ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výpočet rozložení výkonu reaktoru III+ generace

Autor práce: Vedoucí práce: Bc. Miroslav Mertl Ing. Jana Jiřičková, Phd. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI Fakulta elektrotechnická Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Osobní číslo: Studijní program: Specializace: Téma práce: Zadávající katedra: Bc. Miroslav MERTL E22N0025P N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika Elektroenergetika Výpočet rozložení výkonu reaktoru III+ generace Katedra elektroenergetiky

Zásady pro vypracování

Cílem této práce je vytvořit 2-D model aktivní zóny dle vybraného zadání benchmarkové úlohy pro reaktor generace III+ pomocí programu Serpent a stanovit výkonovou distribuci na úrovni palivových souborů a palivových proutků.

- 1. Provedte rešerši reaktorů III+ generace.
- 2. Seznamte se s výpočetním kódem Serpent.
- 3. Vytvořte 2-D model vybraného reaktoru III+ generace a stanovte distribuci výkonu.
- 4. Určete přesnost výpočtu programu Serpent a proveďte vybrané analýzy.

40-60 Rozsah diplomové práce: Rozsah grafických prací: Forma zpracování diplomové práce: elektronická

Seznam doporučené literatury:

- 1. P. Leppänen: "Serpent a Continuous energy Monte Carlo reactor Physics Burnup Calculation Code", VTT Reserach Center of Finland, Helsinky, 2015.
- 2. REUSS, Paul. Neutron Physics. 2. EDP Sciences, 2008. ISBN 9782759800414.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Jiřičková, Ph.D. Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2024

6. října 2023

L.S. Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan

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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou jaderné energetiky v ČR a popisem vývoje jaderných reaktorů dle generací s uvedením jejich zástupců. Přičemž hlavním zaměřením práce je popis aktivní zóny reaktorů III+ generace a vytvoření modelu vybraného reaktoru v programu Serpent. Práce se soustředí na čtyři typy reaktorů, konkrétně EPR1200, AP1000 a korejské APR-1400 a jeho předchůdce OPR-1000. Tento seznam reaktorů odpovídá původní nabídce reaktorů pro Dukovanský tendr než došlo k jeho zúžení. Ze čtyř uvedených typů je model vytvořen pro reaktor typu AP1000 od americké firmy Westinghouse a pro výsledná data jsou provedeny požadované analýzy.

Klíčová slova

reaktor, aktivní zóna, rozložení proutkového výkonu, Serpent, III+ generace

Abstract

This work deals with the issues of nuclear energy in the Czech Republic and describes the development of nuclear reactors according to generations, providing examples of their representatives. The main focus of the work is the description of the core of III+ generation reactors and the creation of a model of a selected reactor in the Serpent program. The work focuses on four types of reactors, specifically the EPR1200, AP1000, and the Korean APR-1400 and its predecessor OPR-1000. This list of reactors corresponds to the original offer of reactors for the Dukovany tender before it was narrowed down. Among the four types mentioned, a model is created for the AP1000 reactor from the American company Westinghouse, and the required analyses are performed on the resulting data.

Keywords

reactor, core,pin-power distribution, Serpent, generation III+

Prohlášení

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

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

V Plzni dne: 21.05.2024

Podpis: Miroslav Mertl

Rell

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucí této práce, paní Ing. Janě Jiřičkové, Ph.D., za důvěru a volnost při tvorbě této práce. Mé hlavní poděkování však patří panu Ing. Jiřímu Závorkovi, Ph.D., za všechen čas a rady, které mi v průběhu tvorby této práce poskytl.

Obsah

Úv	Úvod				
1	Jade	erná energetika v České republice	2		
	1.1	Energetický mix ČR	2		
	1.2	Historie vývoje jaderných reaktorů dle generace	3		
		1.2.1 Generace I	3		
		1.2.2 Generace II	4		
		1.2.3 Generace III	6		
		1.2.4 Generace III+	7		
		1.2.5 Generace IV	8		
	1.3	Historie jaderné energetiky v Česku a Slovensku	9		
	1.4	Současnost a budoucnost jaderné energetiky v ČR	11		
2	Zák	ladní popis reaktorů III+ generace	14		
	2.1	Primární okruh	15		
		2.1.1 AP1000	15		
		2.1.2 OPR-1000	15		
		2.1.3 APR-1400	16		
		2.1.4 EPR1200	17		
	2.2	Palivo a aktivní zóna	18		
		2.2.1 AP1000	18		
		2.2.2 OPR-1000	18		
		2.2.3 APR-1400	19		
		2.2.4 EPR1200	19		
	2.3	Regulace reaktivity	20		
3	Výp	očetní kód a model	21		
	3.1	Serpent 2	21		
	3.2	Nastavení simulace	22		
	3.3	Materiály	23		
	3.4	Geometrie	24		

OBSAH

		3.4.1	Geometr	ie proutků	25
			3.4.1.1	Definice universa palivového proutku ve 2D	26
			3.4.1.2	Definice universa palivového proutku ve 3D	26
		3.4.2	Geometr	ie palivových souborů	29
		3.4.3	Geometr	ie aktivní zóny	31
		3.4.4	Geometr	ie mřížek	36
4	Výsl	edky			40
	4.1	Multip	likační fal	ktor k-eff	43
	4.2	Rozlož	žení relativ	ního výkonu na úrovni palivových souborů k_q	44
	4.3	Rozlož	žení relativ	ního výkonu na úrovni palivových proutků k _k	46
	4.4	Axiáln	ú rozložen	í relativního výkonu pro vybraný palivový soubor	47
	4.5	Porovr	nání s refei	rencí	48
Zł	nodno	cení a z	avěr		59

Zhodnocení a závěr

Seznam symbolů a zkratek

AZ	Aktivní zóna
PS	Palivový soubor
K-eff	Efektivní multiplikační faktor (-)
SMR	Small Modular Reactor, malý modulární reaktor
wt	hmotnostní podíl (%)
BPRA	Burnable Poison Rod Assembly, Diskrétní vyhořívající absorbátor
IFBA	Integral Fuel Burnable Absorber, Integrální vyhořívající absorbátor
RCCA	Rod Cluster Control Assembly, Sestava regulačních tyčí
CEA	Control Element Assembly, Sestava s ovládacími prvky
GRCA	Grey Rod Cluster Assembly, Sestava šedých tyčí
k _q	Relativní výkon na úrovni palivových souborů (-)
k _k	Relativní výkon na úrovni palivových proutků (-)
pcm	Percent mille, tisícina procenta

Úvod

Civilizovaný svět dnes silně spoléhá na elektrickou energii, která pohání většinu, pokud ne všechny, našich pokročilých technologií a zásadní infrastrukturu. Bez elektřiny bychom zažili úpadek naší úrovně života a komfortu. Navíc s postupem času stoupá naše poptávka po elektřině, zatímco naše zásoby fosilních paliv postupně klesají.

Česká republika i Evropská unie jako celek čelí klíčovému rozhodnutí ohledně směru své energetické politiky. V současnosti dominují dva hlavní směry: jaderná energie a obnovitelné zdroje. Jaderná energie, přestože poskytuje spolehlivý zdroj elektrické energie s nízkými emisemi CO_2 , čelí výzvám týkajícím se nakládání s jaderným odpadem a obavám z možných havárií, jakou byla například nehoda v jaderné elektrárně v Černobylu. Obnovitelné zdroje, jako jsou solární a větrné elektrárny, nabízejí čistější alternativu, ale jejich rozvoj je závislý na vhodných podmínkách pro jejich instalaci a technologickém pokroku v oblasti skladování vyrobené energie. Celkově je rozhodnutí ohledně energetické politiky klíčové pro budoucnost naší existence. Zohlednění ekonomických, environmentálních a sociálních faktorů je nezbytné pro tvorbu udržitelných a efektivních energetických systémů, které budou sloužit prospěchu všech obyvatel světa.

Tato práce je konstruována do čtyř hlavních kapitol, přičemž každá z nich má své konkrétní tématické zaměření. V první kapitole je hlavní zaměření věnováno jaderné energetice na území České republiky. Prvně je stručně popsán celkový energetický mix v České republice s krátkým odstavcem popisujícím aktuální problém, kterému čelí uhelné elektrárny. Značná část této kapitoly je věnována také popisu generačního vývoje jaderných reaktorů, ke každé generaci je uveden krátký popis hlavních aspektů a několik jejích představitelů. Poslední část první kapitoly je věnována historii jaderné energetiky v České republice a její potenciální budoucnosti.

Druhá kapitola je věnována popisu primárního okruhu, paliva, aktivní zóny a způsobu popisu reaktivity v reaktoru. U primárního okruhu je popsáno, z kolika okruhů pro výměnu tepla se skládá, jaké komponenty jsou jeho součástí a jaké prvky jsou charakteristické pro daný reaktor. Popisem aktivní zóny a paliva je myšleno určení úrovní obohacení paliva, kolik palivových souborů tvoří AZ, popřípadě kolik v ní je vodicích a instrumentálních trubic. Poslední částí této kapitoly je regulace reaktivity u vybraných reaktorů, ve které jsou uvedeny typy absorbérů a regulačních orgánů používaných v daných reaktorech.

Ve třetí kapitole je hlavní zaměření věnováno metodickému popisu tvorby modelu pro simulaci reaktoru. Kapitola je konstruována do podkapitol odpovídajících jednotlivým blokům ve vstupním souboru pro výpočetní kód.

Poslední čtvrtou kapitolu tvoří popis zpracovaných dat z vypočtených modelů na úrovních výkonu palivových souborů, výkonu palivových proutků a k-eff. Dále je v této kapitole provedeno porovnání získaných dat s vybranou referencí.

1 Jaderná energetika v České republice

1.1 Energetický mix ČR

Energetickým mixem se rozumí statistika, která udává, jaký poměr elektrické energie jednotlivé zdroje vyrobily za daný rok. Data z roku 2021 indikují, že až 50% veškeré energie vyrobené na území České republiky pochází z fosilních paliv, do této skupiny patří uhlí, ropa a zemní plyn. Druhým největším podílem tvoří elektrická energie vyrobená z jaderných elektráren, která činí 36% celkově vyrobené energie. Zbytek, tedy něco málo přes 13%, pak spadá na obnovitelné zdroje. Obnovitelnými zdroji jsou myšleny zdroje jako je spalování biomasy, fotovoltaické, vodní, větrné a přečerpávací elektrárny.[1]



Obr. 1.1 Energetický mix České republiky [1]

Výroba energie v ČR silně závisí na spalování uhlí, problémem sice je blížící se termín konce jeho těžby. Většina uhelných elektráren buď je postavena přímo na strategických lokalitách blízko uhelných dolů, odkud čerpá palivo, nebo je dopravována vlakovým transportem. První varianta je mnohem ekonomicky přívětivější a po vyřazení těžby uhlí se otázka paliva mnohem komplikuje. První variantou zůstává vyřazení těchto zdrojů z mixu úplně. To bude mít za následek, že přijdeme o hlavní výrobní kapacitu, která pokrývá základní zatížení sítě. Tento problém by se dal vyřešit postavením nových kapacit s podobným regulačním charakterem jako jsou uhelné elektrárny (Jaderné elektrárny). To však v blízké budoucnosti z důvodů aktuální legislativy nevypadá jako validní možnost. Druhou možností je kupování uhlí ze zahraničí, což stejně jako přímý nákup elektrické energie není moc ekonomicky výhodné. Poslední možností je repasovaní stávajících uhelných zdrojů a využití jejich turbosoustrojí s malými modulárními reaktory. Prakticky to znamená, že se stávající kotel nahradí právě SMR, které bude fungovat jako nový tepelný zdroj elektrárny. I tato možnost by však vyžadovala určité změny v současném atomovém zákoně pro to, aby byla validní možností.



Obr. 1.2 Energetický mix ve světě a Evropě v poměru s Českou republikou [2]

1.2 Historie vývoje jaderných reaktorů dle generace

Generací reaktoru se rozumí označení vyspělosti jejich technologické a bezpečnostní úrovně.



Obr. 1.3 Historie vývoje jaderných reaktorů dle generace [3]

1.2.1 Generace I

Jedná se o reaktory, které byly spouštěny v 50. a 60. letech minulého století. Většina těchto reaktorů je "proof of concept", což znamená, že jejich hlavním úkolem bylo demonstrovat jejich praktický potenciál a proveditelnost. Do reaktorů první generace spadá i první reaktor, který byl vybudován v tehdejším Československu v Jaslovských Bohunicích. Poslední reaktor této generace byl odstaven v roce 2015 ve Velké Británii a jednalo se o reaktor elektrárny Wylfa. [4] [5]

Jedním z typů reaktorů I. generace byl lehkovodní tlakový množivý reaktor z anglického "Pressurized Light-Water Breeder Reactor"nebo zkráceně PLWBR. Byl součástí první americké komerční elektrárny v Shippingportu a dosahoval výkonu až 60 MW. Byl také používán jako pohonná jednotka amerických letadlových lodí a zdroj plutonia pro jaderné zbraně. Dalšími příslušníky této generace jsou reaktory GCR (Gas Cooled Reactor) a EBWR (Experimental Boiling Water Reactor). Reaktory GCR, které byly nejvíce používané ve Velké Británii a Japonsku, byly reaktory chlazené CO₂ a moderované grafitem. Palivem pro tyto reaktory byly palivové tyče z přírodního kovového uranu pokrytého oxidem magnézia. Tyto tyče byly v aktivní zóně uloženy v kanálech vytvořených v bloku grafitu. Výměna paliva u těchto reaktorů byla prováděna za provozu. Reaktor typu EBWR byl používaný v americké elektrárně Dresden a jednalo se o reaktor, který byl chlazen i moderován obyčejnou vodou a dosahoval až 200 MW výkonu. Tvorba páry pro pohon turbíny probíhala přímo v aktivní zóně, toto zjednodušení však přináší nevýhodu, že pára v turbíně je radioaktivní, což snižuje celkovou úroveň bezpečnosti reaktoru. [6]

1.2.2 Generace II

Třída reaktorů, která byla uvedena do provozu na konci 60. let a v 70. letech minulého století, byla navržena tak, aby byla ekonomická a spolehlivá s dobou životnosti kolem 40 let. Do druhé generace patří reaktory PWR, BWR, CANDU, AGR a i ruské VVER. Většina reaktorů, které jsou v dnešní době v provozu, patří do druhé nebo třetí generace. Jejich technologická úroveň je o poznání vyšší oproti reaktorům první generace, hlavně v oblasti bezpečnostních systémů. Využívají totiž elektrické a mechanické aktivní prvky bezpečnosti, které pracují automaticky, nebo jejich spuštění může vynutit operátor. Ve svém arzenálu však také mají několik pasivních bezpečnostních prvků, jako jsou například bezpečnostní přetlakové ventily. [4] [5]

Tlakovodní reaktory PWR z anglického "Pressurized Water Reactor" a VVER z ruského "VodoVodjanoj Energetičeskij Reaktor" jsou reaktory chlazené i moderované obyčejnou vodou. Jako palivo slouží obohacený uran ve formě UO_2 . Na rozdíl od reaktoru typu EBWR mají oddělené primární (radioaktivní) a sekundární (ne-kontaminovaný) okruhy. Všechny bloky pracující aktuálně v České republice jsou typu VVER. Typ PWR byl původně vyvinut americkou firmou Westinghouse pro námořnictvo, ale jeho přednosti byly tak významné, že našel uplatnění i v jaderné energetice. [6]



TLAKOVODNÍ REAKTOR PWR

Obr. 1.4 Principiální schéma rektoru PWR [6]

Druhým dnes nejrozšířenějším typem reaktorů je BWR z anglického sousloví "Boiling Water Reactor", který je následníkem EBWR. Stejně jako jeho předchůdce však sdílí nevýhodu kontaminace vody v turbíně a s tím spojenou nižší úroveň bezpečnosti, výhodou je však nižší tlak v okruhu, což přináší určitá zjednodušení. K moderaci i chlazení se využívá obyčejné vody, a výměna paliva se provádí po odstavení reaktoru. Konstrukce aktivní zóny je velmi podobná tlakovodním reaktorům. [6]



Obr. 1.5 Principiální schéma rektoru BWR [6]

Vylepšenou verzí GCR je AGR z anglického "Advanced Gas-cooled Reactor". Moderátor a chladivo jsou stejné jako u GCR. Aktivní zóna je také velmi podobná svému předchůdci, avšak upravený design používá keramické palivo a články z nerezové oceli, což umožňuje dosahovat vysokých výstupních parametrů a tím i účinnost elektrárny až 42%. Jediná země, kde tyto reaktory jsou v provozu, je Velká Británie. [6]

Do reaktorů II. generace patří také typ CANDU, což je anglickou zkratkou pro "CANada Deuterium Uranium". Tento reaktor je moderovaný a chlazený těžkou vodou. Jeho největší výhodou je, že palivem je přírodní uran, čímž odpadá nutnost jeho obohacování, které je velmi finančně i technologicky náročné. Aktivní zóna je ve tvaru válce, ve kterém jsou umístěny vodorovné kanály s tlakovým potrubím. Kromě Kanady je tento typ využíván v Indii, Pákistánu, Argentině, Koreji a Rumunsku. [6]



Obr. 1.6 Vzhled reaktoru typu CANDU [7]

1.2.3 Generace III

Jsou to reaktory s velmi podobnými technologickými rysy jako mají reaktory II. generace, avšak s určitými state-of-the-art designovými vylepšeními. Hlavním vylepšením je prodloužená doba jejich provozu a to o délce 60 let. Většina těchto reaktorů má standardizovaný projekt, což zkracuje dobu schvalování a dobu výstavby. Dále také mají lepší palivovou a tepelnou účinnost, což vede i k menším negativním vlivům na životní prostředí. Majoritní výhodou oproti reaktorům druhé generace jsou jejich zlepšené bezpečnostní systémy, které mají značně více pasivních prvků, jenž snižují poruchovost reaktorů, jelikož nejsou závislé na žádných nadřazených systémech. Do této generace spadají například reaktory ABWR a CANDU 6. [4] [5] [6]

Reaktory typu ABWR, známé také jako "Advanced Boiling Water Reactor", jsou vylepšené verze reaktorů

typu BWR, které dodává společnost General Electronics Hitachi o výkonu 1356 MW. Jako palivo je využíván UO_2 a $UO_2-Gd_2O_3$ s procentuálním obohacením 3,2%. Oproti původnímu typu BWR je typ ABWR rozšířen o plně digitální ochranný systém, 10 čerpadel podporujících vnitřní cirkulaci a elektrohydraulické ovládání regulačních tyčí. Havarijní chlazení je u ABWR také rozděleno do tří sekcí, přičemž každá je sama schopná ochladit celý reaktor. Jednotlivé sekce zahrnují sprchu vnitřního kontejmentu, 18 přetlakových ventilů a bazén s vodou umístěný pod reaktorem. [6]

CANDU 6, jak už z názvu vyplývá, je vylepšenou verzí reaktoru typu CANDU II. generace. Jeho nejvýznamnějšími zlepšeními jsou prodloužení životnosti a snížení negativních vlivů na životní prostředí, vylepšená bezpečnostní zařízení a systémy a možnost regulace výkonu od 50-100% dle aktuální poptávky po elektřině. [6]

1.2.4 Generace III+

Dalším evolučním stupněm jsou generace III+, které v současné době představují nejlepší technologii v oblasti jaderných elektráren. Tato generace vychází ze zkušeností s výstavbou a licencováním generátorů III. Generace a bere v potaz novější bezpečnostní požadavky, které zohledňují analýzy z předešlých jaderných havárií. Tyto reaktory mají zvýšenou odolnost proti vnějším vlivům s větší diverzitou a redundantností bezpečnostních systémů. Využívají ještě větší počet pasivních prvků než předchozí generace s využitím gravitace nebo přírodní cirkulace. Patří sem reaktory, jako jsou typy ESBWR, CANDU ACR-1000, VVER-1200, AP1000, APR-1400, EPR1200. [4] [5] [6]

Reaktorový typ ESBWR je vlastněn firmami Hitachi a General Electric, jehož zkratka představuje "Economic Simplified Boiling Water Reactor". Jedná se o reaktor, který staví na technologii ABWR. Oproti ABWR však využívá více pasivních bezpečnostních prvků, jako například cirkulace teplonosné kapaliny je provedena přírodní cirkulací bez recirkulačních čerpadel nebo kondenzátor schopný odvádět páru z reaktorové nádoby popřípadě kontejnmentu do vodního bazénu. Tyto bazény jsou umístěny nad reaktorovou nádobou a v případě poklesu hladiny vody dojde k zaplavení reaktoru. Pomocí těchto pasivních bezpečnostních systémů je reaktor schopen v případě nehody zůstat stabilizovaný až 72 hodin bez zásahu obsluhy. Jeho parametry jsou 4500 MW tepelného výkonu a 1600 MW elektrického výkonu s účinností 35%. Pravděpodobnost úniku radioaktivity je o několik řádů nižší než u konvenčních reaktorů, přičemž investiční náklady se pohybují okolo 30 až 40% méně než u klasických lehkovodních reaktorů. [6]

CANDU ACR1000 je dalším typem reaktoru, který vychází z kanadského předchůdce a využívá slabě obohacený uran. Oproti CANDU 6 je tento typ rozšířen o dva bezpečnostní systémy fungující na pasivním principu. Prvním z nich jsou havarijní tyče umístěné v izolovaných kanálech nad reaktorem, které se v případě havárie spustí vlastní vahou do reaktoru. Druhým systémem je sada horizontálních trysk s kapalným $GdNO_3$, což je sloučenina s velkou schopností absorpce neutronů. Oba tyto systémy jsou schopny samostatně snížit tepelný výkon reaktoru během dvou sekund o 90% aktuální hodnoty. Dalšími rozšířeními tohoto typu reaktorů je vodní nádrž umístěna nad reaktorem, která je schopná dodat vodu do chladícího okruhu při úniku chladiva nebo v případě potřeby

dodat vodu do parogenerátorů. Electrical Power Supply System, zkráceně EPS, je systém zajišťující náhradní napájení odolné vůči zemětřesení pro podřízené bezpečnostní systémy vyžadující elektrickou energii. [6] Typy reaktorů AP1000, APR-1400, EPR1200 jsou detailněji popsány v druhé kapitole této práce. Současně s tím je popsán i reaktor OPR-1000 z důvodu propojení jeho designu s reaktorem APR-1400 v Dukovanském tendru.

