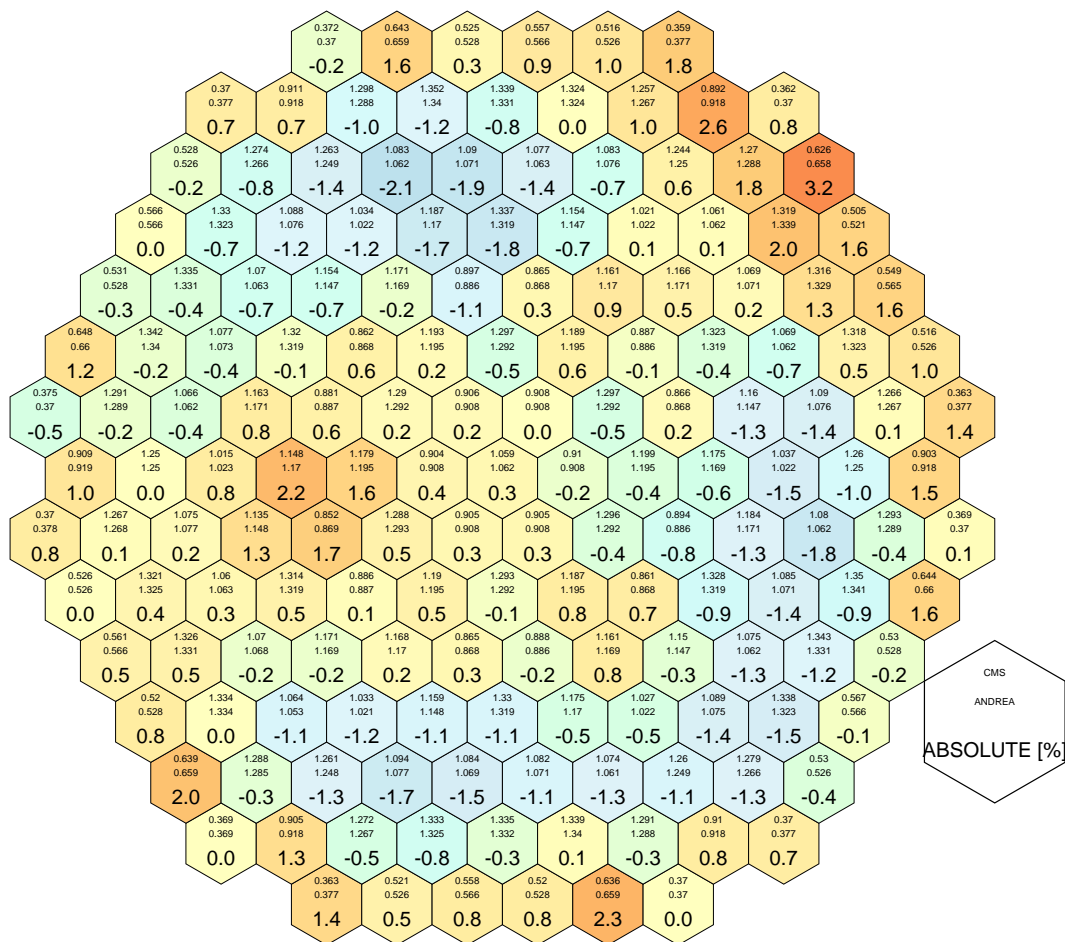
Obrázek 5.40: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13
BOC - knihovna připravená kódem Helios

U2C13 EOC



Zona: ete-u2-c13, Datum: 2016-05-27 06:26:57 UTC, EFPD 282.74

Obrázek 5.41: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 EOC - knihovna připravená kódem Serpent



Zona: ete-u2-c13, Datum: 2016-05-27 06:26:57 UTC, EFPD 282.74

Obrázek 5.42: Absolutní odchylka výkonů PS od provozních dat pro kampaň U2C13 EOC - knihovna připravená kódem Helios

5.8 Shrnutí srovnání vůči provozním datům

Z výše uvedeného srovnání plyne, že knihovna připravená kódem Serpent dává dobré výsledky při srovnání s provozními daty a je použitelná pro výpočty vsázek pro ETE. Z porovnání vůči knihovně připravené kódem Helios je možné říct, že mnou připravená knihovna je lepší či srovnatelná v případě výpočtu kritické koncentrace kyseliny borité, ale naopak dává horší výsledky v případě výpočtů axiálního a radiálního rozložení výkonu, tyto ukazatele je možné vyčíst z tabulky s metrikami 5.4, ale odchylky nejsou nijak zásadní a knihovny jsou srovnatelné. Výsledky jsou natolik dobré, že v rámci návazných prací bude vhodné provést úplnou validaci programu ANDREA s knihovnami připravenými pomocí kódu Serpent. Z těchto výsledků budou moci být učiněny závěry ke směru dalšího vývoje knihoven.

