

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výpočet rozložení výkonu reaktoru VVER-1000

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TÍMR**
Osobní číslo: **E18N0072P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Výpočet rozložení výkonu reaktoru VVER-1000**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

Výpočet rozložení výkonu reaktoru VVER-1000 dle zadání benchmarkové úlohy.
Cílem této práce je vytvořit 2-D model aktivní zóny dle zadání benchmarkové úlohy pomocí programu Serpent a stanovit výkonovou distribuci na úrovni palivových souborů a palivových proutků.

1. Seznamte se s výpočetním kódem Serpent.
2. Vytvořte model dle zadání benchmarkové úlohy a stanovte distribuci výkonu.
3. Určete přesnost výpočtu Serpentu a srovnajte s referenčním řešením.




Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. V. Krýsl, P. Mikoláš: Zadání testové úlohy „FullCore“ VVER-1000 pro Monte Carlo, ŠKODA JS a.s., Plzeň, 2011.
2. J. Leppänen: „Serpent – a Continuous – energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code“, VTT Research Centre of Finland, Helsinki, 2015.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


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



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Hlavním cílem předkládané diplomové práce je validace výpočetního kódu Serpent založeném na metodě Monte Carlo prostřednictvím výpočtu rozložení výkonů v palivových souborech a dílčích palivových proutcích v realistické palivové vsázce pro reaktor typu VVER-1000 a porovnáním získaných dat s referenčním řešením. Vypočítané řešení je velmi přesné, což potvrdila i analýza symetrie daného řešení. Řešený model byl využit i pro další vybrané analýzy dílčích vlivů na výsledky. Tyto analýzy jsou vhodné pro další porovnání přesnosti výpočtu s deterministickými kódy jako je například Moby-dick.

Klíčová slova

VVER-1000, rozložení výkonu, Serpent, Monte Carlo

Abstract

The main goal of this master thesis is to validate the Serpent calculation code based on the Monte Carlo method by calculating the power distribution in fuel assemblies and partial fuel rods in a realistic fuel charge for the VVER-1000 reactor and comparing the obtained data with a reference solution. The calculated solution is very accurate, which was confirmed by the symmetry analysis of the solution. The solved model was also used for other selected analyzes of partial effects on the results. These analyzes are suitable for further comparison of calculation accuracy with deterministic codes such as Moby-dick.

Key words

VVER-1000, power distribution, Serpent, Monte Carlo

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a neméně též Ing. Jiřímu Závorkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK	10
1 VÝPOČETNÍ KÓDY	12
1.1 PŘEHLED KÓDŮ MONTE CARLO.....	12
1.1.1 MCNP.....	12
1.1.2 Serpent.....	13
1.2 PŘEHLED DETERMINISTICKÝCH KÓDŮ.....	14
1.2.1 Moby-dick.....	14
1.2.2 ANDREA.....	14
2 POUŽITÝ MODEL	15
3 VYHODNOCENÍ ŘEŠENÍ	19
3.1 ZPRACOVÁNÍ VÝSTUPU.....	19
3.2 POROVNÁNÍ S MEZINÁRODNÍM REFERENČNÍM ŘEŠENÍM.....	22
3.3 SYMETRIČNOST A NELINEARITA.....	29
4 VÝBĚR PARAMETRŮ	36
5 SPECIÁLNÍ ANALÝZY	38
5.1 VLIV RŮZNÝCH ZDROJŮ JADERNÝCH DAT.....	38
5.2 VLIV KONCENTRACE KYSELINY BORITÉ.....	40
5.3 VLIV ZASUNUTÍ REGULAČNÍCH ORGÁNŮ.....	42
ZÁVĚR	45
POUŽITÁ LITERATURA	47
PŘÍLOHY	48

Úvod

Účelem této práce je vytvořit referenční řešení úlohy FullCore jaderného reaktoru VVER-1000 a výsledkem je zjistit, jestli je použitý výpočetní kód Serpent bezpečné a spolehlivé používat i nadále tzn. provést validaci výpočetního kódu. Před samotným výpočtem je nutné nezávisle vytvořit co nejpřesnější model reálné aktivní zóny odpovídající zadání, ve kterém jsou specifikované veškeré důležité informace, například geometrie, použité materiály nebo podmínky, ve kterých se bude výpočet provádět. Po provedení výpočtu je nutné získané výsledky porovnat s existujícími hodnotami, čímž se stanoví relativní odchylka.

Dále je třeba vyhodnotit samotné řešení, zjistit rozložení výkonů na úrovni palivových souborů a palivových proutků a stanovit přesnost řešení pomocí analýzy symetrie, která závisí na přesnosti konkrétního výpočtu.

V další části této práce jsou provedeny i další specializované analýzy a je zkoumán vliv určitých předem definovaných změn v modelu. K tomu je ovšem nutné zjistit optimální parametry určující přesnost, ale i výpočetní a časovou náročnost, aby bylo možné určit efektivní a reálné podmínky z důvodu optimalizace výpočetního času. Takto zjištěné parametry se dají dále použít v podobných výpočtech například pro první orientační výpočet, kdy se zjišťuje správnost modelu, nebo při výpočtu většího množství podobných variant s přijatelnou přesností.

Provést detailní 3D výpočet aktivní zóny metodou Monte Carlo by bylo z důvodu výpočetní i časové náročnosti prakticky nemožné. Proto se v praxi při využití této metody většinou používají 2D modely, a to ještě s určitou rotační symetrií, například 120° či 60°. V práci je ovšem použita úloha FullCore v 360° symetrii, kde jsou vymodelované všechny palivové soubory, není tudíž třeba využívat rotační symetrie. Výhoda FullCore spočívá v tom, že neztrácí přesnost oproti například metodě využívající 60° symetrii, jelikož zachytí nesymetrii palivových souborů obsahující palivové proutky s vyhořívajícím absorbatorem přesně tak, jak má být.

Seznam symbolů a značek

2D.....	dvoudimenzionální
3D.....	trojdimenzionální
VVER-1000.....	typ jaderného reaktoru používaného v Temelíně
AZ.....	aktivní zóna
PS.....	palivový soubor
PP.....	palivový proutek
MCNP.....	Monte Carlo N-particle, výpočtový kód
K_{eff}	koeficient násobení neutronů
K_q	koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů
K_k	koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových prouteků v palivových souborech
UNIX.....	operační systém
A1300.....	typ palivového souboru se středním obohacením 1,3 %
A2000.....	typ palivového souboru se středním obohacením 2 %
A30E9.....	typ palivového souboru se středním obohacením 3 %
P36E9.....	typ palivového souboru se středním obohacením 3,6 %
P40E9.....	typ palivového souboru se středním obohacením 4 %
A40E9.....	typ palivového souboru se středním obohacením 4 %
Gd.....	gadolinium
Gd ₂ O ₃	oxid gadolinitý
VK-3.....	standardizované číslování
RozptMax_Kk.....	maximální rozptyl koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových prouteků
RozptRel_Kk.....	relativní rozptyl koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových prouteků
StrKv.....	střední kvadratická hodnota
StrArit.....	střední aritmetický průměr
B ₄ C.....	absorpční materiál, karbid boru
VA.....	vyhořívající absorbátor

α_{Kx}^{abs} absolutní koeficient asymetrie daného koeficientu

α_{Kx}^{rel} relativní koeficient asymetrie daného koeficientu

δ_{Kx} relativní odchylka daného koeficientu

1 Výpočetní kódy

Výpočetní kódy lze obecně rozdělit dle přístupu a použité metody do dvou kategorií, a to na kódy stochastické a deterministické. Stochastické metody se zabývají modelováním náhodných jevů, přičemž z důvodů náročnosti je nutné vybrat konkrétní oblasti či rozsah výpočtu. Deterministické metody mají vždy jasně daný počáteční stav a jsou definovány rovnicemi popisujícími daný problém s určitým zjednodušením. Deterministické metody, na rozdíl od stochastických, dojdou ke stejnému výsledku, pokud je zadání problému totožné.

Pro účely této práce se budou následující kapitoly zabírat výpočetními kódy, které se věnují jaderné energetice. Zde se pro tyto kódy používá označení stochastické kódy založené na metodě Monte Carlo. Tato metoda probíhá tak, že spočítá výsledek v každém bodě a seskupení provede v požadovaném uspořádání. Každý výpočet je zatížen statistickou odchylkou daného kódu, protože je založen na pravděpodobnosti. Typickým představitelem této metody je výpočetní kód MCNP nebo Serpent. Deterministické kódy řeší Boltzmannovu transportní rovnici numericky, přičemž dochází k aproximaci daného systému, a tím pádem i k zavedení určité chyby. Mezi tyto kódy pak patří třeba Moby-dick, TRITON nebo ANDREA.

1.1 Přehled kódů Monte Carlo

V této kapitole jsou popsány vybrané kódy založené na metodě Monte Carlo, MCNP a Serpent, který byl použit pro veškeré výpočty obsažené v této práci.

1.1.1 MCNP

Výpočtový kód MCNP byl vyvíjen již v šedesátých letech dvacátého století v laboratořích Los Alamos v USA a je založen na výsledcích výzkumu zakladatelů metody Monte Carlo. Byl postupně složen z několika částí. Jádro tvoří kód sloužící k výpočtu transportu částic využívající metody Monte Carlo, ke které byl posléze přidán kód zabývající se interakcí neutronů a poté následovaly kódy pro řešení transportu gama záření a později i fotonů. V současnosti je tato zkratka interpretována jako Monte Carlo N-particle.

Tento kód prošel mnohými úpravami, a to i v nedávné době, mezi ty nejmarkantnější patří úprava umožňující používat i systémy UNIX a začlenění vícero strojů do jediného výpočtu pomocí paralelních úloh či přepsání kódu z jazyka Fortran 77

na novější Fortran 90. Od roku 2010 do současnosti se tento kód nazývá MCNP6.

Oblast využití je tedy značně rozsáhlá a zahrnuje například analýzu vyhořívání jaderného paliva, výpočty kritičnosti, ale i radiační ochranu, stínění nebo lékařskou fyziku. Simulace je pro spojité spektra ve třech dimenzích. Používá se tedy k odhadu chování částic skrz interakce, buď mezi nimi, nebo s okolím. [2]

1.1.2 Serpent

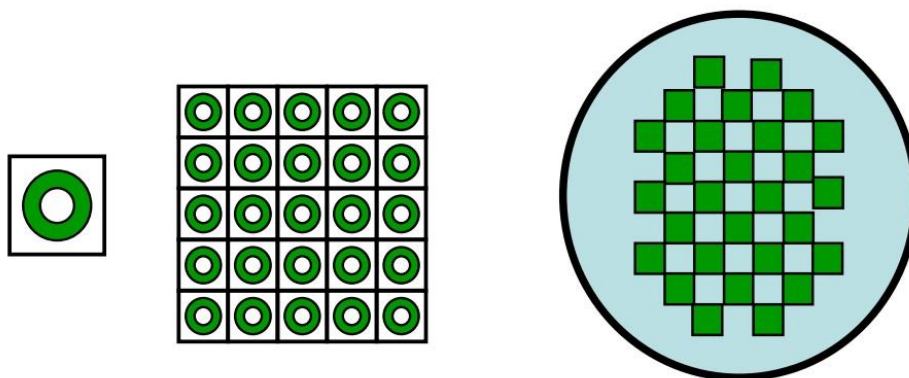
Výpočetní kód Serpent má kořeny ve finském výzkumném centru Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, zkráceně VTT. K jeho sepsání byl použit programovací jazyk C a je napsán pro operační systém UNIX. [4]

Nezpochybnitelnou výhodou tohoto kódu je fakt, že jeho prvotním cílem bylo jeho využití při výpočtech reaktorové fyziky, a proto tak byl i vyvíjen. I z tohoto důvodu umožňuje použití architektura rychlejší výpočet.

Interakce s tímto kódem probíhá přes příkazovou řádku, je tedy zapotřebí zadat vstupní soubor a výsledné výstupy jsou rozděleny do několika výstupních souborů. Zapotřebí je samozřejmě definovat požadovanou geometrie, materiály a odkazy na potřebné knihovny jaderných dat. Tento kód je modernější a momentálně se nevyužívá pouze v reaktorové fyzice, ale i v medicíně či ve výzkumu jaderné fúze. [2]

Podobně jako jiné kódy založené na metodě Monte Carlo, jsou základy geometrie v Serpentu založené na tvorbě tzv. univerz spojené s modelováním CSG, což je zkratka pro constructive solid geometry. Toto modelování spočívá ve tvorbě homogenních hmotných buněk složených za pomoci kombinování základních a odvozených ploch. [4]

Tvorba modelu za použití popisovaného postupu je znázorněna na Obr. 1. Zde je znázorněna tvorba buňky dílčího palivového proutku, vložení těchto buněk do mříže, vytvoření univerza a výsledné složení všech dílčích součástí do jednoho modelu.



Obr. 1: Znázornění tvorby geometrie

1.2 Přehled deterministických kódů

V této části budou popsány některé kódy používané v České republice, jmenovitě Moby-dick a ANDREA.

1.2.1 Moby-dick

Tento výpočetní kód byl napsán ve společnosti ŠKODA JS a je základem pro výpočty českých jaderných reaktorů. Použitým jazykem je opět Fortran 77. Tento kód je v České republice v současné době hojně používanou metodou.

Využití má nejen při řešení difúzních rovnic ve dvou i třech dimenzích, čehož bývá použito při simulaci provozu a efektivního využití paliva, ale i při výpočtu termohydraulických charakteristik, které jsou potřebné pro bezpečný chod reaktoru. Proto je rozdělen do dvou bloků, a to na neutronově-fyzikální a termohydraulický blok.

Při modelování tento kód využívá šestiúhelníků a trojúhelníků, které tvoří výpočetní síť. Je také schopen pracovat s určitou úrovní symetrie. Data musí být zpracována pomocí programu WIMS do knihoven obsahující makroskopické účinné průřezy doplněné parametrizovanými daty. [2]

1.2.2 ANDREA

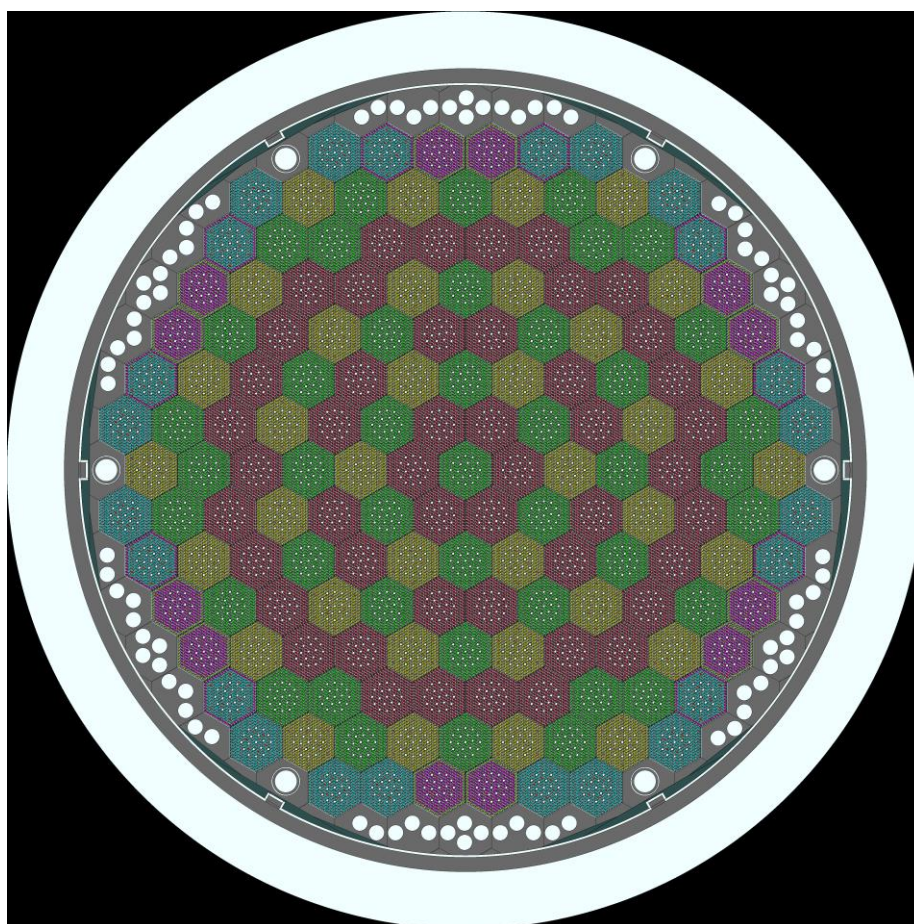
Makrokód ANDREA je program vyvíjen v Ústavu jaderného výzkumu od roku 2005. Jedná se o nodální kód založený na konformním zobrazení a příčné integraci. Jednotlivá řešení v nódech jsou propojena okrajovými podmínkami na jejich rozhraní.

