



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Martin Sedlák

**ID:** 164392

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Citlivostní analýza vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu jaderného paliva

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s druhy paliva používanými v reaktorech VVER1000.
2. Seznamte se s metodikou citlivostních analýz.
3. Detailně se seznamte s prostředím výpočetního balíku SCALE a jednotlivými moduly, které jsou potřebné k citlivostní analýze.
4. Provedte analýzu jednotlivých palivových proutek paliva TVSA-T (1. kampaň JE Temelín) a diskutujte vliv jednotlivých nepřesností na reaktivitu paliva.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Filip Novotný

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

Bibliografická citace práce:

SEDLÁK, M. *Citlivostní analýza vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu jaderného paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Filip Novotný.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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.

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Filipu Novotnému, za vedení a užitečné rady při zpracovávání práce, dále také za možnost využít k některým výpočtům školní server.



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VLIVU VÝROBNÍCH  
NEPŘESNOSTÍ NA REAKTIVITU JADERNÉHO PALIVA**  
SENSITIVITY ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MANUFACTURING INACCURACIES ON THE NUCLEAR  
FUEL REACTIVITY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Martin Sedlák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Filip Novotný**

**BRNO 2016**

**ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá citlivostní analýzou výrobních nepřesností na reaktivitu jaderného paliva. Citlivostní analýza byla provedena pro palivový soubor TVSA-T, pro jaderné reaktory VVER 1000. Konkrétně na palivovém proutku typu tvel - bez vyhořívajících absorbátorů. V prostředí SCALE bylo nasimulováno 33 kombinací maximálních a minimálních hodnot výrobních parametrů. Dále byly zkoumány změny multiplikačního činitele v závislosti na vyhořívání pro 5 kombinací. Bylo zjištěno, že nejvýznamnější vliv na reaktivitu má přesnost obohacení a vnější průměr pokrytí paliva. Významným zjištěním bylo, že vliv výrobních nepřesností není stálý v průběhu vyhořívání. Přínosem práce je zjištění vlivu jednotlivých nepřesností na reaktivitu a faktu, že jejich vliv není konstantní v průběhu vyhořívání.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** citlivostní analýza; jaderná energetika; jaderné palivo; SCALE; tvel; TVSA-T; vyhořívání;

**ABSTRACT**

This thesis deals with a sensitivity analysis of the influence of manufacturing inaccuracies on the reactivity of nuclear fuel. Sensitivity analysis has been done for fuel assembly TVSA-T, for nuclear reactors VVER-1000. Particularly, for fuel rod of type tvel - without burnable absorbers. Thirty three combinations of maximal and minimal of manufacturing parameters were simulated in SCALE environment. Changes of multiplication coefficient in dependence on burnup for 5 combinations have been also studied. It has been found that the most significant influence on the reactivity has the accuracy of enrichment and outer diameter of cladding. It has also been found that influence of manufacturing inaccuracies is not constant during burnup. The benefit of the thesis is determining the effects of individual inaccuracies on the reactivity and the fact that their influence is not constant during burnup.

**KEY WORDS:** sensitivity analysis; nuclear energy; nuclear fuel; SCALE; tvel; TVSA-T; burnup;

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 CÍLE BP .....</b>	<b>11</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ A PALIVA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 ROZDĚLENÍ REAKTORŮ .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 SROVNÁNÍ REAKTORŮ TYPU PWR A VVER .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 SROVNÁNÍ REAKTORŮ VVER 440 A VVER 1000 .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 REAKTORY TYPU VVER 1000 .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5 PALIVO TYPU TVSA-T.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 STRUČNÝ PŘEHLED OSTATNÍCH TYPŮ PALIVA.....</b>	<b>22</b>
<b>3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 PŘEHLED NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH METOD.....</b>	<b>24</b>
<b>4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PALIVA .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 ÚVOD DO VÝPOČTŮ POMOCÍ SCALE .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 VÝPOČET KRITICHNOSTI TVSA-T .....</b>	<b>27</b>
4.2.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTU KRITICHNOSTI PRO ČERSTVÉ PALIVO .....	30
<b>4.3 ROZŠÍŘENÍ ANALÝZY PRO ZMĚNY V PRŮBĚHU VYHOŘENÍ.....</b>	<b>32</b>
4.3.1 NASTAVENÍ SCALE PRO VÝPOČTY VYHOŘENÍ .....	32
4.3.2 TVORBA MODELU.....	32
4.3.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZMĚN KRITICHNOSTI V PRŮBĚHU VYHOŘÍVÁNÍ.....	34
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
<b>6 POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHA A .....</b>	<b>44</b>
<b>PŘÍLOHA B.....</b>	<b>54</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 2-1 Charakteristickým rozdílem je tvar a uspořádání palivových souborů.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-2 Prostorové uspořádání primárního okruhu VVER 1000.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-3 Schéma reaktoru typu VVER 1000 [7] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4 Schéma PS typu TVSA-T [7].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-5 Grafické srovnání některých typů PS [9] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-1 Řez palivovým proutkem použitým při citlivostní analýze.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-2 Graf vlivu změn jednotlivých parametrů .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-3 Graf kritičnosti v závislosti na době vyhoření.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-4 Srovnání průběhů s maximální a minimální počáteční reaktivitou.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-5 Srovnání varianty A1B1C2D1E1 s nominální variantou .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-6 Srovnání varianty A1B1C2D1E2 s nominální variantou .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-7 Srovnání varianty A2B2C2D2E1 s nominální variantou .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-8 Srovnání varianty A2B2C2D2E2 s nominální variantou .....</i>	<i>39</i>



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1 Výčet základních typů energetických reaktorů [2]</i> .....	12
<i>Tab. 2-2 Srovnání technických parametrů systému s reaktory PWR [5]</i> .....	15
<i>Tab. 2-3 Srovnání technických parametrů systému s reaktory VVER</i> .....	16
<i>Tab. 2-4 Základní parametry AZ VVER 1000 [7]</i> .....	18
<i>Tab. 2-5 Technické parametry paliva TVSA-T [9]</i> .....	21
<i>Tab. 4-1 výrobních tolerancí a jejich zvolených označení [16][17]</i> .....	28
<i>Tab. 4-2 Poloměry použité v simulaci pro jednotlivé vrstvy uranu</i> .....	29
<i>Tab. 4-3 Hodnoty výrobních parametrů pro kombinace s nejvyšším a nejnižším multiplikačním činitelem</i> .....	31
<i>Tab. I-1 Detailní výsledky provedených simulací</i> .....	44
<i>Tab. I-2 Hodnoty multiplikačního činitele v závislosti na čase</i> .....	53

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AZ	<u>A</u> ktivní <u>z</u> óna	
BWR	<u>B</u> oiling <u>W</u> ater <u>R</u> eactor	
GeeWiz	<u>G</u> raphically <u>E</u> nhanced <u>E</u> ditng <u>W</u> izard	
IAEA	<u>I</u> nternational <u>A</u> tomc <u>E</u> nergy <u>A</u> gency	
JE	<u>J</u> aderná <u>e</u> lektrárna	
MAAE	<u>M</u> ezinárodní <u>a</u> gentura pro <u>a</u> tomovou <u>e</u> nergii	
NEWT	<u>N</u> ew <u>E</u> SC-based <u>W</u> eighting <u>T</u> ransport	
PS	<u>P</u> alivový <u>s</u> oubor	
PWR	<u>P</u> ressurized <u>W</u> ater <u>R</u> eactor	
RO	<u>R</u> egulační <u>o</u> rgán	
SCALE	<u>S</u> tandardized <u>C</u> omputer <u>A</u> nalyses for <u>L</u> icensing <u>E</u> valuation	
T-NEWT	Modul prostředí SCALE pro výpočet multiplikačního činitele	
T-DEPL	Modul prostředí SCALE pro výpočet multiplikačního činitele v průběhu vyhořívání	
TRITON	<u>T</u> ransport <u>R</u> igor <u>I</u> mplemented with <u>T</u> ime dependent <u>O</u> peration for <u>N</u> eutronic depletion	
VVER	<u>V</u> odo- <u>v</u> odní <u>e</u> nergetický <u>r</u> eaktor	
$S_U$	Obsah části s $UO_2$	(mm)
$P_v$	Specifický výkon	(MW/tU)
$P$	Výkon (tepelný)	(MW)
$m$	Hmotnost	(tU)
$k_\infty$	Multiplikační činitel pro nekonečné prostředí	( - )
$\Delta k_\infty$	Rozdíl multiplikačních činitelů	( - )