1.2.5 Generace IV

V dosavadní době se jedná jen o projekty, které zahrnují demonstrační reaktory, jež jsou v současné době ve fázi vývoje. Mezi tyto reaktory patří plynem chlazené rychlé reaktory (GFR), vysokoteplotní reaktory (VHTR a HTGR), olovem chlazené rychlé reaktory (LFR), reaktory chlazené tekutými solemi (MSR), superkritické vodou chlazené reaktory (SCWR) a rychlé reaktory chlazené sodíkem (SFR). Některé z reaktorů IV. generace mají uzavřený palivový cyklus, což umožňuje větší efektivitu spotřeby paliva a následné využití již vyhořelého paliva, což vede ke snížení množství radioaktivního odpadu. Spuštění prvních těchto reaktorů je odhadováno mezi roky 2030 až 2040, a první komerční reaktory z této generace jsou plánovány až na rok 2050. [5] [8]

Pod anglickou zkratkou GFR, neboli Gas-cooled Fast Reactor, se skrývá typ reaktorů, které se plánují chladit plynným héliem. Štěpná reakce se bude uskutečňovat pomocí spektra rychlých neutronů v uzavřeném palivovém cyklu pro efektivní a řízené aktinoidy. Aktinoidy jsou prvky s atomovým číslem mezi 90 a 103, přičemž z nich se v zemské kůře přírodně vyskytuje pouze uran a thorium. Prvky za uranem se v přírodě nevyskytují a je nutné je připravovat uměle. V elektrárnách s reaktory GFR se plánuje úplná recyklace aktinoidů přímo na místě. Díky recyklaci se minimalizuje jaderný odpad a jeho transport. Tento typ reaktorů dále disponuje vysokou účinností díky využití přímého Braytonova cyklu a vysokých teplot chladiva. [6]

Reaktory HTGR (High-Temperature Gas-cooled Reactor) a VHTR (Very High-Temperature Reactor) jsou reaktorové prototypy německé firmy KWU a představují další evoluční krok vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů. Chladivem je helium a jeho výstupní parametry, dosahující až nad 1000 °C, naznačují, že tento typ reaktoru bude vhodný i k výrobě vodíku nebo zkapalňování uhlí. Elektrická účinnost tohoto reaktoru dosahuje až 50% při teplotě 1000 °C. Jejich dalším atraktivním aspektem je možnost kogenerace. [6]

Olovem chlazené reaktory LFR jsou založené na reaktorech používaných na ruských ponorkách typu Alfa. Jako chladivo se bude používat roztavené olovo nebo slitina olova a bismutu. Slitina olova a bismutu má tu výhodu, že má o poznání nižší teplotu tání. Bohužel nevýhodou je reakce bismutu s neutrony, která produkuje radioaktivní izotop polonium-210, který je alfa zářičem. Štěpná reakce bude, jako u ostatních rychlých reaktorů, zajišťována spektrem rychlých neutronů s uzavřeným palivovým spektrem. Existují tři plánované varianty tohoto typu reaktoru: bateriový systém (50-150 MW), modulární systém (300-400 MW) a velké monolitické elektrárny (výkon až 1400 MW). [6]

Dalším zástupcem budoucí IV. generace reaktorů jsou reaktory s roztavenými solemi MSR (Molten Salt Reactor). Jako jediný z reaktorů této generace bude pracovat s roztavenou formou paliva s schopností práce od epitermálního až po termální neutronové spektrum s uzavřeným palivovým cyklem. Tyto vlastnosti naznačují jeho vysokou efektivitu využití plutonia a minoritních aktinoidů. Tento reaktor bude schopen pracovat v konfiguraci jako transmutor, tj. reaktor pracující v uran-thoriovém cyklu, nebo jako reaktor s nízkou tvorbou odpadu. Jako palivo i chladivo se budou používat roztavené fluoridy uranu, sodíku, zirkonia, lithia a berilia. Výhodou těchto solí je jejich vysoká tepelná kapacita na jednotku objemu oproti plynům používaným jako chladiva u jiných reaktorů a jejich neschopnost reagovat se vzduchem ani vodou, což vede k značnému konstrukčnímu zjednodušení. [6]

Nástupcem klasických tlakovodních reaktorů PWR budou superkritické vodou chlazené reaktory SCWR (SuperCritical Water Reactor). Kritičnost v názvu však není vztažená k neutronické kritičnosti, ale k kritickým parametrům vody (374 °C, 22,1 MPa). Použitím těchto parametrů vody v kritickém Rankinově cyklu může účinnost dosáhnout až 44%. Reaktory se superkritickými parametry lze realizovat ve dvou provedeních podle toho, jakými neutrony bude probíhat štěpná reakce. První variantou je s otevřeným palivovým cyklem za využití tepelných neutronů s dodatečným moderátorem. Druhým typem je rychlý reaktor s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem s pokročilou recyklací aktinoidů pomocí vodního zpracování. [6]

Reaktory využívající sodík jako chladivo, zkráceně SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor), jsou reaktory předpokládané pro zpracování vysokoaktivního odpadu, zejména aktinoidů a plutonia. Tyto reaktory pracují s vysokoenergetickými neutrony v uzavřeném palivovém cyklu. Plánují se dvě varianty tohoto reaktoru s různými velikostmi a druhy paliva. Jednou z variant je středně velký reaktor o výkonu 150 až 600 MW s palivem ve formě kovové slitiny uranu, plutonia a zirkonia. Druhou variantou je střední až velký reaktor využívající palivo typu MOX o výkonu 500 až 1500 MW. Nevýhodou těchto reaktorů je schopnost sodíku reagovat se vzduchem a vodou, což může vést k tvorbě závažného množství tepla. [6]

1.3 Historie jaderné energetiky v Česku a Slovensku

Jaderná energetika v českých zemích započala těsně po skončení druhé světové války, jelikož se hledala alternativa k uhelným elektrárnám. Už v té době bylo totiž jasné, že uhelné elektrárny nejsou dlouhodobě udržitelné a pro budoucnost planety jsou i nebezpečné [9].

V roce 1954 se v SSSR povedlo připojit první jadernou elektrárnu (Obninskaja AES AM-1) do elektrické sítě. Po tomto úspěchu začala spolupráce mezi ČSSR a SSSR v rámci rozvoje a výzkumu jaderné energetiky v českých zemích. Došlo k založení výzkumného centra v roce 1955 v Řeži u Prahy, do kterého SSSR dodalo hlavní experimentální vybavení včetně výzkumného reaktoru nebo také cyklotronu. SSSR dále umožňoval školení československých specialistů na svých pracovištích. [9]

Výstavba prvního energetického reaktoru započala, až uzavřením dohody v roce 1956. Šlo o design KS-150 s označením A-1 o výkonu 150 MW, který byl moderován těžkou vodou a chlazený CO₂. Používaným palivem byl kovový uran, který byl těžen přímo v ČSSR, jeho zpracování však probíhalo v SSSR. Z 25 potenciálních lokalit byla vybrána slovenská obec Jaslovské Bohunice, kde byla jeho výstavba zahájena roku 1958. Jeho zkoušky proběhly až roku 1972 a byl uveden do provozu v prosinci téhož roku. Provoz tohoto reaktoru však postihly dvě nehody. První se stala roku 1976, kdy došlo k vysunutí palivové kazety při výměně paliva a následnému úniku

 CO_2 , kvůli kterému došlo k otravě dvou pracovníků, kteří následně zemřeli. Druhá a finální nehoda se stala v důsledku roztrženého balíčku silikagelu, který slouží jako absorbátor vlhkosti při skladování paliva. To mělo za následek uvíznutí kuliček ze silikagelu v palivovém souboru, což způsobilo špatné proudění chladiva. Lokální zvýšená teplota vedla k roztavení kanálu těžké vody, která se pak dostala k chladícímu plynu a palivu. Tato nehoda nenávratně zničila reaktor a jeho oprava se nikdy neuskutečnila, jelikož bylo rozumějí provést výstavbu reaktorů s novější koncepcí. [9] [10] [11]



Obr. 1.7 Reaktor A-1 [12]

Dle dohody z roku 1970 byly další dvě jaderné elektrárny plánovány k výstavbě v Jaslovských Bohunicích (V-1) a Dukovanech (V-2). Avšak dle usnesení vlády z roku 1975 došlo k závažné změně plánu. Všechny předem plánované reaktory VVER 440 byly postaveny v Jaslovských Bohunicích a v Dukovanech došlo k výstavbě čtyř nových reaktorů. Připojení bloků V-1 a V-2 elektrárny v Jaslovských Bohunicích k síti proběhlo v letech 1978 a 1984. V Dukovanech byl první blok připojen k elektrizační soustavě v roce 1985 a všechny bloky byly trvale spuštěny v roce 1988. [9]

Nejambicióznější plán té doby však začal v roce 1978 uzavřením dohody mezi ČSSR a SSSR o další plánované elektrárně s čtyřmi jadernými bloky o výkonu 1000 MW (VVER 1000). Původně se uvažovalo o lokalitách Malovice u Vodňan a Protivín, avšak ani jedna z nich nakonec nevyhovovala z hydrogeologických a bezpečnostních

Název JE	Náklady v Mld. Kčs	Číslo	Typ a výkon reaktoru	Plánované do provozu
Jaslovské Bohunice V-1 (SK)	5	1	VVER440	3. měsíc roku 1979
		2	VVER440	6. měsíc roku 1980
Jaslovské Bohunice V-2 (SK)	10,5	1	VVER440	10. měsíc roku 1984
		2	VVER440	9. měsíc roku 1985
Dukovany (CZ)	10,5	1	VVER440	3. měsíc roku 1985
		2	VVER440	3. měsíc roku 1986
		3	VVER440	12. měsíc roku 1986
		4	VVER440	7. měsíc roku 1987
Mochovce (SK)	28,3	1	VVER440	10. měsíc roku 1989
		2	VVER440	10. měsíc roku 1990
		3	VVER440	6. měsíc roku 1991
		4	VVER440	3. měsíc roku 1992
Temelín (CZ)	52	1	VVER1000	11. měsíc roku 1992
		2	VVER1000	5. měsíc roku 1994
		3	VVER1000	5. měsíc roku 1997
		4	VVER1000	8. měsíc roku 1998
Kecerovce (SK)	-	1	VVER1000	2000
		2	VVER1000	2001
Blahutovice (CZ)	-	1	VVER1000	2003
		2	VVER1000	2004
Tetov (CZ)	-	1	VVER1000	2006
		2	VVER1000	2007
		3	VVER1000	2009
		4	VVER1000	2010

Tab. 1.1 Původní plán spuštění jaderných bloků v Československu [9]

hledisek. Nakonec bylo rozhodnuto elektrárnu postavit u obce Temelín. Její výstavba začala v roce 1986. Práce na všech čtyřech blocích však nebyly dokončeny a po pádu komunismu v roce 1989 došlo k zastavení prací na 3. a 4. bloku v Temelíně. Po analýze provedené mezinárodní agenturou pro jadernou energii IAEA v roce 1990 byly zjištěny nedostatky, které byly v následujících letech buď modernizovány, nebo kompletně nahrazeny. [9] Pokud by se postupovalo podle původních plánů, mělo by na území Československa stát až 14 nových reaktorů. Tento plán však nebyl dodržen a po pádu komunismu se výstavba nových jaderných bloků ještě více zkomplikovala. Největší odpor vůči novým jaderným blokům v Čechách vyjádřilo Rakousko, které bylo ochotno vetovat vstup České republiky do EU, pokud by nebyla zastavena výstavba bloků v Temelíně. Tyto bloky nejsou dosud dokončeny a hlavní zaměření se přesunulo na nový blok plánovaný v Dukovanech. [9]

1.4 Současnost a budoucnost jaderné energetiky v ČR

Jak již bylo zmíněno, tak bloky 3 a 4 Temelínské jaderné elektrárny nikdy nebyly dostavěny. To však neznamená, že po vstupu České republiky do EU nebyla nikdy snaha o jejich dokončení. V roce 2008 plánovala společnost ČEZ zahájit jejich dostavbu v roce 2013 s plánovaným uvedením do provozu v roce 2020. Z těchto plánů však sešlo. Roku 2009 byl sice zahájen tendr mezi potenciálními dodavateli a jejich třemi designy reaktorů, kterými tehdy byli Rosatom (Rusko) s reaktorem AES-2006/MIR-1200, Westinghouse (USA) s reaktorem AP1000 a

Areva (Francie) s reaktorem typu EPR. Francie však po nesplnění podmínek tendru odstoupila. Následně, po několika odkladech a otázkách ohledně ekonomické výhodnosti, byl tendr ukončen a plány na dokončení bloků 3 a 4 Temelína byly opuštěny. Veškeré úsilí se následně soustředilo na nové bloky v Dukovanech. Aktuální plány vlády České republiky směřují k udržení minimálně současné kapacity podílu jaderných zdrojů s důrazem na zvýšení podílu jaderné energie a především obnovitelných zdrojů energie do roku 2050. Podle modelovaných scénářů WEM+ a WAM3, uvedených v aktualizaci vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu z roku 2023, je plánováno odstavení stávajících a uvedení do provozu nových jaderných zdrojů, jak je uvedeno v následující tabulce. [11] [13] [14]

	WAM3	WEM+
Stávající JE Dukovany 2040 MW	EDU1 (510 MW do 2045)	EDU1 (510 MW do 2045)
	EDU2 (510 MW do 2046)	EDU2 (510 MW do 2046)
	EDU3 (510 MW do 2046)	EDU3 (510 MW do 2046)
	EDU4 (510 MW do 2047)	EDU4 (510 MW do 2047)
Stávající JE Temelín 2200 MW	ETE1 (1100 MW do 2060)	ETE1 (1100 MW do 2060)
	ETE2 (110 0MW do 2062)	ETE2 (1100 MW do 2062)
Nový jaderný zdroj 1100 MW	NJZ1 EDU5 od 2036	NJZ1 EDU5 od 2040
SMR 350 MW	SMR od 2035	-
Další nové jaderné zdroje 1100 MW	NJZ2 ETE3 od 2039	-
	NJZ3 ETE4 od 2041	-

Tab. 1.2 Hlavní předpoklady scénářů WAM3 a WEM+ [14]

Plán pro tento nový blok byl zveřejněn v roce 2015 s tím, že nyní probíhá nový tendr, který byl zahájen v roce 2022. Zahájení stavby je plánováno na rok 2028 a uvedení do provozu v roce 2036. Z původních šesti kandidátů - EDF/Areva, Atmea, China General Nuclear Group, Korea HNP, Westinghouse a Rusatom - zůstali pouze tři. V roce 2020 Atmea ze soutěže odstoupila a v dubnu následujícího roku byly z politických důvodů vyřazeny také CGN a Rusatom. Vyhlášení vybraného kandidáta z tří zbývajících firem se očekává v letošním roce 2024. [11] Doplňující možností je využití malých a středních reaktorů modulárního provedení, zkráceně tzv. SMR. Tyto reaktory jsou definované Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE/IAEA) jako zdroje elektrického výkonu do 700 MW s možností modulární konstrukce. Jedná se o technologii s vysokou úrovní pasivní bezpečnosti, malými rozměry a sníženými nároky na řízení a údržbu. Pořizovací náklady jsou až o třetinu nižší než u konvenčních nových bloků jaderných reaktorů, což otevírá možnosti pro širší spektrum investorů, i když jednotkové náklady na vyrobený gigawatt energie jsou vyšší. Tato technologie se mimo Rusko a Čínu dosud nedostala do komerčního využití, přičemž prvním spuštěným reaktorem tohoto typu v západním světě by měl být SMR typu BWRX společnosti GE Hitachi o výkonu 300 MW v Kanadě v roce 2028. Z tohoto důvodu usiluje konkurence o zahájení podobných projektů v EU, včetně České republiky. SMR představují

technologii, která je považována za doplňkovou k velkým energetickým jaderným blokům, a podle aktuálních dekarbonizačních scénářů ČEPS do roku 2040 nedokáže výstavba nových bloků a obnovitelných zdrojů energie pokrýt potřeby energetické soběstačnosti České republiky. SMR tak představují jednu z možných alternativ pro zabezpečení potřebných až 3 GW, jaké scénář počítá do roku 2050. Tyto reaktory slouží k pokrývání základního zatížení a v některých zemích, jako je Francie, se využívají i k regulaci. Díky své schopnosti pracovat s proměnlivým elektrickým výkonem v síti s intermitentními zdroji energie a kogenerací představují SMR vhodnou volbu i pro teplárenství. V současné době tvoří uhelné zdroje přibližně polovinu teplárenského sektoru, a kvůli zájmu o zachování systémů dodávky tepla i po ukončení spalování uhlí představují SMR vhodnou náhradu za uhelné kotle. Stejně jako u tepláren je možné modernizovat stávající uhelné elektrárny na elektrárny využívající SMR jako zdroj tepla. Kromě těchto využití lze SMR v letních měsících využít k výrobě vodíku v době sníženého odběru tepla. Technologie SMR představuje příležitost pro rozvoj českého průmyslu a vytváření nových pracovních míst. Lokality vybrané skupinou ČEZ pro první tři malé modulární reaktory jsou: Temelín, Tušimice a Dětmarovice. Kromě toho v září 2023 získala západočeská firma Sokolovská uhelná dotaci z amerického projektu Phoenix na studii proveditelnosti pro umístění SMR v elektrárnách Tisová a Vřesová. Dalším ambiciózním projektem, který se snaží využít SMR v teplárenství, je projekt Teplátor. [11] [15] [14] [16]

2 Základní popis reaktorů III+ generace

S aktuálním stavem pokroku v oblasti technologie reaktorů IV. generace se s jejich komerčním uplatněním ještě hezkou řádku let nedá počítat. Proto i nejnovější projekty uplatňují reaktory III+ generace, které se stále považují za nejlepší a nejpokročilejší technologii v rámci výstavby jaderných reaktorů. Z tohoto důvodu dominují v Dukovanském tendru převážně reaktory III+ generace. Tato kapitola je tedy věnována popisu konstrukčních a funkčních stránek několika zástupců této generace. Mezi zástupce byly vybrány designy AP1000, EPR1200 a APR-1400. Dodatečně je popsán i reaktor OPR-1000, který sice není reaktorem III+ generace, ale jeho popis je zde uveden za účelem poskytnutí kontextu k vývoji reaktoru APR-1400.

Zdokonalený pasivní dvou-okružní PWR reaktor pod označením AP1000 s elektrickým výkonem 1100 MW spadá pod americkou firmu Westinghouse. Design reaktoru AP1000 vychází z jejich předchozího designu AP600, a lze říci, že se jedná o rozšíření tohoto designu. Stejně jako ostatní designy této generace, i AP1000 se snaží dosáhnout co nejvyšší úrovně bezpečnosti za co nejnižší pořizovací a provozní náklady. [17]

Původně označovaný jako KNSP, což je zkratka pro Korea's standard nuclear power plant, byl později přejmenován na OPR-1000 z důvodu exportu této technologie i mimo Jižní Koreu. Jedná se o dvou-okružní PWR reaktor s elektrickým výkonem 1000 MW, který navrhla a dodává korejská korporace KEPCO a její dceřiná společnost zaměřená na jaderné a vodní elektrárny, KHNP. Tato technologie byla odvozena od americké firmy Combustion Engineering po dohodě o transferu technologií. V průběhu let došlo k akumulaci zkušeností a vylepšení designu OPR-1000. [18]

Reaktor označovaný jako APR-1400 představuje design, který vychází z aktuálně používaného korejského reaktoru OPR-1000, přičemž zlepšuje aspekty bezpečnosti, ekonomiky a efektivity provozu. Stejně jako jeho předchůdce se jedná o dvou-okružní tlakovodní PWR reaktor s elektrickým výkonem 1400 MW. V současné době jsou v Koreji v provozu čtyři reaktory tohoto typu a další dva jsou ve výstavbě. [19]

Posledním reaktorem v řadě reaktorů III+ generace je reaktor EPR1200. Projekt EPR byl původně pod vedením společností Framatome a Siemens. V roce 2001 však Siemens svá práva prodal nově vytvořené společnosti AREVA, která vznikla spojením několika firem, mezi které patřil i Framatome. Tento design vznikl na základě zkušeností získaných z provozu reaktorů N4 a KONVOI ve Francii a Německu. Zkratka EPR představuje Evolutionary Power Reactor, nebo také European Pressurized Water Reactor, a jedná se o čtyř-okruhový tlakovodní reaktor s elektrickým výkonem 1600 MW. [20] [21]

2.1 Primární okruh

2.1.1 AP1000

Hlavním rozdílem oproti primárním okruhům ostatních reaktorů jsou rozšiřující komponenty, které zlepšují efektivitu provozu reaktoru a bezpečnost. Hlavními komponentami primárního okruhu těchto reaktorů je samotný reaktor s dvěma obvody pro přenos tepla. Každý z těchto obvodů je tvořen parogenerátorem, dvěma čerpadly a potrubím, které je děleno podle teploty chladiva (hot, cold leg pipe). Potenciální problémy, které by mohly vzniknout na potrubí mezi čerpadly a parogenerátorem, jsou eliminovány tím, že čerpadla jsou instalována přímo na parogenerátoru. Pro kompenzaci tlaku je primární okruh rozšířen přetlakovou nádobou. [17]



Obr. 2.1 Primární okruh reaktoru AP1000 [22]

2.1.2 OPR-1000

Primární okruh u těchto reaktorů je tvořen nádobou reaktoru a dvěma obvody pro výměnu tepla, z nichž každý je složený z parogenerátoru, čerpadel a chladicích systémů (RCS - reactor coolant system). Pro kompenzaci tlaku chladiva v primárním okruhu se využívá přetlakové nádoby s pojistnými pružinovými ventily. Umístění parogenerátorů je podobně jako u ostatních reaktorů III+ generace výše než je nádoba reaktoru pro uplatnění přírodní cirkulace chladiva. [18]



Obr. 2.2 Schématický diagram OPR-1000 [23]

2.1.3 APR-1400

Provedení primárního okruhu je velice podobné reaktoru OPR-1000. Také je tvořen dvěma okruhy, reaktorovou nádobou, přetlakovou nádobou a systémy RCS. Podobně jako u OPR-1000 v každém okruhu je parogenerátor s dvěma symetricky umístěnými čerpadly chladiva. Design se pak odlišuje v tom, že hlavní reaktorová nádoba má čtyři DVI (Direct Vessel Injection) linky pro zásobování vodou z nádrže umístěné uvnitř kontejmentu (IRWST - in-containment refueling water storage tank). Dodatečné sondy jsou přidány do potrubí pro sledování hladiny vody během operace a konvenční pružinové ventily na vrchu přetlakové nádoby jsou nahrazeny pilotně ovládanými bezpečnostními pojistnými ventily (POSRV). [24]



Obr. 2.3 Konfigurace primárního okruhu APR-1400 [25]

2.1.4 EPR1200

Jedná se o představitele troj-okruhového reaktoru, tudíž systém RCS je tvořen třemi okruhy, každý ze svého parogenerátoru a čerpadla chladiva s příslušným potrubím. Oproti předchozím designům více-okruhových reaktorů vyniká reaktor EPR1200 zvýšenými pracovními objemy vody a páry, které přináší značné množství bezpečnostních i provozních benefitů. [21] [26]

2 ZÁKLADNÍ POPIS REAKTORŮ III+ GENERACE



Obr. 2.4 Primární okruh EPR1200[26]

2.2 Palivo a aktivní zóna

2.2.1 AP1000

Aktivní zóna je složena z 157 palivových souborů o délce 426,72 cm (14 stop). Palivový cyklus pro tento typ reaktoru je 18 měsíců. Samotné palivové soubory jsou pak zhotoveny z čtvercové matice palivových proutků o velikosti 17x17 (264 proutků). Palivové peletky z obohaceného dioxidu uranu (UO_2) o průměru 8,19 mm jsou na sebe vyskládány do pláště ze zirkoniové slitiny (obchodní označení ZIRLOtm), tvořícího palivový proutek. Ve všech palivových souborech jsou 25 dedikovaných míst tvořených trubicí ze zirkoniové slitiny určených pro měřící nebo regulační techniku. Palivo v aktivní zóně má tři úrovně obohacení pohybující se od 2,35% wt až po 4,45% wt. [27][28] [29] [17]

2.2.2 OPR-1000

Palivové soubory jsou složeny z klasických palivových proutků vyskládaných do čtvercové matice o velikosti 16x16 (236 proutků) nebo v případě použití speciálních, takzvaně dvojitě chlazených palivových proutků se jedná o matici 12x12 (124 proutků) nebo 14x14 (172 proutků). Menší počet proutků v matici je způsoben tím, že tyto proutky mají větší průměr, přičemž celková délka proutku je v obou případech stejná. Dvojitě

chlazené palivové proutky jsou podobně jako u klasického paliva tvořeny peletkami (UO_2) obalenými pláštěm (ZIRLOtm). V tomto případě však peletky mají v sobě dutinu, díky které dochází jak ke chlazení povrchu paliva, tak i vnitřní oplášťované dutiny. Zvýšená účinnost chlazení pak umožňuje provozovat reaktor stejných rozměrů s vyšším výkonem a využití paliva s vyšším obohacením. [30] [18]

-	Dvoj. Chlazené 13x13	Klasické 17x17
Vnitřní průměr	8,610 cm	-
Vnější průměr vnitřního pláště	9,753 cm	-
Vnitřní průměr paliva	9,877 cm	-
Vnější průměr paliva	14,225 cm	8,260 cm
Vnitřní průměr vnějšího pláště	14,349 cm	8,380 cm
Vnější průměr vnějšího pláště	15,492 cm	9,520 cm
Rozteč	16,510 cm	12,630 cm

Tab. 2.1 Porovnání rozměrů mezi dvojitě chlazeným a klasickým palivem

Osazení aktivní zóny má tři možné scénáře, které záleží na typu použitých palivových souborů. Může se tedy skládat z palivových souborů 16x16, 12x12 nebo 14x14. Z důvodu porovnání s ostatními reaktory III+ generace budeme uvažovat aktivní zónu tvořenou soubory 16x16 s klasickým palivem, tím pádem je aktivní zóna tvořena ze 177 palivových souborů. Palivový cyklus tohoto reaktoru je v rozmezí 18 až 24 měsíců. Úroveň obohacení paliva v jednotlivých palivových souborech dosahuje vždy dvou rozdílných úrovní. Jedinou výjimkou je palivový soubor bez jakékoliv formy absorbátoru, ve kterém je obohacení u všech palivových proutků identické. Vodící trubice pro regulační orgány jsou v palivových souboru. Dle typu použitých palivových proutků se jejich průměr a popřípadě i tvar nebo počet vrstev pláště může měnit. V případě použití klasických palivových souborů 16x16 je jejich průměr 24,9 mm a mají jednu vrstvu pláště o tloušťce 1 mm. [30]