Používá se ke statickým výpočtům reaktorů s hexagonálním průřezem palivové kazety, tedy projektování a bezpečnostního hodnocení palivových vsázek reaktorů VVER. Konkrétně lze využít například k výpočtům koeficientů reaktivity, váhy regulačních tyčí nebo automatickému hledání konce kampaně. [5]

Také potřebuje předem zpracované podklady určitým mikrokódem, kupříkladu HELIOS, do knihoven obsahující makroskopická data. Celkově je tento kód začleněn do balíku jednotlivých součástí, do kterého jmenovitě patří například HELIOS, QUADRIGA, Astrid či Adéla. [5]

2 Použitý model

Řešený 2D model je určený pro modelový výpočet metodou Monte Carlo. Účelem je spočítat rozložení výkonů na úrovni palivových souborů a palivových proutků v reálné vsázce pro reaktor typu VVER-1000, a tak výstupní řešení poslouží jako reference pro validaci difuzních kódů. Jedná se o model celé aktivní zóny s radiálním reflektorem. V radiálním směru končí na vnitřní straně tlakové nádoby reaktoru, kde je stanovena okrajová podmínka plné absorpce (dále je vakuum). Hlavní částí modelu je tedy aktivní zóna, která je složena z jednotlivých palivových souborů obsahující různé palivové proutky v závislosti na své poloze a použitém palivu.

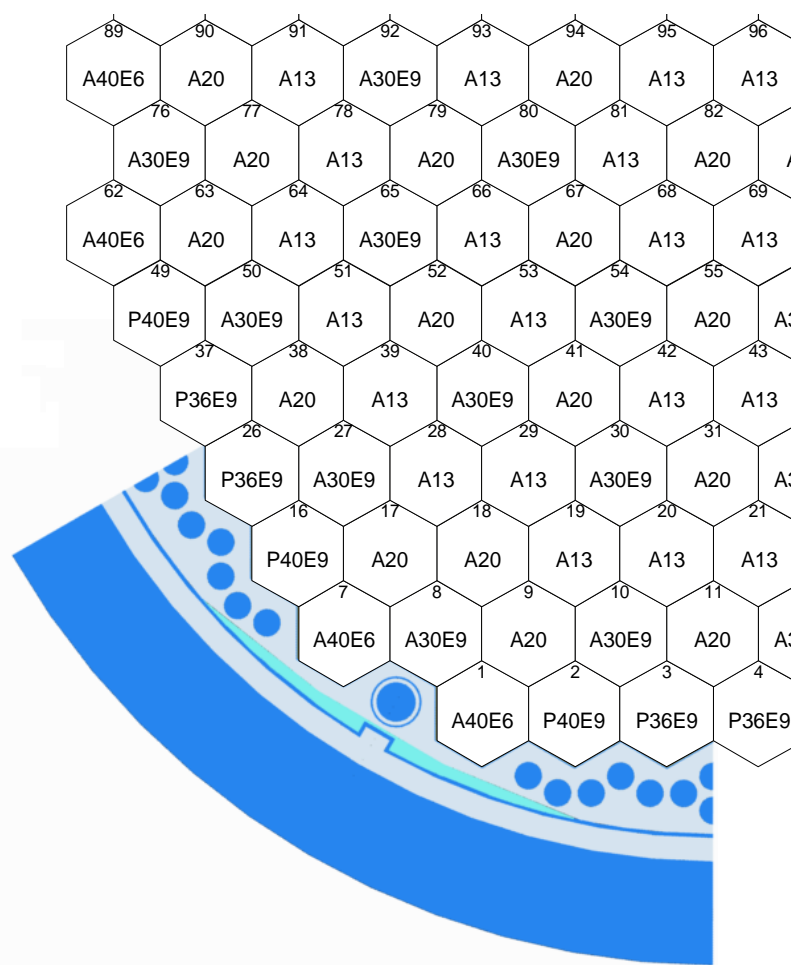


Obrázek 2: Zobrazení geometrie AZ vygenerované Serpentem

Následuje mezera vyplněná chladivem, která odděluje vnitřní povrch koše aktivní zóny od palivové části. Tento povrch je tvořen lomenými rovinnými plochami, přičemž každé dvě sousedící spolu svírají 120° (v tomto 2D modelu je tato plocha reprezentována hranicí složenou z úseček). Koš aktivní zóny je celkově nejkomplikovanější součástí celého modelu, proto je nutné ho za účelem zjednodušení homogenizovat. Obsahuje dva

typy vertikálních děr. Vnější povrch koše aktivní zóny lze modelovat jako kruhovou plochu s pravidelně se opakujícími vertikálními zářezy. Situaci komplikují vertikálně se střídající vrstvy chladiva a oceli na vnějším kraji koše aktivní zóny, které ale lze nahradit směsí těchto dvou materiálů v poměru 10:19, který vyplývá z 3D geometrie. Jedná se tedy o komplexní problém v rámci převodu z 3D geometrie do 2D. Další částí v radiálním směru od středu ke kraji modelu je šachta reaktoru, která je zde modelována jako mezikruží, které má na své vnitřní straně symetricky rozloženy výstupy reprezentující ocelová pera. Poslední modelovanou hladinou je vrstva chladiva mezi tlakovou nádobou a šachtou reaktoru. Klustry jsou v tomto případě vysunuté, respektive vodící trubky klastrů jsou vyplněné chladivem. Model je izotermický, přičemž teplota všech jeho součástí je stanovena na 600 K. [7]

Na Obr. 3 je názorně vidět rozložení dílčích typů palivových souborů i s jejich označením a dokresluje tak geometrii.



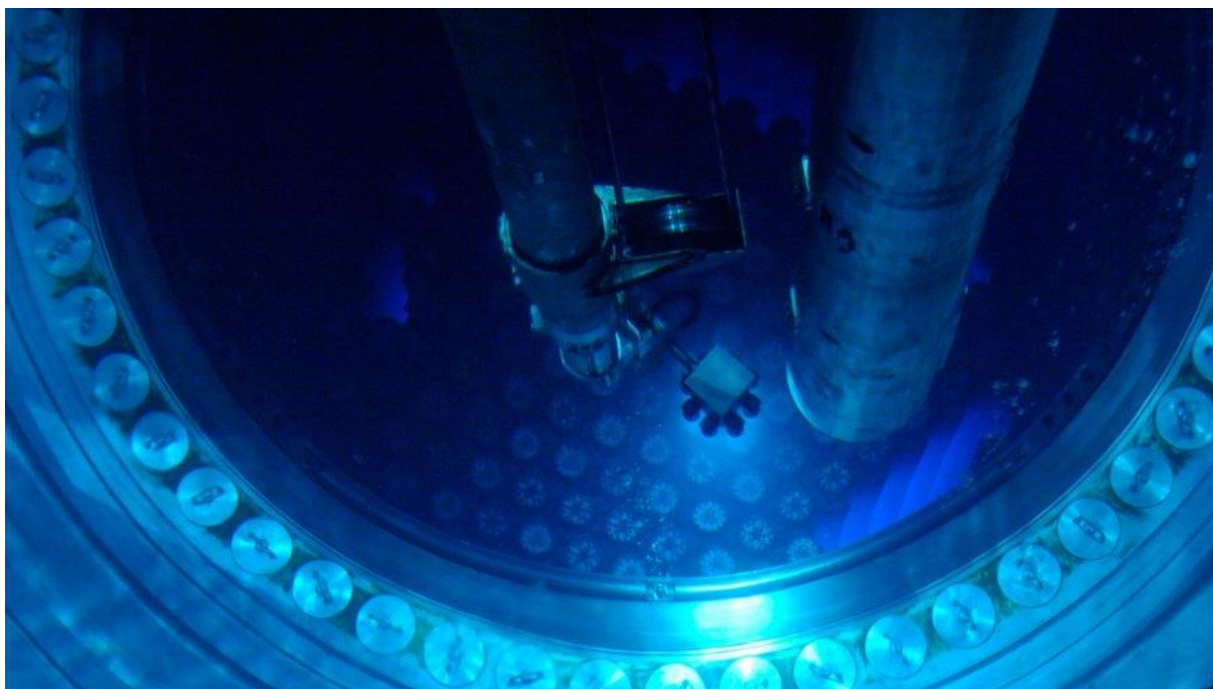
Obrázek 3: Označení jednotlivých PS (kartogram) i s částí reflektoru [9]

Označení palivových souborů odlišuje rozdílné profilace, které obsahují odlišné počty palivových proutků s gadoliniem i bez něj. Zároveň se jedná i o jiné obohacení jednotlivých palivových proutků, a to v rozmezí od 1,3% až do 4%.

Typ PS	Počet PP bez Gd VA / obohacení [%w]		Počet PP s Gd VA / obohacení [%w] / váhový podíl Gd ₂ O ₃ [%w]
	PP typ 1	PP typ 2	
A1300	312 / 1,3	-	-
A2000	312 / 2,0	-	-
A30E9	303 / 3,0	-	9 / 2,4 / 5
P36E9	243 / 3,6	60 / 3,3	9 / 3,3 / 5
P40E9	243 / 4,0	60 / 3,6	9 / 3,3 / 5
A40E6	306 / 4,0	-	6 / 3,3 / 5

Tabulka č 1: Typy palivových souborů použité v kartogramu [7]

V tabulce je seznam veškerých typů palivových souborů s typovým označením použitým v kartografu. První dva typy mají všech 312 palivových proutků bez příměsí gadolinia s obohacením uranu 1,3 % nebo 2,0 %. Palivový soubor typu A30E9 obsahuje 303 palivových proutků s obohacením 3,0 % a 9 palivových proutků s obohacením 2,4 % a příměsí gadolinia. Palivový soubor s profilací P36E9 obsahuje 243 palivových proutků s obohacením 3,6 %, 60 palivových proutků s obohacením 3,3 % a 9 palivových proutků se stejným obohacením, ale s příměsí gadolinia. Palivový soubor typu P40E9 se od předchozího liší pouze v míře obohacení palivových proutků bez příměsí gadolinia, které bylo navýšeno. Poslední typ palivového souboru je A40E6, který obsahuje 306 nejvíce obohacených palivových proutků, a to na hodnotu 4 %, a zároveň nejmenší počet palivových proutků s příměsí gadolinia, což je 6.



Obrázek 4: Pohled do AZ v Temelíně [6]

Na Obr. 4 je pohled do reálné aktivní zóny reaktoru VVER-1000 v Temelíně, tedy poklad pro řešený model.

3 Vyhodnocení řešení

Vyhodnocení řešení se skládá z několika kroků, které jsou podrobněji popsány v této části práce.

3.1 Zpracování výstupu

Serpent po úspěšném dokončení výpočtu vygeneruje data v několika příslušných souborech. Pro účely této práce byly použity soubory s daty rozložení výkonu však jen některé. Soubor "Název_úlohy_core0.m" obsahuje napočtená data potřebná pro výpočet rozložení výkonu na kazetové (K_q) a poproutkové (K_k) úrovni, zatímco soubor "Název_úlohy_res.m" obsahuje základní informace o provedeném výpočtu, dále použité parametry, dobu trvání či koeficient násobení neutronů (K_{eff}). Tyto koeficienty je nutné před porovnáním s referenčním řešením a celkovým vyhodnocením upravit do vhodné formy. K tomu je zapotřebí připravit software pro postupné zpracování s určitou úrovní automatizace.

Prvním krokem je zpracování surových dat, která jsou uložena ve výstupu ze Serpentu. Je nutné, aby program našel konkrétní sekci tohoto souboru, nanormaloval dílčí koeficienty a v neposlední řadě přeuspořádal palivové soubory či palivové proutky do odpovídajícího číslování VK-3. Prakticky to lze blíže popsat například na zpracování koeficientu K_q . Program musí nejdříve otevřít příslušný soubor a načíst data, která si uloží do předem nadefinovaných polí. Nalezení správného segmentu souboru lze samozřejmě provést vícero způsoby. Program použitý pro zpracování vypočtených dat v této práci byl napsán tak, aby našel pevně danou hlavičku, v tomto konkrétním případě řádek s textem lv10, což označuje první hladinu výpočtů, to znamená kazetové výkony. Počet dat, nalezených v této části je též pevně daný. Po načtení těchto hodnot musí program spočítat průměr koeficientu K_q , který je důležitou součástí při normování dat, které spočívá ve vydělení konkrétní hodnoty na dané pozici právě tímto průměrem. V této části jsou data zpracována a připravena na další postup. Dalším úkolem tohoto programu je zajistit správné číslování. Serpent čísluje palivové soubory i palivové proutky vlastním způsobem. Tudiž převod na standardizované číslování VK-3 je důležité hlavně při porovnávání výsledků s jinými kódy. Jelikož se data obsažná v této práci budou nadále v praxi používat, je vhodné zde tento krok udělat. Spočívá ve správném přiřazení konkrétní hodnoty na novou pozici. V tomto případě například hodnota původně na šesté pozici je nově na první pozici. Takto se musí přeuspořádat 163 hodnot. Posledním krokem je výpis takto

získaných dat do nového výstupního souboru s pevně nadefinovaným formátem, což je důležité při strojovém zpracování statistickým programem. Obdobný postup je i u koeficientu K_k , přičemž je dobré si uvědomit, že je v každém ze 163 palivových souborů uloženo 312 palivových proutků. Vhodné je také upozornit na komplikovanější převod číslování. Zde není nutné pouze přeorganizovat palivové soubory a palivové proutky, ale také vložit 19 nulových hodnot na nepalivové pozice obsahující centrální tyč a vodící tyče. Takto upravený soubor tedy ve výsledku obsahuje 331 znormovaných hodnot na nových pozicích v každém palivovém souboru.

Druhým krokem je převést zdrojová data, která byla předzpracována prvním krokem, do standardního datového formátu, kde jsou koeficienty uspořádány ve vhodném pořadí, tedy nejdříve koeficient K_q následován koeficienty K_k pro všechny palivové soubory.

Dalším krokem je analýza řešení, která zahrnuje vyhodnocení symetrie a porovnání s jinými výsledky. Tyto dílčí úkony jsou detailněji popsány v kapitolách, které jsou na ně vyhrazeny.

Tuto proceduru je nutné aplikovat na výsledky všech variant, což je také důvod zavedení částečné automatizace. Konečný výstup po popisovaném postupu je ale stále ve formě textového souboru a pro další operace byl přepracován do tabulky pro jednodušší porovnání i orientaci.

Pro další části zde budou nadefinovány koeficienty a použité parametry.

Koeficienty rozložení výkonu

K_{eff} – koeficient násobení neutronů

K_q – koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů

K_k – koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků v palivových souborech

Koeficient asymetrie α

$$\alpha_{Kx}^{abs} = \max \text{ difference of } (Kx_0, Kx_{+120deg}, Kx_{-120deg}) \quad (3.1)$$

$$\alpha_{Kx}^{rel} = \frac{\max \text{ difference of } (Kx_0, Kx_{+120deg}, Kx_{-120deg})}{\text{Average}(Kx_0, Kx_{+120deg}, Kx_{-120deg})} \quad (3.2)$$

Koeficient asymetrie α je zde vztažen ke 120° rotační symetrii AZ a reprezentuje absolutní či relativní rozdíl tří hodnot K_q , které jsou na stejných orbitálních pozicích daného úseku aktivní zóny. Z toho důvodu by v ideální situaci v modelu, ve kterém by se počítalo s nekonečným množstvím neutronů, byly tyto hodnoty totožné, což by znamenalo, že by model byl symetrický a řešení šlo prohlásit za plně doiterované.

