



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČETNÍ ANALÝZA AKTIVNÍ ZÓNY JADERNÉHO REAKTORU VVER-440

COMPUTATION ANALYSIS OF THE VVER-440 NUCLEAR POWER REACTOR CORE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Máca

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Pavel Máca

ID: 195599

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Výpočetní analýza aktivní zóny jaderného reaktoru VVER-440

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Detailně se seznamte s aktivní zónou jaderného reaktoru VVER-440, konkrétně jaderných reaktorů Elektrárny Dukovany.
2. Osvojte si výpočetní reaktorově-fyzikální výpočetní program pro analýzy aktivní zóny.
3. Vytvořte model aktivní zóny a proveďte výpočet palivové kampaně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Lamarsh, Barata: Introduction to nuclear engineering
2. Vytiska, Burket, Hejzlar, Smola - diplomové a dizertační práce, VUT v Brně a ČVUT v Praze
3. Další dle doporučení vedoucího a konzultanta

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem rotace palivových kazet na optimalizaci aktivní zóny jaderného reaktoru VVER-440. První část této práce obsahuje stručný popis a projektové parametry jaderného reaktoru VVER-440. Dále je popsána aktivní zóna reaktoru tohoto typu provozovaného na jaderné elektrárně Dukovany s vývojem palivových vsázek a jejich optimalizacemi. Praktická část obsahuje porovnání palivové vsázky bez rotace kazet a s jejich rotací. Dále je praktická část věnovaná tzv. vícenásobné rotaci, která by v určitých ohledech mohla být vhodnější než současně používaná jednoduchá rotace.

Klíčová slova

VVER-440, aktivní zóna, palivová kazeta, Jaderná elektrárna Dukovany, MOBY-DICK

Abstract

This thesis is focused on effect of fuel assembly rotation on the reactor core optimization in VVER-440 reactor. In the first part of this thesis, a brief description and main parameters of VVER-440 reactor are introduced. Next chapter is focused on the Dukovany NPP reactor core design, where these reactors are in operation, together with evolution of used fuel assemblies and reactor core design optimization. The practical part of this thesis includes a comparison of reactor core design optimization with and without fuel assemblies' rotation. Furthermore, a so-called multiple rotation method is investigated, which could be more suitable compared to the currently used one.

Keywords

VVER-440, reactor core, fuel assembly, Dukovany NPP, MOBY-DICK

Bibliografická citace

MÁCA, Pavel. *Výpočetní analýza aktivní zóny jaderného reaktoru VVER-440* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149347>

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Pavel Máca</i>
VUT ID studenta:	<i>19559</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Výpočetní analýza aktivní zóny jaderného reaktoru VVER-440</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 21. května 2023

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. a současně panu Ing. Josefu Bajglovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a všem blízkým za trpělivost podporu během mého studia.

V Brně dne: 21. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	2
SEZNAM TABULEK.....	4
ÚVOD	5
1. REAKTORY VVER	6
1.1 REAKTORY VVER-440	6
1.2 POPIS AKTIVNÍ ZÓNY VVER-440	7
1.3 VÝVOJ PALIVOVÉ VSÁZKY NA EDU	12
1.3.1 <i>Původní palivový cyklus</i>	13
1.3.2 <i>Zdokonalený palivový cyklus</i>	14
1.4 PROJEKTOVÁNÍ PALIVOVÉ VSÁZKY	19
2. VÝVIN TEPLA V AKTIVNÍ ZÓNĚ.....	23
2.1 SOUČINITELÉ NEROVNOMĚRNOSTI VÝVINU TEPLA	24
2.2 ROZLOŽENÍ VÝKONU V KAZETĚ - NÁKLON VÝKONU.....	24
3. VÝPOČETNÍ METODY A VÝPOČETNÍ KÓDY	27
3.1 TRANSPORTNÍ ROVNICE.....	27
3.2 DETERMINISTICKÝ PŘÍSTUP.....	28
3.3 STOCHASTICKÝ	30
4. VÝPOČETNÍ KÓD MOBY-DICK.....	32
4.1 NEUTRONOVĚ-FYZIKÁLNÍ BLOK	32
4.2 TERMO-HYDRAULICKÝ BLOK	34
4.3 METODA ŘEŠENÍ VÝPOČTU	35
4.4 POPIS VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH SOUBORŮ	36
5. ANALÝZA NESYMETRICKÉHO VYHOŘÍVÁNÍ KAZET	40
5.1 ROTACE PALIVOVÝCH KAZET	42
5.1.1 <i>Vliv rotace na délku kampaně</i>	44
5.1.2 <i>Vliv rotace na relativní a lineární výkon</i>	46
5.2 VÍCENÁSOBNÁ ROTACE	67
5.2.1 <i>Vliv vícenásobné rotace na délku kampaně</i>	68
5.2.2 <i>Vliv vícenásobné rotace na rovnoměrnost vyhoření</i>	71
5.2.3 <i>Vliv vícenásobné rotace na relativní a lineární výkon</i>	79
6. ZÁVĚR.....	92
LITERATURA.....	94
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	96

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Reaktor VVER-440.....	8
Obrázek 1.2 Palivový proutek PK VVER-440.....	10
Obrázek 1.3 Palivová kazeta.....	12
Obrázek 1.4 Neprofilovaná palivová kazeta.....	13
Obrázek 1.5 Inovace palivových kazet.....	16
Obrázek 1.6 Palivová kazeta Gd-2M+ [5].....	18
Obrázek 1.7 Palivová kazeta PK3+ [5].....	18
Obrázek 1.8 Palivová kazeta Gd-2M++ [5].....	19
Obrázek 1.9 Kartogram s návrhem palivové vsázky EDU [5].....	22
Obrázek 2.1 Výtěžek štěpných produktů ²³⁵ U [6]	23
Obrázek 2.2 Rozložení výkonu v palivové kazetě [4].....	25
Obrázek 2.3 Rozdělení palivové kazety pomocí tří os [5].....	26
Obrázek 2.4 Grafické zobrazení relativního výkonu v palivové kazetě [4].....	26
Obrázek 3.1 Diskretizace spojitého spektra účinného průřezu [9].....	29
Obrázek 3.2 Porovnání metod a jejich efektivity [10].....	30
Obrázek 4.1 Porovnání dělení kazet [16].....	33
Obrázek 4.2 Popis vstupního souboru programu MOBY-DICK.....	38
Obrázek 4.3 Mapa kazety z výstupního souboru.....	39
Obrázek 5.1 Vliv okolních kazet na náklon výkonu.....	40
Obrázek 5.2 Relativní výkony palivových proutků z 28. kampaně.....	41
Obrázek 5.3 Kazeta bez rotace (nalevo), rotovaná kazeta (vpravo).....	43
Obrázek 5.4 Koncentrace kyseliny borité během 30. kampaně.....	44
Obrázek 5.5 Relativní výkony palivových proutků v celé aktivní zóně.....	48
Obrázek 5.6 Vyhořívající absorbátory čerstvé PK a PK druhým rokem.....	50
Obrázek 5.7 Vyhoření proutků 20. kampaně bez rotace.....	51
Obrázek 5.8 Vyhoření proutků 20. kampaně s rotací.....	51
Obrázek 5.9 Vyhoření proutků 21. kampaně bez rotace.....	52
Obrázek 5.10 Vyhoření proutků 21. kampaně s rotací.....	52
Obrázek 5.11 Vyhoření proutků 22. kampaně bez rotace.....	53
Obrázek 5.12 Vyhoření proutků 22. kampaně s rotací.....	53
Obrázek 5.13 Vyhoření proutků 23. kampaně bez rotace.....	54
Obrázek 5.14 Vyhoření proutků 23. kampaně s rotací.....	54
Obrázek 5.15 Vyhoření proutků 24. kampaně bez rotace.....	55
Obrázek 5.16 Vyhoření proutků 24. kampaně s rotací.....	55
Obrázek 5.17 Vyhoření proutků 25. kampaně bez rotace.....	56
Obrázek 5.18 Vyhoření proutků 25. kampaně s rotací.....	56

Obrázek 5.19 Vyhoření proutků 26. kampaně bez rotace.....	57
Obrázek 5.20 Vyhoření proutků 26. kampaně s rotací.....	57
Obrázek 5.21 Vyhoření proutků 27. kampaně bez rotace.....	58
Obrázek 5.22 Vyhoření proutků 27. kampaně s rotací.....	58
Obrázek 5.23 Vyhoření proutků 28. kampaně bez rotace.....	59
Obrázek 5.24 Vyhoření proutků 28. kampaně s rotací.....	59
Obrázek 5.25 Vyhoření proutků 29. kampaně bez rotace.....	60
Obrázek 5.26 Vyhoření proutků 29. kampaně s rotací.....	60
Obrázek 5.27 Vyhoření proutků 30. kampaně bez rotace.....	61
Obrázek 5.28 Vyhoření proutků 30. kampaně s rotací.....	61
Obrázek 5.29 Vyhoření proutků 31. kampaně bez rotace.....	62
Obrázek 5.30 Vyhoření proutků 31. kampaně s rotací.....	62
Obrázek 5.31 Vyhoření proutků 32. kampaně bez rotace.....	63
Obrázek 5.32 Vyhoření proutků 32. kampaně s rotací.....	63
Obrázek 5.33 Vyhoření proutků 33. kampaně bez rotace.....	64
Obrázek 5.34 Vyhoření proutků 33. kampaně s rotací.....	64
Obrázek 5.35 Vyhoření proutků 34. kampaně bez rotace.....	65
Obrázek 5.36 Vyhoření proutků 34. kampaně s rotací.....	65
Obrázek 5.37 Vyhoření proutků 35. kampaně bez rotace.....	66
Obrázek 5.38 Vyhoření proutků 35. kampaně s rotací.....	66
Obrázek 5.39 Rozdělení kazety na šestiny.....	68
Obrázek 5.40 Vyhoření proutků 25. kampaně s vícenásobnou rotací.....	88
Obrázek 5.41 Vyhoření proutků 26. kampaně s vícenásobnou rotací.....	88
Obrázek 5.42 Vyhoření proutků 27. kampaně s vícenásobnou rotací.....	89
Obrázek 5.43 Vyhoření proutků 28. kampaně s vícenásobnou rotací.....	89
Obrázek 5.44 Vyhoření proutků 29. kampaně s vícenásobnou rotací.....	90
Obrázek 5.45 Vyhoření proutků 30. kampaně s vícenásobnou rotací.....	90
Obrázek 5.46 Vyhoření proutků 31. kampaně s vícenásobnou rotací.....	91

SEZNAM TABULEK

5.1	Porovnání délky kampaní s rotací a bezrotace	45
5.2	Relativní výkony palivových proutků s rotací a bez rotace.....	47
5.3	Lineární výkony palivových proutků s rotací a bez rotace.....	49
5.4	Kazety zavezené ve 24. kampani	69
5.5	Kazety zavezené ve 25. kampani	69
5.6	Kazety zavezené ve 26. kampani	69
5.7	Kazety zavezené ve 27. kampani	70
5.8	Délka kampaní s rotací a s vícenásobnou rotací.....	70
5.9	Porovnání vyhoření kazety 6313.....	71
5.10	Porovnání vyhoření kazety 6326.....	72
5.11	Porovnání vyhoření kazety 6330.....	72
5.12	Porovnání vyhoření kazety 6354.....	72
5.13	Porovnání vyhoření kazety 6409.....	73
5.14	Porovnání vyhoření kazety 6417.....	73
5.15	Porovnání vyhoření kazety 6426.....	73
5.16	Porovnání vyhoření kazety 6430.....	74
5.17	Porovnání vyhoření kazety 6439.....	74
5.18	Porovnání vyhoření kazety 6509.....	74
5.19	Porovnání vyhoření kazety 6513.....	75
5.20	Porovnání vyhoření kazety 6526.....	75
5.21	Porovnání vyhoření kazety 6528.....	75
5.22	Porovnání vyhoření kazety 6535.....	76
5.23	Porovnání vyhoření kazety 6539.....	76
5.24	Porovnání vyhoření kazety 6545.....	76
5.25	Porovnání vyhoření kazety 6604.....	77
5.26	Porovnání vyhoření kazety 6609.....	77
5.27	Porovnání vyhoření kazety 6611.....	77
5.28	Porovnání vyhoření kazety 6621.....	78
5.29	Porovnání vyhoření kazety 6625.....	78
5.30	Porovnání vyhoření kazety 6626.....	78
5.31	Porovnání vyhoření kazety 6649.....	79
5.32	Porovnání vyhoření kazety 6654.....	79
5.33	Relativní výkony kazet zavezených ve 24. kampani v průběhu let.....	80
5.34	Relativní výkony kazet zavezených ve 25. kampani v průběhu let.....	81
5.35	Relativní výkony kazet zavezených ve 26. kampani v průběhu let.....	82
5.36	Relativní výkony kazet zavezených ve 27. kampani v průběhu let.....	83
5.37	Lineární výkony kazet zavezených ve 24. kampani v průběhu let.....	84
5.38	Lineární výkony kazet zavezených ve 25. kampani v průběhu let.....	85
5.39	Lineární výkony kazet zavezených ve 26. kampani v průběhu let.....	86
5.40	Lineární výkony kazet zavezených ve 27. kampani v průběhu let.....	87

ÚVOD

Jaderná elektrárna Dukovany je se svými čtyřmi výrobními bloky obsahující tlakovodní reaktory typu VVER-440 v provozu již od roku 1985. Za tuto dlouhou provozní dobu se podařilo inovovat většinu parametrů těchto bloků díky neustálým modernizacím a optimalizacím jak v primární, tak sekundární části elektrárny, a to zejména za intenzivního využití projektových rezerv. Jedna z klíčových částí primárního okruhu, která byla a stále je podstatně vylepšována, je optimalizace palivového cyklu. Na optimalizaci palivového cyklu nebyl zpočátku kladen velký důraz, i přes její značný význam na efektivitě a ekonomičnosti provozu při současném dodržení provozních a bezpečnostních limitů. Jedním z klíčových důvodů byly chybějící provozní zkušenosti a nedostatek výpočetního výkonu. Postupem času se však způsob zavážení aktivní zóny a množství obměňovaného paliva výrazně změnilo. Také samotné palivové kazety byly postupem času upravovány a optimalizovány. Výsledkem optimalizovaného palivového cyklu je dosažení vyššího vyhoření a tedy mnohem efektivnějšího využití jaderného paliva. Zásadní roli zde hrají především výpočetní výkony počítačů, které se oproti dřívějším mnohonásobně navýšily a umožnili tak dokonalejší analýzu aktivní zóny v kratším čase a s vyšší přesností. Za dobu své existence byly výpočetní kódy významně vylepšeny, optimalizovány a doplněny o další funkce a moduly, které napomáhají při výpočtech aktivní zóny.

1. REAKTORY VVER

Jako reaktory typu VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) jsou označovány tlakovodní reaktory takzvané východní koncepce. Tlakovodní reaktory využívají chemicky upravenou lehkou vodu s příměsí kyseliny borité. Vývoj reaktorů VVER vznikl v bývalém Sovětském svazu, v současném Rusku. První reaktor typu VVER byl spuštěn v Novovoronežské jaderné elektrárně. Elektrický výkon bloku dosahoval 210 MW. Připojení k elektrické síti proběhlo koncem roku 1964. Později byl spuštěn reaktor s elektrickým výkonem 365 MW, který byl následován reaktorem VVER-440, což byl první reaktor typu VVER sériové výroby. Další reaktory s pokročilejšími bezpečnostními systémy a vyššími výkony následovaly, až do současné verze reaktoru VVER-1200, zahrnující moderní pasivní systémy. Zdroje informací pro tuto kapitolu jsou [1], [2], [3], [4] a [5].

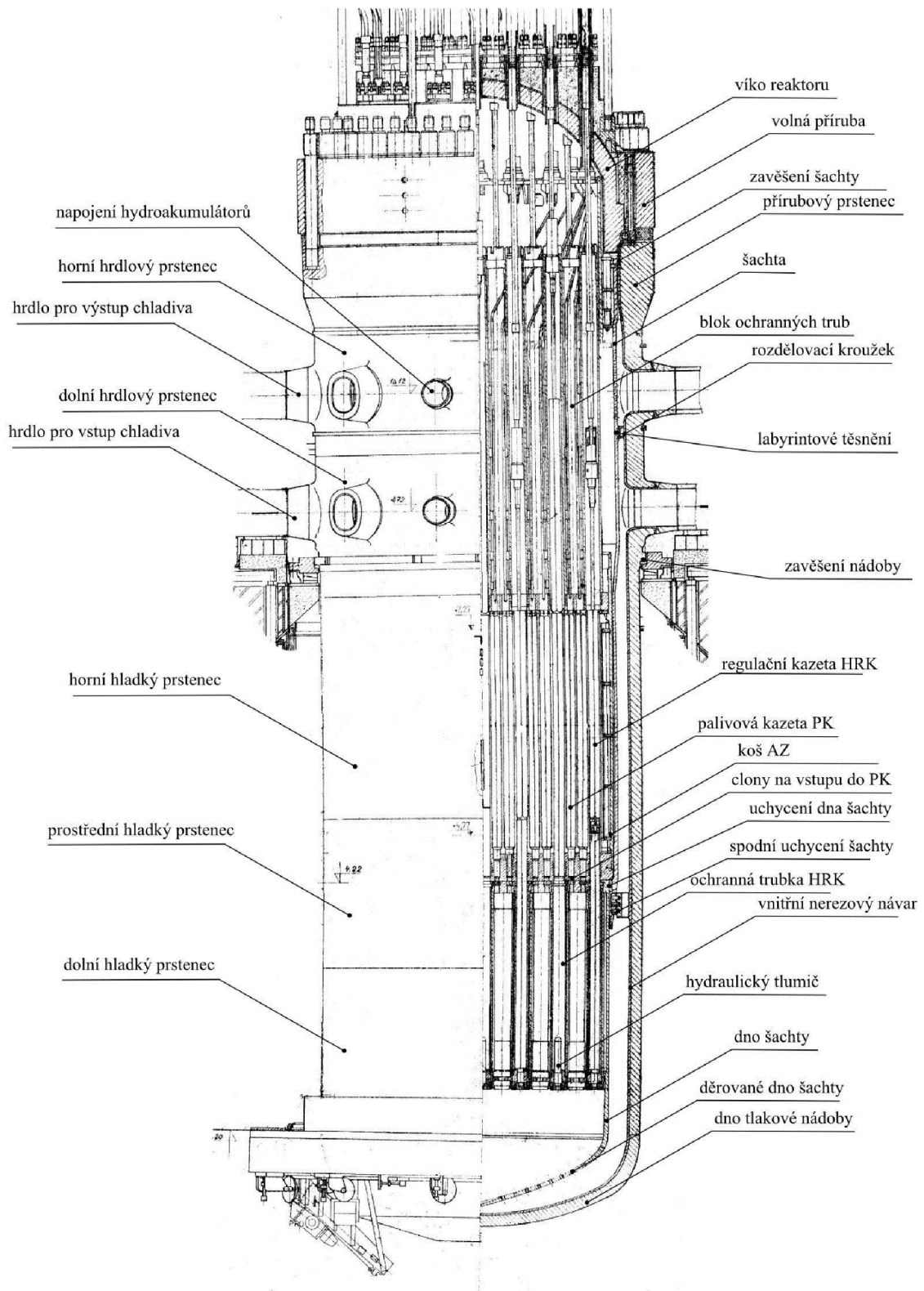
1.1 Reaktory VVER-440

Reaktor VVER-440/V-213 patří mezi reaktory tzv. druhé generace, který je oproti předchozímu typu reaktoru VVER-440/V-230 doplněn o barbotážní vakuový systém neboli barbotážní věž. Díky tomuto systému byla bezpečnost reaktorů VVER výrazně zvýšena a největší projektová havárie již počítala s úplným protržením hlavního potrubí v primárním okruhu, tzv. Large-Break Loss of Coolant Accident (LB-LOCA). Tento typ V-213 je provozován v Jaderné elektrárně Dukovany (EDU), v celkovém počtu čtyř reaktorů, které jsou koncepčně stavěny jako dvojblok, kde vždy dva reaktory mají společnou reaktorovou budovu a strojovnu, včetně některých pomocných systémů.

Původní (projektový) tepelný výkon reaktoru byl 1375 MW. Tomu odpovídá, jak již z názvu plyne, elektrický výkon 440 MW. Jako palivo je použit mírně obohacený UO_2 ve formě palivových tablet, uložených v palivových proutcích. Z palivových proutků jsou dále tvořeny palivové kazety. Umístění palivových kazet v AZ je navrženo tak, aby byl zajištěno optimální rozložení výkonu, vodo-uranový poměr, bezpečné rozložení regulačních kazet (HRK) při splnění limitů a podmínek bezpečného provozu, ale zároveň co nejvyšší ekonomičnosti dané vsázky.

1.2 Popis aktivní zóny VVER-440

Aktivní zóna (AZ) reaktoru VVER-440 se skládá z trojúhelníkové mříže. Tato mříž je tvořena hexagonálními palivovými kazetami (PK) v heterogenním uspořádání, tedy s různým uranovým obohacením. Tato aktivní zóna je složena z celkově 349 kazet, z nichž 37 je regulačních a 312 palivových. Palivová kazeta (také palivový soubor) je tvořena 126 palivovými proutky a centrální trubkou, do které lze umístit termočlánky nebo samonapájecí detektory neutronů. Palivové proutky se skládají z keramických palivových tablet, někdy také nazývané palivové pelety. Palivové tablety jsou naskládány do uzavřených trubiček (proutků) s povlakem ze slitin zirkonia s příměsí niobu ($Zr + 1\% Nb$) tvořící palivové pokrytí, které zajišťuje dostatečný přestup tepla z palivových tablet do chladiva primárního okruhu. Tyto palivové proutky zároveň slouží jako jedna z bezpečnostních bariér bránících úniku radioaktivních látek z paliva do primárního okruhu a potenciálně jeho okolí. Pokrytí paliva musí být navrženo s dostatečnou rezervou pro případ havárie, kde by vlivem vyšších teplot mohlo dojít k chemickým reakcím s chladivem obsahující příměs kyseliny borité (oxidaci pokrytí) za současného uvolnění vodíku, nebo dokonce tavení samotných palivových proutků. Současné trendy ve vývoji paliva se soustředí na zlepšení tohoto pokrytí a pod názvem Accident Tolerant Fuel (ATF) jsou vyvíjeny nové typy pokrytí odolné proti výše zmíněným nepříznivým vlivům.

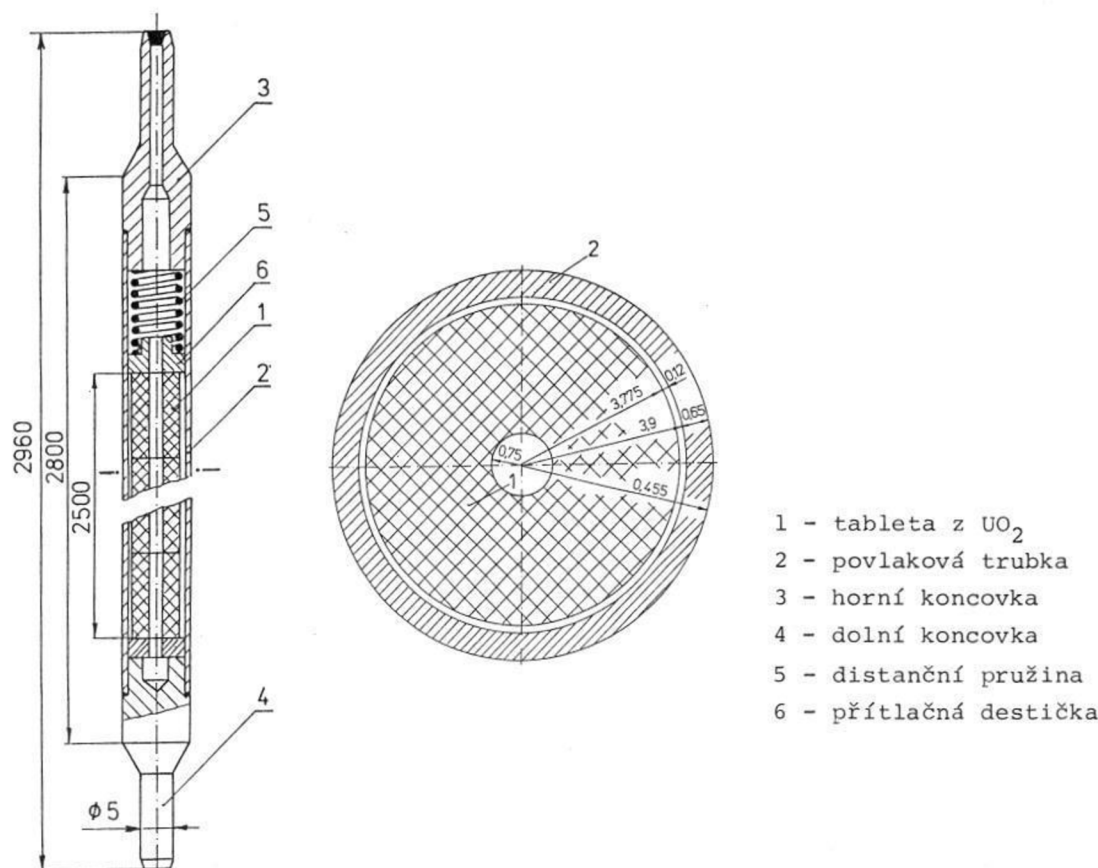


Obrázek 1.1 Reaktor VVER-440 [3]

Na obrázku 1.1 je zobrazen vertikální řez reaktorem VVER-440. Jsou zde vyobrazeny hlavní části reaktorové nádoby, včetně nátrubků horké, studené větve a napojení hydroakumulátorů (bezpečnostních systémů), stejně jako víko a dno nádoby, prsteneček, který obklopuje klíčovou část reaktoru – aktivní zónu včetně palivových a regulačních kazet umístěných v koši aktivní zóny, šachta, blok ochranných trub k vedení regulačních kazet a vyvedení vnitroreaktorových měření a další.

Jak již bylo zmíněno, palivové pokrytí, které je součástí palivových proutků každé palivové kazety, vytváří první hermetickou bariéru, která zamezuje úniku štěpných produktů do chladiva primárního okruhu. Zbývající vnitřní prostor v palivovém proutku (mezera mezi palivem a pokrytím) je vyplněn héliem. Hélium má mnohem lepší tepelné vlastnosti díky efektivnějšímu přestupu tepla v porovnání se vzduchem. V horní části palivového proutku je mezi horní koncovkou a palivovými tabletami umístěna distanční pružina s přítlačnou destičkou. Pružina s destičkou zde udržuje palivové tablety v požadované (pracovní) poloze tak, aby se nemohly v palivovém proutku volně pohybovat. Distanční pružina v palivovém proutku je také důležitá kvůli dějům probíhajícím během palivové kampaně díky štěpné reakci a následnému uvolňování štěpných produktů. Na palivové tablety tedy působí řada různých vlivů a jsou tak extrémně namáhány. Mezi nejčastější vlivy patří objemové napučání a rozpínání paliva, růst palivového zrna a další.

Provedení palivových tablet může být s centrálním otvorem nebo bez centrálního otvoru. Tento otvor slouží k hromadění plynných produktů vzniklých při štěpení a také jako dostatečná objemová rezerva pro napučání tablet v palivovém proutku. Zároveň je tím sníženo tepelné namáhání ve středu palivového proutku. Na obrázku 1.2 je zobrazen axiální a radiální řez palivovým proutkem.



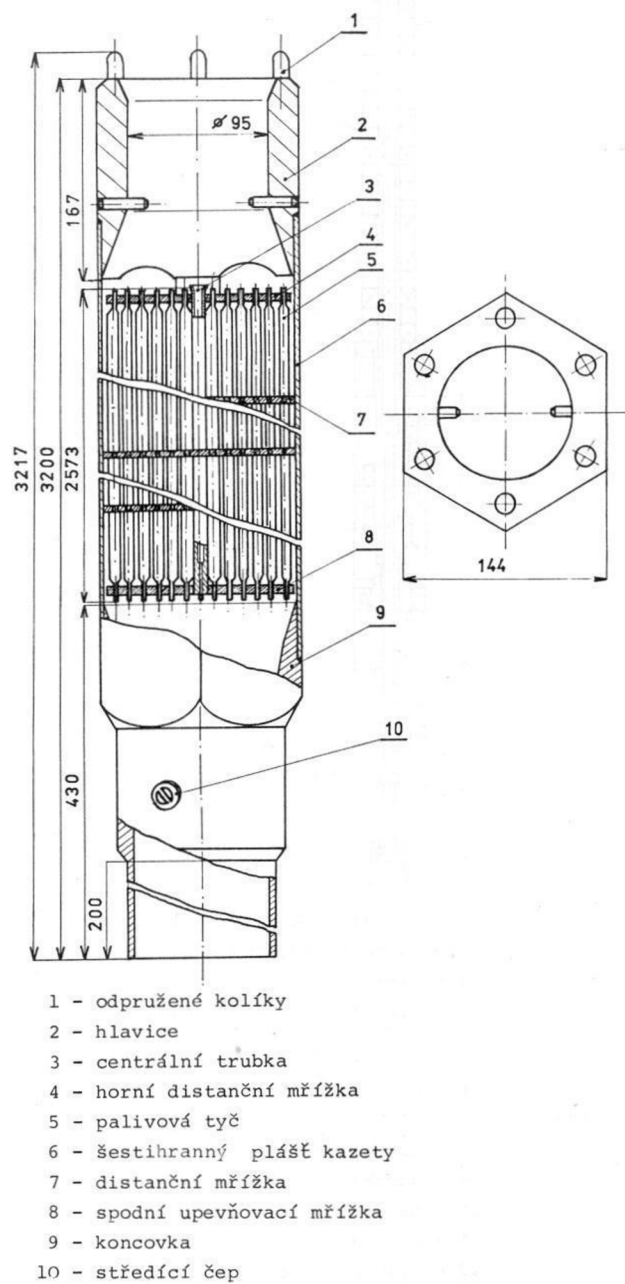
Obrázek 1.2 Palivový proutek palivové kazety pro reaktor typu VVER-440 [3]

Jak již bylo zmíněno, palivové soubory jsou v AZ uspořádány do trojúhelníkové mříže s roztečí 14,4 cm. Nosná část palivové kazety je tvořena hexagonálním pláštěm s hlavicí a koncovkou. Tento plášť (obálka) vymezuje vnější hranici palivové kazety a zároveň zamezuje radiálnímu proudění v palivové kazetě. Konstrukční části PK jsou rovněž vyrobeny ze slitin zirkonia ($Zr + 2,5 \% Nb$). Přesné geometrické uspořádání palivových proutků v PK je zajištěno pomocí upevnění do distančních mřížek. Původní distanční mřížky byly vyrobeny z oceli, později se ale začaly zavážet palivové vsázky s distančními mřížkami ze slitiny zirkonia. Výměna distančních mřížek je dále popsána v následující kapitole. Spodní distanční mřížka je pevně spojena s válcovou koncovkou a jednotlivé palivové proutky jsou do této distanční mřížky upevněny. Horní mřížkou procházejí proutky posuvně, a to kvůli rozdílné tepelné dilataci palivových proutků a obálce palivové kazety. Uprostřed PK jsou distanční mřížky připevněny k centrální (vodící) trubce. Palivová kazeta je usazena válcovou koncovkou ve spodní nosné desce, na kterou navazuje spodní vodící část PK. V té je umístěn středící čep sloužící

pro upevnění polohy PK. Válcová koncovka také slouží jako vstupní otvor pro vstup chladící vody do PK. V horní části (hlavici) palivové kazety jsou zabudovány odpružené kolíky sloužící k pružnému uložení PK v aktivní zóně. Celkově je v hlavici zabudováno šest odpružených kolíků, každý v jednom z vrcholů hexagonální palivové kazety.

Reaktory VVER-440 používají pro okamžitou regulaci výkonu tzv. tandemovou regulaci. Jedná se o regulační kazetu spojenou s palivovou kazetou, zavěšenou na absorpční části regulačního orgánu. Spodní část regulační kazety (HRK) je tvořena palivovou kazetou analogickou s PK. Hlavice palivové části HRK je oproti klasické palivové kazetě doplněna o speciální bajonetový uzávěr. Tento uzávěr slouží ke spojení palivové a regulační části HRK. Horní část je absorpční, tvořena hexagonálním ocelovým pláštěm stejného tvaru jako palivová kazeta. Vnitřní povrch je vyplněn vložkami z bórové oceli obsahující 2 hmotnostní procenta bóru. Tyto vložky jsou připevněny na vnitřním povrchu pláště.

Změna reaktivity je provedena vysouváním palivové části HRK do prostoru pod aktivní zónu a současným zasouváním absorpční části HRK do aktivní zóny, případně opačným způsobem, podle potřeby na snížení, resp. zvýšení výkonu reaktoru. Pohyb regulačních kazet je proveden pomocí elektrických pohonů, kdy elektrický pohon pohybuje vloženou tyčí v HRK. Součástí elektrického pohonu je také indukční čidlo pro snímání polohy HRK. Ke spodní části připojené palivové kazety je připevněno tlumící zařízení. V případě rychlého bezpečnostního odstavení reaktoru zmírňuje hydraulický tlumič pohyb a zároveň tlumí dopad HRK na dno nádoby reaktoru. V absorpční části HRK je vložena trubka, která slouží k intenzivnějšímu odvodu tepla z absorpčních prvků regulačních orgánů. Reaktory VVER-440 mají univerzální regulační články, což znamená, že je možné jejich použití pro kompenzaci přebytečné reaktivity, pro regulaci výkonu reaktoru i pro havarijní odstavení reaktoru. Na obrázku 1.3 je zobrazena palivová kazeta reaktoru VVER-440.