2.2.3 APR-1400

U reaktorů APR-1400 je aktivní zóna tvořena 241 palivovými soubory s palivovými cykly nad 18 měsíců. Provoz také počítá s možností použití až 1/3 osazení aktivní zóny palivem MOX, což označuje typ paliva z oxidických směsí s nízkým obohacením uranu. Palivové soubory jsou tvořeny z 16x16 velké matice, ze které 236 míst obsazují palivové proutky z dioxidu uranu s 0,5715 cm tlustým pláštěm ze ZIRLOtm. Zbylá místa představují 4 vodící trubice a 1 instrumentální trubici pro měření neutronového toku uvnitř reaktoru. Nominální obohacení paliva má následující úrovně: 1,71; 2,64; 3,14 a 3,64% wt. Místo konvenčních palivových souborů reaktory APR-1400 využívají tzv. PLUS7 palivové soubory, které dosahují vyššího výkonu, strukturální integrity a lepší termohydrauliky. [24] [31] [32]

2.2.4 EPR1200

V aktivní zóně reaktoru EPR1200 se využívá 241 palivových souborů, přičemž každý obsahuje 256 (17x17) palivových proutků a 24 vodících trubic. Palivo je obdobně jako u ostatních reaktorů této generace tvořeno UO₂

s úrovní obohacení až 5% wt. Pláštěm, který se však u těchto palivových proutků používá, je zirkoniová slitina M5tm. Zajímavostí těchto reaktorů je, že dokážou pracovat i se značnou částí aktivní zóny osazenou palivem MOX. [20] [33]

2.3 Regulace reaktivity

Delší palivové kapsy reaktorů vyžadují, aby na jejich začátku docházelo ke kompenzaci přebytečné reaktivity vlivem většího obohacení paliva. Z těchto důvodů jsou v aktivní zóně neutronové absorbátory. Rozlišujeme rozpustné a vyhořívající absorbátory. Jako rozpustný absorbátor se v reaktorech nejčastěji využívá bor v různých podobách. Vyhořívající absorbátory se dále dělí na diskrétní (BPRA - Burnable Poison Rod Assembly) a integrální (IFBA - Integral Fuel Burnable Absorber). Jedna forma diskrétního absorbátoru představuje tyče z borosilikátového skla opláštěné dvojitou vrstvou oceli typu 304 s vakuem mezi jednotlivými vrstvami. Tento typ absorbátoru je označován jako Pyrex a vkládá se do vodících trubic v palivových souborech. Integrální může být proveden jako tenká vrstva materiálu nalisovaná nebo přímo smíchána s materiálem paliva. Název vyhořívajících absorbátorů vychází z té vlastnosti, že v průběhu palivové kampaně jejich obsah se v aktivní zóně postupně snižuje. V profilaci aktivní zóny se palivové soubory s absorbátory označují počtem tyčí s daným absorbátorem a písmenem P (Diskrétní) nebo I (Integrální). Nejefektivnější regulace při výkyvech reaktivity se v reaktoru využívá regulačních orgánů RCCA (Rod Cluster Control Assemblies) nebo CEA (Control Element Assemblies), které do aktivní zóny zasouvají tyče vyrobené z materiálu s dobrou absorpcí neutronů.

reaktor	Rozpustný absorbátor	BPRA	IFBA	materiál RCCA/CEA	počet RCCA/CEA
AP1000	H ₃ BO ₃	B ₂ O ₃ -SiO ₂	ZrB ₂	Ag-In-Cd/304SS	53+16 (GRCA)
OPR-1000	H ₃ BO ₃	žádný	Gd ₂ O ₃	B ₄ C/Inconel 625	65+8 (part-strength)
APR-1400	H ₃ BO ₃	žádný	Gd ₂ O ₃	B ₄ C/Inconel 625	76+17 (part-strength)
EPR1200	H ₃ BO ₃	žádný	Gd ₂ O ₃	Ag-In-Cd/B ₄ C	89

Tab. 2.2 Regulace reaktivity v reaktorech III+ generace [17][18][34][24][21]

3 Výpočetní kód a model

Tato kapitola je věnována popisu výpočetního modelu a metody získání konečných výsledků, které jsou uvedeny v poslední kapitole této práce. Výpočetní model byl vytvořen pro reaktor AP1000. Samotné výpočty provedl výpočetní kód Serpent 2.

Model je realizován formou textového souboru, který funguje jako vstupní soubor, se kterým pak výpočetní kód pracuje. Tento vstupní soubor je jediný způsob komunikace mezi uživatelem a samotným výpočetním kódem. Vstupní soubor je rozdělen do jednotlivých bloků (karet), které nemají žádný daný pořadí, v jakém musí být definované, a jejich čtení probíhá jeden po druhém. Do jednotlivých bloků se definuje geometrie, materiály, podmínky simulace, způsoby vykreslení, atd. V této práci představuje vstupní soubor 3D model aktivní zóny reaktoru AP1000.[35]

3.1 Serpent 2

centra pro radiační bezpečnost.[36] [37]

Tento kód představuje svou třetí iteraci verze multifunkčního 3D neutronového a fotonového transportního kódu, využívající metodu Monte Carlo k výpočtu reaktorové fyziky. Jeho vývoj byl zahájen roku 2004 v Technickém výzkumném středisku VTT ve Finsku. Přičemž jeho první verze, označovaná jako PSG (Probabilistic Scattering Game), byla vyvinuta s cílem zlepšení efektivity výpočtu oproti univerzálním Monte Carlo kódům.[36] [37] V roce 2007 došlo k kompletnímu přepsání kódu PSG za účelem opravení několika fyzikálních chyb, jichž se PSG za určitých podmínek dopouštěl. V roce 2008 byl jeho vývoj znovu obnoven za účelem vytvoření samostatné rutiny pro výpočet vyhořívání, která zahrnovala využití nových metod řešení Batemanových rovnic, jako je CRAM (Čebyševova metoda racionální aproximace). Před zahrnutím kódu do databáze OECD/NEA (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj/Nuclear Energy Agency) byl kód v roce 2009 přejmenován na Serpent. Jeho distribuce proběhla o rok později, v roce 2010, prostřednictvím informačního a výpočetního

S rozvojem komunity používající Serpent došlo i k rychlejšímu odhalování chyb spojených s výpočetním kódem. Největším problémem byl přechod výpočtů z 2D na 3D model, kdy docházelo ke kvadratickému nárůstu zatížení na výpočetním hardwaru.[36] [37]

S tímto problémem se vývojářský tým chtěl poprat, a tak v roce 2010 začali výpočetní kód znovu od základu přepisovat. Výsledkem jejich úsilí byl Serpent 2, který se v aktualizované formě používá aktuálně.[36] [37]



Obr. 3.1 rozhraní konzole s informacemi o verzi kódu Serpent

3.2 Nastavení simulace

V bloku nastavení výpočtu určujeme pomocí příkazu *setbc* s jakou hraniční podmínkou kód Serpent bude počítat. Existují tři varianty: černá (1), reflektivní (2) a periodická (3). V případě této práce se využívá první podmínka, která všechny neutrony, co přes hranici přejdou, eliminuje. K nastavení počtu neutronů vygenerovaných v každém cyklu společně s počtem celkových a neaktivních cyklů se využívá příkazu *setpop*. Příkazem *setcpd* se nastavuje výpočet distribucí výkonu v mřížce do výstupního souboru. Tento blok je zakončen soustavou příkazů *plot* a *mesh*, které slouží k vykreslení geometrie o rozlišení 5000x5000 pixelů. Jednotlivé výkresy jsou v různě orientovaných plochách nebo vůči xyz souřadnicovému systému.

Výpis kódu 3.1 Definice 2D palivového proutku pin1

```
% — Periodic boundary condition:
set bc 1
% — Neutron population and criticality cycles:
%set pop 2000 500 20
set pop 8000000 2020 20
set cpd 2
% — Geometry and mesh plots:
% - Kontrolní Řezy
plot 3 5000 5000 500
plot 3 5000 5000 460
% - Globální
plot 30 5000 5000
```

3.3 Materiály

V tomto bloku se nachází definice všech materiálů, které se v modelu nacházejí. Syntaxe pro definici nového materiálu začíná příkazem *mat*, za kterým následuje přidělené jméno a atomická nebo hmotnostní hustota. Popřípadě lze tuto definici rozšířit o příkazy *tmp*, který udává pracovní teplotu v kelvinech, nebo *rgb*, který umožňuje změnu barevného zobrazení daného materiálu ve výkresech.

Každý použitý materiál se musí skládat z nuklidů s jejich atomickým nebo hmotnostním zastoupením v daném materiálu. Nuklid je definován jako protonové číslo daného prvku kombinované s číslem izotopu zakončeným tečkou a označením ACE jaderné knihovny, ze které bude výpočet čerpat data o daných materiálech.

Pro výpočet byla původně využívána knihovna ENDF/B-VII.0, ta se pro účely této práce neprojevila jako vhodná, a došlo k jejímu nahrazení knihovnou ENDF/B-VII.1. U všech použitých nuklidů musí být také doplněna informace o jejich atomickém nebo hmotnostním zastoupení v daném materiálu.

Výpis kódu 3.2 Úsek z bloku pro definici materiálů

% — UO2 fuel	enriched to 4.45	% wt U-235:	
mat fuel445	sum	tmp 300	rgb 0 255 0
92234.80c	8.45122188E-06		
92235.80c	1.05189486E-03		
92238.80c	2.22925932E-02		
8016.80c	4.66881303E-02	%	
8017.80c	1.77482338E-05		
% — IFBA coa	ting		
mat ZrB2_coat	-5.42000	tmp 300	rgb 205 0 205
5010.80c	-0.018700		
5011.80c	-0.171300		
40090.80c	-0.416745		

40091.80c	-0.090882				
40092.80c	-0.138915				
40094.80c	-0.140778				
40096.80c	-0.022680				
% —— cladding	(ZIRLOtm)				
mat clad	-6.55000	tmp 300	rgb 1	28 128	128
%40000.06c	-0.98110				
40090.80c	-0.50565894	%51,45%			
40091.80c	-0.11007942	%11,22%			
40092.80c	-0.16825865	%17,15%			
40094.80c	-0.17051518	%17,38%			
40096.80c	-0.0274708	%2,8%			
41093.80c	-0.01000	%			
%50000.80c	-0.00670				
50112.80c	-6.499E-5	%0,97%			
50114.80c	-4.355E-5	%0,65%			
50115.80c	-2.278E-5	%0,34%			
50116.80c	-9.7418E-4	%			
50117.80c	-5.1456E-4	%7,68%			
50118.80c	-1.62341E-3	%24,23%			
50119.80c	-5.7553E-4	%			
50120.80c	-2.18353E-3	%			
50122.80c	-3.1021E-4	%4,63%			
50124.80c	-3.8793E-4	%5,79%			
%26000.06c	-0.00100				
26054.80c	-5.8450E-05	%5,845%			
26056.80c	-9.1754E-04	%91,754%			
26057.80c	-2.1190E-05	%2,119%			
26058.80c	-2.8200E-06	%−−−0,282%			
8016.80c	-0.00120	%			

3.4 Geometrie

Geometrie vytvořená pro Serpent je založená na "univerzech". Tyto univerza jsou tvořena nezávisle na sobě, a pro tvorbu pokročilých konstrukcí dochází k jejich vzájemnému vkládání do sebe. Nejlepším příkladem tohoto principu je popsání využití tohoto způsobu geometrie přímo pro popsání jaderného reaktoru. Univerzum reaktoru je tvořeno skládáním menších univerz (palivových souborů) vedle sebe, tvořících aktivní zónu. V každém palivovém souboru jsou potom ještě menší univerza, představující individuální palivové proutky. Základním blokem této geometrie jsou buňky, které jsou definovány mezi povrchy. V každé buňce pak může být definován materiál, jiné univerzum nebo prázdnota.[35]

3.4.1 Geometrie proutků

Základním prvkem modelu je geometrie proutků, které pak tvoří palivové soubory. Přičemž z perspektivy jejich geometrie existují čtyři různé druhy: palivové, IFBA, Pyrex a vodící/instrumentální proutky. Z perspektivy materiálového složení se jejich počet navýší z důvodu rozdílné úrovně obohacení palivových a IFBA proutků. Úrovně obohacení uranu v palivu jsou 2,35%, 3,4%, a 4,45% wt pro palivové soubory, a 3,4% a 4,45% wt pro soubory obsahující IFBA.



Obr. 3.2 Geometrie proutků [29]

Celkově tedy v modelu existuje 8 typů proutků, každý s vlastním jménem univerza od 1 do 9. Univerzum s číslem 4, které původně představovalo proutek IFBA s obohaceným uranem o 2,35% wt, se projevilo jako nepotřebné a v pozdějších verzích modelu bylo odstraněno.

Tab. 3.1 Číselné označení přiřazené k jednotlivým	proutkům
---	----------

typ proutku	číslo universa
Palivový s obohacením 2,35%	1
Palivový s obohacením 3,4%	2
Palivový s obohacením 4,45%	3
IFBA s obohacením 2,35% - nevyužito	4
IFBA s obohacením 3,4%	5
IFBA s obohacením 4,45%	6
voda	7
vodící/instrumentálí proutek	8
Pyrex	9

3.4.1.1 Definice universa palivového proutku ve 2D

Universum pojmenované jako *pin* 1 je definované třemi povrchy o rozdílných poloměrech. Od středu do 0,409575 cm je buňka vyplněna uranem 235 (*fuel235*). Následně buňka mezi povrchy mezi poloměry 0,409575 cm a 0,41783 cm je vyplněna prázdnotou (*void*). Plášť z materiálu ZIRLOtm (*clad*) je definován v buňce mezi poloměry 0,41783 cm a 0,47498 cm. Poslední buňka v této definici je mezi poloměry 0,47498 cm a nekonečno a ta je vyplněna vodou (*waterCOLD*).

Výpis kódu 3.3 Definice palivového proutku pin1 ve 2D.basicstyle

pin 1	
fuel235	0.409575
void	0.417830
clad	0.474980
waterCOLD	

3.4.1.2 Definice universa palivového proutku ve 3D

Definice proutku pomocí příkazu *pin* není vhodná pro aplikaci ve 3D, jelikož umožňuje měnit geometrii pouze v horizontálním směru, přičemž ve směru axiálním se definovaná geometrie pouze nekonečně roztáhne. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit celou definici od základu a určit jak horizontální, tak axiální povrchy.

Pro vytvoření povrchu se využívá příkaz surf, za kterým se vkládá jméno povrchu, jeho typ a geometrické parametry. V uvedeném příkladu jsou vytvořeny povrchy cylindrické, u kterých se určuje souřadnice jejich středu, poloměr a roviny kolmé k ose z s jejich axiální polohou.
Výpis kódu 3.4 Definice povrchů palivového proutku pin1 ve 3D

% horizontální struktura proutku surf 101 cyl 0.0 0.0 0.409575 surf 102 cyl 0.0 0.0 0.417830 surf 103 cyl 0.0 0.0 0.474980 % axiální struktura proutku surf PP_z8 pz 445.77 surf PP_z7 pz 444.5 surf PP_z6 pz 426.72 surf PP_z5 pz 406.4 surf PP_z4 pz 20.32 surf PP_z3 pz 0 surf PP_z2 pz -12.16 surf PP_z1 pz -14.31 surf grid1BOT pz -8.0 surf grid1TOP pz 436 surf grid14BOT pz 436

Buňky geometrie pak vytváříme právě mezi těmito horizontálními a axiálními povrchy, přičemž syntaxe jejich definice začíná příkazem *cell*, následuje název dané buňky, název univerza, do kterého patří, materiál a horizontální a axiální hranice. Hranice se určují pomocí názvů povrchů a znaménka mínus, které udává, zda se pohybujeme vně/uvnitř nebo nad/pod daným povrchem. Z důvodu diverzity axiálních i horizontálních struktur proutků je nutná jejich individuální definice.

Výpis kódu 3.5 Definice buněk palivového proutku pin1 ve 3D

%	defin	nic	e proutku pin1								
% - pod palivem (-14.31 - 0 cm)											
c e 1 1	10001	1	clad	-103		PP_z1 -	PP_z2				
c e 1 1	10002	1	void	-103		PP_z2 -	PP_z3				
c e 1 1	10003	1	waterCOLD	103		PP_z1 -	grid1BOT				
c e 1 1	10004	1	waterMIX_INC	103		grid1BO	Γ -grid1TOP				
c e 1 1	10005	1	waterCOLD	103		grid1TO	P -PP_z3				
% – s	spodn í	zć	óna nízkého obohacen	í (0	- 20.32 cm)						
c e 1 1	10006	1	fuel158	-101		PP_z3	-PP_z4				
c e 1 1	10007	1	void	101	-102	PP_z3	-PP_z4				
c e 1 1	10008	1	clad	102	-103	PP_z3	-PP_z4				
c e 1 1	10009	1	waterMIX_GLOB	103		PP_z3	-PP_z4				
% - 2	zóna s	nc	ormálním obohacením	(20.3	2 - 405.4 cm)						
c e 1 1	10010	1	fuel235	-101		PP_z4	-PP_z5				
c e 1 1	10011	1	void	101	-102	PP_z4	-PP_z5				

cell 10012 1 clad	102 -103	PP_z4 –PP_z5
cell 10013 1 waterMIX_GLOB	103	PP_z4 -PP_z5
% – horní zóna nízkého obohacen	(405.4 - 426.72 cm)	
cell 10014 1 fuel158	-101	PP_z5 -PP_z6
cell 10015 1 void	101 -102	PP_z5 -PP_z6
cell 10016 1 clad	102 -103	PP_z5 -PP_z6
cell 10017 1 waterMIX_GLOB	103	PP_z5 -PP_z6
% - nad palivem (426.7 - 445.77	cm)	
cell 10018 1 void	-103	PP_z6 -PP_z7
cell 10019 1 clad	-103	PP_z7 -PP_z8
cell 10020 1 waterCOLD	103	PP_z6 -grid14BOT
cell 10021 1 waterMIX_INC	103	grid14BOT -grid14TOP
cell 10022 1 waterCOLD	103	grid14TOP -PP_z8

Palivové non-IFBA a IFBA proutky mají téměř identickou axiální konstrukci. Proutek je tvořen z 386,08 cm vysoké oblasti paliva s nominální úrovní obohacení, která je z obou konců ohraničená oblastí s nižším obohacením o výšce 20,32 cm (1,58% pro non-IFBA a 3,2% pro IFBA) a oblastí o výšce 12,16 cm vyplněnou heliem nebo vakuem, zapečetěnou zirkoniovým víkem s výškou 2,15 cm. Celková výška proutku je tedy 460,08 cm, což je identická výška pro všechny typy proutků.

Axiální struktura proutků Pyrex je tvořena 368,3 cm vysokou oblastí z borosilikátového absorbéru. Podobně jako u palivových souborů je tato oblast z obou konců obklopena vakuem nebo heliem. Tento úsek je vysoký 30,48 cm, přičemž z horní části je zapečetěn ocelovým víkem a zespoda přechází z oblasti vakua do vody.



Obr. 3.3 Axiální geometrie proutků [29]

3.4.2 Geometrie palivových souborů

O úroveň složitější geometrie je geometrie palivových souborů, které jsou tvořeny z proutků. Pro tvorbu palivového souboru využíváme příkazu *lat*, který vytvoří speciální universum, ve kterém můžeme tvořit geometrii nebo do něj vkládat další menší universa. Pro tvorbu palivového souboru se využívá druhého případu. Syntaxe za příkazem *lat* udává označení daného universa, typ (1 označuje čtvercovou mřížku, 2 a 3 hexagonální mřížku s natočením podle osy x nebo y), souřadnice počátku, počet prvků ve směru x, y osy a nakonec rozteč mezi prvky.

Výpis kódu 3.6 Syntaxe příkazu lat pro palivový soubor

lat Fuel_Rod 1 0.0 0.0 19 19 1.25964

Palivové soubory používané v reaktoru AP1000 mají velikost 17x17 prvků. Pro jejich vytvoření však potřebujeme 19x19 prvků z důvodu ohraničení celého souboru vodou ze všech stran. Definici tvoří tedy 19x19 matice čísel odpovídajících jménům přiřazeným k daným proutkům nebo vodě.

Výpis kódu 3.7 Matice 19x19 prvků tvořená z univers proutků

7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	8	1	1	8	1	1	8	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Pro správnou funkci je nutno definovat okolí palivového souboru. K tomu se využívají předem definované povrchy pro tvorbu buněk. Do vytvořené hranice se vkládá universum s definovanou maticí a zvenčí se hranice obklopuje vodou.

Výpis kódu 3.8 Definice struktury universa

surf	100	sqc	0.0 0.0 1	0.70102		
surf	110	sqc	0.0 0.0 1	0.75182		
c e 1 1	11	100	fill Fuel_Rod	-100		% Pin lattice
c e 1 1	14	100	waterCOLD	100	-110	% Water in channel
c e 1 1	15	100	waterCOLD	110		

Analogicky je vytvořena geometrie pro dalších 8 profilací palivových souborů využitých v modelu. Jejich označení je dáno počtem Pyrex a IFBA proutků přítomných v dané profilaci. Soubory s primárními a sekundárními neutronovými zdroji (1PS 23P 28I a 6SS 112I) nebyly použity. Číselné označení jejich univers je od 100 do 1000 po stovkách. Pokud je u jednoho souboru více čísel označení, toto číslo udává orientaci palivového souboru vůči středu geometrie aktivní zóny.



Obr. 3.4 Možné profilace palivových souborů, šipka indikuje orientaci ke středu AZ[29]

Označení palivového souboru	Číslo universa	Úroveň obohacení
Klasický palivový soubor (Fuel)	100	2,35%
24P 88I	200	3,40%
12P 88I	300, 320, 330, 340	4,45%
24P 72I	400	4,45%
28I	500	2,35%
24P 44I	600	3,40%
24P 28I	700	3,40%
9P 88I	800, 820, 830, 840	4,45%
112I	900	4,45%
Geometrie souboru vyplněna vodou	1000	0%

Tab. 3.2 Číselné označení přiřazené k palivovým souborům

3.4.3 Geometrie aktivní zóny

Nejsložitějším geometrickým uspořádáním v modelu je konstrukce aktivní zóny, která je tvořena z palivových souborů podobně jako soubor je tvořen z palivových proutků. Pro tvorbu znovu využíváme příkazu *lat*, který vytvoří čtvercovou mříž o velikosti 17x17 prvků s roztečí 21,50364 cm.

Výpis kódu 3.9 Syntaxe příkazu lat pro jádro

lat zona 1 0.0 0.0 17 17 21.50364



Číslo	Popis	Rozměr (cm)
1	Proutková rozteč	1,25984
2	Mezera mezi soubory	0,10160
3	Rozměr souboru	21,40204
4	Souborová rozteč	21,50364

Obr. 3.5 Dodatečné rozměry nutné pro vytvoření geometrie jádra[29]

Aktivní zóna je tvořena ze 157 palivových souborů vyskládaných do kosočtverce. Matice o velikosti 17x17 prvků je vyplněna, podobně jako u palivových souborů, číselným označením palivových souborů nebo prázdnou pozicí vyplněnou vodou.

