

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Modelování axiálního dělení aktivní zóny
VVER-1000 makrokódem MOBY-DICK**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Bc. Filip PRŮCHA**
Osobní číslo: **E19N0079P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Modelování axiálního dělení aktivní zóny VVER-1000 makrokódem MOBY-DICK**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Vliv axiálního dělení programu MOBY-DICK na stanovení lineárního výkonu reaktoru VVER-1000.

1. Seznamte se s výpočtním kódem MOBY-DICK.
2. Stanovte vliv axiálního dělení na stanovení lineárního výkonu a globální parametry palivových vsázek.
3. Navrhněte nepravidelné dělení pro směsné zóny reaktoru VVER-1000 a srovnajte s referenčním výpočtem.

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

Seznam doporučené literatury:

1. P. Fraňkova, V. Krysl, P. Mikolaš, D. Sprinzl, J. Šústek, J. Švarny, K. Vlachovsky: Popis programu MOBY-DICK s úpravami pro VVER-1000. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae12489/Dok, Rev.3, Plzeň 2018

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na analýzu heterogenního modelu aktivní zóny reaktoru VVER-1000. Jednotlivé palivové soubory byly rozmístěny dle ruské referenční vsázky. Hlavním cílem této práce je vytvoření daného heterogenního modelu ve výpočetním programu MOBY-DICK a porovnání s homogenním modelem vytvořeným pomocí stejného programu. V této práci jsou porovnány globální parametry a lineární výkon jednotlivých palivových souborů. Práce se dále zaměřuje na primární okruh jaderné elektrárny Temelín s reaktorem VVER-1000 a na používaná paliva v této elektrárně.

Klíčová slova

VVER-1000, axiální ofset, jaderný reaktor, jaderné palivo, TVSA-T mod. 1, TVSA-T mod. 2, LTA, VVANTAGE 6, MOBY-DICK.

Abstract

The presented master thesis is focused on the analysis of a heterogeneous model of the core of the VVER-1000 reactor. The individual fuel assemblies were distributed according to the Russian reference charge. The main goal of this work is to create a given heterogeneous model in the computer program MOBY-DICK and compare it with a homogeneous model created using the same program. In this work, global parameters and linear performance of individual fuel assemblies are compared. The work also focuses on the primary circuit of the Temelín nuclear power plant with the VVER-1000 reactor and on the fuels used in this power plant.

Keywords

VVER-1000, axial offset, nuclear reactor, nuclear fuel, TVSA-T mod. 1, TVSA-T mod. 2, LTA, VVANTAGE 6, MOBY-DICK.

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

V Plzni dne 27. května 2021

Bc. Filip Průcha

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mé vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a neméně též Ing. Jiřímu Závorkovi za odborné vedení práce, věcné připomínky a vstřícný přístup v průběhu konzultací.

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk	9
Úvod	10
1 Jaderný reaktor VVER-1000	11
1.1 Primární okruh	11
1.1.1 Reaktor	12
1.1.2 Aktivní zóna	13
1.1.3 Kompenzátor objemu	14
1.1.4 Parogenerátor	15
1.1.5 Hlavní cirkulační čerpadlo	16
2 Palivové soubory v ETE	17
2.1 VVANTAGE-6	17
2.1.1 Palivový soubor	18
2.1.2 Palivový proutek	19
2.2 TVSA-T mod.1	20
2.2.1 Palivový soubor	22
2.2.2 Palivový proutek	22
2.3 TVSA-T mod.2	23
2.3.1 Palivový soubor	24
2.3.2 Palivový proutek	25
2.4 LTA	25
3 Výpočetní kódy	27
3.1 Stochastické kódy	27
3.2 Deterministické	28
3.3 MOBY-DICK	28
3.3.1 Metoda řešení	28
3.3.2 Popis vstupních souborů	29
4 Použitý model	31
5 Analýza výsledků	38
5.1 Globální neutronově-fyzikální parametry	38
5.2 Lineární výkon	45
5.3 Statistické vyhodnocení	48
5.4 Nejzatíženější PP	57
Závěr	62
Seznam literatury a informačních zdrojů	64
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	68

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Význam
AZ	Aktivní zóna
EFPD	efektivní čas (z angl. Effective Full Power Day)
ETE	Elektrárna Temelín
Gd	Gadolinium
HČČ	Hlavní cirkulační čerpadlo
JE	Jaderná elektrárna
KO	Kompenzátor objemu
PG	Parogenerátor
PP	Palivový proutek
PS	Palivový soubor
PWR	Tlakovodní reaktor (z angl. Pressurized Water Reactor)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŠJS	Škoda jaderné strojírenství
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
UO ₂	Oxid uraničitý
VVER	Vodovodný energetický reaktor

Symbol	Význam
%w	váhová procenta
AO	Axiální ofset [%]
Cb	Koncentrace kyseliny borité [g/kg]
K0	koeficient nerovnoměrnosti rozložení lineárního výkonu v palivových proutcích [-]
Kq	koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonů palivových souborů [-]
Kr	koeficient nerovnoměrnosti v rozložení výkonu po proutcích v aktivní zóně [-]
Kv	koeficient nerovnoměrnosti nodálních výkonů palivových souborů [-]

Úvod

Cílem této diplomové práce je analyzování vlivu zjednodušujících předpokladů pro výpočty prováděné pomocí výpočetního kódu MOBY-DICK. Zkoumaným zjednodušením je takzvaná homogenizace konstant. Práce se zaměřuje na vyhodnocení vlivu daného zjednodušení na lineární výkon palivových souborů a na základní neutronově fyzikální charakteristiky aktivní zóny. Tato problematika je řešena vytvořením homogenního modelu a detailního heterogenního modelu pomocí výpočetního kódu MOBY-DICK. Následná analýza získaných dat se zaměřuje na zjištění rozdílů mezi jednotlivými modely.

První část této diplomové práce je teoretická. První kapitola je věnovaná jaderné elektrárně Temelín a primárnímu okruhu s reaktorem VVER-1000. Dva reaktory tohoto typu jsou provozovány v elektrárně Temelín. Druhá kapitola je zaměřena na historii a popis používaných palivových souborů v jaderné elektrárně Temelín. Ve třetí kapitole jsou představeny výpočetní kódy používané pro výpočet detailních fyzikálních dějů probíhajících v aktivní zóně. V této kapitole jsou představeny dva přístupy k výpočtům, stochastickému a deterministickému.

Druhá část diplomové práce se zaměřuje na praktické výpočty a na analýzu získaných dat. Ve čtvrté kapitole je představen referenční model používaný společností Škoda JS. Druhá část této kapitoly je zaměřena na tvorbu heterogenního modelu palivových souborů v aktivní zóně reaktoru a návrhu axiálního dělení pro vytvořený model. V poslední páté kapitole jsou zhodnoceny získaná data z vytvořených modelů. Převážně byl zhodnocen vliv homogenizace konstant na lineární výkon, axiální ofset, neutronově fyzikální parametry palivové vsázky a na statistické zhodnocení výkonu v jednotlivých axiálních úsecích.

1. Jaderný reaktor VVER-1000

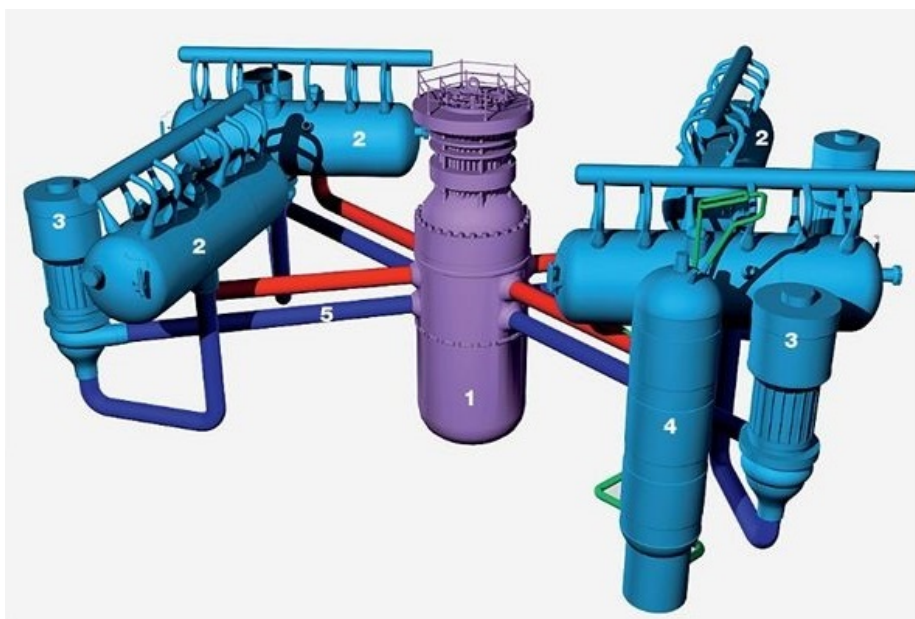
Společnost ČEZ, a.s. provozuje v České republice aktuálně 6 energetických tlakovodních reaktorů ruského typu VVER (z ruského *Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor*), které patří do skupiny tlakovodních reaktorů PWR (z anglického *Pressurized Water Reactor*). Čtyři bloky jaderného reaktoru VVER-440, jsou umístěny v lokalitě Dukovany, zbývající dva bloky typu VVER-1000 leží u obce Temelín. Všechny jaderné bloky jsou bezpečným a spolehlivým zdrojem elektrické energie. Celkový instalovaný výkon jaderných elektráren je 4200 MW.

Pracovním médiem tlakovodního reaktoru je chemicky upravená lehká voda (H_2O) s rozpuštěnou kyselinou boritou. Pracovní médium plní dvě základní funkce:

- Chladicí médium, které odvádí tepelnou energii, vzniklou štěpnou reakcí, z aktivní zóny do parogenerátoru.
- Moderátor, je materiál, nejčastěji voda, která slouží ke snížení energie rychlých neutronů vznikajících při štěpení jádra atomu na energii potřebnou k vyvolání štěpné reakce dalšího atomového jádra.

1.1 Primární okruh

Konstrukce primárního okruhu reaktoru VVER se skládá z několika základních komponent, kterými jsou: kompenzátor objemu (KO), parogenerátor (PG), hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ) a tlaková nádoba reaktoru (TNR), ve které jsou umístěny veškeré vnitřní části včetně palivových souborů. Primární okruh je umístěn v ochranné hermetické obálce (kontejment), který primárně chrání jaderné zařízení proti vnějším vlivům a v případě nehody chrání životní prostředí proti úniku nebezpečných látek do okolí. Primární okruh jaderné elektrárny Temelín je na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Primární okruh VVER-1000. [1]

1.1.1 Reaktor

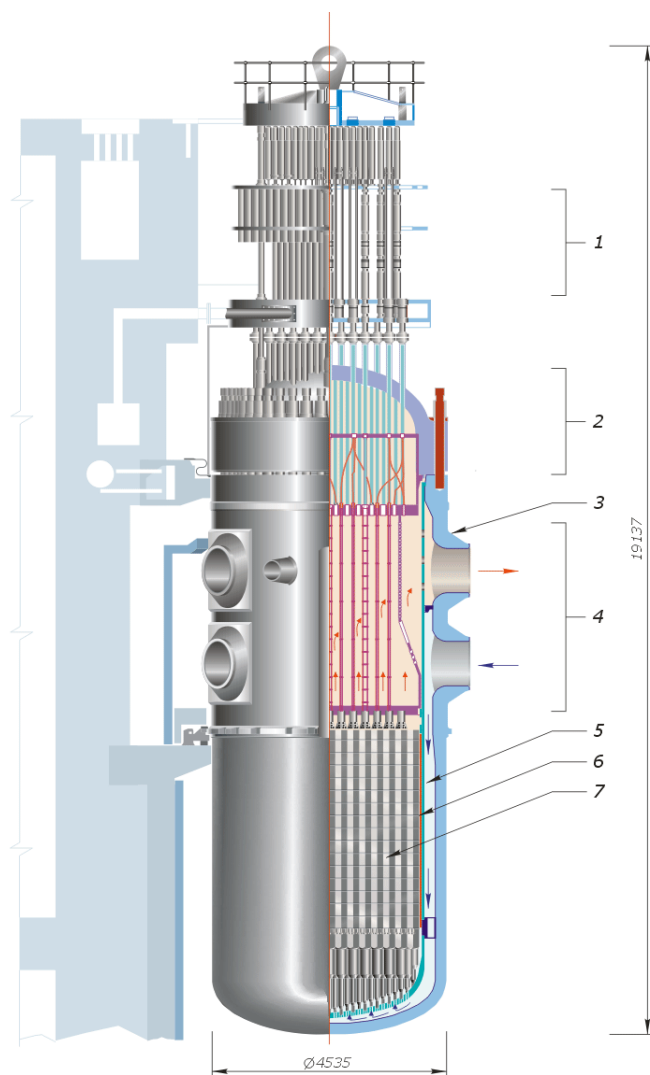
Nádoba reaktoru (obrázek 1.2) je vložena do železobetonové šachty, jejímž účelem je stínění ionizujícího záření a uchycení reaktoru. Reaktor se skládá z několika částí, mezi hlavní patří:

- **Horní blok** - v jehož konstrukci je umístěno 61 lineárních krokových motorů sloužící k regulaci neutronového toku v AZ. V konstrukci se také nalézá vyvedení všech vedení vnitroblokových měření.
- **Víko reaktoru** - jedná se o odjímatelnou část, která při odstávkách je demontována pro přístup k AZ reaktoru. Při chodu reaktoru je těsnost mezi víkem reaktoru a tlakovou nádobou nepřetržitě monitorovaná.
- **Tlaková nádoba** - je silnostěnná válcová nádoba vyrobená z kvalitní oceli. Skládá se ze šesti kovaných prstenců a eliptického dna. Jednotlivé prstence jsou k sobě svařené. Reaktor má 4 chladicí smyčky a tak v nádobě nalezneme 8 nátrubků na připojení primárního cirkulačního potrubí a 4 nátrubky k připojení hydro-akumulátorů pro případ havárie.

Tlaková nádoba je kontrolována z hlediska křehnutí materiálů, ke kterému dochází vlivem neutronové radiace. K tomuto účelu jsou v dolní části tlakové nádoby schránky pro svědečné vzorky.

V tlakové nádobě se nacházejí vnitřní části reaktoru:

- Šachta reaktoru
- Plášť aktivní zóny
- Blok ochranných trub
- Aktivní zóna

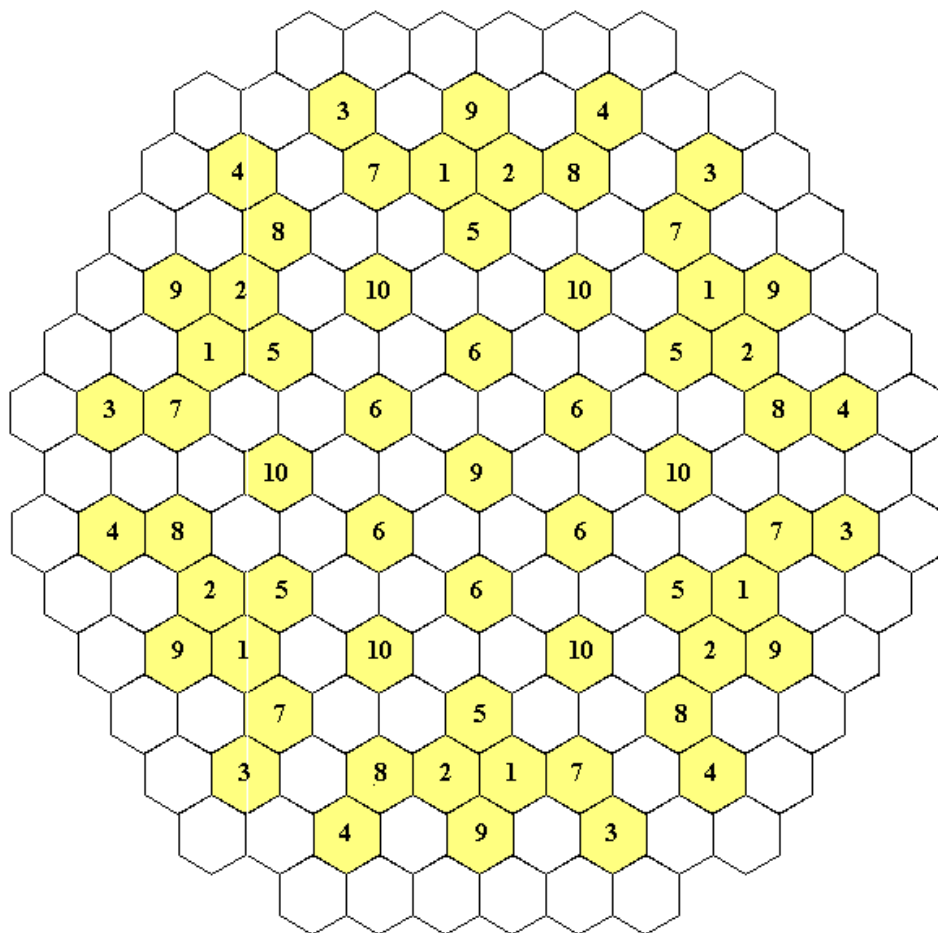


Obrázek 1.2: Průřez reaktorovou nádobou VVER-1000. [1]

1.1.2 Aktivní zóna

V AZ jaderného reaktoru probíhá řízená štěpná reakce, při které je uvolňováno velké množství energie (200 MeV z jedné štěpné reakce [2]). Tato energie je dále z reaktoru odváděna pomocí chladicího média.

Aktivní zóna reaktoru VVER-1000 se skládá ze 163 palivových souborů a 61 řídicích orgánů uspořádaných v šestiúhelníkové mříži. Regulační orgány jsou rozděleny do deseti skupin. Skupiny 1 - 6 slouží k nouzovému odstavení reaktoru a skupiny 7 - 10 se využívají k regulaci výkonu reaktoru spolu s obsahem kyseliny borité obsažené v chladicím médiu. Na obrázku 1.3 je znázorněno rozložení regulačních klastrů. Koncentrace kyseliny se postupně s vyhoříváním paliva snižuje.

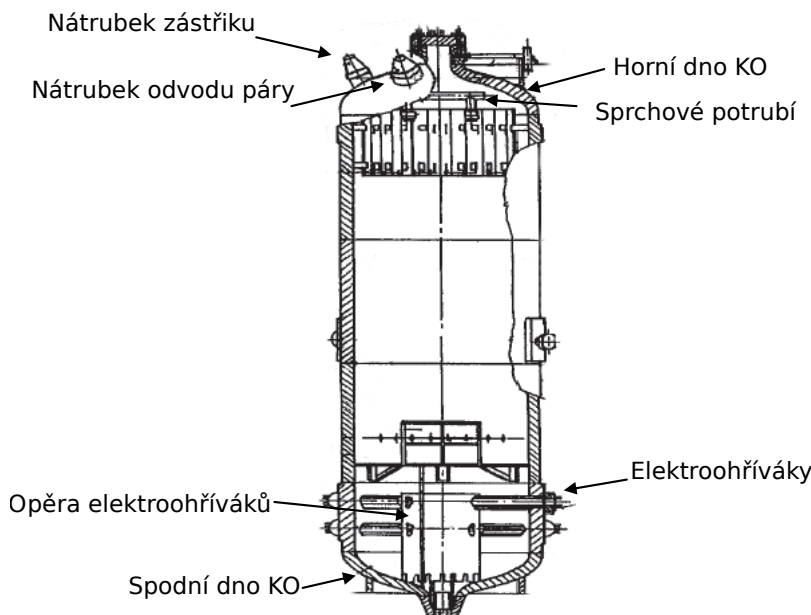


Obrázek 1.3: Značení a rozmístění skupiny absorpčních svazků systému řízení a regulace reaktoru. [3]

1.1.3 Kompenzátor objemu

Při provozu jaderného bloku dochází vlivem změny výkonu ke změně teploty v chladícím médiu, a tím také dochází k objemovým a tlakovým změnám v chladícím médiu primárního okruhu. Tyto změny se vyrovnávají pomocí kompenzátoru objemu (KO), který je spojen s horkou větví jedné cirkulační smyčky. Při nominálním provozu je kompenzátor objemu naplněn ze dvou třetin chladivem primárního okruhu a z jedné třetiny parou. V případě, že dojde ke zvýšení tlaku primárního okruhu nad určitou mez, respektive dojde ke zvýšení objemu páry v KO, aktivuje se sprchový systém umístěný v horní části KO, jehož zapůsobením se sníží objem páry v KO a následně dojde ke snížení tlaku primárního okruhu. Naopak při situaci, kdy dojde ke snížení tlaku v primárním okruhu, tedy zvýšení hladiny vody v KO nad určitou mez, se aktivují elektroohříváky umístěné ve spodní části nádoby, které způsobí ohřátí média a jeho var, přičemž se opět zvýší objem páry a tím se zvýší i tlak v primárním okruhu na požadovanou úroveň. Při menších tlakových změnách se neuvádějí do provozu elektroohříváky, ani sprchový systém, nýbrž se uplatní samoregulační vlastnost systému. Zvýšením tlaku se zvýší i teplota sytosti média a teplota vody je nižší než teplota sytosti, čímž dojde ke kondenzaci části parního objemu a sníží se tlak média. Tak je tomu i v opačném případě.

Pokud nedojde k zafungování sprchového systému, nebo sprchový systém nestačí k potlačení tlaku primárního okruhu, jsou na KO umístěné odlehčovací a pojistné ventily, které odpouští parní objem do barbotážní nádrže. Kompenzátor objemu je znázorněn na obrázku 1.4.

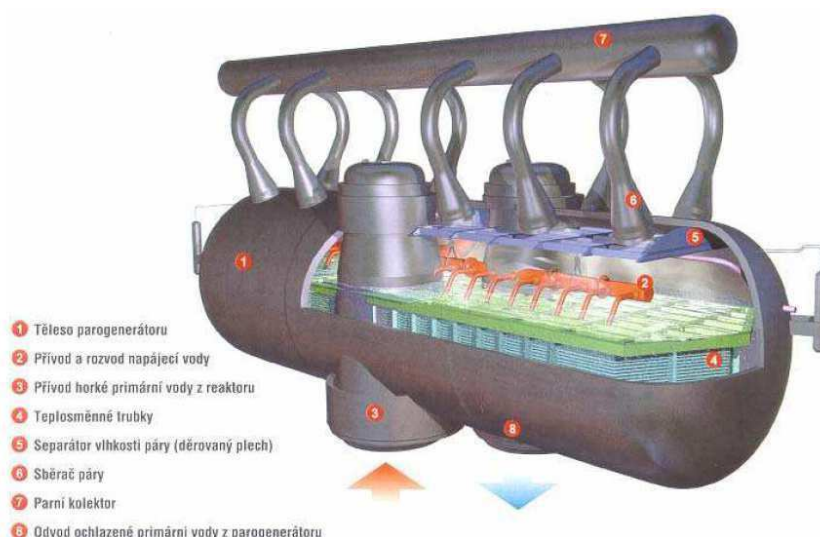


Obrázek 1.4: Kompenzátor objemu. [4]

1.1.4 Parogenerátor

Parogenerátor (PG), zobrazen na obrázku 1.5, je tepelný výměník, ve kterém dochází k výměně tepelné energie z primárního okruhu do okruhu sekundárního. Jelikož se jedná o styčné místo obou okruhů, je důležité zajistit těsnost. Při této výměně dochází ke změně určitých energetických parametrů (*teplota, tlak*) a u média sekundárního okruhu dochází i ke změně skupenství na plynné. Reaktory ruského typu VVER mají horizontální PG, na rozdíl od reaktorů západního typu. Výhodou horizontálních PG je zalisování teplosměnných trubiček do kolektorů z boku, a tudíž nedochází k usazování kalu v místě spojů. Nevýhodou jsou větší prostorové požadavky v okolí reaktoru.