# 1 ÚVOD

Jaderná energetika tvoří významnou část energetiky. Po jejím rychlém rozvoji v 70tých a 80tých letech došlo ke zpomalení výstavby nových reaktorů. Zejména po haváriích v jaderných elektrárnách Three Mile Island a v Černobyli. Jaderné energetika se opět začala stávat velmi slibným zdrojem v období takzvané „Jaderné renezance“, což je období mezi léty 2001-2011, kdy se dostávaly plány na výstavbu nových bloků do vládních programů a strategických plánů. Hlavně z důvodu stále se zvyšujících obav z emisí skleníkových plynů a zvyšování cen fosilních paliv. Toto období však bylo ukončeno jednak kvůli snížení cen fosilních paliv souvisejících s rozvojem těžby zemního plynu a ropy frakováním a také havárií v JE Fukušima v roce 2011, po které opět ustala politická vůle pro další výstavbu.

V roce 2014 bylo v jaderných elektrárnách vyrobeno 2 411 TWh, což představuje 11,5 % celosvětové výroby elektřiny. K 1. 3. 2016 bylo připojeno k síti 440 reaktorů a ve stádiu výstavby dalších 65. [1]

Dá se pozorovat výrazný rozdíl v přístupu k jaderné energetice mezi regiony i jednotlivými zeměmi. Zatímco asijské země staví velké množství nových jaderných elektráren k udržení a podpoře svého ekonomického růstu (Čína, Indie). Evropské země plánují svoje jaderné elektrárny postupně odstavovat (Německo, Švýcarsko), či udržovat jejich podíl na výrobě elektřiny stabilní. Pouze Slovensko a Finsko provádí výstavbu nových bloků.

Právě pokračující výzkum se zapojením nových softwarových technologií by mohl přispět k dalšímu zvýšení bezpečnosti a zlepšení ekonomiky provozů jaderných elektráren. Tyto vlastnosti budou klíčové pro jejich zachování a budoucí rozvoj.

V první části práce je zmíněno dělení jaderných reaktorů a blíže popsán VVER 1000, následuje popis paliva typu TVSA-T a jeho srovnání s dalšími typy. V další kapitole je pak popsána citlivostní analýza a vyjmenovány její nejvýznamnější metody. Následuje popis prostředí SCALE a jeho možností. Na který navazuje hlavní cíl práce, vypracování citlivostní analýzy palivového proutku TVSA-T a vyhodnocení výsledků z ní vyplívajících.

## 1.1 Cíle BP

Tato Bakalářská práce byla vypracována s cílem seznámit se s druhy paliva používanými v reaktorech VVER 1000. Seznámit se s tím co jsou a jak se provádějí citlivostní analýzy. Detailně se seznámit s výpočetním balíkem SCALE jeho moduly a naučit se v něm provádět citlivostní analýzu. Posledním cílem bylo provést citlivostní analýzu na proutku paliva palivového souboru TVSA-T a vyhodnocení vlivu jednotlivých nepřesností na reaktivitu paliva.

## 2 ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ A PALIVA

Tato kapitola představuje teoretický úvod práce. Obsahuje zejména základní přehled jaderných reaktorů. Typů paliva pro jaderné reaktory dále výčet některých jejich vlastností a je v ní provedeno srovnání jejich vlastností.

### 2.1 Rozdělení reaktorů

Pro použití v jaderné energetice existují různé typy jaderných reaktorů, které je možné rozdělit podle různých parametrů. Mezi základní rozdělení patří, zda většinu štěpení způsobují tepelné neutrony po zpomalení moderátorem nebo rychlé neutrony. Dále je možné reaktory dělit podle použitého paliva, moderátoru a chladiva v reaktoru viz tabulka 2-1.

Tab. 2-1 Výčet základních typů energetických reaktorů [2]

Označení podle energie neutronů	Označení podle moderátoru	Chladivo	Označení podle IAEA
Tepelné reaktory	lehkovodní (LWR)	H <sub>2</sub> O	PWR tlakovodní reaktor
			BWR Varný reaktor
	grafitové	CO <sub>2</sub>	GCR Magnoxový reaktor
			AGR Zdokonalený plynem chlazený reaktor
		He	HTGR Vysokoteplotní reaktor
		H <sub>2</sub> O	LWGR Grafitový reaktor chlazený vodou
	BWGR Grafitový reaktor chlazený vodou (varný)		
	těžkovodní (HWR)	D <sub>2</sub> O	PHWR Tlakový těžkovodní reaktor (CANDU)
		H <sub>2</sub> O	HWLWR Těžkovodní reaktor chlazený vodou
		CO <sub>2</sub>	HWGCR Těžkovodní reaktor chlazený plynem
Rychlé reaktory	Bez moderátoru	Na	FBR Rychlý množinový reaktor

Z pohledu formy paliva je důležité dělení reaktorů na:

- **Homogenní** – palivo je rozptýlené v moderátoru buď formou roztoku, chemické sloučeniny, slitiny nebo suspenze práškového paliva v kapalině.
- **Heterogenní** – palivo je odděleno od moderátoru uložením v palivových elementech s hermetickým pokrytím.

Pro využití v energetice se používají prakticky výhradně heterogenní. [3]

Jako palivo (prvek účastnící se reakce) mohou sloužit izotopy  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a jako množivý materiál  $^{238}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ , které se po zachycení neutronu přemění na  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{233}\text{U}$ .

Z pohledu chemického složení může být palivem:

- **Kovový uran** – byl využíván hlavně v počátcích jaderné energetiky. Výhodami jsou vysoká koncentrace jader a vysoká tepelná vodivost. Nevýhodami jsou nízká teplota tavení a menší chemická odolnost.
- **Keramické palivo** – je rozšířené v současnosti. Obvykle se využívá oxid uraničitý  $\text{UO}_2$ . Mezi výhody patří vysoká teplota tavení a chemická odolnost. Nevýhodami jsou nižší koncentrace jader, vyžadující vyšší obohacení a nižší teplotní vodivost.