V ýpis	kõdu	3.10 1	Matice	17x17	prvkŭ	tvořen	á z uni	vers pa	ulivový	ch soul	oorŭ				
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	800	300	840	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	900	900	400	100	400	900	900	1000	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	900	900	700	100	700	100	700	900	900	1000	1000	1000
1000	1000	1000	900	500	600	100	200	100	200	100	600	500	900	1000	1000
1000	1000	900	900	600	100	200	100	200	100	200	100	600	900	900	1000
1000	1000	900	700	100	200	100	200	100	200	100	200	100	700	900	1000
1000	800	400	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	400	840
1000	320	100	700	100	200	100	200	100	200	100	200	100	700	100	330
1000	820	400	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	400	830
1000	1000	900	700	100	200	100	200	100	200	100	200	100	700	900	1000
1000	1000	900	900	600	100	200	100	200	100	200	100	600	900	900	1000
1000	1000	1000	900	500	600	100	200	100	200	100	600	500	900	1000	1000
1000	1000	1000	1000	900	900	700	100	700	100	700	900	900	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	900	900	400	100	400	900	900	1000	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	820	340	830	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Výpia kódu 2 10 Matian 17x17 palivových souborů

									_							
						3 9P88I	3 12P88I	3 9P88I								
				3 1121	3 112l	3 24P72I	1 Fuel	3 24P72l	3 112l	3 6SS11						
			3 1121	3 1121	2 24P28I	1 Fuel	2 1PS23	1 Feul	2 24P28I	3 1121	3 1121					
		3 112i	1 281	2 24P44I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P44I	1 281	2 1121				
	3 112I	3 1121	2 24P44I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P44I	3 1121	3 112l			
	3 112I	2 24P28I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P28I	3 112l			
3 9P88I	3 24P72l	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	3 24P72I	9P	3 2881									
3 12P88I	1 Fuel	2 24P28I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P28I	1 Fuel	12F	3 P88I	
3 9P88I	3 24P72l	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	3 24P72I	9P	3 2881									
	3 1121	2 24P28I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P28I	3 112l			
	3 112I	3 1121	2 24P44I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P44I	3 112l	3 112l			
		3 112i	1 281	2 24P44I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P88I	1 Fuel	2 24P44I	1 281	2 1121				
			3 1121	3 112i	2 24P28I	1 Fuel	2 1PS23	1 Feul	2 24P28I	3 1121	3 112i					
				3	3	3	1	3	3	3		07	značen	í	obo	hacení
				1121	1121	24P72I	Fuel	24P72I	1121	6SS11				1		2,35%
						3 9P88I	3 12P88I	3 9P88I				┝		2		3,40% 4,45%
							-	-								,

Obr. 3.6 Schéma aktivní zóny reaktoru AP1000

Jelikož se jedná o nejvyšší stupeň složitosti geometrie modelu, musí se určit parametry universa 0, do kterého vkládáme všechny ostatní universa, se kterými pracujeme. Nejdůležitějším parametrem je absolutní hranice, za kterou je prostor, který je pro model už irelevantní.

```
Výpis kódu 3.11 Definice hranic 3D modelu
surf HraniceModelu cylz 0.0 0.0 300.000 -100.0 530
cell 401 0 fill reactor -HraniceModelu
cell 402 0 outside HraniceModelu
```

Popis povrchů, oproti palivovým souborům, je o poznání složitější, jelikož obsahuje jak horizontální, tak axiální povrchy, které slouží při tvorbě reflektoru kolem aktivní zóny.

Výpis kódu 3.12 Definice horizontálních povrchů reflektoru

3 VÝPOČETNÍ KÓD A MODEL

surf	2999	c y l	0.0	0.0	161.2265
surf	3000	c y l	0.0	0.0	164.531
surf	3010	c y l	0.0	0.0	166.694
surf	3020	c y l	0.0	0.0	169.863
surf	3030	c y l	0.0	0.0	174.943
surf	3040	c y l	0.0	0.0	201.930
surf	3050	c y 1	0.0	0.0	222.250
surf	3060	sqc	0.0	0.0	280.000



Číslo	Popis	Rozměr (cm)
1	Vnitřní poloměr jádra	164,531
2	Vnější poloměr jádra	166,694
3	Vnitřní poloměr reaktorového sudu	169,863
4	Vnější poloměr reaktorového sudu	174,943
5	Vnitřní poloměr RPV	201,930
6	Vnější poloměr RPV	222,250
7	Venek modelu	280,000

Obr. 3.7 Výřez čtvrtiny jádra s popisem horizontální geometrie[29]

Výpis kódu 3.13 Definice axiálních povrchů reflektoru

% — Axiální hranice geometrie

surf modelBOT pz -100

surf modelTOP pz 530

% — Axiální geometrie

3 VÝPOČETNÍ KÓD A MODEL

surf	TOPrefTOP	pz	470
surf	TOPrefBOT	pz	455.03
surf	TOPnozzle	pz	445.77
surf	BOTnozzle	pz	-14.31
surf	BOTrefTOP	pz	-20.75
surf	BOTrefBOT	pz	-50



Obr. 3.8 Výřez poloviny jádra s popisem Axiální geometrie[29]

Využitím těchto definovaných povrchů je nyní možné nadefinovat buňky mezi nimi. Prakticky se v této části modeluje vše okolo aktivní zóny, která se následně pouze vyplní.

• ypn	5 KOUU J.17 D	chinee buile	K ICHCKIOI U			
% A>	ciální struk	tura zóny	jako celku			
c e 1 1	rzonaBOT	reactor	waterCOLD	-2999	modelBOT	-BOTrefBOT
c e 1 1	botref	reactor	SS304	-2999	BOTrefBOT	-BOTrefTOP
c e 1 1	botnoz	reactor	SS304_2	-2999	BOTrefTOP	-BOTnozzle
c e 1 1	rzonaMID	reactor	fill zona	-3000	BOTnozzle	-TOPnozzle
c e l l	topnoz	reactor	SS304_2	-2999	TOPnozzle	-TOPrefBOT
c e 1 1	topref	reactor	SS304	-2999	TOPrefBOT	-TOPrefTOP

c e 1 1	rzonaTOP	reactor	waterCOLD	-2999	TOPrefTOP	-modelTOP
c e 1 1	mezera11	reactor	waterCOLD	2999 -3000	modelBOT	-BOTnozzle
c e 1 1	mezera12	reactor	waterCOLD	2999 -3000	TOPnozzle	-modelTOP
% St	ruktura jedi	notlivých	částí reflektor	ru		
% A x	ialni strukt	ura Core	shroud			
c e 1 1	CshroudBOT	reactor	waterCOLD	3000 -3010	modelBOT	-BOTrefBOT
c e 1 1	CshroudMID	reactor	SS304	3000 -3010	BOTrefBOT	-TOPrefTOP
c e 1 1	CshroudTOP	reactor	waterCOLD	3000 -3010	TOPrefTOP	-modelTOP
c e 1 1	mezera2	reactor	waterCOLD	3010 -3020	modelBOT	-modelTOP
% Ax	iální strukt	ura reakt	orového sudu			
c e 1 1	CbarrelBOT	reactor	waterCOLD	3020 -3030	modelBOT	-BOTrefBOT
c e 1 1	CbarrelMID	reactor	SS304	3020 -3030	BOTrefBOT	-TOPrefTOP
c e 1 1	CbarrelTOP	reactor	waterCOLD	3020 -3030	TOPrefTOP	-modelTOP
c e 1 1	mezera3	reactor	waterCOLD	3030 -3040	modelBOT	-modelTOP
% Ax	iální strukt	ura RPV				
c e 1 1	RPVBOT	reactor	waterCOLD	3040 -3050	modelBOT	-BOTrefBOT
c e l l	RPVMID	reactor	SA508	3040 -3050	BOTrefBOT	-TOPrefTOP
c e 1 1	RPBTOP	reactor	waterCOLD	3040 -3050	TOPrefTOP	-modelTOP
% Ax	iální strukt	ura okoli	í za reflektoren	1		
c e 1 1	okoli	reactor	air	3050 -3060	modelBOT	-modelTOP
c e 1 1	vnejsek	reactor	air	3060	modelBOT	-modelTOP

3.4.4 Geometrie mřížek

Mřížky jsou komponenty, které drží palivové soubory pohromadě a představují překážku v cirkulaci chladiva, a proto nesmí v modelu chybět. Jelikož však informace o jejich rozměrech nebo geometrii není známa, je nutné za účelem získání jejich objemu vycházet ze znalosti materiálu, ze kterého jsou mřížky vytvořeny, a jejich váhy. V modelu existuje několik typů mřížek s rozdílnými výškami a materiály, ze kterých jsou vytvořeny, což znamená, že ideálně by bylo nutné získat přesnou váhu mřížky z daného materiálu a dané výšky. Jelikož se přesné váhy nevyskytují ve zdrojových dokumentech, bylo potřeba udělat určitá přiblížení, ze kterých se následně vycházelo.

číslo	výška mřížky (cm)	Název	Materiál
14	6,105	Top grid	Alloy 718
13	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
12	1,676	IMF	ZIRLO tm
11	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
10	1,676	IMF	ZIRLO tm
9	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
8	1,676	IMF	ZIRLO tm
7	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
6	1,676	IMF	ZIRLO tm
5	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
4	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
3	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
2	5,715	Intermediate spacer grid	ZIRLO tm
1	5,715	Bottom grid	Alloy 718

Tab. 3.3 přehled mřížek, IMF - Intermediate Mixing Flow, informace o materiálech mřížek vychází z [29]

První váha je 1169,23 g pro mřížku o výšce 5,715 cm ze Zircaloy a druhá je 390,136 g pro mřížku o výšce 3,358 cm z oceli Inconel 718. Pokud se uvažuje předpoklad, že hustoty Zircaloy a ZIRLOtm jsou ekvivalentní, pak první váha přesně odpovídá mřížkám v modelu. Pro získání objemu mřížek IMF je nutno získaný objem vynásobit výškovým poměrem. Analogicky, pro mřížky z oceli Inconel 718 se získaný objem z váhy násobí výškovými poměry pro potřebné mřížky z modelu. Tato zjednodušení negativně ovlivňují přesnost výsledků, ale přesná data týkající se mřížek nejsou veřejně dostupná. Samotné zakomponování mřížek do modelu se provádí formou homogenizace, která může být provedena dvěma způsoby. Z tohoto důvodu vznikají z jednoho modelu dva, které jsou následně mezi sebou porovnány.



Obr. 3.9 Axiální rozložení mřížek v reaktoru[29]

Prvním způsobem je globální homogenizace, při které se všechny mřížky v aktivní zóně homogenizují s vodou v celém objemu aktivní zóny. Prakticky to znamená, že objem 12 mřížek v aktivní zóně se homogenizuje s vodou v celé aktivní zóně, a z tohoto poměru se v materiálové sekci vytvoří směs materiálu mřížky a chladiva. Zbylé dvě mřížky mimo aktivní zónu se řeší identicky jako v druhé metodě homogenizace.

Výpis kódu 3.15 Definice materiálových směsí pro model s globální homogenizací

 mix
 waterMIX_GLOB
 rgb
 0
 255

 waterCOLD
 0.984048404

 clad
 0.015951596

 mix
 waterMIX_INC
 rgb
 0
 233

 waterCOLD
 0.941102609
 1nc718
 0.058897391

Druhou metodou je lokální homogenizace v místě mřížek. Namísto homogenizace celé aktivní zóny dochází pouze k homogenizaci určitých axiálních úseků, ve kterých je poměr materiálu mřížek ke chladivu značně vyšší než při globální homogenizaci. Umístění a výška těchto úseků odpovídá umístění mřížek a jejich výšce.

mix waterMIX_ZIRLO rgb 0 0 255 waterCOLD 0.870157464 clad 0.129842536 mix waterMIX_INC rgb 0 0 233 waterCOLD 0.941102609 Inc718 0.058897391

Výpis kódu 3.16 Definice materiálových směsí pro model s lokální homogenizací v místě mřížek

4 Výsledky

Výpočetní model byl vytvořen za účelem určení 2D rozložení výkonu v aktivní zóně reaktoru třetí generace. Konkrétním reaktorem byl vybrán AP1000 od firmy Westinghouse z důvodu dostatku dostupných podkladů k tomuto typu reaktoru. Během vývoje modelu došlo k rozhodnutí rozšířit model z 2D na 3D, i když tento krok nebyl součástí zadání této práce. Toto rozhodnutí umožnilo efektivnější porovnání výsledků této práce s jinými modely. Většina materiálových a geometrických dat vychází z informací uvedených v [29]. Výpočet byl prováděn pro stav reaktoru při nulovém výkonu ve stavu "cold state"s vyjmutými RCCA z aktivní zóny a teplotě nastavené na 300 K.



Obr. 4.1 Horizontální řez geometrií modelu s globální homogenizací mřížek

4 VÝSLEDKY



Obr. 4.2 Axiální řez geometrií modelu s globální homogenizací mřížek



Obr. 4.3 Horizontální řez geometrií modelu s lokální homogenizací v místě mřížek

4 VÝSLEDKY



Obr. 4.4 Axiální řez geometrií modelu s lokální homogenizací v místě mřížek

Finální data získaná z výpočetních modelů pro tuto práci lze rozdělit do čtyř úrovní. První z nich je úroveň k-eff modelu, druhou je rozložení výkonu na úrovni palivových souborů (k_q) . Třetí úrovní je rozložení výkonu na úrovni palivových souborů (k_q) . Třetí úrovní je rozložení výkonu na úrovni palivových proutků (k_k) a finální je axiální rozložení výkonu pro vybraný palivový soubor. Z důvodu velkého množství dat bylo vybráno pouze několik palivových souborů, pro které je v této práci vykresleno rozložení výkonu. Výsledky na úrovních palivových souborů a k-eff jsou porovnány s řešením uvedeným v referencích [29] a [28].

4.1 Multiplikační faktor k-eff

Tab. 4.1 Výledné hodonoty k-eff pro jednotlivé modely

Typ modelu	K-eff
Lokální homogenizace v místě mřížek	1,20539
Globální homogenizace	1,20511

								¹⁵⁵ 0,352	¹⁵⁶ 0,433	¹⁵⁷ 0,353						
						¹⁴⁸ 0,523	¹⁴⁹ 0,709	¹⁵⁰ 0,762	¹⁵¹ 0,950	¹⁵² 0,763	¹⁵³ 0,710	¹⁵⁴ 0,523				
					¹³⁹ 0,727	¹⁴⁰ 0,981	¹⁴¹ 0,930	¹⁴² 1,225	¹⁴³ 1,102	¹⁴⁴ 1,226	¹⁴⁵ 0,931	¹⁴⁶ 0,980	¹⁴⁷ 0,726			
				¹²⁸ 0,727	¹²⁹ 1,108	¹³⁰ 1,038	¹³¹ 1,302	¹³² 1,051	¹³³ 1,352	¹³⁴ 1,052	¹³⁵ 1,305	¹³⁶ 1,038	¹³⁷ 1,107	¹³⁸ 0,727		
1,4			¹¹⁵ 0,523	¹¹⁶ 0,981	¹¹⁷ 1,038	¹¹⁸ 1,347	¹¹⁹ 1,068	¹²⁰ 1,344	¹²¹ 1,075	¹²² 1,345	¹²³ 1,069	¹²⁴ 1,348	¹²⁵ 1,039	¹²⁶ 0,982	¹²⁷ 0,524	
1,3			¹⁰² 0,710	¹⁰³ 0,931	¹⁰⁴ 1,304	¹⁰⁵ 1,069	¹⁰⁶ 1,352	¹⁰⁷ 1,080	¹⁰⁸ 1,360	¹⁰⁹ 1,080	¹¹⁰ 1,352	¹¹¹ 1,070	¹¹² 1,306	¹¹³ 0,932	¹¹⁴ 0,712	
1,1	8 [.] 0,3	, 52	⁸⁸ 0,762	⁸⁹ 1,226	⁹⁰ 1,052	⁹¹ 1,345	⁹² 1,080	⁹³ 1,363	⁹⁴ 1,086	⁹⁵ 1,363	⁹⁶ 1,080	⁹⁷ 1,346	⁹⁸ 1,053	⁹⁹ 1,229	¹⁰⁰ 0,764	¹⁰¹ 0,353
0,9 0,8	7: 0,4	2 33	⁷³ 0,949	⁷⁴ 1,102	⁷⁵ 1,351	⁷⁶ 1,075	77 1,358	⁷⁸ 1,087	⁷⁹ 1,367	⁸⁰ 1,086	⁸¹ 1,359	⁸² 1,075	⁸³ 1,353	⁸⁴ 1,105	⁸⁵ 0,953	⁸⁶ 0,434
0,7	5 [.] 0,3	, 52	⁵⁸ 0,761	⁵⁹ 1,225	⁶⁰ 1,052	⁶¹ 1,344	⁶² 1,079	⁶³ 1,362	⁶⁴ 1,085	⁶⁵ 1,361	66 1,080	⁶⁷ 1,345	⁶⁸ 1,053	⁶⁹ 1,229	⁷⁰ 0,764	⁷¹ 0,353
0,3			44 0,709	45 0,930	46 1,302	47 1,067	48 1,350	⁴⁹ 1,079	⁵⁰ 1,357	⁵¹ 1,079	⁵² 1,351	⁵³ 1,069	⁵⁴ 1,305	55 0,932	⁵⁶ 0,712	
0,2			31 0,522	³² 0,979	³³ 1,036	³⁴ 1,345	³⁵ 1,068	³⁶ 1,344	³⁷ 1,074	³⁸ 1,344	³⁹ 1,068	40 1,347	41 1,039	42 0,983	⁴³ 0,524	
0,0				²⁰ 0,725	²¹ 1,105	²² 1,037	²³ 1,303	²⁴ 1,052	²⁵ 1,351	²⁶ 1,052	²⁷ 1,305	²⁸ 1,039	²⁹ 1,109	³⁰ 0,728		I
					11 0,726	¹² 0,980	¹³ 0,930	¹⁴ 1,227	¹⁵ 1,103	¹⁶ 1,226	¹⁷ 0,931	¹⁸ 0,983	¹⁹ 0,728		I	
						4 0,523	5 0,710	6 0,763	7 0,951	⁸ 0,763	9 0,711	¹⁰ 0,525		I		
								1 0,353	2 0,433	³ 0,353			I			

4.2 Rozložení relativního výkonu na úrovni palivových souborů $\mathbf{k}_{\mathbf{q}}$

Obr. 4.5 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro model s lokální homogenizací v místě mřížek

4 VÝSLEDKY

							¹⁵⁵ 0,353	¹⁵⁶ 0,434	¹⁵⁷ 0,353						
					¹⁴⁸ 0,524	¹⁴⁹ 0,712	¹⁵⁰ 0,765	¹⁵¹ 0,952	¹⁵² 0,763	¹⁵³ 0,709	¹⁵⁴ 0,522				
				¹³⁹ 0,728	¹⁴⁰ 0,983	¹⁴¹ 0,933	¹⁴² 1,228	¹⁴³ 1,105	¹⁴⁴ 1,225	¹⁴⁵ 0,930	¹⁴⁶ 0,979	¹⁴⁷ 0,725			
			¹²⁸ 0,727	¹²⁹ 1,107	¹³⁰ 1,040	¹³¹ 1,306	¹³² 1,055	¹³³ 1,352	¹³⁴ 1,052	¹³⁵ 1,302	¹³⁶ 1,036	¹³⁷ 1,103	¹³⁸ 0,725		
1,4		¹¹⁵ 0,525	116 0,983	¹¹⁷ 1,041	¹¹⁸ 1,350	¹¹⁹ 1,072	¹²⁰ 1,347	¹²¹ 1,076	¹²² 1, 34 4	¹²³ 1,068	¹²⁴ 1, 345	¹²⁵ 1,037	¹²⁶ 0,978	¹²⁷ 0,522	
1,3		¹⁰² 0,714	¹⁰³ 0,935	¹⁰⁴ 1,308	¹⁰⁵ 1,073	¹⁰⁶ 1,356	¹⁰⁷ 1,083	¹⁰⁸ 1,359	¹⁰⁹ 1,082	¹¹⁰ 1,351	¹¹¹ 1,068	¹¹² 1,302	¹¹³ 0,930	¹¹⁴ 0,710	
1,1	⁸⁷ 0,355	⁸⁸ 0,767	⁸⁹ 1,232	⁹⁰ 1,058	⁹¹ 1,352	⁹² 1,086	⁹³ 1,367	⁹⁴ 1,090	⁹⁵ 1,366	⁹⁶ 1,082	⁹⁷ 1,346	⁹⁸ 1,053	⁹⁹ 1,226	¹⁰⁰ 0,763	¹⁰¹ 0,353
0,9	⁷² 0,436	⁷³ 0,956	⁷⁴ 1,110	⁷⁵ 1,359	⁷⁶ 1,082	77 1,366	⁷⁸ 1,093	⁷⁹ 1,372	⁸⁰ 1,091	⁸¹ 1,363	⁸² 1,078	⁸³ 1,353	⁸⁴ 1,105	⁸⁵ 0,952	⁸⁶ 0,434
0,7	57 0,355	⁵⁸ 0,768	⁵⁹ 1,234	⁶⁰ 1,060	⁶¹ 1,354	⁶² 1,088	⁶³ 1,371	⁶⁴ 1,093	⁶⁵ 1,369	66 1,085	⁶⁷ 1,350	⁶⁸ 1,056	⁶⁹ 1,229	⁷⁰ 0,765	⁷¹ 0,354
0,3		44 0,715	45 0,938	46 1,314	47 1,078	⁴⁸ 1,363	⁴⁹ 1,089	⁵⁰ 1,368	⁵¹ 1,087	⁵² 1,359	⁵³ 1,074	⁵⁴ 1,308	⁵⁵ 0,935	⁵⁶ 0,713	
0,2		³¹ 0,528	³² 0,990	³³ 1,048	³⁴ 1,359	³⁵ 1,080	³⁶ 1,356	³⁷ 1,084	³⁸ 1,354	³⁹ 1,076	40 1,353	41 1,043	42 0,985	43 0,526	
0,0			20 0,733	21 1,117	22 1,049	²³ 1,316	²⁴ 1,063	²⁵ 1,363	²⁶ 1,061	²⁷ 1,313	²⁸ 1,044	²⁹ 1,111	³⁰ 0,729		1
				11 0,734	¹² 0,991	¹³ 0,940	¹⁴ 1,237	¹⁵ 1,114	¹⁶ 1,236	¹⁷ 0,938	¹⁸ 0,987	¹⁹ 0,730		1	
					4 0,528	5 0,717	6 0,771	7 0,959	⁸ 0,770	9 0,715	¹⁰ 0,526		I		
							1 0,356	2 0,438	³ 0,356						

Obr. 4.6 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro model s globální homogenizací mřížek



4.3 Rozložení relativního výkonu na úrovni palivových proutků k

Obr. 4.7 Rozložení výkonu v palivovém souboru číslo 79 (klasický palivový soubor), vlevo pro model s lokální a vpravo globální homogenizací



Obr. 4.8 Rozložení výkonu v palivovém souboru číslo 80 (24P 88I palivový soubor), vlevo pro model s lokální a vpravo globální homogenizací

4 VÝSLEDKY



Obr. 4.9 Rozložení výkonu v palivovém souboru číslo 1 (9P 88I palivový soubor), vlevo pro model s lokální a vpravo globální homogenizací