Závěr

Cílem mojí práce bylo ukázat, že kód Serpent je vhodný nástroj k přípravě knihoven účinných průřezů pro kód ANDREA. Před samotným sestavením knihovny a jejím otestováním vůči provozním datům z druhého výrobního bloku Jaderné elektrárny Temelín a srovnáním s výsledky výpočtů pomocí produkční knihovny připravené kódem Helios bylo třeba vyřešit několik velmi zajímavých dílčích úkolů.

Prvním úkolem byla verifikace procesu homogenizace dat pro palivové soubory, který byl u nás na Oddělení reaktorové fyziky ÚJV Řež již dříve vytvořen a bylo třeba jej důkladně otestovat. Během řešení tohoto problému jsem musel vytvořit vhodnou metodiku, díky které bych proces otestoval. To zahrnovalo propojení nástroje Quadriga3, který připravuje vstupy pro palivové soubory v kódu Serpent, s nástrojem SFullcore, který připravuje vstupy pro 2D celozónové výpočty, a datase pro kód ANDREA, se kterým jsem následně prováděl přepočty vybraných stavů aktivní zóny - začátek kampaně U1C9 a U1C15. Vše probíhalo pomocí skriptů v jazyce Ruby a během vypracování jsem pozoroval velké odchylky výkonů v periferních palivových souborech mezi výpočtem kódem ANDREA a referenčním výpočtem v kódu Serpent. Při detailnějším zkoumání jsem přišel na příčinu těchto odchylek způsobenou přípravou dat pro radiální reflektory a následně jsem ji v programu SFullcore odstranil (popsáno v kap. 5.4.2). Z provedené verifikace plyne důležitý závěr, že proces homogenizace je navržen správně a kód Serpent je vhodným nástrojem pro přípravu homogenizovaných dat pro palivové i nepalivové součásti aktivní zóny a bude dále využit na přípravu kompletní knihovny pro kód ANDREA. Taktéž bylo prokázáno, že nástroj Quadriga3 neobsahuje chyby v šablonách pro generování vstupů.

V dalších kapitolách jsem se věnoval vybraným aspektům homogenizace. Cílem druhé kapitoly je ocenit chybu, ke které dochází při homogenizaci periferních palivových souborů v nekonečné 2D mříži. Během zkoumání odchylek u periferních palivových souborů se nabízelo vysvětlení, že jsou způsobeny blízkostí radiálních reflektorů, které zde s palivem přímo sousedí a výrazně ovlivňují energetické spektrum neutronů. Vytvořil jsem proces ocenění přípravy dat pro periferní řadu palivových souborů pomocí 2D výpočtu aktivní zóny a srovnal výsledky oproti první kapitole. Z provedených výpočtů plyne, že je možné vylepšit a zpřesnit proces homogenizace periferních palivových souborů, ale jeho přínos nepřeváží jeho výpočetní náročnost a složitost implementace.

Ve třetí kapitole jsem se věnoval způsobu přípravy difuzních koeficientů a vlivu na výsledky počítané pomocí kódu ANDREA. Cílem bylo vybrat co nejvhodnější způsob výpočtu difuzního koeficientu v kódu Serpent pro potřeby přípravy knihoven a podložit tuto volbu výpočty. Hodnota D je během výpočtů v difuzním přiblížení kriticky důležitá a je třeba ji znát co nejpřesněji. V této oblasti jsem navázal na práci, která již byla na ORF ÚJV Řež udělána v minulosti a poskytla mi důležitý teoretický základ pro vytvoření metodiky. V kódu Serpent ovlivní počítaná homogenizovaná data především korekce na kritické spektrum. Ke srovnání jsem použil referenční Monte Carlo výpočet, připravil jsem data pro palivové soubory s různou definicí korekce na kritické spektrum v nekonečné mříži a provedl jsem srovnání výpočtů kódem ANDREA vůči referenčnímu výpočtu. Z nabízených možností byla, na základě odchylek výkonů a koeficientů násobení, vybrána metoda B1. Ta byla následně použita k přípravě dat do knihovny pro kód ANDREA.