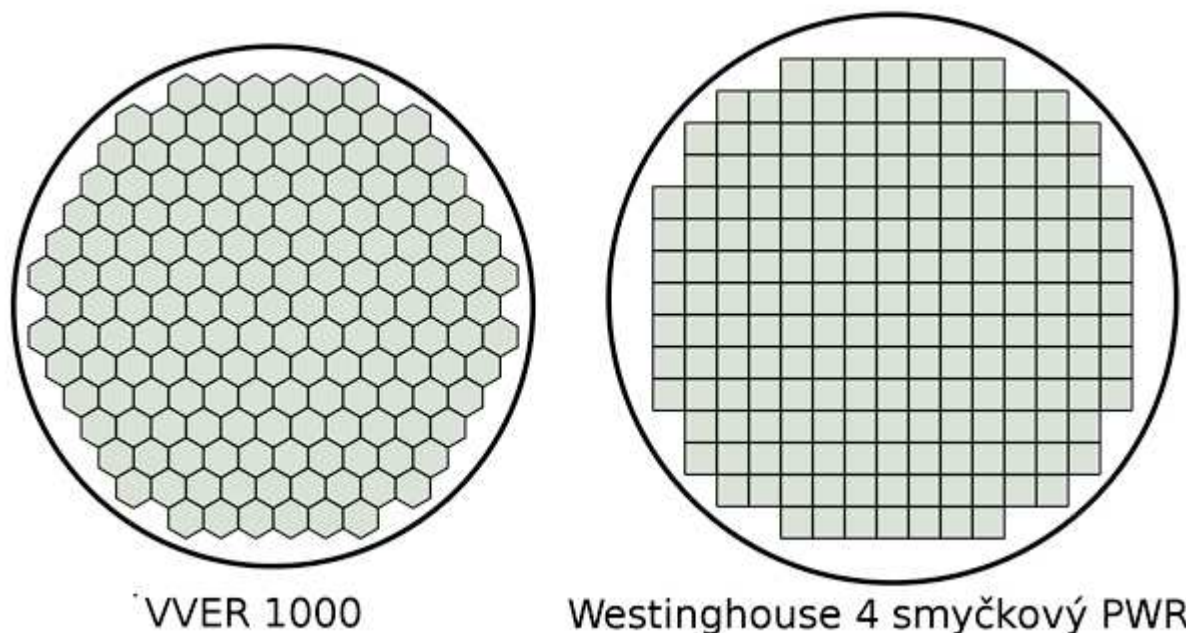
## 2.2 Srovnání reaktorů typu PWR a VVER

Oba uvedené typy reaktorů jsou tepelné, lehkovodní a tlakovodní. Jsou tedy shodné principem fungování. Použitým moderátorem neutronů je u obou lehká voda, která slouží zároveň jako chladivo aktivní zóny. Elektrárny s oběma uvedenými typy reaktorů využívají rozdělení na primární a sekundární okruh, které jsou odděleny parogenerátorem. V parogenerátoru dochází k vytváření páry pro sekundární okruh. Potřebná tepelná energie je do něj přivedena chladivem primárního okruhu. V žádném z uvedených reaktorů nedochází k varu vody v primárním okruhu.

Hlavním rozdílem mezi oběma koncepcemi je tvar palivových souborů a aktivní zóny. Tvar palivových souborů koncepce VVER je šestiúhelníkový. Tvar palivových souborů pro reaktor typu PWR je čtvercový.

Dalším z významných rozdílů mezi elektrárnami západní a východní koncepce je poloha parogenerátorů. K reaktorům typu PWR jsou obvykle připojeny vertikální parogenerátory, zatímco jak VVER 440 tak VVER 1000 využívají parogenerátory uložené horizontálně.

Mezi další rozdíly může patřit přítomnost uzavíracích armatur na studené i horké smyčce, chemický režim primárního okruhu atd.



Obr. 2-1 Charakteristickým rozdílem je tvar a uspořádání palivových souborů

Tab. 2-2 Srovnání technických parametrů systémy s reaktory PWR [5]

parametr	Model 212	Model 312	Model 412
Počet chladících smyček	2	3	4
Tepelný výkon [MW]	1882	2785	3425
Tlak chladiva primárního okruhu [MPa]	15,5	15,5	15,5
Teplota na vstupu do reaktoru [°C]	287,7	291,7	291,9
Teplota na výstupu z reaktoru [°C]	324,5	326,6	325,8
Počet palivových souborů	121	157	193
Uspořádání palivového souboru	16 x 16	17 x 17	17 x 17

### 2.3 Srovnání reaktorů VVER 440 a VVER 1000

Číselné označení obou typů reaktoru původně korespondovalo s elektrickým výkonem, ovšem na mnoha JE proběhly rekonstrukce vedoucí ke zvýšení efektivity. To vedlo k navýšení výkonu například v případě ČR je současný elektrický výkon dukovanských bloků 4 x 500 MW. V případě Temelína jsou pro rok 2015 dostupné informace o výkonech 1 x 1078 MW a 1x 1055 MW.

Elektrárny s reaktory VVER 440 jsou starší, proto byly vystavěny bez ochranného kontejnmentu. Novější elektrárny již byly vybudovány s reaktory VVER 1000 a mají primární okruh uzavřený v ochranném kontejnmentu. Výjimku tvoří pouze finská JE Loviisa, která byla vybudována s reaktory typu VVER 440, avšak ve spolupráci se západními firmami Westinghouse a Siemens a měla ve svém plánu zahrnutý ochranný kontejnment.[6]

VVER 440 má primární okruh tvořený 6 chladícími smyčkami, zatímco VVER 1000 má primární okruh tvořený 4 chladícími smyčkami. VVER 440 má AZ tvořeno 312 palivovými kazetami, z nichž každá obsahuje 126 palivových proutků, VVER 1000 obsahuje menší počet větších souborů, konkrétně 163, každý z nich má 312 palivových proutků.

Použití dvou názvů kazeta/soubor je záměrné, v rámci českého prostředí se v souvislosti s reaktory VVER 440 v Dukovanech používá překlad z ruštiny, ale pro palivo VVER 1000 překlad z angličtiny. Tento jev vznikl tím, že původním dodavatelem paliva pro oba temelínské bloky byla firma Westinghouse, avšak palivo pro JE Dukovany bylo po celou dobu provozu dodáváno z Ruska.

Dalším z rozdílů mezi VVER 440 a VVER 1000 je v konstrukci řídicích tyčí. VVER 440 používá tandemové uspořádání kdy má tyč palivovou a řídicí část, přičemž při pádu do reaktoru dochází k vysunutí palivové části pod reaktor. VVER 1000 má řídicí tyče samostatné, bez palivové části.