Chladicí médium primárního okruhu vstupuje do PG tzv. horkým kolektorem a následně proudí skrze trubičky ke studenému kolektoru PG. Z vnější strany teplosměnných trubek je prostor zaplněný vodou ze sekundárního okruhu, která se odpařuje. Vzniklá pára je odváděna pomocí sběrače páry k turbosoustrojí.



Obrázek 1.5: Parogenerátor. [1]

1.1.5 Hlavní cirkulační čerpadlo

Hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ) patří mezi základní komponenty primárního okruhu. Jejich primární funkcí je vytvoření nucené cirkulace k odvodu tepelné energie, vzniklé štěpnou reakcí, z AZ reaktoru do PG s pomocí chladicího média. Umístění HCČ je na studené větvi za PG a před TNR na každé z cirkulačních smyček. Konstrukčně se jedná o jednostupňové vertikální odstředivé čerpadlo poháněné synchronním motorem. Příkon je závislý na teplotě čerpaného média. Při čerpání chladného média je příkon přibližně 6,8 MW. Při čerpání horkého média s nižším měrným objemem je příkon 5,1 MW. Každé z čerpadel má nominální průtok 21 000 m³/hod.

Tato kapitola o primárním okruhu jaderné elektrárny Temelín byly zpracovaná s využitím [4], [5], [6], [7]

2. Palivové soubory v ETE

První provozované palivové soubory byly vyvinuty a dodávány americkou společností Westinghouse s označením VVANTAGE-6. Tento typ palivových souborů se potýkal od začátku provozu s komplikacemi. Problematické bylo konstrukční provedení souboru a volba použitých materiálů, kdy docházelo k nadměrnému kroucení a ohýbání celého palivového souboru. To mělo za následek, že při bezpečnostních zkouškách nedosadaly regulační orgány (klastry) do svých koncových poloh, jelikož vodící trubky pro klastry byly ohnuty. Druhým neduhem byl radiační růst palivových článků. Problémy byly na základě provozních zkušeností postupně modifikovány, především byl pozměněn materiál, který byl používán k pokrývání palivových proutků.

Společnost ČEZ se i přesto rozhodla ke změně dodavatele paliva, kterým se stala ruská společnost TVEL, která je sesterskou společností Rosatomu. Původně mělo být palivo VVANTAGE-6 postupně nahrazováno novým palivem TVSA-T v plánovaných odstávkách, to by znamenalo, že po určitou dobu budou v aktivní zóně dva rozdílné typy paliva pracovat společně. SÚJB nepovolilo směsnou zónu, kde by se nacházelo ruské palivo TVSA-T a VVANTAGE-6. V roce 2010 byly vyměněny všechny palivové soubory na prvním bloku elektrárny a o rok později výměna proběhla na druhém bloku. V roce 2018 bylo poprvé zavezeno modernizované palivo TVSA-T mod. 2. do druhého výrobního bloku. V současné době se provádějí testy s palivem LTA od společnosti Westinghouse na prvním výrobním bloku ve směsné zóně spolu s palivem TVSA-T mod. 0 a mod. 1. Druhý výrobní blok se provozuje s modernizovaným palivem TVSA-T mod. 2, TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 0.

2.1 VVANTAGE-6

Tento typ palivového souboru byl vyvinut pro jaderné elektrárny typu VVER americkou společností Westinghouse. Palivo bylo dodáváno do elektrárny 10 let. Palivové soubory byly v prvním palivovém cyklu bez problému. Ale již v druhém palivovém cyklu se začaly projevovat chyby v konstrukci. Palivové tyče se začaly ohýbat, kroutit a prodlužovat, také docházelo k poškozování povlaku palivových proutků o distanční mřížky (*grid-to-rod fretting*).

Na základě těchto zkušeností byly zlepšeny provozní parametry palivových souborů. Toto vylepšování probíhalo ve fázích, konkrétně: T1, T2, Phase0 a Phase1X. Hlavní změny v konstrukci PS nastaly převážně v posledních dvou fázích.

Fáze T1 byla zavezena pouze v první palivové vsázce na prvním výrobním bloku. Druhá fáze T2 již byla používána pro oba bloky do roku 2006.

Další fáze měla označení Phase0, která byla nasazena v roce 2006. Mezi zásadní změny lze zařadit úpravu horní hlavice palivového souboru. Podstatnou změnou také prošla oblast hydraulického tlumiče vodních trubek, kdy došlo k jeho vyztužení.

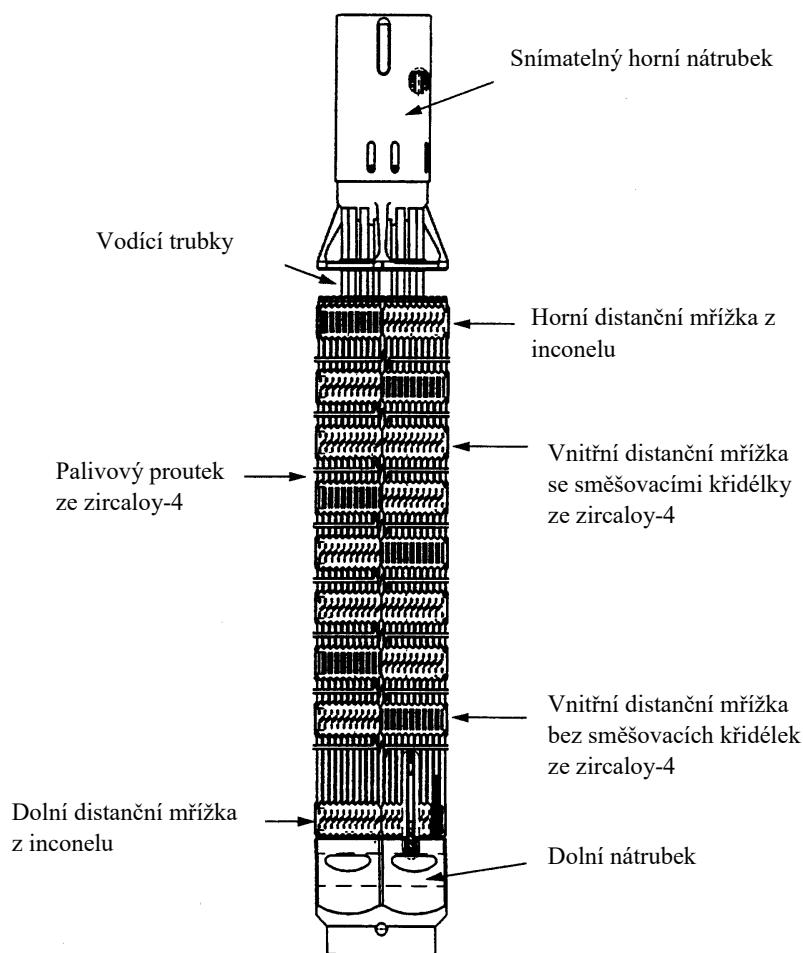
Phase 1X byla poprvé zavezena v roce 2007. Zásadní změnou byla výměna materiálu ze Zircaloy-4 na *ZIRLOTM*. Tento materiál byl využit k pokrytí palivových tyčí a také na zhotovení instrumentačních tyčí. Také byla nahrazena předposlední distanční mřížka

modifikovanou inconelovou mřížkou. Z důvodu nechtěného ohýbání a kroucení byla celá konstrukce zpevněna pomocí lepšího propojení distančních mřížek s vodícími trubkami.

2.1.1 Palivový soubor

Palivový soubor se skládá z 312 palivových proutků v hexagonální mřížce s centrální trubkou, ve které jsou umístěny senzory pro vnitroblokové měření. V každém palivovém souboru je umístěno 18 vodících trubek ze zirkoniové slitiny, které převážně slouží k zasouvání absorpčních tyčí, kterým se říká klastry. Do vodících trubek lze také vložit svazky s neutronovými zdroji, nebo svazky s diskretními absorbátory v závislosti na umístění palivového souboru v aktivní zóně reaktoru. Nosnou konstrukci tvoří centrální trubka spolu s 18 vodícími trubkami, jež jsou pevně spojeny pomocí distančních mřížek. Kvůli usnadnění případné demontáže palivový soubor obsahuje snímatelný dolní nátrubek a horní nátrubek. Nátrubky jsou vyrobeny z nerezové oceli. Dolní nátrubek slouží k usměrňování toku chladiva. Horní nátrubek je tvořen hlavicí, která slouží jako ochranné pouzdro pro svazek regulačních klastrů. Konstrukce palivového souboru je zobrazena na obr. 2.1.

Důležitým prvkem, který udržuje přesnou vzdálenost mezi palivovými proutky je distanční mřížka. Ta je složena pomocí vzájemně spojených pásků v kosočtvercovém uspořádání. Na páskách mřížky jsou umístěny pružinky a výstupky, které svírají jednotlivé palivové proutky. Palivový soubor celkem obsahuje 9 distančních mřížek, z nichž 6 obsahuje směrovací křídélka pro zvýšení přestupu tepla z palivového proutku do chladiva. Horní mřížka, dolní mřížka a nejspodnější vnitřní mřížka tyto směrování křídélka nemají.

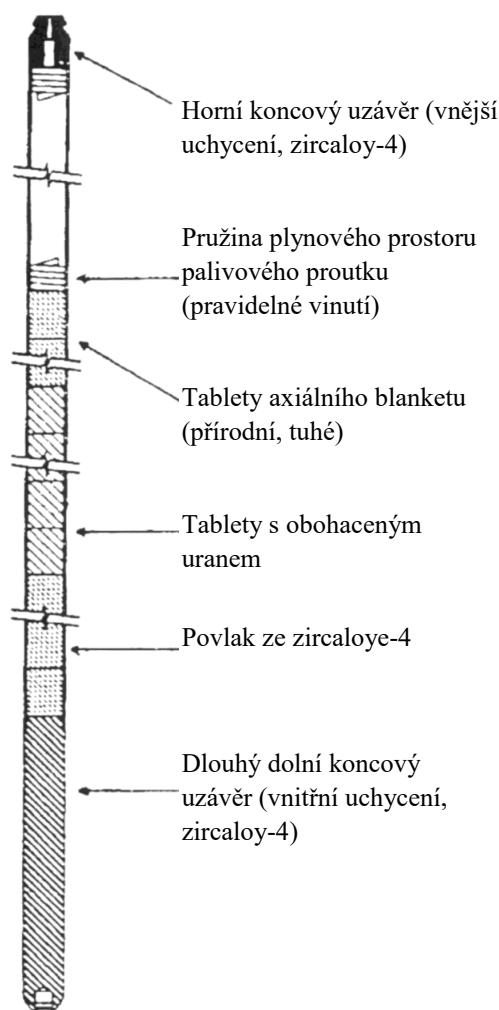


Obrázek 2.1: Konstrukce palivového souboru VVANTAGE 6. [3]

2.1.2 Palivový proutek

Palivové proutky jsou tvořeny palivovými tabletkami oxidu uranu (UO_2), naskládané v trubičce ze zirkoniové slitiny. Tato trubička je z obou stran utěsněna přivařenou zátkou a natlakovaná héliem kvůli lepšímu přenosu tepla mezi palivovými tabletkami a tyčí. Také slouží ke snížení deformace povlaku tečením za provozu. Proutek může obsahovat axiální blanket, který je tvořen sloupcem tabletek z přírodního uranu na koncích palivového proutku. Blanket je využíván ke snížení axiálního úniku neutronů a tím zvýšení využití paliva. Vzhledem k vyhořívání paliva se v palivových proutcích koncentrují štěpné produkty v plynném skupenství, aby nedošlo k poškození musí mít proutky dostatečný volný prostor nad palivovými tabletkami. Konstrukce palivového proutku je znázorněna na obrázku 2.2.

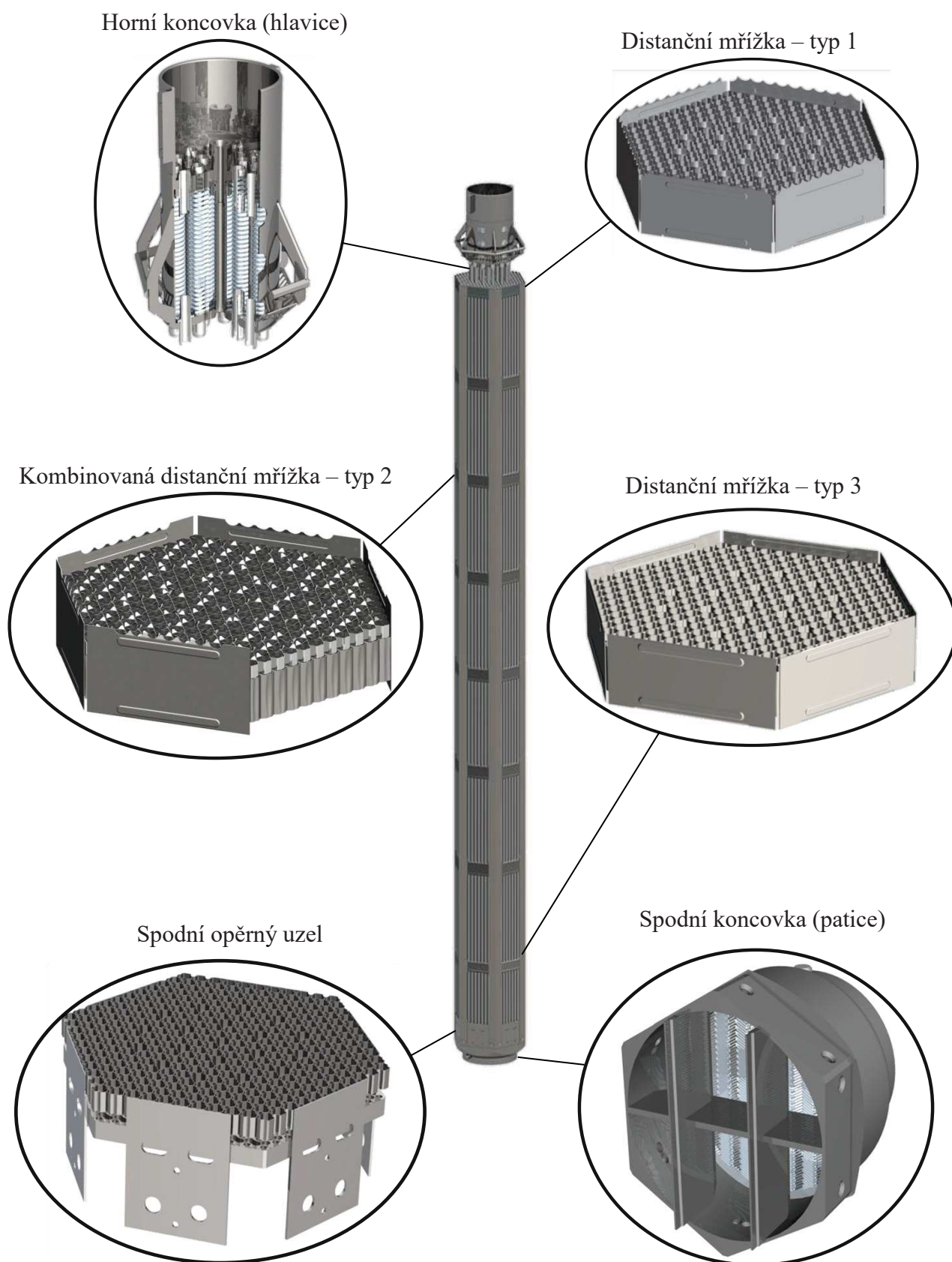
Některé z palivových proutků se zhotovují s vyhořívajícími absorbátory, které slouží ke kompenzaci reaktivity paliva ze začátku kampaně. Vyhořívající absorbátor je tvořen pomocí povlaku diboridu zirkonia ZrB_2 na povrchu palivových tablet. Vyhořívající absorbátor může být proveden jako diskretní, kdy je zasunut do vodících trubek daných palivových souborů.



Obrázek 2.2: Konstrukce palivového proutku VVANTAGE 6. [3]

2.2 TVSA-T mod.1

Palivový soubor TVSA-T byl vyvinut ruskou společností TVEL speciálně pro jadernou elektrárnu Temelín. Požadavkem byla kompatibilita s původně používaným palivem a možnost provozovat obě paliva současně. Jde o vylepšené palivo TVSA pro reaktory VVER-1000, které je používáno na 21 blocích z celkových 37 provozovaných reaktorů ([8], [9]). Konstrukce palivového souboru TVSA-T je na první pohled odlišná oproti předchozímu palivu. Změny se převážně týkají použitých materiálů, konstrukce a počtu distančních mřížek a uchycení klastrů. Změny proběhly i na palivových peletkách. Palivo se vyznačuje zvýšenou provozní spolehlivostí a odolností díky novým konstrukčním vylepšením. V průběhu plánovaných kampaní dojde k zanedbatelným deformacím PS a tudíž nedochází k tzv. „banánovému“ efektu a klastry mohou dosedat do svých koncových poloh. Palivový soubor používá uran-gadoliniové palivo pro lepší regulaci výkonu JE.



Obrázek 2.3: Konstrukce palivového souboru TVSA-T mod.1. [4]

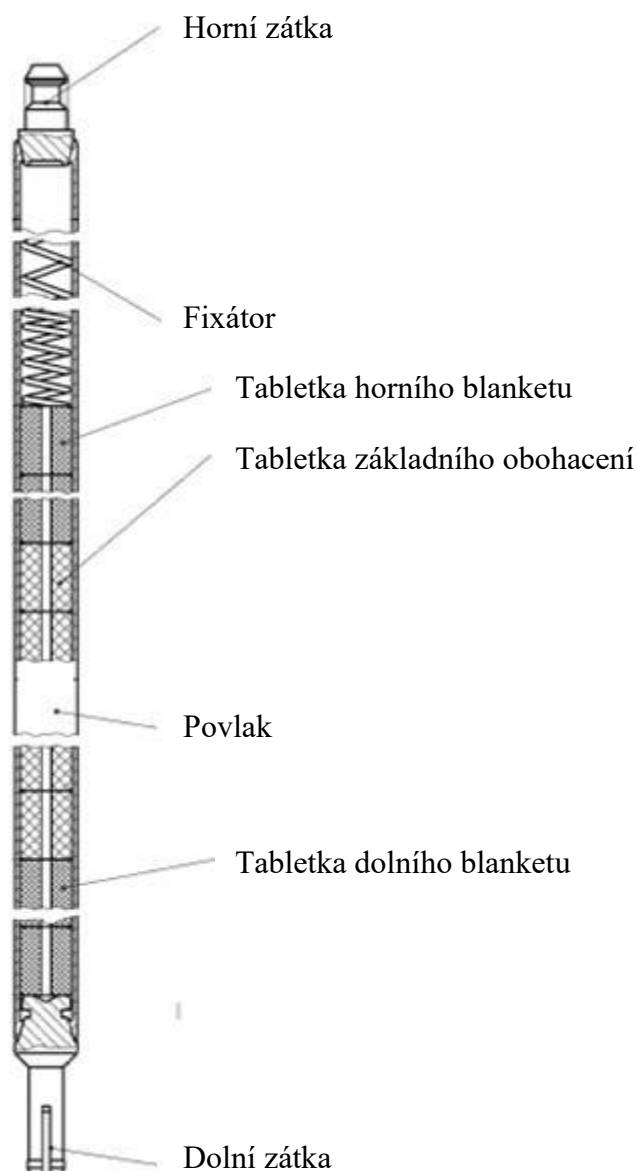
2.2.1 Palivový soubor

Palivový soubor má stejně jako předchozí typ paliva 312 palivových proutků uspořádaných v trojúhelníkové mřížce. Nosný skelet má hexagonální tvar. Uprostřed palivového souboru je centrální trubka, ve které jsou umístěny samonapájecí detektory pro vnitroblokové měření. Centrální trubka také slouží jako nosný prvek pro distanční mřížky. V palivovém souboru je rozmístěno 18 trubiček pro klastry, svazky s neutronovými zdroji, nebo pro svazky s vyhořívajícími absorbátory. Volba záleží na tom, v jaké části aktivní zóny bude daný soubor umístěn. Palivový soubor obsahuje z obou stran nátrubky. Horní nátrubek lze demontovat z důvodu kontroly palivových proutků. V případě netěsností, či poškození lze takto palivové proutky také vyměnit. Spodní nátrubek slouží převážně k usměrňování toku chladícího média palivovým souborem. Ve spodní části se nalézá i debris filtr. Filtr zabraňuje vniknutí větších částí, než-li 2 mm do palivového souboru mezi palivové proutky. Vniknutí taková částice by mohlo způsobit lokální nárůst teploty z důvodu zhoršeného průtoku chladiva a tudíž poškození palivového proutku.

Nosná konstrukce palivového souboru se skládá ze spodního opěrného uzlu, 18 vodících trubek, centrální trubky, 8 distančních mřížek a 6 úhelníků. Tyto úhelníky jsou v celé výšce palivového souboru. Nevýhodou je mírně zhoršený průtok mezi jednotlivými palivovými soubory. V palivovém souboru se nacházejí tři druhy distančních mřížek, které mají udržovat stejnou vzdálenost mezi palivovými proutky. Buňka distanční mřížky je navržena tak, aby umožňovala růst palivových proutků v průběhu působení v aktivní zóně. Na koncích palivových proutků jsou umístěny dolní a horní distanční mřížky. Mezi těmito mřížkami je umístěno 6 kombinovaných distančních mřížek. Kombinovanou mřížku tvoří dvě mřížky, distanční a mísící mřížky. Distanční mřížka zajišťuje konstantní polohu palivových proutků a vodících tyčí. Mísící mřížka slouží pouze k vytvoření turbulentního proudu. Konstrukce palivového souboru je zobrazena na obrázku 2.3.

2.2.2 Palivový proutek

Palivový proutek je také vyroben ze zirkoniové slitiny E110, ve kterém jsou naskládané palivové peletky UO_2 . Tento proutek je natlakován heliem a hermeticky uzavřen. Axiální blanket na koncích palivových proutků zamezuje úniku neutronů. Horní část palivového proutku obsahuje pružinu, která udržuje tabletky ve správné poloze. Prostor je také využíván pro hromadění plyných štěpných produktů. Palivové proutky, pro palivový soubor TVSA-T, jsou vyráběny ve dvou provedení. Palivové proutky jsou typu tvel a tveg. Prvním druhem je palivový proutek tvel, kdy se jedná o klasickou palivovou tyč, která je naplněna tabletkami s obohaceným uranem. Palivové proutky s označením tveg navíc obsahují vyhořívající absorbátor gadolinia Gd_2O_3 , který slouží ke kompenzaci vyšší reaktivity čerstvého palivového souboru ze začátku kampaně.