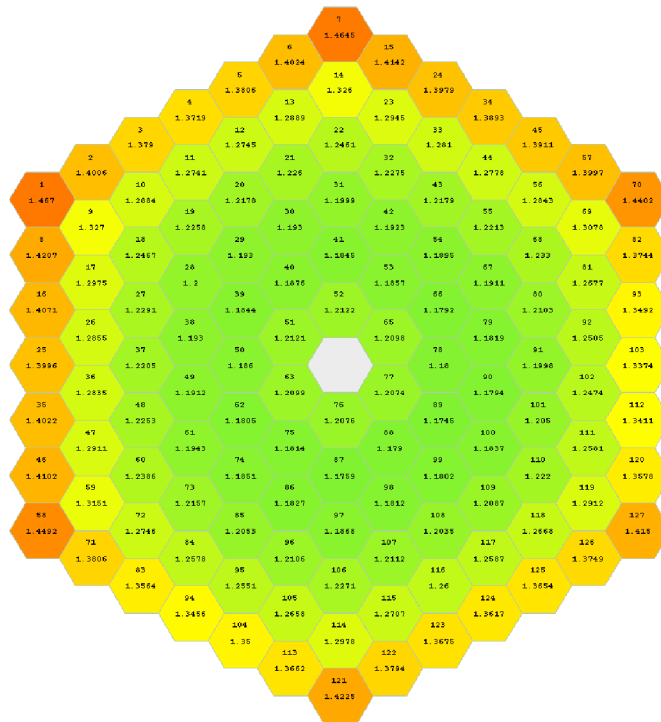
Obrázek 1.3 Palivová kazeta reaktoru VVER-440 [3]

1.3 Vývoj palivové vsázky na EDU

V Jaderné elektrárně Dukovany (EDU) jsou aktuálně čtyři výrobní bloky s reaktory VVER-440/V-213. Roku 1985 byl do provozu uveden první výrobní blok. Od roku 1986, respektive 1987, jsou provozu i všechny ostatní bloky. V současné době pokrývá výroba EDU přibližně pětinu spotřeby elektrické energie České republiky.

1.3.1 Původní palivový cyklus

Jak již bylo zmíněno, projektový tepelný výkon reaktoru byl 1375 MW, což odpovídalo elektrickému výkonu 440 MW. Původní palivový cyklus reaktorů VVER-440 byl tříletý, s délkou palivové kampaně okolo 300 dní. Během odstávky probíhala výměna paliva, která odpovídala přibližně jedné třetině PK zavezených v aktivní zóně. Průměrně bylo tedy vyměněno 116 kazet. Obohacení paliva bylo původně 3,6 % ^{235}U . Částečné vyhoření PK bylo v první vsázce nahrazeno kazetami s obohacením 2,4 a 1,6 % ^{235}U . Kazety obohacené na úroveň 2,4 % ^{235}U byly použity zejména u palivových částí HRK. Projektové palivové kazety byly neprofilované, tzn. obohacení všech palivových proutků bylo stejné. Relativní výkon palivových proutků původního neprofilovaného paliva je zobrazen na obrázku 1.4. Na první pohled je zřejmé, že výkon v krajních proutcích je mnohem vyšší než výkon palivových proutků uprostřed kazety. Vyobrazená kazeta je z 10. palivové kampaně, zavezena na BIPR pozici 2. Obrázek byl vytvořen programem MapView.



Obrázek 1.4 Původní neprofilovaná palivová kazeta

Brzy po zahájení provozu EDU začaly práce na optimalizaci palivových vsázek a současně také modernizace ostatních komponentů výrobních bloků. Modernizace všech bloků byla dokončena v roce 2012. Využitím projektových rezerv se nominální elektrický výkon jednotlivých bloků zvýšil na 116 % původní hodnoty. Celkově se tepelný výkon reaktorů zvýšil až na 1444 MW a elektrický výkon poté na 510 MW. Navýšení nominálního výkonu bylo možné díky optimalizaci palivového cyklu a zvýšení účinnosti sekundární části výrobního bloku. Dále také díky modernizaci vyvedení elektrického výkonu, výměny rotoru elektrického generátoru, vysokotlakého a nízkotlakého dílu turbíny a dalšími změnami v zařízeních sekundárního okruhu.

Původní metoda překládkového schéma výměny paliva byla typu out-in-in. To v praxi znamenalo, že čerstvé palivo bylo zavezeno na okraj AZ. Výhodou této metody byl poměrně homogenní vývin tepla v aktivní zóně. U této metody však ve výsledku převažovaly nevýhody nad výhodami. Mezi hlavní nevýhodu schématu out-in-in patřil vysoký únik neutronů z aktivní zóny. Vysoký únik neutronů se také projeví vyšším ozářením reaktorové nádoby, což způsobí vyšší namáhání a potenciální snížení životnosti. U reaktorů typu VVER je tento jev více problematický než u jiných typů energetických reaktorů. Důvodem je poměrně tenká vrstva vody mezi košem aktivní zóny a nádobou reaktoru, sloužící jako radiální reflektor. Další nevýhodou původní metody bylo neúplné využití energetického potenciálu paliva a také nízká variabilita projektové vsázky. Hlavním důvodem využívání této metody byl ale vysoký stupeň bezpečnosti a dlouhodobě prověřené překládkové schéma. Také původní optimalizace aktivní zóny odpovídala dřívějším možnostem technických parametrů dostupné výpočetní techniky a úrovni výpočetních programů sloužících pro výpočet vsázek.

1.3.2 Zdokonalený palivový cyklus

První optimalizované vsázky s nízkým únikem neutronů byly známy už během uvedení EDU do provozu. Překládkové schéma tohoto typu se také označuje jako L³P (Low Leakage Loading Pattern). Nízký únik neutronů je zajištěn umístěním nejvíce vyhořelých kazet na okraj AZ a čerstvých palivových kazet více do středu AZ. Palivové kazety jsou rozmístěny v aktivní zóně podle optimalizačního výpočtu. To mimojiné způsobí, že reaktorová nádoba je díky nízkouníkové vsázce mnohem méně namáhána neutronovým tokem. Koncem 80. let byl tříletý palivový cyklus nahrazen tři a půl letým, později čtyřletým. Při čtyřletém palivovém cyklu bylo během odstávky průměrně

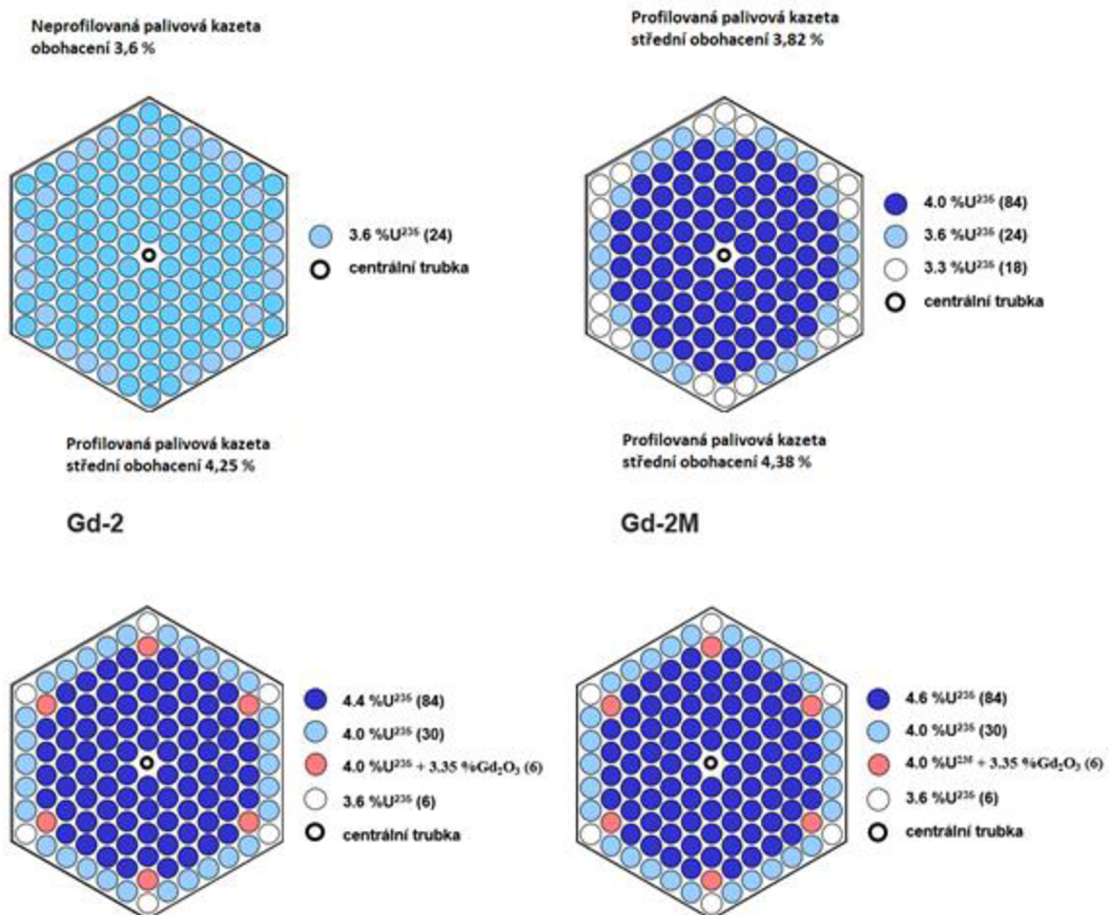
vyměněno 87 palivových kazet. Postupně byl zahájen přechod na inovovanou nízkoúnikovou palivovou vsázku, také označovanou jako in-in-in-out. Již v roce 1990 byly zavezeny první palivové kazety s vylepšenými parametry. Původní ocelové distanční mřížky byly nahrazeny za mřížky ze slitiny zirkonia (označované jako E-110). Tím se významně snížila parazitní absorpce neutronů. Také tloušťka palivové obálky byla zmenšena z původních 2 mm na 1,5 mm, přičemž tloušťka palivových částí HRK zůstala 2 mm. Pomocí těchto vylepšených parametrů byla prodloužena palivová kampaň o 13 efektivních dní. Kvůli zlepšení přestupu tepla mezerou mezi palivovými tabletami a pokrytím se zvýšil plnicí tlak hélia ze 100-140 kPa na 500-700 kPa. Od roku 1998 se začaly zavážet PK s radiálně profilovaným obohacením. Střední obohacení těchto palivových kazet bylo 3,82 % ^{235}U . Zavezením radiálně profilovaných kazet se snížila nevyrovnanost výkonu v aktivní zóně. U tohoto nového typu paliva byly navíc zmenšeny centrální otvory v palivových tabletách z původních 1,6 mm nově na 1,4 mm.

V roce 2003 se prodloužil palivový cyklus na pětiletý. Aby bylo možné přejít na pětiletý palivový cyklus, bylo nutné zvýšit střední obohacení paliva na 4,38 % ^{235}U . Zároveň bylo nutné vykompenzovat přebytečnou reaktivitu PK na začátku palivové kampaně. Z tohoto důvodu byly do PK vloženy vyhořívající absorbátory z gadolinia. Tyto palivové kazety se označují jako Gd-1. Gadolinium zde bylo ve formě oxidu gadolinitého (Gd_2O_3). Na šesti určených pozicích v PK se tak umístily palivové proutky, kde k UO_2 bylo přidáno 3,35 % oxidu gadolinitého. Další změnou oproti předchozím typům PK bylo snížení množství hafnia v pokrytí proutků z původních 0,05 % na 0,03 %. Přechodem na pětiletý palivový cyklus se průměrný počet vyměněných palivových kazet během jedné odstávky snížil na 72. Devět z nich byly HRK s obohacením palivové části 3,82 % ^{235}U , ostatních 63 PK bylo dosaženo obohacení 4,38 % ^{235}U .

Roku 2005 se začal zavážet nový typ paliva s označením Gd-2+ se středním obohacením 4,25 % ^{235}U . V roce 2009 se na třetím bloku začalo přecházet na novější palivo označované jako Gd-2M. O rok později bylo toto palivo zavezeno také na ostatních blocích (bloky 1, 2 a 4). Nominální tepelný výkon s tím zvýšil na 105 %. U paliva typu Gd-2, Gd-2+ a Gd-2M byl zmenšen průměr centrálního otvoru palivových tablet z 1,4 mm na 1,2 mm. Také výška palivového sloupce se prodloužila o 60 mm, hmotnost UO_2 v palivové kazetě se tím zvýšila ze 120,2 kg na 126,3 kg. Množství hafnia v pokrytí palivových proutků bylo sníženo z 0,03 % na 0,01 %. Rozteč mezi palivovými proutky

se zvýšila z 12,2 mm na 12,3 mm, tím došlo ke zlepšení vodo-uranového poměru, který mimojiné souvisí s vlivem změn reaktivity od moderátoru.

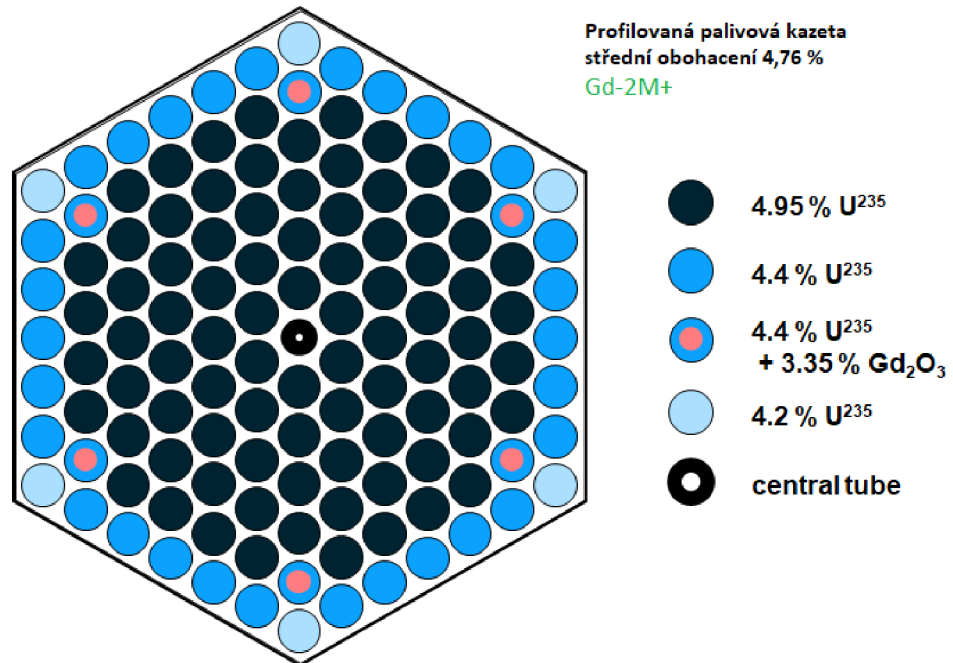
V roce 2014 dostalo licenci optimalizovanější palivo označované jako Gd-2M+. Oproti palivu typu Gd-2M byly změněny pouze palivové proutky bez vyhořívajících absorbátorů. Konkrétně byla změněna tloušťka palivového pokrytí a rozměry palivových tablet. Vnitřní průměr palivového pokrytí se zvýšil ze 7,8 mm na 7,93 mm. Zároveň se zvýšil vnější průměr palivových tablet ze 7,6 mm na 7,8 mm. Dále byl zrušen centrální otvor palivové tablety. Těmito úpravami se v každé PK zvýšila hmotnost UO_2 o 9,2 kg (ze 126,3 kg na 135,5 kg). V každé palivové části HRK se hmotnost UO_2 zvýšila o 8,8 kg (ze 120,2 kg na 129,0 kg). Na obrázku 1.5 jsou zobrazeny vybrané typy PK použité na EDU.



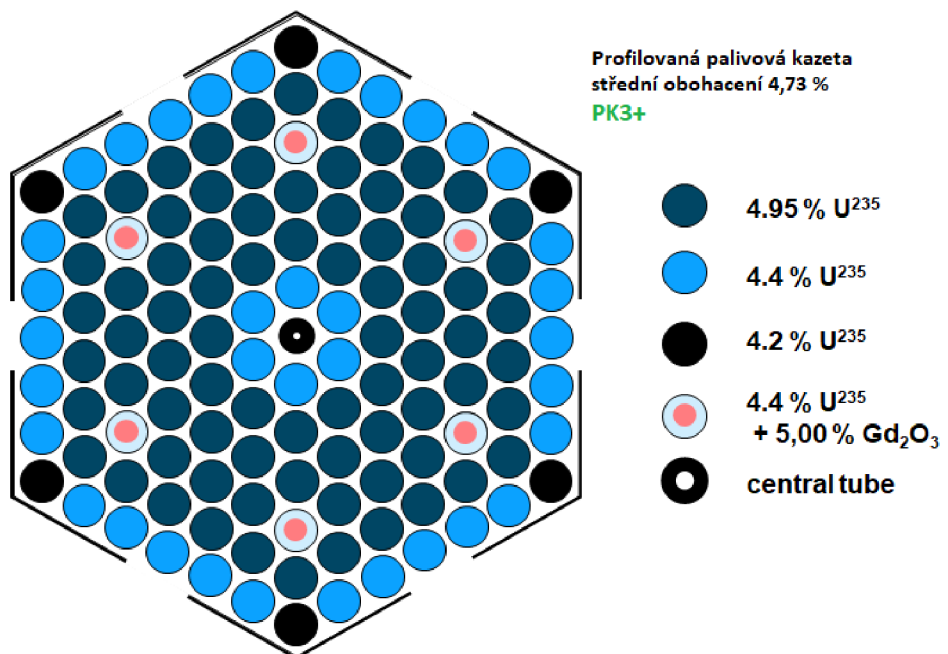
Obrázek 1.5 Inovace palivových kazet [5]

V porovnání s reaktorem VVER-100 obsahuje aktivní zóna reaktoru VVER-440 větší počet kazet s menším počtem palivových proutků. Tím umožňuje optimalizovat palivovou vsázku, aniž by musel být změněn radiální profil obohacení PK. To znamená, že radiální profil zůstává stejný a nemění se během optimalizace každé palivové vsázky. Dlouhodobý plán palivových vsázek předpokládá zavedení AZ jedním typem palivových kazet. Avšak vlivem postupného vývoje PK se v praxi občas stává, že je v reaktoru více typů paliva současně. Například v roce 2015 byly v AZ zavedeny palivové kazety typu Gd-2M a Gd-2M+ a současně palivové části HRK typu Gd-2. Palivová kazeta typu Gd-2M+ je zobrazena na obrázku 1.6. Současná délka palivové kampaně s palivem Gd-2M+ je zhruba 330 dní.

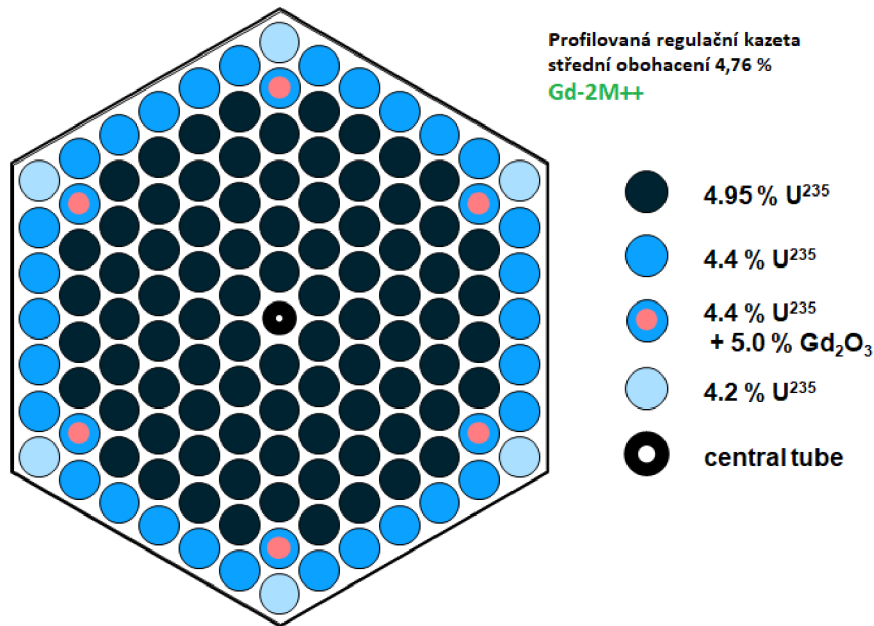
Koncem roku 2023 je v plánu zavést nový typ paliva s označením PK3+, které má střední obohacení 4,73 %, a to provtně na 4. bloku EDU. Blok obsahující toto palivo by měl být spuštěn začátkem roku 2024. Zásadní změnou oproti předchozím typům PK je tzv. karkasovitá obálka. Obálka této PK má po stranách výřezy, které sníží parazitní absorpci neutronů, což se projeví ekonomičtějším využitím paliva. Dále bude u těchto PK zvětšena rozteč mezi palivovými proutky, čímž selepší vodo-uranový poměr. Palivová kazeta PK3+ je zobrazena na obrázku 1.7. Současně s novým palivem PK3+ je v plánu začít zavážet nový typ HRK označovaný jako Gd-2M++. Střední obohacení těchto HRK je stejné jako u pracovní kazety typu Gd-2M+, avšak u HRK Gd-2M++ se zvýší podíl vyhořívajících absorbátorů z 3,35 % na 5 % Gd_2O_3 . Regulační kazeta Gd-2M++ je zobrazena na obrázku 1.8. V budoucnu se také uvažuje o prodloužení délky palivového cyklu v rámci využití projektových rezerv II na 16měsíční, případně až na 18měsíční.



Obrázek 1.6 Palivová kazeta Gd-2M+ [5]



Obrázek 1.7 Palivová kazeta PK3+ [5]



Obrázek 1.8 Regulační kazeta Gd-2M++ [5]

1.4 Projektování palivové vsázky

Při zadání stejných vstupních hodnot je možné najít více vyhovujících variant palivové vsázky, které splňují hodnocená provozní, bezpečnostní a ekonomická kritéria. Do jisté míry je projektování palivové vsázky závislé na zkušenostech projektanta. Projektování je v podstatě hledání nejvhodnější palivové vsázky podle určené délky palivové kampaně. Vyhoření PK se většinou přepokládá podobně jako v předchozí palivové kampani. Nejvhodnější palivová vsázka je tedy kombinace vhodného uspořádání paliva, regulačních kazet a vyhořívajících absorbátorů. Každá palivová vsázka je však omezena těmito základními limity:

- Provozní limity – jejich kontrola probíhá během provozu výrobního bloku. Při definici provozních limitů bývají určeny výrobní tolerance a míra nepřesnosti monitorovacího systému. Provozní limity jsou stanoveny provozovatelem.
- Bezpečnostní limity – určují zásadní provozní parametry, které je nutné dodržet, aby nemohlo dojít k poškození paliva. Tyto limity jsou stanoveny výrobcem paliva.
- Projekční limity – tyto limity slouží k navržení palivové vsázky. Pomocí bezpečnostních analýz je pak kontrolováno jejich plnění. Projekční limity stanovuje provozovatel.

Bezpečnostními limity jsou často stanoveny parametry, které je v praxi obtížné změřit. Z tohoto důvodu jsou definovány projekční limity stanovené pro odvozené veličiny, které je možné jednoduše změřit. Příkladem je bezpečnostní limit teploty pokrytí palivových proutků. Tento limit definuje poškození palivového pokrytí a únik radioaktivních látek z palivového proutku. Z důvodu složitého měření teploty pokrytí paliva je projekční limit stanoven pro teplotu chladicí vody.

Provozovatel jaderné elektrárny je povinen plnit bezpečnostní limity. Zároveň se provozovatel snaží provozovat elektrárnu ekonomicky, pokud možno s co nejvyšším ziskem. Bezpečnostní limity a ekonomický provoz jdou často proti sobě a zpravidla není snadné splnit oba požadavky současně. Provozovatel elektrárny určí požadovanou dobu a stanovený výkon, při kterém bude palivo v provozu. Výrobce paliva tak musí vyrobit palivo s dostatečnou zásobou reaktivity, aby palivo tyto podmínky splňovalo. Dále je výrobcem paliva garantováno zajištění splnění bezpečnostních limitů při provozu paliva v reaktoru. Bezpečnostní limity musí být také v souladu s provozními.

Jak již bylo zmíněno, palivové vsázky jsou nyní navrhovány jako nízkoúnikové (schéma typu in-out). Zároveň je úkolem optimalizace palivové vsázky navrhnout takovou vsázku, při níž bude výkon v aktivní zóně co nejrovnoměrnější. Vyrovnanost výkonu v aktivní zóně je kontrolována bezpečnostními analýzami. Nevyrovnanost je popsána pomocí koeficientů nerovnoměrnosti rozložení výkonu v AZ. Hodnoty daných koeficientů musí být pod stanovenou mezí určenou bezpečnostními analýzami. Při dodržení těchto koeficientů a výkonu reaktoru při standartním provozu je zaručeno, že během abnormálního stavu nebudou překročena tzv. kritéria přijatelnosti. Nejhorší možný průběh vzniklé události tak bude podle předpokladů bezpečnostních analýz.

Dalším důležitou sledovanou hodnotou je kritérium omezující koeficient reaktivity. Pro toto kritérium je nutné, aby celkový teplotní koeficient reaktivity byl za všech okolností záporný. Pro moderátorový teplotní koeficient platí speciální limit. Jeho hodnota musí být vždy záporná při jakémkoliv provozním výkonu a při všech provozních stavech. Zároveň moderátorový teplotní koeficient nesmí být nižší, než je stanovená limitní hodnota v bezpečnostní zprávě. Při nižší hodnotě, než je limitní by, totiž zpětnovazební efekty reaktivity přesto mohly vést k uvolnění kladné reaktivity. Došlo by tak k nežádoucímu růstu výkonu.

Mezi další vyhodnocované koeficienty reaktivity patří výkonový koeficient reaktivity, dutinový koeficient reaktivity a koeficient reaktivity koncentrace kyseliny borité.

Ve zkratce se projektování palivové vsázky se skládá z následujících kroků:

- Shromáždění vstupních dat
- Provedení střednědobé analýzy (vývoj palivového cyklu v rozmezí 3 až 5 let)
- Výběr nejvhodnější palivové vsázky a provedení 3-D výpočtu
- Základní bezpečnostní hodnocení mini-RSAC (Reactor Safety Analysis Checklist)
- Ověření návrhu palivové vsázky
- Kompletní bezpečnostní hodnocení RSAC
- Příprava modelu pro monitorovací systém

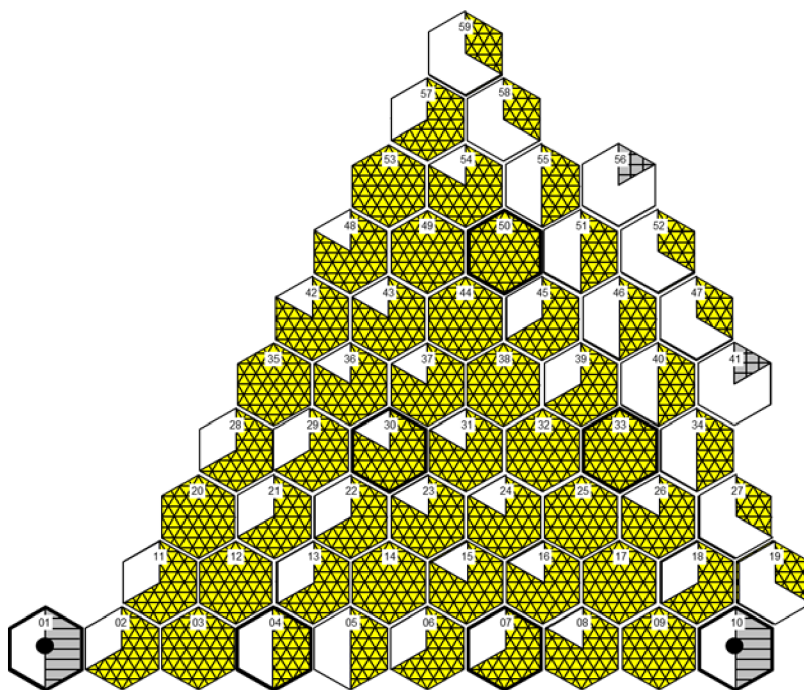
Výstupem projektování palivové vsázky je určení kartogramu AZ, navržený počet a typ nově zaváženého paliva do AZ a bezpečnostní hodnocení. Součástí výstupu je také zpracování projektové a provozní dokumentace. Základní provozní podmínky, které musí být splněny při každém návrhu palivové vsázky jsou zejména:




- Řídicí systém rektoru musí být vždy schopen odstavit reaktor
- Tepelný tok musí splňovat podmínku pro rezervu do vzniku krize varu
- Lineární výkon nesmí převýšit maximální přípustnou hodnotu
- Reaktor musí být schopen udržet štěpnou řetězovou reakci po celou dobu kampaně

Návrh palivové vsázky může začít vznikat i rok a půl před jeho předpokládaným zavezením. Pro návrh následující palivové vsázky však není možné určit konečné parametry aktuálně zavezeného paliva. Palivová kampaň totiž může skončit dříve nebo později než je naplánovaný termín. Proto je vždy nutné navrhnout dvě varianty palivových vsázek. Jedna varianta počítá s případem, kdy palivová kampaň skončí dříve než je plánováno (tzv. krátké okno). Druhá varianta počítá s tím, že palivová kampaň skončí později než je stanovený termín (tzv. dlouhé okno). V případě, že jsou kontrolované limity splněny pro obě navržené varianty, je možné očekávat, že budou

splněny pro všechny varianty v tomto rozmezí. Výsledné bezpečnostní hodnocení palivové kampaně však probíhá těsně před začátkem odstávky. Respektive ve chvíli, kdy jsou známy parametry vyhoření předchozí palivové vsázky.

Provést střednědobou analýzu palivového cyklu není nutné. Avšak její provedení přináší určité výhody a umožní minimalizovat budoucí problémy. Díky této analýze je možné přesněji odhadnout počet palivových kazet, které mají být nahrazeny čerstvými. Pokud by analýza nebyla provedena, mohl by v budoucnu nastat problém se splněním bezpečnostní hodnocení u některé z nadcházejících palivových vsázek. Například by nebylo možné navrhnout palivovou kampaň pro stanovenou délku bez zvýšení počtu čerstvých kazet. Příklad kartogramu jedné z dřívějších navržených palivových vsázek je vyobrazen na obrázku 1.9.



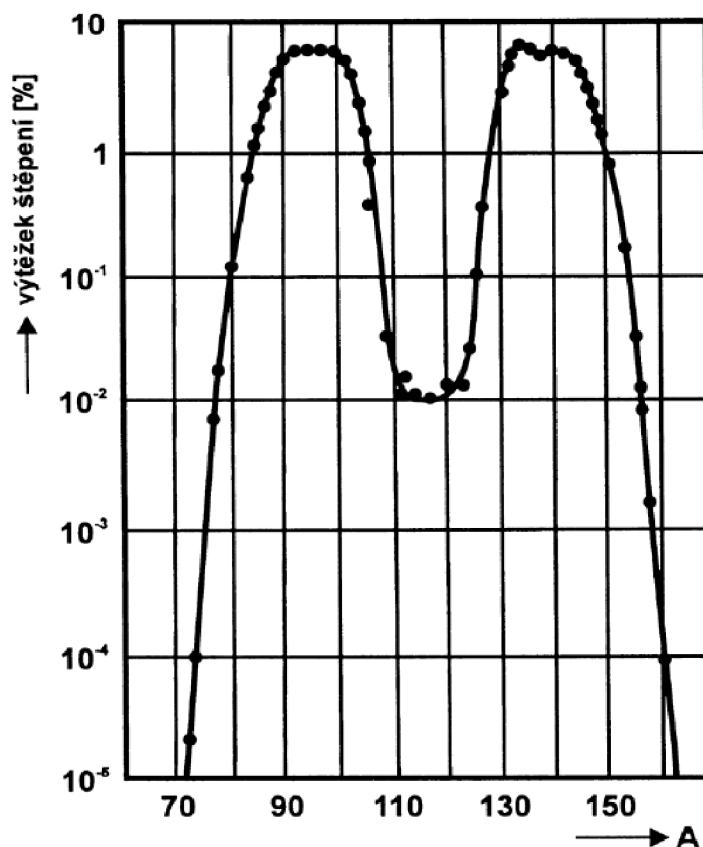
pracovní palivová kazeta/ regulační kazeta		čerstvá	2	3	4	5	6
	Gd-2M+ 4,38 %	78 / 12	78 / 6	72 / 6	36 / 6	36 / -	- / -
	Gd-2M 4,38 %	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	12 / -
	Gd-2+ 4,25 %	- / -	- / -	- / -	- / 7	- / -	- / -

● - PK/HRK z bazénu použitého paliva

Obrázek 1.9 Ukázka kartogramu s návrhem palivové vsázky na EDU [5]

2. VÝVIN TEPLA V AKTIVNÍ ZÓNĚ

Teplo vyvinuté v aktivní zóně se uvolňuje během štěpení těžkých jader, v tomto případě štěpením izotopu uranu ^{235}U . Jádra uranu ^{235}U se rozštěpí nejčastěji na dva štěpné produkty (fragmenty), které jsou obvykle v hmotnostním poměru přibližně 2:3. Podle pravděpodobnosti funkce výskytu vznikají nejčastěji štěpné produkty s nukleonovými čísly 95 a 139. Závislost výskytu štěpných fragmentů na nukleonovém čísle je znázorněn na obrázku 2.1. Primární štěpné produkty obsahují vysoký přebytek neutronů a jsou tak nestabilní. Nestabilní štěpné produkty mají tendenci se zbavit přebytečné energie postupnou radioaktivní přeměnou a přejít tak do stabilního stavu. Tato kapitola čerpá ze zdrojů [1], [2], [4], [5] a [6].