*Tab. 2-3 Srovnání technických parametrů systémy s reaktory VVER*

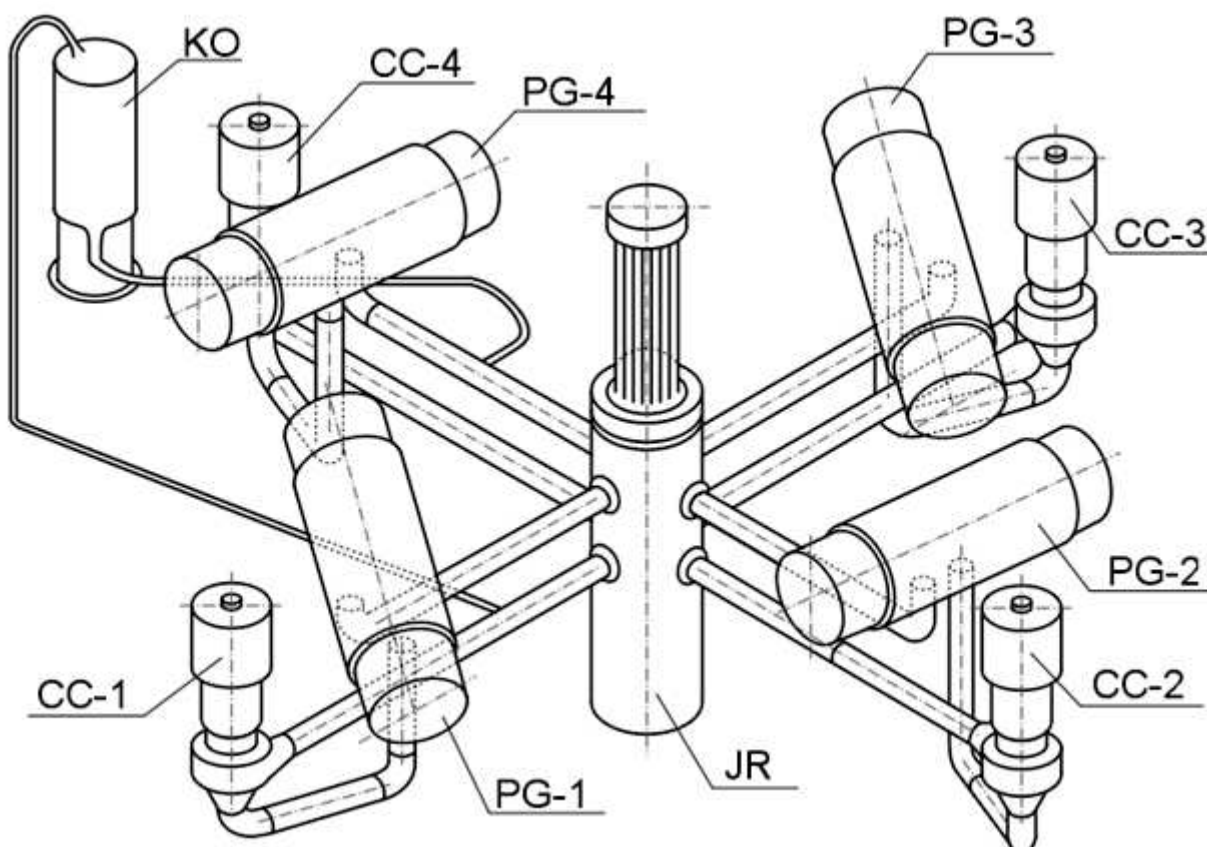
parametr	VVER 440 [2]	VVER 1000 [4]
Počet chladících smyček	6	4
Tepelný výkon reaktoru [MW]	1444	3000
Tlak chladiva primárního okruhu [MPa]	12,25	15,7
Teplota na vstupu do reaktoru [°C]	267	291
Teplota na výstupu z reaktoru [°C]	297	321
Počet palivových souborů	312	163
Počet palivových proutků	126	312



## 2.4 Reaktory typu VVER 1000

Jak již bylo uvedeno jaderný reaktor typu VVER 1000 V-320 je tepelný lehkovodní tlakovodní reaktor. Jeho navržený výkon byl 3000 MWt, což odpovídalo přibližně 1000 MWe. Reaktor je 4 smyčkový. Jeho primární okruh je tvořen hlavně samotnou tlakovou nádobou reaktoru, parogenerátory, hlavními cirkulačními čerpadly, hlavním cirkulačním potrubím, systémem kompenzace objemu a systémem nouzového ochlazení reaktoru. Jeho zjednodušené prostorové uspořádání je zobrazeno níže. [7]

Prvním postaveným blokem VVER 1000 je 5. blok JE Novovoronež označený jako V-187 dalším byl typ V-302, poté V-320. V současné době probíhá výstavba ještě novějších typů V-392 a V-466, které přinášejí vyšší účinnost přeměny tepelného výkonu na elektrický a jsou navrhovány podle nejnovějších bezpečnostních požadavků. [8] V současné době ve světě funguje 34 reaktorů VVER 1000 a probíhá výstavba a plánování dalších hlavně v Rusku, na Ukrajině, v Číně a Indii.



*Obr. 2-2 Prostorové uspořádání primárního okruhu VVER 1000*

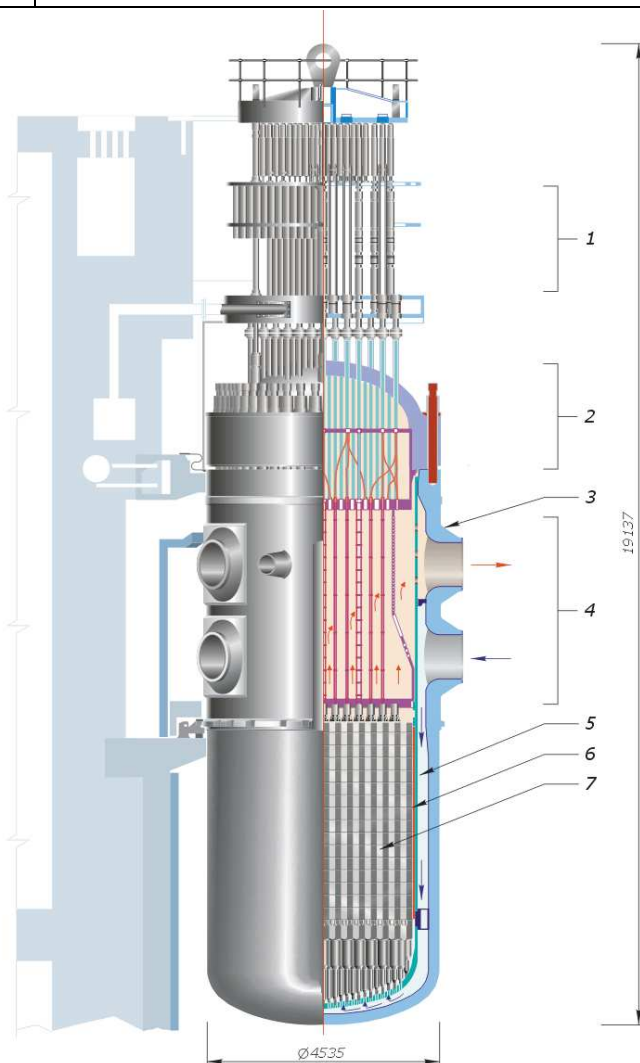
Samotný reaktor je umístěn v betonové šachtě, která slouží zároveň jako stínění proti ionizujícímu záření. Tlaková nádoba reaktoru zajišťuje potřebné parametry uvnitř reaktoru. Její výška je 10,9 m a její vnější průměr 4,5 m. Je navržena pro tlak 17,6 MPa a teplotu 350 °C. Provozní tlak je 15,7 MPa a teplota na výstupu chladicího média 320 °C. V tlakové nádobě jsou čtyři páry otvorů pro vstup a výstup chladiva.

Nejdůležitější částí reaktoru je aktivní zóna a šachta aktivní zóny. Jejimi hlavními funkcemi jsou uchycení palivových souborů a směřování průtoku chladiva. Skládá se ze 163 palivových souborů šestihrábného tvaru. Její další parametry jsou shrnuty v tabulce 2-4. [7]

Tab. 2-4 Základní parametry AZ VVER 1000 [7]

Ekvivalentní průměr	3,16 m
Aktivní výška	3,68 m
Celkový příčný průřez	7,84m <sup>2</sup>
Tloušťka bočního reflektoru	375 mm
Celkový počet palivových proutků [ks]	50856
Celkový počet RO [ks]	61
Hmotnost uran v AZ (tvel)	75500kg

- 1 – pohony řídicích tyčí
- 2 - víko reaktorové nádoby
- 3 – tlaková nádoba reaktoru
- 4 – vstupní a výstupní otvory
- 5 – koš aktivní zóny
- 6 – aktivní zóna reaktoru
- 7 – palivové soubory