Obrázek 2.4: Konstrukce palivového proutku TVSA-T mod.1. [3]

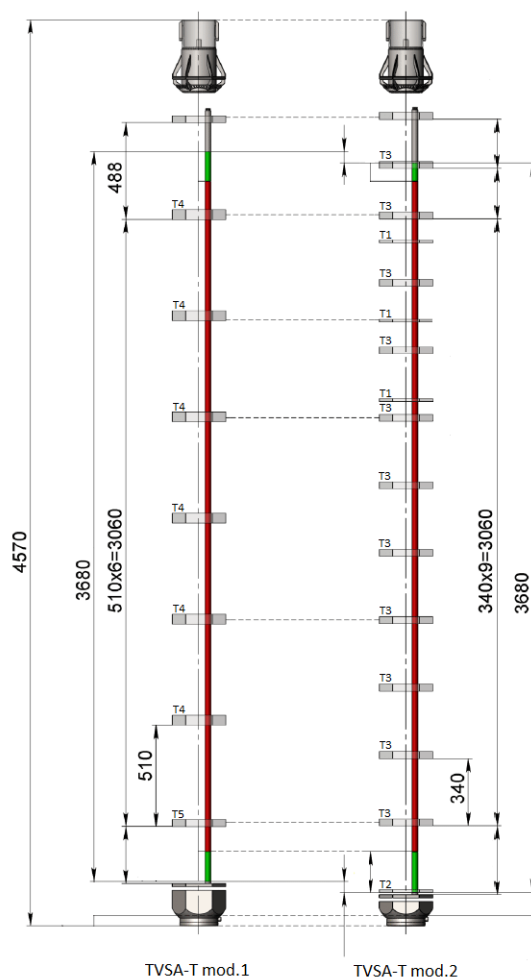
2.3 TVSA-T mod.2

Palivový soubor TVSA-T mod. 2 byl stejně jako jeho předchůdce vyvinut ruskou společností TVEL. Jedná se o modernizovanou verzi a náhradu za současně používaný typ mod. 1. Hlavním rysem nového palivového souboru je změněný počet distančních mřížek, kdy změnami prošla i konstrukce distančních a mísících mřížek. Již není distanční a mísící mřížka v jedné kombinované mřížce, ale jsou samostatně umístěné. Změny jsou patrné i na palivových peletkách. V současnosti jsou palivové soubory zavezeny na druhém výrobním bloku ETE.

2.3.1 Palivový soubor

Modernizovaný palivový soubor má obdobnou konstrukci jako předchůdce. Počet palivových proutků a uspořádání zůstalo beze změny. Nosná konstrukce palivového souboru se skládá z centrální trubky, 18 vodících trubek a 6 úhelníků. Stejně jako předchozí verze palivového souboru má spodní koncovku s debris filtrem a horní koncovku. 12 distančních mřížek je rovnoměrně rozmístěno po výšce palivového souboru, je jich o 4 více než u předchozí verze.

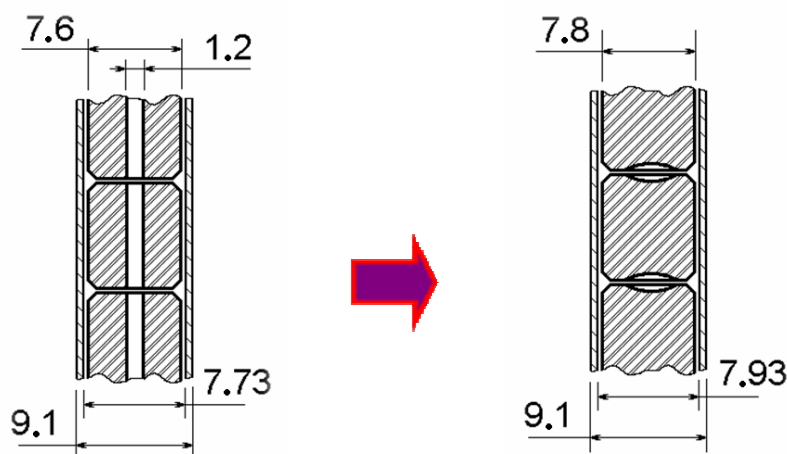
Zásadní modernizací prošly mísící mřížky. Oproti palivu TVSA-T mod.1 nejsou součástí kombinované mřížky spolu s distanční mřížkou. Vylepšení mísících mřížek proběhlo z důvodu optimalizace účinnosti těchto mřížek. Konstrukce lopatek mísící mřížky byla přepracována tak, aby chladicí médium proudilo zleva doprava skrze palivové proutky. Takto konstrukčně řešené lopatky mísících mřížek jsou označeny jako „row-through“. Výsledky provedených testů prokázaly, že modernizované mísící mřížky „row-through“ jsou účinnější v odvodu tepla z palivových proutků, než-li starší typ mísících mřížek „swirling“. Mísící mřížky jsou umístěny v horní části palivových souborů mezi distančními mřížkami. Jejich počet byl zmenšen na 3. Na obrázku 2.5 je znázorněn rozdíl mezi palivem TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 2.



Obrázek 2.5: Rozdíl v rozmístění distančních a mísících mřížek mezi palivem. TVSA-T mod.1 a TVSA-T mod. 2 [10]

2.3.2 Palivový proutek

Palivový proutek neměl žádné podstatné změny ale došlo ke změně palivové peletky. Palivová peletka u verze mod.1 měla středový otvor, ten u nové verze chybí. Tato změna byla provedena ke zvýšení zatížení paliva. Rozdíl je zobrazen na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Vývoj konstrukce palivové peletky. [9]

2.4 LTA

Palivový soubor LTA byl vyvinut americkou společností Westinghouse. V dubnu 2019 bylo do prvního bloku zavezeno šest zkušebních palivových souborů. Konstrukce vychází z paliva RFWA. Nový design palivového souboru má méně distančních mřížek. Jedním z požadavků je kompatibilita s ostatními výrobci paliva. Byly zlepšeny mechanické vlastnosti a odolnost materiálu, aby nedocházelo k mechanickému poškození paliva během manipulace při vsázce. Tuhost paliva je ale nižší, než-li u PHASE-1X. Testy prováděné na šesti ukrajinských reaktorech VVER-1000 prokázaly, že kroucení palivového souboru je omezené s ohnutím menším než 10 mm.

Na obrázku 2.7 je znázorněn palivový soubor LTA. Palivový soubor se skládá z několika základních komponent, kterými jsou dolní nátrubek, horní nátrubek, který je demontovatelný z důvodu kontroly palivových prouteků a případné opravy vadných kusů. Pevnost palivového souboru zajišťuje třináct distančních mřížek. Palivový soubor obsahuje 312 palivových prouteků plněných heliem.

Tato kapitola o jaderném palivu byla zpracována s využitím [3], [4], [9], [11] [12], [13], [14].



Obrázek 2.7: Konstrukce palivového souboru LTA. [12]

3. Výpočetní kódy

Pro návrh a následný provoz jaderného reaktoru je podstatné znát detailní fyzikální děje v aktivní zóně reaktoru. To představuje velice náročný úkol vzhledem k velkému množství neutronových interakcí, proto se nemůžeme vyhnout určitým zjednodušujícím předpokladům. K výpočtu využíváme výkonné servery a celou řadu výpočetních programů (kódů). Hlavním úkolem bývá určení hustoty toku neutronů v AZ. Další důležité fyzikální veličiny se od neutronového toku odvíjí.

Výpočetní kódy lze obecně rozdělit podle principu výpočtu do dvou skupin, na kódy stochastické a deterministické. Stochastické metody pracují s určitou nahodilostí jevů. Z důvodu vysoké náročnosti na výpočetní výkon je potřeba vybrat konkrétní oblast a rozsah výpočtů. Deterministické metody jsou vždy definovány daným počátečním stavem a popisují určitou problematiku pomocí rovnic s určitým zjednodušením. Použití deterministické metody na rozdíl od stochastické vede ke stejnému výsledku za předpokladu stejných vstupních dat.

3.1 Stochastické kódy

Stochastické kódy v jaderném odvětví využívají pro výpočet metodu Monte Carlo. Kódy založené na metodě Monte Carlo představují přesný způsob počítání neutronových charakteristik v AZ reaktoru. Velkou nevýhodou jsou vysoké požadavky na výpočetní výkon počítače pro výpočet realistického 3D modelu celé AZ. Pro tyto výpočty se více hodí deterministické kódy. Kódy založené na metodě Monte Carlo se využívají k výpočtu referenčních hodnot.

Principiálně je metoda Monte Carlo jednoduchá. Při snaze určit hodnotu veličiny, která je výsledkem náhodného děje, je provedeno velké množství simulací tohoto děje a výsledky jsou následně zpracovány pomocí statistických metod. Zvyšujícím počtem simulací se výsledek přibližuje skutečné hodnotě.

Kódy využívající stochastické metody jsou například:

- MCNP - je vyvíjen od šedesátých let dvacátého století. Je založen na výsledcích výzkumu od zakladatelů metody Monte Carlo. Tento kód má velkou oblast využití, lze použít například k analýze vyhořívání jaderného paliva, výpočtu kritičnosti nebo k výpočtu radiační ochrany.
- SERPENT - je trojrozměrný výpočetní kód, který byl vyvinut speciálně pro výpočty v reaktorové fyzice. SERPENT se využívá k řešení problémů zabývajících se studiem palivových cyklů zahrnujících výpočty vyhořívání jaderného paliva. Dá se také využít pro vzdělávací účely a demonstraci nejrůznějších jevů reaktorové fyziky.

3.2 Deterministické

Výpočetní kódy založené na deterministické metodě využíváme v širokém spektru výpočtů. Od procesních kódů, které se používají pro zpracování naměřených a zhodnocených dat, až po celoreaktorové simulace.

Kódy využívající deterministické metody jsou například:

- DYN3D - tento kód je primárně určený k trojrozměrným analýzám rychlých přechodových procesů v AZ lehkovodních reaktorů. Výpočty lze provést jak pro reaktory západního typu se čtvercovým palivem, tak i pro reaktory východního typu s hexagonálním palivem.
- HELIOS - jedná se o dvourozměrný transportní kód, který je určen pro výpočet vyhořívání jaderného paliva a pro výpočet dávek záření γ v palivových souborech.
- MOBY-DICK - podrobněji v další kapitole.
- ANDREA - vývoj započal v roce 2003. Kód pracuje se 60° symetrií. Využívá se k výpočtům pro projektování bezpečnostního hodnocení palivových vsázek pro reaktory typu VVER.

3.3 MOBY-DICK

Výpočetní kód MOBY-DICK je jedním ze základních výpočetních programů používaných v ČR pro analýzu fyzikálních dějů v jaderném reaktoru. Tento výpočetní kód byl vyvinut společností Škoda JS a.s. primárně pro optimalizaci palivových vsázek. Využívá se pro analýzy reaktorů východního typu VVER-440 a pro výkonnější reaktory VVER-1000. MOBY-DICK řeší neutronový tok v aktivní zóně pomocí difúzní teorie. Výpočetní kód je využit pro simulace provozu a efektivního využití paliva a při výpočtech termohydraulických charakteristik, které slouží pro bezpečný chod reaktoru.

Program je napsán v jazyce Fortran 77. Původní kód byl vyvinut pro pracovní stanice HP B2600 a HP C3700. Se zvyšujícím se výkonem osobních počítačů byl tento kód upraven i pro PC. Výpočetní kód je rozdělen na neutronově-fyzikální blok a termohydraulický blok.

Pro řešení lze vybrat druh výpočetní sítě, na které jsou výpočty prováděny. Základní hrubá síť je tvořena pomocí hexagonů, což odpovídá dělení na jednotlivé palivové soubory. K optimalizačním úlohám je rozlišení sítě nízké, a proto se využívá rozdělení jednotlivých ok sítě na $6k^2$ elementů. Nejčastěji se využívá 24 nebo 96 rovnostranných trojúhelníků na jedno oko hexagonální sítě.

3.3.1 Metoda řešení

MOBY-DICK je jedním z kódů využívajících při řešení neutronových toků v AZ difúzní teorii (popis této teorie je zpracován v publikaci [15] v kapitole 4.2). V principu řeší soustavu malogrupových difúzních rovnic. Uvažují se 2 grupy okamžitých neutronů a 6 až 8 grup zpožděných neutronů. Difúzní rovnice má tvar:

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div} [D^g(\mathbf{r}, \tau) \operatorname{grad} \varphi^g(\mathbf{r}, \tau)] + \left[\sum_r^g \mathbf{r}, \tau + D^g(\mathbf{r}, \tau) B^{2g}(\mathbf{r}, \tau) \right] \varphi^g(\mathbf{r}, \tau) = \\
 \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \sum_s^{h \rightarrow g} (\mathbf{r}, \tau) \varphi^h(\mathbf{r}, \tau) + \frac{X^g(\mathbf{r}, \tau)}{k_{ef}} S(\mathbf{r}, \tau) + Q^g(\mathbf{r}, \tau) \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Kde:	$g = 1 \dots G$	- index grupy, G je počet energetických grup
	$D^g(\mathbf{r}, \tau)$	- difúzní koeficient
	$\varphi^g(\mathbf{r}, \tau)$	- hustota toku neutronů
	$\sum_r^g(\mathbf{r}, \tau), \sum_s^{h \rightarrow g}(\mathbf{r}, \tau)$	- makroskopické účinné průřezy pro absorpci a rozptyl
	$X^g(\mathbf{r}, \tau)$	- štěpné spektrum
	k_{ef}	- koeficient násobení
	$S(\mathbf{r}, \tau)$	- štěpný zdroj
	$Q^g(\mathbf{r}, \tau)$	- externí neutronový zdroj
	$B^{2g}(\mathbf{r}, \tau)$	- pro 3D výpočty je tento člen roven nule, v případech s méně dimenzemi zastupuje nadbytečnou axiální absorpci

3.3.2 Popis vstupních souborů

Vstupních souborů pro výpočty v kódu MOBY-DICK je několik, kromě samotných vstupních dat jde o knihovny, soubory pro termohydraulické výpočty, archívy, apod. Vlastní vstupní data jsou textově zadána v blocích. Struktúra vstupních dat je zobrazena na příkladu první kampaně čtvrtého bloku na EDU (obrázek 3.1). Vstupní soubory dalších kampaní vycházejí z prvního souboru. Nemají detailně popsanou vstupní kazetovou mapu, ale jen seznam překládek a otočení jednotlivých palivových souborů.

Tato kapitola o výpočetních kódech byla zpracována s využitím [15], [16], [17]

```

TRAP      GOARCHIVED ... Výběr výpočetní stezky + požadavek na archivaci výsledků
RESULTS  BPOWER-2D ... Výběr tisku výsledků (zde mapa rozložení relativních výkonů v biprovském formátu)
#
WD422FE8      MIX ] ... Zadání názvu knihovny difuzních dat (a jejich spektrálních korekci) + zadání
WS422FE8      geometrie výpočtu (zde poproutkový výpočet, jinak heslo COARSE)
WD422FE8
#
BIPROU KN CQ ... Tisk dodatečných informací do výsledků (zde jméno kazety a max. výkon kanálu)
DB4C01ST XC NEW          PW      TI 200.QM 8270.CB ] ... Úvodní data při výpočtu nové varianty
8.70PR 12.3-          PN 1375.UN      4CY      1      (výkon, tlak, teplota,...)
HEIGHT-R      249.900 42 ... Zadání výšky zóny a jejího dělení + geometrie reflektoru (zde pravidelné axiální
NO REFL.          dělení a bez difuzně řešeného reflektoru)

CORE MAP TROT. 60
2001 1002 2003 2004 1005 1006 2007 2008 3009
2010
      2011 1020 2028 2035 2042 1048 1053
3057 3059
      1012 2021 1029 1036 2043 2049 3054
3058
      2013 1022 2030 1037 1044 1050
3055
      2014 1023 1031 2038 2045 3051
3056
      2015 2024 1032 2039 2046
3052
      1016 2025 1033 3040 3047
      1017 3026 3034 3041
      3018 3027
      3019

*
RCCG MAP T 7
7 0 0 5 0 0 6 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 2 0 0 4 0
0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0
0 0 3 0 0
0 0 0 0
0 0
0

*
RCCINS.N - 2 -12 238
190 6
190 7

] Údaje o zasunutých regulačních kazetách + do jaké hloubky jsou zasunuty

ASSEMBLY
SUR16ORI 1001-099
SUR24ORI 2001-099
SUR36ORI 3001-099
] Blok přiřazení určitého materiálu k určité skupině kazet (parametry
materiálů v knihovně)

#
DB4C0101 XC DB4C01ST MP- PW 1375.TI 266.506 190.07 190.
TI-STEPR F 4 2. 4 3. 1 20.
#
DB4C0101 XC DB4C0101 MP-
TI-STEPR F 15 20.
#
DB4C01S1 XC DB4C0101 MP- 06 201.07 201.
TI-STEPR F 3 10.
#
DB4C01S2 XC DB4C01S1 MP- 06 250.07 250.
TI-STEPR F 3 10.
#
DB4C01P1 XC DB4C01S2 MP- TI 265.
TI-STEPR F -339.1
#
DB4C01EX X DB4C01P1 MP- PW AC
TI-STEPR 1 60.
#
stop ... Ukončení výpočtu
    
```

Zadání kazetové mapy, popř. překládkového schématu (zde 60° rotační symetrie v biprovském tvaru)

Mapa rozmístění regulačních kazet a jejich umístění do skupin

Údaje o zasunutých regulačních kazetách + do jaké hloubky jsou zasunuty

Blok přiřazení určitého materiálu k určité skupině kazet (parametry materiálů v knihovně)

Zadání dalších navazujících variant výpočtu a jejich parametrů

Obrázek 3.1: Popis vstupních dat programu MOBY-DICK. [15]

4. Použitý model

Cílem této práce je analyzovat vliv axiálního dělení na lineární výkon a neutronové fyzikální parametry palivové vsázky. Použitý 3D model byl navržen pro výpočetní kód MOBY-DICK. Výpočty byly prováděny pro ruskou referenční vsázku navrženou dodavatelem paliva. Kartogram této palivové překládky je zobrazen na obrázku 4.1. Z kartogramu lze zjistit počet palivových cyklů jednotlivých palivových souborů, druh palivového souboru, aktuální pozici a předchozí pozici v předešlém cyklu. K sestavení zmíněné palivové vsázky je potřeba palivových souborů typu TVSA-T mod. 2. z různou profilací palivových proutků. Přehled použitých palivových souborů je uveden v tabulce 4.1, ve které jsou uvedeny základní charakteristiky jednotlivých PS. Na obrázku 4.2 jsou zobrazeny schémata těchto palivových souborů v příčném řezu. Blanket na horním a dolním konci má délku 100 mm a 200 mm s přírodním obohacením 0,71% U^{235} . V každém palivovém cyklu vkládáme do reaktoru 36 čerstvých PS, 6 PS X47E9, 6 PS X49G6 a 24 PS X49E6. Z kartogramu lze vidět, že se čerstvé palivo zaváží převážně na okraj AZ. Pokud by byla tato vsázka reálně použita, reaktorová nádoba by byla větší měrou namáhána neutronovým zářením oproti vsázce, která by byla navržena s ohledem na rovnoměrné rozložení výkonu na kraji aktivní zóny.

Tabulka 4.1: Popis základních vlastností PS pro ruskou palivovou vsázku

Typ PS	Průměrné obohacení paliva U^{235}		Počet PP bez Gd / obohacení [%w U^{235}]	Počet PP s Gd / obohacení [%w U^{235}] / Gd_2O_3 obsah [%w]
	Užití blanketu			
	Ne	Ano 0,71 %w U^{235}		
X47E9	4,67	4,35	303 / 4,7	9 / 3,6 / 5
X49G6	4,93	4,58	306 / 4,95	6 / 3,6 / 5
X49E6	4,93	4,58	306 / 4,95	6 / 3,6 / 5

Níže v bodech jsou popsány globální parametry, na které je zaměřena tato práce:

Koncentrace kyseliny borité

Jaderný reaktor je potřeba regulovat. Regulace probíhá pomocí vnesení kladné či záporné reaktivity. Vnášení reaktivity lze provést buď změnou konfigurace regulačních klastrů, kompenzací přebytečné reaktivity pomocí vyhořívajících absorbátorů, nebo změnou koncentrace kyseliny borité rozpuštěné v chladicím médiu.

Koeficient udávající koncentraci kyseliny borité v chladicím médiu je označena jako Cb. Koeficient je udáván v gramech na kilogram.

Axiální ofset

Větší rozměry aktivní zóny, které má i reaktor VVER-1000, mohou mít za následek rozdělení aktivní zóny na více částí. Každá část takto rozdělené AZ má rozdílnou reaktivitu a tudíž i tepelný výkon.

Při manipulaci s regulačními orgány se v AZ rozběhnou dynamické děje, které vedou ke kolísání neutronového toku v axiálních rovinách AZ a tím i k různým hladinám

výkonu. I když celkový výkon aktivní zóny $P_{stř}$ je konstantní, výkony horní části aktivní zóny P_h a dolní části P_d mohou být odlišné. Nerovnoměrné rozložení výkonu se nazývá axiální ofset, který je definován vztahem:

$$AO = \frac{P_h - P_d}{P_h + P_d} = \frac{\Delta I}{P_{stř}} \quad (4.1)$$

Kde: P_h - je výkon horní poloviny aktivní zóny
 P_d - je výkon dolní poloviny aktivní zóny
 $P_{stř}$ - je relativní výkon aktivní zóny
 ΔI - je axiální diference neutronového toku, též udávaná jako AFD

Axiální ofset je tedy koeficient nerovnoměrnosti udávající představu o axiálním rozložení výkonu. Nejoptimálnější je axiální ofset rovnající se nule, tedy kdy je výkon horní části roven spodní části. Je-li axiální ofset větší než nula, tak více než polovina výkonu reaktoru je produkována horní polovinou aktivní zóny. Axiální ofset nižší než-li nula znamená, že více než polovinu výkonu produkuje dolní polovina aktivní zóny. [18]

Koeficienty nerovnoměrnosti rozložení výkonů

Koeficienty nerovnoměrnosti rozložení výkonů v aktivní zóně reaktoru lze definovat jako bezrozměrné charakteristiky jednotlivých výkonových parametrů palivových souborů, palivovém proutku nebo axiálním úseku. Koeficienty jsou využívány při kontrole rozložení výkonu při projektování palivových vsázek, v bezpečnostních analýzách a jako kontrola rozložení výkonu za provozu jaderného bloku.