Obrázek 2.1 Pravděpodobnostní křivka výtěžku štěpných produktů ^{235}U [6]

Většina energie ze štěpení je uvolněna formou kinetické energie štěpných produktů (přibližně 80 %), které zpomalováním předávají svou energii do okolí. Energie přeměněná z kinetické na tepelnou je odváděna chladivem z AZ reaktoru

do paragenerátorů, které tuto tepelnou energii předají do sekundárního okruhu a ochlazené se dále vrací zpět do reaktoru. Mimo kinetickou energii štěpných fragmentů je zbytek energie uvolněn v podobě štěpných neutronů, gama záření, beta přeměnám a neutrin. Celková využitelná energie z jednoho štěpení ^{235}U se udává okolo 193 MeV. Přesná hodnota se může nepatrně lišit, závisí na konstrukci reaktoru a štěpném nuklidu.

2.1 Součinitelé nerovnoměrnosti vývinu tepla

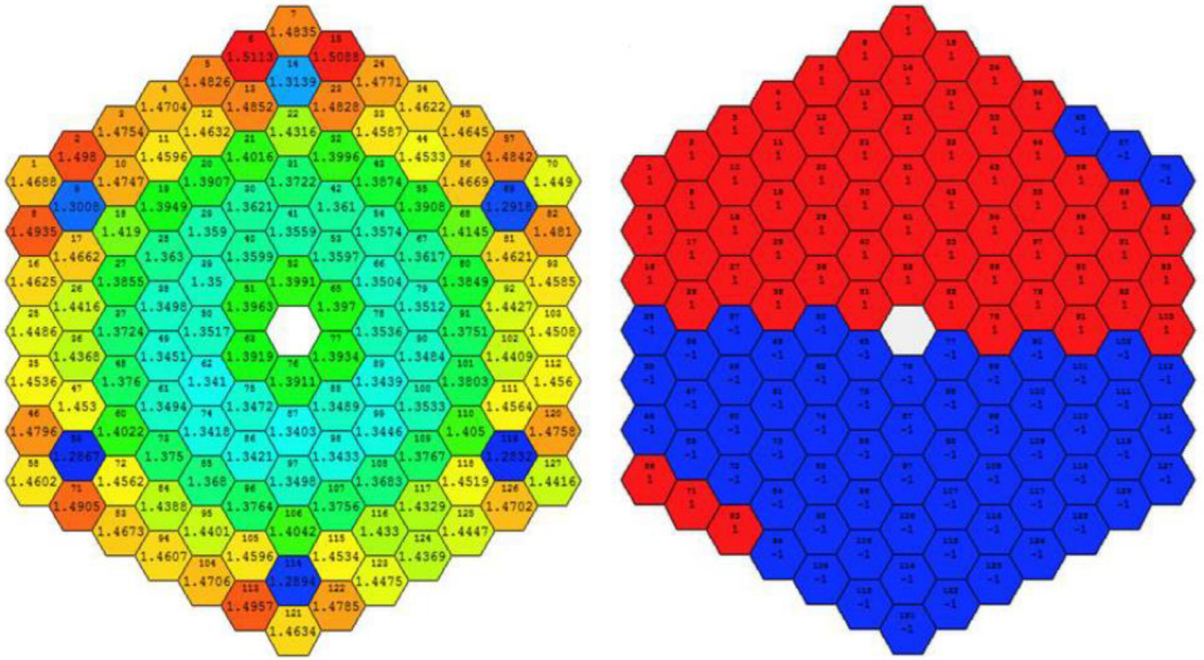
Jak již bylo zmíněno, při provozu energetického reaktoru je nutné kontrolovat vyrovnanost výkonu v aktivní zóně. Vyrovnanost výkonu je popsána součinitelem vyrovnání vývinu tepla μ_V . Ten je definován poměrem středního tepelného výkonu reaktoru v jednotce objemu $\overline{q_V}$ ku maximálnímu měrnému výkonu reaktoru $q_{V,0}$. V provozu je však mnohem častěji používána převrácená hodnota součinitele vyrovnání, součinitel (koeficient) nerovnoměrnosti. Vzhledem k válcovému tvaru většiny energetických reaktorů je vývin tepla rozlišován na závislost v radiálním a axiálním směru. Pro radiální směr je zaveden koeficient nerovnoměrnosti vývinu tepla po poloměru K_r , pro axiální pak po výšce AZ K_z .

Dále je zaveden koeficient K_q , který určuje nerovnoměrnost vývinu tepla v palivových kazetách. Tento koeficient udává relativní velikost výkonu palivové kazety vzhledem k ostatním. Koeficient nerovnoměrnosti palivových kazet zohledňuje pouze výkony mezi jednotlivými kazetami, nikoliv však rozložení výkonu v palivové kazetě. Rozložení výkonu uvnitř PK je popsáno pomocí koeficientu K_K neboli koeficientem nerovnoměrnosti vývinu tepla v palivových proutcích, v praxi je možné se setkat také s označením K_r . Další koeficienty budou jsou popsány v praktické části.

2.2 Rozložení výkonu v kazetě - náklon výkonu

Nerovnoměrnost rozložení výkonu v palivové kazetě je vhodnější a názornější popsat veličinou, která se nazývá náklon výkonu. Náklon je možné popsat rozdělením palivové kazety na dvě stejné poloviny a středově souměrné palivové proutky jsou spárovány. V případě EDU je počet palivových proutků v PK rozdělen na 63 dvojic (celkově 126 proutků). Pro jednotlivé dvojice je následně vypočítán poměr relativního výkonu. Pro osově souměrné dvojice bude výsledný poměr vždy pro jeden proutek menší než jedna a pro druhý větší než jedna. Ta z dvojic s větším poměrem má větší výkon a druhá

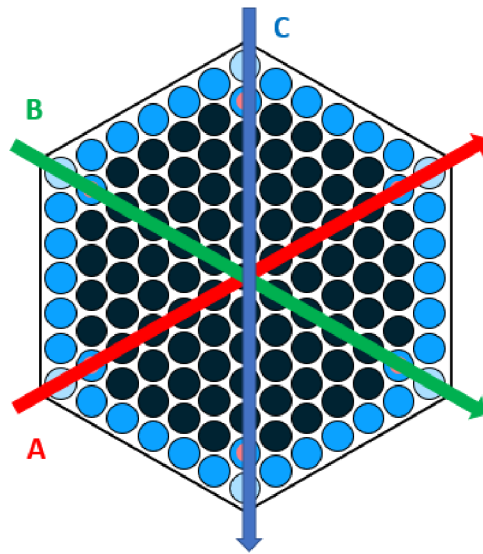
s menším poměrem má tedy nižší. Poměry výkonů jsou zobrazeny na obrázku 2.2. Levá strana zobrazuje rozložení výkonu podle poproutkového koeficientu nerovnoměrnosti (K_r). Pravá strana zobrazuje středově souměrné dvojice palivových proutků. Proutky s vyšším výkonem jsou označeny červeně, proutky s nižším výkonem jsou označeny modře. Graficky je tak možné znázornit gradient výkonu v palivové kazetě.



Obrázek 2.2 Rozložení výkonu v palivové kazetě [4]

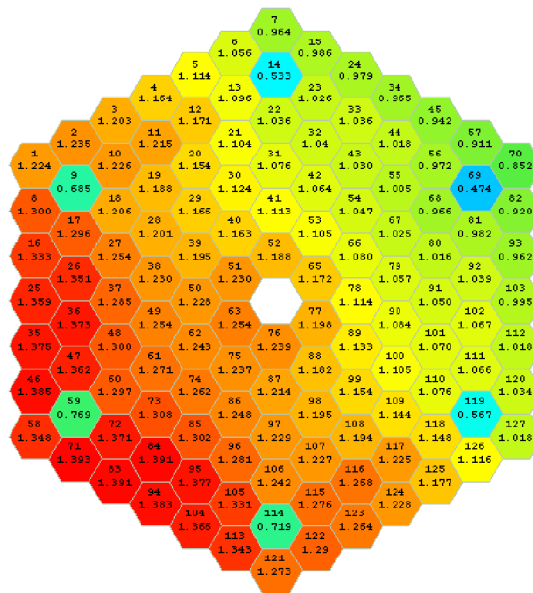
Z dvojic poměrů výkonů středově souměrných proutků se následně určuje střední náklon palivové kazety. Střední náklon je vypočten z průměru hodnot větších než jedna, tedy z proutků s vyšším výkonem. Pokud by palivová kazeta byla dokonale středově souměrná, její náklon by byl roven jedné. V případě nerovnoměrnosti PK, například větším výkonem v jedné její polovině, je náklon větší než jedna. Sledování výsledků náklonu jedné kazety nemá příliš valný význam. Avšak vzájemné porovnání více kazet vytvoří přehled o přesnějším rozložení výkonu a nerovnoměrnostech.

Pro lepší a přehlednější zobrazení rozložení výkonu v palivových kazetách je možné kazety rozdělit pomocí tří os (například A, B a C). Hexagonální PK je rozdělena osami A, B a C, které prochází vrcholy šestiúhelníkové kazety, na šest dílů. Rozdělení PK pomocí os je zobrazeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Rozdělení palivové kazety pomocí tří os [5]

Grafické zobrazení relativních výkonů palivových proutků je možné vygenerovat například v programu MapView. Příklad takového diagramu je zobrazen na obrázku 2.4. Díky těmto diagramům je možné si snadno udělat přehled o rozložení výkonu v PK. Také je zde možné poměrně snadno zobrazit jevy související s vyhoříváním paliva. Například vliv vyhořívajících absorbátorů je zde patrný poklesem relativních výkonů ve vrcholcích palivové kazety.



Obrázek 2.4 Grafické zobrazení relativního výkonu v palivové kazetě [4]

3. VÝPOČETNÍ METODY A VÝPOČETNÍ KÓDY

Optimalizace AZ je jednou ze stěžejních činností při návrhu palivové vsázky. Má totiž vliv na bezpečnost, spolehlivost a ekonomické aspekty provozované palivové vsázky. Při počátcích provozu energetických reaktorů byly palivové vsázky projektovány podle schématu out-in. Přípravu palivových vsázek bylo možné provádět dokonce ručně, pomocí inženýrského přístupu a zkušeností. Přechodem na nízkoúnikové vsázky pomocí schématu in-out se zvýšila nerovnoměrnost výkonu v AZ. Zároveň se zvýšily nároky na optimalizaci palivové vsázky. Rozšířením výpočetní techniky a výpočetních kódů umožnilo vyvinout rychlejší a efektivnější algoritmy k optimalizaci palivových vsázek. Informace v této kapitole pochází ze zdrojů [7], [8], [9], [10], [11], [12] a [13].

Mnoho jaderných elektráren provozovaných ve světě (například v USA nebo Rusku) se optimalizací příliš nezabývá. Obvykle používají překládkové schéma out-in a kartogram palivové vsázky bývá zpravidla součástí dodávky paliva. Naopak v České republice je příprava palivových vsázek s mnohaletými zkušenostmi na velmi vysoké úrovni a na optimalizaci AZ je kladen velký důraz.

Optimalizace palivové vsázky je založena na postupné výměně pozic PK v aktivní zóně. Daný optimalizační algoritmus tak regeneruje vhodné kandidáty na optimální kartogram vsázky. Výsledné návrhy jsou následně předány výpočetnímu kódu, který provede neutronově-fyzikálních charakteristiky. Výsledkem je pak nalezení ideální palivové vsázky s neoptimálnějším poměrem mezi bezpečnostními požadavky během provozu a ekonomickým využitím paliva. V praxi však jdou tyto požadavky proti sobě. Z tohoto důvodu je nutné určit klíčové parametry, které charakterizují úspěšnost hledání vsázky. Prioritou při hledání vhodné vsázky je splnit bezpečnostní limity, které mají přednost před ekonomickým aspektem.

3.1 Transportní rovnice

Základ kolektivního chování neutronů v jaderných reaktorech je možné popsat pomocí transportní rovnice. Tato rovnice je také známá pod názvem Boltzmannova nebo kinetická rovnice. Transportní rovnice je obecná matematická formulace popisující rovnováhu neutronů. Obecně lze tuto rovnici napsat ve zjednodušeném tvaru:

$$\text{Vznik} - \text{Únik} - \text{Absorpce} = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (3.1)$$

přičemž pravá strana rovnice popisuje změnu hustoty neutronů za jednotku času. V celém tvaru je možné napsat transportní rovnici:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \varphi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, E, \tau) = S(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, E, \tau) - \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla \varphi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, E, \tau) - \sum_t(\mathbf{r}, E, \tau) \varphi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, E, \tau) \quad (3.2)$$

Rovnice udává přírůstky a úbytky počtu neutronů v dané jednotce objemu. Levá strana rovnice popisuje diferenciální hustotu neutronového toku. První člen na pravé straně rovnice (S) reprezentuje diferenciální hustotu neutronů z vnějšího zdroje, druhý člen ($-\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla \phi$) značí únik neutronů a třetí ($-\sum_t \phi$) úbytek neutronů vlivem absorpce. Rychlost neutronů je v rovnici zastoupena v , závislé proměnné zde představují prostorové souřadnice \mathbf{r} , směr $\boldsymbol{\Omega}$, energii E a čas τ . Metod pro řešení transportních rovnic je sousta, mezi nejčastěji používané patří tyto dvě:

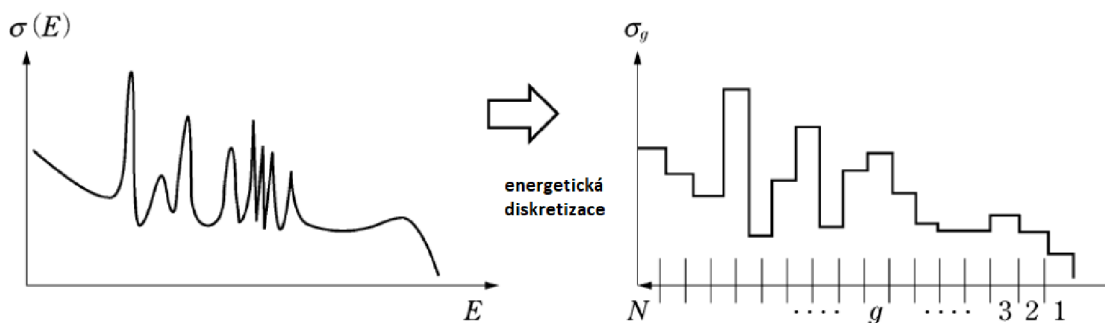
- Metoda P_n (spherical harmonic) řeší integro-diferenciální tvar transportní rovnice pomocí převodu do sférických souřadnic
- Metoda S_n (discrete ordinaires) diskredituje diferenciální tvar transportní rovnice, respektive její úhlové závislosti do specifických směrů

3.2 Deterministický přístup

Metody založené na deterministickém přístupu bývají založeny na principu částečného zjednodušení přijetím omezujících podmínek numerického výpočtu. Pro jednoduchá zadání jsou deterministické metody mnohem méně náročnější na výpočetní výkon v porovnání se stochastickými. Což je jeden z důvodů, proč deterministické metody byly vyvíjeny dříve. Pokud je řešený problém komplikovanější, počet rovnic v řešené soustavě narůstá. Při překročení určité složitosti zadání se vyplatí použít stochastické metody. Řešený úkol totiž bude méně náročný na výpočtový čas a výpočetní výkon.

Deterministické metody by se mohly při složitosti dnešních úkolů a požadovaných výkonech na výpočetní techniku jevit jako zbytečné nebo zastaralé. Pokud je ale řešený problém dostatečně zjednodušen a požadavky zvládnutelné, jsou ideální pro základní neutronové výpočty. Pro základní komplexní výpočty, jako jsou aktivní zóny reaktorů, jsou v podstatě jedinou možností výpočtu. Při použití deterministických metod je možné počítat s vysokou přesností výpočtů.

Deterministické metody jsou stále klíčové při výpočtech AZ, z tohoto důvodu se vývoj výpočtových metod přizpůsoboval tomuto použití. Zpočátku vývoje těchto metod se transportní rovnice řešily jako linearizované. Průběžně však došlo k přirozenému vývoji. Vlivem navýšení výpočetních výkonů a požadavků na přesnější výstupní hodnoty se začaly zjednodušovat závislosti veličin. Jeden z hlavních přístupů k řešení deterministických metod je založen na diskretizaci spojitých spekter. Spojité spektrum je nahrazeno konečným počtem prvků, respektive uzlových bodů. Diskretizace se týká energie neutronů, energetické závislosti účinných průřezů, polohy nebo směru pohybu neutronů. Nicméně i po diskretizaci bude nutné počítat sedm neznámých, výsledná hodnota je následně vztahena na spojitou oblast, která byla zjednodušena. Diskretizace spojitého spektra účinného průřezu v závislosti na energii je zobrazena na obrázku 3.1.

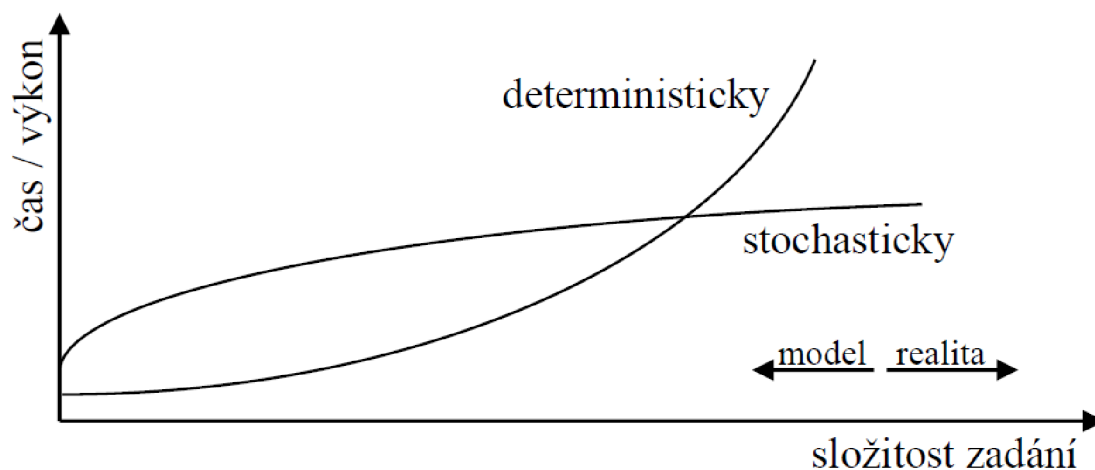


Obrázek 3.1 Diskretizace spojitého spektra účinného průřezu [9]

Směrová závislost veličin je často zanedbána. Tento předpoklad je základem řešení difuzní teorie. Difuzní rovnice předpokládají rychlost neutronu nezávislou na směru jeho pohybu. Zjednodušení ideálně splňuje homogenní nekonečné prostředí, tedy prostředí, které je vzdálené od neutronových zdrojů, absorbátorů a rozhraní. Diskretizace směrové závislosti je také možná pomocí rozdělení prostoru do několika směrů.

Významnou sférou ve zjednodušování je závislost veličin na energii, zvláště závislost účinných průřezů. Další důležitou součástí všech výpočetních kódů jsou knihovny jaderných dat. Tyto knihovny obsahují data, které jsou použity pro vstupní soubory výpočtu. Mezi jedny z nejdůležitějších dat patří hodnoty účinných průřezů v závislosti na energii, produkty reakcí nebo odchylky zpracovaných dat. Nejstarší vytvořená knihovna jaderných dat je americká ENDF, která je dostupná již v několika verzích. Dalšími knihovnami jsou například japonská JEFF, evropská JENDL a další. Porovnání

obou výpočetních metod z hlediska náročnosti na výpočetní výkon (čas) ve vztahu ke složitosti zadané úlohy je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Porovnání metod a jejich efektivity [10]

3.3 Stochastický

Stochastické metody jsou založeny na principu, který se velmi liší od deterministických metod. Komplexní řešený problém je rozdělen do velkého počtu náhodných opakovaných simulací. Výsledky všech simulací jsou zpracovány statisticky. Podstatou náhodné simulace je pozorování života každé částice po celou dobu jejího pohybu ve sledovaném prostoru a sledování jejího chování na základě materiálových vlastností daného prostředí. Poté, co sledovaná částice zanikne nebo unikne ze sledovaného prostředí, je vygenerována nová. Tento děj se neustále opakuje, zatímco probíhá nepřetržitý výpočet průměru požadované veličiny. Životní cyklus částice se také nazývá historie. Od výpočtu první historie je k dispozici hodnota hledané veličiny. Její hodnota se zpřesňuje s přibývajícím počtem historií a klesá tak chyba jejího výpočtu. Pravděpodobnostní metody dovedou simulovat i velmi složité geometrie, které jsou téměř shodné s reálnými. Pokud je zvolená geometrie příliš komplexní, je řešený problém velice náročný na výpočetní výkon, respektive čas. V takovém případě, jsou stochastické metody mnohem efektivnější než deterministické. Na tomto principu pracují například výpočetní kódy MCNP a Serpent.

Nejistoty stochastických metod jsou dány zpracováním statistických dat, což znamená že při vyšším počtu provedených výpočtů nejistoty klesají. Velikost nejistoty je (z matematického pohledu) nepřímo úměrná druhé mocnině celkové hodnoty provedených simulací. Prakticky je celkový výpočet výrazně prodloužen, v případě že je žádána vysoká přesnost výsledku. Pokud má být nejistota snížena na polovinu, musí být počet provedených historií čtyřnásobný.

Při zpracování a zejména při interpretaci vypočtených dat stochastickou analýzou je nutné věnovat pozornost hodnocení výsledků. Dosažením velmi malé nejistoty při výpočtu může získaný výsledek vypadat velmi přesně. Avšak je nutné brát ohled na preciznost simulovaného modelu v porovnání s reálným. Při zjednodušení vstupního modelu (což v praxi pokaždé) nemusí být výsledek přesný, přestože je nejistota nízká. Z tohoto důvodu je nutné najít optimální poměr mezi přesností a precizností. Při krátkém výpočtu precizního modelu je výsledek velmi nepřesný. Stejně tak nedává smysl simulovat příliš zjednodušený model s dlouhým časem výpočtu.

4. VÝPOČETNÍ KÓD MOBY-DICK

Výpočetní program MOBY-DICK je první kód vyvinutý v České republice, který je určený ke stanovení neutronově-fyzikálních charakteristik. Program MOBY-DICK byl vyvinut společností ŠKODA JS a.s. mezi lety 1975-1980. Za dobu své existence je tento program průběžně inovován a udržován. Kód MOBY-DICK byl inspirován ruským optimalizačním kódem BIPR. Výhodou výpočetního kódu BIPR je jeho univerzálnost použití, avšak jeho nevýhodou je značný konzervativní přístup. Výstupní hodnoty totiž byly s vysokými bezpečnostními rezervami technických a fyzikálních parametrů.

Z formálního hlediska je program MOBY-DICK rozdělen na dva bloky. Na neutronově-fyzikální blok (NF-blok) a na termo-hydraulický blok (TH-blok). Tato kapitola vyhází ze zdrojů [2], [4] a [14].

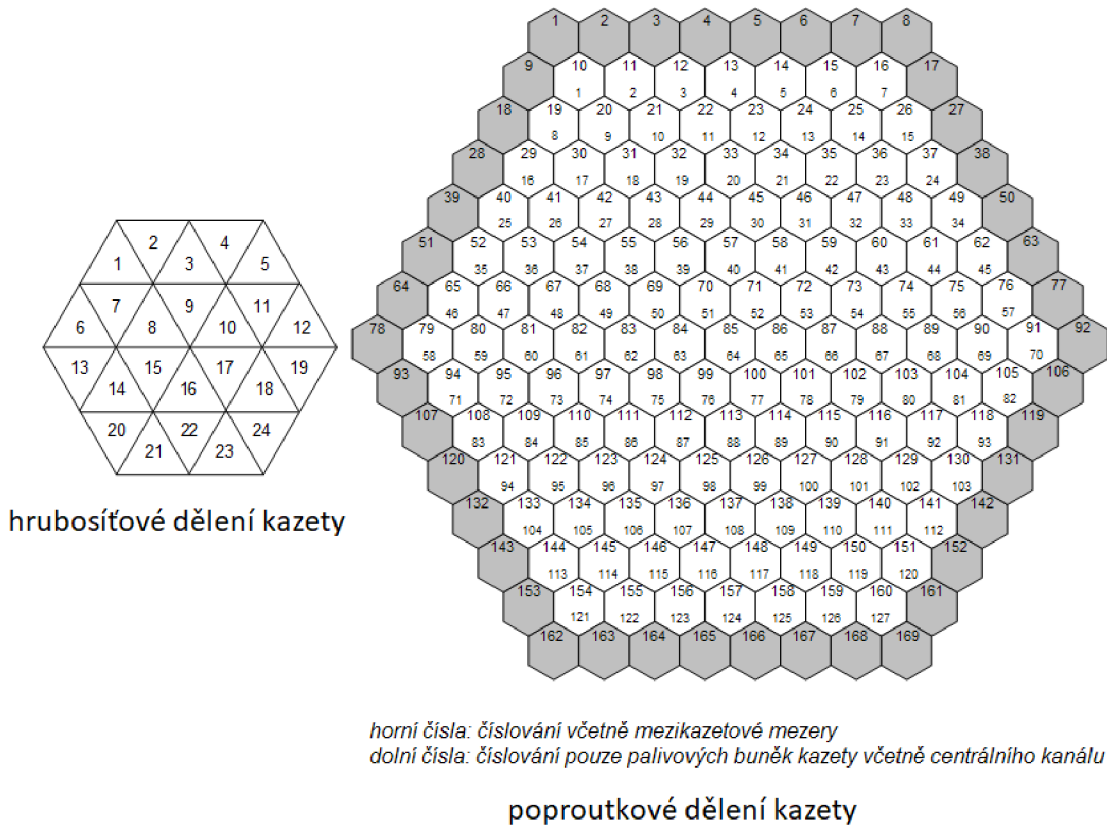
4.1 Neutronově-fyzikální blok

Základ NF-bloku je tvořen moduly, které diferenčně řeší více-grupové soustavy difuzních rovnic. Moduly lze použít na 2D a 3D výpočty pro dva typy sítě. Prvním typem je trojúhelníková síť. Bývá používána pro hrubosíťové výpočty AZ s rozdělením PK na $6k^2$ elementů (rovnostanných trojúhelníků). Prakticky tak program s krokem dělení 1 rozdělí kazetu na 6 elementů, s krokem 2 na 24 a tak dále. Reálně se u hrubosíťového výpočtu používá maximální krok dělení kazety 3 (54 elementů). Jemnější krok dělení by neodpovídal reálnému rozdělení kazety na palivové proutky. Nepřesnost výpočtu by tedy byla vyšší než je požadovaná. Zároveň by se zvyšoval výpočetní čas. Druhým typem je hexagonální síť, používána pro poproutkové výpočty AZ v regulární síti pravidelných šestiúhelníků. Dělení kazety zde odpovídá rozdělení na jednotlivé palivové proutky. Rozdělení palivové kazety oběma způsoby je zobrazeno na obrázku 4.1.

Mimo diferenčního řešení je možné použít 2 a 4grupový nodální algoritmus, kdy je modul (subrutina) pro výpočet toků nahrazen modulem HanKa. Pomocí těchto modulů je možné zpracovávat různé druhy manipulací s palivem. Například zavážení kazet ze skladu vyhořelého paliva nebo rotaci kazet během překládky.

Moduly určené pro výpočet konstant umožňují snadno vyměnit knihovny parametrizovaných difuzních dat. Difuzní data jsou připraveny mikrovýpočtem pro poproutkové i hrubosíťové výpočty. Data se mohou lišit formou aproximačních

vztahů, výběrem parametrů, typem a rozsahem zahrnutých hraničních podmínek apod. Při řešení třírozměrného výpočtu umožňuje program formálně nerovnoměrné axiální dělení (dělení po výšce). Avšak kvůli specifčnosti při pohybu paliva v axiálním směru je pro tuto verzi nutné zadávat rovnoměrné dělení. Vzhledem k použité knihovně je maximální počet dělicích bodů 42.



Obrázek 4.1 Porovnání dělení kazet v programu MOBY-DICK [16]

Kromě přímého trojrozměrného výpočtu celé AZ je možné použít dvojrozměrný výpočet, nebo tzv. rekonstrukci. Při tzv. rekonstrukci je možné použít hrubosíťový výpočet (v 6 nebo v 24 bodech na kazetu), nebo nodální, při kterém se poproutkové hodnoty výkonu dopočítávají. Pro 2D a 3D výpočty lze použít různé varianty jejich výpočtů (hrubosíťových i poproutkových), včetně jejich kombinací. Jeden ze způsobů výpočtu je simultánní 3D hrubosíťový výpočet spojený s 2D poproutkovým výpočtem v jednom axiálním řezu. Podle výkonů kazet z hrubosíťového výpočtu jsou normovány hodnoty výkonů v jednotlivých proutcích.

Dále je součástí NF-bloku teplotní modul zpětnovazební modul. Tento modul zahrnuje výpočty teploty paliva, hustoty chladiva a teploty chladiva (pomocí entalpie).

Teplotu paliva lze v programu MOBY-DICK vypočítat dvěma způsoby. Oba postupy se liší určením způsobu výpočtu součinitele přestupu tepla mezi palivem a palivovým pokrytím. Při prvním způsobu (také označován jako „původní“) je součinitel počítán jako polynom 4. stupně v závislosti na lineárním výkonu. V druhém případě je součinitel aproximován pomocí „spline“ dle tabulky v závislosti na vyhoření a lineárním výkonu. V současné době je tento způsob ve fázi testování.

Zpětnovazební modul je primárně určen k zahrnutí zpětných vazeb. Tento modul byl sjednocen s modulem v TH-bloku ve smyslu použitých funkcí vlastnosti vody. Výstupem TH-bloku jsou pak podrobnější termohydraulické výpočty.

4.2 Termo-hydraulický blok

Termo-hydraulický blok zpracovává výsledky neutronově-fyzikálního výpočtu distribuce výkonu v AZ. Následně pomocí stacionárních výpočtů určí termohydraulické charakteristiky AZ, jednotlivých PK a nejzatíženějších subkanálů reaktoru VVER-440. Výsledky jsou použity ke kontrole termohydraulických kritérií, kterými je zajištěn bezpečný provoz reaktoru. Pokud jsou tyto kritéria splněna, jsou dále využita k sestavení „Tabulky režimů“, ve které jsou uvedeny dovolené ohřevy všech palivových kazet. Dále tyto výsledky slouží ke kontrole pokazetové a poproutkové nerovnoměrnosti výkonu a ke kontrole NF kritérií maximálního lineárního výkonu.

Stejně jako v NF-bloku lze v TH-bloku provádět hrubosíťové i poproutkové výpočty. Hrubosíťový výpočet lze použít pro kontrolu kritéria vstupní a výstupní teploty chladiva z reaktoru a z jednotlivých kazet. Dále je možné vypočítat rezervu do krize varu (Departure from Nucleate Boiling Ratio – DNBR), což je jeden z hlavních bezpečnostních parametrů provozu reaktoru. Tento výpočet však je pouze přibližný a málo konzervativní. Důvodem nízké přesnosti jsou použité tepelné toky, které odpovídají středně zatíženému místo nejzatíženějšího prouku.

V případě použití poproutkové distribuce je možné vypočítat teplotu na výstupu nejzatíženějšího subkanálu a horkého subkanálu. Dalšími veličinou, kterou je možné určit při použití poproutkové distribuce je DNBR v subkanálu s limitním výkonem prouků a v nejzatíženějším subkanálu. Výpočetní program je možné použít i pro krátkodobou kinetiku se změnou termohydraulického modulu umožňující rychlé změny (například vystřelení tyče apod.).

Omezení komplexnosti řešeného problému jsou dána strukturou programu nebo dimenzováním polí. Důležitými parametry programu pro výpočet jsou:

- Počet dělicích bodů na kazetu je deklarován dynamicky
- Symetričnost AZ 120° a 60° rotační, 60° a 30° zrcadlová nebo plná zóna
- Max. počet PK v daném segmentu symetrie je 500
- Max. počet dělicích bodů po výšce je sice 250, avšak vzhledem k připojené knihovně prakticky 42
- Max. počet různých materiálů v AZ je deklarován dynamicky
- Počet energetických neutronových grup je 2÷10
- Max. počet různých materiálů v radiálním reflektoru je 20
- Max. počet složek axiální materiálové struktury je 9
- Max. počet různých materiálů v kazetě je 200
- Max. počet kazetových struktur je deklarován dynamicky
- Max. počet regulačních grup je 99

Výše zmíněné číselné hodnoty jsou parametry, které jsou zadávány při kompilaci programu. Z praktického hlediska byly dané hodnoty zvoleny jako dostačující. V případě potřeby je možné zadané hodnoty změnit. Konkrétně změnou příslušných parametrů a rekompilací programu. Počty dynamicky deklarovaných proměnných jsou z hora omezeny pouze hardwarovou konfigurací daného počítače.