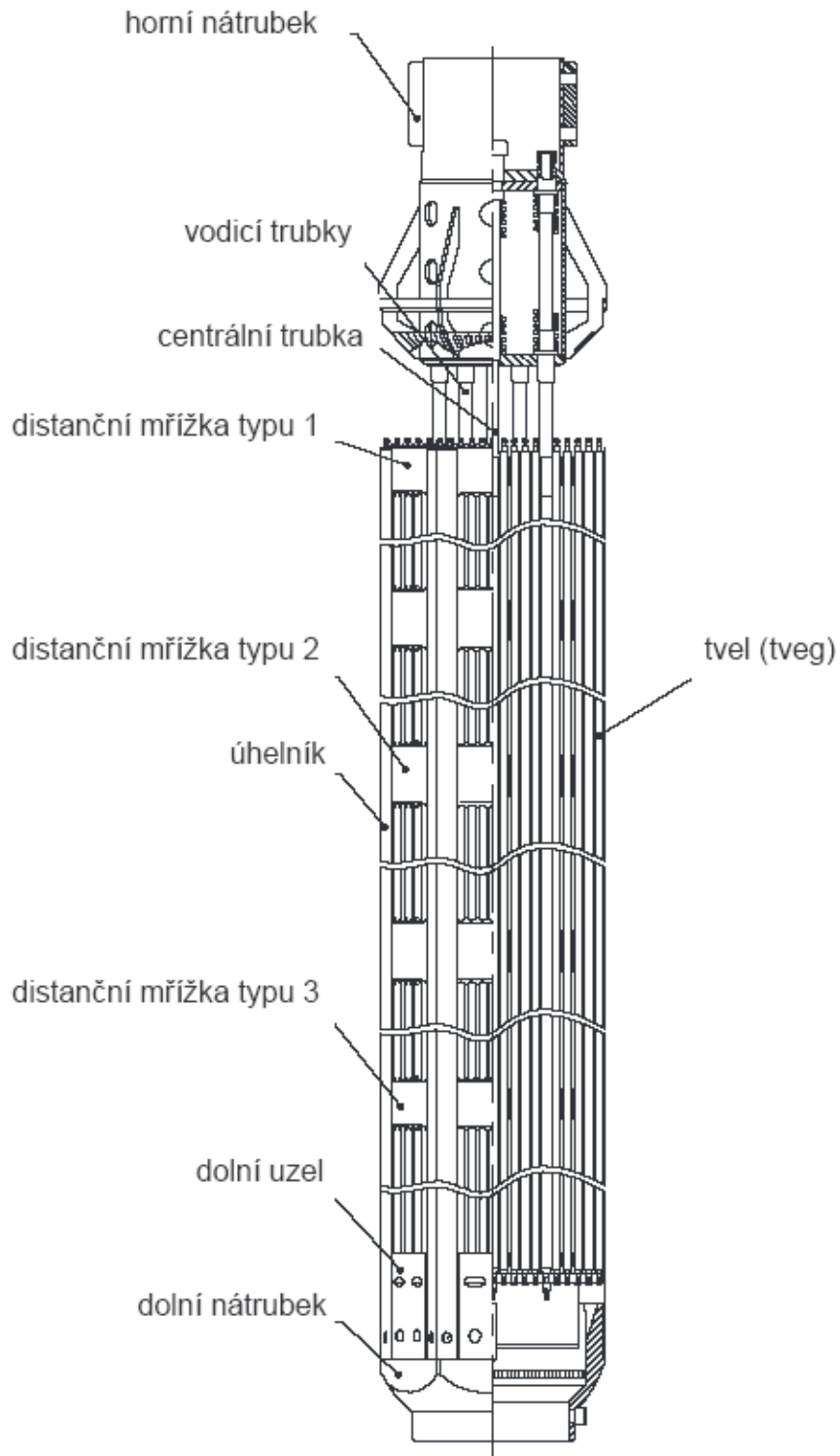
Obr. 2-3 Schéma reaktoru typu VVER 1000 [7]

## 2.5 Palivo typu TVSA-T

Palivo TVSA-T je dodáváno ruskou společností TVEL. TVEL je dceřiná společnost ruské státní korporace ROSATOM. Zabývá se především vývojem a výrobou paliva pro jaderné reaktory a souvisejícími odvětvími např.: obohacováním uranu. O využívání jejího paliva typu TVSA-T na JE Temelín, bylo rozhodnuto při výběrovém řízení v roce 2006. První palivo bylo do reaktoru zavezeno v roce 2010. Kromě JE Temelín dodává TVEL v ČR rovněž palivo do JE Dukovany, pro výzkumný reaktor LVR-15 v Ústavu jaderného výzkumu Řež a také pro školní reaktor VR-1 patřící FJFI ČVUT. Před palivem TVSA-T bylo v JE Temelín používáno palivo VVANTAGE-6. [9]

Palivový soubor typu TVSA-T má šestiúhelníkový průřez. Jedná se o bezobálkový PS. Jeho celková výška je 4570 mm, šířka je 235 mm. Obsahuje 312 palivových proutků, 18 vodících trubek a 1 centrální trubku, do které se mohou umístit detektory, celkem tedy 331 trubek. K centrální a vodícím trubkám je přiděleno 8 distančních mřížek, jedna horní distanční mřížka jedna dolní a šest kombinovaných. K distančním mřížkám je připojeno šest úhelníků, které pomáhají zpevňovat nosnou konstrukci. Dále k PS přiléhá horní a dolní nátrubek, které uzavírají konstrukci. Spodní nátrubek rovněž pomáhá směřovat proud chladiva vstupujícího do PS. Palivové soubory se od sebe mohou lišit středním obohacením, dobou strávenou v reaktoru a tedy i vyhořením a zastoupením jednotlivých prvků a izotopů. PS je popsán na obrázku 2-4. [7] [10]

Palivové proutky jsou tvořeny trubkou ze speciální zirkoniové slitiny, která slouží jako obal, má vnější průměr 9,1 mm a vnitřní průměr 7,7 mm. Trubka je na obou koncích uzavřená a je vyplněna peletkami  $\text{UO}_2$ , přičemž na spodním i horním okraji jsou umístěny peletky s nižší koncentrací  $^{235}\text{U}$  tzv. horní a dolní blanket což snižuje únik neutronů a zvyšuje využití paliva. Proutek má výšku 3925 mm, přičemž výška palivového sloupce je 3680 mm. Proutky mohou mít různé obohacení nikdy však vyšší než 4,95 %. Proutky mohou rovněž obsahovat  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  viz dále tvel/tveg. Peletky v proutku jsou obklopeny heliem o tlaku 2 MPa, které účinně odvádí teplo a umožňuje peletkám určitý pohyb. Peletky  $\text{UO}_2$  mají tvar válce, jsou široké 7,60 mm se středovou dutinou 1,20 mm. Jejich hustota může být 10,4 až 10,7 g/cm. Celková hmotnost paliva v jednom proutku je 1690 g. Technická data o PS a proutcích jsou shrnuty v tabulce 2-5.



Obr. 2-4 Schéma PS typu TVSA-T [7]

**TVEL / TVEG**

Palivo TVSA-T může obsahovat dva typy proutků tvel a tveg. Typ tvel představuje normální palivové proutky. Zatímco typ tveg obsahuje kromě  $\text{UO}_2$  i rozptýlenou příměs  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ .  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  funguje v reaktoru jako vyhořívající absorbátor. Snižuje reaktivitu zvláště u čerstvého paliva a svým postupným vyhoříváním opět dovoluje palivu vrátit se na jeho normální reaktivitu později, to je zvláště výhodné u delších palivových cyklů. Zastoupení oxidu gadolinia se může pohybovat mezi 3,35 a 8 %hm. Obohacení těchto proutků je snižené vzhledem k jejich jiným fyzikálním vlastnostem. Zároveň celková hmotnost paliva je o něco nižší, přibližně 1680 g.