	1 1,5010	2 1,5802	3 1,8141	4 1,8783	5 1,8935	o 1,9006	7 1,9258	8 1,9286	9 1,9198	10 1,9261	11 1,9166	12 1,8993	13 1,8962	14 1,8814	15 1,8103	10 1,5790	17 1,4931	1,4	1 980 1	2 ,5863	3 1,8198	4 1,8760	5 1,8960	° 1,9029	7 1,9270	8 1,9286	9 1,9183	10 1,9300	11 1,9226	12 1,8964	13 1,8953	14 1,8750	15 1,8107	18 1,5873	17 1,4983
	18 1,3261	19 1,4690		21 1,5347	22 1,4968	23 1,3541	24 1,5244	25 1,5251	28 1,3651	27 1,5228	28 1,5300	29 1,3508	30 1,5000			33 1,4716	³⁴ 1,3291	1,3	8 267 1	19 ,4703			22 1,5021	23 1,3505	24 1,5304	28 1,5222	28 1,3676	27 1,5195	28 1,5291	29 1,3541	³⁰ 1,5025	31 1,5343	32 1,5208	33 1,4761	34 1,3306
	35	30	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	3	6	38	37	38	39	40	41	42	43	44	45	40	47	48	49	50	51
	1,3786	1,3606	1,2228	1,2516	1,1258	0	1,2814	1,1906	0	1,1874	1,2821	0	1,1316	1,2494	1,2220	1,3548	1,3740	1,3	743 1	1,3578	1,2243	1,2459	1,1263	0	1,2768	1,1843	0	1,1848	1,2756	0	1,1284	1,2506	1,2242	1,3535	1,3736
_	52	53	54	55	50	57	58	59	60	61	62	63	64	05	00	67	es	e	2	53	54	55	50	57	58	59	00	61	62	63	64	05	00	67	es
	1,3124	1,2529	1,1402	0	1,0203	1,0627	1,2383	1,2349	1,1689	1,2349	1,2343	1,0598	1,0194	0	1,1375	1,2597	1,3139	1,3	026 1	1,2463	1,1318	0	1,0222	1,0636	1,2376	1,2314	1,1776	1,2321	1,2388	1,0594	1,0225	0	1,1398	1,2543	1,3016
1,4	69	70	71	72	73	74	75	78	77	78	79	80	81	82	83	84	85	e	9	70	71	72	73	74	75	70	77	78	79	⁸⁰	81	82	83	84	85
	1,2150	1,1319	0,9610	0,9500	1,1249	1,1665	1,2309	1,1690	1,0279	1,1716	1,2345	1,1645	1,1326	0,9535	0,9581	1,1371	1,2175	1,2	182 1	1,1322	0,9555	0,9470	1,1265	1,1631	1,2364	1,1703	1,0276	1,1665	1,2344	1,1657	1,1255	0,9476	0,9578	1,1345	1,2172
1,3	88	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	8	e	87	88	89	90	91	92	93	94	95	90	97	98	99	100	101	102
	1,1254	0,9515	0	0,9239	1,0998	0	1,2355	0,9958	0	0,9943	1,2421	0	1,0986	0,9235	0	0,9484	1,1318	1,1	285 0),9506	0	0,9262	1,0996	0	1,2358	0,9959	0	0,9965	1,2356	0	1,0937	0,9274	0	0,9489	1,1308
	103 1,0699	104 1,0034	105 0,9416	108 1,0016	107 1,0873	108 1,1661	109 1,0260	110 1,0577	111 1,0145	112 1,0537	113 1,0240	114 1,1687	115 1,0863	110 1,0038	117 0,9456	118 1,0052	119 1,0747	1,0	¹³ 763 1	104 1,0050	105 0,9407	108 1,0019	107 1,0866	108 1,1660	109 1,0288	110 1,0480	111 1,0119	112 1,0496	113 1,0297	114 1,1669	115 1,0814	118 1,0090	117 0,9484	118 1,0080	119 1,0701
0,9	120	121	122	123	124	125	128	127	128	129	130	131	132	133	134	135	130	1:	20	121	122	123	124	125	128	127	128	129	130	131	132	133	134	135	138
	1,0054	0,9415	0,8259	0,9389	0,9601	0,8785	0,9964	1,0379	1,0157	1,0401	0,9901	0,8829	0,9621	0,9383	0,8278	0,9393	1,0075	1,0	063 0),9441	0,8257	0,9423	0,9572	0,8799	0,9912	1,0428	1,0149	1,0403	0,9942	0,8789	0,9563	0,9433	0,8264	0,9425	1,0064
0,8	137	138	139	140	141	142	143	144	145	148	147	148	149	150	151	152	153	1:	37	138	139	140	141	142	143	144	145	148	147	148	149	150	151	152	153
	0,9344	0,7914	0	0,8424	0,7852	0	0,8973	0,9598	0	0,9613	0,9024	0	0,7874	0,8365	0	0,7879	0,9323	0,9	343 0),7915	0	0,8417	0,7853	0	0,9024	0,9600	0	0,9602	0,9011	0	0,7902	0,8447	0	0,7912	0,9295
0,6	154 0,8918	155 0,8490	158 0,7497	157 0,8458	158 0,8432	159 0,7696	100 0,8770	161 0,9429	162 0,9398	163 0,9450	164 0,8812	185 0,7716	100 0,8497	167 0,8453	168 0,7509	169 0,8461	170 0,8848	0,8	54 854 0	155),8452	158 0,7525	157 0,8453	158 0,8460	159 0,7683	160 0,8790	161 0,9382	182 0,9376	163 0,9389	164 0,8800	185 0,7675	108 0,8446	167 0,8468	168 0,7538	169 0,8453	170 0,8914
0,5	171 0,8380	172 0,8495	173 0,8916	174 0,8557	175 0,8578	178 0,9069	177 0,8127	178 0,8948	179 0,9618	180 0,8956	181 0,8160	182 0,9061	183 0,8643	184 0,8565	185 0,8917	188 0,8449	187 0,8441	0,8	71 444 (172),8428	173 0,8862	174 0,8628	175 0,8631	176 0,9086	177 0,8151	178 0,8948	179 0,9637	180 0,8965	181 0,8109	182 0,8987	183 0,8580	184 0,8588	185 0,8904	188 0,8498	187 0,8443
0,3	188 0,7881	189 0,7744	190 0	191 0,7850	192 0,7960	193 0	194 0,8830	195 0,8218	198 0	197 0,8226	198 0,8852	199 0	200 0,7931	201 0,7905	202 0	203 0,7776	204 0,7825	0,7	18 878 0	189),7752	190 0	191 0,7851	192 0,7932	193 0	194 0,8865	195 0,8265	198 0	197 0,8235	198 0,8845	199 0	200 0,7936	201 0,7815	202 0	203 0,7725	204 0,7859
0,1	205	208	207	208	209	210	211	212	213	214	215	218	217	218	219	220	221	20	³⁵	208	207	208	209	210	211	212	213	214	215	218	217	218	219	220	221
	0,7322	0,7403	0,7425	0,7388	0,7684	0,7521	0,7879	0,7889	0,7699	0,7869	0,7886	0,7504	0,7691	0,7390	0,7408	0,7410	0,7337	0,7	346 0	0,7450	0,7409	0,7399	0,7690	0,7537	0,7889	0,7866	0,7729	0,7869	0,7882	0,7495	0,7707	0,7375	0,7402	0,7420	0,7273
0,0	222	223	224	225	228	227	228	229	230	231	232	233	234	235	238	237	238	2:	22	223	224	225	228	227	228	229	230	231	232	233	234	235	238	237	238
	0,6685	0,6813	0,7345	0	0,6955	0,6899	0,7344	0,7345	0,7754	0,7374	0,7287	0,6915	0,6923	0	0,7408	0,6849	0,6728	0,6	719 0	0,6807	0,7331	0	0,6960	0,6907	0,7284	0,7385	0,7724	0,7375	0,7317	0,6911	0,6964	0	0,7367	0,6792	0,6703
	239 0,6103	240 0,6187	241 0,6029	242 0,7083	243 0,6618	244 0	245 0,7308	248 0,6708	247 0	248 0,6726	249 0,7247	250 0	251 0,6566	252 0,7102	253 0,6017	254 0,6200	255 0,6139	2 0,6	143 C	240 0,6204	241 0,6013	242 0,7064	243 0,6593	244 0	245 0,7297	248 0,6731	247 0	248 0,6739	249 0,7337	250 0	251 0,6645	252 0,7031	253 0,5996	254 0,6223	255 0,6136
	258	257	258	259	260	281	282	283	284	265	268	267	288	289	270	271	272	20	58	257	258	259	280	281	262	263	284	265	288	287	268	269	270	271	272
	0,5473	0,6092	0,6472	0,6748	0,6881	0,6742	0,7080	0,7035	0,6773	0,7087	0,7090	0,6754	0,6868	0,6727	0,6438	0,6106	0,5451	0,5	453 (0,6056	0,6443	0,6762	0,6925	0,6673	0,7131	0,7097	0,6776	0,7044	0,7050	0,6717	0,6888	0,6783	0,6461	0,6132	0,5487
	273	274	275	278	277	278	279	280	281	282	283	284	285	288	287	288	289	2	73	274	275	278	277	278	279	280	281	282	283	284	285	288	287	288	289
	0,6887	0,7125	0,8229	0,8641	0,8798	0,8902	0,8979	0,9032	0,9034	0,9053	0,9033	0,8908	0,8875	0,8617	0,8233	0,7146	0,6887	0,6	876 0),7190	0,8289	0,8645	0,8876	0,8956	0,9027	0,9036	0,9043	0,9062	0,8979	0,8945	0,8807	0,8631	0,8276	0,7138	0,6917

Obr. 4.10 Rozložení výkonu v palivovém souboru číslo 2 (12P 88I palivový soubor), vlevo pro model s lokální a vpravo globální homogenizací

4.4 Axiální rozložení relativního výkonu pro vybraný palivový soubor

Pro zobrazení axiálního rozložení výkonu byl vybrán PS ve středu aktivní zóny s pořadovým označením 79. Axiální geometrie aktivní zóny byla rozdělena na 385 měřených úseků.



Obr. 4.11 Rozložení výkonu v aktivní zóně ve axiálním směru

4.5 Porovnání s referencí

Pro porovnání výsledků této práce byly vybrány reference [29], což je studie od polské skupiny, publikované v roce 2018, která v jejich práci řešila simulace reaktoru AP1000 v kódu Serpent, jejíž model a výsledky se snaží tato práce co nejpřesněji emulovat a [28] což je technická dokumentace k reaktoru AP1000 od jeho dodavatele Westinghouse.

Porovnání mezi referencemi a řešením v této práci bylo provedeno na úrovních výkonu palivových souborů a k-eff pro počátek palivového cyklu. Z důvodu neúplnosti referenčních dat byla nutná jejich symetrizace po obvodu aktivní zóny a až pak následné porovnání s výsledky z této práce. Z důvodu kompletní absence dat výkonů na úrovni palivových proutků v referenci [29] bylo porovnání výsledků na této úrovni provedeno pouze mezi modely z této práce. Všechny diference byly vypočtené dle následujícího vzorce:

$$\Delta = 1 - 100 \frac{Reference}{x} \tag{\%}$$

kde x je konkrétní porovnávané řešení.

Tab. 4.2 k-eff uvedená v referencích [29] a [28]

Reference	K-eff
Darnowski [29]	1,20536
TD Westinghouse [28]	1,20500

Verze	K-eff	Δ K-eff (pcm) [29]	Δ K-eff (pcm) [28]
Lokální hom.	1,20539	-3,0	-39
Globální hom.	1,20511	25,0	-11

Tab. 4.3 Řešení k-eff a difference uvedná v pcm vůči referencím [29] a [28]

							0,3526 0,3539 0,36%	0,4332 0,4347 0,34%	0,3530 0,3534 0,12%						
					0,5235 0,5248 0,25%	0,7099 0,7124 0,35%	0,7623 0,7654 0,40%	0,9502 0,9524 0,23%	0,7631 0,7636 0,07%	0,7103 0,7097 -0,08%	0,5230 0,5227 -0,06%				
				139 0,7274 0,7284 0,13%	0,9812 0,9831 0,9831 0,19%	0,9302 0,9333 0,33%	1,2256 1,2282 1,2282 0,21%	143 1,1029 1,1052 0,21%	144 1,2267 1,2256 -0,09%	0,9312 0,9302 -0,11%	0,9809 0,9790 -0,19%	0,7269 0,7250 -0,26%			
			0,7275 0,7279 0,06%	129 1,1080 1,1077 -0,03%	130 1,0380 1,0408 0,26%	131 1,3029 1,3069 0,31%	1,0519 1,0551 1,0551 0,30%	133 1,3520 1,3524 0,03%	1,0528 1,0528 1,0526 -0,02%	135 1,3051 1,3028 -0,17%	1,0387 1,0387 1,0369 -0,18%	137 1,1074 1,1033 -0,38%	0,7278 0,7252 0,7252 -0,35%		
1,4		0,5237 0,5255 0,33%	0,9818 0,9839 0,21%	117 1,0388 1,0410 0,22%	118 1,3474 1,3503 0,22%	1,0685 1,0726 0,37%	120 1,3448 1,3472 0,18%	1,0758 1,0764 0,06%	122 1,3459 1,3440 -0,13%	123 1,0699 1,0686 -0,12%	124 1,3483 1,3450 -0,24%	125 1,0393 1,0370 -0,22%	126 0,9826 0,9789 -0,37%	0,5246 0,5228 -0,35%	
1,3 1,2		0,7102 0,7102 0,7140 0,54%	0,9313 0,9353 0,44%	1,3043 1,3043 1,3084 0,31%	105 1,0691 1,0737 0,42%	1,3528 1,3568 1,3568 0,30%	1,0809 1,0836 0,24%	1,3600 1,3599 -0,01%	1,09 1,0805 1,0821 0,15%	110 1,3529 1,3519 -0,07%	111 1,0700 1,0687 -0,12%	112 1,3065 1,3023 -0,33%	0,9328 0,9308 -0,22%	0,7120 0,7101 -0,27%	
1,1 1,0	0,3528 0,3550 0,63%	0,7623 0,7676 0,68%	1,2260 1,2324 0,52%	90 1,0526 1,0583 0,54%	91 1,3457 1,3521 0,47%	1,0809 1,0864 0,51%	93 1,3635 1,3678 0,31%	1,0869 1,0905 0,33%	95 1,3631 1,3660 0,22%	98 1,0804 1,0829 0,23%	97 1,3469 1,3462 -0,05%	1,0539 1,0533 -0,06%	99 1,2292 1,2265 -0,21%	0,7648 0,7638 -0,12%	0,3538 0,3531 -0,19%
0,9 0,8	0,4331 0,4363 0,72%	0,9498 0,9564 0,70%	1,1022 1,1103 0,73%	75 1,3519 1,3598 0,58%	78 1,0753 1,0827 0,68%	77 1,3583 1,3663 0,59%	78 1,0871 1,0931 0,55%	1,3671 1,3724 0,39%	1,0867 1,0917 0,46%	81 1,3593 1,3632 0,29%	1,0759 1,0787 0,26%	1,3536 1,3537 0,00%	1,1056 1,1057 0,01%	0,9533 0,9523 -0,11%	0,4348 0,4346 -0,04%
0,7 0,6	0,3521 0,3551 0,85%	0,7682 0,7682 0,89%	1,2253 1,2347 0,76%	1,0522 1,0604 0,77%	1,3443 1,3546 0,76%	1,0797 1,0887 0,83%	1,3628 1,3717 0,65%	1,0859 1,0939 0,73%	1,3615 1,3693 0,57%	1,0801 1,0859 0,54%	87 1,3454 1,3501 0,35%	1,0538 1,0561 0,22%	1,2292 1,2291 -0,01%	0,7648 0,7654 0,08%	0,3536 0,3540 0,10%
0,0 0,4 0,3		0,7091 0,7155 0,89%	0,9300 0,9388 0,94%	1,3028 1,3141 0,86%	1,0677 1,0785 1,00%	1,3505 1,3634 0,95%	49 1,0791 1,0896 0,96%	1,3573 1,3682 0,79%	51 1,0792 1,0878 0,79%	1,3517 1,3597 0,58%	1,0691 1,0747 0,52%	1,3054 1,3087 0,26%	0,9327 0,9353 0,27%	0,7121 0,7131 0,13%	
0,2 0,1		0,5226 0,5283 1,09%	0,9797 0,9900 1,04%	1,0366 1,0485 1,13%	1,3457 1,3596 1,03%	1,0685 1,0800 1,07%	38 1,3443 1,3568 0,92%	1,0741 1,0844 0,95%	1,3441 1,3548 0,79%	39 1,0688 1,0766 0,73%	40 1,3478 1,3532 0,40%	41 1,0398 1,0435 0,36%	0,9831 0,9850 0,19%	0,5246 0,5260 0,27%	
0,0			0,7256 0,7338 1,13%	1,1052 1,1174 1,09%	1,0375 1,0494 1,14%	1,3039 1,3167 0,97%	1,0521 1,0635 1,07%	1,3514 1,3636 0,89%	1,0524 1,0618 0,88%	27 1,3053 1,3133 0,61%	1,0396 1,0448 0,49%	1,1092 1,1115 0,20%	0,7285 0,7295 0,13%		
				0,7264 0,7345 1,10%	0,9807 0,9911 1,04%	0,9307 0,9408 1,07%	1,2271 1,2379 0,87%	1,1036 1,1141 0,94%	1,2262 1,2361 0,81%	0,9317 0,9386 0,74%	0,9836 0,9872 0,36%	0,7288 0,7305 0,24%			
					0,5232 0,5289 1,08%	0,7 ⁵ 0,7173 1,00%	0,7 <mark>6</mark> 33 0,7711 1,01%	0,9513 0,9597 0,88%	0,7 <mark>6</mark> 31 0,7702 0,91%	0,7116 0,7158 0,58%	0,5250 0,5269 0,36%				
							0,3530 0,3561 0,88%	0,4337 0,4381 0,98%	0,3531 0,3561 0,85%			-			

Obr. 4.12 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro modely s lokální i globální homogenizací mřížek a diference v % mezi nimi

4 VÝSLEDKY

							0,436 0,456 4,4%	0,541 0,538 -0,6%	0,436 0,456 4,4%						
					0,561 0,62 9,5%	0,815 0,844 3,4%	0,913 0,874 -4,5%	0,957 0,918 -4,2%	0,913 0,874 -4,5%	0,815 0,844 3,4%	0,561 0,62 9,5%				
				139 0,63 0,723 12,9%	1,041 1,041 1,066 2,3%	141 1,026 0,994 -3,2%	142 1,168 1,144 -2,1%	143 1,161 1,117 -3,9%	144 1,168 1,144 -2,1%	145 1,026 0,994 -3,2%	1,041 1,041 1,066 2,3%	0,63 0,723 12,9%			
			128 0,63 0,723 12,9%	0,859 0,868 0,868 1,0%	1,033 1,033 1,018 -1,5%	1,203 1,203 1,195 -0,7%	132 1,113 1,094 -1,7%	133 1,254 1,239 -1,2%	1,113 1,113 1,094 -1,7%	135 1,203 1,195 -0,7%	1,033 1,033 1,018 -1,5%	0,859 0,868 0,868 1,0%	0,63 0,723 12,9%		
1,4		0,561 0,62 9,5%	116 1,041 1,066 2,3%	117 1,033 1,018 -1,5%	118 1,193 1,189 -0,3%	119 1,111 1,1 -1,0%	120 1,25 1,244 -0,5%	121 1,137 1,124 -1,2%	122 1,25 1,244 -0,5%	123 1,111 1,1 -1,0%	1,193 1,193 1,189 -0,3%	125 1,033 1,018 -1,5%	1,041 1,041 1,066 2,3%	0,561 0,62 9,5%	
1,3		0,815 0,844 3,4%	103 1,026 0,994 -3,2%	104 1,203 1,195 -0,7%	1,111 1,111 1,1 -1,0%	108 1,25 1,248 -0,2%	107 1,142 1,134 -0,7%	1,268 1,268 1,269 0,1%	109 1,142 1,134 -0,7%	110 1,25 1,248 -0,2%	1,111 1,111 1,1 -1,0%	112 1,203 1,195 -0,7%	113 1,026 0,994 -3,2%	0,815 0,844 3,4%	
1,1	0,436 0,456 4,4%	0,913 0,874 -4,5%	1,168 1,168 1,144 -2,1%	1,113 1,094 -1,7%	91 1,25 1,244 -0,5%	92 1,142 1,134 -0,7%	1,274 1,277 1,277 0,2%	94 1,154 1,151 -0,3%	1,274 1,277 1,277 0,2%	98 1,142 1,134 -0,7%	97 1,25 1,244 -0,5%	⁹⁸ 1,113 1,094 -1,7%	⁹⁹ 1,168 1,144 -2,1%	0,913 0,874 -4,5%	0,436 0,456 4,4%
0,9	72 0,541 0,538 -0,6%	0,957 0,918 -4,2%	74 1,161 1,117 -3,9%	75 1,254 1,239 -1,2%	78 1,137 1,124 -1,2%	77 1,268 1,269 0,1%	78 1,154 1,151 -0,3%	79 1,279 1,284 0,4%	80 1,154 1,151 -0,3%	1,268 1,269 0,1%	1,137 1,124 -1,2%	1,254 1,239 -1,2%	1,161 1,117 -3,9%	0,957 0,918 -4,2%	0,541 0,538 -0,6%
0,7	0,436 0,456 4,4%	0,913 0,874 -4,5%	⁵⁹ 1,168 1,144 -2,1%	1,113 1,094 -1,7%	61 1,25 1,244 -0,5%	62 1,142 1,134 -0,7%	1,274 1,277 1,277 0,2%	04 1,154 1,151 -0,3%	1,274 1,277 1,277 0,2%	08 1,142 1,134 -0,7%	67 1,25 1,244 -0,5%	1,113 1,094 -1,7%	1,168 1,144 -2,1%	0,913 0,874 -4,5%	71 0,436 0,456 4,4%
0,4		0,815 0,844 3,4%	45 1,026 0,994 -3,2%	1,203 1,195 -0,7%	1,111 1,1 1,1 -1,0%	1,25 1,248 -0,2%	1,142 1,134 -0,7%	1,268 1,269 0,1%	51 1,142 1,134 -0,7%	1,25 1,248 -0,2%	1,111 1,1 -1,0%	1,203 1,195 -0,7%	1,026 0,994 -3,2%	0,815 0,844 3,4%	
0,2		0,561 0,62 9,5%	1,041 1,066 2,3%	1,033 1,018 -1,5%	1,193 1,189 1,189 -0,3%	1,111 1,1 -1,0%	1,25 1,244 -0,5%	1,137 1,137 1,124 -1,2%	1,25 1,244 -0,5%	1,111 1,1 -1,0%	1,193 1,189 1,189 -0,3%	41 1,033 1,018 -1,5%	1,041 1,066 2,3%	0,561 0,62 9,5%	
0,0			0,63 0,723 12,9%	0,859 0,868 1,0%	1,033 1,018 -1,5%	1,203 1,195 -0,7%	1,113 1,094 -1,7%	1,254 1,254 1,239 -1,2%	1,113 1,094 -1,7%	27 1,203 1,195 -0,7%	1,033 1,018 -1,5%	0,859 0,868 0,868 1,0%	0,63 0,723 12,9%		
				0,63 0,723 12,9%	1,041 1,066 2,3%	1,026 0,994 -3,2%	1,168 1,168 1,144 -2,1%	1,161 1,161 1,117 -3,9%	18 1,168 1,144 -2,1%	17 1,026 0,994 -3,2%	1,041 1,066 2,3%	0,63 0,723 12,9%			
					0,561 0,62 9,5%	0,815 0,844 3,4%	0,913 0,874 -4,5%	0,957 0,918 -4,2%	0,913 0,874 -4,5%	0,815 0,844 3,4%	0,561 0,62 9,5%		•		
							0,436 0,456 4,4%	0,541 0,538 -0,6%	0,436 0,456 4,4%						

Obr. 4.13 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro reference [29] a [28] a diference v % mezi nimi

							155 0,436 0,2526	158 0,541 0,4222	0,436 0,2530						
						110	-23,6%	-24,9%	-23,5%	150	151	1			
					0,561 0,5235 -7,2%	0,815 0,7099 -14,8%	0,913 0,7623 -19,8%	0,957 0,9502 -0,7%	0,913 0,7631 -19,6%	0,815 0,7103 -14,7%	0,561 0,5230 -7,3%		_		
				0,63 0,7274 13,4%	140 1,041 0,9812 -6,1%	1,026 0,9302 -10,3%	1,168 1,168 1,2256 4,7%	143 1,161 1,1029 -5,3%	144 1,168 1,2267 4,8%	145 1,026 0,9312 -10,2%	148 1,041 0,9809 -6,1%	0,63 0,7269 13,3%			
			0,63 0,7275 13,4%	0,859 1,1080 22,5%	1,033 1,033 1,0380 0,5%	1,203 1,203 1,3029 7,7%	1,113 1,113 1,0519 -5,8%	1,254 1,254 1,3520 7,3%	134 1,113 1,0528 -5,7%	1,203 1,203 1,3051 7,8%	1,033 1,033 1,0387 0,6%	0,859 1,1074 22,4%	0,63 0,7278 13,4%		
1,4		0,561 0,5237 -7,1%	116 1,041 0,9818 -6,0%	117 1,033 1,0388 0,6%	1,193 1,3474 11,5%	119 1,111 1,0685 -4,0%	120 1,25 1,3448 7,0%	1,137 1,137 1,0758 -5,7%	122 1,25 1,3459 7,1%	123 1,111 1,0699 -3,8%	1,124 1,193 1,3483 11,5%	125 1,033 1,0393 0,6%	128 1,041 0,9826 -5,9%	0,561 0,5246 -6,9%	
1,3		0,815 0,7102 -14,8%	1,026 0,9313 -10,2%	1,203 1,203 1,3043 7,8%	1,105 1,111 1,0691 -3,9%	108 1,25 1,3528 7,6%	107 1,142 1,0809 -5,7%	1,268 1,268 1,3600 6,8%	109 1,142 1,0805 -5,7%	110 1,25 1,3529 7,6%	111 1,111 1,0700 -3,8%	1,203 1,203 1,3065 7,9%	113 1,026 0,9328 -10,0%	0,815 0,7120 -14,5%	
1,1	0,436 0,3528 -23,6%	0,913 0,7623 -19,8%	1,168 1,2260 4,7%	1,113 1,0526 -5,7%	91 1,25 1,3457 7,1%	⁹² 1,142 1,0809 -5,7%	1,274 1,3635 6,6%	94 1,154 1,0869 -6,2%	1,274 1,3631 6,5%	98 1,142 1,0804 -5,7%	97 1,25 1,3469 7,2%	1,113 1,0539 -5,6%	1,168 1,2292 5,0%	0,913 0,7648 -19,4%	0,436 0,3538 -23,2%
0,9	0,541 0,4331 -24,9%	0,957 0,9498 -0,8%	74 1,161 1,1022 -5,3%	75 1,254 1,3519 7,2%	78 1,137 1,0753 -5,7%	77 1,268 1,3583 6,6%	78 1,154 1,0871 -6,2%	1,279 1,279 1,3671 6,4%	80 1,154 1,0867 -6,2%	1,268 1,3593 6,7%	1,137 1,0759 -5,7%	1,254 1,3536 7,4%	1,161 1,1056 -5,0%	0,957 0,9533 -0,4%	0,541 0,4348 -24,4%
0,7	0,436 0,3521 -23,8%	0,913 0,7614 -19,9%	1,168 1,2253 4,7%	1,113 1,0522 -5,8%	1,25 1,3443 7,0%	⁶² 1,142 1,0797 -5,8%	1,274 1,3628 6,5%	1,154 1,0859 -6,3%	1,274 1,3615 6,4%	1,142 1,0801 -5,7%	1,25 1,3454 7,1%	1,113 1,0538 -5,6%	1,169 1,2292 5,0%	0,913 0,7648 -19,4%	0,436 0,3536 -23,3%
0,4		0,815 0,7091 -14,9%	1,026 0,9300 -10,3%	1,203 1,3028 7,7%	47 1,111 1,0677 -4,1%	1,25 1,3505 7,4%	1,142 1,0791 -5,8%	1,268 1,3573 6,6%	⁵¹ 1,142 1,0792 -5,8%	1,25 1,3517 7,5%	1,111 1,0691 -3,9%	1,203 1,3054 7,8%	1,026 0,9327 -10,0%	0,815 0,7121 -14,4%	
0,2		0,561 0,5226 -7,4%	1,041 0,9797 -6,3%	1,033 1,033 1,0366 0,3%	1,193 1,3457 11,3%	1,111 1,0685 -4,0%	1,25 1,3443 7,0%	1,137 1,0741 -5,9%	1,25 1,3441 7,0%	1,111 1,0688 -3,9%	1,193 1,3478 11,5%	1,033 1,0398 0,6%	1,041 0,9831 -5,9%	0,561 0,5246 -6,9%	
0,0			0,63 0,7256 13,2%	0,859 1,1052 22,3%	1,033 1,0375 0,4%	1,203 1,3039 7,7%	1,113 1,0521 -5,8%	1,254 1,3514 7,2%	1,113 1,0524 -5,8%	1,203 1,3053 7,8%	1,033 1,0396 0,6%	0,859 1,1092 22,6%	0,63 0,7285 13,5%		
				0,63 0,7264 13,3%	1,041 0,9807 -6,1%	1,026 0,9307 -10,2%	1,168 1,2271 4,8%	1,161 1,1036 -5,2%	1,18 1,168 1,2262 4,7%	1,026 0,9317 -10,1%	1,041 0,9836 -5,8%	0,63 0,7288 13,6%			
					0,561 0,5232 -7,2%	0, ⁵ 15 0,7102 -14,8%	0,913 0,7633 -19,6%	0,957 0,9513 -0,6%	0,913 0,7631 -19,6%	0,815 0,7116 -14,5%	0,561 0,5250 -6,9%		,		
							0,436 0,3530	0,541 0,4337	0,436 0,3531			1			