4.3 Metoda řešení výpočtu

Jak již bylo zmíněno, program MOBY-DICK používá pro výpočty toku neutronů soustavu několika-grupových difúzních rovnic. Difúzní rovnice pro reálné toky je ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 & - \operatorname{div} [D^g(\vec{r}, t) \operatorname{grad} \Phi^g(\vec{r}, t)] + [\Sigma_r^g(\vec{r}, t) + D^g(\vec{r}, t) B^{2g}(\vec{r}, t)] \Phi^g(\vec{r}, t) = \\
 & \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t) \Phi^h(\vec{r}, t) + \frac{\chi^g(\vec{r}, t)}{k_{\text{eff}}} S(\vec{r}, t) + Q^g(\vec{r}, t)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

kde $g = 1, 2, \dots, G$ je číslo energetické grupy, G je celkový počet energetických grup

$$S(\vec{r}, t) = \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_f^h(\vec{r}, t) \Phi^h(\vec{r}, t) \quad \dots \quad \text{štěpný zdroj}$$

$Q^g(\vec{r}, t)$... Vnější neutronový zdroj do dané grupy

k_{eff} ... multiplikační koeficient

$D^g(\vec{r}, t)$... difúzní koeficient

$\Sigma_r^g(\vec{r}, t), \Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t), \nu \Sigma_f^h(\vec{r}, t)$... účinné průřezy pro absorpci,
rozptyl a štěpení

$\chi^g(\vec{r}, t)$... štěpné spektrum

$\Phi^g(\vec{r}, t)$... neutronový tok (tzv. reálný tok)

$B^{2g}(\vec{r}, t)$... buckling v 1D a 2D výpočtu, v 3D výpočtu je roven 0

Difúzní rovnici je také možné jako rovnici pro sdružené toky. V takovém případě má tvar:

$$-div\left[D^g(\vec{r}, t) grad \Phi^{*g}(\vec{r}, t)\right] + \left[\Sigma_r^g(\vec{r}, t) + D^g(\vec{r}, t) B^{2g}(\vec{r}, t)\right] \Phi^{*g}(\vec{r}, t) =$$
$$\sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \Sigma_s^{g \rightarrow h}(\vec{r}, t) \Phi^{*h}(\vec{r}, t) + \frac{\nu \Sigma_f^g(\vec{r}, t)}{k_{eff}} S^*(\vec{r}, t) + Q^{*g}(\vec{r}, t) \quad (4.2)$$

kde $S^*(\vec{r}, t) = \sum_{h=1}^G \chi^h(\vec{r}, t) \Phi^{*h}(\vec{r}, t)$... štěpný zdroj

$\Phi^{*g}(\vec{r}, t)$... sdružený tok

$Q^{*g}(\vec{r}, t)$... vnější zdroj pro sdružený problém

Tyto rovnice jsou následně převedeny pomocí metody konečných diferencí na tvar, který je řešitelný numericky.

4.4 Popis vstupních a výstupních souborů

Vstupní soubory jsou většinou pojmenovány podle určitého kódu. Příkladem je vstupní soubor s názvem f3c20, kde symbol f znamená, že se jedná o poproutkový výpočet. Číslo 3 udává číslo bloku (v tomto případě 3. výrobní blok EDU), c značí cyklus a 20 označuje 20. kampaň. Ve vstupním souboru je nutné dodržet formátování. Tedy každý příkaz a každá mezera musí být přesně zapsána. Některé příkazy a mezery nelze psát jiným

než předem učeným způsobem. Pokud je potřebné, lze ve vstupním souboru psát poznámky za určité příkazy, nebo i na celý řádek. Poznámky se identifikují znakem „!“ . Vše co je napsáno za znakem „!“ program nebere v potaz a automaticky přeskočí na další řádek. Popis vstupního souboru je na obrázku 4.2.

Výstupních souborů je několik typů. Mezi základní patří soubor typu s koncovkou D, M a T (například AAA.D, AAA.M...). Kombinace prvních tří písmen je výstupnímu souboru přiděleno automaticky podle abecedy. Koncovka D znamená že výstupní soubor opíše vstupní soubor, ze kterého se načítají vstupní data. Koncovka T otiskne soubor s tabulkami dat pro každý časový krok a jejich souhrnné hodnoty. Tabulky konkrétně obsahují čas mezi překládkami, parametry primárního okruhu (tlak, vstupní teplota, ...), použité zpětné vazby, koncentrace kyseliny borité a další. Soubor typu M v základním nastavení zobrazí mapy rozložení výkonu a vyhoření v AZ. Dále je možné pomocí klíčových slov za příkazem RESULTS zobrazit další dodatečné mapy. Například pomocí příkazu POWER-2D se ve výstupním souboru M otisknou mapy s průměrnými výkony elementů kazet. Příkaz POWER-AX otiskne průměrné výkony axiálních vrstev kazet. Klíčové slovo BURN-2D tiskne průměrné vyhoření elementů všech kazet. Otisk výsledné mapy je na obrázku 4.3, kde konkrétně pro příkaz BURN-2D je pro ukázkou je zobrazeno vyhoření palivových proutků v rámci jedné palivové kazety.

```

TRAP      GOARCHIVED klíčové slovo pro druh výpočtu; archivace výpočtu
RESULTS  B  určení výstupních dat - typ výsledku
# symbol ukončující konkrétní blok
WDDU2022 CONS042      použité knihovny dat;
WSDU2022      poproutkový výpočet
finemesh
#
ICALCZD   2
BIPROU   KN  CQ  K3  KM      zadání vlastního výpočtu
DB3C01ST XC  NEW          PW      TI  200.QM 8321.CB  8.70PR 12.3-
                             PN 1375.UN      3CY      1
HEIGHT-R      249.900 42  zadání výšky aktivní zóny a její dělení
NO REFL.      zadání reflektoru
CORE MAP TROT. 60      mapa kazetového uspořádání AZ
2001  1002  2003  2004  1005  1006  2007  2008  3009  2010
      2011  1020  2028  2035  2042  1048  1053  3057  3059
      1012  2021  1029  1036  2043  2049  3054  3058
      2013  1022  2030  1037  1044  1050  3055
      2014  1023  1031  2038  2045  3051  3056
      2015  2024  1032  2039  2046  3052
      1016  2025  1033  3040  3047
      1017  3026  3034  3041
      3018  3027
      3019
*
RCCG MAP T 7
7 0 0 5 0 0 6 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 2 0 0 4 0
0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0
0 0 3 0 0
0 0 0 0
0 0
0
*
RCCINS.N - 2 -12 238
190 6
190 7
polohy HRK
ASSEMBLY
SUR16ORI 10331050
SUR24ORI 20012004200720102030
SUP16ORI 1002-0321034-0491053
SUP24ORI 200320082011-0292035-049
SUP36ORI 3009-059
určení materiálů kazet
#
DB3C0101 XC DB3C01ST MP- PW 1375.TI 265.406 190.07 190.
TI-STEPR F 1 2. 6 3. 1 20.
#
DB3C0101 XC DB3C0101 MP-
TI-STEPR F 50 10.
#
DB3C01S1 XC DB3C0101 MP- 06 214.07 214.
TI-STEPR F 3 10.
#
DB3C01S2 XC DB3C01S1 MP- 06 250.07 250.
TI-STEPR F 3 10.
#
DB3C01P1 X DB3C01S2 MP- TI 265.0
TI-STEPR F 1 -341.6
#
DB3C01EX X DB3C01P1 MP- PW AC
TI-STEPR 1 60.
#
STOP
zadání navazujících výpočtů

```

Obrázek 4.2 Popis ukázkového vstupního souboru programu MOBY-DICK

```

BURNUP - AXIALLY AVERAGED
ASSEMBLY NO.( MD) 7 6711
ASSEMBLY NO.(BIPR) 2
AVERAGE= 27268.46

      0      0      0      0      0      0      0      0
0 27495 28187 27945 27902 28030 28339 27661      0
0 28135 25199 28118 28036 28083 28253 25391 28328      0
0 27782 27997 27103 26894 26877 26991 27286 28240 28010      0
0 27611 27784 26761 26417 26394 26445 26566 26998 28083 27899      0
0 27618 27712 26625 26273 26328 26506 26432 26479 26923 28081 27992      0
0 27809 27779 26642 26225 26406 27306 27360 26567 26493 27011 28239 28304      0
0 27036 24839 26863 26273 26255 27281      0 27392 26477 26611 27319 25400 27659      0
0 27719 27760 26655 26249 26431 27331 27387 26600 26538 27074 28325 28406      0
0 27504 27703 26658 26318 26373 26553 26487 26552 27024 28226 28180      0
0 27507 27794 26813 26477 26456 26512 26651 27117 28255 28135      0
0 27699 28025 27165 26963 26948 27077 27404 28412 28248      0
0 28084 25240 28187 28108 28164 28359 25539 28537      0
0 27485 28244 28017 27978 28122 28465 27830      0
      0      0      0      0      0      0      0      0

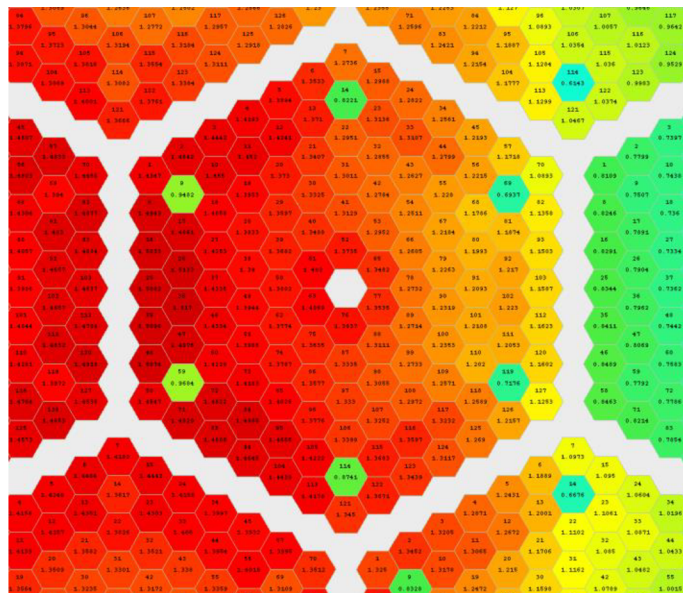
```

Obrázek 4.3 Mapa ukázkové kazety z výstupního souboru MOBY-DICK

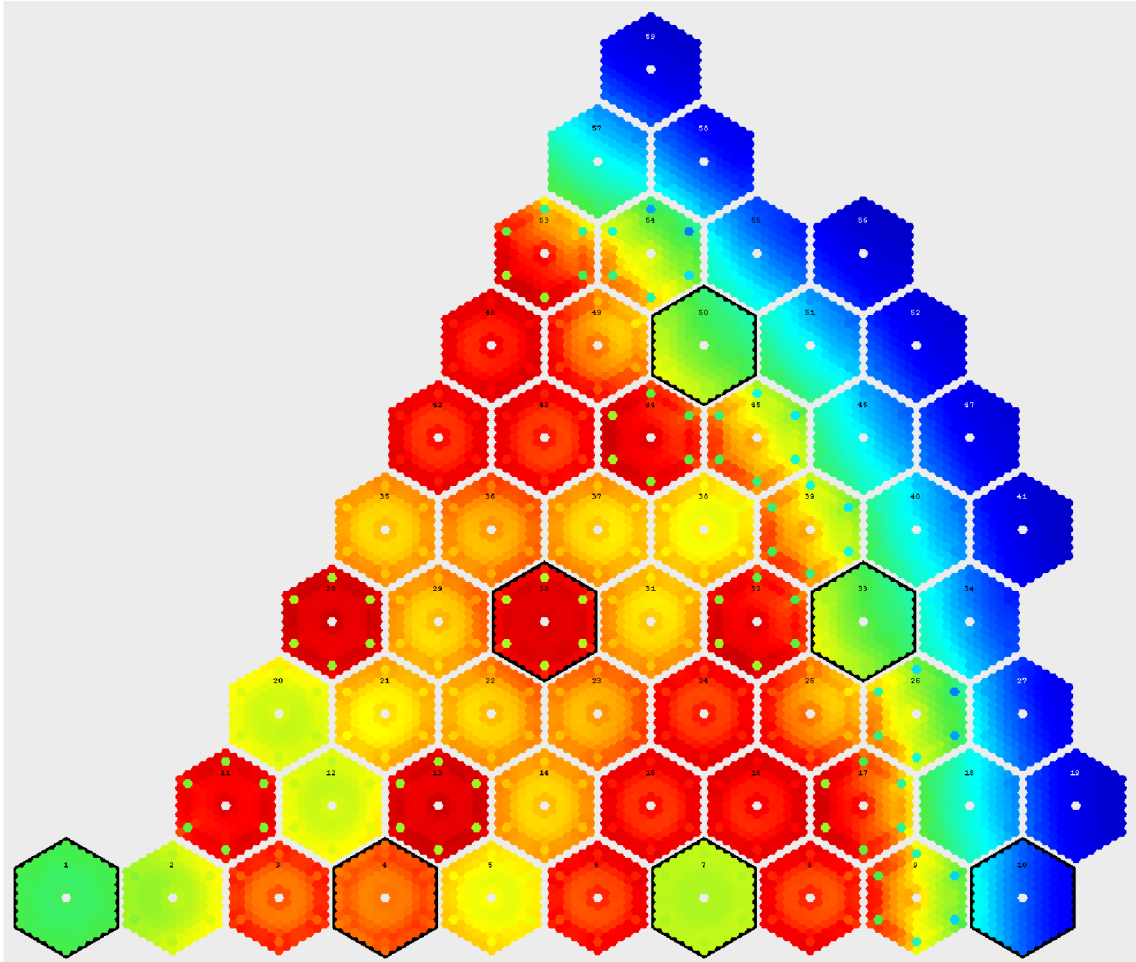
Kromě těchto výstupních souborů se automaticky vytvoří další soubory. Například soubory typu KONF, které jsou ve dvou variantách - KNOFBU a KNOFPW. KNOFBU obsahuje 3D distribuci vyhoření a soubor KNOFPW obsahuje 3D distribuci výkonu. Dále například soubor altM, který slouží jako rozšíření mapového souboru M, altB, který zobrazí vyhoření všech typů pro všechny kazety i s jejich maximálními hodnotami a další soubory. Další výstupní soubory, které se nevytvoří automaticky se volí v konfiguračním souboru FILESMD.CONF.

5. ANALÝZA NESYMETRICKÉHO VYHOŘÍVÁNÍ KAZET

Jak již bylo zmíněno, výkon v jednotlivých proutcích palivové kazety je různý. Znatelný rozdíl je v oblastech s velkými gradienty výkonu. Typickým příkladem je okraj aktivní zóny, kde z jedné strany kazety je pouze chladivo a z druhé strany kazeta s relativně velkým výkonem. Na rozdílné výkony palivových proutků mají také určitý vliv typy kazet, které jsou okolo dané PK (případně HRK). Pokud je z jedné strany čerstvá kazeta, výkon v proutků v blízkosti této strany bude vyšší. Naopak pokud je sousedící kazeta v AZ několikátým rokem, výkon proutků na této straně bude nižší. V palivové kazetě tak vznikne již zmíněný náklon. V oblastech prudkých změn výkonu jednotlivých proutků se vyhoření jednotlivých palivových proutků může výrazně lišit. Vliv okolních kazet na nerovnoměrné rozložení je patrný z obrázku 5.1. Na obrázku 5.2 je výseč šestiny AZ pro ukázkou různých výkonů proutků v rámci celé aktivní zóny. V palivových kazetách na okraji AZ je možné vidět již zmíněný náklon. V praxi se tzv. náklon vyhoření řeší rotací kazet, která je popsána v následující části práce. Tato kapitola vychází ze zdrojů [14], [15], [16], [17].



Obrázek 5.1 Vliv okolních kazet na náklon výkonu



Obrázek 5.2 Relativní výkonové proučkové z 28. kampaně

Jak již bylo zmíněno, náklon je definován pomocí hodnot relativních výkonů. Relativní výkon je veličina, kterou je možné sledovat a která je zároveň limitní hodnotou při výpočtu palivových vsázek. Relativní výkon také bývá označen jako poproučkový koeficient nerovnoměrnosti vývinu energie c_q . Tento koeficient je definován jako podíl výkonu palivového proučku ku střednímu výkonu všech proučků.

Dalším sledovaným parametrem je lineární tepelný výkon palivového proučku, a také lineární výkon palivové tyče. Tento parametr udává výkon palivového proučku na jednotku délky.

Střední hodnota lineárního výkonu je definována jako:

$$\overline{q_H} = \frac{P}{n_K n_{TH}}, \quad (5.1)$$

kde P je tepelný výkon reaktoru za nominálního stavu, n_K je počet palivových kazet v AZ, n_T je počet palivových proutků v kazetě a H je výška aktivní zóny. Po dosazení parametrů reaktoru VVER-440 vyjde střední hodnota lineárního výkonu:

$$\bar{q}_H = \frac{P}{n_K n_T H} = \frac{1444 \cdot 10^6}{349 \cdot 126 \cdot 2,5} = 13,135 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.2)$$

Je ale nutné znát maximální hodnotu lineárního výkonu. Hodnotu je možné vyjádřit pomocí součinitele rovnoměrnosti vývinu tepla. Praktičtější však bude použit jeho převrácenou hodnotu, tedy koeficient nerovnoměrnosti, což je zmíněný relativní výkon. Zde je uvažován relativní výkon palivového proutku c_q :

$$c_q = \frac{1}{\mu_r} = \frac{q^{max}}{\bar{q}} \quad (5.3)$$

Nyní lze z rovnice (5.3) vyjádřit maximální lineární výkon:

$$q^{max} = c_q \cdot \bar{q} \quad (5.4)$$

Po dosazení relativního výkonu do rovnice (5.4) pro palivo Gd-2M vyjde:

$$q^{max} = c_q \cdot \bar{q} = 1,55 \cdot 13,135 \cdot 10^3 = 20,359 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1},$$

což je hodnota lineárního výkonu pro relativní výkon $c_q = 1,55$. Relativní výkon 1,55 je limitní hodnota pro palivo Gd-2M. Společně s relativním výkonem palivového proutku je lineární výkon limitní hodnota pro bezpečný provoz. Oba tyto parametry se kontrolují během tzv. bezpečnostního hodnocení palivové vsázky.

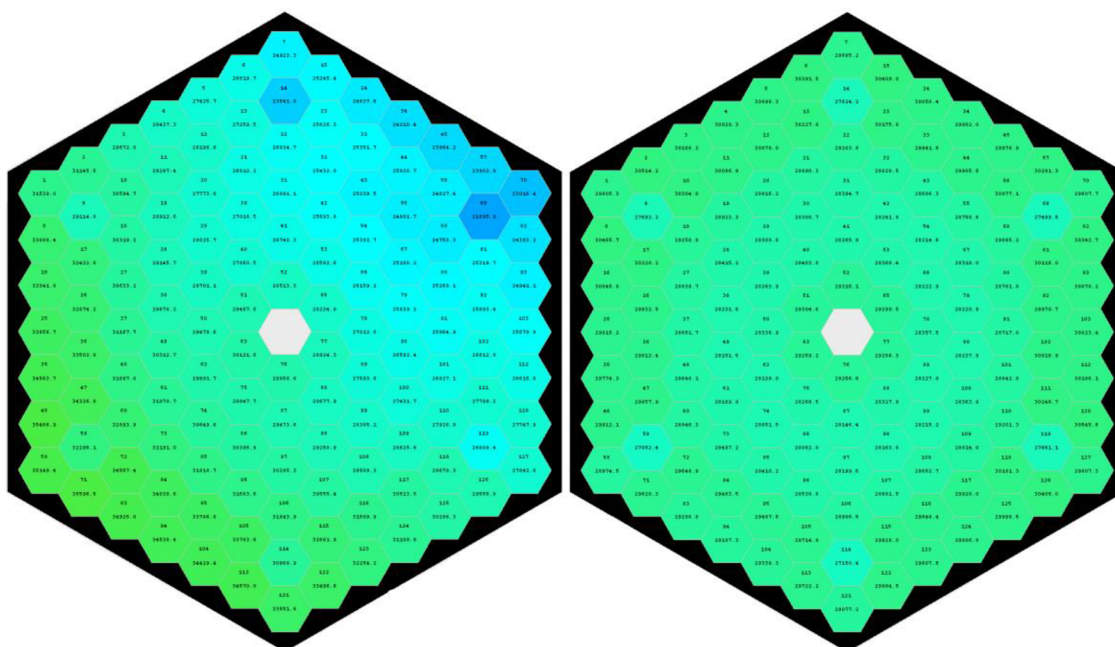
5.1 Rotace palivových kazet

Řešením, jak snížit náklon palivové kazety a zlepšit tak rovnoměrnost vyhořívání palivových proutků je již zmíněná rotace palivových kazet. Rotovat kazetu je možné od druhého až do posledního roku jejího zavezení do AZ. Rotovat čerstvou kazetu by nadávalo smysl. Většinou se rotace provádí posledním rokem, kdy bývá náklon nejvyšší za celou dobu pobytu kazety v AZ. Tyto kazety se zpravidla zaváží na okraj aktivní zóny. Důvodem zavážení nejstarších PK na okraj je již dříve zmíněná

nízkoúniková vsázka. Mimo rotaci posledním rokem se také občas rotují novější kazety (kromě čerstvých), například kazety zavezené druhým rokem. U těchto kazet by mohly mít krajní proutky z jedné strany vyšší výkon než limitní. Rotací je možné tento výkon snížit. Dále je možné rotovat kazetu, která byla v předchozích kampaních vyvezena do bazénu skladování a později byla zavezena zpět do AZ. Ale také je možné nalézt takové kazety, které nebyly po celou dobu obytnosti v AZ rotovány ani jednou.

Ve skutečnosti zavážecí stroj nedokáže rotovat palivovou kazetu jejím otočením, není k tomu uzpůsoben. Prakticky se rotace provádí tak, že je kazeta zavezena do jiné šestiny aktivní zóny. Konkrétní šestina se zvolí podle požadované rotace (0° , 60° , ...). Většinou se kazety rotují o 180° (stupeň rotace 3). Někdy je však výhodné rotovat kazetu o jiný stupeň rotace.

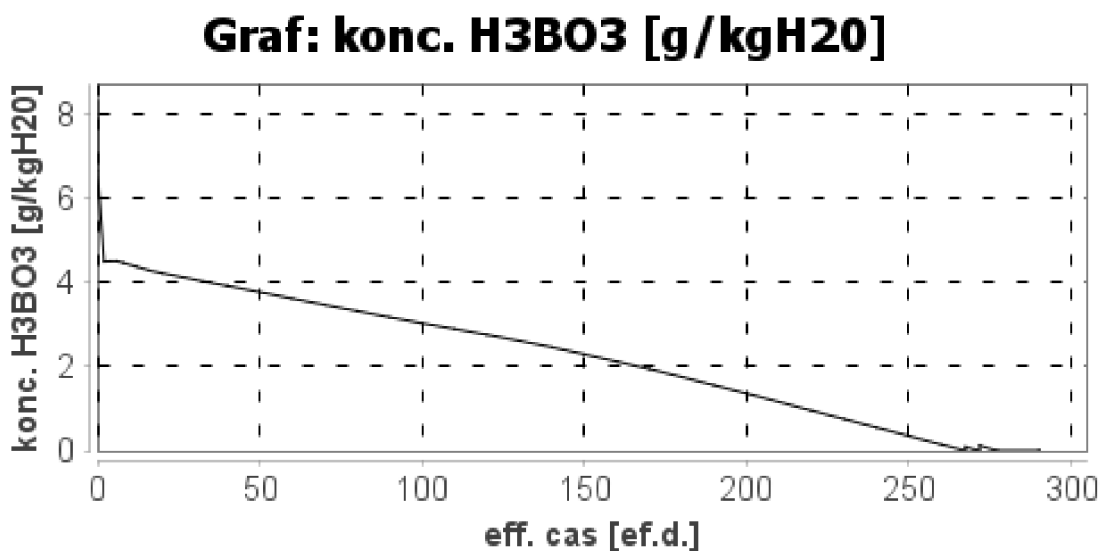
Dalším benefitem rotace je pozitivní vliv na délku kampaně. Vlivem rotace je možné prodloužit kampaň v řádech dnů. Konkrétní výsledky jsou porovnány níže. Rozdíl vyhoření palivových proutků mezi rotovanou a nerotovanou kazetou je zobrazen na obrázku 5.3. HRK na obrázku 5.3 je z 35. kampaně na biprovské pozici 50.



Obrázek 5.3 Kazeta bez rotace (nalevo), rotovaná kazeta (vpravo)

5.1.1 Vliv rotace na délku kampaně

Rozdíl mezi délkou palivové kampaně při použití rotace a bez použití rotace je možné vidět na konci bórové kampaně (End Of Boron). Reálně to znamená, že v palivu je stále dostatečné množství štěpného materiálu pro provoz bloku. Počet dní se odvíjí od velikosti zbylého množství kyseliny borité, respektive kdy je koncentrace kyseliny borité nulová. Pokud by se ale koncentrace kyseliny borité snížila na nulu před plánovaným koncem kampaně, rotace by v takovém případě nebyla vhodně provedena. Průběh koncentrace kyseliny borité v chladiči primárního okruhu je zobrazen na obrázku 5.4. Graf byl vygenerován programem MapView.



Obrázek 5.4 Koncentrace kyseliny borité během 30. kampaně

Jak již bylo zmíněno, při vhodně provedené rotaci je možné prodloužit kampaň v řádech dnů. Porovnání délky efektivních dnů je v tabulce 5.1. Všechny výpočty byly provedeny pro 3. výrobní blok EDU. Kromě 12. kampaně se délka cyklu vždy prodloužila. Ve 12. kampani zůstala délka v podstatě stejná. Prodloužení kampaně se také odvíjí od počtu rotovaných kazet, kterých v průběhu let přibývalo. Nejvýrazněji byla prodloužena 32. Kampaň, u které vícenásobná rotace umožnila provozovat reaktor až o 1,58 efektivních dní déle. V tabulce jsou vynechány kampaně 6 až 11, při kterých nebyla rotace použita.

Tab. 5.1 Porovnání délky kampaní s rotací a bez rotace

Kampaň (-)	Délka nerotované kampaně (d)	Délka rotované kampaně (d)	Rozdíl kampaní (d)
5	270,30	270,83	0,537
12	280,45	280,42	-0,037
13	276,91	277,39	0,483
14	288,95	289,70	0,747
15	289,34	290,15	0,804
16	281,24	281,89	0,648
17	274,76	275,42	0,661
18	274,06	274,72	0,668
19	273,34	274,06	0,719
20	263,49	263,75	0,261
21	295,81	297,13	1,320
22	293,57	294,44	0,861
23	296,21	297,21	0,997
24	272,48	273,84	1,367
25	282,94	283,81	0,865
26	343,92	344,87	0,941
27	311,41	312,33	0,922
28	321,37	321,97	0,606
29	328,60	329,27	0,673
30	266,20	267,43	1,230
31	350,40	351,63	1,229
32	349,88	351,46	1,579
33	368,70	370,03	1,336
34	396,02	397,13	1,110
35	388,83	390,08	1,246

Dny v tabulce 5.1 jsou vztaženy ke dni, kdy koncentrace kyseliny borité dosáhne nulové hodnoty. Tento den je označován jako konec bórové kampaně. Avšak reaktor nebývá v tento den odstaven. Obvykle je dále provozován na teplotním a výkonovém efektu. Nejprve se postupně vytáhnou HRK z AZ až de jejich horní koncové polohy (250 cm). Poté je reaktor provozován na výkonovém a teplotním efektu. Tento efekt se také nazývá stretch-out (End Of Rod).

V průběhu provozu na výkonovém a teplotním efektu je postupně snižován tlak v hlavním parním kolektoru. Zároveň se zlepší odvod tepla z primárního okruhu. Díky tomu se sníží vstupní teplota reaktoru a tím tedy i zpětná vazba od teploty moderátoru.

Vlivem vnesení této kladné reaktivity je možné provozovat reaktor na nominálním výkonu dalších přibližně pět dnů. Následně je nutné snižovat i výkon rychlostí 0,7 % nominálního výkonu za den. Snižování teploty totiž dále není schopné plně kompenzovat vyhořívání. Celkově je možné provozovat reaktor na kombinaci teplotního a výkonového koeficientu zhruba 20 dní, výjimečně i okolo 40 dní. Poté je reaktor odstaven.

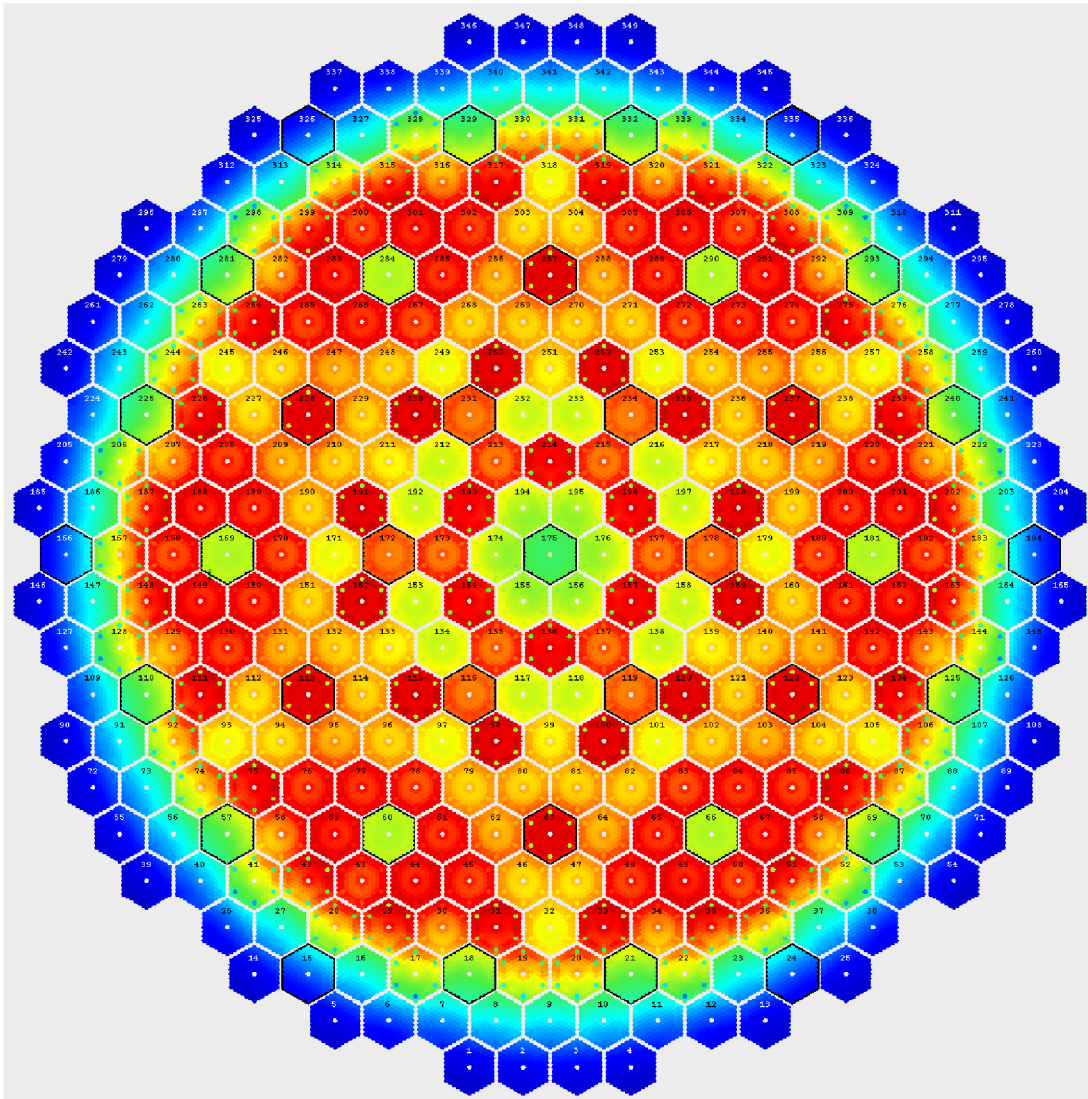
5.1.2 Vliv rotace na relativní a lineární výkon

Jak již bylo zmíněno, rotace má pozitivní vliv na snížení relativního výkonu nejzatíženějších proutků. Nejzatíženější proutky jednotlivých kampaní bez rotace a s rotací jsou v tabulce 5.2. Z tabulky je zřejmé, že maximální relativní výkon se rotací skutečně snížil. Pouze výjimečně došlo ke zhoršení. V několika případech se také změnila kazeta obsahující nejzatíženější palivový proutek. Červeně jsou označeny kampaně u kterých se maximální relativní výkon palivového proutku zhoršil (kampaně 5, 15 a 29). Rozdílné hodnoty relativních výkonů palivových proutků je možné vidět na obrázku 5.5 kde je zobrazena radiálně rozdělená AZ.

Nejzatíženější palivové proutky z pohledu lineárního výkonu jsou v tabulce 5.3. Maximální lineární výkony byly vypočítány z maximálních relativních výkonů (Tab. 5.2) dosazením do rovnice 5.4. Hodnota lineárního výkonu pro 20. až 35. kampaň byla ověřena v grafem s limitní lomenou křivkou. Grafy jsou na obrázku 5.7 až 5.38.