Tab. 2-5 Technické parametry paliva TVSA-T [9]

Geometrie	Šestiúhelníková
Počet palivových proutků	331
- z toho s palivem	312
- bez paliva	18+1
Celková délka	4570 mm
Celková šířka	235 mm
Délka palivového proutku	3915 mm
Vnější průměr palivového proutku	9,1 mm
Délka pelety	9-12 mm
Vnější průměr palivové pelety	7,6 mm
Hustota pelety	10,4-10,7 g/cm <sup>3</sup> *pouze tvel
Průměrný lineární výkon	16,8 kW/m
Špičkový lineární výkon	44,8 kW/m
Materiál pokrytí	Zr-1%Nb
Tloušťka pokrytí	0,65 mm
Maximální teplota pokrytí	355 °C
Materiál distanční mřížky	Zr-1%Nb
Průměrné vyhoření	58 MWd/kgU
Maximální vyhoření	66 MWd/kgU

## 2.6 Stručný přehled ostatních typů paliva

V průběhu používání bloků VVER 1000 pro ně bylo vyvinuto mnoho různých typů paliva. Jednak společností TVEL, ale také společností Westinghouse, která se snaží nabídnout alternativu k ruským palivům a představuje tak prakticky jedinou konkurenci na trhu paliva pro VVER 1000.

Většina nových paliv je vyvíjena s cílem zlepšení provozních vlastností JE zejména to mohou být:

Prodloužení palivového cyklu a úspora nových palivových souborů.

Zvýšení tepelného výkonu reaktoru a tedy vyšší produkce elektrické energie.

Zvýšení mechanické pevnosti a umožnění pohodlnější manipulace a také snížení rizika porušení pokrytí paliva.

### **VVantage-6**

Jedná se o palivo společnosti Westinghouse, které bylo požíváno mezi léty 2000-2010. Bylo použito v několika specifikacích: T1, T2, Phase0 a Phase1X. První tři používaly jako pokrytí slitinu Zircaloy-4, poslední pak ZIRLO<sup>TM</sup>. PS VVantage-6 mohou obsahovat vyhořívající absorbátor ve formě povlaku ZrB<sub>2</sub>. Obsahuje horní, spodní a 7 kombinovaných distančních mřížek. [11]

### **TVS-2M**

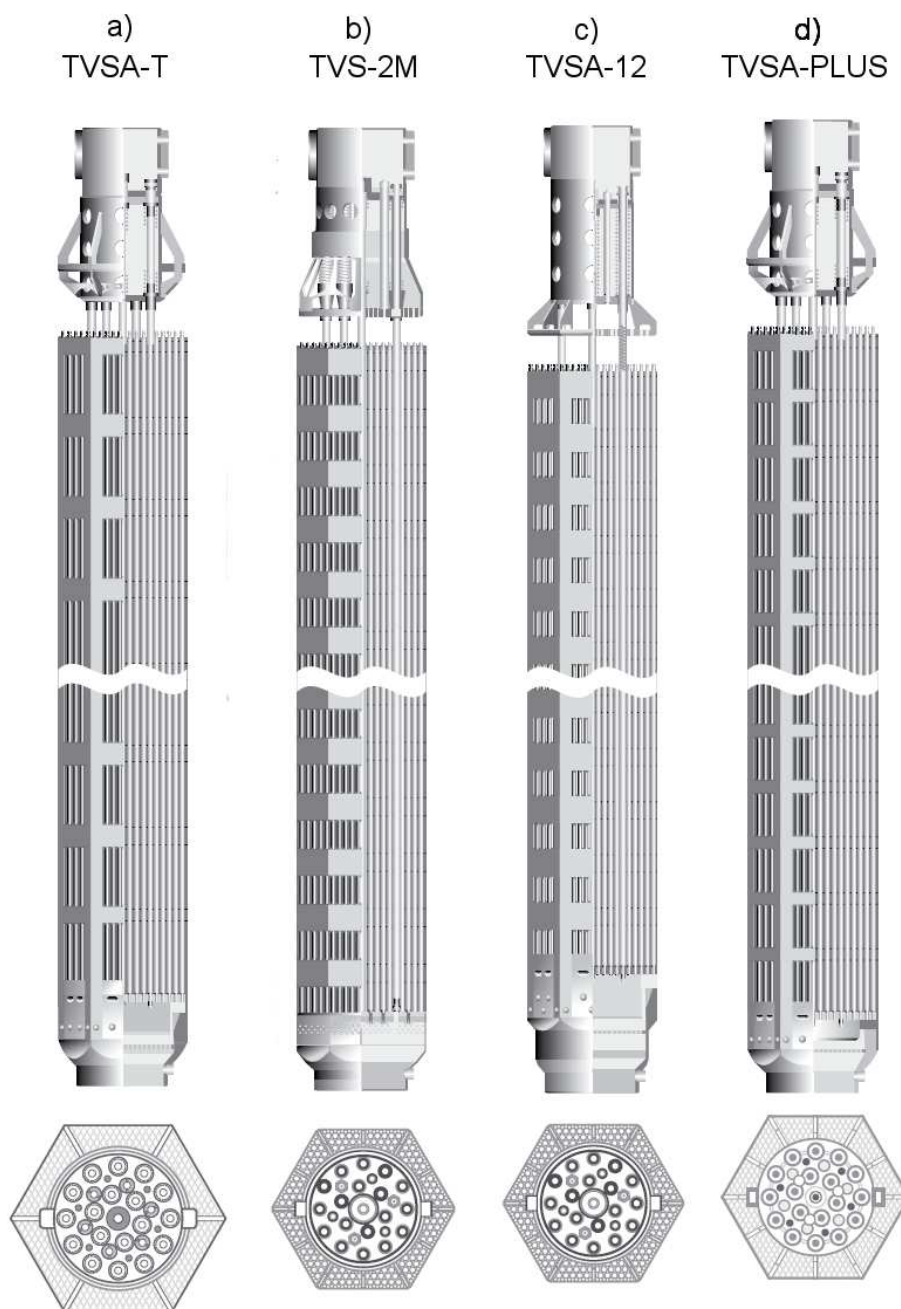
Palivový soubor je podobný výše popsanému TVSA-T, ale nemá úhelníky, má však větší počet distančních mřížek. Délka souboru je stejná, ale délka palivových proutků je delší 3988 mm. Rozměry palivových peletek se neliší. Celková hmotnost UO<sub>2</sub> je 525 kg. PS je vidět na obrázku 2-5 b. [12]

### **TVSA-12**

Palivový soubor je opět podobný TVSA-T, má úhelníky i vyšší počet distančních mřížek. To zvyšuje jeho odolnost proti prohýbání. Vnější rozměry souboru jsou stejné, ale délka palivových proutků se opět liší 3836 mm. Rovněž se liší tloušťka peletek 7,8 mm a peletky v sobě nemají středový otvor. Celková hmotnost UO<sub>2</sub> je 545 kg. Soubor má nižší vyhoření, průměrné je 55 MWd/kgU a maximální 60 MWd/kgU. PS je vidět ve srovnání s ostatními na obrázku 2-5 c. [12]

**TVSA-PLUS**

Opět PS podobný TVSA-T, rovněž má úhelníky a vyšší počet distančních mřížek. Vnější rozměry opět stejné s předchozími. Délka palivových proutků je 3988 mm tedy shodná s typem TVS-2M. Má menší tloušťku pokrytí pouze 0,5 mm. Oproti 0,65 mm u TVSA-T a předchozích typů. Rozměry peletek jsou stejné. Celková hmotnost  $UO_2$  je 525 kg. Vyhoření stejné jako u TVSA-T. Na obrázku 2-5 je zcela napravo d. [12]



Obr. 2-5 Grafické srovnání některých typů PS [9]

## 3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Všeobecně se citlivostní analýza využívá, pokud potřebujeme zjistit, jak se změní výsledek v závislosti na změně vstupů. V oblasti energetiky, zvláště jaderné je jedním z nástrojů, který se dá využít k ověření stability různých parametrů. Především bezpečnostních a ekonomických a to nejen u jaderných elektráren.