Ve čtvrté kapitole jsem provedl ocenění vlivu spektra hustoty toku neutronů na proces vyhořívání paliva. Touto otázkou se ještě nikdo na ORF ÚJV Řež nezabýval a bylo tedy nutné vytvořit metodiku od úplného základu. Deterministické kódy (např. Helios) používají opravu na kritické spektrum jak při procesu vyhořívání, tak při vlastní homogenizaci. Kód Serpent2.1.31 prozatím neumožňuje vyhořívání v kritickém spektru a používá nekonečné spektrum. Cílem této části práce bylo určit, jak vyhořívání v nekonečném spektru ovlivní izotopické složení a následně i samotná homogenizovaná data s dopadem na stanovení charakteristik AZ. Analýza byla provedena kódem Helios, který umožňuje použití opravy na kritické spektrum během vyhořívání vypnout. Ukázal jsem, že vypočtené izotopické složení v různých krocích vyhořívání závisí na volbě spektra - kritického či nekonečného a bylo tedy nutné se na tuto problematiku zaměřit více. Během řešení tohoto bodu jsem musel vytvořit nové šablony pro restart výpočty pro Quadrigu3 a vypořádat se s některými omezeními z vnitřních vlastností kódu Helios (například omezená paměť pro načítání izotopického složení z dumpů). Z provedených výpočtů plyne, že je možné očekávat odchylky ve výpočtu koeficientu násobení v řádu jedné stovky pcm a v rozložení výkonu v maximu okolo jednotky procenta. Chyba výpočtů v důsledku vyhořívání v nekonečném spektru nepřevyšuje chyby vniklé v důsledku ostatních aproximací ve výpočetním řetězci (homogenizace v nekonečné mříži apod.). Proto je kód Serpent s jeho výpočetním schématem (vyhořívání v nekonečném spektru, homogenizace v kritickém spektru) použitelný pro přípravu knihoven účinných průřezů pro výpočty v difuzním přiblížení.

Poslední kapitolou je samotné sestavení knihovny účinných průřezů pro kód ANDREA. Tato část shrnuje poznatky ze všech předchozích kapitol a je logickým vyústěním práce. Hlavní náplní bylo sestavit metodiku pro přípravu knihovny, podle ní ji sestavit a provést částečnou validaci vůči provozním datům a produkční knihovně připravené kódem Helios. Před samotnou tvorbou metodiky bylo třeba zapracovat poznatky popsané výše a vyřešit další důležité úkoly, kterými jsou příprava dat pro nepalivové součásti aktivní zóny (axiální a radiální reflektory) a úprava nástroje Akiko (sestavuje knihovnu), aby umožňoval přímo načítat výstupy z kódu Serpent, což před začátkem psaní této práce nebylo na implementováno. Řešení veškerých dílčích úkolů je v práci podrobně popsáno. V případě přípravy dat pro palivové soubory jsem převzal již hotový proces, který jsem verifikoval (viz kapitola 1). Pro reflektory jsem navrhl kompletně nový proces včetně ocenění rozdílů oproti datům připraveným kódem Helios.

Důležitou částí této kapitoly je částečná validace knihovny srovnáním predikcí kódu ANDREA s provozními daty. To ukáže, zda v celkovém pohledu má příprava knihovny kódem Serpent význam a zda veškeré předcházející kroky byly provedeny korektně a případně odhalí místa na kterých je do budoucna třeba pracovat. Z této části plyne, že knihovna připravená kódem Serpent dává dobré výsledky při srovnání s provozními daty. Hlavní ukazatele jsou k nalezení v tabulce 5.4 a je možné vyčíst, že odchylky nejsou nijak zásadní a výsledky jsou srovnatelné s výsledky získanými s knihovnou připravenou kódem Helios. Výsledky jsou natolik dobré, že v rámci návazných prací bude vhodné provést úplnou validaci programu ANDREA s knihovnamí připravenými pomocí kódu Serpent. Bude to znamenat přípravu dat pro kompletní sortiment palivových souborů a vyhodnocení dat ze všech palivových vsázek, a to včetně vyhodnocení 3D rozložení výkonu podle údajů z SPND detektorů. Z těchto výsledků budou moci být učiněny závěry ke směru dalšího vývoje knihoven.