Tab. 5.2 Relativní výkony palivových prouků s rotací a bez rotace

Číslo kampaně (-)	Max. c_q bez rotace (-)	Kazeta s max. c_q (-)	Max. c_q s rotací (-)	Kazeta s max c_q (-)
5	1,511	28	1,531	2
12	1,546	13	1,516	36
13	1,568	28	1,522	13
14	1,534	2	1,521	2
15	1,498	25	1,502	25
16	1,511	22	1,504	22
17	1,550	25	1,550	49
18	1,551	21	1,517	49
19	1,562	45	1,562	45
20	1,560	21	1,555	48
21	1,553	15	1,552	15
22	1,534	14	1,526	35
23	1,528	24	1,515	53
24	1,580	17	1,579	17
25	1,572	14	1,572	14
26	1,559	17	1,557	53
27	1,560	21	1,552	21
28	1,598	15	1,580	13
29	1,582	13	1,584	13
30	1,576	24	1,547	17
31	1,635	11	1,631	35
32	1,648	13	1,640	13
33	1,641	35	1,634	35
34	1,649	35	1,646	35
35	1,625	35	1,618	14



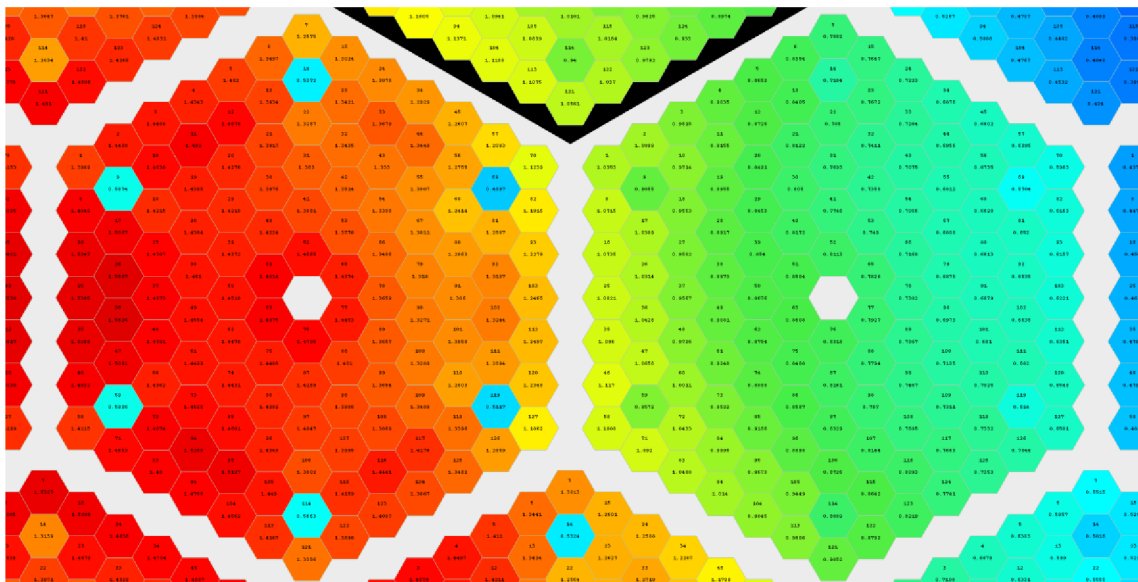
Obrázek 5.5 Relativní výkony palivových proutků v celé aktivní zóně

Tab. 5.3 Lineární výkony palivových proutků s rotací a bez rotace

Číslo kampaně (-)	q^{max} bez rotace (-)	Kazeta s q^{max} (-)	q^{max} s rotací (-)	Kazeta s q^{max} (-)
5	18,896	28	19,151	2
12	19,331	13	18,964	36
13	19,610	28	19,041	13
14	19,183	2	19,024	2
15	18,731	25	18,789	25
16	18,902	22	18,805	22
17	19,386	25	19,391	49
18	19,399	21	18,970	49
19	19,530	45	19,532	45
20	19,509	21	19,444	48
21	19,423	15	19,406	15
22	19,186	14	19,086	35
23	20,064	24	19,896	53
24	20,755	17	20,745	17
25	20,644	14	20,643	14
26	20,479	17	20,445	53
27	20,496	21	20,379	21
28	20,984	15	20,749	13
29	20,774	13	20,803	13
30	20,705	24	20,315	17
31	21,481	11	21,421	35
32	21,648	13	21,537	13
33	21,555	35	21,468	35
34	21,661	35	21,615	35
35	21,346	35	21,247	14

Závislost lineárního výkonu axiálního úseku palivového proutku na vyhoření palivového proutku (tzv. muchy) je zobrazena v grafech na obrázcích 5.7 až 5.38. Grafy byly vytvořeny pro 20. až 35. kampaň. V grafech jsou barevně odlišeny palivové proutky podle stáří pobytu v AZ. Z grafu je zřejmé, že nejvyšší lineární výkon palivových proutků je prvním nebo druhým rokem. Což odpovídá hodnotám relativního výkonu, který je nejvyšší u čerstvých kazet a kazet druhým rokem. Vysoký relativní výkon kazet druhým rokem je způsoben podstatným vyhořením vyhořívajícího absorbátoru v podobě

gadolinia. Porovnání relativních výkonů palivových proutků čerstvé kazety a kazety druhým rokem je zobrazeno na obrázku 5.6. V čerstvé PK (nalevo) je na první pohled vidět vliv vyhořívajících absorbátorů, které snižují relativní výkon palivových proutků v nichž jsou umístěny a také proutků v jeho okolí. V PK druhým rokem (napravo) je vliv vyhořívajících absorbátorů podstatně nižší. Palivové proutky obsahující gadolinium mají druhým rokem velice podobný relativní výkon jako ostatní proutky, které neobsahují vyhořívající absorbátory. Obrázek 5.6 je z 35. kampaně, zobrazené kazety jsou na biprovských pozicích 25 a 26.

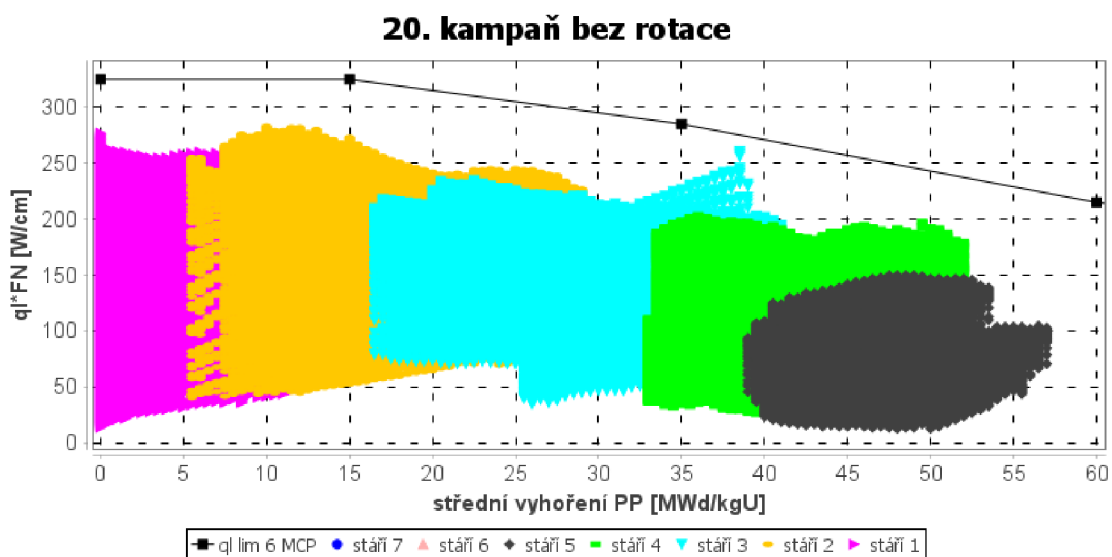


Obrázek 5.6 Vyhořívající absorbátory čerstvé PK a PK druhým rokem

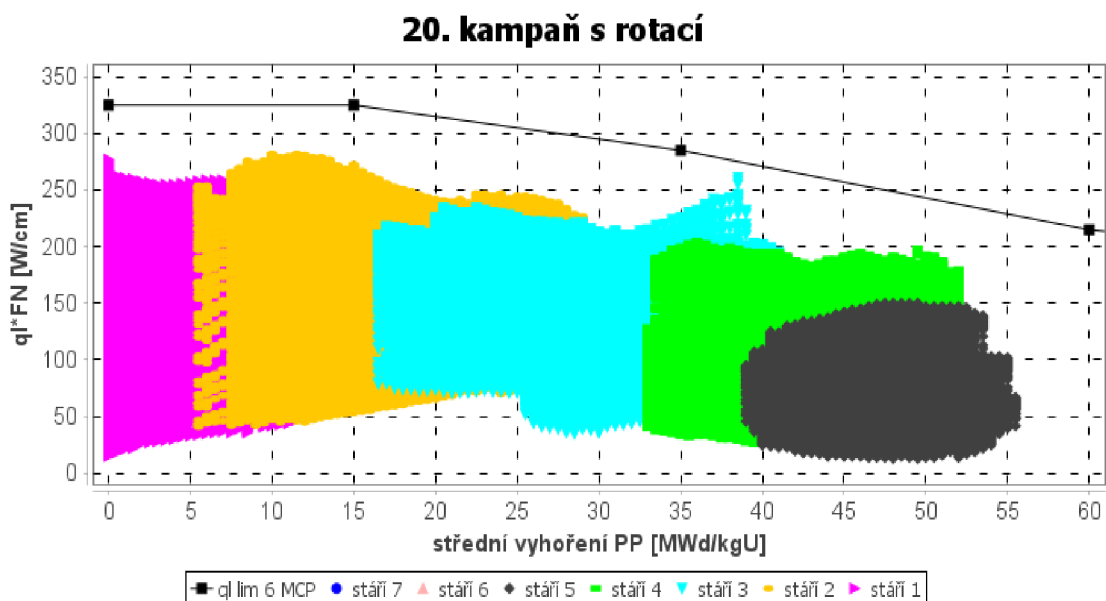
V grafech je možné vidět zmíněnou lomenou křivku s limitní hodnotou lineárního výkonu, která je pro vyhoření 0 MWD/kgU 325 W/cm. Tato hodnota postupně s přibývajícím vyhořením klesá. Pro všechny axiální úseky palivových proutků byla tato limitní hodnota dodržena.

Dále je grafem možné vidět vliv rotace palivových kazet na vyhoření jednotlivých proutků. Tento rozdíl je patrný hlavně na nejstarších kazetách v AZ, které mají nevyšší vyhoření (v grafech vždy množina barevných bodů nejvíce vpravo). Při porovnání jednotlivých kampaní s rotací a bez rotace je vidět podstatný rozdíl ve vyhoření jednotlivých proutků. Kampaně bez rotace mají mnohem větší rozsah vyhoření proutků.

Vyhoření proutků v těchto kazetách je mnohem více nerovnoměrné než v rotovaných kazetách. Největší rozdíl je patrný na 32. kampani (Obrázek 5.31 a 5.32). Vyhoření palivových proutků bez použití rotace by se v tomto případě pohybovalo od 38 až po 65 MWd/kgU. Vlivem použití rotace se však vyhoření pohybovalo od 46 do 57 MWd/kgU. Bez použití rotace by tedy některé palivové proutky vyhořely mnohem méně než ostatní. Palivo v méně vyhořelých proutcích nebylo v tomto případě ideálně využito.

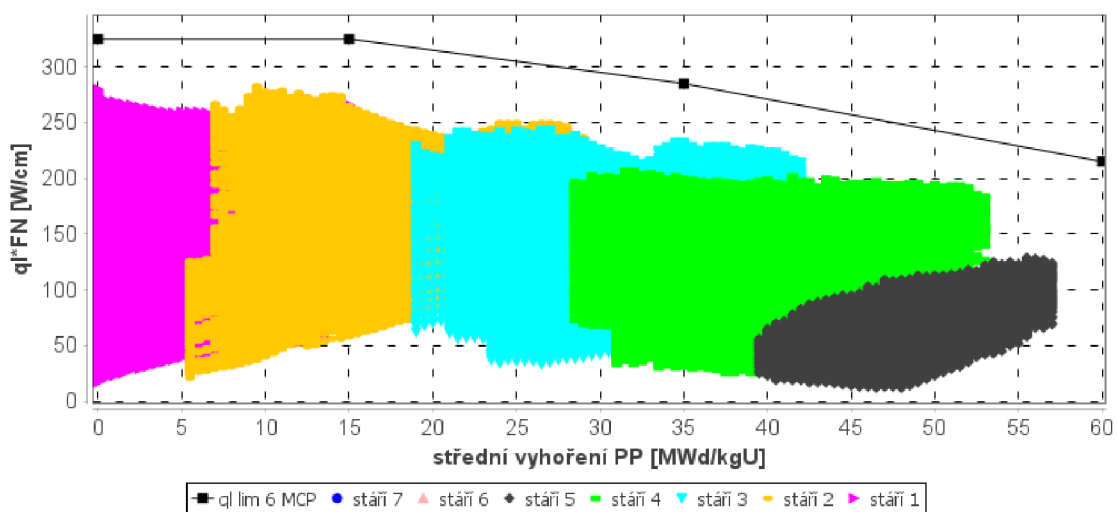


Obrázek 5.7 Vyhoření proutků 20. kampaně bez rotace



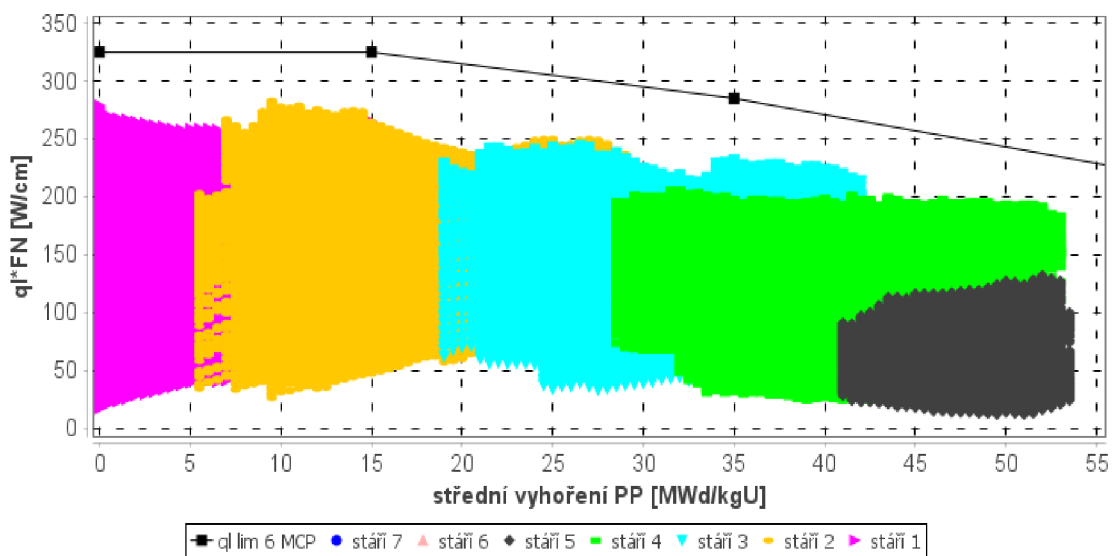
Obrázek 5.8 Vyhoření proutků 20. kampaně s rotací

21. kampaň bez rotace

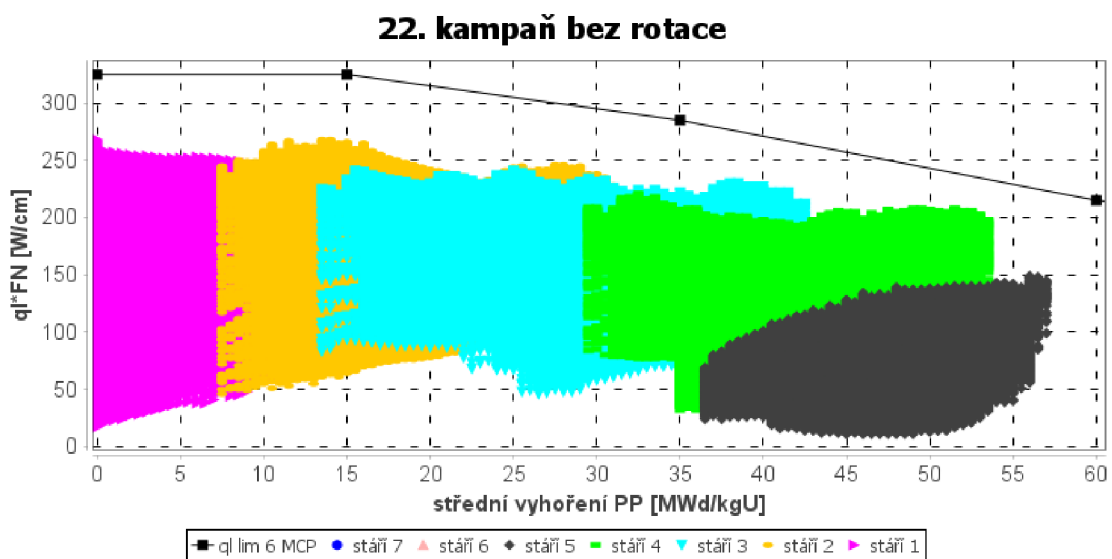


Obrázek 5.9 Vyhoření proutků 21. kampaň bez rotace

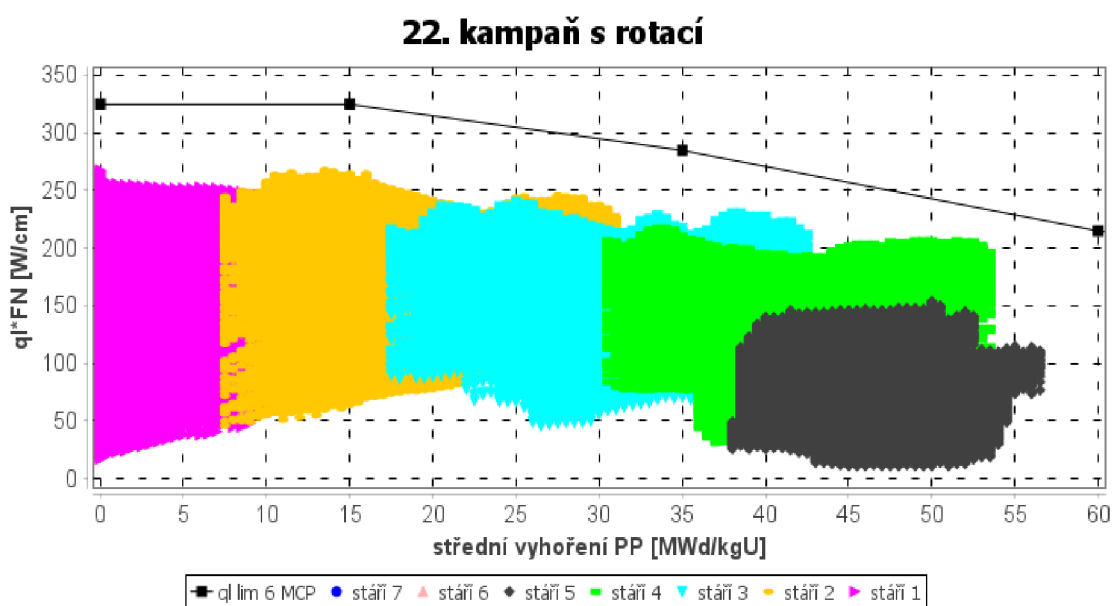
21. kampaň s rotací



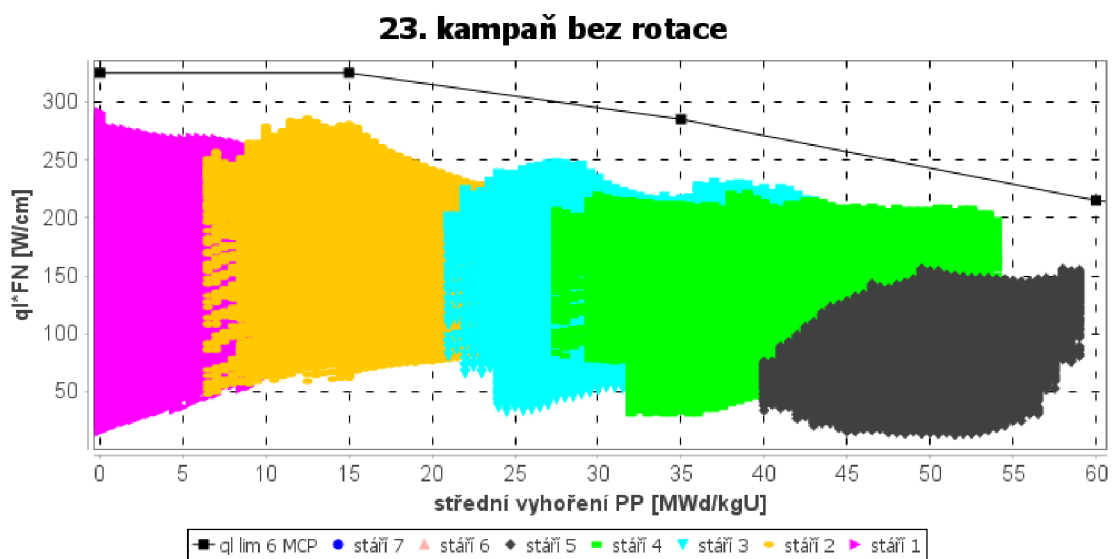
Obrázek 5.10 Vyhoření proutků 21. kampaň s rotací



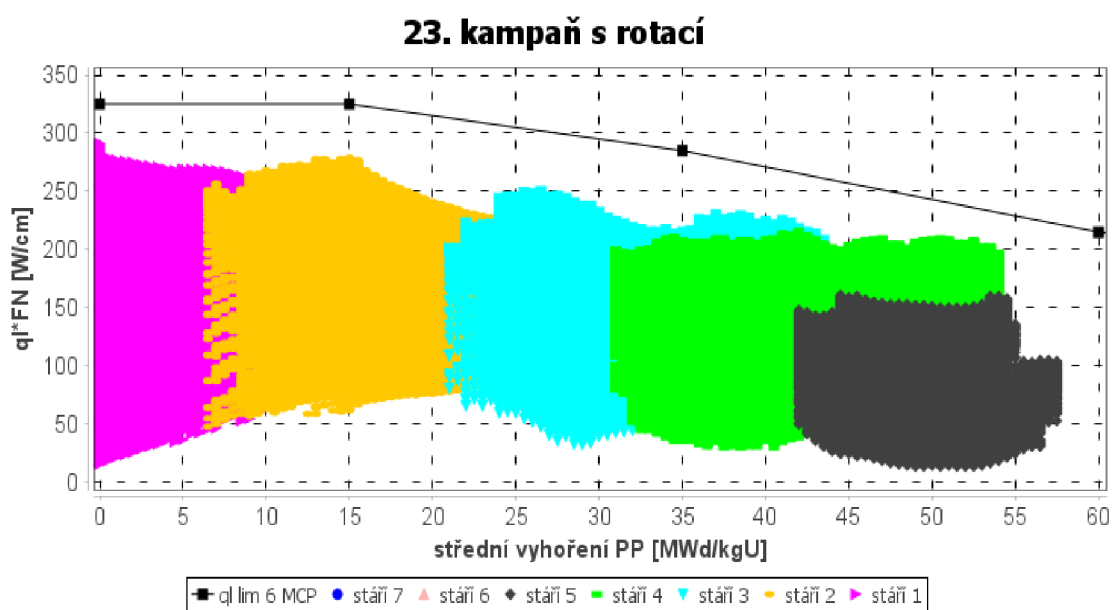
Obrázek 5.11 Vyhoření proutků 22. kampaň bez rotace



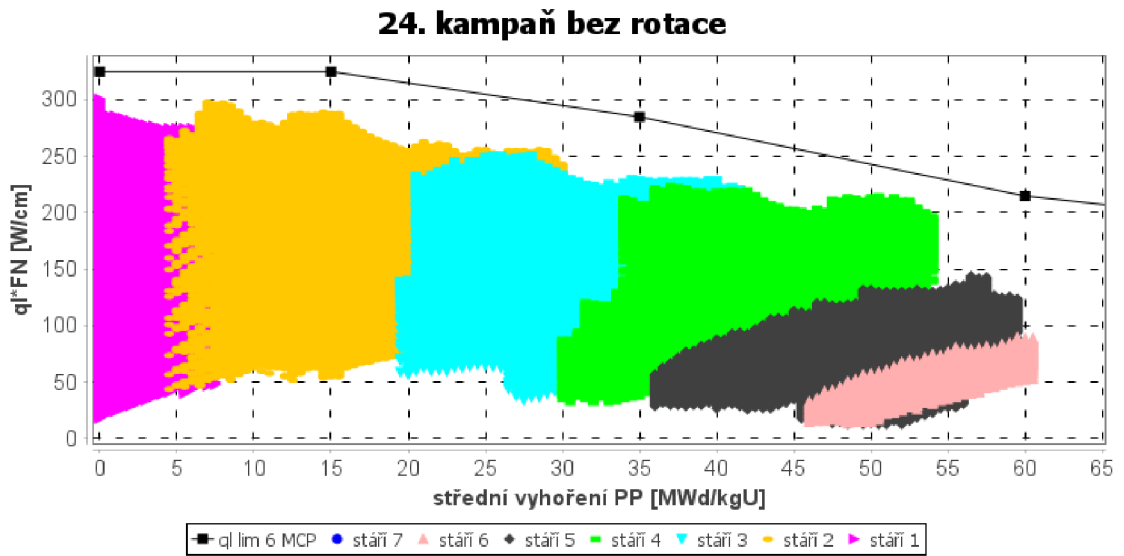
Obrázek 5.12 Vyhoření proutků 22. kampaň s rotací



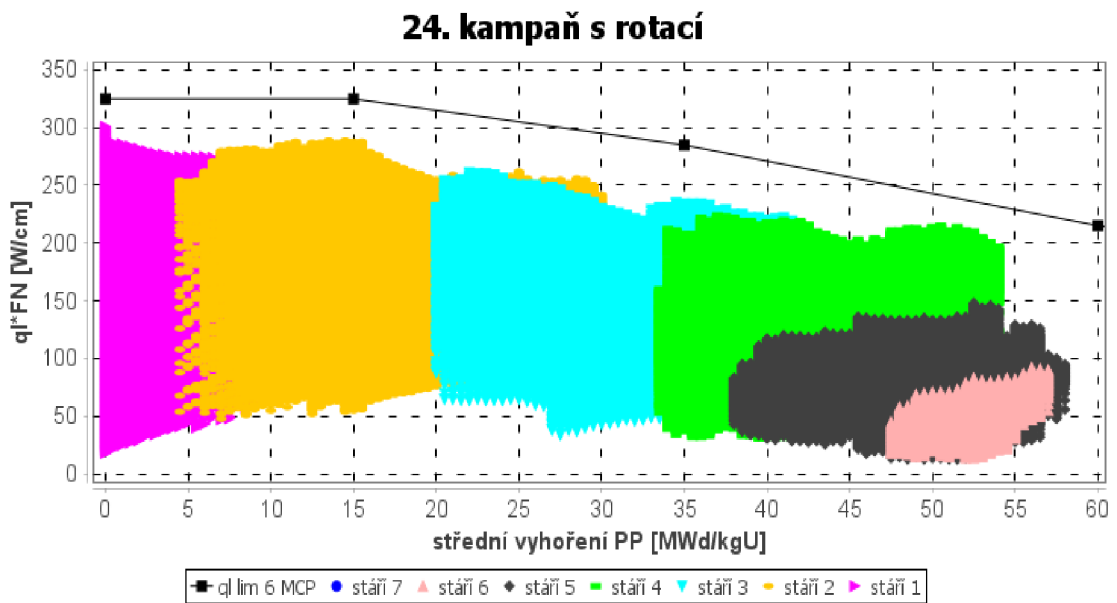
Obrázek 5.13 Vyhoření proutků 23. kampaň bez rotace



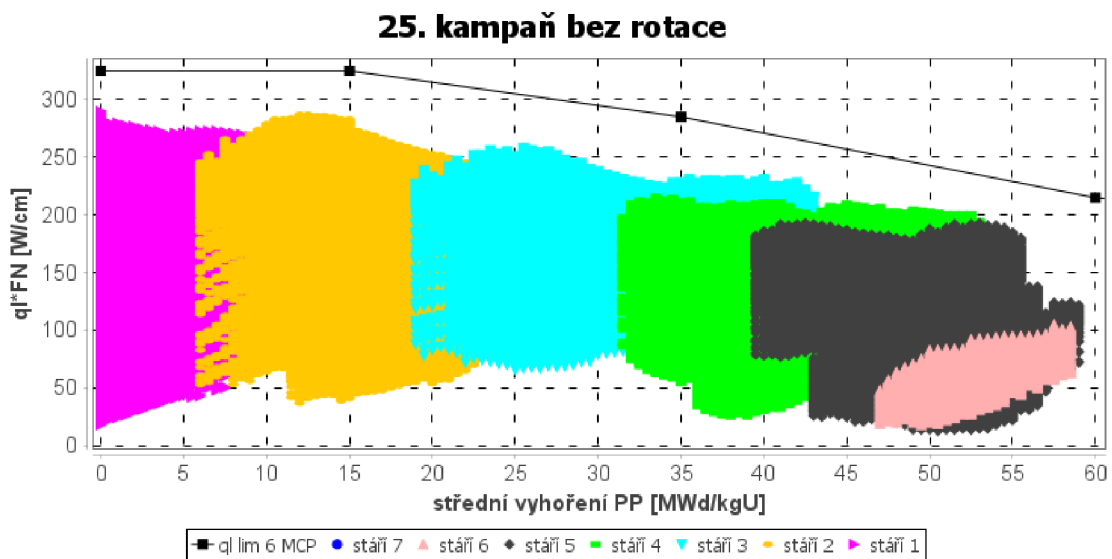
Obrázek 5.14 Vyhoření proutků 23. kampaň s rotací



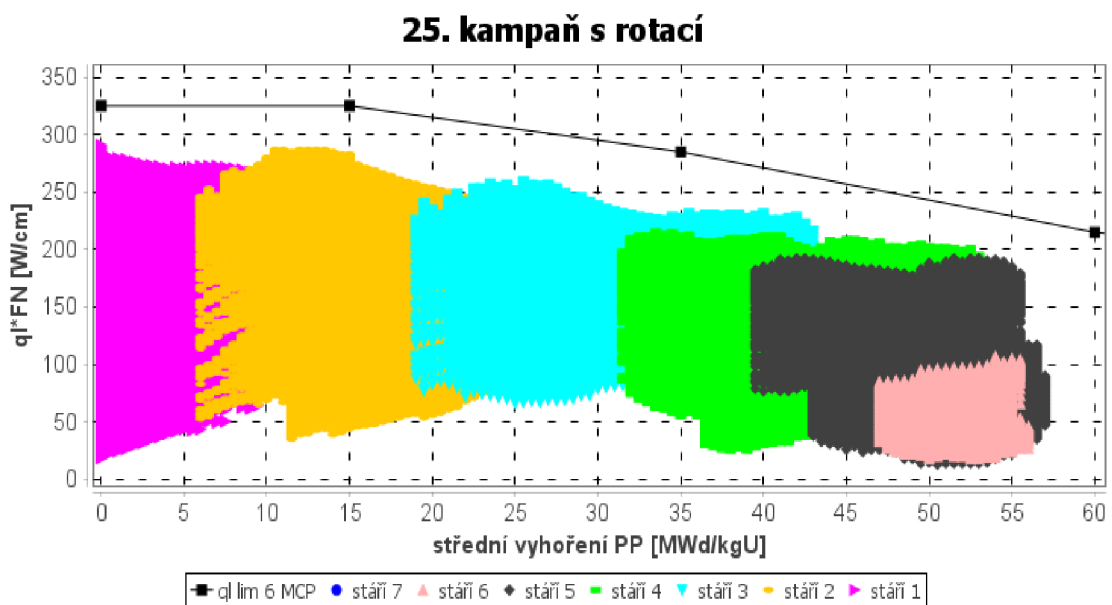
Obrázek 5.15 Vyhoření proutků 24. kampaň bez rotace



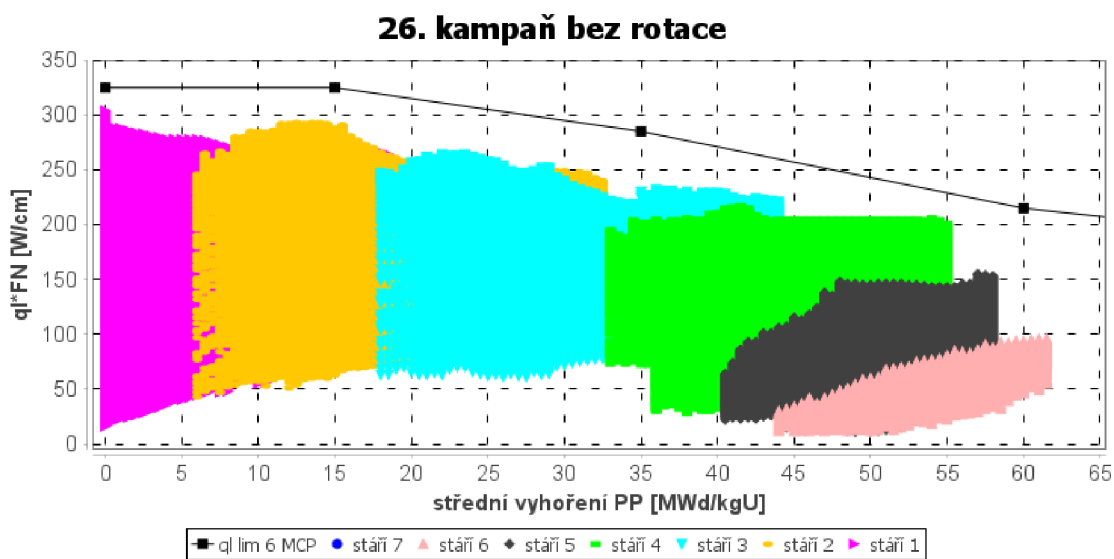
Obrázek 5.16 Vyhoření proutků 24. kampaň s rotací