							155	150	457	1					
							0,436 0,3539 -23,2%	0,541 0,4347 -24,5%	0,436 0,3534 -23,4%						
					0,561 0,5248 -6,9%	0,815 0,7124 -14,4%	0,913 0,7654 -19,3%	0,957 0,9524 -0,5%	0,913 0,7636 -19,6%	0,815 0,7097 -14,8%	0,561 0,5227 -7,3%				
				0,63 0,7284 13,5%	140 1,041 0,9831 -5,9%	1,026 0,9333 -9,9%	1,168 1,168 1,2282 4,9%	143 1,161 1,1052 -5,0%	1,168 1,168 1,2256 4,7%	145 1,026 0,9302 -10,3%	148 1,041 0,9790 -6,3%	0,63 0,7250 13,1%			
			0,63 0,7279 13,4%	0,859 1,1077 22,5%	1,033 1,0408 0,7%	1,203 1,203 1,3069 8,0%	1,113 1,113 1,0551 -5,5%	1,254 1,254 1,3524 7,3%	1,113 1,113 1,0526 -5,7%	1,203 1,203 1,3028 7,7%	1,033 1,033 1,0369 0,4%	0,859 1,1033 22,1%	0,63 0,7252 13,1%		
1,4		0,561 0,5255 -6,8%	1,041 1,041 0,9839 -5,8%	117 1,033 1,0410 0,8%	1,18 1,193 1,3503 11,6%	1,119 1,111 1,0726 -3,6%	1,20 1,25 1,3472 7,2%	121 1,137 1,0764 -5,6%	122 1,25 1,3440 7,0%	1,111 1,111 1,0686 -4,0%	1,193 1,193 1,3450 11,3%	1,033 1,0370 1,0370 0,4%	1,041 1,041 0,9789 -6,3%	0,561 0,5228 -7,3%	
1,3		0,815 0,7140 -14,1%	103 1,026 0,9353 -9,7%	1,203 1,203 1,3084 8,1%	1,111 1,111 1,0737 -3,5%	106 1,25 1,3568 7,9%	107 1,142 1,0836 -5,4%	1,268 1,268 1,3599 6,8%	109 1,142 1,0821 -5,5%	110 1,25 1,3519 7,5%	1,111 1,111 1,0687 -4,0%	1,203 1,203 1,3023 7,6%	1,026 0,9308 -10,2%	0,815 0,7101 -14,8%	
1,1	0,436 0,3550 -22,8%	0,913 0,7676 -18,9%	1,168 1,2324 5,2%	1,113 1,0583 -5,2%	91 1,25 1,3521 7,5%	1,142 1,0864 -5,1%	1,274 1,3678 6,9%	94 1,154 1,0905 -5,8%	1,274 1,3660 6,7%	1,142 1,0829 -5,5%	1,25 1,3462 7,1%	1,113 1,0533 -5,7%	1,168 1,2265 4,8%	0,913 0,7638 -19,5%	0,436 0,3531 -23,5%
0,9	0,541 0,4363 -24,0%	0,957 0,9564 -0,1%	1,161 1,1103 -4,6%	1,254 1,3598 7,8%	1,137 1,0827 -5,0%	1,268 1,3663 7,2%	1,154 1,0931 -5,6%	1,279 1,279 1,3724 6,8%	80 1,154 1,0917 -5,7%	1,268 1,3632 7,0%	1,137 1,0787 -5,4%	1,254 1,3537 7,4%	1,161 1,1057 -5,0%	0,957 0,9523 -0,5%	0,541 0,4346 -24,5%
0,6	0,436 0,3551 -22,8%	0, ⁵⁸ 0,7682 -18,8%	1,168 1,2347 5,4%	1,113 1,0604 -5,0%	1,25 1,3546 7,7%	1,142 1,0887 -4,9%	1,274 1,3717 7,1%	1,154 1,0939 -5,5%	1,274 1,3693 7,0%	1,142 1,0859 -5,2%	1,25 1,3501 7,4%	1,113 1,0561 -5,4%	1,168 1,2291 5,0%	0,913 0,7654 -19,3%	0,436 0,3540 -23,2%
0,4		0,815 0,7155 -13,9%	1,026 0,9388 -9,3%	1,203 1,3141 8,5%	1,111 1,0785 -3,0%	1,25 1,3634 8,3%	1,142 1,0896 -4,8%	1,268 1,3682 7,3%	1,142 1,0878 -5,0%	1,25 1,3597 8,1%	1,111 1,0747 -3,4%	1,203 1,3087 8,1%	1,026 0,9353 -9,7%	0,815 0,7131 -14,3%	
0,2		0,561 0,5283 -6,2%	1,041 0,9900 -5,2%	1,033 1,0485 1,5%	1,193 1,3596 12,3%	1,111 1,0800 -2,9%	1,25 1,3568 7,9%	1,137 1,137 1,0844 -4,9%	1,25 1,3548 7,7%	1,111 1,0766 -3,2%	1,193 1,3532 11,8%	1,033 1,0435 1,0%	1,041 0,9850 -5,7%	0,561 0,5260 -6,6%	
0,0			0,63 0,7338 14,1%	0,859 1,1174 23,1%	1,033 1,0494 1,6%	1,203 1,3167 8,6%	1,113 1,0635 -4,7%	1,254 1,3636 8,0%	1,113 1,0618 -4,8%	1,203 1,3133 8,4%	1,033 1,0448 1,1%	0,859 1,1115 22,7%	0,63 0,7295 13,6%		
				0,63 0,7345 14,2%	1,041 0,9911 -5,0%	1,026 0,9408 -9,1%	1,168 1,2379 5,6%	1,161 1,1141 -4,2%	1,168 1,168 1,2361 5,5%	1,026 0,9386 -9,3%	1,041 0,9872 -5,5%	0,63 0,7305 13,8%			
					0,561 0,5289 -6,1%	0,815 0,7173 -13,6%	0,913 0,7711 -18,4%	0,957 0,9597 0,3%	0,913 0,7702 -18,5%	0,815 0,7158 -13,9%	0,561 0,5269 -6,5%				
							0,436 0,3561	0,541 0,4381	0,436 0,3561			-			



										-					
							0,456 0,3526 -29,3%	0,538 0,4332 -24,2%	0,456 0,3530 -29,2%						
					0,62 0,5235 -18,4%	0,844 0,7099 -18,9%	0,874 0,7623 -14,7%	0,918 0,9502 3,4%	0,874 0,7631 -14,5%	0,844 0,7103 -18,8%	0,62 0,5230 -18,5%				
				0,723 0,7274 0,6%	140 1,066 0,9812 -8,6%	0,994 0,9302 -6,9%	1,142 1,144 1,2256 6,7%	1,117 1,117 1,1029 -1,3%	1,144 1,144 1,2267 6,7%	0,994 0,9312 -6,7%	148 1,066 0,9809 -8,7%	0,723 0,7269 0,5%			
			0,723 0,7275 0,6%	0,868 1,1080 21,7%	1,018 1,018 1,0380 1,9%	1,195 1,195 1,3029 8,3%	1,094 1,094 1,0519 -4,0%	1,239 1,239 1,3520 8,4%	134 1,094 1,0528 -3,9%	1,195 1,195 1,3051 8,4%	1,018 1,018 1,0387 2,0%	0,868 1,1074 21,6%	0,723 0,7278 0,7278 0,7%		
1,4		0,62 0,5237 -18,4%	118 1,066 0,9818 -8,6%	117 1,018 1,0388 2,0%	1,189 1,189 1,3474 11,8%	119 1,1 1,0685 -2,9%	1,20 1,244 1,3448 7,5%	121 1,124 1,0758 -4,5%	1,22 1,244 1,3459 7,6%	123 1,1 1,0699 -2,8%	1,189 1,189 1,3483 11,8%	1,018 1,018 1,0393 2,1%	128 1,066 0,9826 -8,5%	0,62 0,5246 -18,2%	
1,3		0,844 0,7102 -18,8%	0,994 0,9313 -6,7%	1,195 1,3043 8,4%	105 1,1 1,0691 -2,9%	1,248 1,248 1,3528 7,7%	107 1,134 1,0809 -4,9%	1,269 1,3600 6,7%	109 1,134 1,0805 -5,0%	1,248 1,248 1,3529 7,8%	111 1,1 1,0700 -2,8%	1,195 1,195 1,3065 8,5%	0,994 0,9328 -6,6%	0,844 0,7120 -18,5%	
1,1	0,456 0,3528 -29,3%	0,874 0,7623 -14,6%	⁸⁹ 1,144 1,2260 6,7%	1,094 1,0526 -3,9%	91 1,244 1,3457 7,6%	92 1,134 1,0809 -4,9%	1,277 1,3635 6,3%	94 1,151 1,0869 -5,9%	1,277 1,3631 6,3%	98 1,134 1,0804 -5,0%	97 1,244 1,3469 7,6%	1,094 1,0539 -3,8%	1,144 1,2292 6,9%	0,874 0,7648 -14,3%	0,456 0,3538 -28,9%
0,9	0,538 0,4331 -24,2%	0,918 0,9498 3,3%	⁷⁴ 1,117 1,1022 -1,3%	1,239 1,3519 8,4%	78 1,124 1,0753 -4,5%	1,269 1,3583 6,6%	78 1,151 1,0871 -5,9%	79 1,284 1,3671 6,1%	80 1,151 1,0867 -5,9%	1,269 1,3593 6,6%	1,124 1,0759 -4,5%	1,239 1,3536 8,5%	1,117 1,1056 -1,0%	0,918 0,9533 3,7%	0,538 0,4348 -23,7%
0,6	0,456 0,3521 -29,5%	0,874 0,7614 -14,8%	1,144 1,2253 6,6%	1,094 1,0522 -4,0%	61 1,244 1,3443 7,5%	1,134 1,0797 -5,0%	1,277 1,3628 6,3%	1,151 1,0859 -6,0%	1,277 1,3615 6,2%	68 1,134 1,0801 -5,0%	1,244 1,3454 7,5%	1,094 1,0538 -3,8%	1,144 1,2292 6,9%	⁷⁰ 0,874 0,7648 -14,3%	71 0,456 0,3536 -28,9%
0,4		0,844 0,7091 -19,0%	0,994 0,9300 -6,9%	1,195 1,3028 8,3%	47 1,1 1,0677 -3,0%	1,248 1,3505 7,6%	1,134 1,0791 -5,1%	1,269 1,3573 6,5%	1,134 1,0792 -5,1%	1,248 1,3517 7,7%	53 1,1 1,0691 -2,9%	1,195 1,3054 8,5%	0, ⁵⁵ 0,994 0,9327 -6,6%	0,844 0,7121 -18,5%	
0,2		0,62 0,5226 -18,6%	32 1,066 0,9797 -8,8%	1,018 1,0366 1,8%	1,189 1,3457 11,6%	³⁵ 1,1 1,0685 -2,9%	1,244 1,3443 7,5%	³⁷ 1,124 1,0741 -4,6%	1,244 1,3441 7,4%	³⁹ 1,1 1,0688 -2,9%	1,189 1,3478 11,8%	1,018 1,0398 2,1%	1,066 0,9831 -8,4%	0,62 0,5246 -18,2%	
0,0			0,723 0,7256 0,4%	0,868 1,1052 21,5%	1,018 1,0375 1,9%	1,195 1,3039 8,4%	1,094 1,0521 -4,0%	1,239 1,3514 8,3%	28 1,094 1,0524 -4,0%	1,195 1,3053 8,4%	28 1,018 1,0396 2,1%	0,868 1,1092 21,7%	0,723 0,7285 0,8%		
				0,723 0,7264 0,5%	1,066 0,9807 -8,7%	0,994 0,9307 -6,8%	1,144 1,144 1,2271 6,8%	1,117 1,1036 -1,2%	1,144 1,2262 6,7%	0,994 0,9317 -6,7%	1,066 0,9836 -8,4%	0,723 0,7288 0,8%			
					0,62 0,5232 -18,5%	0,844 0,7102 -18,8%	0,874 0,7633 -14,5%	0,918 0,9513 3,5%	0,874 0,7631 -14,5%	0,844 0,7116 -18,6%	0,62 0,5250 -18,1%		1		
							0,456 0,3530 29,2%	0,538 0,4337 24.0%	0,456 0,3531 29.1%			1			

Obr. 4.16 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro referenci [29] a model s lokální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

							0,456 0,3539 -28,8%	0,538 0,4347 -23,8%	0,456 0,3534 -29,0%						
					0,62 0,5248 -18,1%	0,844 0,7124 -18,5%	0,874 0,7654 -14,2%	0,918 0,9524 3,6%	0,874 0,7636 -14,5%	0,844 0,7097 -18,9%	0,62 0,5227 -18,6%				
				0,723 0,7284 0,7%	140 1,066 0,9831 -8,4%	0,994 0,9333 -6,5%	142 1,144 1,2282 6,9%	143 1,117 1,1052 -1,1%	144 1,144 1,2256 6,7%	0,994 0,994 0,9302 -6,9%	148 1,066 0,9790 -8,9%	0,723 0,7250 0,3%			
			0,723 0,7279 0,7%	0,868 1,1077 21,6%	1,018 1,018 1,0408 2,2%	1,195 1,3069 8,6%	132 1,094 1,0551 -3,7%	1,239 1,239 1,3524 8,4%	134 1,094 1,0526 -3,9%	135 1,195 1,3028 8,3%	1,018 1,018 1,0369 1,8%	0,868 1,1033 21,3%	0,723 0,725 0,7252 0,3%		
1,4		0,62 0,5255 -18,0%	116 1,066 0,9839 -8,3%	117 1,018 1,0410 2,2%	1,189 1,189 1,3503 11,9%	119 1,1 1,0726 -2,6%	1,20 1,244 1,3472 7,7%	121 1,124 1,0764 -4,4%	1,224 1,244 1,3440 7,4%	123 1,1 1,0686 -2,9%	1,124 1,189 1,3450 11,6%	125 1,018 1,0370 1,8%	126 1,066 0,9789 -8,9%	127 0,62 0,5228 -18,6%	
1,3		0,844 0,7140 -18,2%	0,994 0,9353 -6,3%	1,194 1,195 1,3084 8,7%	105 1,1 1,0737 -2,5%	1,248 1,248 1,3568 8,0%	107 1,134 1,0836 -4,7%	1,269 1,3599 6,7%	1,139 1,134 1,0821 -4,8%	1,248 1,3519 7,7%	111 1,1 1,0687 -2,9%	112 1,195 1,3023 8,2%	0,994 0,9308 -6,8%	0,844 0,7101 -18,9%	
1,1	0,456 0,3550 -28,4%	0,874 0,7676 -13,9%	⁸⁹ 1,144 1,2324 7,2%	1,094 1,0583 -3,4%	91 1,244 1,3521 8,0%	92 1,134 1,0864 -4,4%	1,277 1,3678 6,6%	94 1,151 1,0905 -5,6%	1,277 1,3660 6,5%	1,134 1,0829 -4,7%	1,244 1,3462 7,6%	1,094 1,0533 -3,9%	1,144 1,2265 6,7%	0,874 0,7638 -14,4%	0,456 0,3531 -29,1%
0,9	0,538 0,4363 -23,3%	0,918 0,9564 4,0%	⁷⁴ 1,117 1,1103 -0,6%	1,239 1,3598 8,9%	78 1,124 1,0827 -3,8%	1,269 1,3663 7,1%	78 1,151 1,0931 -5,3%	79 1,284 1,3724 6,4%	1,151 1,0917 -5,4%	1,269 1,3632 6,9%	1,124 1,0787 -4,2%	1,239 1,3537 8,5%	1,117 1,1057 -1,0%	0,918 0,9523 3,6%	0,538 0,4346 -23,8%
0,7	0,456 0,3551 -28,4%	0,874 0,7682 -13,8%	1,144 1,2347 7,3%	1,094 1,0604 -3,2%	1,244 1,3546 8,2%	1,134 1,0887 -4,2%	1,277 1,3717 6,9%	1,151 1,0939 -5,2%	1,277 1,3693 6,7%	1,134 1,0859 -4,4%	1,244 1,3501 7,9%	1,094 1,0561 -3,6%	1,144 1,2291 6,9%	0,874 0,7654 -14,2%	0,456 0,3540 -28,8%
0,4		0,844 0,7155 -18,0%	0,994 0,9388 -5,9%	1,195 1,3141 9,1%	47 1,1 1,0785 -2,0%	1,248 1,3634 8,5%	49 1,134 1,0896 -4,1%	1,269 1,3682 7,2%	1,134 1,0878 -4,2%	1,248 1,3597 8,2%	53 1,1 1,0747 -2,4%	1,195 1,3087 8,7%	0,994 0,9353 -6,3%	0,844 0,7131 -18,4%	
0,2		0,62 0,5283 -17,4%	³² 1,066 0,9900 -7,7%	1,018 1,0485 2,9%	1,189 1,3596 12,5%	35 1,1 1,0800 -1,8%	1,244 1,3568 8,3%	1,124 1,0844 -3,7%	1,244 1,3548 8,2%	³⁹ 1,1 1,0766 -2,2%	1,189 1,3532 12,1%	41 1,018 1,0435 2,4%	42 1,066 0,9850 -8,2%	0,62 0,5260 -17,9%	
0,0			0,723 0,7338 1,5%	0,868 1,1174 22,3%	1,018 1,0494 3,0%	1,195 1,3167 9,2%	24 1,094 1,0635 -2,9%	1,239 1,3636 9,1%	1,094 1,0618 -3,0%	1,195 1,3133 9,0%	1,018 1,0448 2,6%	0,868 1,1115 21,9%	0,723 0,7295 0,9%		I
				0,723 0,7345 1,6%	1,066 0,9911 -7,6%	0,994 0,9408 -5,7%	14 1,144 1,2379 7,6%	1,117 1,117 1,1141 -0,3%	1,18 1,144 1,2361 7,5%	0,994 0,9386 -5,9%	1,066 0,9872 -8,0%	0,723 0,7305 1,0%			
					0,62 0,5289 -17,2%	0, ⁸ 44 0,7173 -17,7%	0, ⁶ 74 0,7711 -13,3%	0,918 0,9597 4,3%	0, ⁸ 74 0,7702 -13,5%	0,844 0,7158 -17,9%	0,62 0,5269 -17,7%		1		
							0,456 0,3561 -28.0%	0,538 0,4381 -22.8%	0,456 0,3561 -28.0%						

Obr. 4.17 Rozložení výkonu palivových souborů v aktivní zóně pro referenci [29] a model s globální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