Základní koeficienty definované na úrovni palivových proutků jsou jaderný koeficient nerovnoměrnosti lineárních výkonů palivových proutků K_0 a radiální koeficient nerovnoměrnosti integrálních výkonů palivových proutků K_r . Tyto koeficienty jsou definovány jako:

$$K_0 = q_l / q_l^{stř} \quad (4.2)$$

$$K_r = N_r / N_r^{stř} \quad (4.3)$$

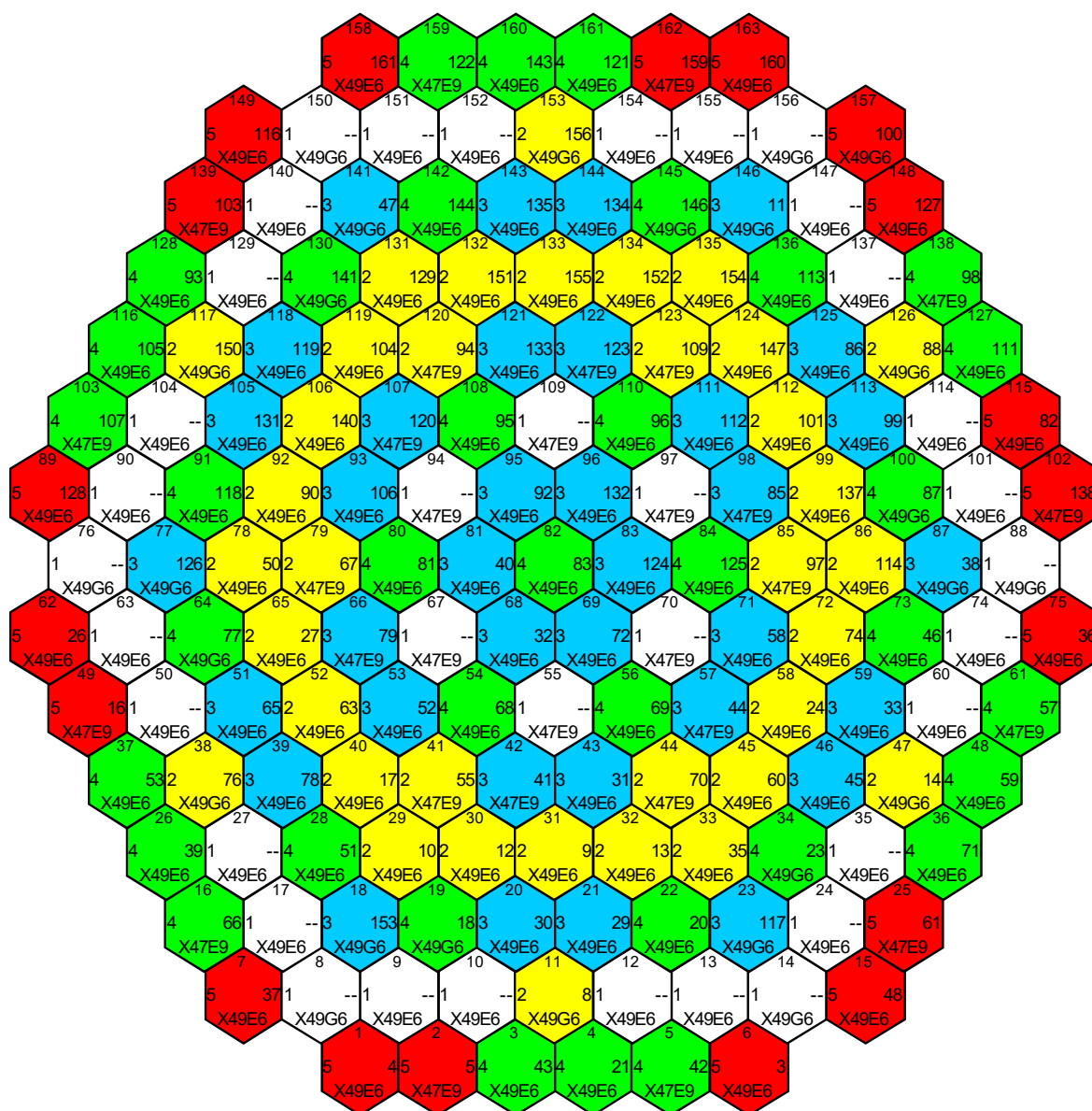
Kde: q_l - je lineární výkon palivového proutku
 N_r - je integrální výkon palivového proutku
 $q_l^{stř}, N_r^{stř}$ - střední hodnoty pro celou aktivní zónu

Na úrovni palivového souboru jsou definovány obdobně radiální koeficient nerovnoměrnosti integrálního výkonu palivového souboru K_q a objemový koeficient nerovnoměrnosti lineárního výkonu palivového souboru K_v . Oba koeficienty K_q a K_v jsou důležitým prvkem pro určení metodických chyb, jelikož vypočtené hodnoty těchto koeficientů lze porovnat s naměřenými hodnotami získaných ze systémů vnitroblokového měření. Koeficienty jsou definovány jako:

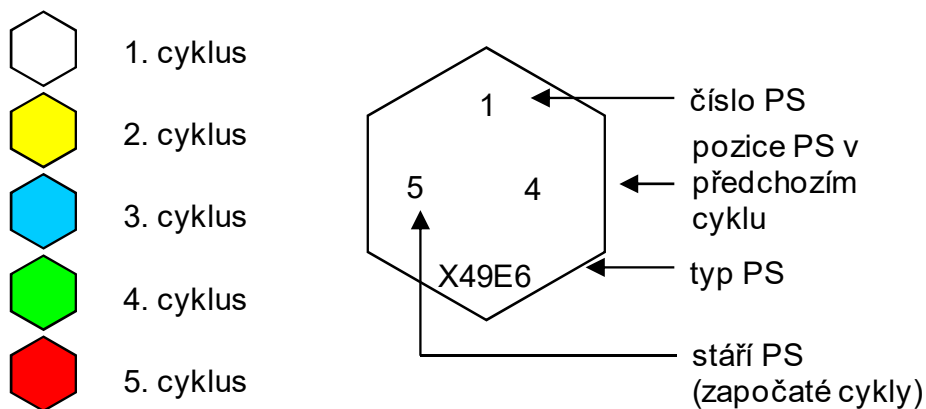
$$K_q = N_{PS} / N_{PS}^{stř} \quad (4.4)$$

$$K_v = Q_{PS} / Q_{PS}^{stř} \quad (4.5)$$

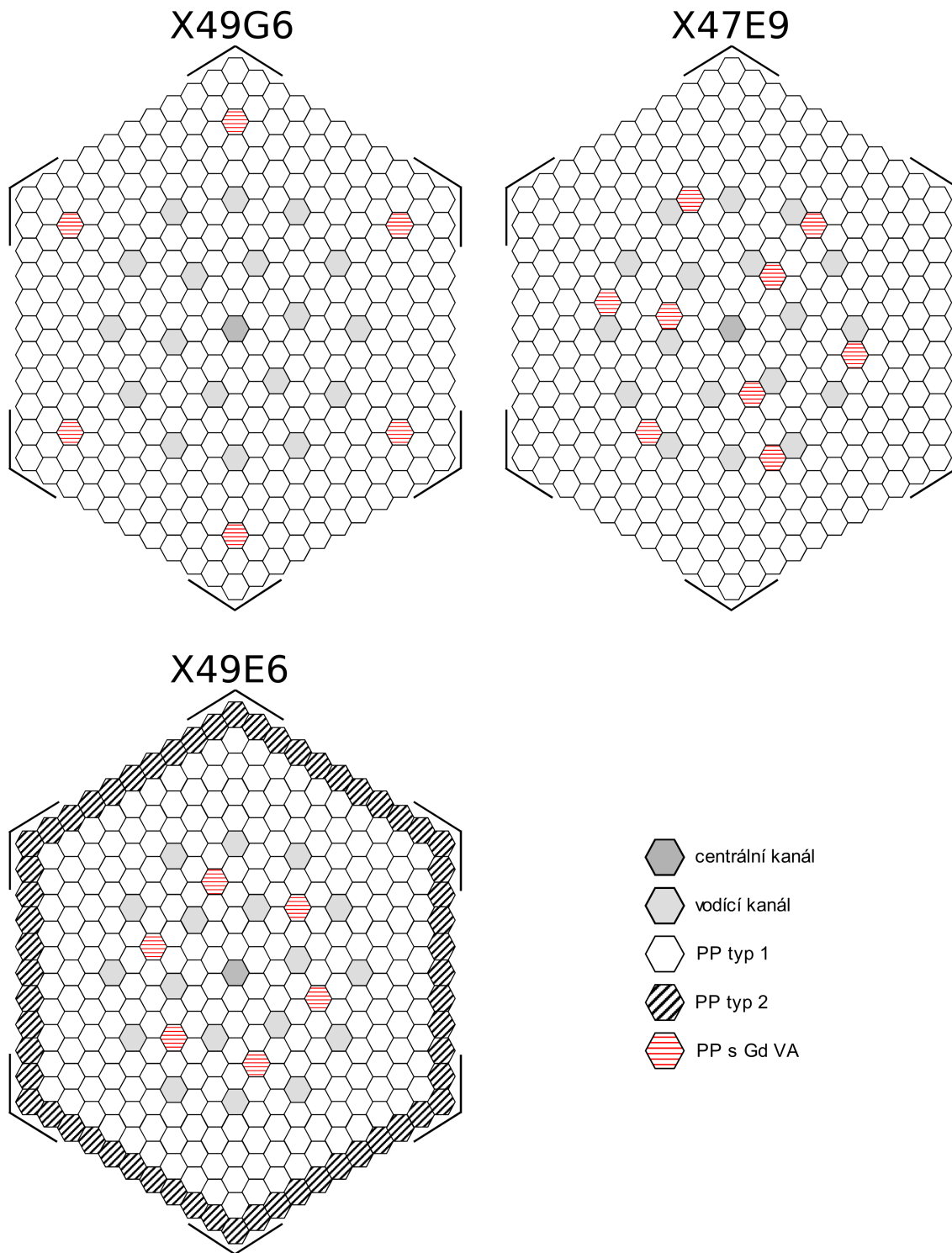
Kde: N_{PS} - je integrální výkon palivového souboru
 Q_{PS} - je lineární výkon v palivovém souboru
 $N_{PS}^{stř}$, $Q_{PS}^{stř}$ - střední hodnoty pro celou aktivní zónu



legenda



Obrázek 4.1: Ruská referenční vsázka. [19]



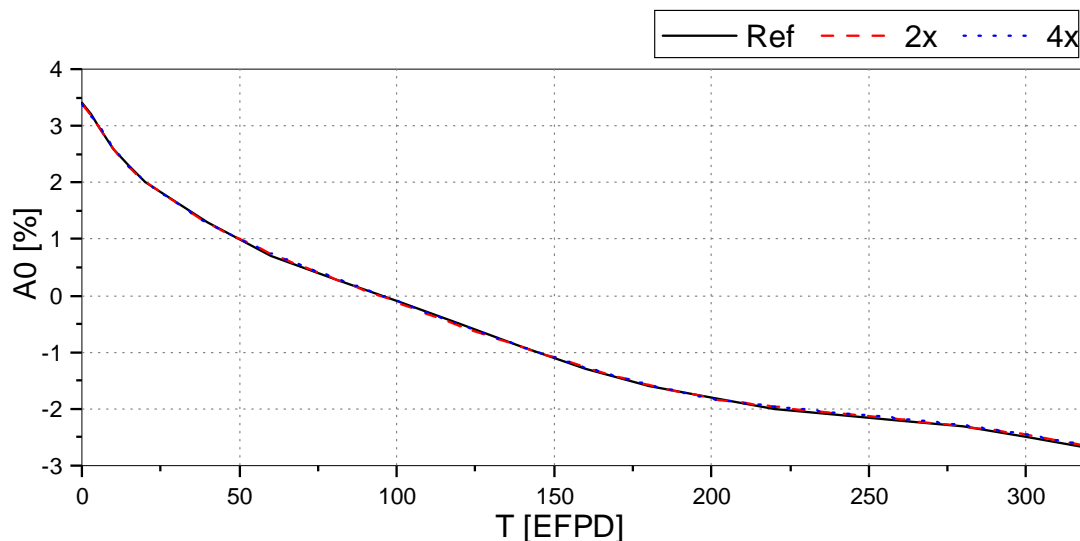
Obrázek 4.2: Palivové soubory. [19]

Každý typ PS ve výpočetním procesu pro MOBY-DICK je speciálně modelován a reprezentován knihovnou dvougrupových difúzních konstant. V homogenním řešení je palivový soubor reprezentován blanketem na koncích PS a homogenizovaným materiálem. Tento materiál reprezentuje jednotlivé slitiny, ze kterých je palivový soubor sestaven, vodu a samotné palivo, ve kterém probíhá jaderná štěpná reakce.

Simulace v prvním cyklu začaly s ruskou referenční vsázkou. Simulace probíhaly po dobu 22 cyklů, každý cyklus měl stejnou palivovou překládku (obrázek 4.1). Za tuto dobu došlo k ustálení hodnot.

V prvním kroku byl spuštěn model pro získání referenčních hodnot. Tento model je jedním z modelů používaných ŠJS pro bezpečnostní analýzy. Využívá některých zjednodušených předpokladů jako je homogenizace konstant. Tento model má 53 axiálních úseků. Výsledky z tohoto modelu budou v grafech značeny jako Ref.

Následovalo provedení výpočtů stále s homogenizovaným materiálem jen se změněným axiálním dělením, kdy byl zvýšen počet axiálních úseků. Zvýšení počtu axiálních úseků proběhlo ve dvou stádiích. Prvním zvýšením axiálních úseků vznikl model se 106 axiálními úseky, tudíž dvakrát více než-li má axiálních úseků referenční model. Zvýšení proběhlo jednoduchým podělením délky daného axiálního úseku dvěma a tím vznikly dva axiální úseky o poloviční délce původního axiálního úseku. Druhé zvýšení axiálních úseků vzniklo obdobně, ale axiální úsek referenčního modelu byl podělen čtyřmi. Tím vzniklo 212 axiálních úseků. Zvýšení počtu axiálních úseků nemělo dle předpokladu žádný efekt na změnu globálních parametrů, a tím byla ověřena funkčnost detailního podrozdělení. Na obrázku 4.3 je zobrazen graf axiálního ofsetu pro 53, 106 a 212 axiálních úseků. Značeny jsou jako Ref, 2x a 4x.

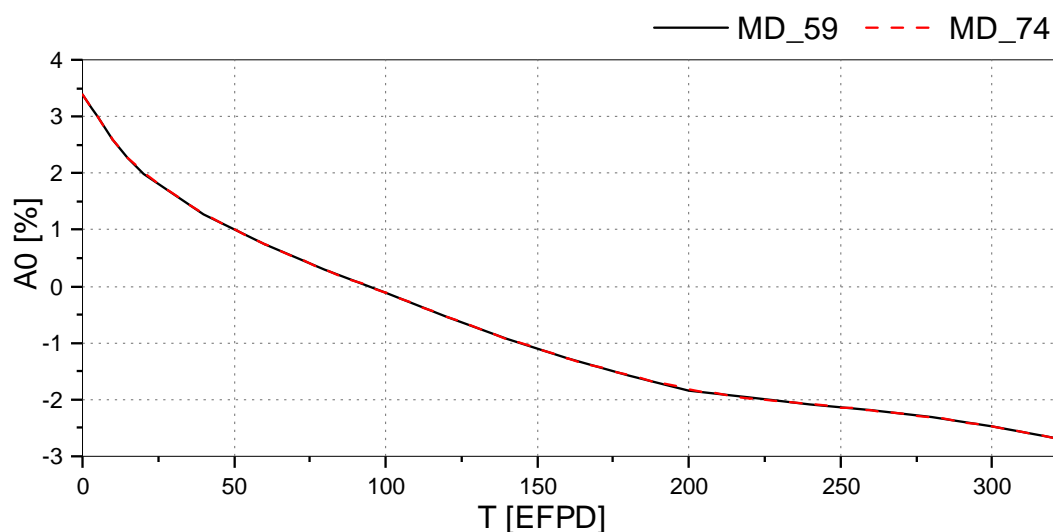


Obrázek 4.3: Porovnání AO pro různá axiální dělení

Pro 4x zjemněné dělení byla použita nová verze výpočetního programu MOBY-DICK. Tato nová verze má vylepšení pro lepší detailní modelování aktivní zóny.

Při přechodu na novou verzi výpočetního kódu bylo potřeba nejprve ověřit, zda-li tento přechod nezmění výsledky globálních parametrů a lineárních výkonů. Dle předpokladu by změna verze na tyto parametry neměla mít vliv. Tento předpoklad byl ověřen pomocí modelu s axiálním dělením o 53 axiálních úsecích. Tento model byl nejprve

spuštěn na starší verzi a následně i na nové verzi výpočetního kódu. Výsledky jsou reprezentovány opět grafem axiálního ofsetu na obrázku 4.4, kdy starší verze výpočetního kódu je označena jako MD_59 a novější verze je značena jako MD_74.



Obrázek 4.4: Porovnání AO pro různé verze kódu MOBY-DICK

Navržené axiální dělení bylo použito pro homogenní i heterogenní model. Axiální dělení bylo navrženo v závislosti na umístění distančních a mísících mřížek tak, aby axiální úsek být tvořen jen jedním materiálem v heterogenním modelu. Axiální dělení bylo navrženo s určitým inženýrským faktorem tak, aby pokud je to možné, byla velikost následujícího axiálního úseku stejná jako předchozí axiální díl.

Posledním krokem v tvorbě modelu bylo explicitní namodelování distančních a mísících mřížek v jednotlivých palivových souborech. Základní model, ze kterého vychází model pro explicitně namodelované mřížky, je tvořen třemi úseky, kterými jsou dolní blanket, homogenní materiál, horní blanket.

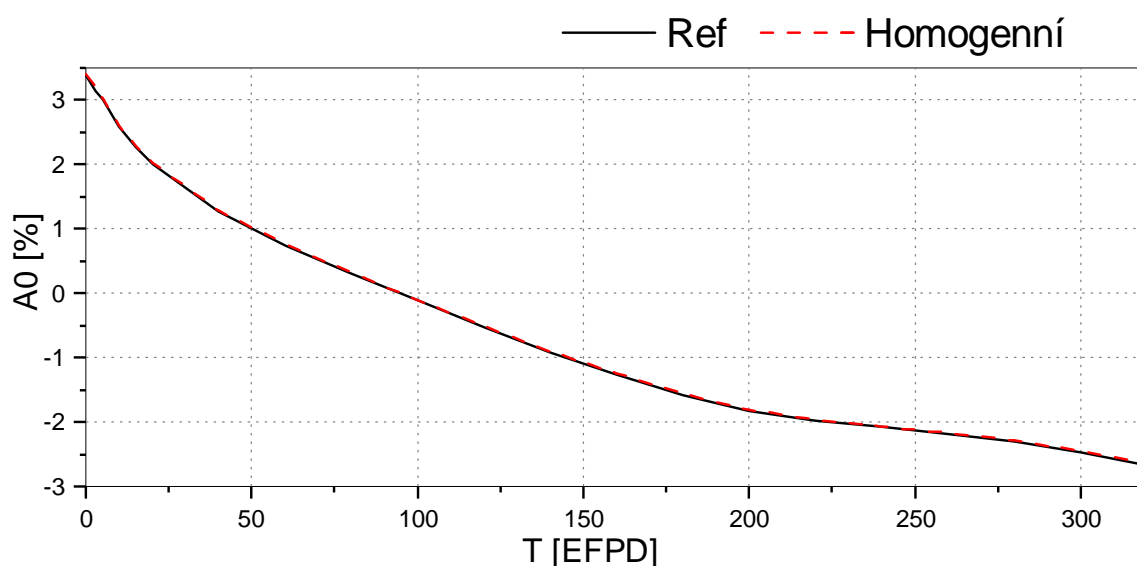
Největší úsek s homogenním materiálem byl rozdělen podle umístění jednotlivých mřížek na 27 úseků a jednotlivé úseky byly nahrazeny konkrétním materiálem, který se v daném místě nachází. Homogenní materiál se mohl nahradit třemi možnostmi, kterými jsou palivo UO_2 , distanční mřížky a mísící mřížky, pro které byly speciálně vytvořeny knihovny dvougrupových difúzních konstant. Tyto knihovny reprezentují vlastnosti daných materiálů.

5. Analýza výsledků

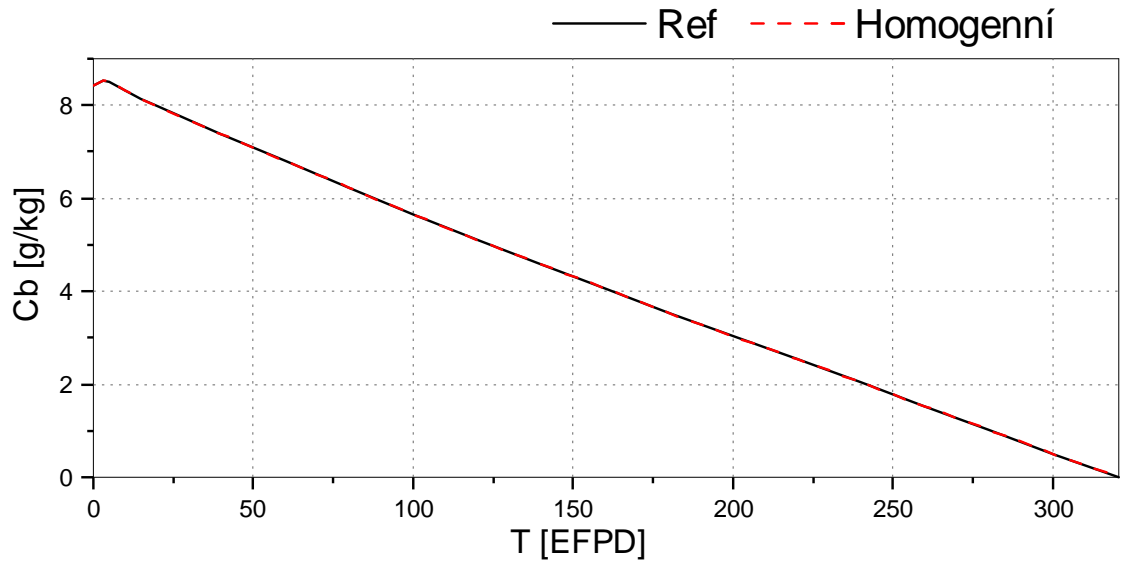
V této kapitole nalezneme analýzu lineárního výkonu a vybraných neutronově fyzikálních charakteristik palivových souborů v aktivní zóně reaktoru.

5.1 Globální neutronově-fyzikální parametry

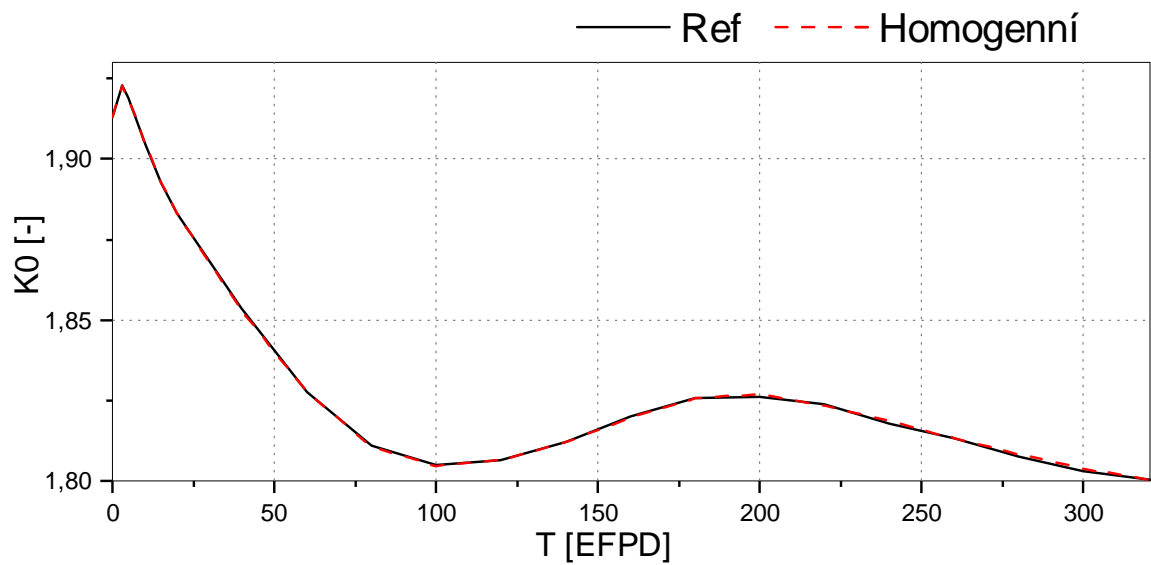
V této kapitole se detailně zaměříme na vyhodnocení vlivu na globální parametry. Nejprve si ověříme, že globální parametry pro návrh axiálního dělení homogenního modelu jsou totožné s referenčním modelem. Černá křivka označuje referenční parametry a červenou křivkou jsou vyneseny hodnoty globálních parametrů pro homogenní model. Obrázek 5.1 znázorňuje graf axiálního ofsetu, obrázek 5.2 zobrazuje graf koncentrace kyseliny borité, obrázek 5.3 - obrázek 5.6 zobrazuje grafy koeficientů nerovnoměrnosti. Dle předpokladu globální parametry jsou pro oba modely totožné.