V anglické literatuře se obvykle používají dva související pojmy sensitivity analysis / citlivostní analýza a uncertainty analysis / analýza nejistot. Zatímco citlivostní analýza se soustředí na míru změny výstupu při změně vstupu a využívá se pro ni tedy několik vstupů. S cílem zjistit který ze vstupních parametrů má nejvyšší dopad na změnu výsledku. Analýza nejistot se soustředí na změnu parametrů výstupu, pokud je použit jeden vstup lišící se jen o svoje nejistoty hodnot. Obě dvě jsou tedy podobné a obvykle jsou prováděny současně. [13]

Oblasti, ve kterých může být citlivostní analýza využita, zahrnují:

- Testování odolnosti systému proti nepřesnostem.
- Zlepšení porozumění vztahů mezi vstupy a výstupy systému nebo modelu.
- Snížení nejistot výsledku pomocí identifikování nejvýznamnějších vlivů a jejich minimalizováním.
- Hledání chyb v modelu, projevených neočekávanou závislostí mezi vstupy a výstupy.
- Snížení výpočetní náročnosti modelu identifikováním parametrů, které nemají významný vliv na výsledek simulace.
- Hledání rozsahu vstupních hodnot, které odpovídají maximálnímu, minimální či optimálnímu výsledku. [13]

### 3.1 Přehled nejvýznamnějších metod

#### Globální citlivostní analýza

Zabývá se přidělením jednotlivých vlivů na výsledek konkrétním nejistotám vstupu. Mezi vlastnosti, které by měla správná globální metoda zahrnovat, patří: Schopnost vyrovnat se s rozdílnými rozsahy výpočtu. Schopnost zhodnotit vliv parametru i v situaci, kdy dochází ke změnám v ostatních parametrech. Nezávislost na konkrétním modelu. [14]



### **Monte Carlo**

Monte Carlo (nebo také na vzorcích založená analýza) je založená na provedení mnoha zhodnocení s náhodně vybranými vstupy modelu a využití těchto zhodnocení k určení jak nejistot v předpovědi modelu tak přiřazení vlivu jednotlivým vstupním faktorům. Tato analýza zahrnuje výběr rozsahů a rozložení pro každý vstupní faktor. Vygenerování vzorků a provedení citlivostní analýzy a analýzy nejistot s každým tímto vzorkem.

### **Response surface methodology**

Tato metoda je založena na vytvoření modelu, jež se chová obdobně jako uvažovaný model. S tímto modelem jsou dále prováděny analýzy citlivosti a nejistoty. Tato metoda vyžaduje kromě stanovení rozsahů vstupů i vývoj a zhodnocení modelu, ale může výrazně snížit potřebný výpočetní čas.

### **Screening designs**

Užitečná metodika jako první krok při řešení modelu s velmi vysokým počtem vstupů. Je využívána pro identifikaci několika nejvýznamnějších faktorů s menší výpočetní náročností. Na druhou stranu není schopna poskytnout informaci o kolik je který parametr významnější než jiný.

### **Local – Differential analysis**

Prozkoumává dopad změny vstupních faktorů lokálně. Obvykle se provádí výpočtem parciálních derivací v malém okolí vybraného bodu. Rozdílová analýza je často založena na využití Taylorovy řady pro aproximaci zvažovaného modelu. [14]

## 4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PALIVA

Následující kapitola popisuje hlavní cíl práce vypracování citlivostní analýzy paliva. Začíná seznámením se s prostředím SCALE, ve kterém budou provedeny výpočty, pokračuje popisem zvolených modelů pro simulaci. Po něm následuje vyhodnocení výsledků pro čerstvé palivo. Poslední částí je rozšíření simulace pro zahrnutí vyhořívání a vyhodnocení vlivu výrobních nepřesností v jeho průběhu.

### 4.1 Úvod do výpočtů pomocí SCALE

Pro výpočty je v práci použit software SCALE, konkrétně ve verzi 6.1.2. Název SCALE je akronym vzniklý ze slov Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, česky tedy Standardizované počítačové analýzy pro licenční hodnocení. Pro výpočet kritičnosti jsou využity moduly TRITON (Transport Rigor Implemented with Time-dependent Operation for Neutronic depletion) a NEWT (New ESC-based Weighting Transport). [15]

Pro výpočet pomocí SCALE/TRITON je potřeba vytvořit vstupní soubor, ve kterém bude popsán problém, který má být vyřešen. Jedná se hlavně o popis geometrie, přiřazení materiálů a definici okrajových podmínek. Pro zjednodušení tvorby takového souboru je vhodné použít připravený průvodce s grafickým rozhraním GeeWiz. GeeWiz je akronym slov: Graphically Enhanced Editng Wizard. Po jeho spuštění se objeví úvodní obrazovka, kde můžeme začít s definicí problému k řešení.

Pro začátek je nutné určit aplikaci (*application*), kterou chceme využít k simulaci, pro účely výpočtu kritičnosti byla zvolena 2D Transport: T-NEWT. Dále je potřeba zvolit *Cross-section library*, tedy volbu knihovny účinných průřezů. Byla zvolena v7-238 která obsahuje 238 energetických grup neutronů. V nabídce *Collapse Block* je možné vytvořit širší energetické grupy neutronů, pro které bude prováděn výpočet. Tím se dá zrychlit výpočet a je možné jej dále vyhodnotit například vykreslením toku neutronů těchto energetických grup. Pro účely práce bylo zvoleno vytvořit dvě energetické skupiny: pomalé neutrony (38 grup) a rychlé neutrony (200 grup).

Po vyplnění všeobecných parametrů se objeví možnost otevřít *Compositions* po jejím otevření, se rozevře nabídka, z níž je třeba zvolit možnost *Create*. To nám umožní dále volit mezi základními látkami, roztoky, slitinami, směsmi a sloučeninami.

Použité látky je možno volit z předpřipravených a ty dále upravovat například úpravou obohacení, nebo je možno vytvářet vlastní látky například jako směsi připravených prvků. Dále je zde možnost definovat hustotu buďto z knihovny, jako násobek teoretické maximální hustoty dané látky, nebo přímým zadáním uživatele. Posledním nutným parametrem je termodynamická teplota.

Po definici materiálů následuje nastavení *Cell Data*. Tato část je důležitá, neboť slouží programu k výpočtům samostínění v důsledku geometrie rozložení proutků. Standardně je vybrána *Lattice Cell* tedy mřížková buňka. Další možností je *Multiregion*, což je buňka s mnoha oblastmi. Tento typ buňky umožňuje rozdělit libovolnou část hlavně palivo do několika oblastí. To umožní ve složitějších simulacích měnit například vyhoření vnějších a vnitřních vrstev jiným tempem a tedy i přesnější výpočet.

Jako poslední definujeme geometrii problému. V programu SCALE je geometrie definována pomocí jednotek, problém musí obsahovat minimálně jednu jednotku, maximální počet není stanoven. Každá jednotka může obsahovat libovolný počet tvarů. Jednotky mohou být dále použity pro vytvoření polí.