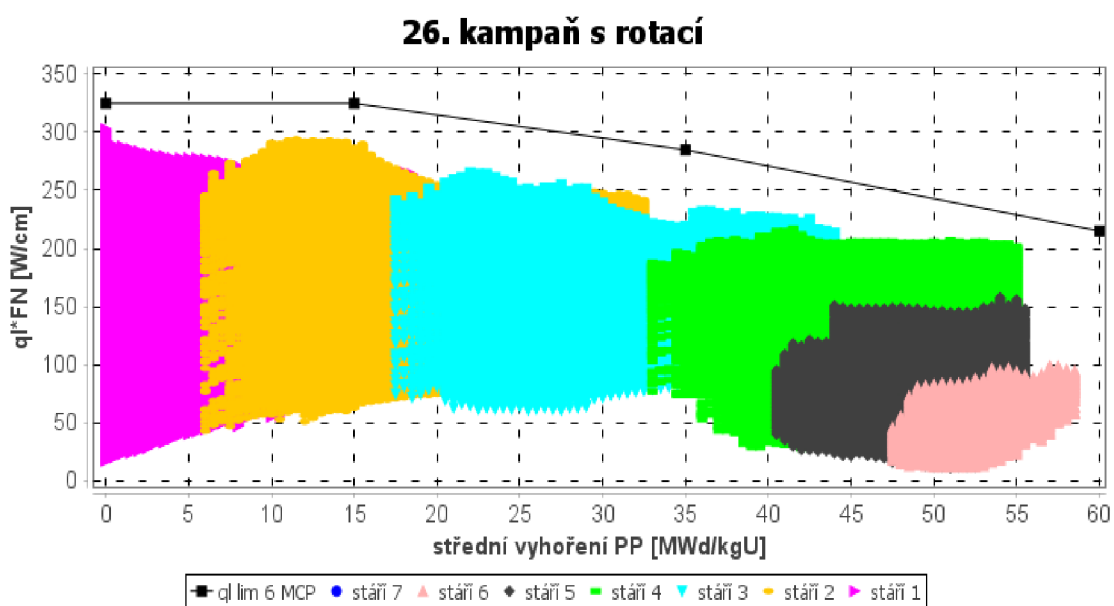
Obrázek 5.17 Vyhoření proutků 25. kampaň bez rotace



Obrázek 5.18 Vyhoření proutků 25. kampaň s rotací

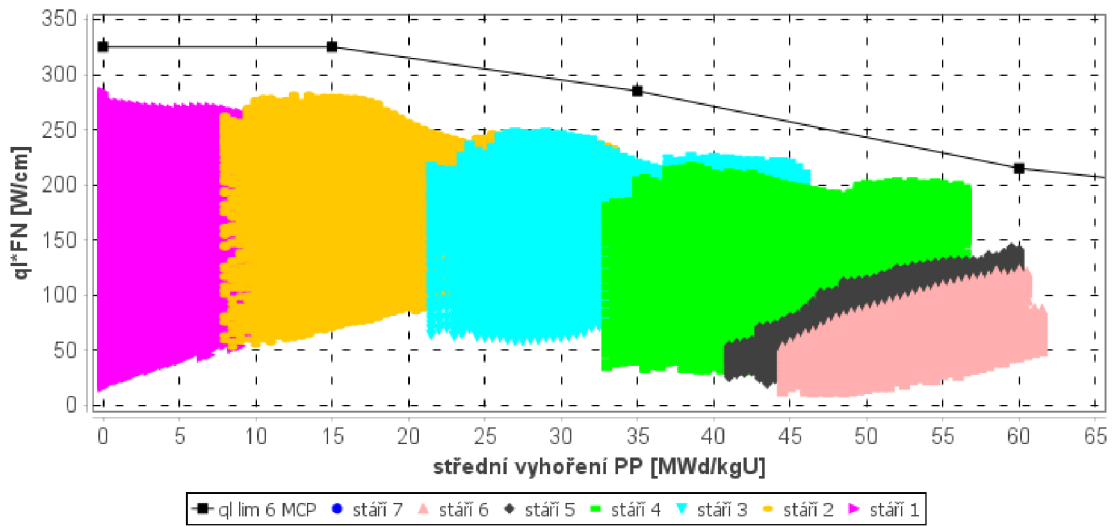


Obrázek 5.19 Vyhoření proutků 26. kampaň bez rotace



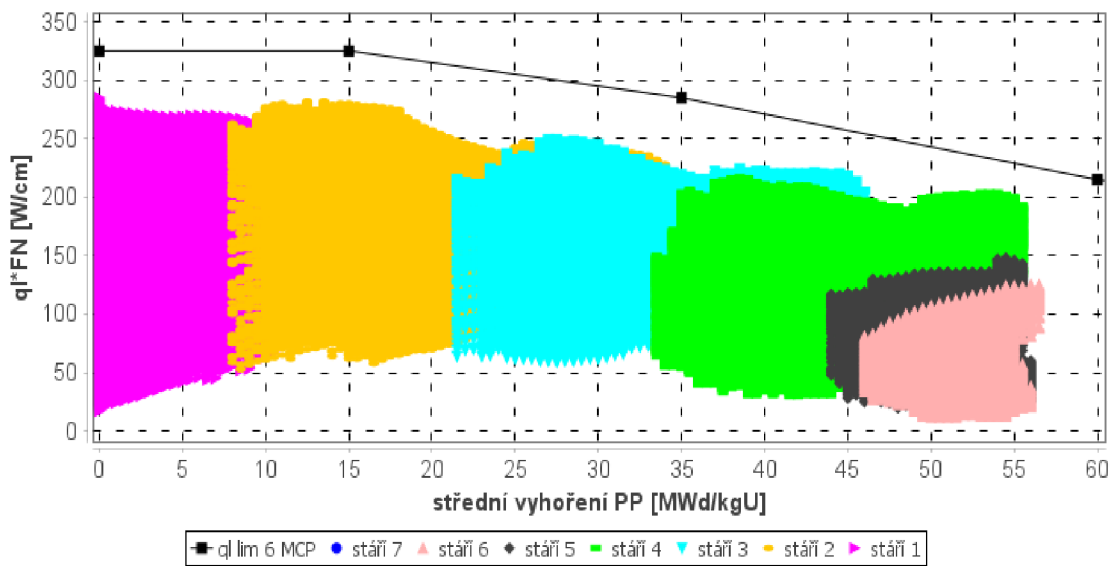
Obrázek 5.20 Vyhoření proutků 26. kampaň s rotací

27. kampaň bez rotace

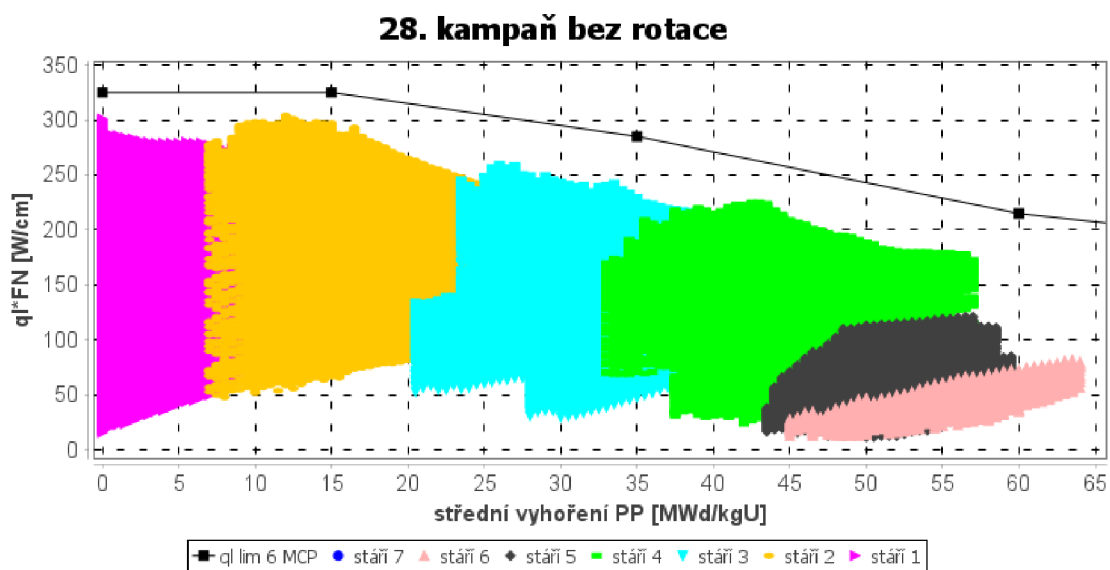


Obrázek 5.21 Vyhoření proutků 27. kampaň bez rotace

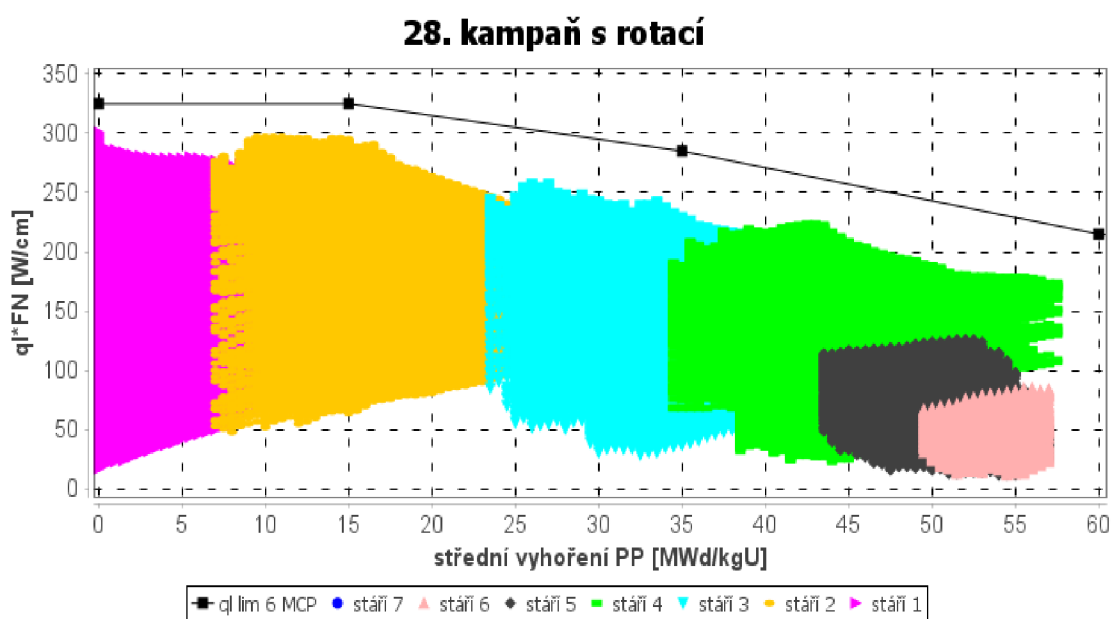
27. kampaň s rotací



Obrázek 5.22 Vyhoření proutků 27. kampaň s rotací

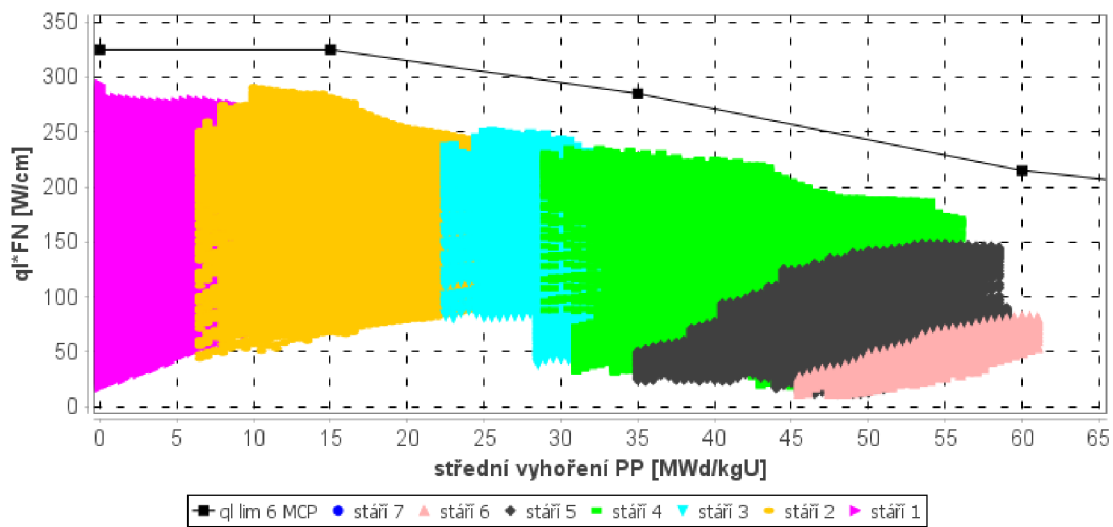


Obrázek 5.23 Vyhoření proutků 28. kampaň bez rotace



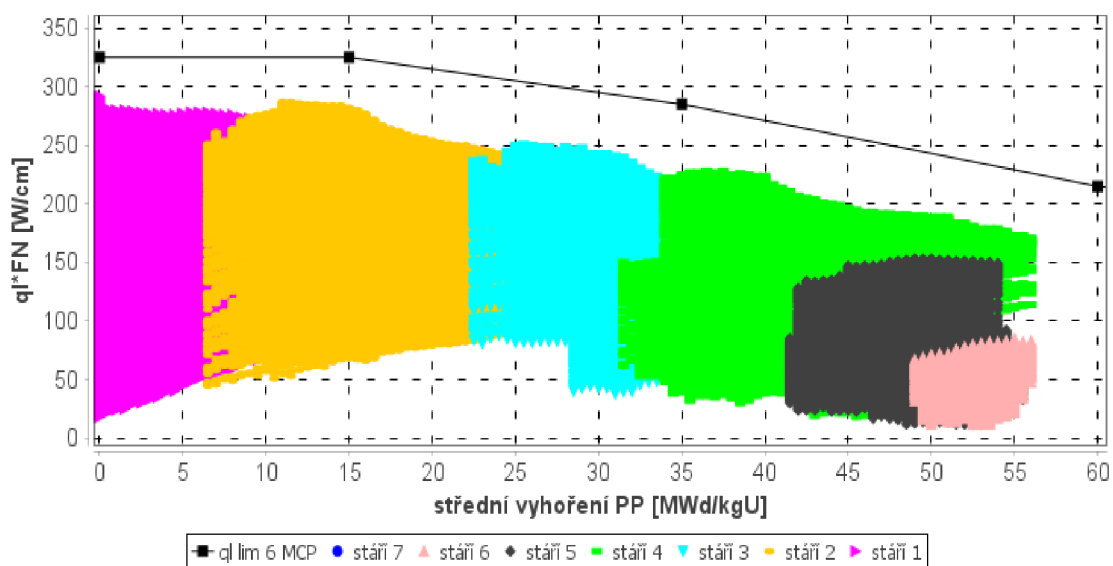
Obrázek 5.24 Vyhoření proutků 28. kampaň s rotací

29. kampaň bez rotace



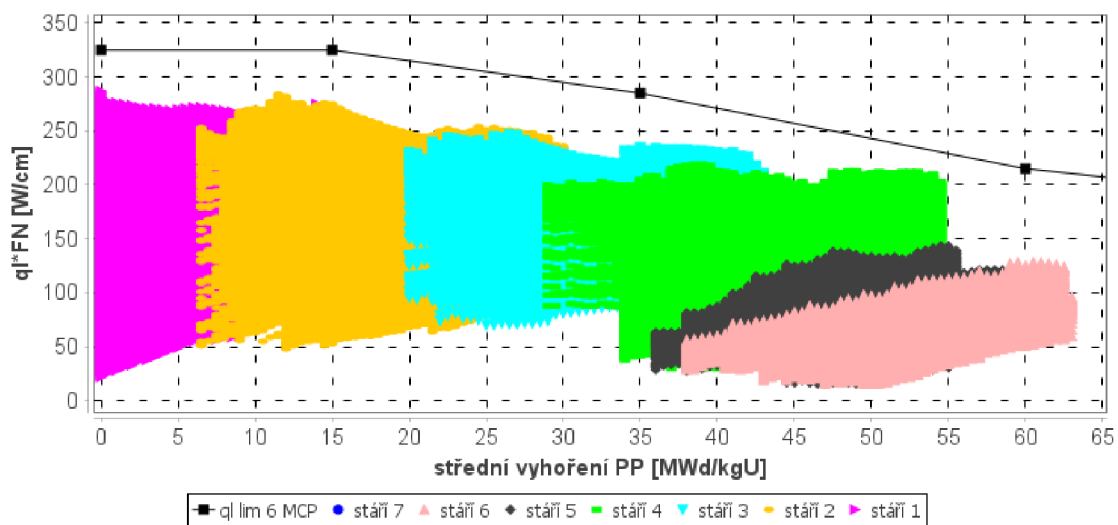
Obrázek 5.25 Vyhoření proutků 29. kampaň bez rotace

29. kampaň s rotací



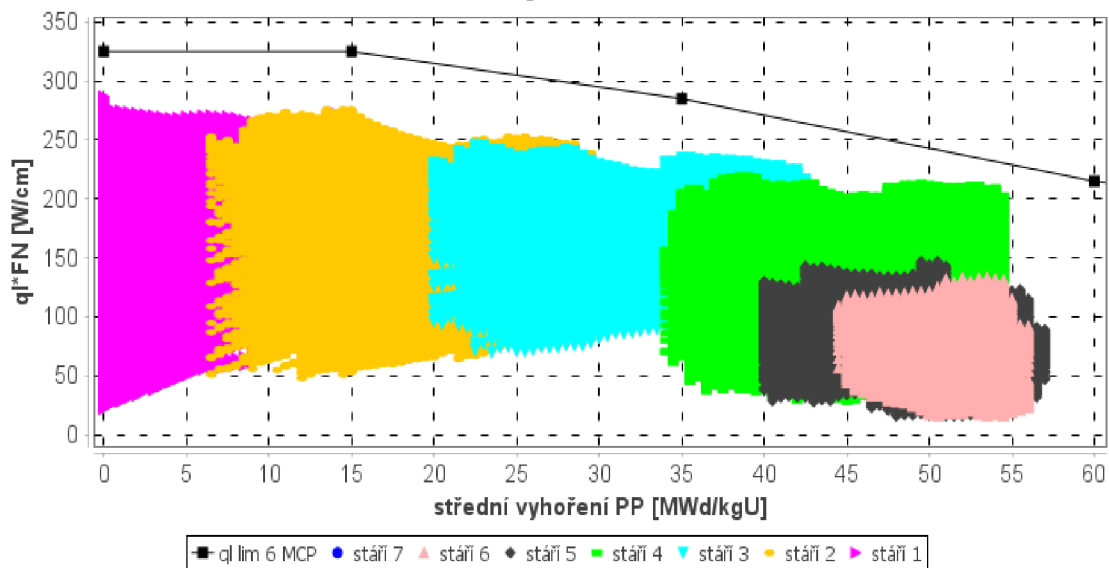
Obrázek 5.26 Vyhoření proutků 29. kampaň s rotací

30. kampaň bez rotace

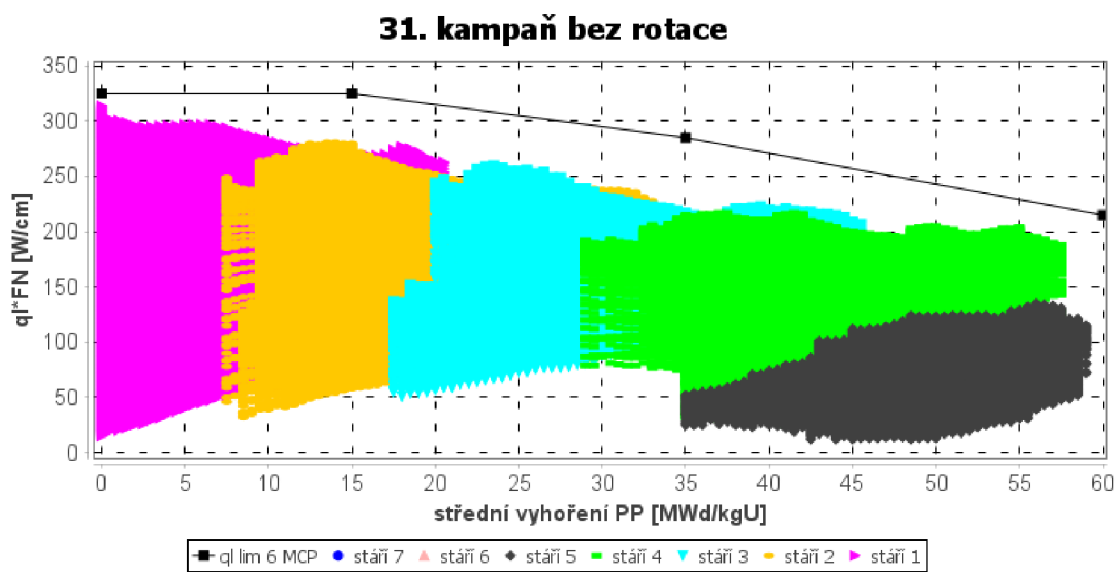


Obrázek 5.27 Vyhoření proutků 30. kampaň bez rotace

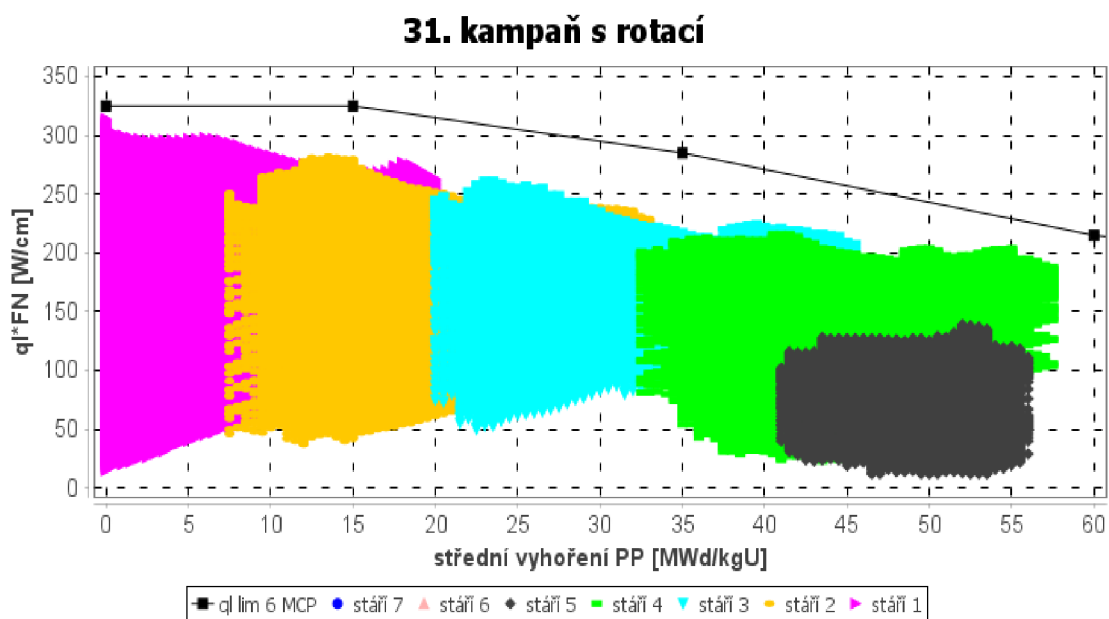
30. kampaň s rotací



Obrázek 5.28 Vyhoření proutků 30. kampaň s rotací

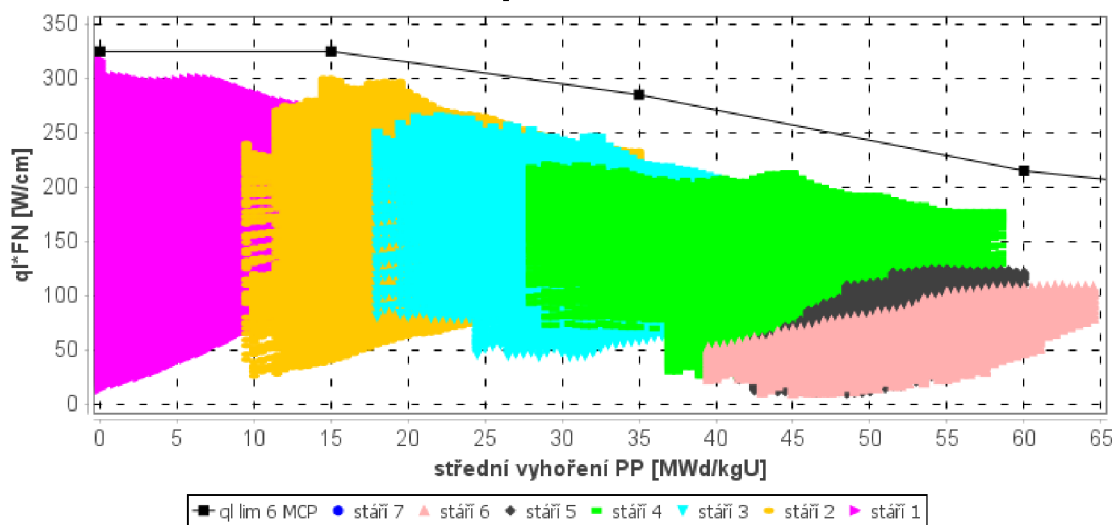


Obrázek 5.29 Vyhoření proutků 31. kampaň bez rotace



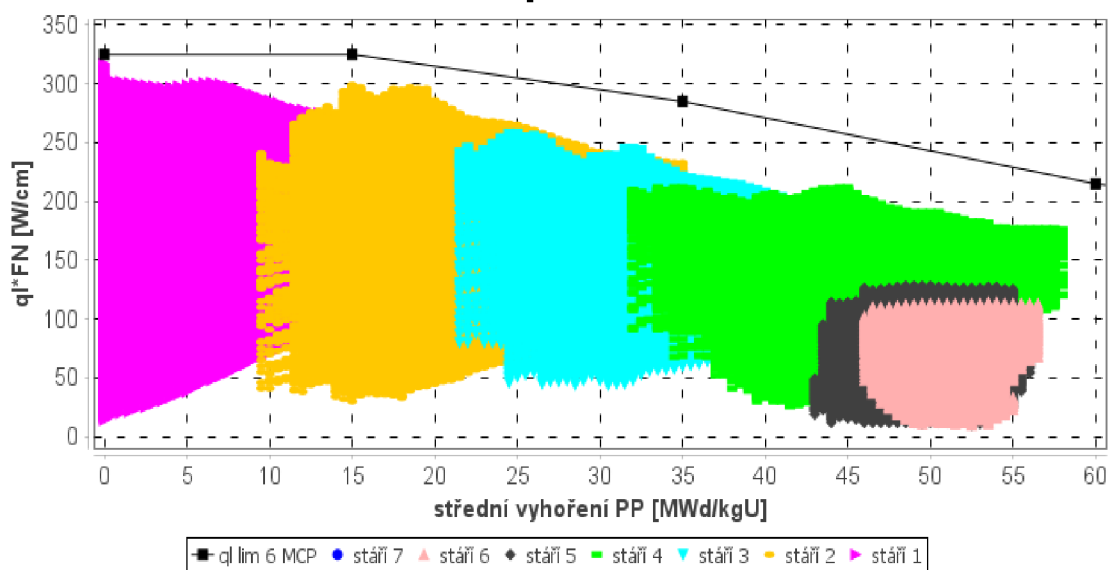
Obrázek 5.30 Vyhoření proutků 31. kampaň s rotací

32. kampaň bez rotace



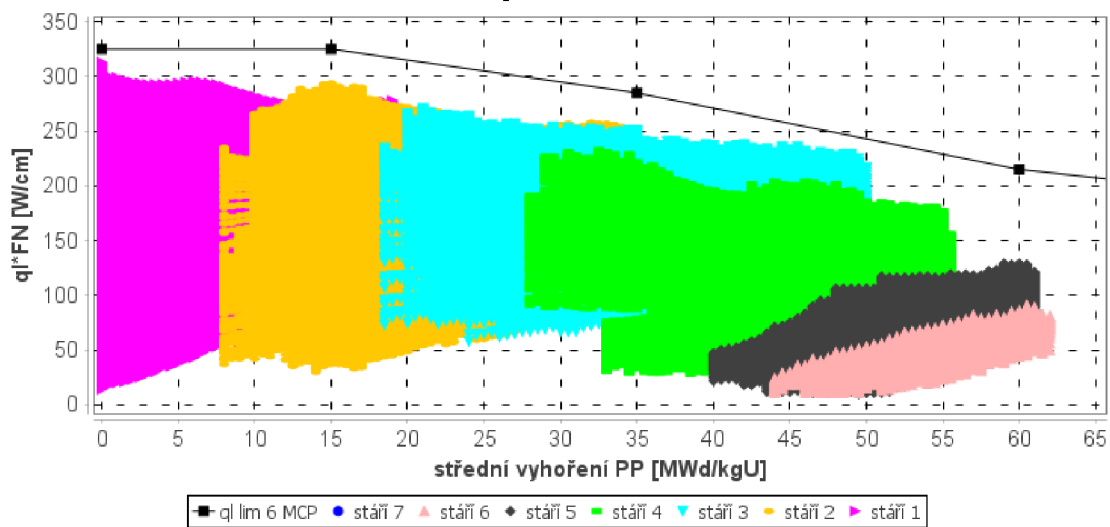
Obrázek 5.31 Vyhoření proutků 32. kampaň bez rotace

32. kampaň s rotací



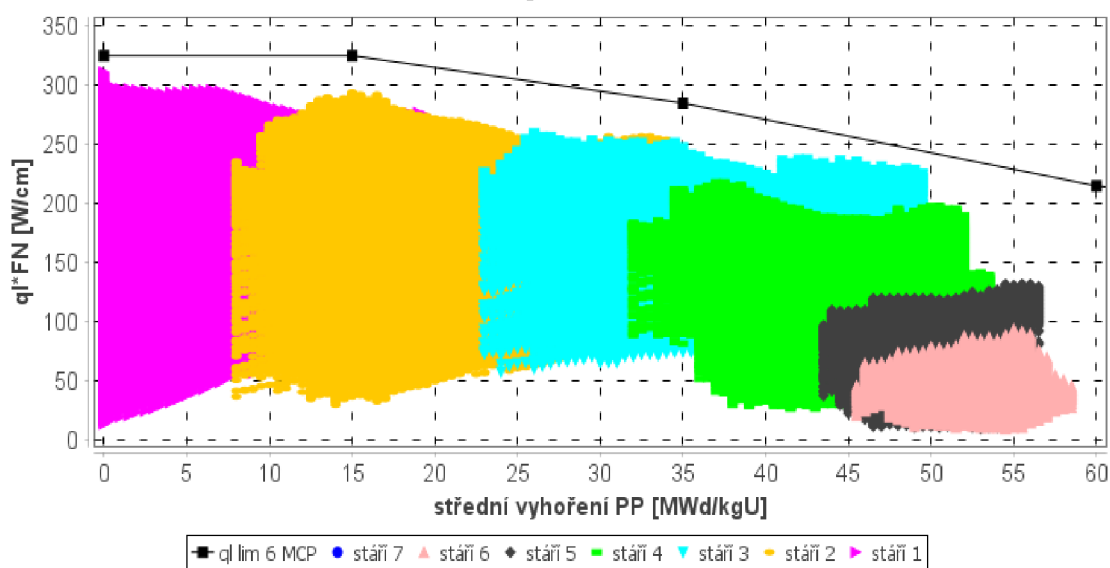
Obrázek 5.32 Vyhoření proutků 32. kampaň s rotací

33. kampaň bez rotace



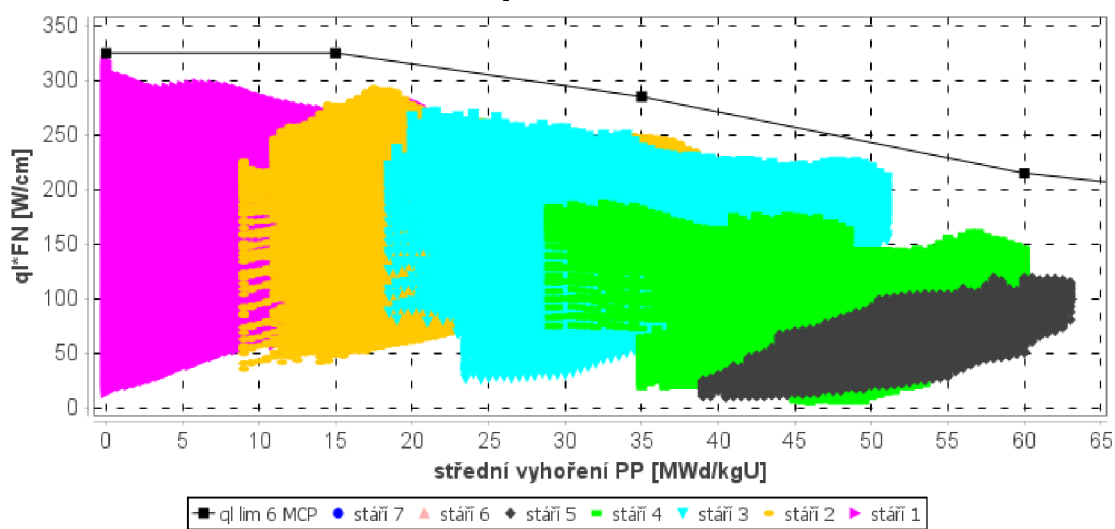
Obrázek 5.33 Vyhoření proutků 33. kampaň bez rotace

33. kampaň s rotací



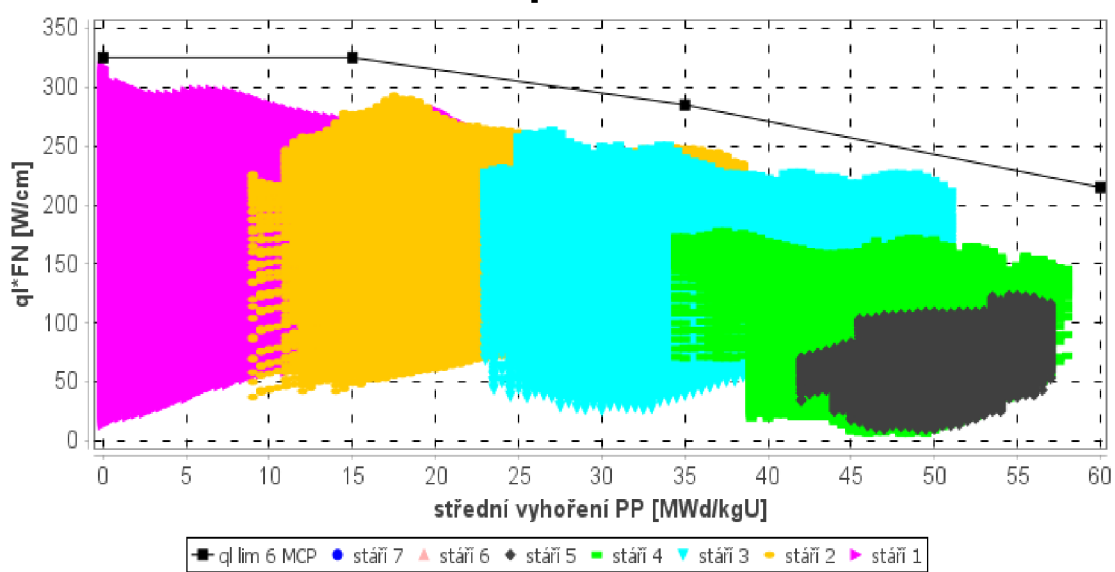
Obrázek 5.34 Vyhoření proutků 33. kampaň s rotací