Relativní odchylka

$$\delta_{Kx} = \frac{K_{xref} - K_x}{K_{xref}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

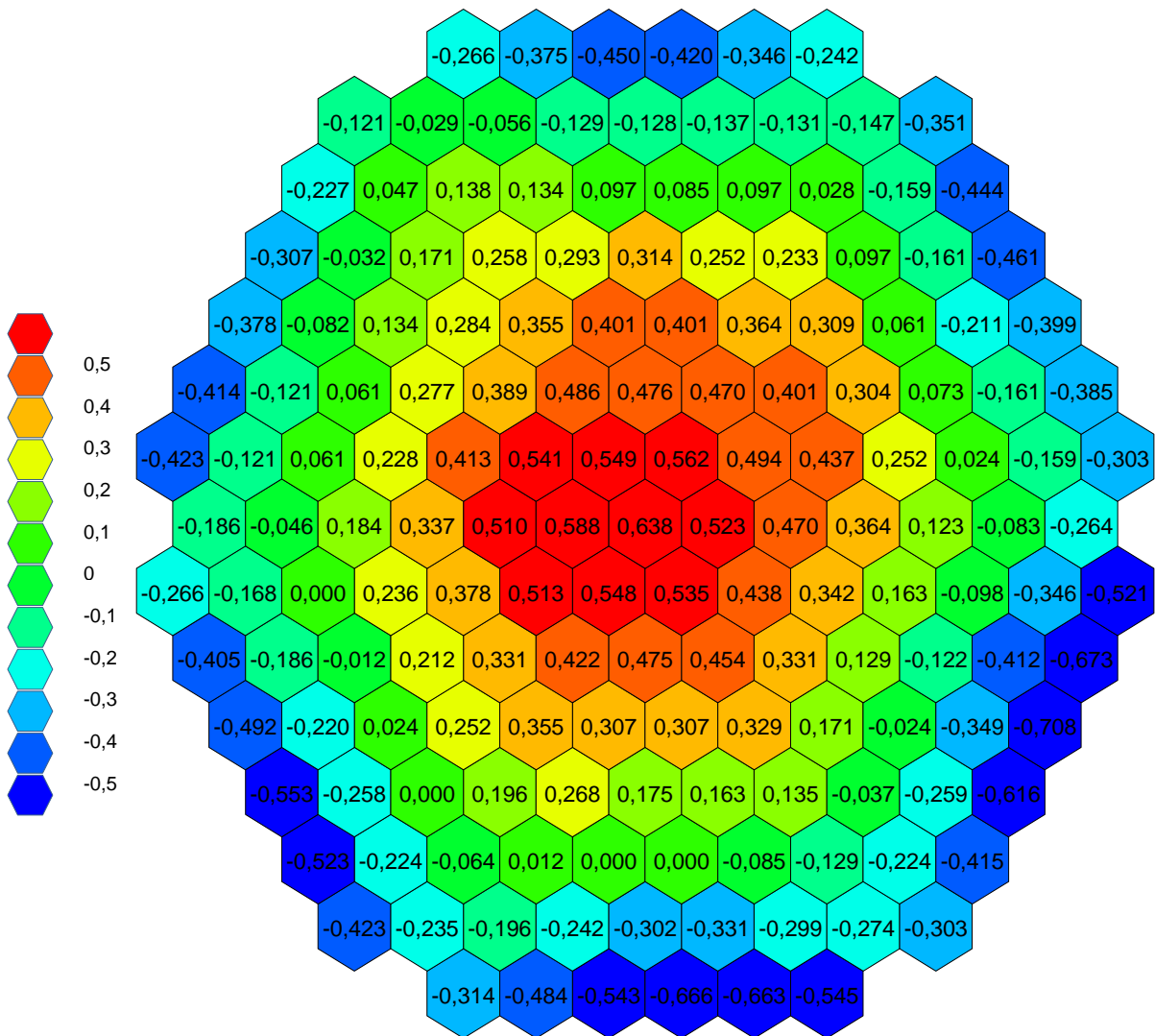
Relativní odchylka daného koeficientu je důležitá veličina použitá v Kapitole 3.2. Jedná se o rozdíl referenční a vypočtené hodnoty dané veličiny vztažené k hodnotě referenční.

3.2 Porovnání s mezinárodním referenčním řešením

V této kapitole je zahrnuto porovnání s mezinárodním referenčním řešením, při kterém byl použit postup popsáný v kapitole předešlé až na poslední krok, kde nebyla zjišťována symetrie daného řešení, která je zahrnutá v kapitole následující, ale byl zkoumán rozdíl jednotlivých koeficientů. Tato data by se zde dala velice jednoduše prezentovat formou tabulky, ale s ohledem na názornost je zvolena grafická forma, kde je hledaný aspekt prezentován barevnou škálou. Nejdříve je uvedena odchylka koeficientu K_{eff} , poté následuje obrázek reprezentující aktivní zónu s uvedenou relativní odchylkou koeficientu K_q . Každý palivový proutek je na sérii zbylých obrázků zobrazen jako šestihran a uvnitř uvedené číslo reprezentuje relativní odchylku koeficientu K_k od reference. Relativní odchylka je vypočtena vzorcem 3.3.

Referenční řešení bylo vypočítáno výpočetním kódem Serpent s knihovnou jaderných dat ENDF/B-VII.1 organizací Škoda JS a.s v Plzni.

Palivové soubory, které jsou zobrazené v této práci, byly vybrány pro reprezentaci dílčích profilací napříč aktivní zónou.



Obrázek 5: Zobrazení relativní odchylky K_q v AZ vůči referenci

Na Obr. 5 je znázorněna relativní odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů vůči referenčnímu řešení. Jak je vidět, největší kladná relativní odchylka je v prostoru středu aktivní zóny. Naopak největší záporná relativní odchylka je na okraji aktivní zóny. Je zde tedy pozorovatelný mírný náklon směrem od středu aktivní zóny, ale chyba je velmi malá.

Při porovnávání vypočítaného a referenčního řešení se zpravidla začíná u koeficientu násobení neutronů K_{eff} . Odchylka tohoto koeficientu činí 12 pcm s neurčitostí 0,6 pcm. Relativní odchylka je 0,012 %.

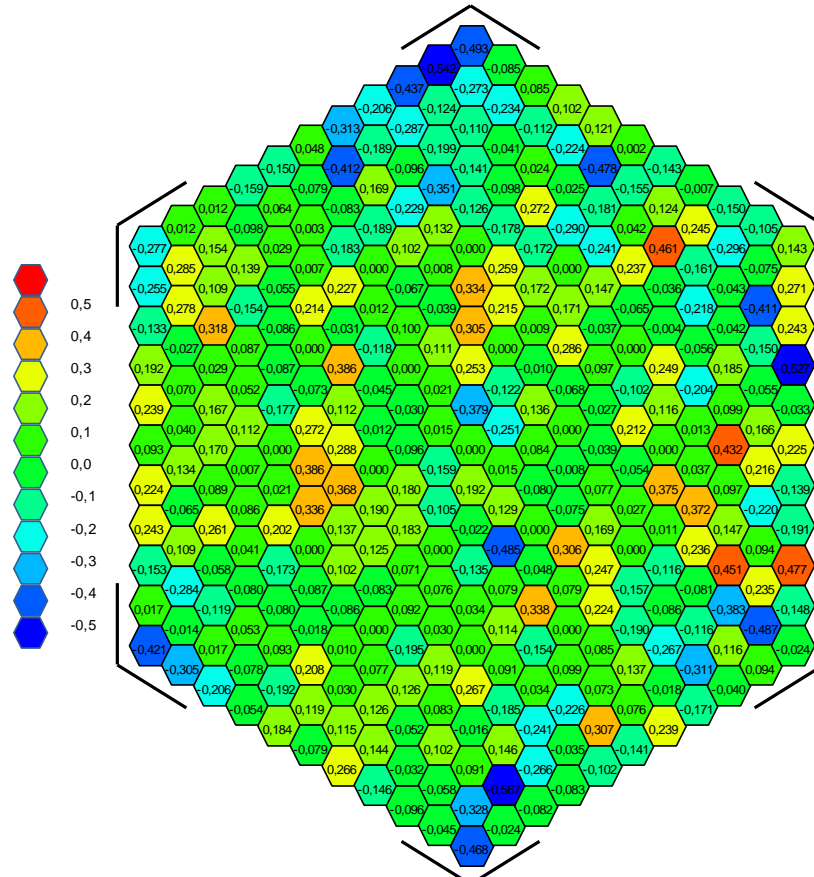
Na úrovni	Min [%]	Max [%]	StrKv	StrArit	Sigma
PS	-0,638	0,708	0,331	0,000	0,332
PP	-0,806	1,057	0,180	0,005	0,180

Tabulka č. 2: Vyhodnocení relativní odchylky řešení od reference

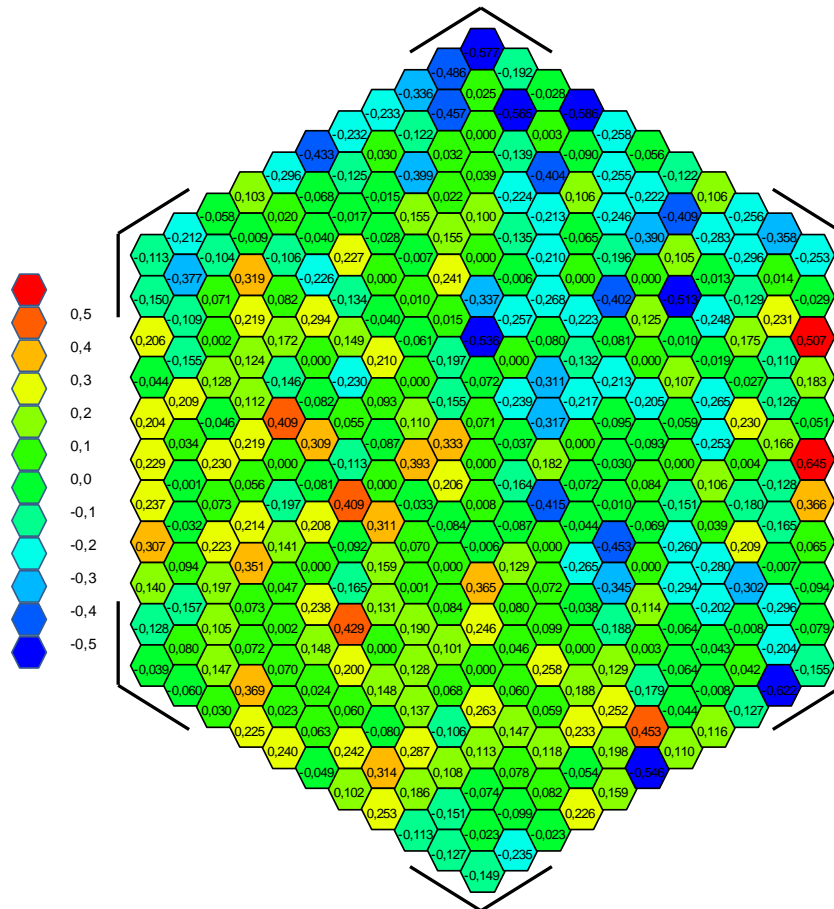
V tabulce č. 2 je vyhodnocení relativní odchylky napříč všemi palivovými soubory a proutky vypočítaného řešení oproti referenčnímu. Největší záporná relativní odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů K_q je -0,638 % a největší kladná relativní odchylka je 0,708 %. Střední kvadratická hodnota této veličiny je 0,331 s neurčitostí 0,332. Střední aritmetický průměr zde nabývá nulové hodnoty. Na úrovni palivových proutků je největší záporná relativní odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků K_k činí -0,806 % a nachází se v palivovém souboru číslo 1 s profilací A40E6 se šesti gadoliniovými proutky. Největší kladná relativní odchylka tohoto koeficientu je 1,057 % a nachází se v palivovém souboru číslo 128, což je palivový soubor typu P36E9, který obsahuje 243 palivových proutků s obohacením 3,6 %, 60 palivových proutků s obohacením 3,3 % a 9 palivových proutků s gadoliniem. Střední kvadratická hodnota této veličiny je 0,180 s neurčitostí 0,180. Střední aritmetický průměr je 0,005.

Z těchto hodnot je vidět, že řešený model je velice přesný, jak na kazetové úrovni, tak i na poproučkové úrovni, a vypočítané hodnoty jsou s přihlédnutím k povaze statistických kódů na obdobné úrovni jako v referenčním řešení. Souhrnně na závěr této kapitoly lze říct, že chyba řešeného modelu je velmi malá a rozhodně se nachází pod úrovní statistické chyby kódu.

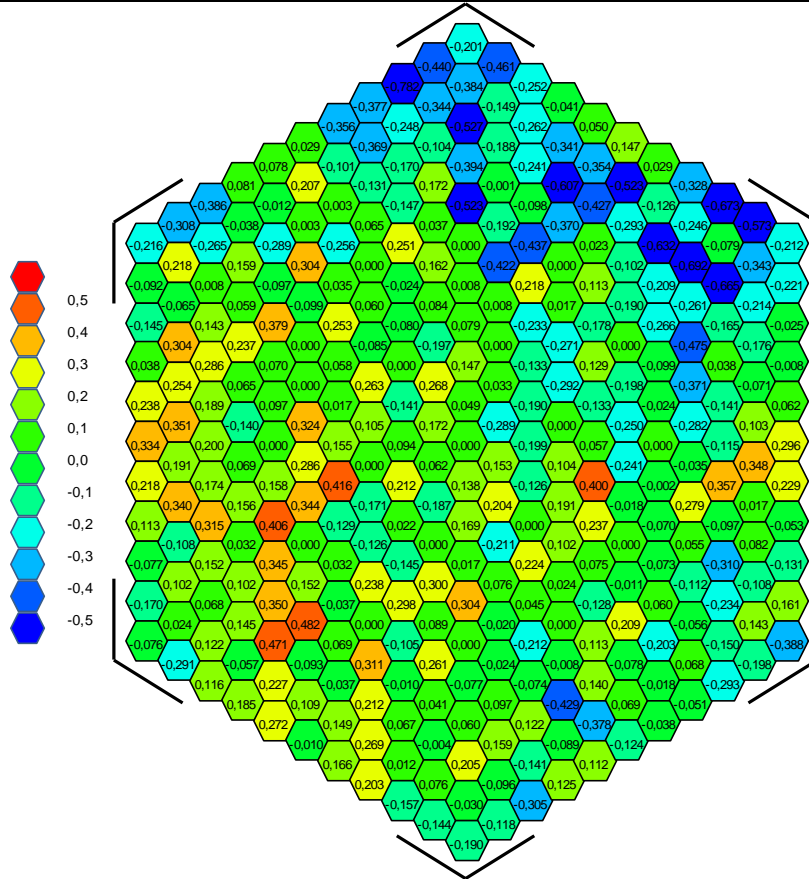
Celková statistika na úrovni palivových souborů je přiložena v příloze č. 1.



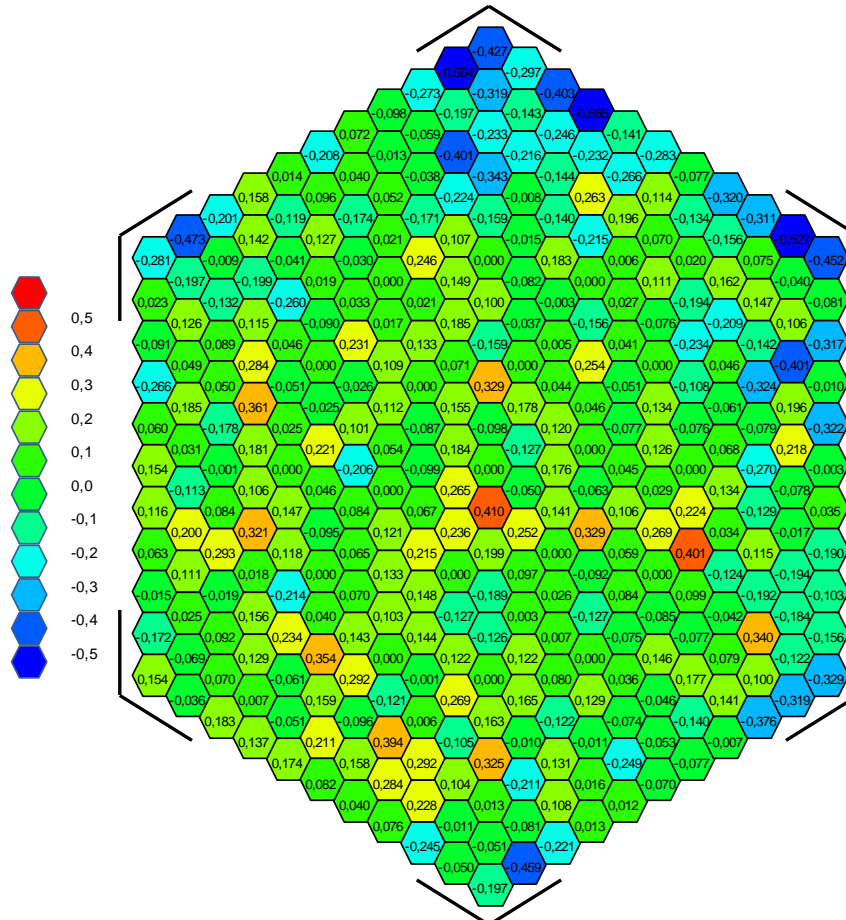
Obrázek 6: Zobrazení porovnání K_k PS č.102(A40E6) s referencí