Reference

- [1] LEPPÄNEN, J., et al., *The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013*, Annals of Nuclear Energy, 82 (2015) 142-150.
- [2] GREN M., *SFullcore – framework for full-core VVER calculations using SERPENT*, 28th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety (2018, Olomouc, Czechia).
- [3] HAVLUJ F., VOČKA R., *Quadruga-general and powerful lattice code calculation framework*, in “International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 2016,” 2016.
- [4] HAVLUJ F., VOČKA R., *Quadruga tutorial*, ÚJV Řež a.s., 2020.
- [5] HAVLUJ F., VOČKA R., a VYSOUDIL J., *ANDREA 2: Improved Version of Code for Reactor Core Analysis*, in “22nd International Conference on Nuclear Engineering,” 2014.
- [6] HEJZLAR J. a spol., *Kvalifikace výpočetního programu ANDREA verze 2.3*, Zpráva UJV Z-5158, srpen 2019.
- [7] VOČKA R., *Uživatelská příručka k programu ANDREA v.2.3*, ÚJV Řež a.s., 2020.
- [8] KUNA, M. *Modelování testů fyzikálního spouštění jaderné elektrárny Temelín s využitím programu ANDREA*. Praha, 2013. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Katedra jaderných reaktorů.
- [9] KRÁL L. et al, *Celoblokový provozní přeis 1TC111 revize 12 pro kampaň U1C9*, ČEZ a.s., 2010.
- [10] SEJKORA J. et al, *Celoblokový provozní předpis 1TC111 revize 18 pro kampaň U1C15*, ČEZ a.s., 2016.
- [11] MIKISEK M. et al, *Core specification for NF calculations*, interní dokument UJV-ORF-2015-009, březen 2021.
- [12] FRÝBORT J. a VOČKA R., *Macroscopic Data Generation for Full-Core VVER Reactor Calculations by Serpent* in ”International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science”, 2017.
- [13] LEPPÄNEN J., PUSA M. a FRIDMAN E., *Overview of methodology for spatial homogenization in the Serpent 2 Monte Carlo code*, Annals of Nuclear Energy. 2016, **96**, 126-136. ISSN 03064549.
- [14] SKLENKA, Ľ., HERALTOVÁ L., *Provozní reaktorová fyzika*. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05901-2.
- [15] *Nuclear Power for Everybody: Diffusion Coefficient* [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/neutron-diffusion-theory/diffusion-coefficient>.

- [16] FRIDMAN, E. a LEPPÄNEN J., *Comparison of Serpent and HELIOS-2 as Applied for the PWR Few-Group Cross Section Generation*, in "International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering (M&C 2013), Sun Valley, Idaho, USA", 2013.
- [17] FRIDMAN, E. a LEPPÄNEN J., *On the use of the Serpent Monte Carlo code for few-group cross section generation*. Annals of Nuclear Energy: Volume 38, Issue 6. , 1399-1405. ISSN 0306-4549. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.032>.
- [18] CHOI S., KORD S., HANJOO K. et al., *On the diffusion coefficient calculation in two-step light water reactor core analysis*, Journal of Nuclear Science and Technology, 2017, 705-715.
- [19] LIU, Z., SMITH K., FORGET B. a ORTENSI J., *Cumulative migration method for computing rigorous diffusion coefficients and transport cross sections from Monte Carlo*. Annals of Nuclear Energy. 2018, 507 - 516. ISSN 0306-4549.
- [20] LEPPÄNEN, J., *Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*, User manual, 2015.
- [21] Input syntax manual. *Serpent Wiki* [online]. VTT Technical Research Centre of Finland, 2019 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: http://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Input_syntax_manual#set_trc.
- [22] LUSZCZEK, K., *Validation and Benchmarking of Westinghouse BWR lattice physics methods* (Dissertation). Dostupné z: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-180563>, 2015.
- [23] KLÍMA T. *CFD modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2017. 101 s.
- [24] VOČKA R. et al. *Lattice code methodology*, ÚJV Řež a.s., září 2017.
- [25] KUBÍN R. *Příprava účinných průřezů pro axiálně heterogenní části aktivní zóny*. Praha, 2020. Výzkumný úkol. České Vysoké Učení Technické v Praze, Katedra jaderných reaktorů. Vedoucí práce Ing. Radim Vočka, Ph.D.