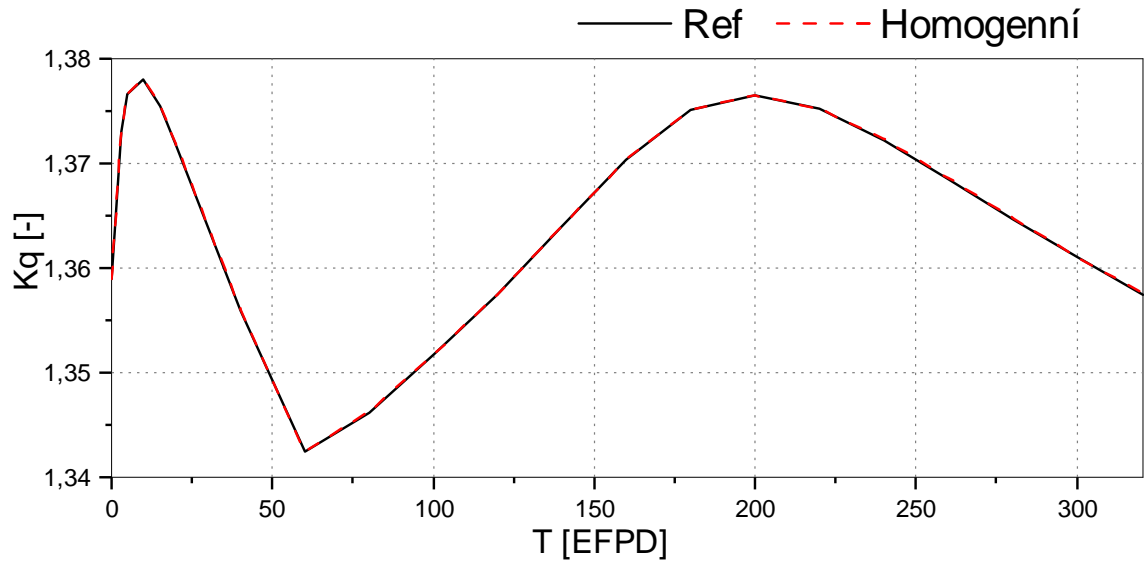
Obrázek 5.1: Porovnání AO mezi homogenním modelem a referenčním modelem



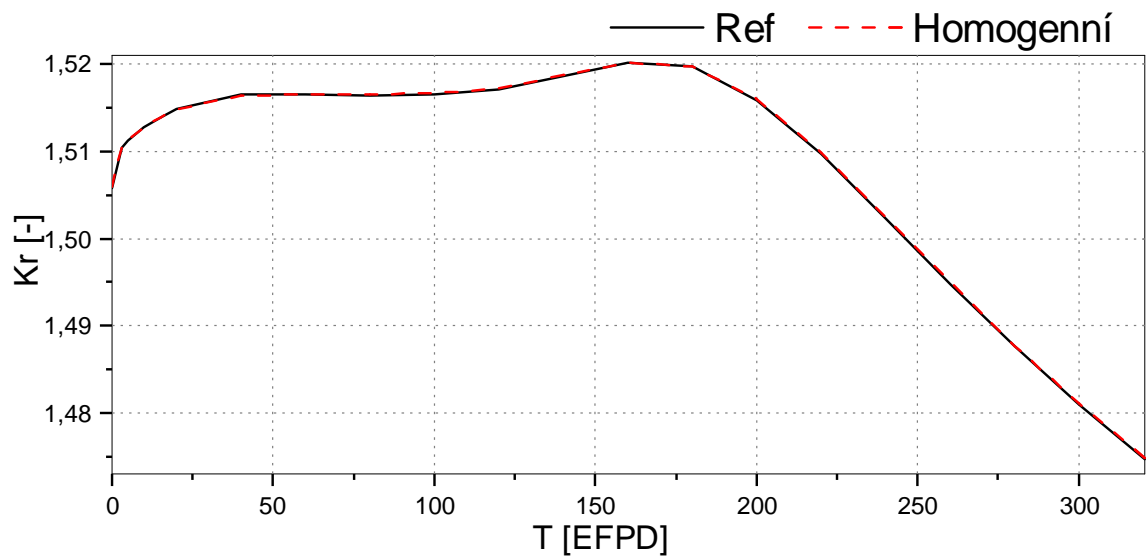
Obrázek 5.2: Porovnání C_b mezi homogenním modelem a referenčním modelem



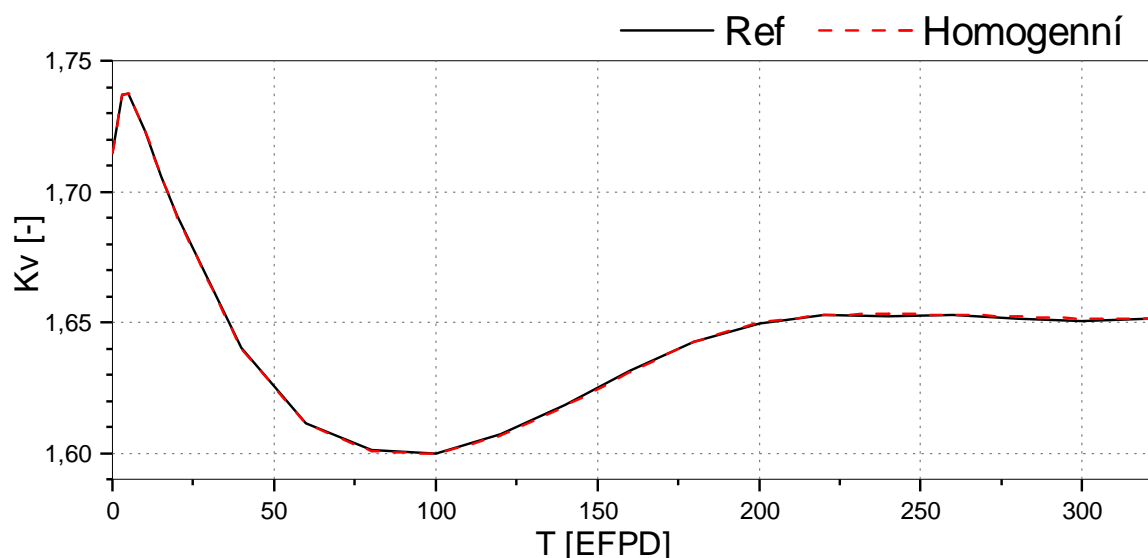
Obrázek 5.3: Porovnání K_0 mezi homogenním modelem a referenčním modelem



Obrázek 5.4: Porovnání K_q mezi homogenním modelem a referenčním modelem

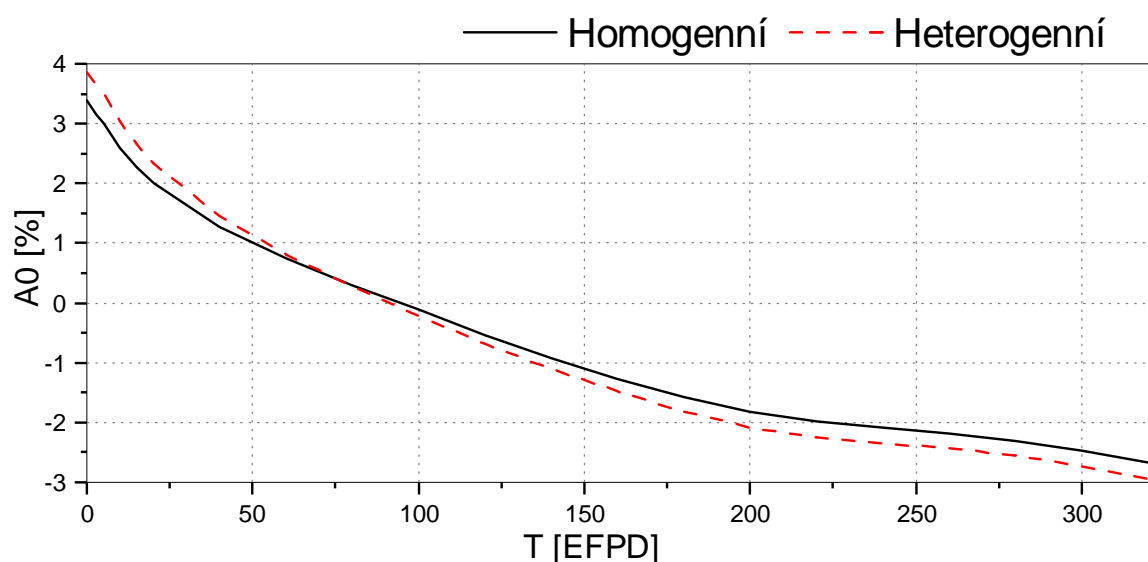


Obrázek 5.5: Porovnání K_r mezi homogenním modelem a referenčním modelem

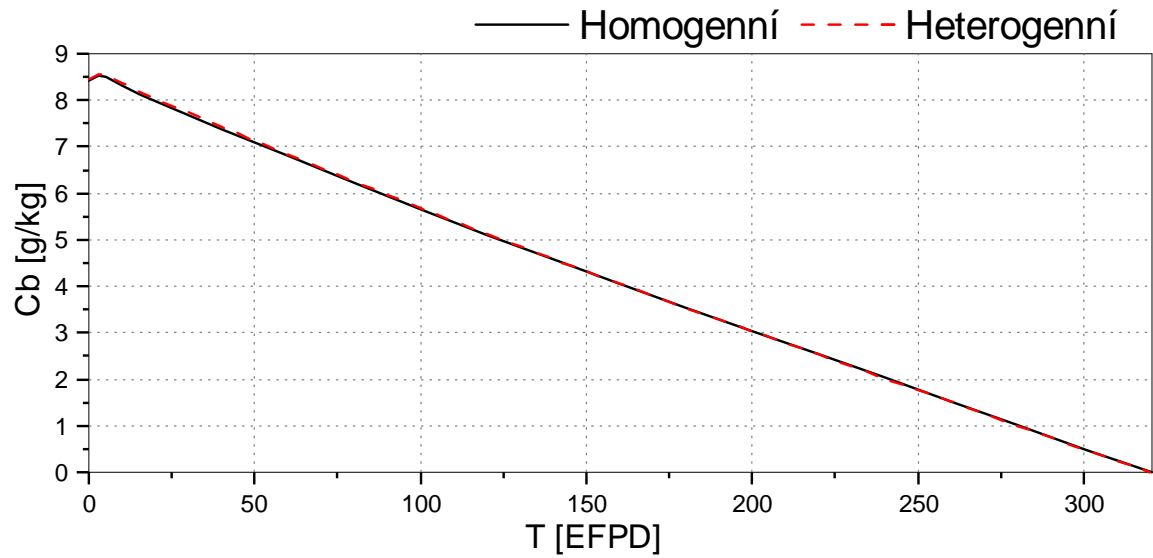


Obrázek 5.6: Porovnání K_v mezi homogenním modelem a referenčním modelem

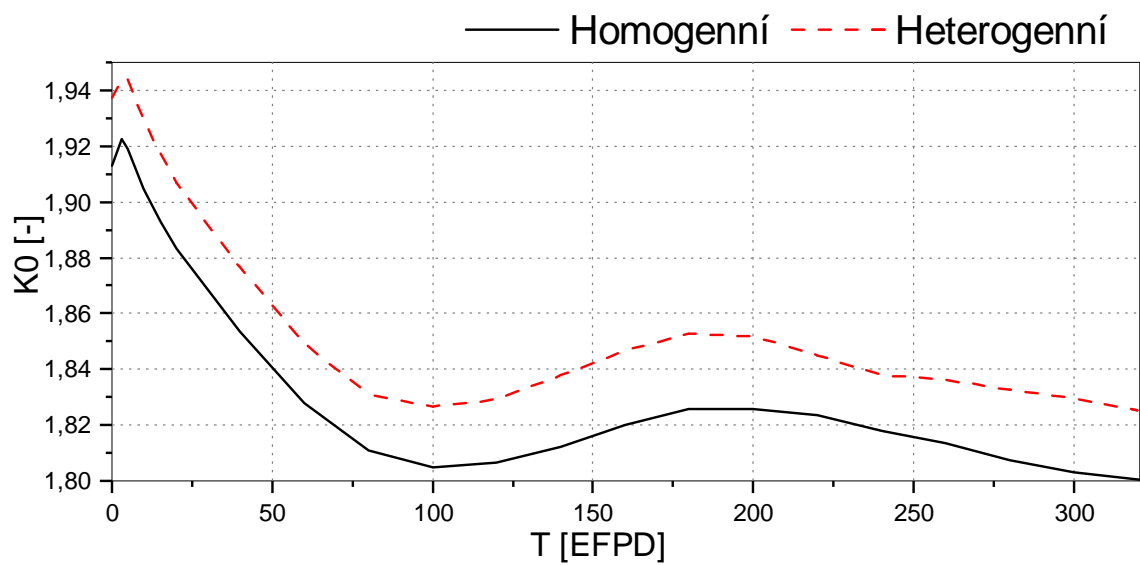
V druhém kroku byly porovnány globální parametry homogenního modelu s vytvořeným heterogenním modelem. Černá křivka označuje homogenní model a červenou křivkou je znázorněn heterogenní model. Obrázek 5.7 zobrazuje graf axiálního offsetu. Heterogenní model má ze začátku kampaně vyšší výkon v horní polovině reaktoru oproti homogennímu modelu, ale výkon se rychleji přenáší do spodní poloviny. Graf koncentrace kyseliny borité zobrazen na obrázku 5.8 je stejný jak pro homogenní tak i heterogenní model. Koeficienty K_q (obrázek 5.10) a K_r (obrázek 5.11) mají stejné průběhy jak pro homogenní i heterogenní model. U Koeficientů K_0 (obrázek 5.9) a K_v (obrázek 5.12) je heterogenní řešení větší oproti řešení homogennímu.



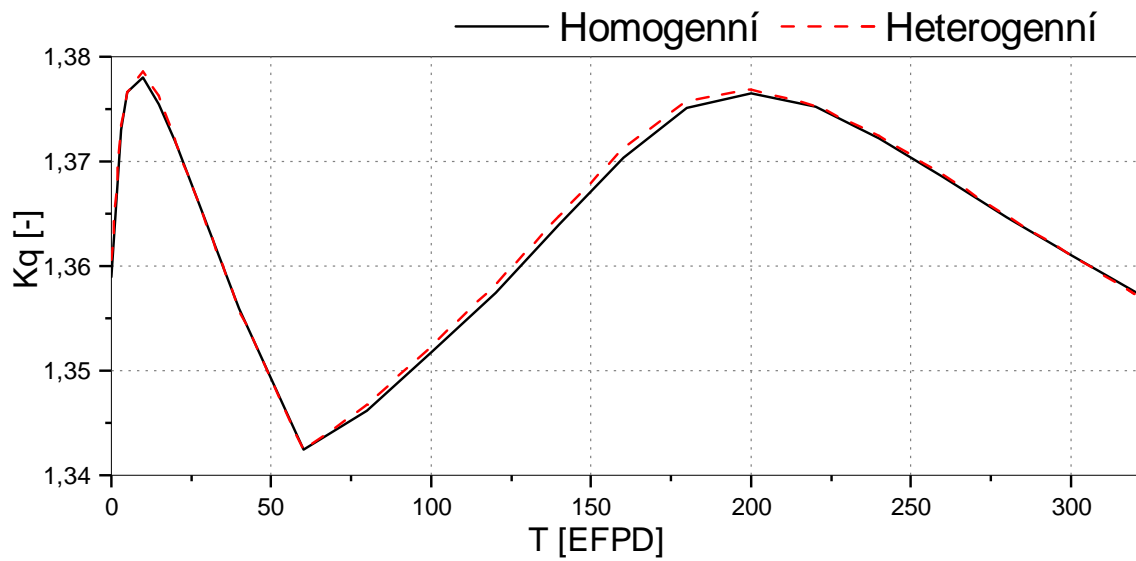
Obrázek 5.7: Porovnání AO mezi homogenním modelem a heterogenním modelem



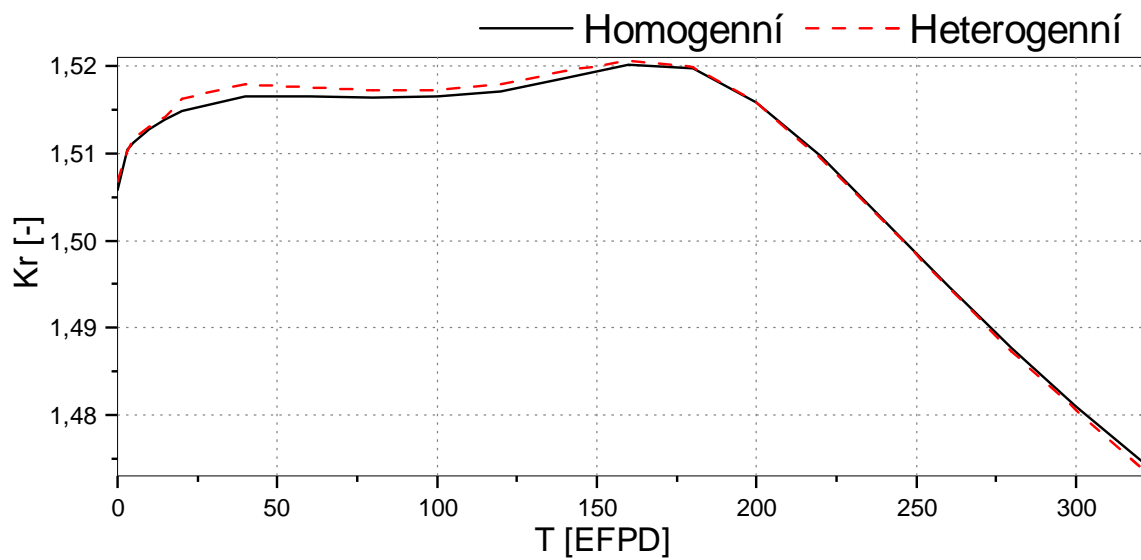
Obrázek 5.8: Porovnání C_b mezi homogenním modelem a heterogenním modelem



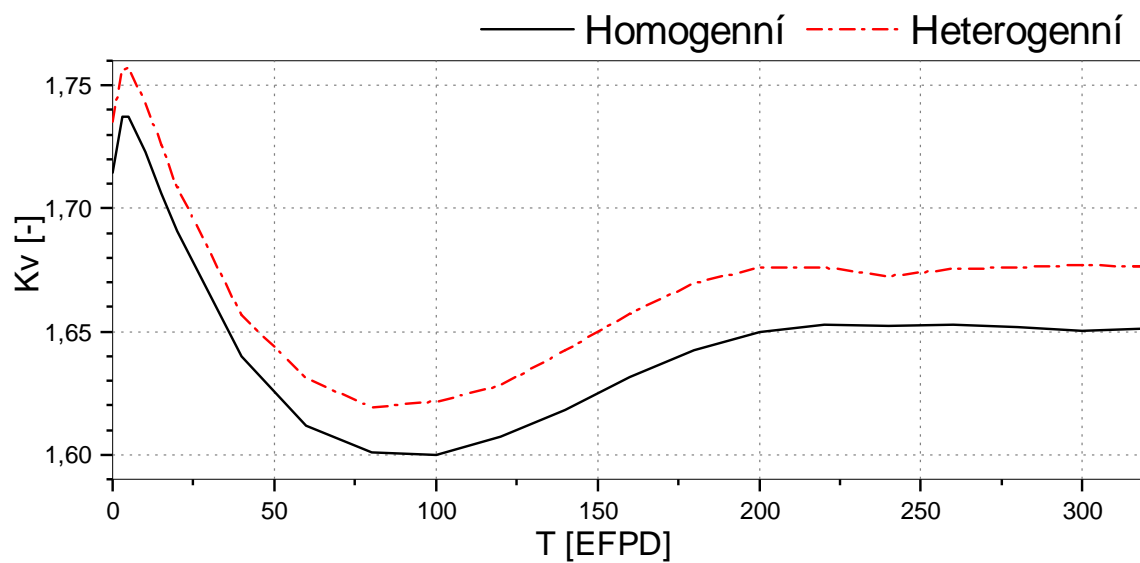
Obrázek 5.9: Porovnání K_0 mezi homogenním modelem a heterogenním modelem



Obrázek 5.10: Porovnání K_q mezi homogenním modelem a heterogenním modelem



Obrázek 5.11: Porovnání K_r mezi homogenním modelem a heterogenním modelem



Obrázek 5.12: Porovnání K_v mezi homogenním modelem a heterogenním modelem

5.2 Lineární výkon

Lineární výkon palivových souborů byl zkoumán v řezu aktivní zónou. Konkrétně se jedná o sedm palivových souborů na pozicích 82 až 88. V těchto sedmi palivových souborech se nachází 3 typy palivových souborů TVSA-T mod. 2. s různým stářím palivových souborů. Tabulka 5.1 zobrazuje zkoumané palivové soubory z hlediska lineárního výkonu.

Tabulka 5.1: Zkoumané palivové soubory

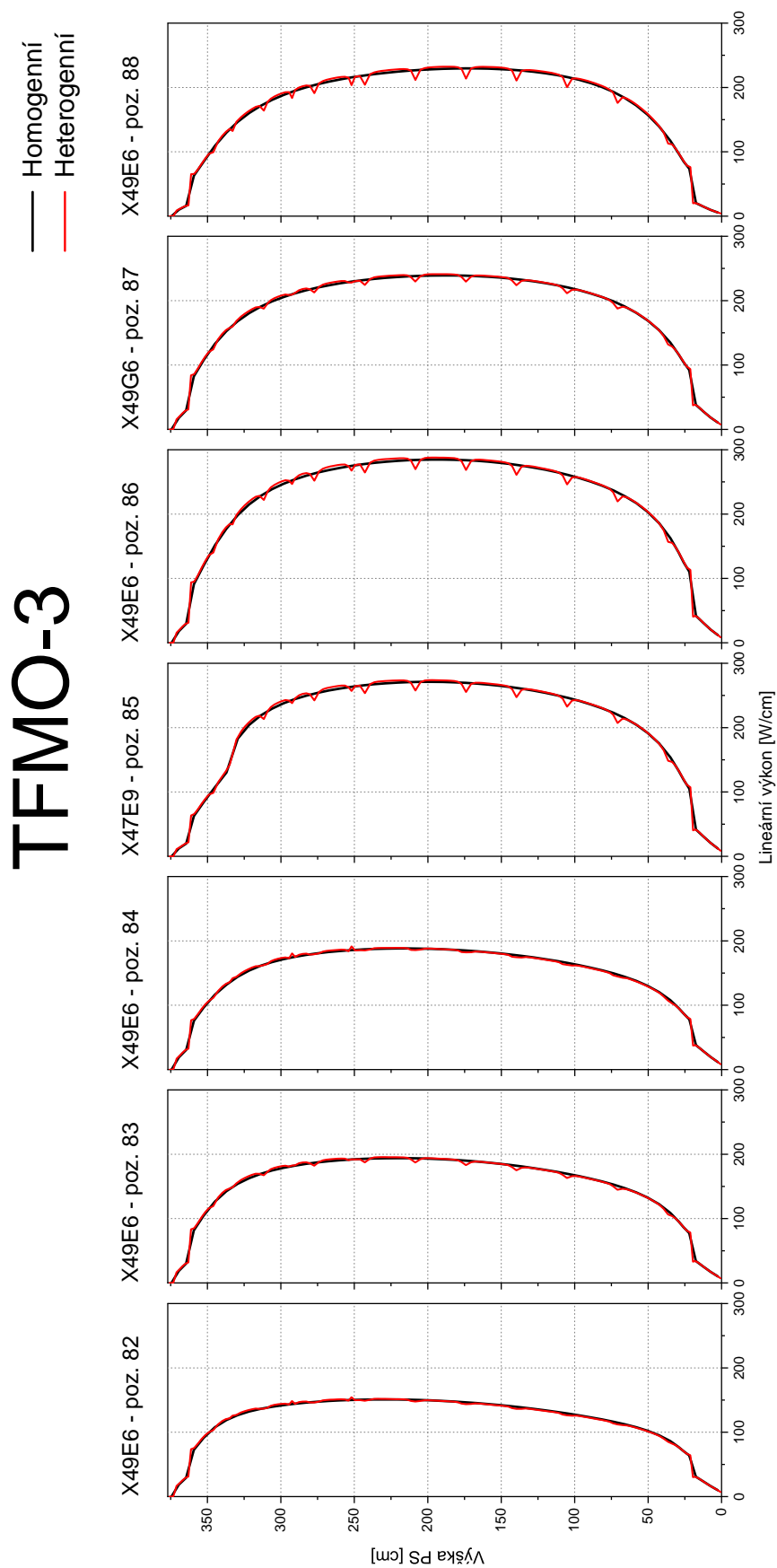
Pozice PS	Druh PS	Stáří PS	Pozice PS v předchozím cyklu
82	X49E6	4.cyklus	83
83	X49E6	3.cyklus	124
84	X49E6	4.cyklus	125
85	X47E9	2.cyklus	97
86	X49E6	2.cyklus	114
87	X49G6	3.cyklus	38
88	X49G6	1.cyklus	- - -

Výpočetní kód MOBY-DICK po dokončení simulací vygeneruje data v několika příslušných souborech. Pro vykreslení grafů lineárních výkonů ve vybraných palivových souborech byly data vzata z vygenerovaných souborů LVKA. Tento soubor obsahuje hodnoty lineárního výkonu v daném axiálním úseku pro všechny palivové soubory v celé délce kampaně. Pro detailní heterogenní model, který má 163 palivových souborů, každý PS má 312 palivových proutků s palivovým proutkem rozděleným na 145 axiálních úseků nám vzniká 7374120 sledovaných bodů pro každý sledovaný čas.