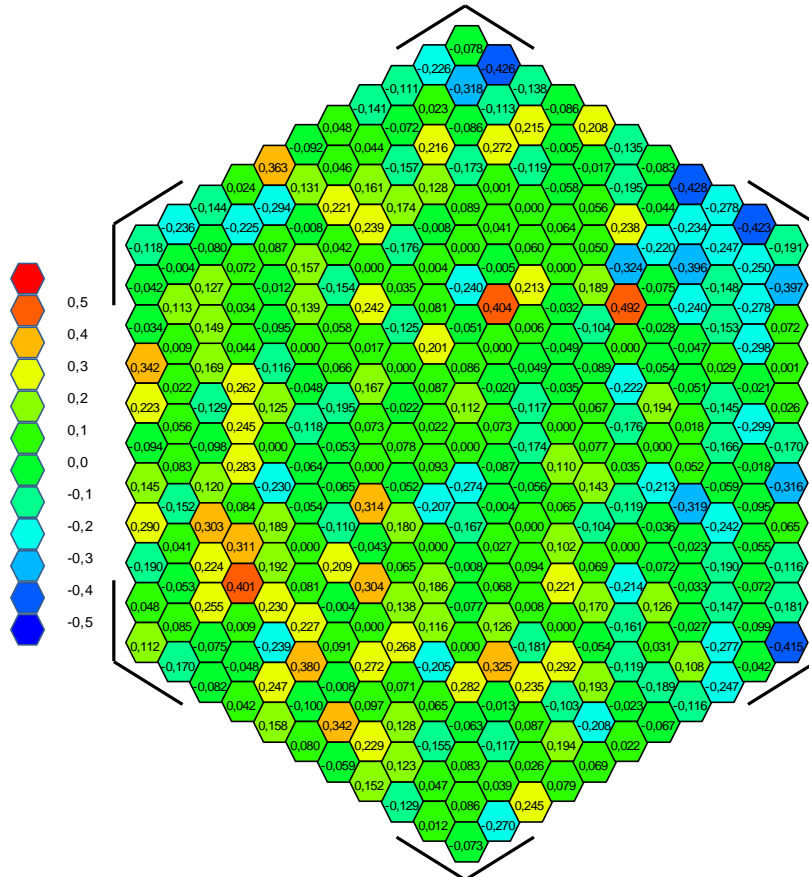
Obrázek 7: Zobrazení porovnání K_k PS č.115 (P40E9) s referencí



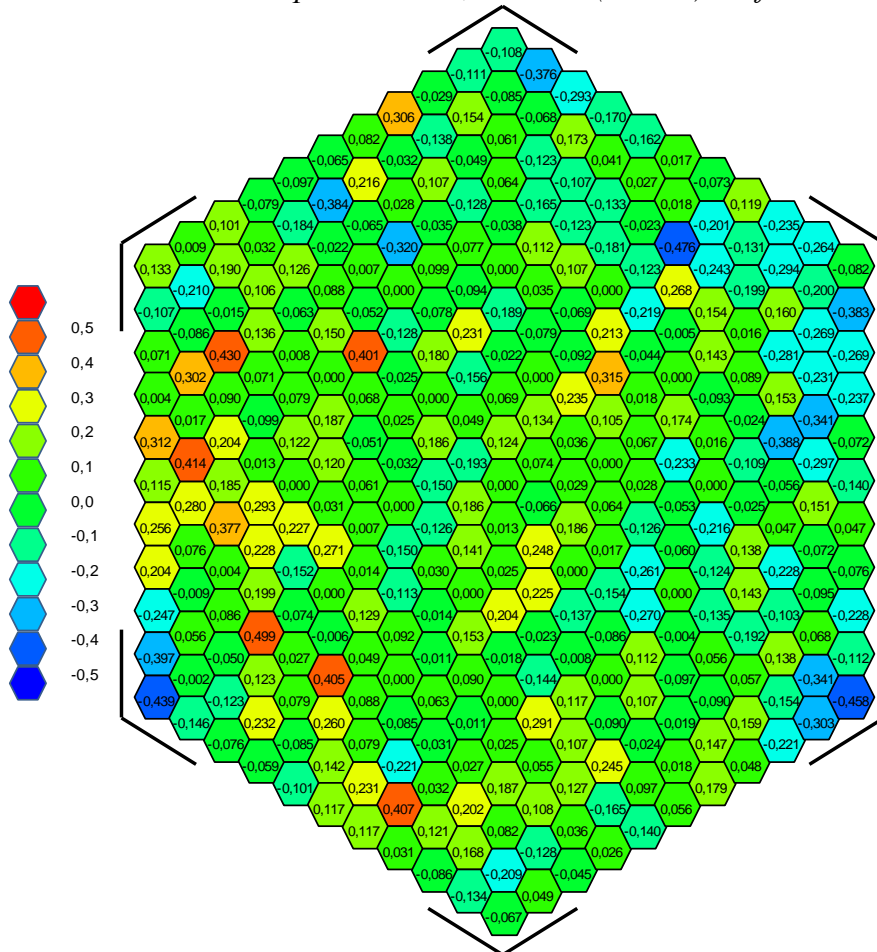
Obrázek 8: Zobrazení porovnání K_k PS č.127 (P36E9) s referencí



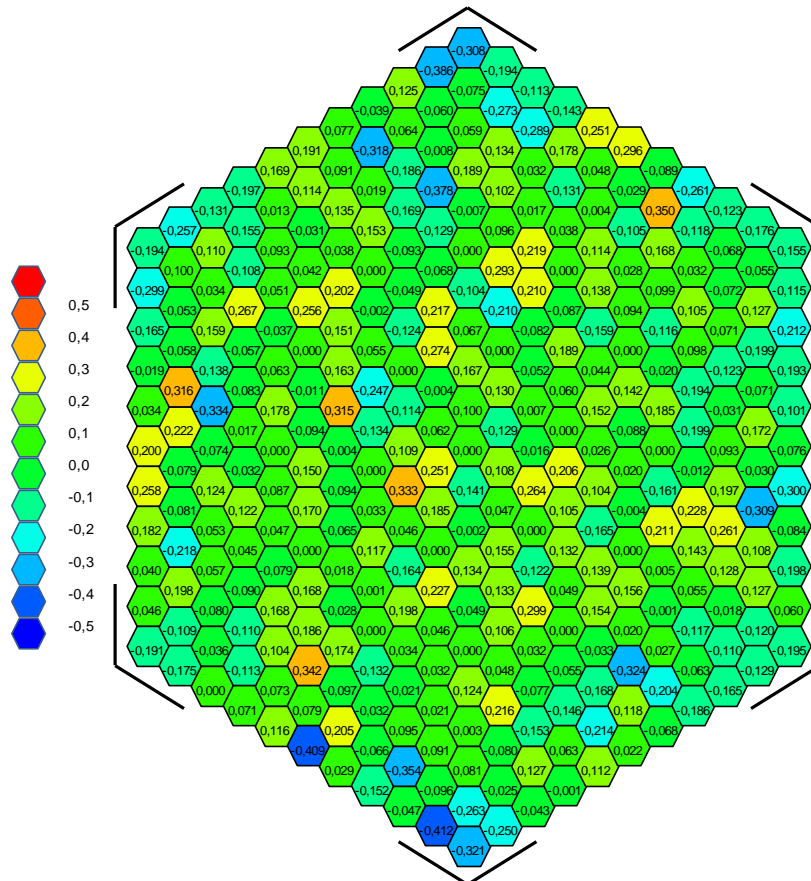
Obrázek 9: Zobrazení porovnání K_k PS č.101 (A20) s referencí



Obrázek 10: Zobrazení porovnání K_k PS č.114 (A30E9) s referencí



Obrázek 11: Zobrazení porovnání K_k PS č.100 (A13) s referencí



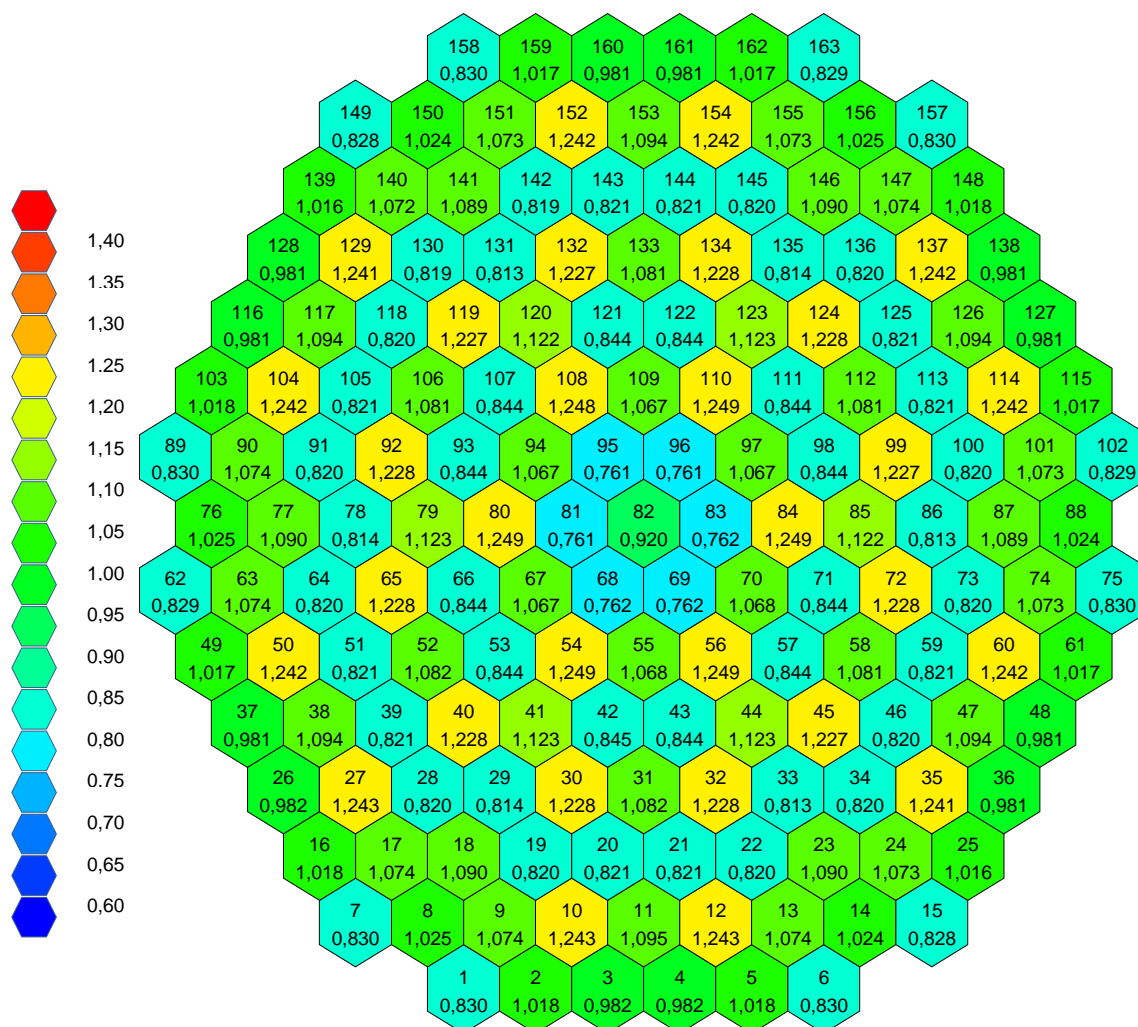
Obrázek 12: Zobrazení porovnání K_k PS č.84 (A30E9) s referencí

3.3 Symetričnost a nelinearita

V této části je znázorněna symetričnost výsledného řešení aktivní zóny, ale i několika vybraných palivových souborů. Analýza symetrie je další důležitý prvek při vyhodnocování řešení. Při nekonečném množství neutronů by řešení bylo naprosto symetrické. To znamená, že hodnota nerovnoměrnosti výkonu palivového souboru číslo 88 by byla totožná s hodnotou palivového souboru číslo 156. Tento ideální výsledek je ovšem vzhledem k výpočetním možnostem nereálný, ale s určitou odchylkou je možné se k němu přiblížit, což je žádoucí. Pokud se hrubé výsledky upraví dle kapitoly 3.1, získané tabulky mohou být stále hůře srozumitelné a množství dat nepřehledné. Proto je tato kapitola koncipována grafickou formou, kdy jsou získaná data prezentována přehlednými obrázky.

U obrázku znázorňující aktivní zónu je každý palivový soubor očíslován v prvním řádku a ve druhém řádku je uveden koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů. V levé části je pak uvedena škála barev, se kterou je pevně spjata barevnost aktivní zóny. U dílčích vybraných palivových souborů je uveden koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků v palivových souborech s jeho číslem i barevná škála, ale navíc je zde znázorněna i poloha palivového souboru v aktivní zóně.

V této části byly zvoleny stejné palivové soubory jako v kapitole 3.2.



Obrázek 13: Zobrazení výsledného rozložení K_q v AZ

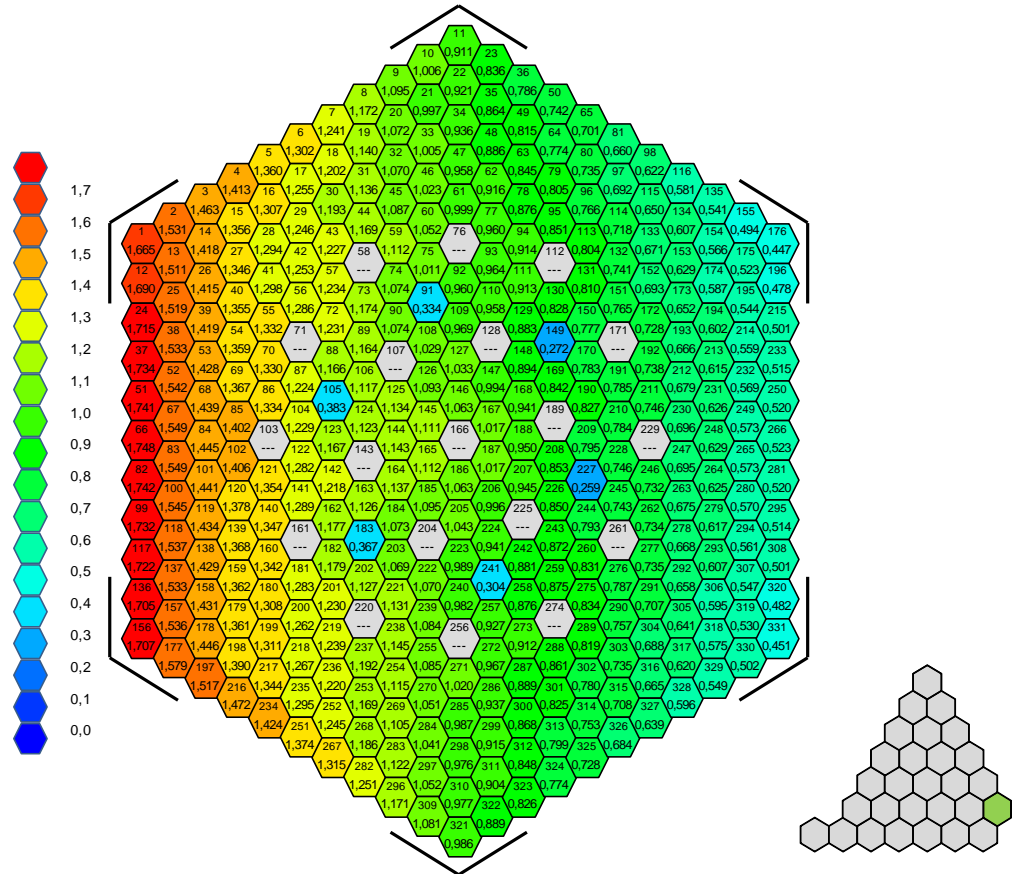
Na Obr. 13 je znázorněna distribuce hodnot koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně. Hodnoty tohoto koeficientu ukazují, že je dané řešení v předpokládaných mezích a je natolik přesné, že hodnoty na orbitální úrovni jsou s určitou odchylkou symetrické.