34. kampaň bez rotace

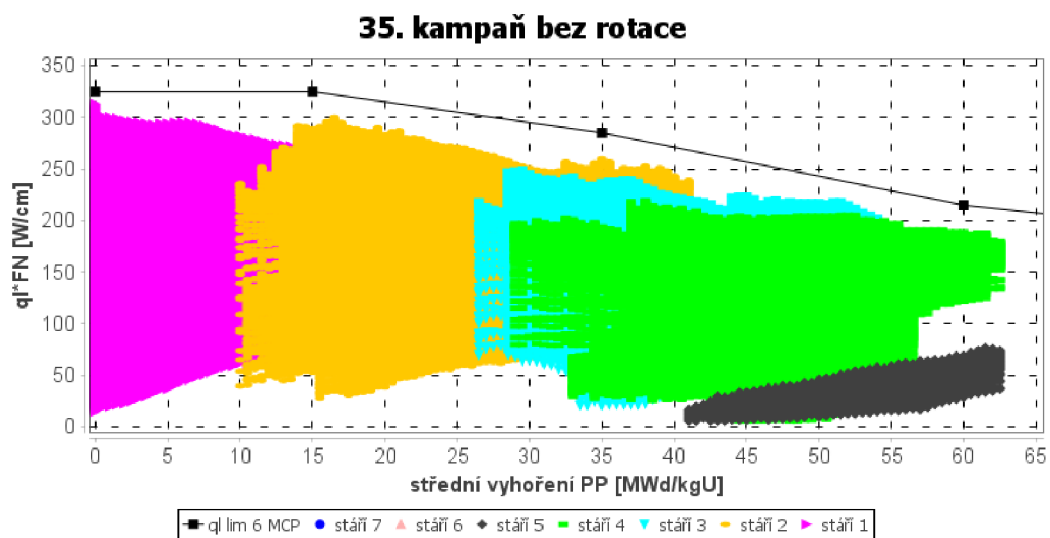


Obrázek 5.35 Vyhoření proutků 34. kampaň bez rotace

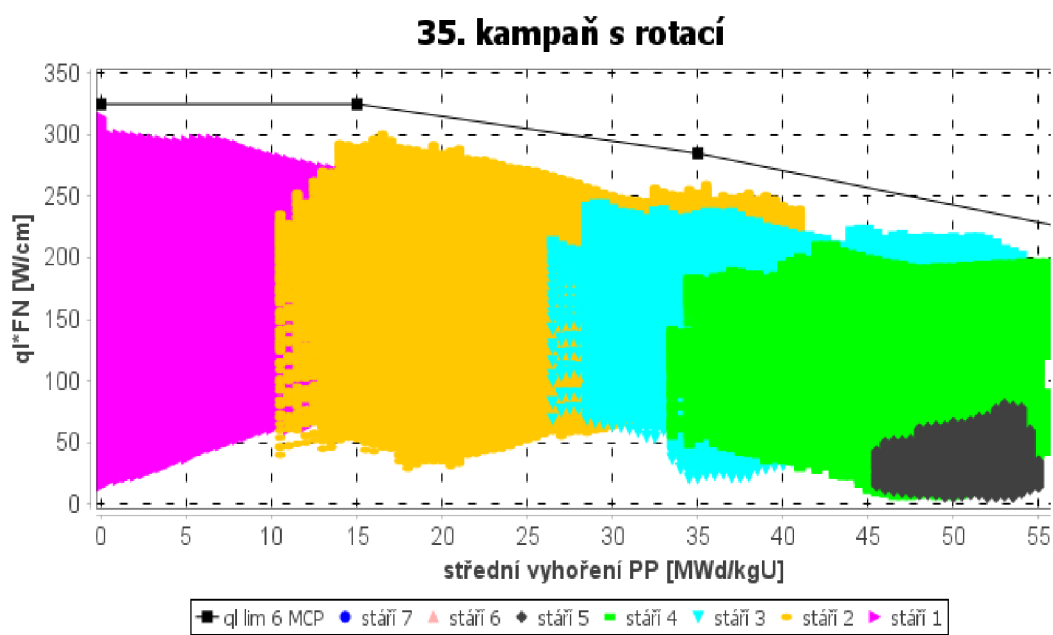
34. kampaň s rotací



Obrázek 5.36 Vyhoření proutků 34. kampaň s rotací



Obrázek 5.37 Vyhoření proutků 35. kampaň bez rotace



Obrázek 5.38 Vyhoření proutků 35. kampaň s rotací

5.2 Vícenásobná rotace

V určitých ohledech by mohlo být výhodnější rotovat kazetu častěji než pouze jednou nebo dvakrát za celou dobu jejího pobytu v AZ. Pokud by se kazeta rotovala každým rokem, rovnoměrnost vyhoření palivových proučků by se mohla zvýšit.

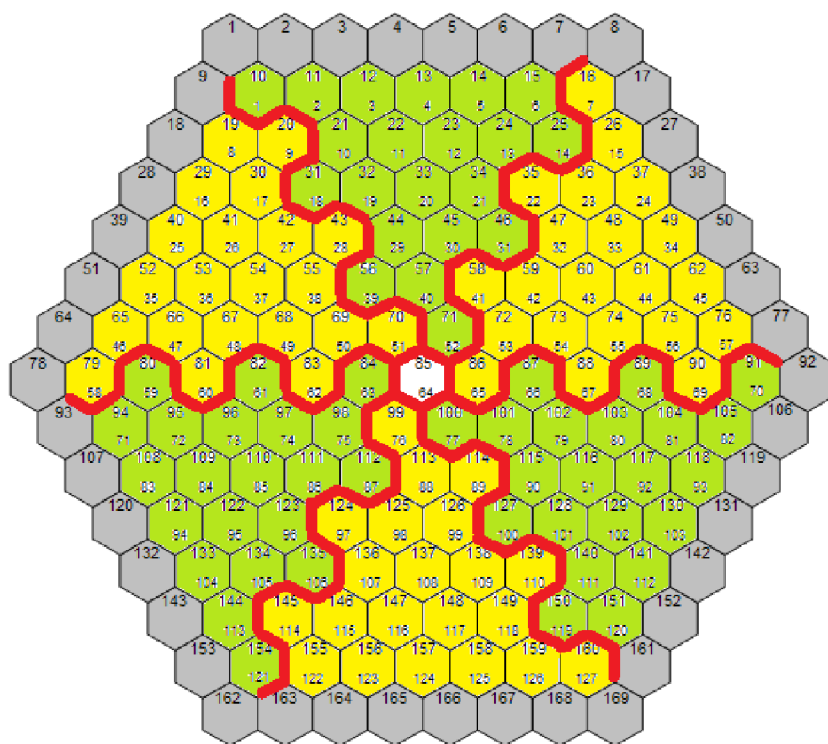
Analyzovány byly vytipované kazety. Ty se následně rotovaly od druhého do posledního roku jejího pobytu v AZ. V každém roce se provedl výpočet pro všechny možnosti rotací tedy 0° až 300° (vždy po 60°). Po skončení výpočtu se vyhodnotily všechny možnosti rotací a vybrala se ta nejvhodnější.

Vyhodnocení probíhalo následovně:

- Vyberou se hodnoty vyhoření palivových proučků na konci kampaně.
- Kazety se rozdělí na šestiny, jak je naznačeno na obrázku 5.39.
- Z 21 proučků dané šestiny se vypočítá průměrná hodnota vyhoření.
- Z průměrné hodnoty šestiny je vypočítána relativní hodnota
- Relativní hodnotě je určena odchylka od ideální hodnoty

Pro výpočty této diplomové práce byl zaveden pojem relativní vyhoření. Jde o podíl průměrné hodnoty vyhoření jedné šestiny ku průměrnému vyhoření celé kazety. Relativním vyhořením je možné porovnat rozdíly vyhoření jednotlivých šestin mezi sebou. Pokud by všechny šestiny vyhořovaly dokonale rovnoměrně, relativní vyhoření by vyšlo 1. Nyní už jen stačí porovnat odchylku relativního vyhoření od ideální hodnoty (hodnoty 1). Stejný postup je pro všechny další varianty rotací. Ze všech variant rotací je potom vybrána ta nejideálnější, což je ta s nejrovnoměrnějším vyhořením.

Kazeta byla rozdělena tímto způsobem, protože jako finální výsledek hodnocení rotace má být informace na kterou stranu je výhodné rotovat. Tímto stylem lze snadno a přehledně určit nejvhodnější rotaci. Respektive o kolik stupňů se kazeta otočí. Nejvhodnější rotace se následně zadají do vstupního souboru kampaně, která právě byla analyzována. Tento vstupní soubor pak bude použit při výpočtu následující kampaně. Tím je docíleno, že program MOBY-DICK vezme jako vstupní data právě ty, kde jsou požadované rotace.



Obrázek 5.39 Rozdělení kazety na šestiny

5.2.1 Vliv vícenásobné rotace na délku kampaně

Vícenásobná rotace byla provedena pouze od 24. do 31. kampaně. Důvodem je časová náročnost vyhodnocování a porovnávání výsledků jednotlivých stupňů rotací. Všechny PK jsou typu Gd-2M. Pouze HRK jsou typu Gd-2+. Konkrétně jde o HRK 6330 zavezenou ve 24. kampani, 6430 zavezenou v 25. kampani a 6604 zavezenou ve 27. kampani. Výsledné stupně rotací, které vyšly nejlépe jsou v tabulkách 5.5 až 5.8. Do tabulky 5.7 byly pro porovnání přidány kazety 6535, 6539 a 6545 (označeny červeně), u kterých vícenásobná rotace nevyšla lépe než původní. Dále budou tyto kazety rozebrány v další kapitole 5.2.2. Symbol „x“ v tabulkách 5.5 až 5.8 znamená vyvezení dané kazety.

Tab. 5.4 Kazety zavezené ve 24. kampani

Kazety zavezené ve 24. kampani	24. kampaň	25. kampaň	26. kampaň	27. kampaň	28. kampaň
Číslo kazety	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)
6313	bez rotace	60	240	180	180
6326	bez rotace	180	180	180	0
6330	bez rotace	300	300	240	x
6354	bez rotace	180	180	120	60

Tab. 5.5 Kazety zavezené ve 25. kampani

Kazety zavezené ve 25. kampani	25. kampaň	26. kampaň	27. kampaň	28. kampaň	29. kampaň
Číslo kazety	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)
6409	bez rotace	240	300	0	x
6417	bez rotace	60	60	180	x
6426	bez rotace	240	240	180	x
6430	bez rotace	180	180	0	x
6439	bez rotace	180	120	300	0

Tab. 5.6 Kazety zavezené ve 26. kampani

Kazety zavezené ve 26. kampani	26. kampaň	27. kampaň	28. kampaň	29. kampaň	30. kampaň
číslo kazety	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)
6509	bez rotace	240	180	x	x
6513	bez rotace	180	60	120	180
6526	bez rotace	120	240	300	x
6528	bez rotace	180	300	240	120
6535	bez rotace	60	180	300	x
6539	bez rotace	180	180	180	x
6545	bez rotace	180	120	240	x

Tab. 5.7 Kazety zavezené ve 27. Kampani

Kazety zavezené ve 25. kampani	27. kampaň	28. kampaň	29. kampaň	30. kampaň	31. kampaň
číslo kazety	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)	Rotace (°)
6604	bez rotace	180	240	240	x
6609	bez rotace	180	120	180	60
6611	bez rotace	180	60	240	300
6621	bez rotace	240	240	300	x
6625	bez rotace	180	240	60	x
6626	bez rotace	120	240	60	x
6649	bez rotace	180	120	0	x
6654	bez rotace	240	120	60	x

Pro 24. až 31. kampaň byly porovnány délky palivových kampaní s původní rotací a s vícenásobnou rotací. Porovnány byly stejným způsobem, jako v předchozí kapitole (5.1.1), kde byly porovnány kampaň bez rotace a s rotací. Srovnání výsledků je v tabulce 5.4. Z výsledků je patrné, že vícenásobná rotace by měla kromě 29. a 31. pozitivní vliv a kampaň by se mírně prodloužila. Nejlepší zlepšení je pozorováno u 28. kampaň, která by se díky vícenásobné rotaci prodloužila a 0,077 dne. Zároveň je nutné dodat, že rozdíly v délce dní jsou poměrně malé, v podstatě zanedbatelné.

Tab. 5.8 Délka kampaní s rotací a s vícenásobnou rotací

Kampaň (-)	Délka kampaň s původní rotací (-)	Délka kampaň s Vícenásobnou rotací (d)	Rozdíl kampaní (d)
25	283,8100	283,8715	0,065
26	344,8700	344,9065	0,041
27	312,3300	312,3754	0,048
28	321,9700	322,05	0,077
29	329,2700	329,21	-0,062
30	267,4300	267,4635	0,034
31	351,6300	351,62	-0,007

5.2.2 Vliv vícenásobné rotace na rovnoměrnost vyhoření

Největším přínosem vícenásobné rotace je rovnoměrnější vyhoření palivových proutků v kazetě. V tabulce 5.9 až 5.32 jsou výsledky porovnání původní a vícenásobné rotace. Výsledky ukazují porovnání průměrného vyhoření šestin kazety (vždy je v tabulce 1. až 6. šestina). Z výsledků je vidět, že vícenásobné rotace zlepšili rovnoměrnost vyhoření jednotlivých šestin. Nejlepší výsledky vyšly pro kazety 6439, 6609, 6625, 6649, kde vyšly rovnoměrněji všechny šestiny. Pozitivní vliv vícenásobné rotace měl také na průměrné vyhoření palivové kazety, které se mírně zvýšilo. Palivo by tedy bylo využito efektivněji než při původních rotacích. Mimo kazety 6426, 6625 a 6649 vyšlo průměrné vyhoření vždy vyšší než původní. Nejvíce je zlepšení vidět na PK 6513, kdy se průměrné vyhoření zvýšilo z původních 49 586,270 MWd/tU na 49 626,960 MWd/tU.

Do výsledků byly vloženy i kazety 6535, 6539, 6645, na které vícenásobné rotace neměla pozitivní vliv na rovnoměrnost vyhoření. Tyto kazety jsou v tabulkách 5.22 až 5.24. Průměrné vyhoření bylo vyšší pouze u kazety 6535, kde vyšla rovnoměrněji pouze 5. šestina kazety. U kazet 6539 a 6545 se zhoršila rovnoměrnost vyhoření u všech šestin.

Kazety zavezené v 24. kampani:

Tab. 5.9 Porovnání vyhoření kazety 6313

a) Původní rotace

Původní rotace PK 6313		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46749,238	1,0053407	0,0053407
45192,381	0,9718606	0,0281394
44955,905	0,9667752	0,0332248
46272,476	0,9950880	0,0049120
47865,048	1,0293362	0,0293362
47970,286	1,0315993	0,0315993
Průměrné vyhoření	46500,889 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

Vícenásobná rotace PK 6313		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46660,714	1,0032276	0,0032276
45490,667	0,9780710	0,0219290
45243,333	0,9727533	0,0272467
46247,000	0,9943326	0,0056674
47561,810	1,0226016	0,0226016
47860,048	1,0290139	0,0290139
Průměrné vyhoření	46510,595 MWd/tU	

Tab. 5.10 Porovnání vyhoření kazety 6326

a) Původní rotace

původní rotace PK 6326		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50057,000	1,0094801	0,0094801
48598,476	0,9800666	0,0199334
48122,952	0,9704769	0,0295231
49304,000	0,9942946	0,0057054
50644,476	1,0213275	0,0213275
50794,571	1,0243544	0,0243544
Průměrné vyhoření	49586,913 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6326		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49502,90476	0,9979524	0,0020476
50036,14286	1,0087022	0,0087022
50120,000	1,0103927	0,0103927
49889,09524	1,0057378	0,0057378
49238,47619	0,9926216	0,0073784
48840,2381	0,9845934	0,0154066
Průměrné vyhoření	49604,476 MWd/tU	

Tab. 5.11 Porovnání vyhoření kazety 6330

a) Původní rotace

původní rotace HRK 6330		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51396,095	0,9982326	0,0017674
51750,286	1,0051118	0,0051118
51876,905	1,0075710	0,0075710
51488,095	1,0000194	0,0000194
51159,048	0,9936285	0,0063715
51252,143	0,9954367	0,0045633
Průměrné vyhoření	51487,095 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace HRK 6330		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51503,19048	1,0000606	0,0000606
51527,33333	1,0005294	0,0005294
51657,52381	1,0030573	0,0030573
51481,66667	0,9996426	0,0003574
51342,33333	0,9969371	0,0030629
51488,38095	0,9997730	0,0002270
Průměrné vyhoření	51500,071 MWd/tU	

Tab. 5.12 Porovnání vyhoření kazety 6354

a) Původní rotace

původní rotace PK 6354		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50673,048	1,0217547	0,0217547
49373,952	0,9955602	0,0044398
48157,095	0,9710238	0,0289762
48556,333	0,9790739	0,0209261
50016,952	1,0085254	0,0085254
50787,476	1,0240620	0,0240620
Průměrné vyhoření	49594,143 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6354		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49018,90476	0,9883313	0,0116687
49191,85714	0,9918184	0,0081816
49779,61905	1,0036690	0,0036690
50040,19048	1,0089228	0,0089228
50066,47619	1,0094527	0,0094527
49488,80952	0,9978057	0,0021943
Průměrné vyhoření	49597,643 MWd/tU	

Kazety zavezené v 25. kampani:

Tab. 5.13 Porovnání vyhoření kazety 6409

a) Původní rotace

Původní rotace PK 6409		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46781,762	1,0139289	0,0139289
44565,476	0,9658940	0,0341060
43897,381	0,9514140	0,0485860
45601,333	0,9883448	0,0116552
47785,762	1,0356892	0,0356892
48202,857	1,0447291	0,0447291
Průměrné vyhoření	46139,095 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

Vícenásobná rotace PK 6409		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46660,714	0,9896700	0,0103300
45490,667	0,9886479	0,0113521
45243,333	0,9925239	0,0074761
46247,000	1,0081122	0,0081122
47561,810	1,0167861	0,0167861
47860,048	1,0042600	0,0042600
Průměrné vyhoření	46170,127 MWd/tU	

Tab. 5.14 Porovnání vyhoření kazety 6417

a) Původní rotace

původní rotace PK 6417		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51480,476	0,9874448	0,0125552
52184,952	1,0009574	0,0009574
52771,238	1,0122029	0,0122029
52821,143	1,0131601	0,0131601
52130,667	0,9999161	0,0000839
51421,762	0,9863186	0,0136814
Průměrné vyhoření	52135,040 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6417		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
52186,2381	1,0005922	0,0005922
52068,19048	0,9983289	0,0016711
52021,14286	0,9974268	0,0025732
51853,80952	0,9942184	0,0057816
52292,09524	1,0026219	0,0026219
52510,61905	1,0068118	0,0068118
Průměrné vyhoření	52155,349 MWd/tU	

Tab. 5.15 Porovnání vyhoření kazety 6426

a) Původní rotace

původní rotace PK 6426		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
48549,571	1,0018011	0,0018011
47324,952	0,9765316	0,0234684
47172,333	0,9733823	0,0266177
48579,286	1,0024142	0,0024142
49610,381	1,0236905	0,0236905
49537,19	1,0221802	0,0221802
Průměrné vyhoření	48462,286 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6426		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
48872,80952	1,0086890	0,0086890
48765,80952	1,0064807	0,0064807
48161,42857	0,9940068	0,0059932
47929,52381	0,9892205	0,0107795
48247,71429	0,9957877	0,0042123
48733,57143	1,0058153	0,0058153
Průměrné vyhoření	48451,810 MWd/tU	

Tab. 5.16 Porovnání vyhoření kazety 6430

a) Původní rotace

původní rotace HRK 6430		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51048,619	1,0011992	0,0011992
51299,619	1,0061220	0,0061220
51201,143	1,0041906	0,0041906
50955,81	0,9993789	0,0006211
50722,048	0,9947942	0,0052058
50697,619	0,9943151	0,0056849
Průměrné vyhoření	50987,476 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace HRK 6430		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51070,04762	1,0012580	0,0012580
51001,47619	0,9999136	0,0000864
50896,66667	0,9978588	0,0021412
50971,85714	0,9993329	0,0006671
51057,66667	1,0010153	0,0010153
51037,57143	1,0006213	0,0006213
Průměrné vyhoření	51005,881 MWd/tU	

Tab. 5.17 Porovnání vyhoření kazety 6439

a) Původní rotace

původní rotace PK 6439		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50876,619	1,0113560	0,0113560
51231,048	1,0184016	0,0184016
50619,524	1,0062454	0,0062454
49686,000	0,9876882	0,0123118
49348,857	0,9809863	0,0190137
50070,048	0,9953225	0,0046775
Průměrné vyhoření	50305,349 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6439		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50479,80952	1,0032186	0,0032186
50301,38095	0,9996726	0,0003274
50418,09524	1,0019921	0,0019921
50442,57143	1,0024785	0,0024785
50096,47619	0,9956004	0,0043996
50168,80952	0,9970379	0,0029621
Průměrné vyhoření	50317,857 MWd/tU	

Kazety zavezené v 26. kampani:

Tab. 5.18 Porovnání vyhoření kazety 6509

a) Původní rotace

původní rotace PK 6509		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51620,381	0,9899751	0,0100249
52129,429	0,9997376	0,0002624
52488,476	1,0066234	0,0066234
52682,095	1,0103366	0,0103366
52249,19	1,0020344	0,0020344
51689,095	0,9912929	0,0087071
Průměrné vyhoření	52143,111 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6509		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51628,80952	0,9899758	0,0100242
52137,61905	0,9997322	0,0002678
52496,04762	1,0066050	0,0066050
52690,42857	1,0103322	0,0103322
52258,47619	1,0020496	0,0020496
51698,14286	0,9913053	0,0086947
Průměrné vyhoření	52151,587 MWd/tU	

Tab. 5.19 Porovnání vyhoření kazety 6513

a) Původní rotace

původní rotace PK 6513		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49734,429	1,0029879	0,0029879
49798,286	1,0042757	0,0042757
49795,238	1,0042142	0,0042142
49146,048	0,9911221	0,0088779
49181,571	0,9918385	0,0081615
49862,048	1,0055616	0,0055616
Průměrné vyhoření	49586,270 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6513		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49561,04762	0,9986718	0,0013282
49878,38095	1,0050662	0,0050662
50055,7619	1,0086405	0,0086405
49538,85714	0,9982247	0,0017753
49217,2381	0,9917440	0,0082560
49510,47619	0,9976528	0,0023472
Průměrné vyhoření	49626,960 MWd/tU	

Tab. 5.20 Porovnání vyhoření kazety 6526

a) Původní rotace

původní rotace PK 6526		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50463,571	1,0116216	0,0116216
48885,905	0,9799948	0,0200052
48439,905	0,9710540	0,0289460
49446,571	0,9912342	0,0087658
50849,857	1,0193653	0,0193653
51217,238	1,0267300	0,0267300
Průměrné vyhoření	49883,841 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6526		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50814,95238	1,0181323	0,0181323
50420,66667	1,0102324	0,0102324
49269,38095	0,9871651	0,0128349
48859,71429	0,9789570	0,0210430
49608,33333	0,9939564	0,0060436
50486,7619	1,0115567	0,0115567
Průměrné vyhoření	49909,968 MWd/tU	

Tab. 5.21 Porovnání vyhoření kazety 6528

a) Původní rotace

původní rotace PK 6528		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50997,524	1,0050889	0,0050889
51015,429	1,0054418	0,0054418
50470,619	0,9947043	0,0052957
50124,619	0,9878852	0,0121148
50795,048	1,0010984	0,0010984
51032,667	1,0057815	0,0057815
Průměrné vyhoření	50739,317 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6528		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50192	0,9887932	0,0112068
50337,61905	0,9916620	0,0083380
50981,90476	1,0043545	0,0043545
51085,71429	1,0063996	0,0063996
51073,28571	1,0061548	0,0061548
50894,66667	1,0026359	0,0026359
Průměrné vyhoření	50760,865 MWd/tU	

Tab. 5.22 Porovnání vyhoření kazety 6535

a) Původní rotace

původní rotace PK 6535		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46631,714	1,0065702	0,0065702
46029,905	0,9935798	0,0064202
45595,571	0,9842045	0,0157955
45892,333	0,9906103	0,0093897
46725,571	1,0085962	0,0085962
47088,905	1,0164389	0,0164389
Průměrné vyhoření	46327,333 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6535		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
47030,28571	1,0148379	0,0148379
45944,85714	0,9914161	0,0085839
45528,85714	0,9824395	0,0175605
45714,04762	0,9864356	0,0135644
46533,28571	1,0041134	0,0041134
47304,61905	1,0207576	0,0207576
Průměrné vyhoření	46342,659 MWd/tU	

Tab. 5.23 Porovnání vyhoření kazety 6539

a) Původní rotace

původní rotace PK 6539		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46370,762	0,9973776	0,0026224
46385,048	0,9976849	0,0023151
46360,238	0,9971513	0,0028487
46639,143	1,0031502	0,0031502
46778,571	1,0061491	0,0061491
46422,333	0,9984869	0,0015131
Průměrné vyhoření	46492,683 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6539		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46769,7619	1,0061441	0,0061441
46205,28571	0,9940007	0,0059993
45714,42857	0,9834410	0,0165590
46218,42857	0,9942834	0,0057166
46941,85714	1,0098463	0,0098463
47055,19048	1,0122844	0,0122844
Průměrné vyhoření	46484,159 MWd/tU	

Tab. 5.24 Porovnání vyhoření kazety 6545

a) Původní rotace

původní rotace PK 6545		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
46789,714	1,0059306	0,0059306
46680,143	1,0035750	0,0035750
46386,81	0,9972686	0,0027314
46406,524	0,9976924	0,0023076
46396,19	0,9974703	0,0025297
46423,762	0,9980630	0,0019370
Průměrné vyhoření	46513,857 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

vícenásobná rotace PK 6545		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
47044,2381	1,0115286	0,0115286
46155,95238	0,9924290	0,0075710
45777,52381	0,9842922	0,0157078
46391,28571	0,9974891	0,0025109
46659,52381	1,0032566	0,0032566
47019,85714	1,0110044	0,0110044
Průměrné vyhoření	46508,063 MWd/tU	

Kazety zavezené v 27. kampani:

Tab. 5.25 Porovnání vyhoření kazety 6604

a) Původní rotace

původní rotace PK 6604		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50184,381	0,9970784	0,0029216
50603,667	1,0054089	0,0054089
50739,667	1,0081110	0,0081110
50393,19	1,0012271	0,0012271
50017,619	0,9937651	0,0062349
50050,048	0,9944094	0,0055906
Průměrné vyhoření	50331,429 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6604		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50201,14286	0,9970016	0,0029984
50187,52381	0,9967311	0,0032689
50311	0,9991834	0,0008166
50524	1,0034136	0,0034136
50484,04762	1,0026201	0,0026201
50405	1,0010502	0,0010502
Průměrné vyhoření	50352,119 MWd/tU	

Tab. 5.26 Porovnání vyhoření kazety 6609

a) Původní rotace

původní rotace PK 6609		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50738,762	0,9945381	0,0054619
50942,429	0,9985302	0,0014698
51173,429	1,0030581	0,0030581
51461,190	1,0086986	0,0086986
51135,381	1,0023123	0,0023123
50653,286	0,9928627	0,0071373
Průměrné vyhoření	51017,413 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6609		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50945,95238	0,9992383	0,0007617
50796,52381	0,9963075	0,0036925
50702,04762	0,9944545	0,0055455
50946,048	0,9992402	0,0007598
51244,61905	1,0050963	0,0050963
51273,52381	1,0056632	0,0056632
Průměrné vyhoření	50984,78571 MWd/tU	

Tab. 5.27 Porovnání vyhoření kazety 6611

a) Původní rotace

původní rotace PK 6611		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50858,143	0,9968676	0,0031324
51247,952	1,0045082	0,0045082
51462,524	1,0087140	0,0087140
51066,952	1,0009604	0,0009604
50712,333	0,9940096	0,0059904
50759,81	0,9949402	0,0050598
Průměrné vyhoření	51017,952 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6611		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
51012,42857	0,9993745	0,0006255
50983,2381	0,9988026	0,0011974
51123	1,0015407	0,0015407
51163,28571	1,0023299	0,0023299
51028,09524	0,9996814	0,0003186
50956,09524	0,9982709	0,0017291
Průměrné vyhoření	51044,357 MWd/tU	

Tab. 5.28 Porovnání vyhoření kazety 6621

a) Původní rotace

původní rotace PK 6621		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
47495,571	1,0138202	0,0138202
46038,19	0,9827116	0,0172884
45497,571	0,9711718	0,0288282
46234,667	0,9869055	0,0130945
47609,857	1,0162597	0,0162597
48212,857	1,0291311	0,0291311
Průměrné vyhoření	46848,119 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6621		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
48172,61905	1,0274058	0,0274058
47406	1,0110556	0,0110556
46077,52381	0,9827225	0,0172775
45569,28571	0,9718830	0,0281170
46348,66667	0,9885053	0,0114947
47751,66667	1,0184279	0,0184279
Průměrné vyhoření	46887,627 MWd/tU	

Tab. 5.29 Porovnání vyhoření kazety 6625

a) Původní rotace

původní rotace PK 6625		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49663,476	1,0014863	0,0014863
48950,619	0,9871112	0,0128888
48811,714	0,9843102	0,0156898
49806,238	1,0043652	0,0043652
50257,238	1,0134598	0,0134598
50049,333	1,0092673	0,0092673
Průměrné vyhoření	49589,770 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6625		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49378,28571	0,9960792	0,0039208
49811	1,0048081	0,0048081
49584,04762	1,0002299	0,0002299
49687,04762	1,0023077	0,0023077
49657,42857	1,0017102	0,0017102
49318,09524	0,9948650	0,0051350
Průměrné vyhoření	49572,651 MWd/tU	

Tab. 5.30 Porovnání vyhoření kazety 6626

a) Původní rotace

původní rotace PK 6626		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49332,476	1,0107740	0,0107740
47939,81	0,9822396	0,0177604
47524,143	0,9737230	0,0262770
48341	0,9904596	0,0095404
49597,857	1,0162114	0,0162114
50104,524	1,0265925	0,0265925
Průměrné vyhoření	48806,635 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6626		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49950,19048	1,0233272	0,0233272
49237,28571	1,0087219	0,0087219
48025,667	0,9838995	0,0161005
47643,7619	0,9760755	0,0239245
48347,71429	0,9904973	0,0095027
49664,71429	1,0174786	0,0174786
Průměrné vyhoření	48811,556 MWd/tU	

Tab. 5.31 Porovnání vyhoření kazety 6649

a) Původní rotace

původní rotace PK 6649		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
50230,714	1,0132551	0,0132551
49826,143	1,0050941	0,0050941
48818,905	0,9847760	0,0152240
48904,095	0,9864945	0,0135055
49634,333	1,0012249	0,0012249
50027,476	1,0091554	0,0091554
Průměrné vyhoření	49573,611 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6649		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
49300,38095	0,9949075	0,0050925
49471,19048	0,9983545	0,0016455
49844	1,0058780	0,0058780
49766,28571	1,0043097	0,0043097
49502,66667	0,9989897	0,0010103
49431,85714	0,9975607	0,0024393
Průměrné vyhoření	49552,730 MWd/tU	

Tab. 5.32 Porovnání vyhoření kazety 6654

a) Původní rotace

původní rotace PK 6654		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
47868,619	0,9810882	0,0189118
49389,81	1,0122657	0,0122657
50141,429	1,0276705	0,0276705
49629,952	1,0171875	0,0171875
48251,429	0,9889341	0,0110659
47466,857	0,9728540	0,0271460
Průměrné vyhoření	48791,349 MWd/tU	

b) Vícenásobná rotace

původní rotace PK 6654		
Vyhoření (MWd/tU)	Relativní vyhoření (-)	Odchylka (-)
48377,95238	0,9911919	0,0088081
47641,57143	0,9761045	0,0238955
47991,47619	0,9832736	0,0167264
49199,66667	1,0080276	0,0080276
49942,90476	1,0232554	0,0232554
49693,57143	1,0181470	0,0181470
Průměrné vyhoření	48807,857 MWd/tU	

5.2.3 Vliv vícenásobné rotace na relativní a lineární výkon

Jak již bylo zmíněno, maximální hodnoty relativních a lineárních výkonů palivových proučků jsou prvním a druhým rokem zavezení v AZ. Obecně lze říct, že s přibývajícím délkou pobytu paliva v AZ výkony palivových proučků klesají. Hodnoty relativních výkonů jsou v tabulkách 5.33 až 5.36. Hodnoty lineárních výkonů jsou v 5.37 až 5.40. Nejvyšší relativní poproučkové výkony průběhu let jsou označeny modře.