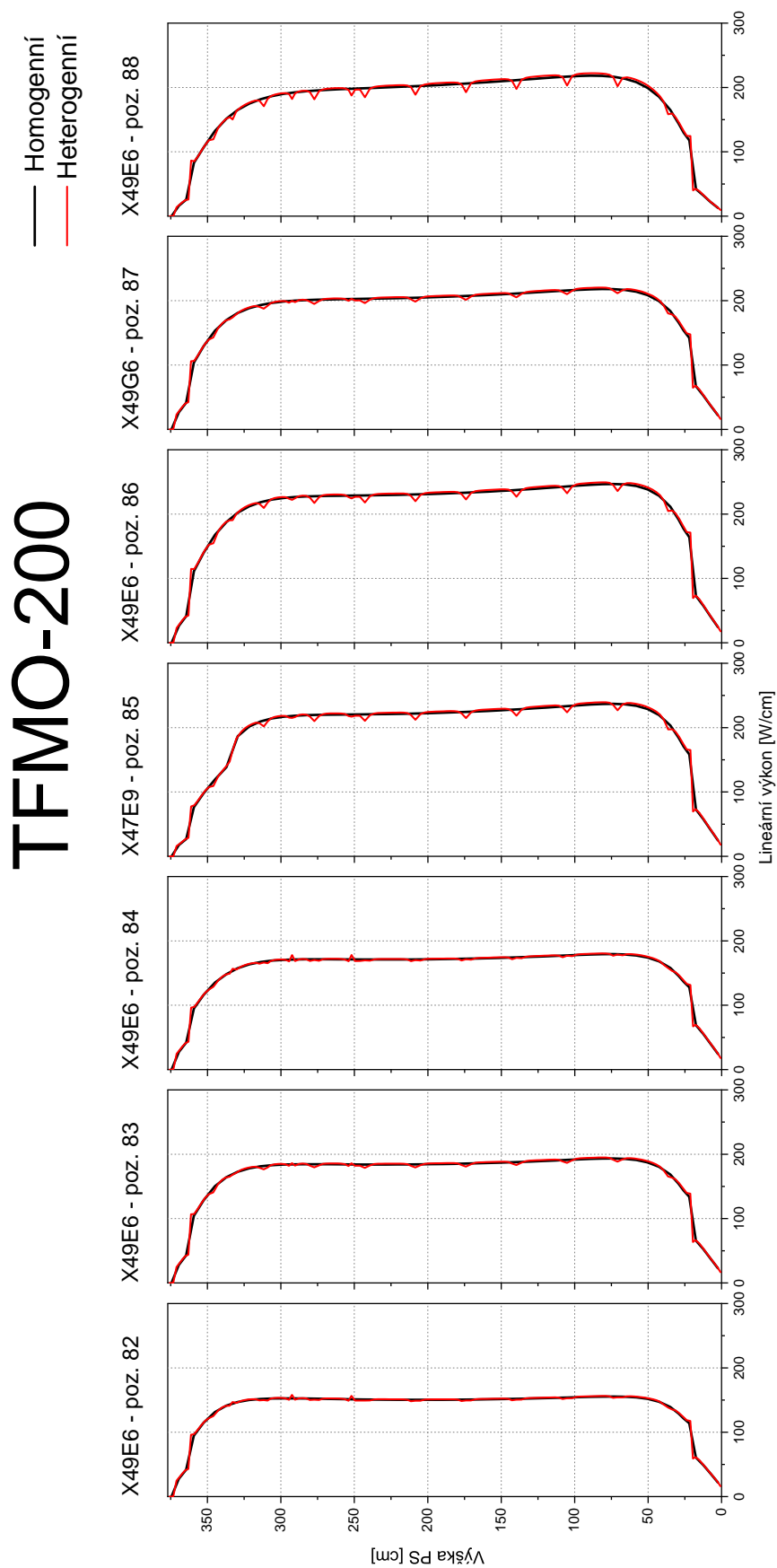
Pro analýzu lineárních výkonů byly vybrány dva dny z celé délky kampaně. Konkrétně byly vybrány dny:

- 3 EFPD - Pro zobrazení grafů ze začátku kampaně, kdy je předpoklad nejzřetelnějšího zobrazení výkonových píků způsobených distančními a mísíci mřížkami z důvodu největší reaktivity způsobenou čerstvým palivem.
- 200 EFPD - Pro zobrazení dat ke konci kampaně, kdy je již předpoklad vyhlazení hodnot v místě distančních a mísících mřížek z důvodu vyhoření TVEGu.

Obrázek 5.13 zobrazuje grafy lineárních výkonů pro 3. EFPD. Nejzřetelněji jsou vidět výkonové propady způsobené mřížkami v palivovém souboru X49E6 na pozici 88. Jedná se o čerstvě zavezenou kazetu s vysokou reaktivitou. Obrázek 5.14 zobrazuje grafy lineárních výkonů pro 200. EFPD. Palivový soubor X49E6 na pozici 88 již nemá tak zřetelné umístění mřížek. Také lze pozorovat přesun lineárního výkonu do spodní poloviny AZ jak plyne z grafu axiálního výkonu (obrázek 5.7)



Obrázek 5.13: Lineární výkon PS v řezu AZ ve 3 EFPD



Obrázek 5.14: Lineární výkon PS v řezu AZ ve 200 EFPD

5.3 Statistické vyhodnocení

Tato podkapitola je zaměřena na tvorbu histogramů. Histogram představuje grafické znázornění intervalového rozdělení četnosti. Jedná se o sloupcový graf, kde výška sloupců vyjadřuje četnost hodnot sledované veličiny [20]. V našem případě nás zajímá o kolik procent může maximálně vzrůst lineární výkon oproti referenci. Hodnoty byly získány prostým poměrem heterogenního řešení ku homogennímu řešení.

Data pro tvorbu histogramu byla vytažena ze souboru LVDA, který obsahuje hodnoty lineárních výkonů v daných axiálních úsecích jednotlivých palivových proutků. Nejprve byla z každého palivového proutku zjištěna maximální hodnota lineárního výkonu jak pro homogenní, tak i pro heterogenní řešení. V následném kroku byly tyto hodnoty pro konkrétní palivové proutky poděleny.

Vzhledem k tomu, že v aktivní zóně je 163 palivových souborů a každý palivový soubor má 312 palivových proutků, vznikne 50856 hodnot maximálního lineárního výkonu pro každý model. Proto byla data zpracovávána pomocí programu, kdy ze dvou vstupních souborů LVDA pro jednotlivá řešení a vstupních parametrů vygeneruje pomocí naprogramovaného algoritmu datový soubor pro vytvoření histogramů.

Vstupní parametry byly dva. Prvním parametrem byl výběr efektivního dne. Druhým parametrem byl filtr výkonu, který fungoval na porovnání zadané hodnoty lineárního výkonu s maximálním výkonem jednotlivých palivových proutků. Filtr výkonů byl postupně nastaven na 0, 100, 150, 200 a 250 W/cm. Pro tvorbu histogramů byly vybrány tyto tři efektivní dny, aby reprezentovaly hodnoty ze začátku, prostředka a konce kampaně:

- 0 EFPD
- 160 EFPD
- 300 EFPD

Pro vybrané histogramy zobrazuje tabulka 5.2 počet výskytů pro zadané parametry. Jak lze vidět z tabulky 5.2 lineární výkony pro hodnoty 0 až 200 W/cm jsou v délce kampaně konstantní. Počet palivových proutků, který mají lineární výkon 250 W/cm a více v délce kampaně klesá. Na začátku kampaně v AZ bylo 17900 palivových proutků s výkonem větším než 250 W/cm, kdežto ke konci kampaně počet palivových proutků klesl k 9800 proutkům.

Tabulka 5.2: Počet hodnot

T (EPPD) /P [W/cm]	0	100	150	200	250
0	50856	42784	39256	34258	17908
160	50856	42904	39446	29819	10862
300	50856	43678	39655	32025	9837

Percentil je statistické označení pro relativní umístění měřené hodnoty v závislosti na ostatních měřených hodnotách [21]. Například 90% percentil udává, že 90% hodnot je menších a 10% hodnot je větších. Konkrétně tabulka 5.3 zobrazuje pro daná kritéria koeficienty 95% percentilu. Udávaný koeficient na začátku kampaně a výkon větší, než 250 W/cm je 1,013. Tento koeficient značí, že výkon oproti referenci je 1,013 krát větší,

tzn. o 1,3% větší.

Tabulka 5.3: percentil-95%

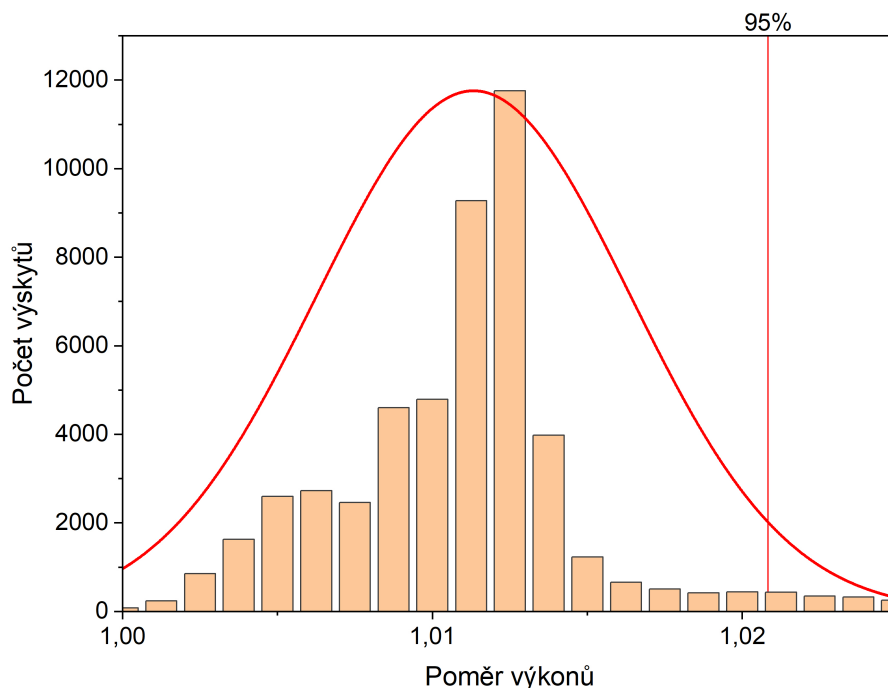
T (EPPD) /P [W/cm]	0	100	150	200	250
0	1,020	1,016	1,014	1,013	1,013
160	1,027	1,018	1,017	1,017	1,018
300	1,015	1,015	1,014	1,014	1,016

Z tabulky 5.3 můžeme říci, že 95% maximálních lineárních výkonů palivových proutků pro parametry nultého dne a výkonu většího než 250 W/cm je menší, než 1,3% pro 0 den a 5% hodnot je větších. Tabulka 5.4 zobrazuje hodnoty 98% percentilu pro zadané parametry.

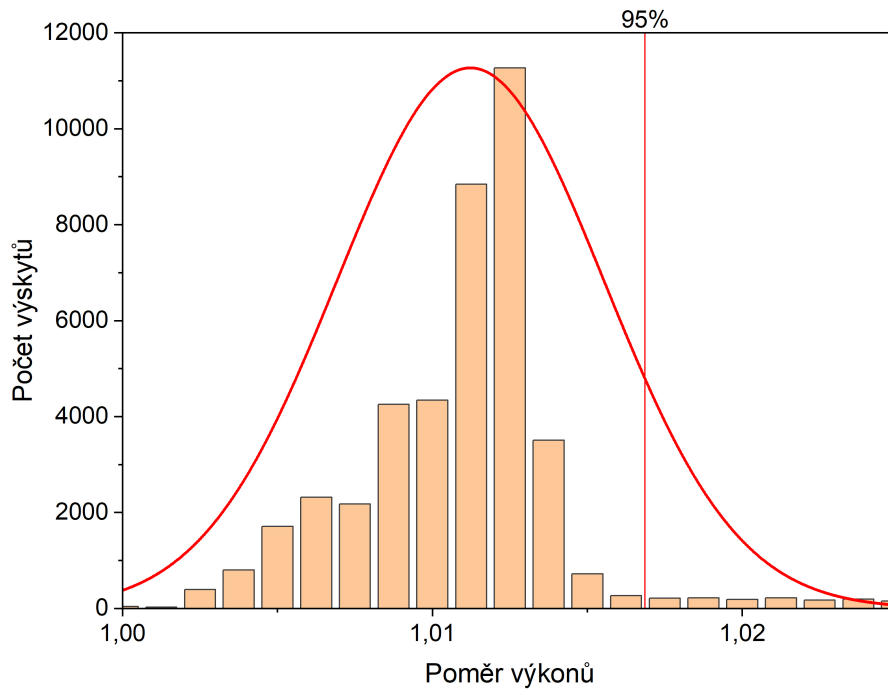
Tabulka 5.4: percentil-98%

T (EPPD) /P [W/cm]	0	100	150	200	250
0	1,027	1,025	1,022	1,014	1,014
160	1,034	1,027	1,019	1,018	1,018
300	1,021	1,014	1,016	1,016	1,016

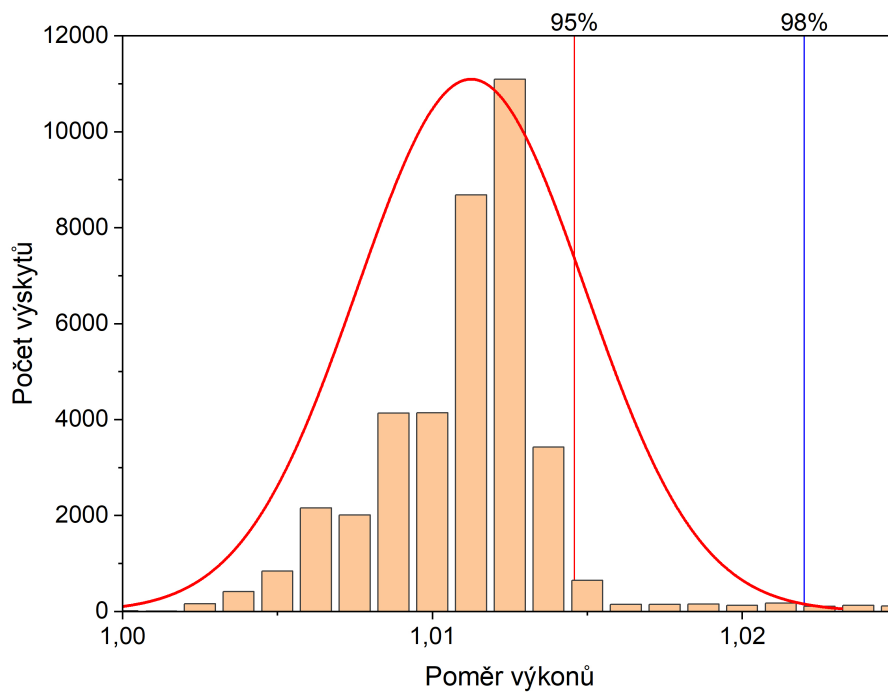
Histogramy zobrazené na obr 5.15 až 5.29 mají na ose y vyneseno počet výskytů a na ose x je vyneseno poměr výkonů. Červeným grafem je vynesena gaussova křivka, která je dopočtena ze získaných dat poměrů výkonů. Červená kolmice k ose x značí 95% percentil a modrá kolmice 98% percentil



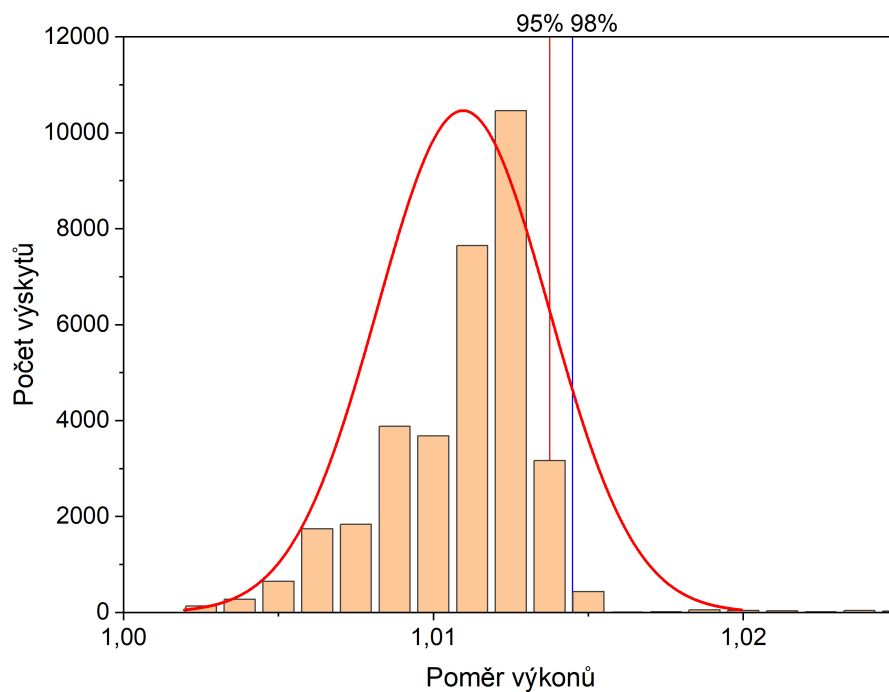
Obrázek 5.15: Histogram pro 0 EPPD a výkon vyšší než 0 W/cm



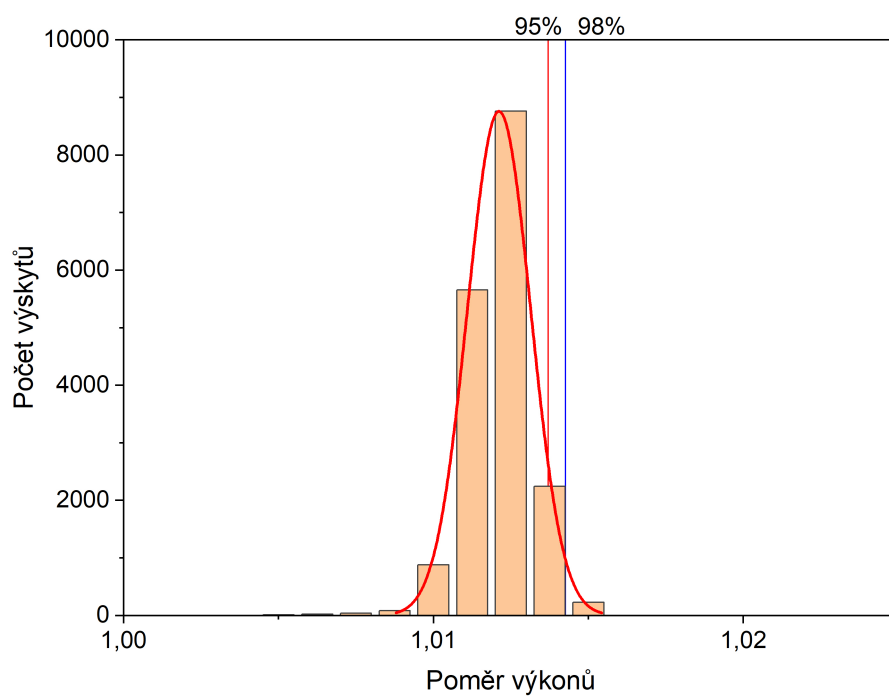
Obrázek 5.16: Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm



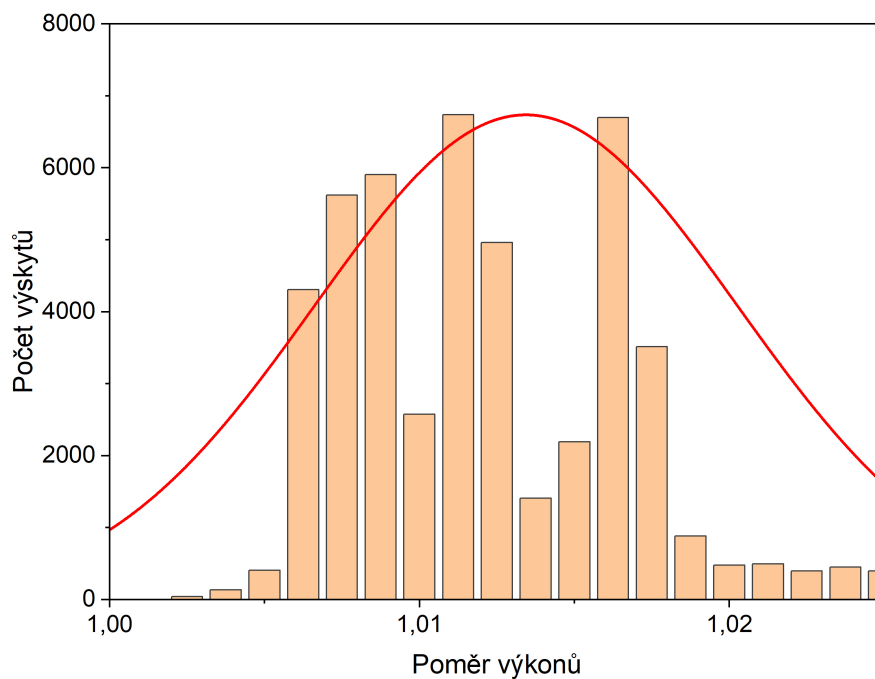
Obrázek 5.17: Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm



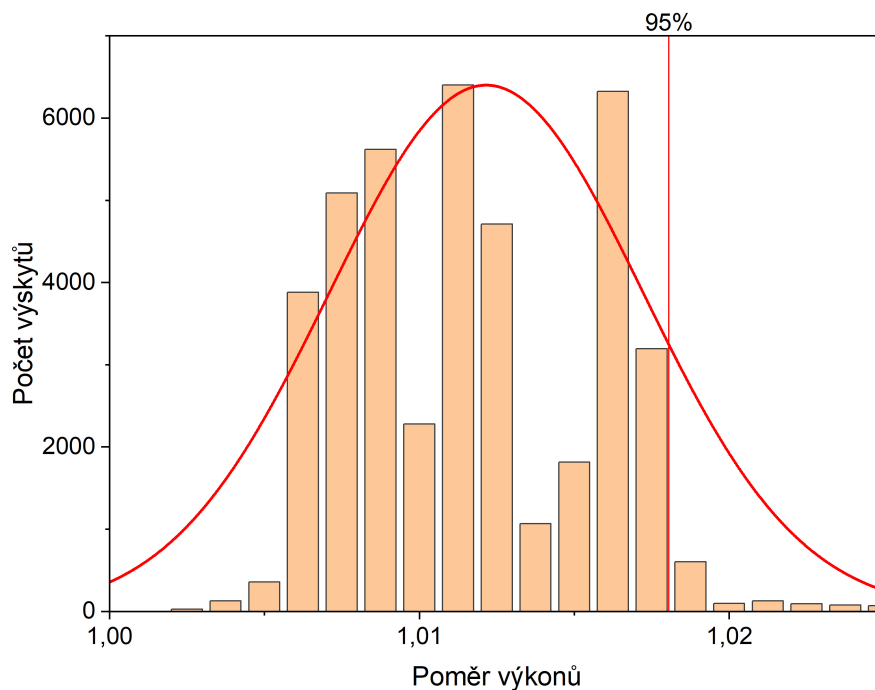
Obrázek 5.18: Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm



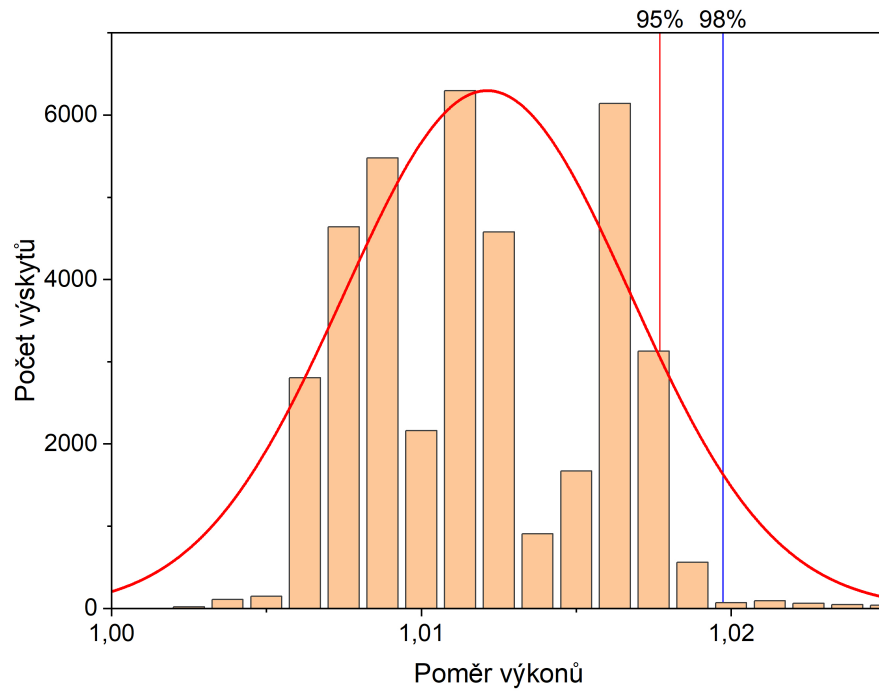
Obrázek 5.19: Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm



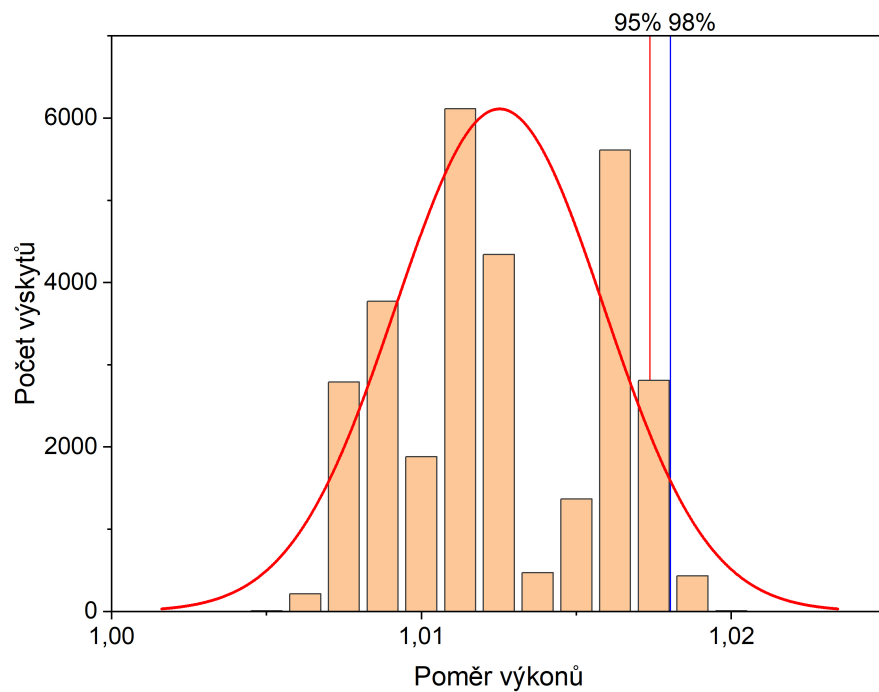
Obrázek 5.20: Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm



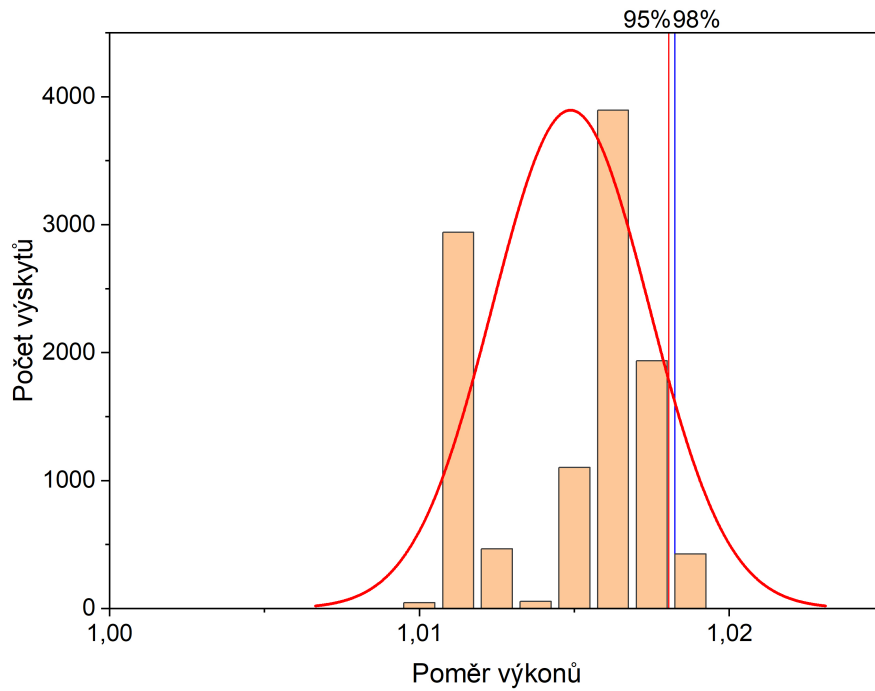
Obrázek 5.21: Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm



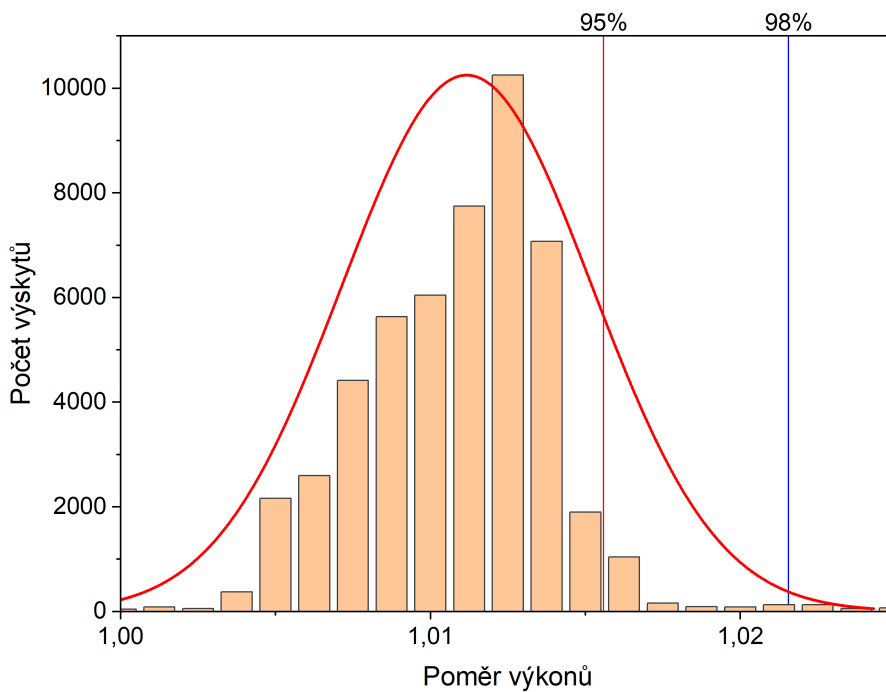
Obrázek 5.22: Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm



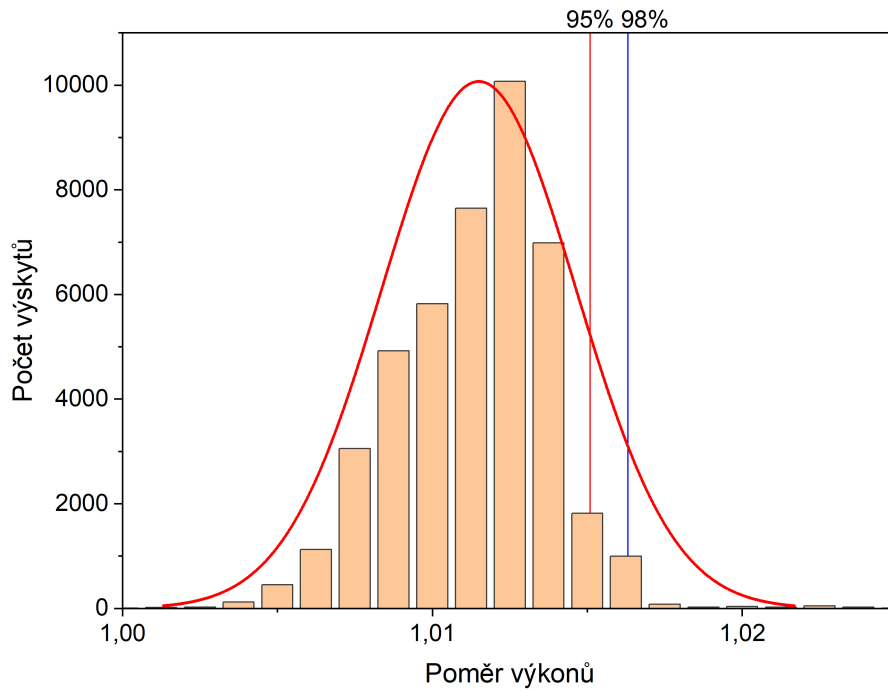
Obrázek 5.23: Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm



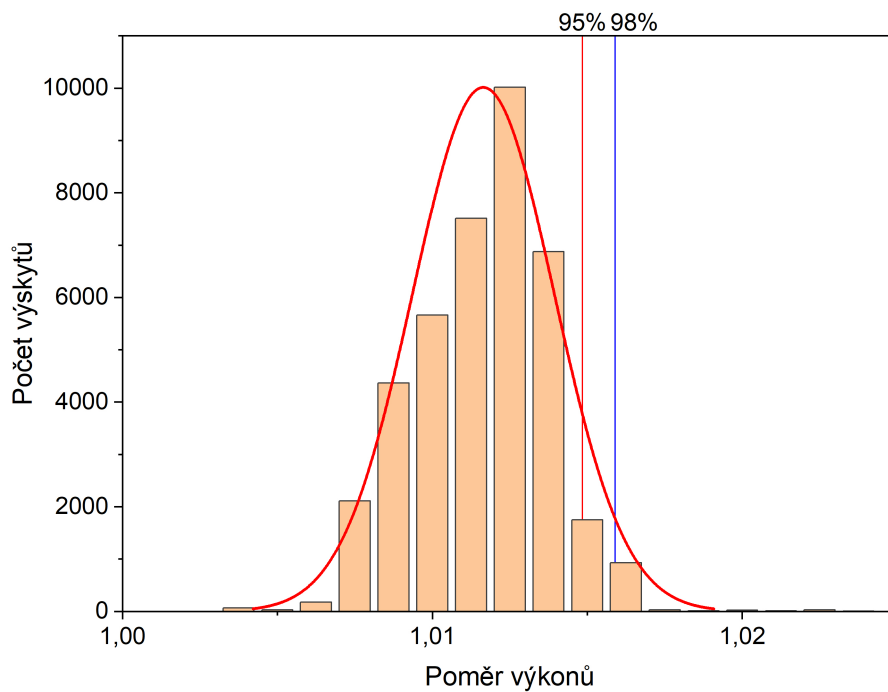
Obrázek 5.24: Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm



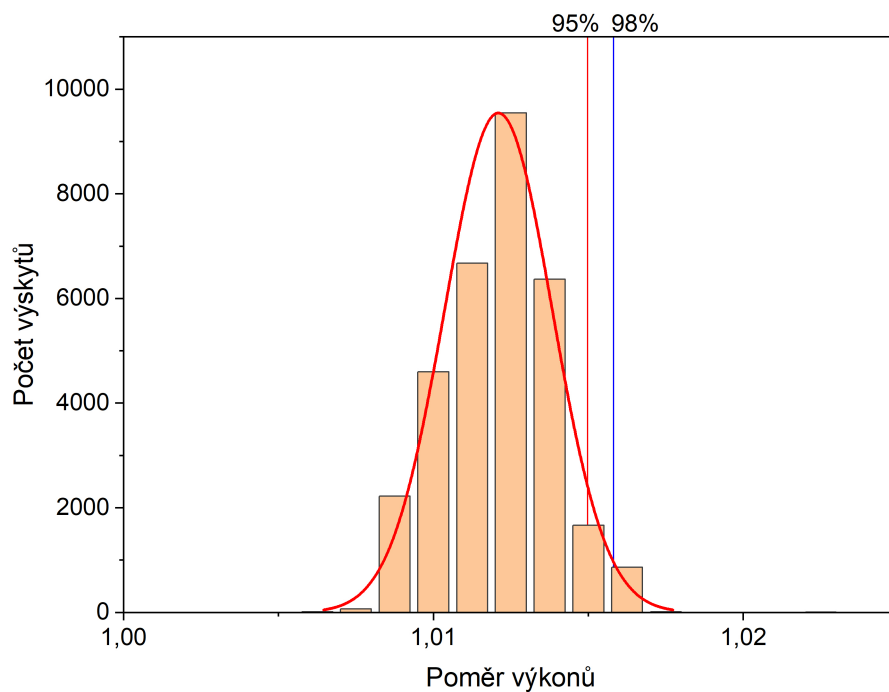
Obrázek 5.25: Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm



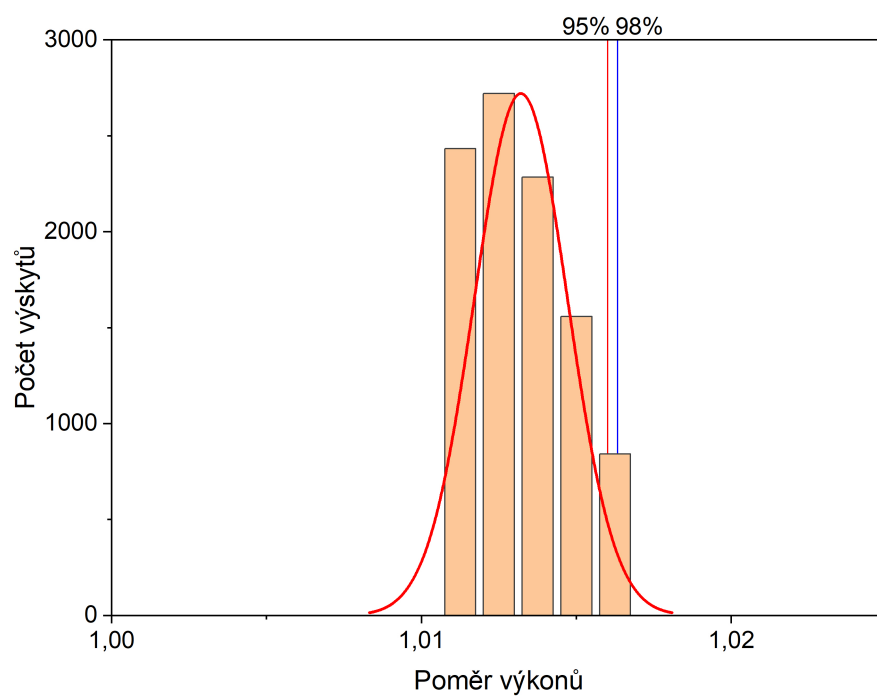
Obrázek 5.26: Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm



Obrázek 5.27: Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm



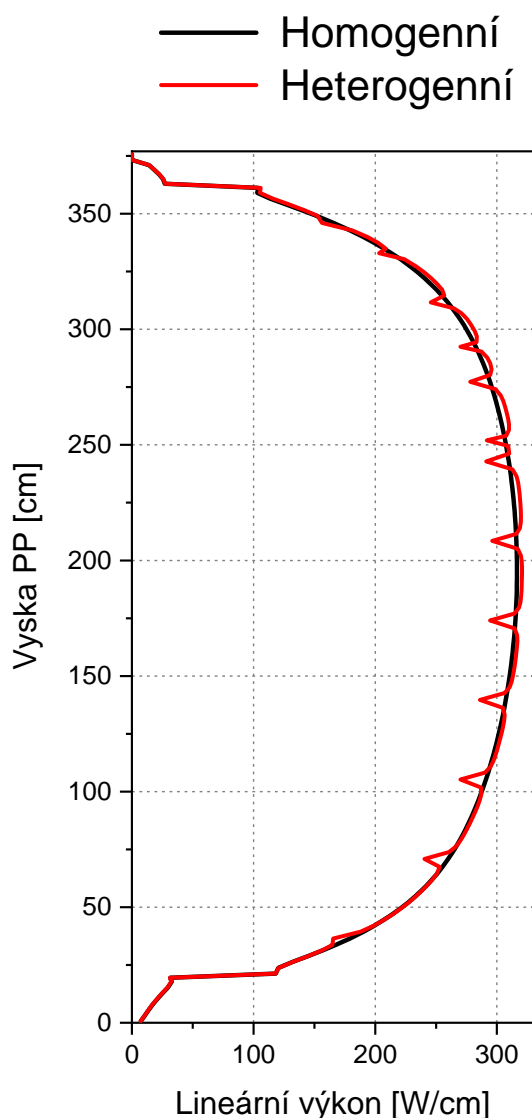
Obrázek 5.28: Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm



Obrázek 5.29: Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm

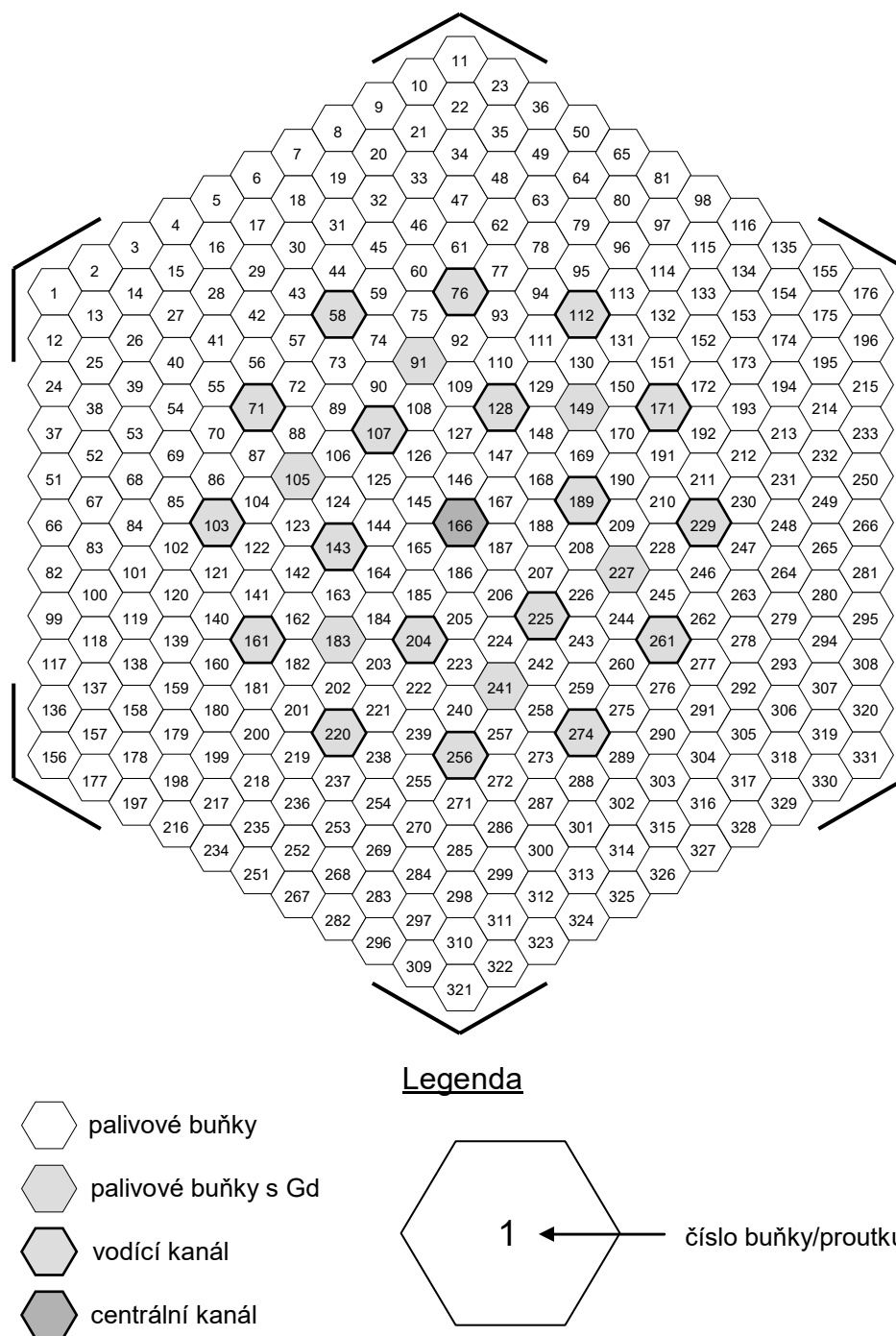
5.4 Nejzatíženější PP

Pomocí algoritmu, který byl použit na hodnoty lineárního výkonu palivových proutků v celé délce kampaně bylo zjištěno, že nejvíce zatíženým palivovým proutkem je 145 palivový proutek v 94 palivovém souboru. Umístění palivového proutku v palivovém souboru lze vidět na obrázku 5.31. Maximální lineární výkon 320,66 W/cm palivový proutek dosáhl v 5 EFPD. Na obrázku 5.30 můžeme vidět profil lineárního výkonu nejzatíženějšího palivového proutku v 5 EFPD pro heterogenní řešení (červená křivka) a homogenní řešení (černá křivka). Opět lze vidět u heterogenního řešení pokles lineárního výkonu v místech distančních a mísících mřížek.



Obrázek 5.30: Lineární výkon PP-145 v 94 PS ve 5 EFPD

Obrázek 5.32 zobrazuje grafy nejzatíženějšího palivového proutku v celé délce kampaně jak pro homogenní řešení (černou křivkou) tak i heterogenní řešení (červenou křivkou). Modrou křivkou je poté vyneseno rozdílné hodnoty mezi homogenním a heterogenním modelem.