Nesymetričnost v úrovni	RozptMax	PS	PP	StrKvAbs	RozptRel%	PS	PP	StrKvRel%
PS	0,00200	38	-	0,00092	0,18689	41	-	0,09084
PP	0,00694	3	287	0,00197	0,84844	54	331	0,19827

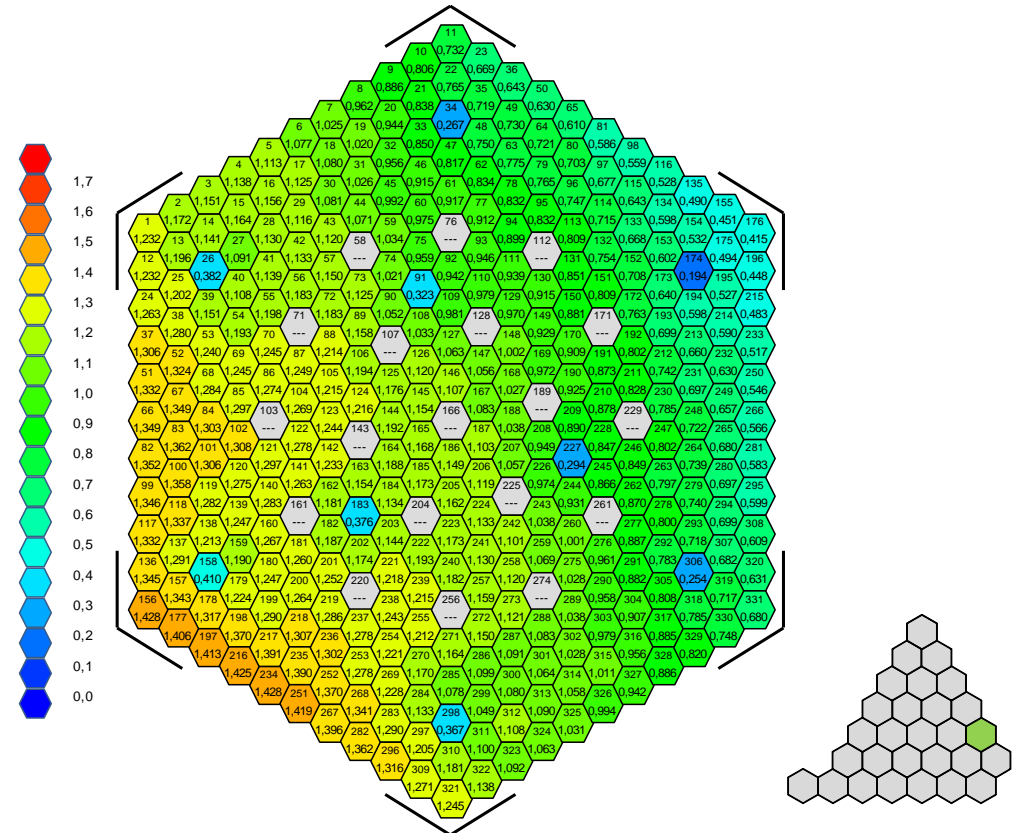
Tabulka č. 3: Vyhodnocení asymetrie řešeného modelu

V Tab. č. 3 je zapsáno vyhodnocení asymetrie řešeného modelu. Na úrovni nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně je největší odchylka absolutního koeficientu asymetrie α_{Kq}^{abs} 0,002 a to v palivovém souboru číslo 38. Tento palivový soubor má profilaci A20, což má klasické rozložení palivových proutků s obohacením 2 %. Střední kvadratická hodnota tohoto koeficientu je 0,00092. Největší odchylka relativního koeficientu asymetrie α_{Kq}^{rel} na této úrovni je 0,18689 a to v palivovém souboru číslo 41. Tento palivový soubor má profilaci taktéž A20. Střední kvadratická hodnota tohoto koeficientu je 0,09084. Na úrovni nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků v palivových souborech je největší odchylka absolutního koeficientu asymetrie α_{Kk}^{abs} 0,00694 a to v palivovém proutku číslo 287 v palivovém souboru číslo 3. Tento palivový soubor je typu P36E9, což znamená, že obsahuje 9 gadoliniových proutků. Střední kvadratická hodnota tohoto koeficientu na dané úrovni je 0,00197. Největší odchylka relativního koeficientu asymetrie α_{Kk}^{rel} je 0,84844 a to v palivovém proutku číslo 331 umístěného v palivovém souboru číslo 54. Tento palivový soubor má profilaci A30E9, což znamená, že obsahuje 303 palivových proutků s obohacením 3 % a 9 palivových proutků s gadoliniem. Střední kvadratická hodnota tohoto koeficientu je 0,19827.

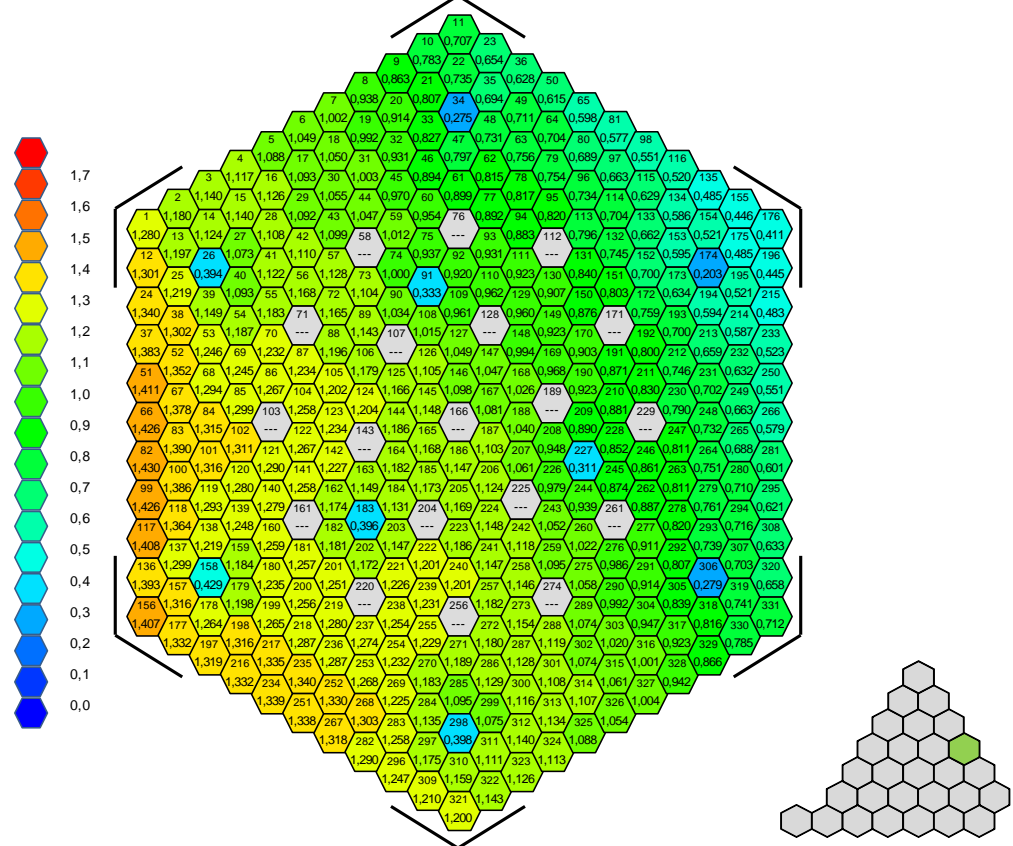
Veškerá zmíněná data v této kapitole jsou podložena velmi rozsáhlými soubory, v příloze č. 2 jsou uvedeny podklady pro data na úrovni palivových souborů uvedených v Tab. č. 3.



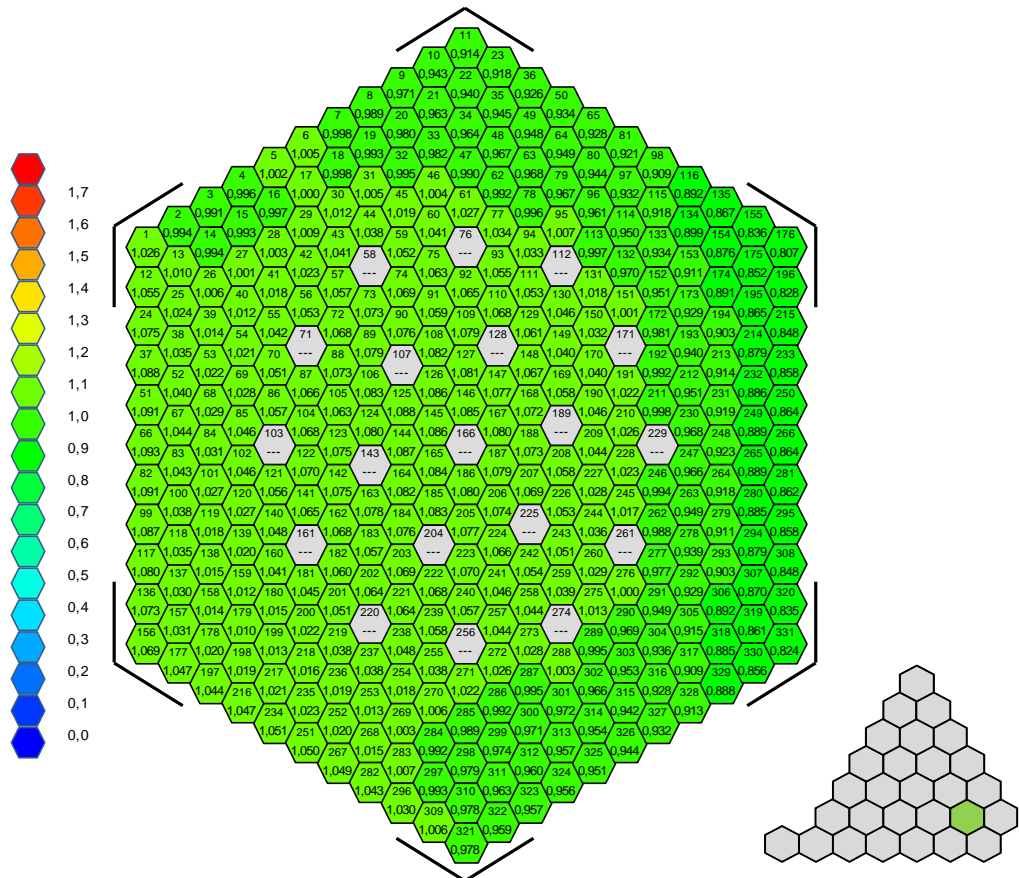
Obrázek 14: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.102 (A40E6)



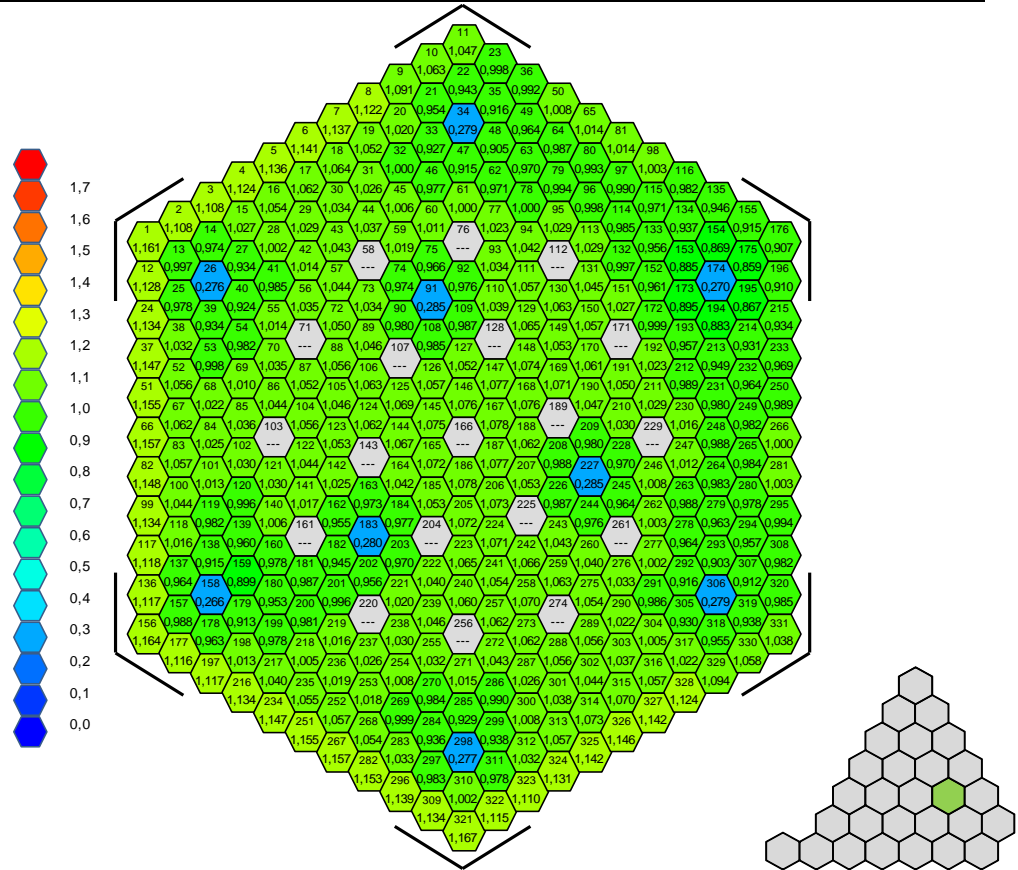
Obrázek 15: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.115 (P40E9)



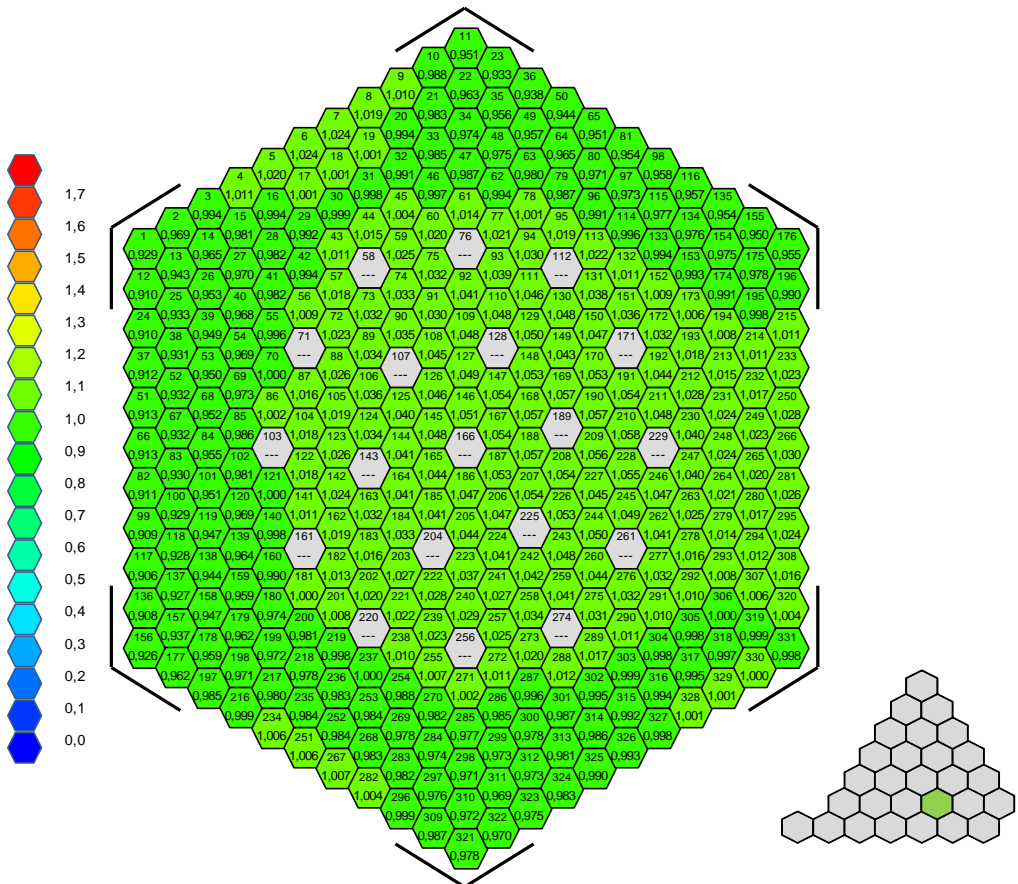
Obrázek 16: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.127 (P36E9)