	1,7376 1,7335 -0,23%	1,3262 1,3223 -0,29%	1,3883 1,3958 0,54%	1,4132 1,4128 -0,03%	1,4235 1,4195 -0,28%	1,4289 1,4314 0,17%	1,4677 1,4693 0,12%	1,4987 1,4981 -0,04%	1,5131 1,5190 0,39%	1,5708 1,5801 0,59%	1,6088 1,6025 -0,39%	1,6340 1,6252 -0,54%	1,6954 1,6897 -0,34%	1,7491 1,7587 0,55%	1,7628 1,7656 0,16%	1,6279 1,6256 -0,14%	1,6915 1,6962 0,28%
	1,9351 1,9425 0,38%	1,4438 1,4454 0,11%	1,3215 1,3224 0,07%	1,3102 1,3123 0,16%	1,2611 1,2667 0,44%	1,1351 1,1402 0,44%	1,2925 1,2976 0,39%	1,3149 1,3160 0,08%	1,1993 1,2014 0,17%	1,3744 1,3822 0,56%	1,4184 1,4212 0,19%	1,2912 1,2921 0,07%	1,4845 1,4897 0,35%	1,5778 1,5778 0,01%	1,6163 0,08%	1,6385 1,6462 0,47%	1,5827 1,5773 0,92%
	2,2064 2,2066 0,01%	1,4527 1,4564 0,26%	1,1837 1,1889 0,44%	1,2943 1,2946 0,02%	1,0688 1,0631 -0,35%	0,00%	1,1478 1,1434 -0,37%	1,0756 1,0737 -0,17%	0,00%	1,1321 1,1353 0,28%	1,2450 1,2421 -0,24%	0,00%	1,1751 1,1760 0,08%	1,3375 1,3384 0,07%	1,3573 1,3613 0,29%	1,5643 1,5649 0,04%	1,6520 1,6493 -0,16%
	2,1559 2,1627 0,31%	1,4240 1,4223 -0,12%	1,2962 1,2960 -0,02%	0,00%	1,0905 1,0903 -0,01%	0,9902 0,9856 -0,47%	1,1374 1,1345 -0,25%	1,1483 1,1502 0,34%	1,1148 1,1179 0,28%	1,2006 1,2073 0,55%	1,2354 1,2379 0,20%	1,0956 1,0909 -0,43%	1,0806 1,0859 0,48%	0,00%	1,2898 1,2928 0,24%	1,4617 1,4652 0,24%	1,5852 1,5832 -0,13%
1,4	2,0247 2,0213 -0,17%	1,3328 1,3344 0,13%	1,1273 1,1324 0,44%	1,0807 1,0890 0,76%	1,1167 1,1098 -0,62%	1,0809 1,0825 0,15%	1,1370 1,1355 -0,13%	1,0942 1,0957 0,14%	0,9874 0,9858 -0,16%	1,1551 1,1505 -0,41%	1,2452 1,2505 0,43%	1,2085 1,2078 -0,06%	1,1996 1,2037 0,34%	1,0409 1,0394 -0,14%	1,0857 1,0883 0,23%	1,3299 1,3327 0,21%	1,4784 1,4751 -0,09%
1,3	1,8772 1,8649 -0,66%	1,1799 1,1834 0,30%	0,00%	1,0101 1,0120 0,18%	1,0317 1,0307 -0,10%	0,00%	1,1430 1,1442 0,10%	0,9412 0,9373 -0,41%	0,00%	0,9887 0,9892 0,25%	1,2835 1,2574 -0,48%	0,00%	1,1682 1,1722 0,35%	1,0151 1,0160 0,09%	0,00%	1,1198 1,1200 0,01%	1,3679 0,35%
1,1 1,0	1,7089 1,7081 -0,05%	1,1428 1,1532 0,90%	1,0664 1,0662 -0,01%	0,9953 0,9898 -0,56%	1,0127 1,0097 -0,30%	1,0937 1,0914 -0,21%	0,9683 0,9653 -0,31%	0,9956 1,0012 0,56%	0,9791 0,9829 0,38%	1,0412 1,0464 0,50%	1,0496 1,0451 -0,43%	1,2275 1,2178 -0,79%	1,1608 1,1591 -0,14%	1,1078 1,1051 -0,22%	1,0748 1,0732 -0,13%	1,1828 1,1877 0,42%	1,3026 0,69%
0,9	1,5473 1,5453 -0,13%	1,0499 1,0464 -0,34%	0,8946 0,8976 0,34%	0,9224 0,9217 -0,08%	0,9484 0,9439 -0,27%	0,9482 0,9486 0,04%	0,9953 0,9905 -0,48%	1,0085 1,0016 -0,69%	0,9894 0,9823 -0,72%	1,0354 1,0278 -0,74%	1,0057 1,0036 -0,21%	0,9226 0,9231 0,06%	1,0314 1,0245 -0,67%	1,0391 1,0349 -0,40%	0,9389 0,9390 0,22%	1,0979 1,1010 0,28%	1,2152 1,2189 0,30%
0,8 0,7	1,3960 1,4005 0,32%	0,9022 0,9058 0,40%	0,00%	0,9018 0,8960 -0,65%	0,8523 0,8537 0,16%	0,00%	0,9994 0,99977 -0,16%	0,9429 0,9370 -0,63%	0,00%	0,9510 0,9506 -0,04%	0,9098 0,9060 -0,42%	0,00%	0,8427 0,8381 -0,55%	0,9175 0,9161 -0,15%	0,00%	0,9172 0,9172 0,00%	1,1280 1,1281 0,19%
0,6	1,2711 1,2705 -0,04%	0,8651 0,8656 0,05%	0,7604 0,7581 -0,30%	0,7921 0,7817 -1,33%	0,8144 0,8147 0,03%	0,8265 0,8313 0,58%	0,8771 0,8779 0,10%	0,9089 0,9036 -0,36%	0,9055 0,8987 -0,76%	0,9299 0,9239 -0,65%	0,8883 0,8844 -0,44%	0,7937 0,7955 0,22%	0,8912 0,8917 0,06%	0,9027 0,8975 -0,58%	0,8167 0,8108 -0,73%	0,9555 0,9650 0,99%	1,0677 1,0659 -0,17%
0,3	1,1418 1,1377 -0,36%	0,7908 0,7931 0,29%	0,7518 0,7486 -0,44%	0,7201 0,7170 -0,43%	0,7482 0,7511 0,65%	0,8198 0,8182 -0,20%	0,7489 0,7512 0,30%	0,8417 0,8406 -0,13%	0,9171 0,9183 0,13%	0,8837 0,8760 -0,88%	0,8198 0,8192 -0,08%	0,9313 0,9293 -0,22%	0,8932 0,8933 0,01%	0,8594 0,8526 -0,79%	0,8277 0,8310 0,40%	0,8993 0,8993 -1,00%	0,9954 0,9981 0,27%
0,3 0,2	1,0227 1,0274 0,46%	0,6791 0,6770 -0,30%	0,00%	0,6258 0,6221 -0,60%	0,6615 0,6601 -0,22%	0,00%	0,7833 0,7870 0,46%	0,7847 0,7562 -1,13%	0,00%	0,8096 0,8040 -0,69%	0,8859 0,8877 0,20%	0,00%	0,8128 0,8082 -0,53%	0,7108 0,7072 -0,51%	0,00%	0,7515 0,7487 -0,38%	0,9197 0,9231 0,37%
0,1	0,9119 0,9095 -0,26%	0,6348 0,6382 0,57%	0,5693 0,45%	0,5709 0,5704 -0,09%	0,6164 0,6203 0,62%	0,6333 0,6327 -0,09%	0,6872 0,6877 0,07%	0,7188 0,7195 0,41%	0,7248 0,7238 -0,14%	0,7625 0,7624 -0,01%	0,7852 0,7840 -0,14%	0,7681 0,7682 0,28%	0,7890 0,7870 -0,25%	0,7356 0,7382 0,35%	0,6832 0,6872 0,57%	0,7887 0,7869 0,02%	0,8596 0,8582 -0,15%
0,0	0,8020 0,7990 -0,37%	0,5884 0,5612 -0,92%	0,5498 0,55557 1,06%	0,00%	0,5451 0,5438 -0,25%	0,5713 0,5723 0,17%	0,6328 0,6328 0,00%	0,6659 0,11%	0,7207 0,7236 0,40%	0,7095 0,7113 0,25%	0,7307 0,7257 -0,69%	0,7070 0,7034 -0,52%	0,7250 0,7223 -0,37%	0,00%	0,7890 0,7854 -0,46%	0,7890 0,7642 -0,63%	0,8050 0,8064 0,17%
	0,6733 0,6723 -0,15%	0,4848 0,4826 -0,41%	0,4256 0,4286 0,71%	0,5141 0,5129 -0,24%	0,5051 0,5045 -0,13%	0,00%	0,6138 0,6163 0,41%	0,5950 0,5934 -0,27%	0,00%	0,6455 0,6411 -0,69%	0,7258 0,7239 -0,26%	0,00%	0,6926 0,6939 0,18%	0,7531 0,7603 0,95%	0,6671 -0,36%	0,7152 0,7123 -0,41%	0,7380 0,7371 0,14%
	0,4894 0,4890 -0,08%	0,4065 0,4034 -0,78%	0,4086 0,4072 0,15%	0,4470 0,4460 -0,23%	0,4850 0,4852 0,05%	0,5107 0,5031 -1,52%	0,5850 0,5662 0,22%	0,5934 0,5935 0,01%	0,5972 0,6010 0,63%	0,6489 0,6470 -0,28%	0,6817 0,6801 -0,23%	0,6752 0,6687 -0,98%	0,7191 0,7109 -1,15%	0,7243 0,7287 0,60%	0,7141 0,7158 0,24%	0,7097 0,7077 -0,29%	0,6561 0,6589 0,42%
	0,3593 0,3630 1,03%	0,3225 0,3258 1,00%	0,3933 0,3936 0,07%	0,4481 0,4499 0,41%	0,5099 0,5058 -0,81%	0,5641 0,5626 -0,26%	0,6193 0,6247 0,86%	0,6751 0,6771 0,30%	0,7194 0,7171 -0,31%	0,7640 0,7670 0,38%	0,8084 0,8055 -0,36%	0,8430 0,8436 0,07%	0,8742 0,8752 0,11%	0,8944 0,9001 0,64%	0,9040 0,9089 0,55%	0,8157 0,8171 0,17%	0,8230 0,8265 0,43%

Obr. 4.18 Rozložení výkonu v Palivovém souboru číslo 1 mezi modely s lokální a globální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

		1,5010 1,4980 -0,20%	1,5802 1,5863 0,38%	1,8141 1,8198 0,32%	1,8783 1,8760 -0,12%	1,8935 1,8960 0,13%	1,9008 1,9029 0,12%	1,9258 1,9270 0,06%	1,9286 1,9286 0,00%	1,9198 1,9183 -0,08%	1,9261 1,9300 0,20%	1,9166 1,9226 0,31%	1,8993 1,8964 -0,15%	1,8962 1,8953 -0,05%	1,8814 1,8750 -0,34%	1,8103 1,8107 0,02%	1,5790 1,5873 0,53%	1,4931 1,4983 0,35%
		1,3261 1,3267 0,04%	1,4690 1,4703 0,09%	1,5202 1,5211 0,06%	1,5347 1,5315 -0,21%	1,4968 1,5021 0,35%	1,3541 1,3505 -0,27%	1,5244 1,5304 0,39%	1,5251 1,5222 -0,19%	1,3651 1,3676 0,19%	1,5228 1,5195 -0,22%	1,5300 1,5291 -0,06%	1,3508 1,3541 0,24%	1,5000 1,5025 0,16%	1,5358 1,5343 -0,10%	1,5170 1,5208 0,26%	1,4716 1,4761 0,30%	1,3291 1,3306 0,11%
		1,3786 1,3743 -0,31%	1,3606 1,3578 -0,20%	1,2228 1,2243 0,12%	1,2516 1,2459 -0,46%	1,1258 1,1263 0,04%	0 0,00%	1,2814 1,2768 -0,36%	1,1906 1,1843 -0,53%	0 0,00%	1,1874 1,1848 -0,22%	1,2821 1,2756 -0,51%	0,00%	1,1316 1,1284 -0,28%	1,2494 1,2506 0,09%	1,2220 1,2242 0,18%	1,3548 1,3535 -0,10%	1,3740 1, 3736 -0,03%
		1,3124 1,3026 -0,75%	1,2529 1,2463 -0,53%	1,1402 1,1318 -0,74%	0,00%	1,0203 1,0222 0,19%	1,0627 1,0636 0,09%	1,2383 1,2376 -0,05%	1,2349 1,2314 -0,29%	1,1689 1,1776 0,74%	1,2349 1,2321 -0,23%	1,2343 1,2388 0,37%	1,0598 1,0594 -0,04%	1,0194 1,0225 0,30%	0,00%	1,1375 1,1398 0,21%	1,2597 1,2543 -0,43%	1,3139 1,3016 -0,94%
	1,4	1,2150 1,2182 0,26%	1,1319 1,1322 0,02%	0,9610 0,9555 -0,58%	0,9500 0,9470 -0,31%	1,1249 1,1265 0,15%	1,1885 1,1631 -0,29%	1,2309 1,2364 0,44%	1,1690 1,1703 0,11%	1,0279 1,0276 -0,03%	1,1716 1,1665 -0,44%	1,2345 1,2344 0,00%	1,1645 1,1657 0,10%	1,1326 1,1255 -0,63%	0,9535 0,9476 -0,63%	0,9581 0,9578 -0,03%	1,1371 1,1345 -0,23%	1,2175 1,2172 -0,03%
Я	1,2	1,1254 1,1285 0,28%	0,9515 0,9506 -0,10%	0,00%	0,9239 0,9262 0,25%	1,0998 1,0996 -0,02%	0,00%	1,2355 1,2358 0,03%	0,9958 0,9959 0,01%	0,00%	0,9943 0,9965 0,22%	1,2421 1,2356 -0,53%	0,00%	1,0986 1,0937 -0,45%	0,9235 0,9274 0,42%	0,00%	0,9484 0,9489 0,05%	1,1318 1,1308 -0,09%
	1,1 1.0	1,0899 1,0763 0,59%	1,0034 1,0050 0,16%	0,9418 0,9407 -0,10%	1,0016 1,0019 0,03%	1,0873 1,0866 -0,07%	1,1681 1,1660 -0,01%	1,0280 1,0288 0,27%	1,0577 1,0480 -0,92%	1,0145 1,0119 -0,25%	1,0537 1,0496 -0,39%	1,0240 1,0297 0,55%	1,1687 1,1669 -0,16%	1,0863 1,0814 -0,45%	1,0038 1,0090 0,52%	0,9456 0,9484 0,30%	1,0052 1,0080 0,28%	1.0747 1.0701 -0,43%
\mathbb{Z}	0,9	1,0054 1,0063 0,09%	0,9415 0,9441 0,28%	0,8259 0,8257 -0,03%	0,9389 0,9423 0,36%	0,9601 0,9572 -0,30%	0,8785 0,8799 0,16%	0,9964 0,9912 -0,53%	1,0379 1,0428 0,47%	1,0157 1,0149 -0,08%	1,0401 1,0403 0,02%	0,9901 0,9942 0,41%	0,8829 0,8789 -0,45%	0,9621 0,9563 -0,61%	0,9383 0,9433 0,53%	0,8278 0,8264 -0,17%	0,9383 0,9425 0,34%	1,0075 1,0064 -0,12%
	0,8 0,7	0,9344 0,9343 0,00%	0,7914 0,7915 0,00%	0,00%	0,8424 0,8417 -0,08%	0,7852 0,7853 0,01%	0,00%	0,8973 0,9024 0,56%	0,9598 0,9600 0,02%	0,00%	0,9613 0,9602 -0,11%	0,9024 0,9011 -0,14%	0,00%	0,7874 0,7902 0,36%	0,8365 0,8447 0,96%	0,00%	0,7879 0,7912 0,43%	0,9323 0,9295 -0,30%
	0,6	0,8918 0,8854 -0,72%	0,8490 0,8452 -0,45%	0,7497 0,7525 0,37%	0,8458 0,8453 -0,06%	0,8432 0,8460 0,34%	0,7696 0,7683 -0,17%	0,8770 0,8790 0,23%	0,9429 0,9382 -0,50%	0,9398 0,9376 -0,24%	0,9450 0,9389 -0,66%	0,8812 0,8800 -0,14%	0,7716 0,7675 -0,53%	0.8497 0,8446 -0,61%	0,8453 0,8468 0,18%	0,7509 0,7538 0,38%	0,8461 0,8453 -0,10%	0,8848 0,8914 0,74%
	0,5 0,4	0,8380 0,8444 0,76%	0,8495 0,8428 -0,79%	0,8916 0,8862 -0,61%	0,8557 0,8628 0,82%	0,8578 0,8631 0,62%	0,9089 0,9086 0,19%	0,8127 0,8151 0,29%	0,8948 0,8948 0,00%	0,9618 0,9637 0,20%	0,8956 0,8965 0,10%	0,8160 0,8109 -0,63%	0,9061 0,8987 -0,82%	0,8580 -0,73%	0,8585 0,8588 0,28%	0,8917 0,8904 -0,15%	0,8449 0,8498 0,58%	0,8441 0,8443 0,02%
Z	0,3	0,7881 0,7878 -0,04%	0,7744 0,7752 0,10%	0,00%	0,7850 0,7851 0,02%	0,7980 0,7932 -0,35%	0 0,00%	0,8830 0,8865 0,40%	0,8218 0,8265 0,57%	0 0,00%	0,8226 0,8235 0,10%	0,8852 0,8845 -0,07%	0,00%	0,7931 0,7936 0,07%	0,7905 0,7815 -1,16%	0,00%	0,7778 0,7725 -0,66%	0,7825 0,7859 0,43%
	0,1	0,7322 0,7346 0,33%	0,7403 0,7450 0,63%	0,7425 0,7409 -0,22%	0,7388 0,7399 0,15%	0,7884 0,7690 0,07%	0,7521 0,7537 0,22%	0,7879 0,7889 0,14%	0,7889 0,7866 -0,29%	0,7899 0,7729 0,39%	0,7869 0,7869 0,00%	0,7886 0,7882 -0,05%	0,7504 0,7495 -0,12%	0,7891 0,7707 0,21%	0,7390 0,7375 -0,21%	0,7408 0,7402 -0,08%	0,7410 0,7420 0,13%	0,7337 0,7273 -0,88%
	0,0	0,6695 0,6719 0,51%	0,6813 0,6807 -0,09%	0,7345 0,7331 -0,19%	0,00%	0,6955 0,6960 0,07%	0,6999 0,6907 0,12%	0,7344 0,7284 -0,81%	0,7345 0,7385 0,55%	0,7754 0,7724 -0,38%	0,7374 0,7375 0,01%	0,7287 0,7317 0,41%	0,6915 0,6911 -0,06%	0,6923 0,6964 0,60%	0 0,00%	0,7408 0,7367 -0,56%	0,6849 0,6792 -0,83%	0,6728 0,6703 -0,38%
		0,6103 0,6143 0,64%	0,6187 0,6204 0,27%	0,6029 0,6013 -0,26%	0,7083 0,7064 -0,26%	0,6593 -0,38%	0 0,00%	0,7308 0,7297 -0,14%	0,6731 0,35%	0 0,00%	0,6726 0,6739 0,20%	0,7247 0,7337 1,23%	0 0,00%	0,6586 0,6645 1,18%	0,7102 0,7031 -1,01%	0,6017 0,5996 -0,34%	0,6200 0,6223 0,36%	0,6139 0,6136 -0,05%
		0,5473 0,5453 -0,37%	0,6092 0,6056 -0,58%	0,6472 0,6443 -0,46%	0,6762 0,20%	0,6881 0,6925 0,63%	0,6742 0,6673 -1,04%	0,7080 0,7131 0,72%	0,7035 0,7097 0,87%	0,6773 0,6776 0,04%	0,7087 0,7044 -0,61%	0,7090 0,7050 -0,57%	0,6754 0,6717 -0,56%	0,6868 0,6888 0,29%	0,6727 0,6783 0,82%	0,6438 0,6461 0,35%	0,6108 0,6132 0,42%	0,5451 0,5487 0,66%
		0,6887 0,6876 -0,17%	0,7125 0,7190 0,90%	0,8229 0,8289 0,73%	0,8641 0,8645 0,04%	0,8798 0,8876 0,87%	0,8902 0,8956 0,61%	0,8979 0,9027 0,52%	0,9032 0,9036 0,04%	0,9034 0,9043 0,10%	0,9053 0,9062 0,11%	0,9033 0,8979 -0,60%	0,8908 0,8945 0,42%	0,8875 0,8807 -0,77%	0,8631 0,16%	0,8233 0,8276 0,52%	0,7148 0,7138 -0,12%	0,6887 0,6917 0,43%

Obr. 4.19 Rozložení výkonu v Palivovém souboru číslo 2 mezi modely s lokální a globální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

	0,7978	0,8227	0,8470	0,8672	0,8767	0,8835	0,8804	0,8799	0,8829	0,8790	0,8794	0,8835	0,8764	0,8663	0,8461	0,8218	0,7957
	0,7959	0,8227	0,8470	0,8632	0,8740	0,8840	0,8798	0,8805	0,8848	0,8815	0,8796	0,8823	0,8754	0,8681	0,8463	0,8214	0,7952
	-0,24%	0,00%	0,01%	-0,46%	-0,31%	0,06%	-0,06%	0,07%	0,20%	0,29%	0,02%	-0,14%	-0,11%	0,21%	0,03%	-0,05%	-0,07%
	0,8217	0,8660	0,8972	0,9311	0,9601	1,0047	0,9668	0,9671	1,0054	0,9656	0,9684	1,0027	0,9603	0,9315	0,9000	0,8649	0,8216
	0,8202	0,8661	0,9008	0,9303	0,9625	1,0045	0,9661	0,9647	1,0048	0,9694	0,9685	1,0018	0,9581	0,9330	0,9003	0,8652	0,8237
	-0,18%	0,01%	0,40%	-0,08%	0,25%	-0,02%	-0,08%	-0,25%	-0,06%	0,39%	0,01%	-0,11%	-0,23%	0,16%	0,04%	0,03%	0,27%
	0,8472	0,9031	0,9603	1,0387	1,0744	0	1,0616	1,0593	0	1,0607	1,0608	0	1,0721	1,0385	0,9617	0,8972	0,8468
	0,8493	0,9010	0,9559	1,0358	1,0718	0	1,0600	1,0589	0	1,0612	1,0621	0	1,0704	1,0381	0,9579	0,8990	0,8481
	0,25%	-0,23%	-0,46%	-0,29%	-0,24%	0,00%	-0,15%	-0,03%	0,00%	0,04%	0,13%	0,00%	-0,16%	-0,04%	-0,40%	0,20%	0,16%
	0,8677	0,9330	1,0383	0	1,1124	1,1058	1,0478	1,0455	1,0918	1,0472	1,0480	1,1044	1,1103	0	1,0378	0,9299	0,8643
	0,8669	0,9311	1,0377	0	1,1094	1,1058	1,0497	1,0443	1,0889	1,0481	1,0480	1,1052	1,1058	0	1,0378	0,9319	0,8664
	-0,09%	-0,20%	-0,05%	0,00%	-0,27%	-0,03%	0,18%	-0,11%	-0,27%	-0,11%	0,00%	0,08%	-0,41%	0,00%	-0,01%	0,21%	0,25%
1,4	0,8745	0,9605	1,0718	1,1090	1,0885	1,1163	1,0841	1,0673	1,1076	1,0654	1,0651	1,1169	1,0845	1,1092	1,0688	0,9597	0,8737
	0,8745	0,9627	1,0681	1,1103	1,0871	1,1140	1,0842	1,0608	1,1068	1,0635	1,0667	1,1152	1,0861	1,1090	1,0692	0,9599	0,8747
	0,00%	0,23%	-0,33%	0,12%	-0,13%	-0,21%	0,01%	-0,63%	-0,07%	-0,18%	0,15%	-0,16%	0,15%	-0,02%	0,04%	0,02%	0,11%
1,3	0,8835	1,0051	0	1,1052	1,1174	0	1,1188	1,1182	0	1,1199	1,1210	0	1,1164	1,1057	0	1,0009	0,8850
	0,8835	1,0027	0	1,1033	1,1154	0	1,1159	1,1171	0	1,1191	1,1172	0	1,1139	1,1053	0	1,0036	0,8830
	0,01%	-0,24%	0,00%	-0,17%	-0,17%	0,00%	-0,26%	-0,09%	0,00%	-0,07%	-0,34%	0,00%	-0,22%	-0,03%	0,00%	0,27%	-0,22%
1,1 1.0	0,8782 0,8785 0,04%	0,9672 0,9683 0,11%	1,0625 1,0587 -0,36%	1,0495 1,0486 -0,08%	1,0665 1,0654 -0,10%	1,1192 1,1173 -0,17%	1,0788 1,0778 0,10%	1,0799 1,0785 -0,13%	1,1259 1,1243 -0,14%	1,0815 1,0798 -0,18%	1,0788 1,0761 -0,24%	1,1209 1,1181 -0,25%	1,0688 1,0647 -0,39%	1,0496 1,0491 -0,05%	1,0615 1,0619 0,04%	0,9689 0,9686 -0,03%	0,8805 0,8807 0,03%
0,9	0,8782	0,9874	1,0597	1,0459	1,0648	1,1203	1,0800	1,0823	1,1297	1,0836	1,0822	1,1191	1,0637	1,0488	1,0615	0,9691	0,8811
	0,8812	0,9886	1,0618	1,0461	1,0657	1,1195	1,0781	1,0815	1,1268	1,0817	1,0782	1,1165	1,0650	1,0485	1,0606	0,9686	0,8816
	0,34%	0,13%	0,20%	0,02%	0,10%	-0,07%	-0,18%	-0,07%	-0,26%	-0,18%	-0,37%	-0,23%	0,13%	-0,01%	-0,09%	-0,05%	0,06%
0,8 0,7	0,8844 0,8863 0,21%	1,0033 1,0056 0,22%	0 0 0,00%	1,0940 1,0914 -0,24%	1,1067 1,1115 0,43%	0 0 0,00%	1,1302 1,1262 -0,35%	1,1295 1,1274 -0,18%	0 0 0,00%	1,1290 1,1300 0,09%	1,1251 1,1246 -0,05%	0 0 0,00%	1,1084 1,1083 0,00%	1,0910 1,0921 0,10%	0 0 0,00%	1,0040 1,0053 0,13%	0,8847 0,8851 0,05%
0,6	0,8814	0,9882	1,0835	1,0461	1,0648	1,1197	1,0784	1,0824	1,1293	1,0834	1,0798	1,1213	1,0641	1,0479	1,0595	0,9681	0,8811
	0,8836	0,9883	1,0808	1,0498	1,0659	1,1174	1,0817	1,0858	1,1282	1,0804	1,0806	1,1203	1,0632	1,0447	1,0610	0,9680	0,8812
	0,25%	0,21%	-0,25%	0,35%	0,10%	-0,21%	0,31%	0,31%	-0,10%	-0,27%	0,07%	-0,10%	-0,09%	-0,31%	0,15%	0,00%	0,01%
0,5 0,4	0,8800 0,8809 0,10%	0,9894 0,9700 0,05%	1,0824 1,0824 0,00%	1,0501 1,0518 0,16%	1,0873 1,0853 -0,19%	1,1189 1,1195 0,08%	1,0791 1,0762 -0,27%	1,0804 1,0808 0,02%	1,1243 1,1281 0,33%	1,0802 1,0782 -0,18%	1,0784 1,0748 -0,35%	1,1188 1,1158 -0,28%	1,0652 1,0647 -0,05%	1,0483 1,0503 0,18%	1,0640 1,0631 -0,09%	0,9681 0,9675 -0,07%	0,8782 0,8833 0,57%
0,3 0,2	0,8829 0,8855 0,29%	1,0053 1,0054 0,02%	0 0 0,00%	1,1050 1,1058 0,07%	1,1139 1,1154 0,14%	0 0 0,00%	1,1233 1,1208 -0,22%	1,1217 1,1184 -0,30%	0 0 0,00%	1,1203 1,1201 -0,02%	1,1198 1,1188 -0,09%	0 0 0,00%	1,1171 1,1134 -0,34%	1,1055 1,1053 -0,02%	0 0 0,00%	1,0025 1,0044 0,19%	0,8834 0,8842 0,09%
0,1	0,8764	0,9637	1,0721	1,1092	1,0881	1,1185	1,0842	1,0647	1,1090	1,0820	1,0653	1,1152	1,0874	1,1080	1,0727	0,9820	0,8751
	0,8780	0,9609	1,0713	1,1115	1,0888	1,1185	1,0851	1,0659	1,1105	1,0849	1,0687	1,1189	1,0862	1,1099	1,0712	0,9818	0,8767
	0,18%	-0,29%	-0,07%	0,20%	0,07%	0,00%	0,08%	0,12%	0,14%	0,27%	0,13%	0,33%	-0,12%	0,17%	-0,14%	-0,02%	0,18%
0,0	0,8675	0,9328	1,0377	0	1,1090	1,1049	1,0489	1,0445	1,0907	1,0457	1,0462	1,1048	1,1131	0	1,0404	0,9327	0,8649
	0,8671	0,9313	1,0384	0	1,1114	1,1058	1,0494	1,0492	1,0930	1,0504	1,0493	1,1051	1,1098	0	1,0381	0,9327	0,8666
	-0,05%	-0,16%	0,06%	0,00%	0,22%	0,09%	0,05%	0,46%	0,21%	0,44%	0,29%	0,03%	-0,30%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,20%
	0,8462	0,9018	0,9600	1,0411	1,0701	0	1,0812	1,0577	0	1,0583	1,0633	0	1,0698	1,0378	0,9593	0,8991	0,8452
	0,8487	0,8989	0,9589	1,0389	1,0744	0	1,0842	1,0600	0	1,0612	1,0598	0	1,0701	1,0352	0,9593	0,8990	0,8484
	0,29%	-0,32%	-0,12%	-0,21%	0,40%	0,00%	0,28%	0,22%	0,00%	0,28%	-0,33%	0,00%	0,04%	-0,26%	0,00%	0,00%	0,38%
	0,8208	0,8652	0,8999	0,9328	0,9623	1,0059	0,9698	0,9870	1,0041	0,9857	0,9684	1,0029	0,9626	0,9310	0,8985	0,8645	0,8207
	0,8254	0,8655	0,8988	0,9341	0,9605	1,0047	0,9689	0,9703	1,0064	0,9887	0,9700	1,0050	0,9617	0,9326	0,9004	0,8652	0,8218
	0,57%	0,04%	-0,13%	0,13%	-0,19%	-0,12%	-0,09%	0,34%	0,23%	0,10%	0,16%	0,21%	-0,09%	0,18%	0,21%	0,08%	0,13%
	0,7981	0,8217	0,8471	0,8814	0,8713	0,8834	0,8794	0,8788	0,8861	0,8799	0,8787	0,8848	0,8758	0,8670	0,8470	0,8195	0,7948
	0,7974	0,8228	0,8485	0,8656	0,8755	0,8876	0,8805	0,8801	0,8845	0,8787	0,8820	0,8847	0,8745	0,8658	0,8480	0,8222	0,7971
	0,16%	0,14%	0,17%	0,48%	0,48%	0,48%	0,12%	0,15%	-0,18%	-0,13%	0,38%	0,01%	-0,15%	-0,13%	0,12%	0,33%	0,30%