Při porovnání relativních výkonů použitých rotací s vícenásobnou rotací je zřejmé, že některé vícenásobné rotace provedené druhým rokem vedly ke zvýšení relativního výkonu nad limitní hodnotu. Například u kazety 6426 se relativní výkon zvýšil z 1,5370 na 1,5767. Již zmíněná limitní hodnota pro palivo Gd-2M je 1,55. Avšak hodnota 1,5767 by se mohla za určitých okolností použít. Program MOBY-DICK zjednoduší výpočet kampaně tím, že během jednoho časového kroku najede z nulového výkonu

na plný výkon reaktoru 1444 MWt. Reálně však tento proces trvá zhruba okolo dvou dnů. Tato hodnota byla na začátku kampaně pouze v jednom okamžiku. Krátkodobě by tedy bylo možné tuto hodnotu brát jako vyhovující. Další hodnoty, které jsou u vícenásobné rotace vyšší než limitní jsou u kazet 6354, 6509, 6526, 6654. Hodnoty u těchto kazet jsou až příliš vysoké a v praxi by se na ně musel brát ohled. Reálně by tedy nešly použít. Pro účel této diplomové práce však byly zanedbány. Hlavním účelem totiž bylo poukázat a vysvětlit možnost použití vícenásobné rotace.

Tabulky s relativními výkony:

Tab. 5.33 Relativní výkony kazet zavezených ve 24. kampani v průběhu let

Relativní výkon kazet zavezených ve 24. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)
6313	1,5322	1,5459	1,2113	0,8447	0,6174
6326	1,3971	1,5572	1,4141	1,2376	0,4349
6330	1,51	1,343	1,2069	1,1791	x
6354	1,3961	1,5575	1,4116	1,2336	0,4344
Relativní výkon kazet zavezených ve 24. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)
6313	1,5329	1,5483	1,2142	0,8447	0,6377
6326	1,3982	1,5593	1,4137	1,2324	0,448
6330	1,5086	1,3379	1,203	1,177	x
6354	1,3981	1,5595	1,4167	1,2313	0,4479
Relativní výkon kazet zavezených 24. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)
6313	1,5329	1,5521	1,2127	0,8538	0,6183
6326	1,3982	1,6112	1,3977	1,2055	0,4413
6330	1,5086	1,3374	1,2052	1,1805	x
6354	1,3981	1,6109	1,3974	1,2152	0,4386

Tab. 5.34 Relativní výkony kazet zavezených ve 25. kampani v průběhu let

Relativní výkon kazet zavezených ve 25. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)
6409	1,4775	1,5149	1,3711	0,859	x
6417	1,5309	1,5325	1,2572	1,1564	x
6426	1,3885	1,5356	1,1606	1,1364	x
6430	1,5466	1,3476	1,1493	1,089	x
6439	1,5037	1,5079	1,3648	0,9006	0,4797
Relativní výkon kazet zavezených ve 25. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)
6409	1,4739	1,5357	1,3922	0,8747	x
6417	1,5306	1,5282	1,2656	1,1343	x
6426	1,3861	1,5370	1,208	1,1381	x
6430	1,5128	1,3458	1,1459	1,0867	x
6439	1,5167	1,5473	1,3776	0,9197	0,496
Relativní výkon kazet zavezených 25. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)
6409	1,4739	1,5375	1,392	0,8885	x
6417	1,5306	1,5500	1,2851	1,148	x
6426	1,3861	1,5767	1,1986	1,1214	x
6430	1,5128	1,3551	1,142	1,0836	x
6439	1,5167	1,5500	1,3782	0,9157	0,4961

Tab. 5.35 Relativní výkony kazet zavezených ve 26. kampani v průběhu let

Relativní výkon kazet zavezených ve 26. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)
6509	1,4243	1,5407	0,434	x	x
6513	1,5324	1,5274	1,3084	0,743	0,4512
6526	1,3947	1,5509	1,3962	1,1772	x
6528	1,5315	1,5273	1,3059	0,743	0,609
6535	1,536	1,5236	1,279	0,5798	x
6539	1,4688	1,5028	1,3403	0,8602	x
6545	1,4671	1,5061	1,3406	0,86	x
Relativní výkon kazet zavezených ve 26. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)
6509	1,4248	1,5394	1,4479	x	x
6513	1,5343	1,5241	1,3132	0,7441	0,4596
6526	1,3945	1,5498	1,3927	1,1777	x
6528	1,5353	1,5233	1,3099	0,744	0,6194
6535	1,5402	1,5189	1,2771	0,5845	x
6539	1,4613	1,5033	1,338	0,888	x
6545	1,4627	1,5062	1,3383	0,8879	x
Relativní výkon kazet zavezených 26. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)
6509	1,4247	1,5969	0,4479	x	x
6513	1,5343	1,5427	1,3227	0,7426	0,4609
6526	1,3945	1,6095	1,3866	1,1725	x
6528	1,5353	1,5318	1,3197	0,7429	0,619
6535	1,5402	1,5253	1,2779	0,5823	x
6539	1,4613	1,5443	1,327	0,8819	x
6545	1,4627	1,5464	1,3104	0,8753	x

Tab. 5.36 Relativní výkony kazet zavezených ve 27. kampani v průběhu let

Relativní výkon kazet zavezených ve 27. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)	31 (-)
6604	1,5238	1,3779	1,2542	0,9878	x
6609	1,3875	1,5059	1,3115	1,2188	0,4402
6611	1,5287	1,5465	1,084	1,2201	0,4374
6621	1,5604	1,5487	1,0844	1,0645	x
6625	1,5317	1,4722	1,2755	1,1518	x
6626	1,4138	1,5685	1,3573	1,2569	x
6649	1,531	1,477	1,2754	1,1506	x
6654	1,4135	1,5686	1,3566	1,2561	x
Relativní výkon kazet zavezených ve 27. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)	31 (-)
6604	1,5156	1,3744	1,2524	0,9871	x
6609	1,3977	1,5030	1,3114	1,2215	0,4505
6611	1,5216	1,5985	1,0849	1,2231	0,4496
6621	1,5515	1,5382	1,0856	1,0647	x
6625	1,5323	1,4752	1,2758	1,1526	x
6626	1,4168	1,5607	1,355	1,2613	x
6649	1,5315	1,4755	1,2759	1,1516	x
6654	1,4165	1,5610	1,3549	1,2247	x
Relativní výkon kazet zavezených 27. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (-)	28. kampaň (-)	29. kampaň (-)	30. kampaň (-)	31 (-)
6604	1,5151	1,3772	1,2549	0,9768	x
6609	1,3976	1,5499	1,31	1,2197	0,4477
6611	1,5216	1,5489	1,08	1,2206	0,4486
6621	1,5514	1,5499	1,0852	1,0649	x
6625	1,532	1,4909	1,293	1,1378	x
6626	1,4171	1,6194	1,3557	1,2593	x
6649	1,5312	1,4914	1,291	1,1369	x
6654	1,4151	1,6205	1,3559	1,2602	x

Tabulky s lineárními výkony:

Tab. 5.37 Lineární výkony kazet zavezených ve 24. kampani v průběhu let

Lineární výkon kazet zavezených ve 24. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (kW/m)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)
6313	20,13	20,31	15,91	11,10	8,11
6326	18,35	20,45	18,57	16,26	5,71
6330	19,83	17,64	15,85	15,49	x
6354	18,34	20,46	18,54	16,20	5,71
Lineární výkon kazet zavezených ve 24. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (kW/m)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)
6313	20,13	20,34	15,95	11,10	8,38
6326	18,37	20,48	18,57	16,19	5,88
6330	19,82	17,57	15,80	15,46	x
6354	18,36	20,48	18,61	16,17	5,88
Lineární výkon kazet zavezených ve 24. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	24. kampaň (kW/m)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)
6313	20,13	20,39	15,93	11,21	8,12
6326	18,37	21,16	18,36	15,83	5,80
6330	19,82	17,57	15,83	15,51	x
6354	18,36	21,16	18,35	15,96	5,76

Tab. 5.38 Lineární výkony kazet zavezených ve 25. kampani v průběhu let

Lineární výkon kazet zavezených ve 25. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)
6409	19,41	19,90	18,01	11,28	x
6417	20,11	20,13	16,51	15,19	x
6426	18,24	20,17	15,24	14,93	x
6430	20,31	17,70	15,10	14,30	x
6439	19,75	19,81	17,93	11,83	6,30
Lineární výkon kazet zavezených ve 25. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)
6409	19,36	20,17	18,29	11,49	x
6417	20,10	20,07	16,62	14,90	x
6426	18,21	20,19	15,87	14,95	x
6430	19,87	17,68	15,05	14,27	x
6439	19,92	20,32	18,09	12,08	6,51
Lineární výkon kazet zavezených ve 25. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	25. kampaň (kW/m)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)
6409	19,36	20,20	18,28	11,67	x
6417	20,10	20,36	16,88	15,08	x
6426	18,21	20,71	15,74	14,73	x
6430	19,87	17,80	15,00	14,23	x
6439	19,92	20,36	18,10	12,03	6,52

Tab. 5.39 Lineární výkony kazet zavezených ve 26. kampani v průběhu let

Lineární výkon kazet zavezených ve 26. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)
6509	18,71	20,24	5,70	x	x
6513	20,13	20,06	17,19	9,76	5,93
6526	18,32	20,37	18,34	15,46	x
6528	20,12	20,06	17,15	9,76	8,00
6535	20,18	20,01	16,80	7,62	x
6539	19,29	19,74	17,60	11,30	x
6545	19,27	19,78	17,61	11,30	x
Lineární výkon kazet zavezených ve 26. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)
6509	18,71	20,22	19,02	x	x
6513	20,15	20,02	17,25	9,77	6,04
6526	18,32	20,36	18,29	15,47	x
6528	20,17	20,01	17,21	9,77	8,14
6535	20,23	19,95	16,77	7,68	x
6539	19,19	19,75	17,57	11,66	x
6545	19,21	19,78	17,58	11,66	x
Lineární výkon kazet zavezených ve 26. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	26. kampaň (kW/m)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)
6509	18,71	20,98	5,88	x	x
6513	20,15	20,26	17,37	9,75	6,05
6526	18,32	21,14	18,21	15,40	x
6528	20,17	20,12	17,33	9,76	8,13
6535	20,23	20,03	16,79	7,65	x
6539	19,19	20,28	17,43	11,58	x
6545	19,21	20,31	17,21	11,50	x

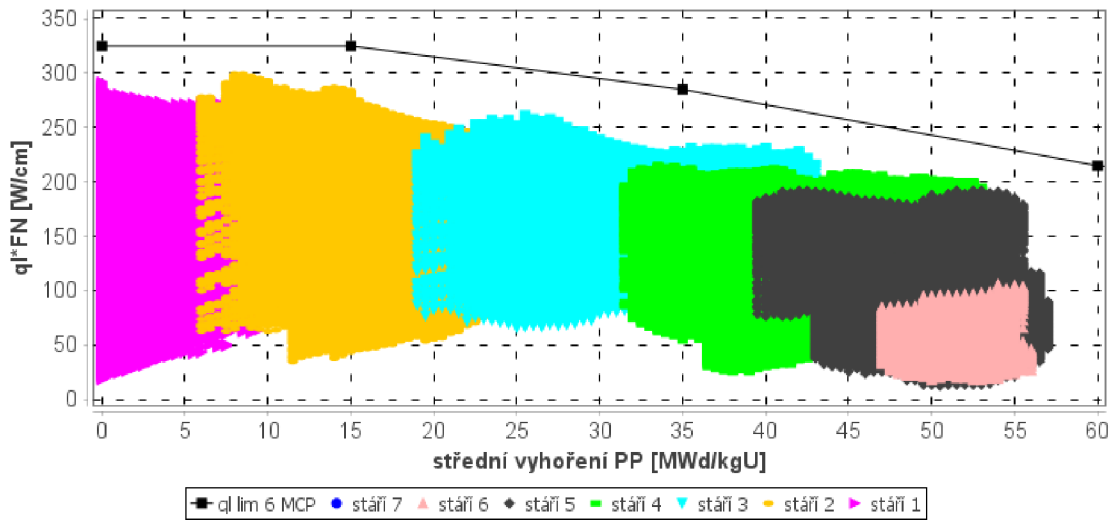
Tab. 5.40 Lineární výkony kazet zavezených ve 27. kampani v průběhu let

Lineární výkon kazet zavezených ve 27. kampani bez rotace					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)	31. kampaň (kW/m)
6604	20,02	18,10	16,47	12,97	x
6609	18,22	19,78	17,23	16,01	5,78
6611	20,08	20,31	14,24	16,03	5,75
6621	20,50	20,34	14,24	13,98	x
6625	20,12	19,34	16,75	15,13	x
6626	18,57	20,60	17,83	16,51	x
6649	19,61	20,98	17,77	11,44	x
6654	20,11	19,40	16,75	15,11	x
Lineární výkon kazet zavezených ve 27. kampani s rotací					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)	31. kampaň (kW/m)
6604	19,91	18,05	16,45	12,97	x
6609	18,36	19,74	17,23	16,04	5,92
6611	19,99	21,00	14,25	16,07	5,91
6621	20,38	20,20	14,26	13,98	x
6625	20,13	19,38	16,76	15,14	x
6626	18,61	20,50	17,80	16,57	x
6649	19,62	20,38	17,48	6,47	x
6654	20,12	19,38	16,76	15,13	x
Lineární výkon kazet zavezených ve 27. kampani s vícenásobnou rotací					
Číslo kazety (-)	27. kampaň (kW/m)	28. kampaň (kW/m)	29. kampaň (kW/m)	30. kampaň (kW/m)	31. kampaň (kW/m)
6604	19,90	18,09	16,48	12,83	x
6609	18,36	20,36	17,21	16,02	5,88
6611	19,99	20,34	14,19	16,03	5,89
6621	20,38	20,36	14,25	13,99	x
6625	20,12	19,58	16,98	14,95	x
6626	18,57	20,60	17,82	16,50	x
6649	18,61	20,50	17,80	16,09	x
6654	18,59	21,29	17,81	16,55	x

V tabulkách 5.37 až 5.40 jsou maximální lineární výkony. Nejvyšší lineární výkon palivového proutku vyšel pro kazetu 6654, konkrétně 21,29 (Tab. 5.40) Pro přehlednost byly vytvořeny grafy na obrázcích 5.40 až 5.46. Grafy je limitní lomená křivka pro ověření maximálního lineárního výkonu při použití vícenásobných rotací. Všechny lineární výkony jsou pod limitní křivkou a splňují limitní hodnoty. Nejvyšší limitní

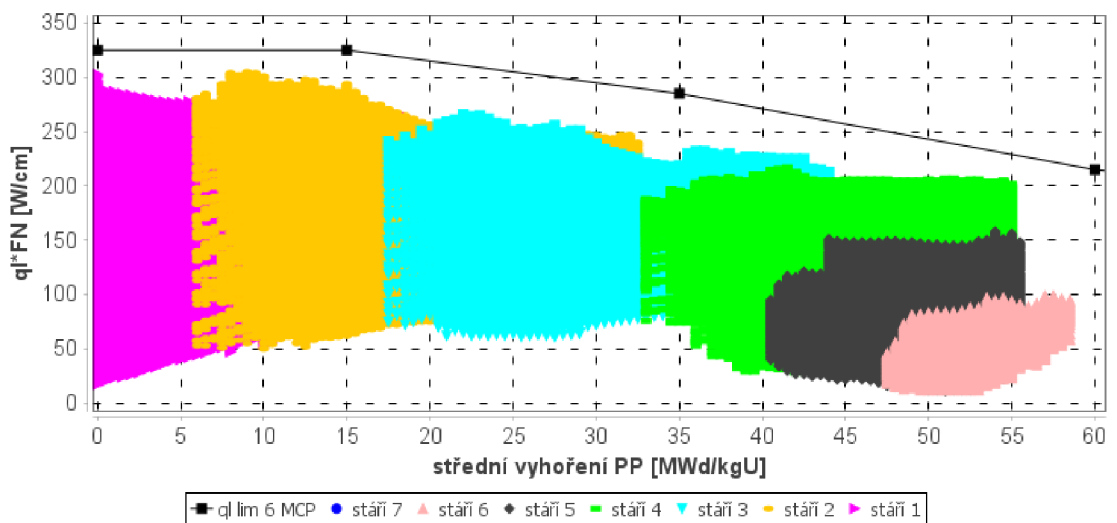
hodnota je 32,5 kW/m pro vyhoření 0 MWd/kgU. Tato hodnota se snižuje s vyšším vyhořením.

25. kampaň s vícenásobnou rotací



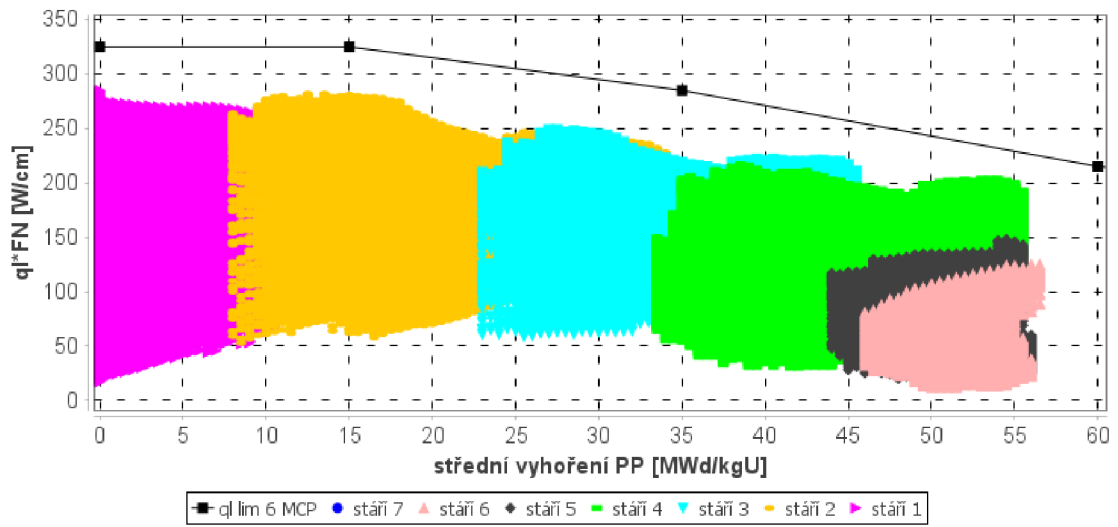
Obrázek 5.40 Vyhoření proutků 25. kampaně s vícenásobnou rotací

26. kampaň s vícenásobnou rotací



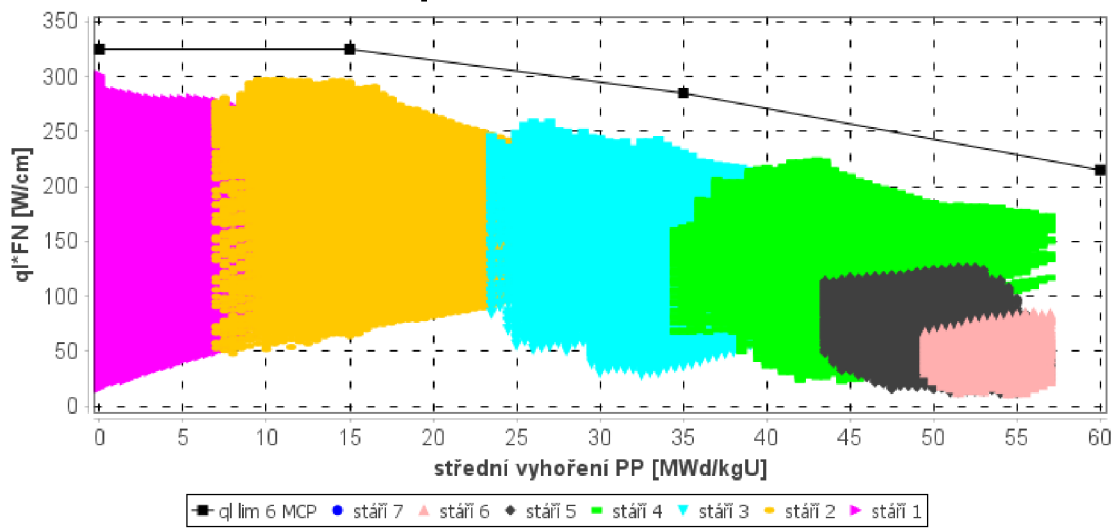
Obrázek 5.41 Vyhoření proutků 26. kampaně s vícenásobnou rotací

27. kampaň s vícenásobnou rotací



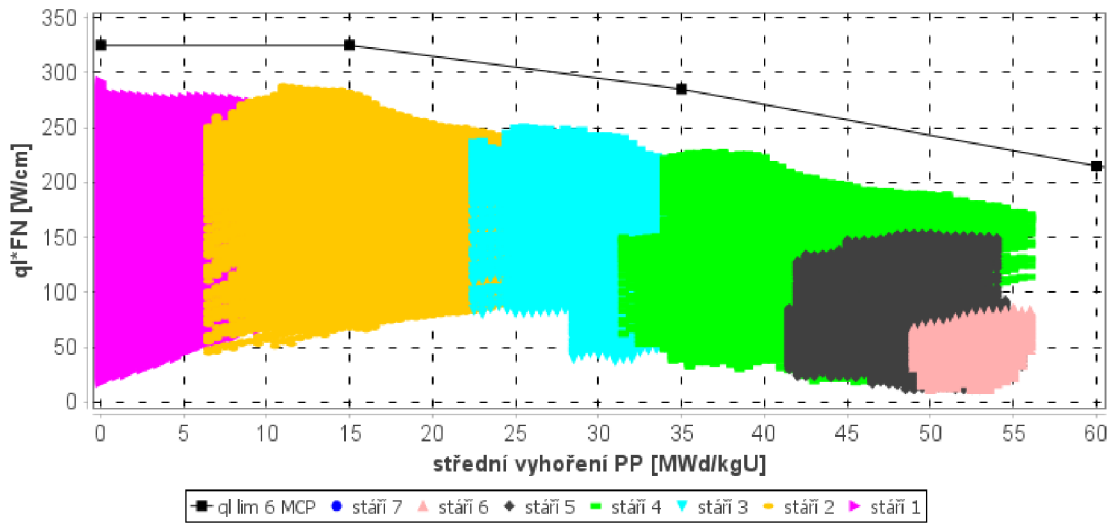
Obrázek 5.42 Vyhoření proutků 27. kampaň s vícenásobnou rotací

28. kampaň s vícenásobnou rotací



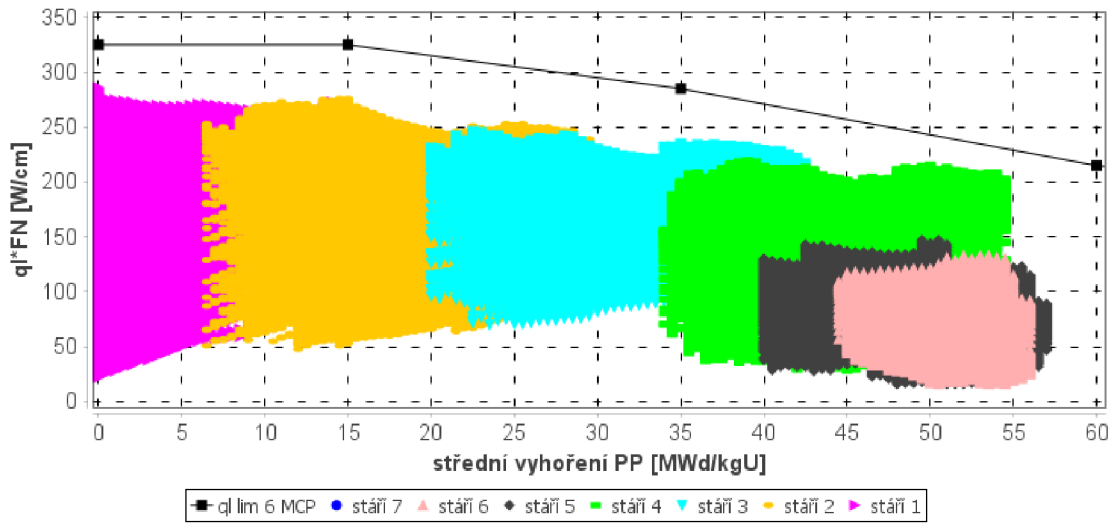
Obrázek 5.43 Vyhoření proutků 28. kampaň s vícenásobnou rotací

29. kampaň s vícenásobnou rotací



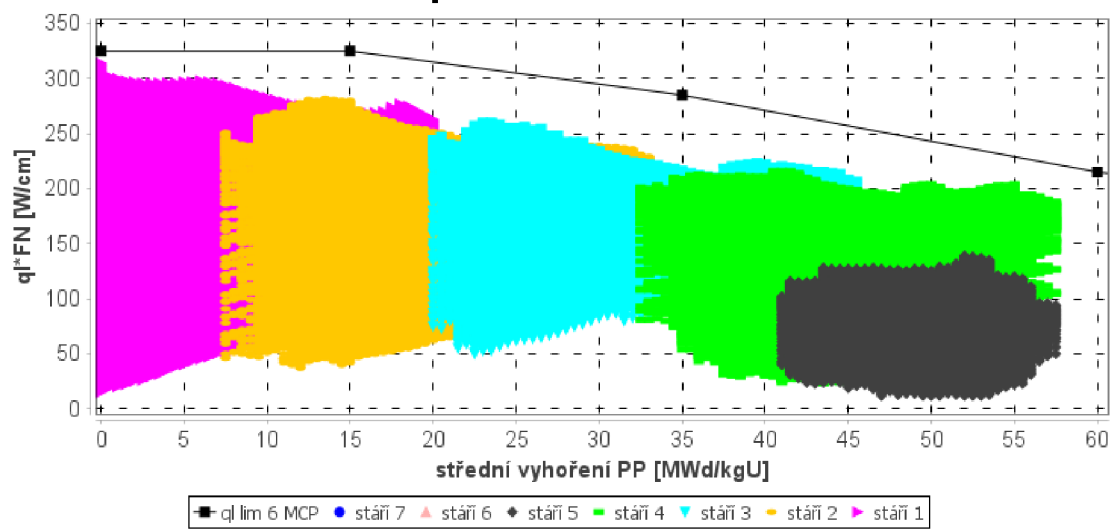
Obrázek 5.44 Vyhoření proutků 29. kampaň s vícenásobnou rotací

30. kampaň s vícenásobnou rotací



Obrázek 5.45 Vyhoření proutků 30. kampaň s vícenásobnou rotací

31. kampaň s vícenásobnou rotací



Obrázek 5.46 Vyhoření proutků 31. kampaň s vícenásobnou rotací

6. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá analýzou aktivní zóny reaktoru VVER-440 a její optimalizací. Konkrétně vlivem rotace palivových kazet na optimalizaci AZ. Reaktory typu VVER byly zvoleny, jelikož jsou provozovány v Jaderné elektrárně Dukovany. První část diplomové práce obsahuje stručný popis jaderného reaktoru VVER-440 a jeho aktivní zóny. Dále je zde popsán vývoj palivové vsázky v průběhu let. Dále jsou zde uvedeny typy paliva použitého na EDU.

Nejprve se praktická část zabývá výpočty palivových vsázek s rotacemi kazet. Všechny výpočty byly provedeny v programu MOBY-DICK, který je zapůjčený od Škoda JS a.s. První část praktické práce obsahuje porovnání palivové vsázky bez použití rotace a s použitím. Porovnány byly z hlediska vlivu rotace na délku kampaně (Tab. 5.1). Z výsledků je možné vidět prodloužení kampaní díky rotaci (až o 1,579 dne). Dalšími porovnanými parametry byly relativní výkon palivových proutků (Tab. 5.2) a lineární výkon (Tab. 5.3). Mimo tři kampaně došlo u všech ostatních ke snížení maximálního relativního výkonu palivového proutku a maximálního lineárního výkonu. Lineární výkon pro 20. až 35. kampaň byl také ověřen v grafech na obrázcích 5.7 až 5.38. V těchto grafech je vynesena závislost lineárního výkonu axiálního úseku palivového proutku na vyhoření palivového proutku. Z těchto grafů lze pozorovat výrazný rozdíl v rovnoměrnosti vyhořívání palivových proutků v kazetě. Díky rotaci kazet vyhořívají proutky rovnoměrněji. Nejvíce je efekt rotace vidět na nejstarších kazetách v 32. kampani (Obrázek 5.31 a 5.32). Vyhoření palivových proutků bez použití rotace by se v tomto případě pohybovalo v rozmezí od 38 až po 65 MWd/kgU. Použitím rotace se vyhoření palivových proutků pohybovalo od 46 do 57 MWd/kgU. Tím byl potenciál palivových kazet využit mnohem více než kdyby rotovány nebyly.

Dále se praktická část věnovala zkoumání vícenásobné rotace kazet. Ta byla porovnáována s původní rotací (současně používanou). V kapitole 5.2.1 je porovnána délka kampaní pro obě varianty. U mimo 29. a 31. kampaň se délka palivového cyklu mírně prodloužila. Nejlépe vyšla 28. kampaň, kterou by bylo možné prodloužit vícenásobnou rotací o 0,077 dne. Reálně je tento rozdíl zanedbatelný. V kapitole 5.2.2 byla porovnána nerovnoměrnost vyhoření vytipovaných kazet. Vytipované kazety byly zavezeny v 24. až 27. kampani. Vícenásobná rotace vedla k rovnoměrnějšímu vyhoření

palivových kazet (Tab. 5.9 až 5.32). Dále se také u většiny kazet mírně zvýšilo průměrné vyhoření, nejvíce u kazety 6513 (Tab. 5.19). U této kazety se vyhoření zvýšilo z 49 586,27 MWd/tU na 49 626,96 MWd/tU. Poslední kapitola byla věnována porovnání původní a vícenásobné rotace z hlediska limitních hodnot. Relativní výkony palivových proudků u vícenásobné rotace byly u většiny kazet pod limitní hodnotou 1,55 (Tab. 5.33 až 5.36). Překročeny byly u kazet 6354, 6526, 6626 a 6654. Pro ukázkou vlivu vícenásobné rotace byly v této diplomové práci zanedbány. Reálně by zanedbat nešly a musel by se zvolit jiný stupeň rotace. Maximální lineární výkon vyšel u všech nejzatíženějších proudků pod stanovený limit 32,5 kW/m pro vyhoření 0 MWd/kgU. Pro kampaně 25 až 31 byl lineární výkon ověřen lomenou křivkou (viz. grafy 5.40 až 5.46). Všechny axiální úseky palivových proudků limity lineárního výkonu splňují.

Vícenásobná rotace by měla příznivý vliv na délku kampaně a rovnoměrnější vyhoření palivových proudků. Výsledné hodnoty však nebyly příliš rozdílné od hodnot původních rotací. Podrobnějším zkoumáním vícenásobné rotace by bylo možné dosáhnout lepších výsledků. Při dalším studiu této problematiky může být provedeno mnohem více výpočtů vícenásobné rotace. Zejména pro jiné druhy paliva. Také by mohla být porovnána s rotací každým druhým rokem.

LITERATURA

- [1] RAČEK, J. *Jaderné elektrárny: Skripta*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2008. ISBN 978-80-214-3770-8.
- [2] SKLENKA, L., HERALTOVÁ L. *Provozní reaktorová fyzika*. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05901-2.
- [3] BURKET, D. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Jaderná elektrárna Dukovany, 2003. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka CSc.
- [4] SMOLA, L. *Rozložení výkonu a teplot v palivových souborech reaktoru VVER-440 na Elektrárně Dukovany*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [5] Zýbal J., Five years of operational experience with Gd-2M+ fuel, 2019
- [6] *Jaderná energetika* [online]. Brno: MUNI, Příhoda [cit. 2022-01-14].
Dostupné
z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2018/C5040/um/28_Jaderna_energetika_2018.pdf
- [7] LAMARSH, J. R. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*. New York: New York University.
- [8] Janečková P., *Difúze neutronů: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská* [online]. Praha: České vysoké učení technické, [cit. 2022-01-14].
- [9] OKA, Yoshiaki. *Nuclear reactor design*. Tokyo: Springer, 2014. *Advanced course in nuclear engineering*. ISBN 978-443-1548-973.
- [10] *A general monte Carlo N-Particle Transport Code* [online]. Los Alamos National Laboratory: Breismeister J.F., 2000 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-13709-M>
- [11] JELÍNEK, M. *Analýza neutronového pole laboratorního AmBe zdroje s využitím měřicího stendu*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.

- [12] NOVOTNÝ, F. *Výpočetní analýza chování aktivní zóny tlakovodního jaderného reaktoru*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [13] *Neutron Transport Theory: Sample lesson* [online]. Pennsylvania: State University, 2009 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: http://www.engr.psu.edu/cde/courses/nuce521/nuce521_chapter1_reading.pdf
- [14] *Příručka k programu MOBY-DICK: Abstrakt výpočtového programu MOBY-DICK*, Jaderná elektrárna Dukovany: ŠKODA JS, Ae 10068/Dok.
- [15] Bajgl J., *Oddělení projektování a bezpečnostního hodnocení vsázek – ústní konzultace*
- [16] Vytiska, T. *Seznámení s programem MOBY-DICK a výpočet a výpočet benchmarku s palivem Gd-2 (EDU)*. Praha, 2007 Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů
- [17] Hejzlar, J. *Grafické rozhraní (mapview) programu MOBYDICK*. Praha, 2010 Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky:

AZ	Aktivní zóna
DNBR	Departure from Nuclear Boiling Ratio
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
HRK	Havarijní, regulační a kompenzační kazeta
NF	Neutronově-fyzikální
PK	Palivová kazeta
TH	Termo-hydraulický
VVER	Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor (tlakovodní reaktor východního typu)

Symboly:

c_q	relativní výkon palivového proutku	-
q	lineární výkon	kW/m
K_q	koeficient nerovnoměrnosti vývinu tepla	-
μ	součinitel vyrovnání vývinu tepla	-