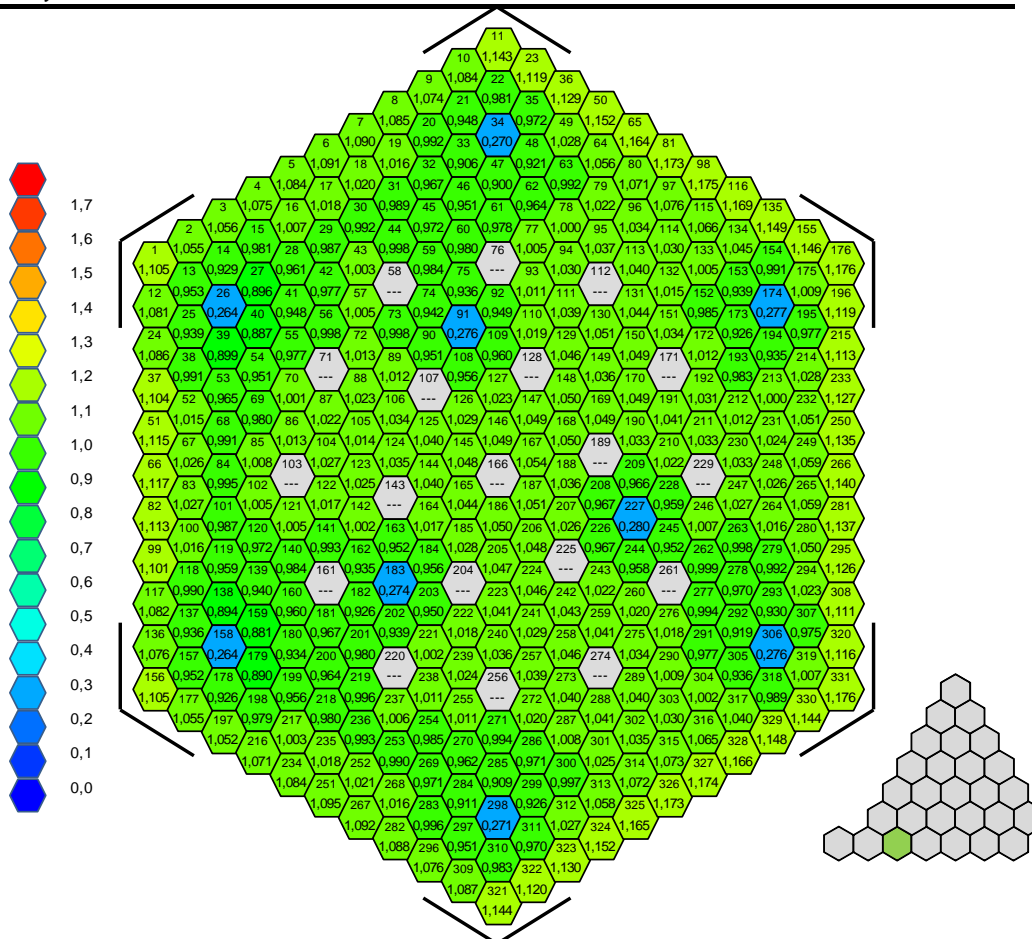
Obrázek 17: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.101 (A20)



Obrázek 18: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.114 (A30E9)



Obrázek 19: Zobrazení rozložení výkonu v PS č.100 (A13)



Obrázek 20: Zobrazení rozložení výkonu v PS č. 84 (A30E9)

Z pohledu samostatných palivových souborů je situace komplikovanější. Z důvodu rozdílných typů palivových souborů, ale i jejich polohy v aktivní zóně, je vidět, že rozmístění koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků v palivových souborech se mění. V závislosti na vzdálenosti od středu aktivní zóny se projevuje určitý náklon. Palivový soubor číslo 102 je nejdále od středu aktivní zóny a náklon rozložení výkonu je zřetelný. Situace se zlepšuje směrem do středu aktivní zóny a palivový soubor číslo 101 a 100 jsou téměř bez náklonu. Zajímavý je palivový soubor číslo 84, na kterém je, ačkoliv se nachází nejbližše středu aktivní zóny ze všech znázorněných palivových souborů, vidět určité zhoršení rozložení výkonu. Je to zapříčiněno hlavně tím, že se jedná o jiný typ palivového souboru a je zde tudíž vidět vliv různých palivových proutků na symetrii, zejména těch, které obsahují vyhořívající absorbátor.

4 Výběr parametrů

Pro vybrané analýzy bylo potřebné určit optimální parametry, při kterých je řešení dostatečně přesné a využití výpočetních serverů zůstává zároveň efektivní. Vzniklo 12 testovacích variant, které se lišily buď počtem proběhlých cyklů, nebo počtem neutronů. Konkrétní hodnoty jsou uvedené v Tab. 4. V téže tabulce jsou napsány i hodnoty K_{eff} , maximálního absolutního rozptylu K_k a relativní rozptyl K_k . Tyto parametry zohledňují přesnost daného řešení na úrovni celkového modelu a zároveň i na úrovni palivových proutků. Podle těchto kritérií byla vybrána čtvrtá varianta jako vyhovující.

Optimální počet neutronů je tedy 25 428 000, přičemž se počítá 600 cyklů. Tato hodnota neutronů odpovídá přesně takové situaci, kdy je počítáno s 500 neutrony na jeden palivový proutek. Tento poznatek je velice důležitý pro další výpočty, protože se použijí právě tyto parametry, při snížení požadavků by již došlo k takové odchylce, která by byla nezanedbatelná, zatímco při vyšších nárocích je sice odchylka menší, a tím pádem řešení přesnější, ale výpočetní čas při použití stejných výpočetních zdrojů markantně roste. Právě čas a výpočetní zdroje jsou důležité parametry například při prvním výpočtu nového modelu, kdy je důležité nejdříve zjistit, zda obsahuje chyby či nepřesnosti, které mají být opraveny, a poté je přepočten s vyššími nároky.

Dalším příkladem je výpočet s větším počtem variant. Takto zvolené parametry poskytují dostačující přesnost při adekvátním využití výpočetních zdrojů v rozumném časovém úseku.

Neutrony	Cykly	Čas [hod]	K_{eff}	RozptMax_Kk [-]	RozptRel_Kk [%]	Počet neutronů na proutek
2 542 800	600	7,58	1,00323	0,04149	4,75857	50
7 628 400	600	24,04	1,00324	0,02543	2,22161	150
12 714 000	600	41,22	1,00326	0,01892	1,94450	250
25 428 000	600	85,03	1,00326	0,00838	0,89412	500
2 542 800	1100	13,98	1,00326	0,31600	3,26210	50
7 628 400	1100	43,54	1,00326	0,01900	2,06967	150
12 714 000	1100	72,74	1,00326	0,01534	1,42980	250
25 428 000	1100	149,72	1,00326	0,00849	0,94768	500
2 542 800	1600	18,94	1,00325	0,02360	2,42432	50
7 628 400	1600	56,43	1,00327	0,02673	2,31131	150
12 714 000	1600	108,74	1,00326	0,01102	1,23788	250
25 428 000	1600	210,49	1,00326	0,00694	0,84844	500

Tabulka 4: Vybrané parametry testovacích variant

Počty neutronů jsou vypočítány v závislosti na množství palivových souborů a proutků v nich uložených. Celá tabulka se všemi důležitými parametry je obsažena v příloze č. 3.

Dílčí varianty byly vypočítány na serverech používajících 48 jader procesoru Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v3.

5 Speciální analýzy

V této části jsou analyzovány některé parametry ovlivňující výsledné koeficienty, dle kterých je i kapitola členěna. Jednotlivé varianty vycházejí z původního modelu, a tudíž se dají navzájem porovnávat. Jsou zde uvedeny modely v různých situacích, které lze dále použít jako reference pro pomalejší difúzní kódy. Je zde nutné podotknout, že na výpočty v této kapitole byly použity jiné výpočetní servery, a to univerzitní servery ZČU.

5.1 Vliv různých zdrojů jaderných dat

Vliv různých zdrojů jaderných dat je vcelku zajímavý pohled na vytváření modelů, jelikož v samotném vstupu pro výpočet se kromě odkazu na použité knihovny nic nezmění. Byl zde využit vytvořený model, u kterého se testovaly běžně používané knihovny jaderných dat. V knihovnách se mohou lišit počty jednotlivých izotopů, ale i samotné hodnoty důležitých veličin, jako je třeba účinný průřez, produkty štěpení nebo produkty rozpadů radioaktivních prvků. Pak záleží pouze na tom, z jaké lokace se tvůrce modelu rozhodne využít knihovny a jakou konkrétní verzi knihovny si vybere. V této práci byly použity dvě nejpoužívanější knihovny v Evropě a USA. Existují ale i jiné knihovny jaderných dat, jako například japonské, ruské či čínské.

Zdroje jaderných dat, jinak také knihovny jaderných dat, jsou vyhodnocené datové soubory, které na základě velkého počtu experimentálních výsledků a teoretických výpočtů nabízejí jednu doporučenou hodnotu dané veličiny.

Prvním typem zdroje jaderných dat použitým v této práci je americká knihovna ENDF (Evaluated Nuclear Data File) ve verzi ENDF/B-VII.1. Tato knihovna je používána od 22. prosince roku 2011 a je rozdělena na několik částí. Vydána byla skupinou CSEWG (The Cross Section Evaluation Working Group).

Dalším typem je novější varianta stejné knihovny, a to ENDF/B-VIII.0. Ta byla vydána roku 2018. Autoři přidali některé izotopy a zohledněny některé změny zásadní hlavně pro neutronové reakce, které mají dopad při simulaci jaderné kritičnosti a jsou zde začleněny i hlavní aktualizace důležitých mezinárodních norem. Veškeré inovace v přesnosti, ale i rozsáhlosti, informací a dat byly ovlivněny vzrůstajícím výpočetním výkonem. [8]

Použita byla i evropská knihovna JEF 2.2. Tato knihovna byla publikována v lednu roku 1992. Použitá zkratka znamená The Joint Evaluated File. Obsahuje obdobné

informace, které jsou ale z jiných zdrojů.

Jako poslední zdroj jaderných dat v této analýze byla použita novější verze té předešlé, a to JEFF 3.3, což znamená The Joint Evaluated Fission and Fusion File. Tato verze byla publikována 20. listopadu 2017. Důvodem aktualizace bylo zvýšení přesnosti uvedených dat, jejich rozsah a modernizace.

Použitá knihovna	Odchylka [pcm]	Sigma [pcm]	Odchylka [%]
ENDF/B-VII.1	-3,0	1,1	-0,003
ENDF/B-VIII.0	192,0	1,1	0,191
JEF 2.2	200,0	1,1	0,199
JEFF 3.3	474,0	1,1	0,472

Tabulka č. 5: Vyhodnocení relativní odchylky dílčích analýz na úrovni AZ

V Tab. č. 5 jsou uvedeny relativní odchylky koeficientu násobení neutronů dílčích analýz vůči již vypočítanému řešení z kapitoly 3. Nejmenší odchylku tohoto koeficientu má knihovna ENDF/B-VII.1, a to -3,0 pcm s neurčitostí 1,1 pcm. To odpovídá relativní odchylce -0,003 %. Ostatní knihovny již mají nezanedbatelnou odchylku od původního řešení. Nejblíže je pak knihovna ENDF/B-VIII.0 s odchylku koeficientu násobení neutronů 192 pcm se stejnou neurčitostí, což odpovídá relativní odchylce 0,191 %. Naopak největší odchylku má řešení, které použilo jako zdroj jaderných dat knihovnu JEFF 3.3, a to 474 pcm se stejnou neurčitostí, což odpovídá relativní odchylce 0,472 %.

Použitá knihovna	Na úrovni	Min [%]	Max [%]	StrKv	StrArit	Sigma
ENDF/B-VII.1	PS	-0,663	0,506	0,268	0,001	0,269
	PP	-1,644	1,477	0,300	0,000	0,300
ENDF/B-VIII.0	PS	-1,730	2,164	1,071	0,012	1,074
	PP	-1,442	1,536	0,354	-0,001	0,354
JEF 2.2	PS	-2,991	3,091	1,605	0,007	1,610
	PP	-1,823	2,398	0,470	0,030	0,473
JEFF 3.3	PS	-1,958	1,314	0,827	-0,005	0,830
	PP	-2,018	1,472	0,362	-0,010	0,362

Tabulka č. 6: Vyhodnocení relativní odchylky dílčích analýz od vypočítaného řešení

V Tab. č. 6 jsou uvedeny relativní odchylky dílčích analýz vůči vypočítanému řešení na hlubších úrovních. Na úrovni palivových souborů je nejbližší původnímu řešení opět řešení s knihovnou ENDF/B-VII.1. Největší zápornou relativní odchylku koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů K_q má hodnotu -0,663 %, což je nejméně ze všech variant. Situace je stejná i pro ostatní hodnoty na této úrovni. Největší kladná relativní odchylka tohoto koeficientu je 0,506 %. Střední kvadratická hodnota této veličiny je 0,268 s neurčitostí 0,269. Střední aritmetický průměr je zde 0,001. Z tabulky vyplývá, že jako druhá nejpřesnější varianta je řešení s použitou knihovnou JEFF 3.3. Největší zápornou relativní odchylku koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů má totiž hodnotu -1,958 % a největší kladná relativní odchylka tohoto koeficientu je 1,314 %. Střední kvadratická hodnota této veličiny je 0,827 s neurčitostí 0,830. Střední aritmetický průměr zde nabývá hodnoty -0,005.

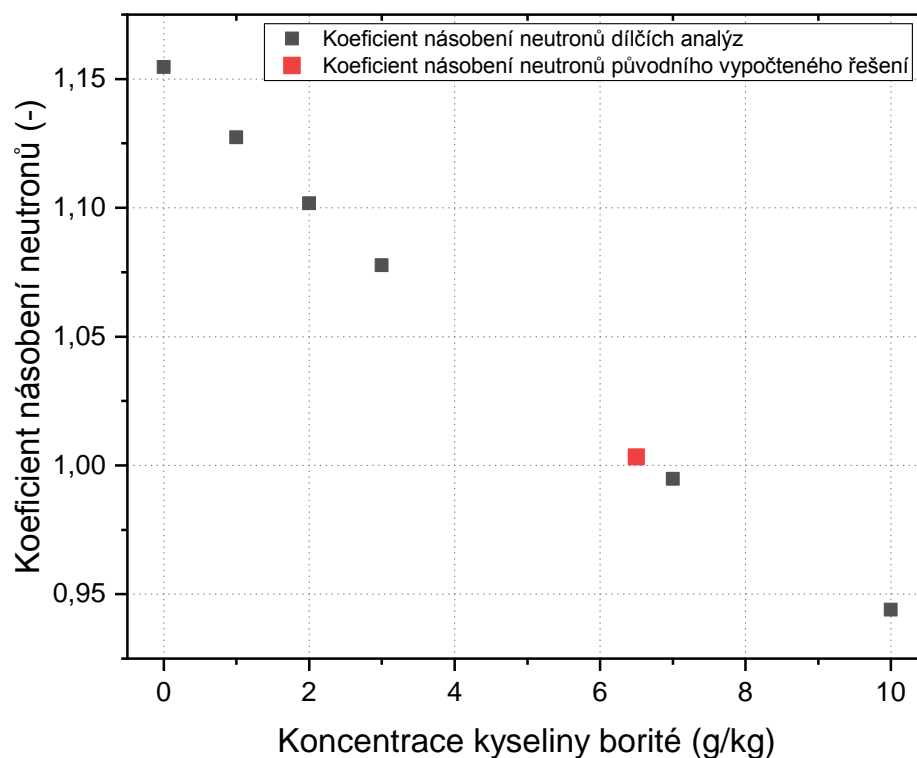
Na úrovni palivových proutků je ovšem nejbližší vypočítanému řešení varianta s knihovnou ENDF/B-VIII.0, kde největší relativní záporná odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků K_k činí -1,442 % a zároveň největší kladná relativní odchylka je 1,536 %. Střední kvadratická hodnota této veličiny je 0,354 s neurčitostí 0,354. Střední aritmetický průměr je zde -0,001.

5.2 Vliv koncentrace kyseliny borité

Taktéž koncentrace kyseliny borité v chladiivu má vliv na daný model třeba v podobě změny koeficientu násobení. Napsaná hodnota koncentrace kyseliny borité ve vodě v zadání, se kterou byl počítán původní model, byla 6,5 g/kg.