Obr. 4.20 Rozložení výkonu v Palivovém souboru číslo 79 mezi modely s lokální a globální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

	1,1634	1,1387	1,2596	1,2748	1,2678	1,2507	1,2621	1,2611	1,2473	1,2584	1,2599	1,2464	1,2636	1,2745	1,2559	1,1323	1,1585
	1,1615	1,1392	1,2558	1,2732	1,2646	1,2529	1,2613	1,2588	1,2488	1,2636	1,2620	1,2438	1,2639	1,2704	1,2520	1,1389	1,1567
	-0,17%	0,22%	-0,30%	-0,11%	-0,25%	0,18%	-0,06%	-0,18%	0,12%	0,41%	0,17%	-0,21%	0,02%	-0,33%	-0,31%	0,58%	-0,15%
	1,1420	1,1537	1,1373	1,1217	1,0641	0,9478	1,0653	1,0589	0,9461	1,0585	1,0632	0,9471	1,0637	1,1183	1,1342	1,1510	1,1384
	1,1413	1,1535	1,1383	1,1193	1,0651	0,9476	1,0648	1,0585	0,9422	1,0572	1,0625	0,9488	1,0613	1,1113	1,1369	1,1496	1,1397
	-0,06%	-0,02%	0,08%	-0,21%	0,10%	-0,01%	-0,04%	-0,23%	-0,42%	0,08%	-0,07%	0,18%	-0,23%	-0,63%	0,24%	-0,12%	0,11%
	1,2570	1,1400	0,9743	0,9473	0,8359	0	0,9264	0,8619	0	0,8599	0,9207	0	0,8354	0,9442	0,9713	1,1342	1,2543
	1,2585	1,1384	0,9721	0,9461	0,8334	0	0,9229	0,8628	0	0,8598	0,9233	0	0,8328	0,9438	0,9687	1,1320	1,2582
	-0,04%	-0,14%	-0,22%	-0,12%	-0,29%	0,00%	-0,38%	0,11%	0,00%	0,00%	0,28%	0,00%	-0,31%	-0,04%	-0,28%	-0,19%	0,15%
	1,2743	1,1179	0,9467	0	0,7732	0,7840	0,9191	0,9261	0,8828	0,9285	0,9180	0,7803	0,7702	0	0,9418	1,1097	1,2709
	1,2739	1,1143	0,9458	0	0,7694	0,7822	0,9203	0,9277	0,8819	0,9278	0,9203	0,7820	0,7709	0	0,9420	1,1128	1,2702
	-0,03%	-0,32%	-0,10%	0,00%	-0,49%	-0,24%	0,14%	0,18%	-0,11%	-0,10%	0,25%	0,22%	0,09%	0,00%	0,03%	0,28%	-0,06%
1,4	1,2680	1,0668	0,8365	0,7701	0,8326	0,7764	0,9001	0,8998	0,8069	0,9007	0,8997	0,7727	0,8331	0,7684	0,8354	1,0591	1,2622
	1,2681	1,0664	0,8360	0,7721	0,8355	0,7763	0,8992	0,9017	0,8063	0,9005	0,8994	0,7741	0,8306	0,7681	0,8316	1,0648	1,2612
	-0,15%	-0,04%	-0,06%	0,28%	0,35%	-0,01%	-0,10%	0,21%	-0,07%	-0,02%	-0,04%	0,17%	-0,30%	-0,04%	-0,45%	0,53%	-0,08%
1,3	1,2521	0,9491	0	0,7834	0,7773	0	0,8460	0,7986	0	0,8001	0,8444	0	0,7787	0,7827	0	0,9475	1,2485
	1,2497	0,9484	0	0,7832	0,7765	0	0,8452	0,7989	0	0,7989	0,8470	0	0,7749	0,7789	0	0,9470	1,2485
	-0,19%	-0,07%	0,00%	-0,03%	-0,11%	0,00%	-0,09%	0,03%	0,00%	-0,16%	0,31%	0,00%	-0,49%	-0,49%	0,00%	-0,05%	0,00%
1,1 1.0	1,2622 1,2641 0,15%	1,0682 1,0662 -0,19%	0,9235 0,9241 0,06%	0,9241 0,9218 -0,27%	0,8999 0,8991 -0,09%	0,8454 0,8468 0,15%	0,8355 0,8358 0,03%	0,9087 0,9092 0,05%	0,8873 0,8880 0,07%	0,9068 0,9084 0,18%	0,8360 0,8356 -0,04%	0,8464 0,8449 -0,18%	0,8970 0,8965 -0,06%	0,9205 0,9173 -0,35%	0,9234 0,9225 -0,10%	1,0647 1,0628 -0,18%	1,2578 1,2629 0,41%
0,9	1,2624	1,0572	0,8614	0,9309	0,9018	0,7977	0,9092	0,9684	0,9510	0,9643	0,9073	0,7986	0,9003	0,9266	0,8606	1,0548	1,2610
	1,2626	1,0578	0,8636	0,9287	0,9023	0,7998	0,9093	0,9643	0,9489	0,9663	0,9092	0,7953	0,9002	0,9257	0,8604	1,0543	1,2572
	0,01%	0,06%	0,26%	-0,23%	0,05%	0,26%	0,01%	-0,42%	-0,22%	0,21%	0,21%	-0,41%	-0,02%	-0,09%	-0,02%	-0,05%	-0,30%
0,8 0,7	1,2516 1,2449 -0,54%	0,9480 0,9448 -0,34%	0 0 0,00%	0,8830 0,8834 0,04%	0,8018 0,8037 0,24%	0 0 0,00%	0,8886 0,8864 -0,25%	0,9516 0,9504 -0,13%	0 0 0,00%	0,9523 0,9509 -0,15%	0,8861 0,8867 0,06%	0 0 0,00%	0,8037 0,8052 0,18%	0,8838 0,8797 -0,47%	0 0 0,00%	0,9423 0,9434 0,12%	1,2448 1,2428 -0,16%
0,6	1,2639	1,0574	0,8605	0,9292	0,9027	0,7978	0,9096	0,9867	0,9493	0,9604	0,9100	0,7950	0,9004	0,9275	0,8606	1,0538	1,2608
	1,2663	1,0582	0,8635	0,9299	0,9024	0,7968	0,9085	0,9873	0,9464	0,9675	0,9084	0,7980	0,9003	0,9274	0,8637	1,0577	1,2561
	0,19%	0,08%	0,34%	0,07%	-0,03%	-0,11%	-0,13%	0,05%	-0,30%	0,74%	-0,17%	0,37%	0,00%	-0,02%	0,36%	0,38%	-0,38%
0,5 0,4	1,2678 1,2664 -0,12%	1,0676 1,0679 0,03%	0,9228 0,9251 0,25%	0,9229 0,9220 -0,10%	0,9013 0,8993 -0,22%	0,8437 0,8470 0,39%	0,8377 0,8344 -0,40%	0,9077 0,9079 0,02%	0,8862 0,8879 0,19%	0,9062 0,9098 0,40%	0,8374 0,8393 0,23%	0,8459 0,8465 0,07%	0,8981 0,8998 0,18%	0,9218 0,9194 -0,26%	0,9229 0,9215 -0,15%	1,0621 1,0599 -0,21%	1,2593 1,2629 0,29%
0,3 0,2	1,2506 1,2518 0,10%	0,9517 0,9494 -0,24%	0 0 0,00%	0,7842 0,7803 -0,50%	0,7785 0,7792 0,08%	0 0 0,00%	0,8445 0,8458 0,15%	0,7972 0,7971 -0,01%	0 0 0,00%	0,7960 0,7979 0,23%	0,8459 0,8470 0,13%	0 0 0,00%	0,7730 0,7775 0,58%	0,7806 0,7789 -0,23%	0 0 0,00%	0,9439 0,9468 0,31%	1,2519 1,2482 -0,30%
0,1	1,2648	1,0649	0,8370	0,7720	0,8349	0,7772	0,8976	0,9003	0,8049	0,9003	0,8996	0,7758	0,8320	0,7676	0,8315	1,0643	1,2591
	1,2680	1,0643	0,8382	0,7713	0,8342	0,7775	0,8999	0,8994	0,8050	0,9004	0,8983	0,7769	0,8352	0,7687	0,8342	1,0618	1,2626
	0,25%	-0,06%	-0,10%	-0,09%	-0,08%	0,04%	0,26%	-0,09%	0,02%	0,01%	-0,14%	0,16%	0,39%	0,14%	0,32%	-0,26%	0,28%
0,0	1,2732	1,1185	0,9484	0	0,7728	0,7804	0,9198	0,9282	0,8834	0,9285	0,9226	0,7818	0,7691	0	0,9406	1,1124	1,2724
	1,2767	1,1148	0,9489	0	0,7707	0,7844	0,9231	0,9261	0,8808	0,9274	0,9199	0,7807	0,7701	0	0,9447	1,1133	1,2728
	0,27%	-0,34%	0,05%	0,00%	-0,27%	0,51%	0,36%	-0,23%	-0,29%	-0,12%	-0,29%	-0,11%	0,13%	0,00%	0,43%	0,08%	0,03%
	1,2541	1,1357	0,9738	0,9458	0,8358	0	0,9237	0,8613	0	0,8622	0,9232	0	0,8352	0,9433	0,9702	1,1324	1,2529
	1,2581	1,1390	0,9748	0,9460	0,8371	0	0,9237	0,8607	0	0,8628	0,9239	0	0,8329	0,9458	0,9701	1,1343	1,2537
	0,32%	0,28%	0,13%	0,05%	0,18%	0,00%	0,00%	-0,08%	0,00%	0,05%	0,08%	0,00%	-0,28%	0,26%	-0,01%	0,17%	0,07%
	1,1389	1,1531	1,1376	1,1158	1,0659	0,9487	1,0651	1,0548	0,9411	1,0531	1,0618	0,9475	1,0648	1,1135	1,1343	1,1508	1,1387
	1,1420	1,1573	1,1364	1,1178	1,0648	0,9500	1,0650	1,0559	0,9448	1,0568	1,0643	0,9471	1,0639	1,1145	1,1332	1,1492	1,1419
	0,27%	0,36%	-0,11%	0,18%	-0,10%	0,13%	-0,01%	0,11%	0,39%	0,33%	0,24%	-0,04%	-0,08%	0,09%	-0,10%	-0,12%	0,48%
	1,1606	1,1417	1,2568	1,2744	1,2655	1,2493	1,2613	1,2571	1,2482	1,2613	1,2824	1,2489	1,2656	1,2724	1,2549	1,1382	1,1610
	1,1633	1,1388	1,2614	1,2755	1,2658	1,2525	1,2635	1,2588	1,2474	1,2606	1,2830	1,2487	1,2645	1,2708	1,2542	1,1386	1,1538
	0,23%	-0,25%	0,37%	0,08%	0,03%	0,26%	0,18%	0,13%	-0,06%	-0,06%	0,04%	-0,02%	-0,09%	-0,12%	-0,06%	0,03%	-0,62%

Obr. 4.21 Rozložení výkonu v Palivovém souboru číslo 80 mezi modely s lokální a globální homogenizací mřížek a diference mezi nimi

Závěr

Hlavním cílem zadání této práce byl výpočet a pak následné grafické zobrazení rozložení výkonu v aktivní zóně reaktoru III+ generace. Následně došlo k porovnání získaných dat se daty získaných z referenčních řešení. Největší absolutní diference na úrovni výkonů palivových souborů mezi získanými daty z této práci a vybranou referencí se většinově pohybovala kolem 20-30%. Tato diference v drtivé většině případů týká palivových souborů na okraji aktivní zóny, které jsou nízkovýkonové, tudíž i pro malé změny vzniká velký relativní rozdíl. Průměrná celková diference v aktivní zóně se pohybuje okolo -2% až 3,5% pro různé kombinace řešení s porovnávanou referencí. Absolutní diference na úrovni proutkových výkonů mezi modely s globální a lokální homogenizací se pohybuje pod 1%. Diference mezi referencemi dosahuje až 13% a to v palivových souborech také na okrajích aktivní zóny s průměrnou diferencí 0,5%. Jmenovitě se jedná o PS 11, 19, 20, 128, 138, 139 a 147. V těchto stejných PS se modely v této práci svými výsledky velmi blíží referenci [29]. Diference kolem 13% pro řešení v této práci nebo v referenci [29] v porovnání s referencí [28] se dají vysvětlit vlivem rozdílných stavů, ve kterých se daný reaktor nachází. Modely v této práci a referenci [29] uvažují s reaktorem v chladném stavu, naopak reaktor v referenci [28] uvažuje teplý stav. Vliv nižších teplot a hustot v reaktoru je tedy možné vysvětlení těchto diferencí. Bohužel tento závěr není možno ověřit z důvodu absence dat pro studený stav v referenci [28]. Diference v PS 1,2,3 a dalších však musí být zapříčiněné ještě jiným způsobem. Jelikož se jedná o okraje aktivní zóny tyto diference by mohly naznačovat chybu v geometrii reflektoru, ale žádné chyby v modelu reflektoru nebyly nalezeny.

Pomocí axiálního rozložení výkonu v aktivní zóně jde velmi názorně vidět vliv mřížek v geometrii modelu. Vlivem mřížek dochází k potlačení výkonu až o 14% a mimo nich k jeho nárůstu až o 4% oproti řešení s globální homogenizací mřížek. Tyto nárůsty výkonu jsou důležitým faktorem v rámci bezpečného provozu reaktoru.

Všechny absolutní diference mezi hodnotami k-eff jsou menší než 40 pcm, což naznačuje, že oba modely s odlišnými způsoby homogenizace mřížek jsou i v nekalibrovaném stavu dostatečně přesné pro popsání rozložení výkonu v centru aktivní zóny. Pro vyřešení problému s diferencemi na okrajích aktivní zóny by byly nutné další analýzy a kalibrace. I přes jejich nedokonalost tyto modely je možné využít i pro jiné typy studií, například pro detailnější analýzu vlivu geometrie mřížek na výkon v aktivní zóně reaktoru.

Bibliografie

- ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR PRO ROK 2021 [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://eru.gov.cz/rocni-zprava-o-provozu-elektrizacnisoustavy-cr-pro-rok-2021.
- 2. WOFF, Petr. *Energetický mix celého světa, Evropy a Česka* [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.cenyenergie.cz/energeticky-mix-svet-evropa-cesko/#/promo-gas-mini.
- 3. Evolution of nuclear power systems from Generation I commercial reactors in the 1950s up to the future Generation IV systems which could be operational after about 2030 [online]. [B.r.]. [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/figure-4-9.html.
- GOLDBERG, Stephen M.; ROSNER, Robert. The History of Reactor Generations [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.amacad.org/publication/nuclear-reactorsgeneration-generation/section/5.
- 5. Základní typy jaderných reaktorů, Vývojové generace technologie jaderných reaktorů [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jadernaenergetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru.
- Vývoj jaderných reaktorů od počátků po současnost [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https: //www.aldebaran.cz/bulletin/2020_09_rek.php.
- CANDU: A Canadian Success Story [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://canadiangeographic. ca/articles/candu-a-canadian-success-story/.
- ŞAHIN, Sümer; ŞAHIN, Hacı Mehmet. Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, roč. 46, č. 57, s. 28936–28948 [cit. 2023-12-02]. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.182. HYDROGEN ENERGY SYSTEMS.
- VLČEK, Tomáš; SUCHÝ, Petr. Pohled do historie uranového hornictví a jaderné energetiky v České republice. *Bezpečnost jaderné energie*. 2012, roč. 20. ISSN 1210-7085.
- Spouštění jaderných bloků v Československu: seminář uspořádaný při příležitosti 80. narozenin Františka Hezoučkého. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2022. ISBN 978-80-261-1103-0.

- 11. Nuclear Power in Czech Republic [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic. aspx.
- SUK, Pavel. KS-150 československý těžkovodní reaktor [online]. 2016 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: https://blog.idnes.cz/pavelsuk/ks-150-ceskoslovensky-tezkovodni-reaktor. Bg16121229.
- ING. TOMÁŠ KOŘÍNEK, Ph.D. Trapný temelínský tendr 2009-2014: poučení z krizového vývoje [online].
 [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.teplator.cz/blog/trapny-temelinsky-tendr-2009-2014-pouceni-z-krizoveho-vyvoje/.
- 14. Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/aktualizace-vnitrostatniho-planu-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--277532/.
- 15. Small Modular Reactor (SMR) Regulators' Forum [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https: //www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/smr-regulators-forum.
- Plán pro malé a střední reaktory v České republice využití a hospodářský přínos [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2023/11/PlanSMR_graficke-zpracovani_CZ.pdf.
- 17. Status report 81 Advanced Passive PWR (AP 1000) [online]. [cit. 2024-05-04]. Tech. zpr. Dostupné z: https://aris.iaea.org/PDF/AP1000.pdf.
- Status Report 103 Advanced Power Reactor (APR1000) [online]. [cit. 2024-05-04]. Tech. zpr. Dostupné z: https://aris.iaea.org/PDF/APR1000.pdf.
- PUCHNAR, Jiří. V pořadí čtvrtý reaktor APR-1400 v Jižní Koreji zahájil komerční provoz [online]. 2024.
 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/v-poradictvrty-reaktor-apr-1400-v-jizni-koreji-zahajil-komercni-provoz.
- 20. *1.A EPR Design Description v3 PDF* [online]. 2007. Tech. zpr. Dostupné také z: https://www.scribd.com/document/407552161/1-A-EPR-Design-Description-v3-pdf.
- 21. Status report 78 The Evolutionary Power Reactor (EPR) [online]. [cit. 2024-05-04]. Tech. zpr. Dostupné z: https://aris.iaea.org/PDF/EPR.pdf.
- 22. AP1000 reactor coolant system [online]. [B.r.]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: https://www.researchgate. net/figure/e-AP1000-reactor-coolant-system_fig10_284913309.

- 23. AHN, Kwang-II; PARK, Soo-Yong; CHOI, Wonjun; KIM, Sung Joong. Best-practice severe accident analysis for the OPR1000 short-term SBO sequence using MELCOR2.2 and MAAP5. *Annals of Nuclear Energy*. 2021, roč. 160, s. 108350. ISSN 0306-4549. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1016/j. anucene.2021.108350.
- 24. APR1000 Advanced Power Reactor 1000 [online]. [cit. 2024-05-04]. Tech. zpr. Dostupné z: https: //aris.iaea.org/PDF/APR1000_20191130_R2.pdf.
- 25. APR1400 reactor coolant system configuration [online]. [B.r.]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: https: //www.researchgate.net/figure/APR1400-reactor-coolant-system-configuration-7_fig1_360878076.
- 26. EPR1200 Designed for Safety, Built for Performance [online]. [B.r.]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://czech-republic.edf.com/sites/czech_republic/files/2024-03/EPR1200% 20brochure_0.pdf.
- 27. AP1000 Design Control Document [online]. [cit. 2024-05-19]. Tech. zpr. Dostupné z: https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A444.pdf.
- AP1000 Design Control Document [online]. [cit. 2024-05-19]. Tech. zpr. Dostupné z: https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A445.pdf.
- 29. DARNOWSKI, Piotr; IGNACZAK, Patryk; OBRĘBSKI, Paweł; STĘPIEŃ, Michał; NIEWIŃSKI, Grzegorz. Simulations of the AP1000-based reactor core with SERPENT computer code. Archive of Mechanical Engineering [online]. 2018, roč. vol. 65, č. No 3, s. 295–325. Dostupné také z: http://journals.pan. pl/Content/108626/PDF/AME_124484.pdf.
- 30. ZHANG Liang, Ph.D. Evaluation of high power density annular fuel application in the Korean OPR-1000 reactor [online]. 2009. Dostupné také z: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/54480.
- 31. APR1400 DESIGN CONTROL DOCUMENT TIER 2 [online]. [cit. 2024-05-19]. Tech. zpr. Dostupné z: https://www.nrc.gov/docs/ML1822/ML18228A651.pdf.
- 32. THE DESIGN FEATURES OF THE ADVANCED POWER REACTOR 1400 [online]. [cit. 2024-05-19]. Tech. zpr. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20170809141411id_/https://www.kns. org/jknsfile/v41/JK0410995.pdf.
- ZEMAN, Michal. Optimalizace vyhořívajících absorbátorů pro reaktor EPR [online]. 2018. ISBN 978-80-261-0785-9.
 Dostupné také z: http://hdl.handle.net/11025/34350. Dipl. pr. Západočeská univerzita v Plzni.
- 34. APR1000 Advanced Power Reactor 1000 [online]. [cit. 2024-05-04]. Tech. zpr. Dostupné z: https: //aris.iaea.org/PDF/APR1000_20191130_R2.pdf.
- Serpent manual [online]. [B.r.]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: http://merlin.polymtl.ca/Serpent_ Dragon/Serpent_manual_2013.pdf.
- 36. Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code [online]. [B.r.]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: https://serpent.vtt.fi/serpent/.
- 37. LEPPÄNEN, Jaakko; PUSA, Maria; VIITANEN, Tuomas; VALTAVIRTA, Ville; KALTIAISENAHO, Toni. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. Annals of Nuclear Energy. 2015, roč. 82, s. 142–150. ISSN 0306-4549. Dostupné z DOI: https://doi.org/10.1016/ j.anucene.2014.08.024. Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2013, SNA + MC 2013. Pluri- and Trans-disciplinarity, Towards New Modeling and Numerical Simulation Paradigms.