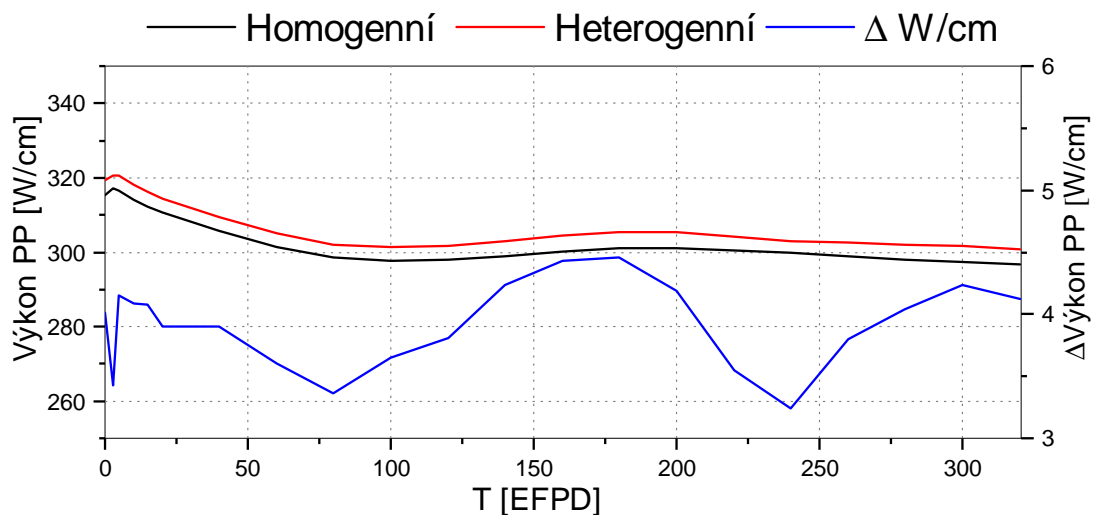


Obrázek 5.31: Číslování proutků v palivovém souboru programem MOBY-DICK. [19]

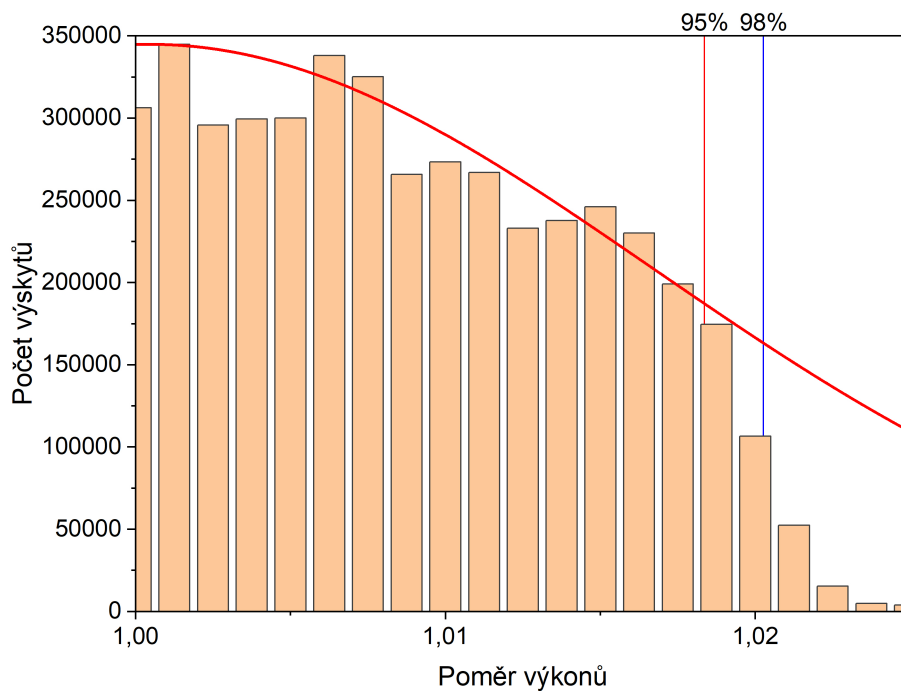
Pro nejzatíženější proutek v 5 EFPD byly vyneseny histogramy z veškerých hodnot lineárních výkonů v daných axiálních úsecích na rozdíl od histogramů v předchozí kapitole, kdy byly brány jen maximální lineární výkony v jednotlivých palivových proutcích. Palivový proutek je výpočetním kódem rozdělen na 145 axiálních úseků a v aktivní zóně je 50856 palivových proutků. To nám dává 7374120 hodnot lineárního výkonu v axiálních úsecích. Hodnoty byly tříděny v závislosti na velikosti lineárního výkonu 0, 100, 150, 200 a 250 W/cm. Tabulka 5.5 zobrazuje počet výskytů v závislosti na daném parametru výkonu a pak 95%, 98% percentil.

Tabulka 5.5: 5 EFPD

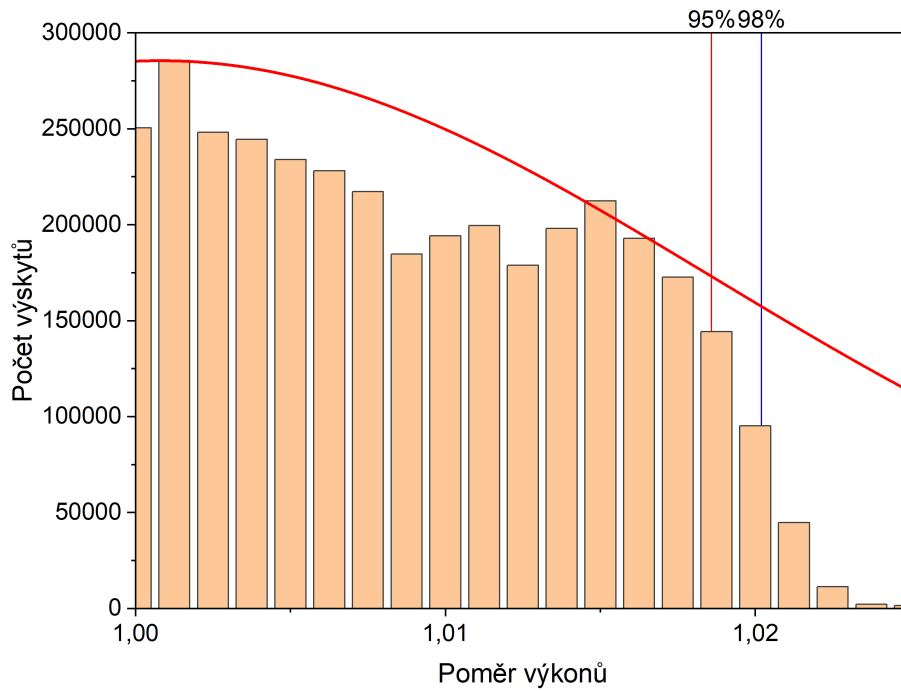
P [W/cm]	0	100	150	200	250
Počet výskytů	7374120	5213419	4371844	3022408	1240654
95% percentil	1,0183	1,0186	1,0187	1,0188	1,0187
98% percentil	1,0202	1,0202	1,0202	1,0202	1,0198



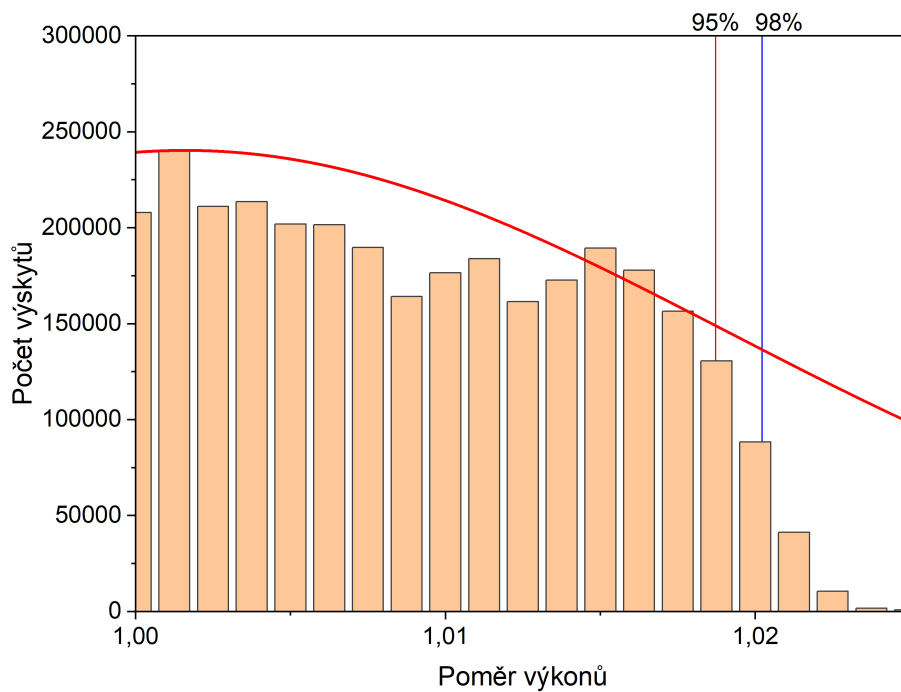
Obrázek 5.32: Průběh maxima lineárního výkonů v délce kampaně



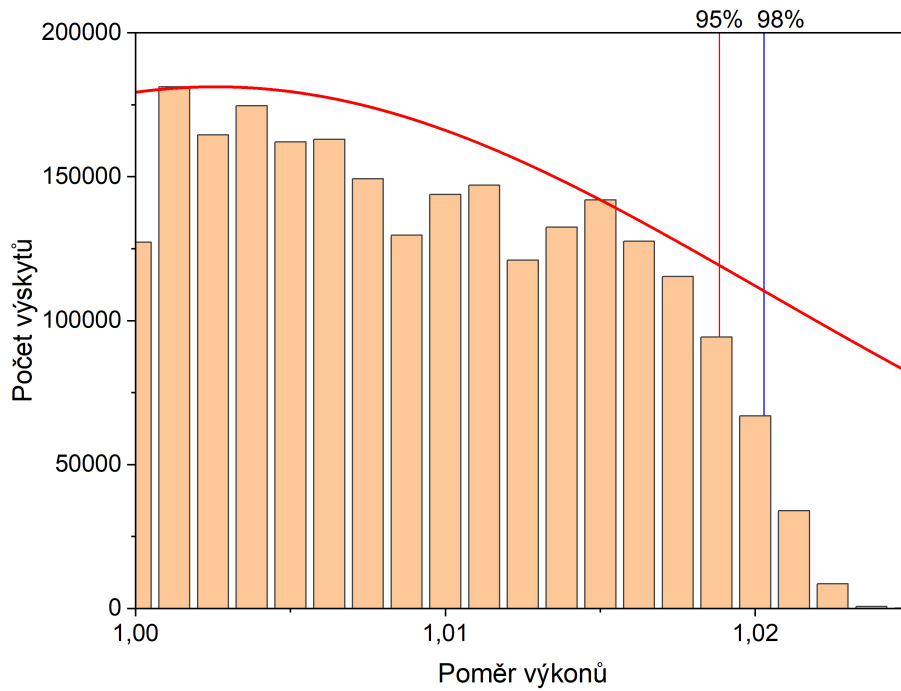
Obrázek 5.33: Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm



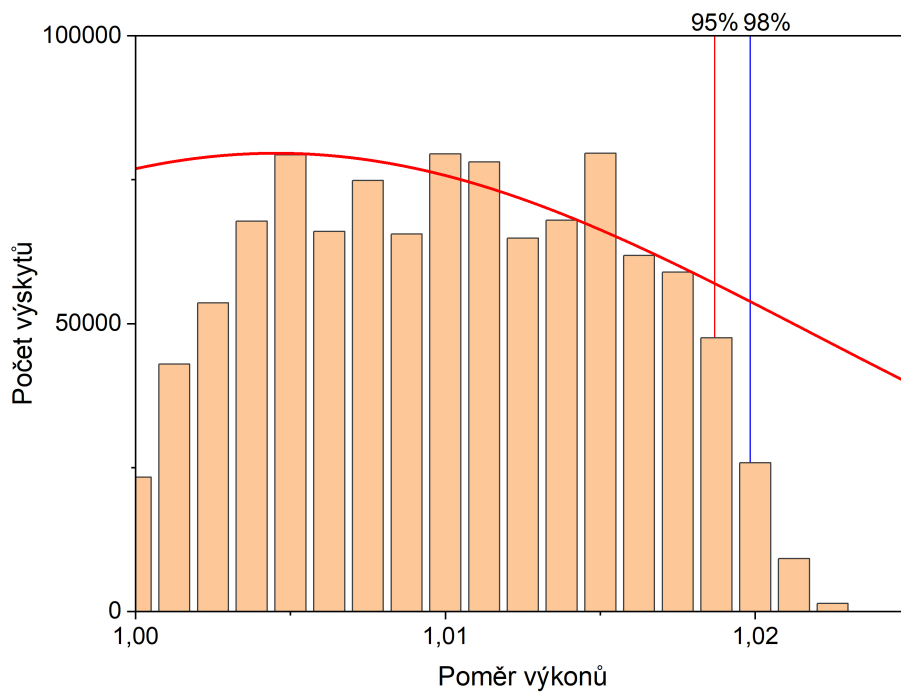
Obrázek 5.34: Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm



Obrázek 5.35: Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm



Obrázek 5.36: Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm



Obrázek 5.37: Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm

Závěr

V jaderném reaktoru probíhá velké množství jaderných interakcí v krátkém časovém úseku, které mají zásadní vliv na sledované parametry z hlediska jaderné bezpečnosti. Tyto interakce je velmi složité modelovat, v zásadě jsou dva přístupy. Stochastický využívající metodu Monte Carlo, který je velmi náročný na výpočetní výkon. Na simulování aktuálních dějů není na jaderné elektrárně dostatek času s využitím dnešní úrovně výpočetní techniky. Druhým přístupem jsou deterministické kódy, které využívají zjednodušující předpoklady pro výpočty, a proto musíme z hlediska jaderné bezpečnosti analyzovat vliv těchto zjednodušení.

Hlavním cílem této práce bylo zjištění vlivu zjednodušujícího předpokladu homogenizace konstant na globální parametry aktivní zóny a na lineární výkon palivových souborů a palivových proutků. Z tohoto důvodu byl vytvořen 3D model aktivní zóny reaktoru VVER-1000 ve výpočetním kódu MOBY-DICK. Použitá ruská palivová vsázka, navržená dodavatelem paliva, obsahovala tři druhy palivových souborů typu TVSA-T mod.2.

Nejprve bylo ověřeno, že změna axiálního dělení nemá vliv na sledované parametry palivových souborů. Ověření bylo provedeno vytvořením modelu, ve kterém byl zvýšen počet axiálních úseků nejprve dvakrát a posléze čtyřikrát. Ověření proběhlo úspěšně a nebyl zjištěn vliv axiálního dělení na neutronově fyzikální parametry nebo lineární výkon palivových souborů.

V následujícím kroku bylo navrženo detailní dělení, které bylo využito pro dva modely. První byl homogenní model, kdy byly jednotlivé palivové soubory modelovány s homogenizovaným materiálem pro palivovou část včetně mřížek a pomocí materiálu reprezentující blanket na koncích palivového souboru. Jako druhý byl vytvořen heterogenní model, ve kterém byl explicitně namodelován materiál s vlastnostmi obohaceného uranu a kovu mřížek. Tento materiál byl umístěn na pozice distančních a mísících mřížek. Materiál paliva mezi jednotlivými mřížkami byl tvořen materiálem s vlastnostmi obohaceného uranu.

Porovnáním referenčního modelu s homogenním modelem bylo ověřeno, že axiální dělení bylo navrženo příznivě bez vlivu na sledované parametry.

Vliv heterogenního materiálu lze pozorovat porovnáním homogenního modelu s heterogenním modelem. Axiální ofset je u detailního heterogenního modelu na začátku kampaně o 0,5% vyšší, než-li axiální ofset u homogenního modelu. Výkon se také rychleji přesouvá do dolní poloviny aktivní zóny a tudíž rychleji klesá axiální ofset. Vliv na koncentraci kyseliny borité nebyl pozorován. Vliv na koeficienty nerovnoměrnosti rozložení výkonů byl pozorován u koeficientů K_0 a K_v , kdy byly koeficienty pro heterogenní model o 2 setiny větší oproti homogennímu modelu.

Vliv detailního rozdělení distančních a mísících mřížek byl největší u čerstvých palivových souborů, které mají největší reaktivitu. V této práci takový palivový soubor reprezentuje palivový soubor X49E6 na pozici 88. V místech distančních a mísících mřížek byl pozorovatelný výkonový pokles oproti homogennímu modelu. Tento pokles byl způsoben změnou vodo-uranového poměru, materiál mřížky vytlačil část vody a tím snížil moderaci rychlých neutronů. Tyto poklesy lineárního výkonu nejsou pro jader-

nou bezpečnost problém. Potenciálním problémem je nárůst výkonu, který na stejném palivovém souboru lze pozorovat. Nárůst výkonu je způsoben potlačením výkonu v místech mřížek, kdy se tento výkon přesune do jiné části palivového souboru. U palivových souborů, které jsou v aktivní zóně již několik cyklů, jsou reprezentovány například palivovým souborem X49E6 na pozici 82, který je v reaktoru čtvrtým cyklem, je lineární výkon homogenního a heterogenního modelu identický.

Nejvíce zatížený byl 145 palivový proutek v čerstvém palivovém souboru zavezen na pozici 94 blízko centra aktivní zóny. Nejvyšší hodnoty lineárního výkonu dosáhl v 5 EFPD s výkonem 320,66 W/cm. Pro tento efektivní den byl vytvořen histogram z poměru heterogenního modelu ku homogennímu modelu z veškerých hodnot lineárního výkonu pro jednotlivé axiální úseky. Tímto vzniklo 7 374 120 hodnot. Ze statistického vyhodnocení těchto dat vzešlo, že z 95% pravděpodobností nebude lineární výkon vyšší o 1,87% při uvažování explicitních mřížek. Ruský dodavatel paliva TVEL, který pro jadernou elektrárnu Temelín dodal palivové soubory TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 2, uvedl u staršího palivového souboru mod. 1 hodnotu do 1% stejně jako u mod.2.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Novák, O. *Jaderné reaktory a jak to vlastně funguje* [online]. [cit. 17.05.2021]. Dostupné z:
<http://fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/reaktory.pdf>
- [2] Klobouček, Jan *Jaderná energetika*. Liberec, 2005. ISBN 80-7083-948-1
- [3] Ježek, Martin. *PALIVOVÝ CYKLUS JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] Klíma, Tomáš. *CFD modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [5] Janoušek, Radek. *Výpočet vyhořívání jaderného paliva reaktoru VVER 1000 pomocí programu Keno*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] Skupina ČEZ *JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN* [online]. [cit. 17.05.2021]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete>
- [7] Zdebor, Jan. *Jaderné systémy I*. [online]. [cit. 27.12.2020]. Dostupné z:
<http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/02/JS1-1.-prednaska-uvod.pdf>
- [8] Wikipedia. *VVER* [online]. [cit. 15.05.2021]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [9] O.B.Samoilov, V.B.Kaydalov, A.I.Romanov, A.A.Falkov, O.N.Morozkin, E.V. Sholin *DEVELOPMENT OF TVSA VVER-1000 FUEL*. JSC Afrikantov OKB Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russia
- [10] ReserchGate *Axial geometry of both types TVSA-T*. [online]. [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Axial-geometry-of-both-types-TVSA-T-2_fig3_325276862
- [11] Klavík, Petr. *Fyzikální modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [12] Westinghouse *VVER-1000 Fuel Products*. [online].
- [13] Höglund, Riznychenko, Latorre, Lashevych *Performance of the Westinghouse WWER-1000 fuel design*. [online]. Dostupné z:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/056/43056279.pdf
- [14] NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL *New fuel for Temelín 1*. [online]. Dostupné z:
<https://www.neimagazine.com/features/featurenew-fuel-temelin-1-7436970/>

- [15] Smola, Luděk. *Rozložení výkonu a teplot v palivových souborech reaktoru VVER-440 na elektrárně Dukovany*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [16] Novotný, Filip. *Výpočetní analýza chování aktivní zóny tlakovodního jaderného reaktoru pomocí kódu Pacs*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [17] Suk, Pavel. *Pokročilé metody homogenizace pro tlakovodní reaktory*. Praha, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [18] Rotbauer, Michal . *Provozování bloku Jaderné elektrárny Temelín mimo nominální výkon*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [19] Škoda JS *Podklady pro palivo TVSA-T mod.2* Interní zdroj.
- [20] Kupka, Karel *Statistické řízení jakosti*. Pardubice: TriloByte, 1997. ISBN 80-238-1818-X.
- [21] Wikipedia. *Percentile* [online]. [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Percentile>

Seznam obrázků

1.1	Primární okruh VVER-1000. [1]	11
1.2	Průřez reaktorovou nádobou VVER-1000. [1]	13
1.3	Značení a rozmístění skupiny absorpčních svazků systému řízení a regulace reaktoru. [3]	14
1.4	Kompenzátor objemu. [4]	15
1.5	Parogenerátor. [1]	16
2.1	Konstrukce palivového souboru VVANTAGE 6. [3]	19
2.2	Konstrukce palivového proutku VVANTAGE 6. [3]	20
2.3	Konstrukce palivového souboru TVSA-T mod.1. [4]	21
2.4	Konstrukce palivového proutku TVSA-T mod.1. [3]	23
2.5	Rozdíl v rozmístění distančních a mísících mřížek mezi palivem. TVSA-T mod.1 a TVSA-T mod. 2 [10]	24
2.6	Vývoj konstrukce palivové peletky. [9]	25
2.7	Konstrukce palivového souboru LTA. [12]	26
3.1	Popis vstupních dat programu MOBY-DICK. [15]	30
4.1	Ruská referenční vsázka. [19]	34
4.2	Palivové soubory. [19]	35
4.3	Porovnání AO pro různá axiální dělení	36
4.4	Porovnání AO pro různé verze kódu MOBY-DICK	37
5.1	Porovnání AO mezi homogenním modelem a referenčním modelem	38
5.2	Porovnání Cb mezi homogenním modelem a referenčním modelem	39
5.3	Porovnání K0 mezi homogenním modelem a referenčním modelem	39
5.4	Porovnání Kq mezi homogenním modelem a referenčním modelem	40
5.5	Porovnání Kr mezi homogenním modelem a referenčním modelem	40
5.6	Porovnání Kv mezi homogenním modelem a referenčním modelem	41
5.7	Porovnání AO mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	41
5.8	Porovnání Cb mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	42
5.9	Porovnání K0 mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	42
5.10	Porovnání Kq mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	43
5.11	Porovnání Kr mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	43
5.12	Porovnání Kv mezi homogenním modelem a heterogenním modelem	44
5.13	Lineární výkon PS v řezu AZ ve 3 EFPD	46
5.14	Lineární výkon PS v řezu AZ ve 200 EFPD	47
5.15	Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm	49
5.16	Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm	50
5.17	Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm	50
5.18	Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm	51
5.19	Histogram pro 0 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm	51
5.20	Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm	52
5.21	Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm	52
5.22	Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm	53
5.23	Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm	53

5.24	Histogram pro 160 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm	54
5.25	Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm	54
5.26	Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm	55
5.27	Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm	55
5.28	Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm	56
5.29	Histogram pro 300 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm	56
5.30	Lineární výkon PP-145 v 94 PS ve 5 EFPD	57
5.31	Číslování proutků v palivovém souboru programem MOBY-DICK. [19]	58
5.32	Průběh maxima lineárního výkonů v délce kampaně	59
5.33	Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 0 W/cm	59
5.34	Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 100 W/cm	60
5.35	Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 150 W/cm	60
5.36	Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 200 W/cm	61
5.37	Histogram pro 5 EFPD a výkon vyšší než 250 W/cm	61

Seznam tabulek

4.1	Popis základních vlastností PS pro ruskou palivovou vsázku	31
5.1	Zkoumané palivové soubory	45
5.2	Počet hodnot	48
5.3	percentil-95%	49
5.4	percentil-98%	49
5.5	5 EFPD	59