Koncentrace kyseliny borité [g/kg]	Koeficient násobení neutronů
0	1,1547
1	1,1273
2	1,1017
3	1,0776
7	0,9948
10	0,9440

Tabulka č.7: Závislost K_{eff} na různé koncentraci kyseliny borité



Graf č. 1: Závislost K_{eff} na různé koncentraci kyseliny borité

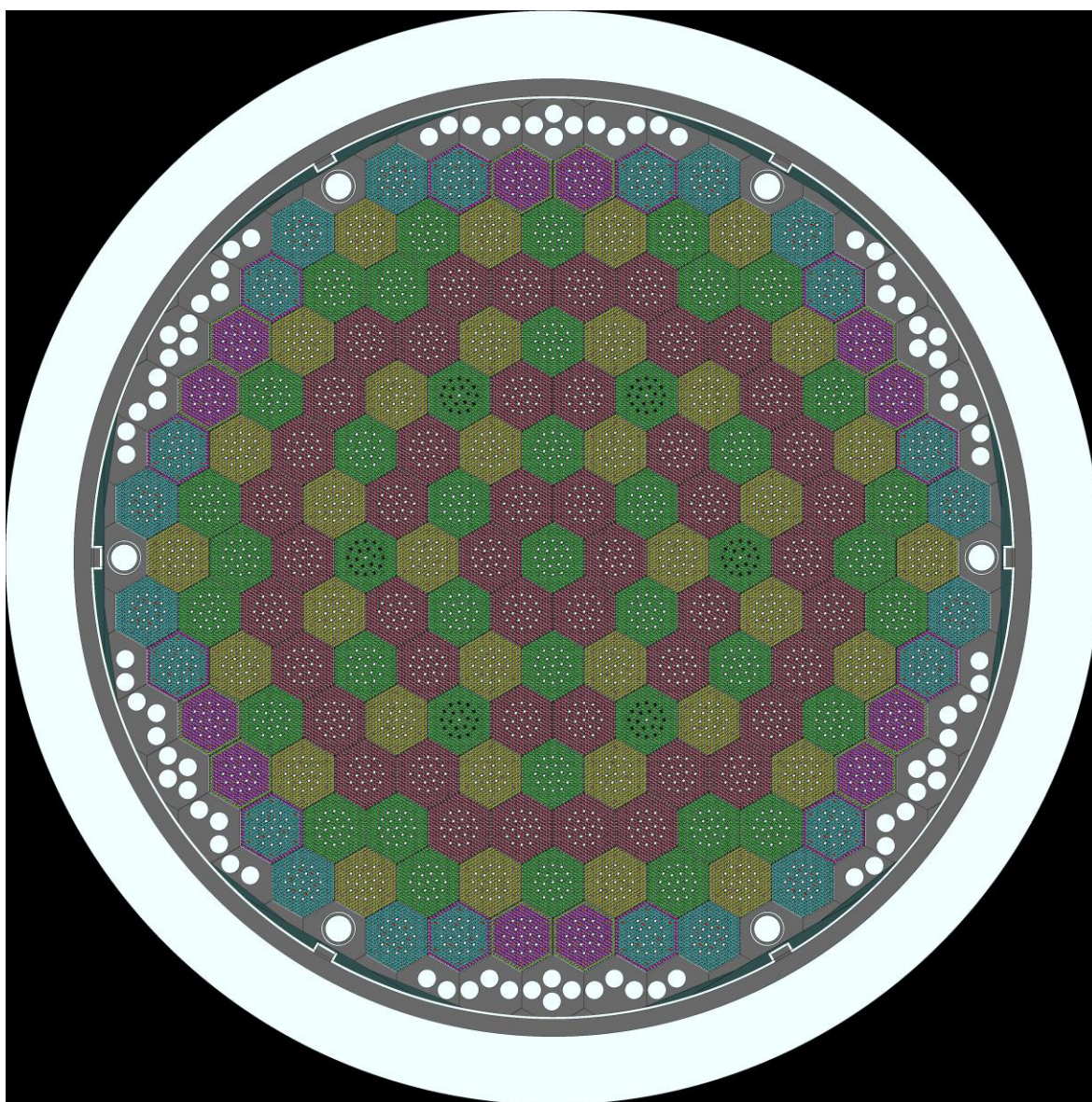
V Tab. č. 7 je vidět závislost koeficientu násobení neutronů na koncentraci kyseliny borité ve vodě. Tato závislost je vynesena do Grafu č. 1. Šedou značkou jsou označeny hodnoty dílčích analýz, přičemž hodnota původního vypočítaného řešení je červená.

První čtyři varianty koncentrace kyseliny borité jsou nad mezí kritičnosti, což je hranice, kdy koeficient násobení neutronů nabývá hodnoty 1, přičemž poslední dvě varianty se nacházejí pod mezí kritičnosti. Jak je vidět na uvedené závislosti, s přibývajícím koncentrací kyseliny borité je reaktor více podkritický a s ubývajícím koncentrací kyseliny borité je reaktor více nadkritický. Původní vypočítané řešení je velmi blízké kritickému stavu.

Vznikly zde tedy dílčí referenční varianty pro porovnání makrokódů s různou koncentrací kyseliny borité.

5.3 Vliv zasunutí regulačních orgánů

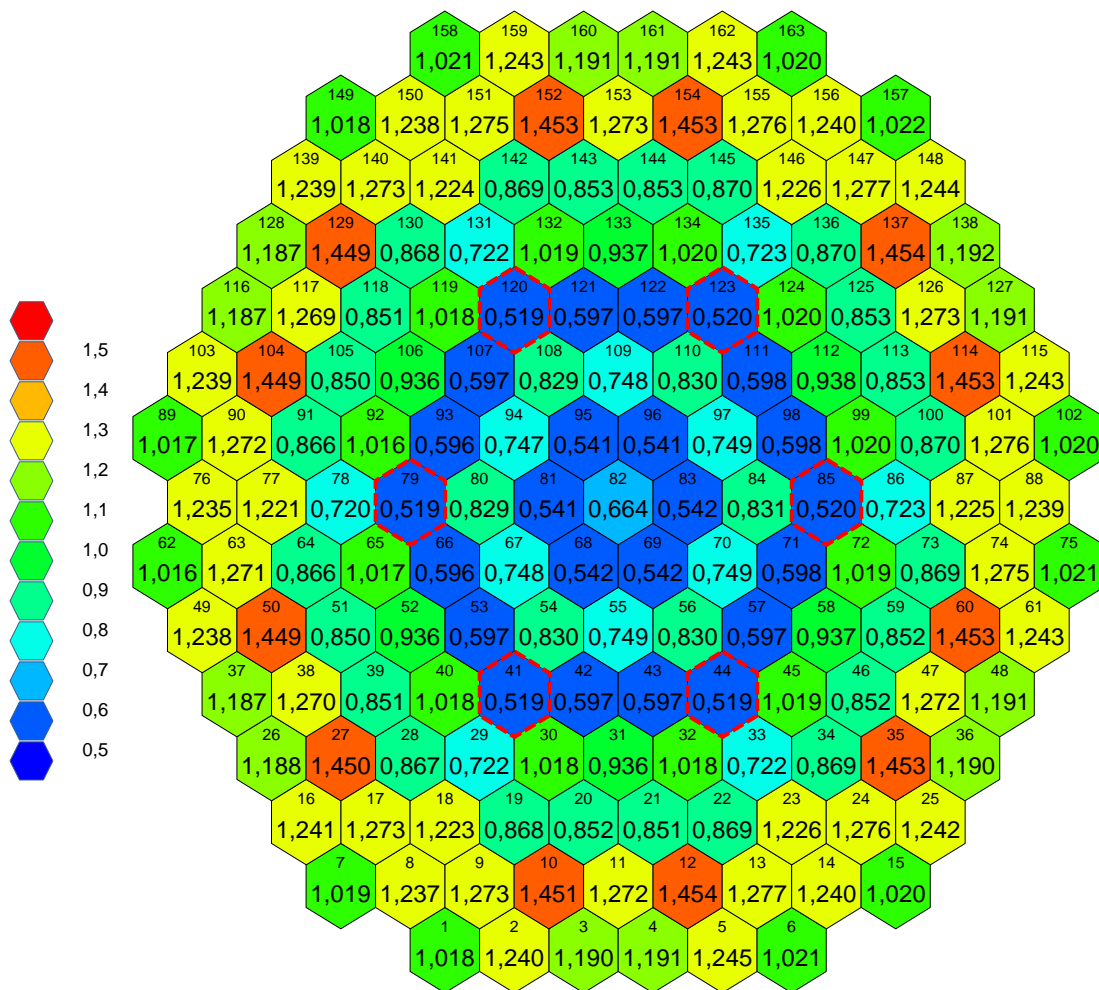
V poslední části této kapitoly je ukázán vliv zasunutých klastrů. Řešený model byl využit jako základ pro několik vybraných analýz spojených s touto problematikou. Nejdříve byly zasunuty regulační orgány pouze v desáté skupině, poté ve všech skupinách, ve kterých se nacházejí, a nakonec pouze v jedné kazetě. Dále byly také použity dva druhy absorbátorů. Tyto analýzy jsou využity pro porovnání přesnosti výpočtů s výpočtním kódem Moby-dick. To ale není účelem této práce, proto zde nebude toto porovnání zpracováno.



Obrázek č. 21: Vyobrazení polohy desáté skupiny v AZ

Tato část práce je zaměřena pouze na úplné zasunutí regulačních orgánů desáté řídící skupiny, přičemž byl použit absorbátor B_4C , tedy karbid bóru. Pozice desáté skupiny v aktivní zóně je znázorněna na Obr. č. 21, kde jsou zasunutá klastry černě odlišeny.

Při porovnávání tohoto a vypočítaného řešení, tedy při zasunutí regulačních orgánů, dojde k poklesu koeficientu násobení neutronů K_{eff} a reaktor se stane podkritický. Odchyłka tohoto koeficientu činí -743 pcm s neurčitostí 0,8 pcm, což má za následek celkem velký výkonový pokles.



Obrázek 22: Zobrazení rozložení K_q v AZ po zasunutí klastrů

Na Obr. 22 je znázorněna distribuce hodnot koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně po úplném zasunutí regulačních orgánů v desáté skupině, jejíž poloha je zvýrazněna červeným obrysem daných palivových souborů. Barevná škála i měřítko zde bylo zachováno z původního zobrazení rozložení výkonu palivových souborů. Díky tomu lze tyto dva obrázky, a s tím obě varianty, porovnat. Z daných hodnot je zřejmý celkový pokles výkonu, ale největší výkonový propad lze pozorovat právě ve středu aktivní zóny, kde se nachází zasunuté klastry. Hodnota výkonu palivového souboru (K_q) v desáté řídicí skupině poklesla z hodnoty 1,123 na hodnotu 0,519, což lze procentuálně vyčíslit hodnotou -53,8 %.

I na úrovni koeficientu rozložení výkonu palivových prouků je největší pokles v palivových souborech se zasunutými regulačními orgány, kde lze konkrétní hodnota největšího poklesu vyčíslit hodnotou -42,3 %.

Po spadnutí regulačních orgánů narostla záporná podkritičnost, to znamená, že zasunuté klastry mají váhu 743 pcm.

Závěr

Hlavním cílem této práce byla validace výpočetního kódu Serpent. Za tímto účelem byl nezávisle vytvořen 2D model aktivní zóny reaktoru VVER-1000 s realistickou palivovou vsázkou. Použitá palivová vsázka zahrnuje i 4 typy palivových souborů, které obsahují palivové proutky s vyhořívajícím absorbátorem obsahujícím gadolinium.

Samotné vyhodnocení vypočítaného řešení zahrnuje výpočet odchylky zpracovaných dat s daty referenčními. Řešený model je velmi přesný, jak na kazetové úrovni, tak i na poproutkové úrovni. Odchylka koeficientu násobení neutronů činí 12 pcm s neurčitostí 0,6 pcm. Největší záporná relativní odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových souborů K_q je -0,638 % a největší kladná relativní odchylka tohoto koeficientu je 0,708 %. Na úrovni palivových proutků je největší záporná relativní odchylka koeficientu nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků K_k činí -0,806 % a největší kladná relativní odchylka tohoto koeficientu je 1,057 %. Vypočítané hodnoty jsou s přihlédnutím k povaze statistických kódů na obdobné úrovni jako v referenčním řešení.

Dalším faktorem přesnosti daného výpočetního kódu je symetričnost vypočítaného řešení. Největší odchylka absolutního koeficientu asymetrie na úrovni palivových souborů α_{Kq}^{abs} je 0,002 a největší odchylka relativního koeficientu asymetrie α_{Kq}^{rel} na této úrovni je 0,18689. Na úrovni nerovnoměrnosti rozložení výkonu palivových proutků v palivových souborech je největší odchylka absolutního koeficientu asymetrie α_{Kk}^{abs} 0,00694 a největší odchylka relativního koeficientu asymetrie α_{Kk}^{rel} je 0,84844. Z těchto hodnot vyplývá, že řešení je natolik přesné, aby hodnoty na orbitální úrovni byly s určitou velmi malou odchylkou symetrické.

Pro vypracování dalších vybraných analýz bylo zapotřebí definování optimálních parametrů z hlediska výkonové náročnosti, aby dané řešení bylo stále dostatečně přesné, ale aby byla zároveň dosažena určitá efektivita výpočtu. Optimální počet neutronů na jeden cyklus byl tedy vybrán jako 25 428 000, přičemž se počítá 600 cyklů. Tato hodnota neutronů odpovídá přesně takové situaci, kdy je počítáno s 500 neutrony na jeden palivový proutek. Tyto hodnoty nemusejí být použity výhradně pro zpracování této práce, ale mohou být použity při podobných výpočtech jako první volba pro zjištění správnosti navržené geometrie či materiálů.

S těmito údaji bylo možné nad rámec zadání diplomové práce zpracovat další 3

vybrané analýzy zahrnující vliv jaderných dat, koncentrace kyseliny borité ve vodě a zasunutí regulačních orgánů vybrané řídicí skupiny. Tyto analýzy jsou důležité pro validaci difúzních makrokódů.

Z důvodu změny výpočetních serverů jsem v rámci první zmiňované analýzy znovu vypočítal stejně zadanou úlohu jako porovnávané řešení s referenčním, pouze s optimálními parametry. Toto řešení používá knihovnu ENDF/B-VII.1 a jak je v kapitole 5.1 vidět, toto řešení bylo nejblíže tomu původnímu. Proto byla vždy uvedena i druhá varianta, která se blížila k původnímu řešení. Je tedy jasné, že řešení používající data z knihovny ENDF/B-VIII.0 bylo přesnější, než výpočty používající data z ostatních zdrojů, protože při použití evropských knihoven byla odchylka většinou větší.

Další analýzou bylo zkoumání vlivu koncentrace kyseliny borité na vytvoření sady úloh pro validaci makrokódu. Se snižující se koncentrací kyseliny borité z hodnoty stanovené v zadání úlohy FullCore se reaktor stával nadkritický a naopak s narůstající koncentrací kyseliny borité se reaktor stával podkritický.

Zasunutí klastrů zapříčilo velký pokles výkonu, stejně jako poměrně velkou deformaci rozložení výkonu, zejména pak na úrovni palivových proutků přímo v palivových souborech obsahující desátou skupinu regulačních orgánů. Také byl názorně vidět velký výkonový pokles na úrovni palivových souborů ve středu aktivní zóny.

Získaná data budou publikována jako součást mezinárodního srovnání AER (The Atomic Energy Research).

Použitá literatura

- [1] JANOŠEK, Radek. Výpočet vyhořívání jaderného paliva reaktoru VVER 1000 pomocí programu KENO [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/44400719.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Filip Novotný.
- [2] NOVOTNÝ, Filip. Výpočetní analýza chování aktivní zóny tlakovodního jaderného reaktoru pomocí kódu PARKS [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83543. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [3] MAŠATA, David. Kombinace antikorozi ochrany paliva, tepelné vodivosti a vyhořívajícího absorbátoru pro tlakovodní reaktory [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31548/1/DP_Masata_D.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
- [4] Leppänen, J., et al. (2015) "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013." *Ann. Nucl. Energy*, 82 (2015) 142-150.
- [5] Andrea. Oddělení Reaktorové fyziky a podpory palivového cyklu [online]. Ústav jaderného výzkumu, 2011 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://orf.ujv.cz/cs/produkty/andrea>
- [6] Pohled do temelínského reaktoru. *Hospodářské noviny* [online]. 2014 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-62724970-pohled-do-temelinskeho-reaktoru-podivejte-se-na-byznysove-fotografie-tydne>
- [7] KRÝSL, Václav a Pavel MIKOLÁŠ. Zadání testové úlohy „FullCore“ VVER-1000 pro Monte Carlo., ŠKODA JS a.s., Plzeň, 2011
- [9] KRÝSL, Václav, Pavel MIKOLÁŠ, Daniel SPRINZL, Jan VIMPEL a Jiří ZÁVORKA. FULL-CORE VVER-1000 calculation benchmark [online]. Olomouc, Škoda JS, 2018, (28th Symposium AER) [cit. 2020-06-17].
- [8] ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *ScienceDirect* [online]. 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375218300206#b10010>
- [9] LAMARSH, John R. a Anthony J. BARATTA. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. ISBN 0-201-82498-1.
- [10] REUSS, Paul. *Neutron Physics*. 2. EDP Sciences, 2008. ISBN 9782759800414.

Přílohy

Příloha 1: Statistika relativní odchylky vypočítaného řešení oproti referenčnímu

PS	Min	Max	StrKv	StrArit	Sigma
1	-0,806	0,627	0,214	-0,004	0,214
2	-0,641	0,697	0,206	0,019	0,205
3	-0,482	0,793	0,205	0,016	0,205
4	-0,535	0,714	0,222	0,023	0,221
5	-0,458	0,718	0,240	0,039	0,237
6	-0,555	0,767	0,240	0,022	0,240
7	-0,752	1,020	0,272	0,037	0,270
8	-0,410	0,554	0,166	0,006	0,166
9	-0,377	0,621	0,171	0,004	0,171
10	-0,446	0,522	0,174	-0,000	0,175
11	-0,443	0,545	0,180	0,004	0,181
12	-0,500	0,569	0,175	0,000	0,175
13	-0,448	0,488	0,173	0,006	0,173
14	-0,416	0,521	0,177	0,005	0,177
15	-0,487	0,782	0,220	0,004	0,220
16	-0,687	0,679	0,206	0,023	0,205
17	-0,543	0,524	0,175	0,006	0,175
18	-0,391	0,501	0,166	0,000	0,166
19	-0,430	0,374	0,158	0,001	0,158
20	-0,503	0,567	0,174	0,001	0,174
21	-0,464	0,563	0,171	0,000	0,171
22	-0,382	0,644	0,175	0,001	0,175
23	-0,477	0,515	0,165	0,000	0,165
24	-0,418	0,530	0,154	0,004	0,154
25	-0,482	0,633	0,221	0,021	0,220
26	-0,412	0,824	0,207	0,022	0,206
27	-0,415	0,593	0,166	0,001	0,166
28	-0,473	0,477	0,171	0,001	0,172
29	-0,539	0,463	0,160	0,001	0,160
30	-0,552	0,521	0,175	-0,002	0,175
31	-0,432	0,489	0,149	0,001	0,150
32	-0,378	0,515	0,164	-0,000	0,164
33	-0,559	0,637	0,176	0,002	0,176
34	-0,434	0,551	0,176	0,000	0,177
35	-0,412	0,527	0,183	0,002	0,183
36	-0,665	0,840	0,222	0,023	0,221
37	-0,803	0,563	0,212	0,024	0,211
38	-0,508	0,572	0,174	0,004	0,174
39	-0,482	0,433	0,177	0,001	0,178
40	-0,459	0,480	0,166	-0,002	0,166

41	-0,429	0,489	0,165	0,001	0,165
42	-0,413	0,438	0,157	0,002	0,158
43	-0,369	0,445	0,157	0,001	0,157
44	-0,417	0,472	0,157	0,001	0,158
45	-0,542	0,468	0,167	-0,001	0,167
46	-0,376	0,389	0,163	0,002	0,164
47	-0,506	0,691	0,197	0,005	0,198
48	-0,523	0,578	0,203	0,024	0,202
49	-0,644	0,806	0,218	0,022	0,217
50	-0,398	0,533	0,163	0,000	0,163
51	-0,434	0,511	0,174	0,001	0,175
52	-0,460	0,464	0,154	0,001	0,154
53	-0,382	0,528	0,152	0,001	0,153
54	-0,390	0,546	0,145	-0,002	0,145
55	-0,441	0,527	0,173	-0,001	0,173
56	-0,541	0,437	0,163	-0,003	0,163
57	-0,463	0,541	0,150	0,001	0,150
58	-0,464	0,516	0,161	0,001	0,161
59	-0,503	0,606	0,177	0,001	0,178
60	-0,440	0,741	0,190	0,001	0,190
61	-0,406	0,885	0,220	0,025	0,219
62	-0,631	0,770	0,218	0,003	0,219
63	-0,531	0,695	0,169	0,005	0,169
64	-0,530	0,587	0,161	0,001	0,161
65	-0,409	0,595	0,159	-0,002	0,160
66	-0,421	0,646	0,160	0,002	0,160
67	-0,412	0,480	0,159	0,000	0,160
68	-0,384	0,400	0,146	0,001	0,146
69	-0,468	0,486	0,169	-0,000	0,169
70	-0,451	0,708	0,166	-0,000	0,167
71	-0,378	0,441	0,147	0,001	0,147
72	-0,479	0,413	0,168	-0,001	0,168
73	-0,388	0,626	0,166	0,000	0,166
74	-0,498	0,649	0,190	0,006	0,190
75	-0,547	0,702	0,220	0,017	0,219
76	-0,434	0,571	0,163	0,004	0,163
77	-0,491	0,456	0,160	0,000	0,160
78	-0,416	0,612	0,181	0,002	0,181
79	-0,445	0,491	0,161	0,001	0,161
80	-0,516	0,484	0,164	-0,000	0,165
81	-0,550	0,462	0,160	0,002	0,161
82	-0,505	0,481	0,164	-0,001	0,164
83	-0,416	0,425	0,163	0,000	0,163
84	-0,350	0,412	0,153	-0,003	0,153
85	-0,458	0,525	0,161	0,002	0,161

86	-0,473	0,536	0,171	0,003	0,171
87	-0,444	0,610	0,169	0,000	0,169
88	-0,557	0,675	0,198	0,006	0,198
89	-0,479	0,691	0,219	0,023	0,218
90	-0,552	0,569	0,185	0,006	0,185
91	-0,392	0,555	0,165	0,001	0,165
92	-0,447	0,385	0,147	-0,002	0,147
93	-0,475	0,458	0,160	0,002	0,160
94	-0,394	0,553	0,169	-0,000	0,170
95	-0,441	0,443	0,161	0,001	0,161
96	-0,409	0,480	0,156	0,001	0,156
97	-0,398	0,488	0,151	0,000	0,151
98	-0,431	0,486	0,164	0,002	0,165
99	-0,459	0,581	0,158	-0,003	0,158
100	-0,499	0,476	0,167	-0,000	0,167
101	-0,410	0,565	0,180	0,005	0,180
102	-0,477	0,567	0,193	0,001	0,193
103	-0,441	0,711	0,222	0,030	0,220
104	-0,518	0,674	0,180	0,001	0,180
105	-0,452	0,500	0,162	0,001	0,162
106	-0,421	0,469	0,165	0,001	0,165
107	-0,446	0,550	0,154	0,002	0,155
108	-0,331	0,473	0,145	0,001	0,145
109	-0,381	0,454	0,161	-0,000	0,161
110	-0,472	0,480	0,162	-0,002	0,162
111	-0,395	0,437	0,149	0,002	0,150
112	-0,403	0,533	0,154	0,001	0,154
113	-0,465	0,546	0,165	0,000	0,165
114	-0,492	0,428	0,168	0,001	0,168
115	-0,645	0,622	0,209	0,017	0,209
116	-0,519	0,784	0,230	0,023	0,229
117	-0,466	0,419	0,154	0,003	0,154
118	-0,398	0,590	0,167	0,001	0,168
119	-0,404	0,451	0,156	-0,003	0,156
120	-0,471	0,460	0,157	0,001	0,157
121	-0,450	0,459	0,174	0,003	0,174
122	-0,394	0,438	0,166	0,002	0,166
123	-0,337	0,538	0,156	0,001	0,156
124	-0,425	0,459	0,163	-0,001	0,163
125	-0,473	0,519	0,186	0,001	0,186
126	-0,374	0,613	0,166	0,004	0,167
127	-0,482	0,782	0,229	0,027	0,227
128	-0,521	1,057	0,231	0,030	0,230
129	-0,454	0,713	0,168	0,002	0,169

130	-0,461	0,465	0,158	0,001	0,159
131	-0,398	0,673	0,163	0,002	0,164
132	-0,423	0,420	0,155	-0,001	0,155
133	-0,496	0,576	0,172	0,001	0,172
134	-0,481	0,548	0,166	-0,004	0,166
135	-0,497	0,524	0,168	0,002	0,168
136	-0,428	0,525	0,188	0,001	0,188
137	-0,457	0,558	0,189	0,002	0,189
138	-0,487	0,685	0,222	0,028	0,221
139	-0,523	0,706	0,231	0,023	0,230
140	-0,559	0,532	0,178	0,006	0,178
141	-0,438	0,531	0,170	0,001	0,170
142	-0,406	0,553	0,164	0,001	0,164
143	-0,466	0,636	0,181	0,000	0,181
144	-0,473	0,361	0,152	0,001	0,152
145	-0,390	0,487	0,152	0,000	0,152
146	-0,421	0,612	0,180	0,000	0,180
147	-0,549	0,592	0,178	0,006	0,178
148	-0,411	0,644	0,204	0,022	0,203
149	-0,560	0,780	0,209	0,005	0,209
150	-0,567	0,742	0,194	0,006	0,194
151	-0,441	0,596	0,190	0,007	0,190
152	-0,412	0,666	0,173	0,004	0,173
153	-0,466	0,578	0,170	0,004	0,170
154	-0,479	0,537	0,176	0,004	0,177
155	-0,493	0,663	0,172	0,005	0,172
156	-0,537	0,712	0,188	0,004	0,188
157	-0,632	0,710	0,212	0,005	0,212
158	-0,649	0,775	0,230	0,015	0,230
159	-0,527	0,687	0,203	0,022	0,202
160	-0,541	0,671	0,231	0,030	0,230
161	-0,665	0,656	0,206	0,022	0,205
162	-0,461	0,600	0,194	0,019	0,193
163	-0,649	0,518	0,201	-0,007	0,201

Příloha č. 2: Vyhodnocení asymetrie

PS	Kq_sym	rozptyl	delta%	Kq_1	Kq_2	Kq_3
1	0,9809	0,0005	0,051	0,9807	0,9812	0,9807
2	1,094	0,0007	0,064	1,0937	1,0944	1,0938
3	1,0163	0,0008	0,0787	1,0165	1,0166	1,0158
4	1,2416	0,0009	0,0725	1,2416	1,242	1,2411
5	0,8286	0,0008	0,0965	0,8289	0,8288	0,8281
6	0,8205	0,0007	0,0853	0,8205	0,8209	0,8202
7	1,0733	0,0011	0,1025	1,0733	1,0739	1,0728
8	1,0813	0,0007	0,0647	1,081	1,0817	1,0812
9	0,82	0,0007	0,0854	0,82	0,8203	0,8196
10	1,0244	0,0004	0,039	1,0245	1,0246	1,0242
11	1,2276	0,0007	0,057	1,2277	1,2279	1,2272
12	1,0897	0,0005	0,0459	1,0896	1,09	1,0895
13	0,83	0,0004	0,0482	0,83	0,8302	0,8298
14	0,844	0,0002	0,0237	0,8439	0,8441	0,8439
15	0,8136	0,0004	0,0492	0,8137	0,8138	0,8134
16	1,0738	0,0002	0,0186	1,0739	1,0737	1,0738
17	1,0673	0,0006	0,0562	1,0669	1,0674	1,0675
18	1,123	0,0007	0,0623	1,1232	1,1233	1,1226
19	0,8201	0,0003	0,0366	0,8201	0,82	0,8203
20	1,0178	0,0001	0,0098	1,0178	1,0178	1,0177
21	1,2487	0,0001	0,008	1,2487	1,2486	1,2487
22	1,2278	0,0006	0,0489	1,2275	1,2279	1,2281
23	1,2422	0,0007	0,0564	1,2422	1,2419	1,2426
24	0,7614	0,0003	0,0394	0,7613	0,7613	0,7616
25	0,844	0,0008	0,0948	0,844	0,8436	0,8444
26	0,8208	0,0003	0,0366	0,8208	0,8206	0,8209
27	0,9817	0,0009	0,0917	0,9814	0,9814	0,9823
28	0,9195	0	0	0,9195	0,9195	0,9195
29	1,0672	0,0009	0,0843	1,0672	1,0668	1,0677
30	1,0813	0,0009	0,0832	1,081	1,0811	1,0819
31	1,0944	0,0012	0,1096	1,0944	1,0938	1,095
32	0,7615	0,0005	0,0657	0,7615	0,7612	0,7617
33	0,8442	0,0009	0,1066	0,8439	0,844	0,8448
34	0,8208	0,0009	0,1097	0,8206	0,8204	0,8213
35	0,9815	0,0013	0,1325	0,9813	0,9809	0,9822
36	1,2487	0,0012	0,0961	1,2487	1,2481	1,2493
37	1,2273	0,0008	0,0652	1,2272	1,227	1,2278
38	1,2417	0,002	0,1611	1,2416	1,2408	1,2428
39	1,1222	0,0008	0,0713	1,1218	1,1221	1,1226
40	0,8196	0,0012	0,1464	0,8195	0,8191	0,8203

41	1,0166	0,0019	0,1869	1,0168	1,0156	1,0175
42	0,8441	0,0005	0,0592	0,8441	0,8439	0,8444
43	0,8136	0,0006	0,0737	0,8134	0,8134	0,814
44	1,0731	0,002	0,1864	1,0732	1,072	1,074
45	1,2275	0,0008	0,0652	1,2275	1,2271	1,2279
46	1,0893	0,0015	0,1377	1,0892	1,0886	1,0901
47	0,8289	0,0014	0,1689	0,8289	0,8282	0,8296
48	0,8197	0,0007	0,0854	0,8196	0,8194	0,8201
49	1,0243	0,0016	0,1562	1,0242	1,0235	1,0251
50	0,8208	0,0006	0,0731	0,8207	0,8205	0,8211
51	1,0735	0,0011	0,1025	1,0733	1,073	1,0741
52	1,242	0,0008	0,0644	1,2417	1,2417	1,2425
53	0,83	0,0008	0,0964	0,8301	0,8296	0,8304
54	1,0173	0,001	0,0983	1,0171	1,0169	1,0179
55	0,9814	0,0006	0,0611	0,9811	0,9814	0,9817

Příloha č. 3: Výběr vhodných parametrů v závislosti na přesnosti a výkonové náročnosti

Neutrony	2 542 800	7 628 400	12 714 000	25 428 000	2 542 800	7 628 400	12 714 000	25 428 000	2 542 800	7 628 400	12 714 000	25 428 000
Cykly	600	600	600	600	1100	1100	1100	1100	1600	1600	1600	1600
N*C	1,53E+ 09	4,58E +09	7,63E+ 09	1,53E+ 10	2,80E +09	8,39E +09	1,40E+ 10	2,80E+ 10	4,07E +09	1,22E +10	2,03E+ 10	4,07E+ 10
Varianta	2	2a	2b	2c	3	3a	3b	3c	4	4a	4b	4c
Čas [hod]	7,5836	24,04 00	41,223 9	85,029 2	13,98 11	43,54 31	72,736 1	149,72 36	18,94 39	56,42 94	108,73 61	210,48 89
Keff	1,0032 3	1,003 24	1,0032 6	1,0032 6	1,003 26	1,003 26	1,0032 6	1,0032 6	1,003 25	1,003 27	1,0032 6	1,0032 6
Odchylka od reference [pcm]	9	10	12	12	12	12	12	12	11	13	12	12
RozptMax	0,0173	0,006 9	0,0071	0,0035	0,012 2	0,009 9	0,0101	0,0025	0,005 5	0,021 4	0,0058	0,0020
v PS	44	16	52	52	45	23	23	52	39	23	38	38
StrKvAbs	0,0089 2	0,003 50	0,0045 1	0,0015 1	0,007 39	0,006 01	0,0053 4	0,0013 9	0,002 92	0,011 86	0,0033 3	0,0009 2
RozptRel [%]	1,6195 3	0,677 02	0,6835 8	0,2869 3	1,035 20	0,797 21	0,8255 2	0,2651 5	0,490 33	1,746 99	0,5031 5	0,1868 9
v PS	47	20	1	55	50	23	27	13	39	13	44	41
StrKvRel [%]	0,8777 6	0,345 03	0,4456 0	0,1494 4	0,727 67	0,586 97	0,5279 5	0,1391 8	0,288 63	1,167 94	0,3286 7	0,0908 4
RozptMax	0,0414 9	0,025 43	0,0189 2	0,0083 8	0,316 00	0,019 00	0,0153 4	0,0084 9	0,023 60	0,026 73	0,0110 2	0,0069 4
v PS	47	47	47	13	13	13	47	47	13	53	54	3
v PP	14	52	3	321	235	156	27	24	218	12	116	287
StrKvAbs	0,0101 9	0,005 93	0,0045 4	0,0021 2	0,007 55	0,004 38	0,0033 8	0,0023 9	0,006 24	0,005 69	0,0028 6	0,0019 7
RozptRel [%]	4,7585 7	2,221 61	1,9445 0	0,8941 2	3,262 10	2,069 67	1,4298 0	0,9476 8	2,424 32	2,311 31	1,2378 8	0,8484 4
v PS	53	54	13	5	13	5	27	3	53	5	54	54
v PP	328	250	295	98	21	176	134	11	294	116	116	331
StrKvRel [%]	1,0237 7	0,596 95	0,4555 8	0,2136 4	0,759 18	0,441 89	0,3407 0	0,2410 2	0,628 75	0,572 41	0,2874 8	0,1982 7