Po otevření okna *Geometry* se otevře možnost výběru jednotky a seznam použitých geometrických tvarů. Po pravé straně se nachází databáze tvarů, jež je možné jednotce přiřadit. Jedná se hlavně o čtverec, šestiúhelník a kruh. Po definování geometrie buňky je potřeba opět z pravého menu pod tvary vybrat možnost *Media*. Tato možnost slouží k přiřazení materiálů jednotlivým tvarům a funguje na principu množin, tzn., pokud chceme přiřadit materiál mezikruží je nutné jej přiřadit vnějšímu kruhu a odečíst vnitřní kruh. Poslední klíčovou činností je definování okrajových podmínek, to se provede vybráním možnosti *Bound* z pravého menu, ve kterém se definuje tvar tvořící hranici buňky a rozlišení výpočtové mříže pro buňku. [15]

## 4.2 Výpočet kritičnosti TVSA-T

Hlavním cílem této práce je provést citlivostní analýzu vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu pro palivový soubor TVSA-T. Pro tyto účely byl vybrán TVSA-T typu A40E6 a 5 typů nepřesností vyplývajících z výrobních tolerancí paliva. Reaktivita byla posuzována pomocí multiplikačního činitele, případně jako jeho změny v jednotce pcm. Analýza byla provedena pro palivový proutek typu tvel. V průběhu práce bylo též uvažováno o provedení citlivostní analýzy pro typ tveg, nicméně jeho nízká reaktivita by vyžadovala odlišný postup a proto bylo od vytvoření této části simulace upuštěno.

Bylo rozhodnuto, že citlivostní analýza bude provedena pro 5 typů výrobních nejistot, pro něž bylo možné dohledat výrobní tolerance ve zdrojích [16] a [17]. Pro budoucí zpracování výsledků bylo každému výrobnímu parametru přiřazeno písmeno: A-hustota paliva, B-průměr palivové peletky, C-vnitřní průměr pokrytí, D-vnější průměr pokrytí, E-koncentrace  $^{235}\text{U}$  (obohacení). Pro každý výrobní parametr byla stanovena jeho maximální a minimální hodnota. Následně byly vytvořeny modely pro každou kombinaci těchto hodnot a jeden navíc, který obsahoval nominální hodnoty. Celkově tedy byly vytvořeny výpočty pro 33 kombinací. Seznam výrobních parametrů a jejich tolerancí lze vidět v tabulce 4-1.

Tab. 4-1 výrobních tolerancí a jejich zvolených označení [16][17]

Označení parametru:	Český název parametru	Nominální parametry	Dolní hranice ozn: 1	Horní hranice ozn: 2	Jednotka
A	Hustota paliva	10,376	10,226	10,526	g/cm <sup>3</sup>
B	Průměr paliva	0,756	0,753	0,756	cm
C	Vnitřní průměr pokrytí	0,778	0,772	0,778	cm
D	Vnější průměr pokrytí	0,915	0,905	0,915	cm
E	Koncentrace <sup>235</sup> U	4,00	3,95	4,05	%hm

V prostředí SCALE byl vybrán modul T-NEWT a následně vytvořeny materiály použité v simulaci. Oxid uraničitý, jehož hustota a obohacení závisely na tom, o kterou kombinaci hodnot výrobních parametrů se jednalo a o teplotě 966 K. Helium pro vnitřní díru o teplotě 966 K a vnější mezeru o teplotě 652 K, obě o hustotě 0,001471 g/cm<sup>3</sup>. Dále byla vytvořena slitina E110 pro pokrytí dle zdroje [16]. Složení: Zr (98,76 %hm), Nb (1,00 %hm), O (0,10 %hm), Fe (0,07 %hm), Hf (0,01 %hm), Ni (0,02 %hm), Cr (0,02 %hm), C (0,02 %hm), teplota 602 K. Jako moderátor byla použita čistá H<sub>2</sub>O bez příměsi bóru o hustotě 0,7071 g/cm<sup>3</sup> a teplotě 582 K.

Pro nastavení buňky simulace byla použita buňka typu *MultiRegion*, která umožnila rozdělit palivo do několika vrstev pro přesnější výpočet. Středová kružnice představovala centrální díru v peletce a poloměru 0,12 mm. Dále bylo rozhodnuto palivo rozdělit do 10 oblastí tvořenými mezikružnicemi o stejném obsahu. Vzhledem ke dvěma uvažovaným průměrům palivové peletky (parametr B) bylo nutné vypočítat dvě kombinace poloměrů jednotlivých vrstev paliva. Následuje použitý výpočet a tabulka 4-2 obsahující poloměry použité v simulaci.

Výpočet poloměru:

$$S_U = \pi r_{10}^2 - \pi r_0^2 \quad (mm^2; mm; mm) \quad (4.1)$$

$$S_{1/10} = \frac{S_U}{10} \quad (mm^2; mm^2) \quad (4.2)$$

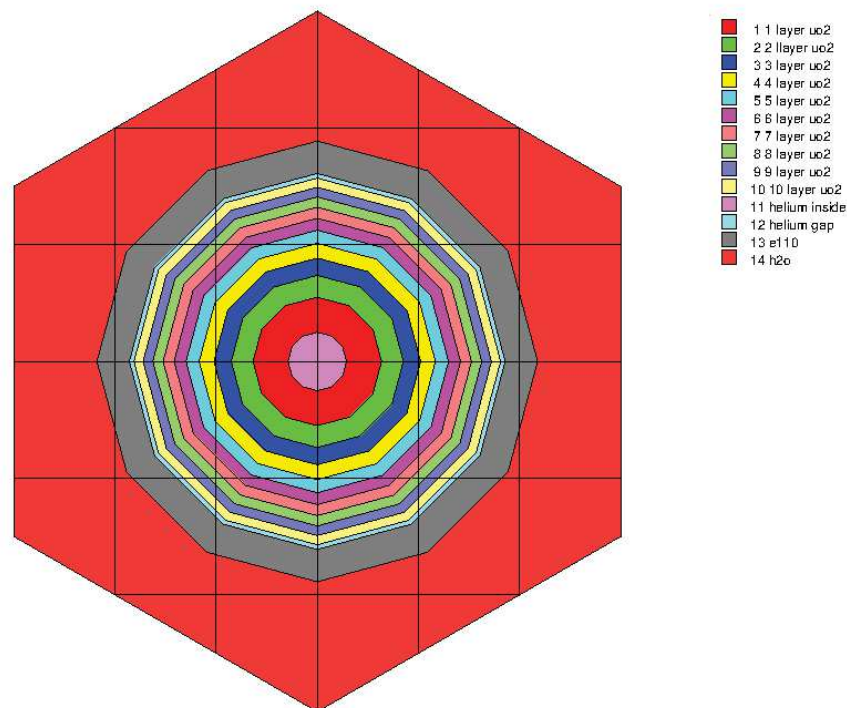
$$r_{n+1} = \sqrt{\frac{S_{1/10}}{\pi} \cdot r_n^2} = \sqrt{\frac{(r_{10}^2 - r_0^2)}{10} + r_n^2} \quad (mm; mm^2; mm; mm; mm; mm) \quad (4.3)$$

Tab. 4-2 Poloměry použité v simulaci pro jednotlivé vrstvy uranu

Parametr: B	Pro hodnotu:		Jednotka
	1	2	
r0	0,06000	0,06000	mm
r1	0,13197	0,13239	mm
r2	0,17672	0,17736	mm
r3	0,21224	0,21304	mm
r4	0,24261	0,24354	mm
r5	0,26959	0,27063	mm
r6	0,29409	0,29525	mm
r7	0,31671	0,31796	mm
r8	0,33782	0,33916	mm
r9	0,35768	0,35910	mm
r10	0,37650	0,37800	mm

Nastavení buňky pokračovalo vyplněním vnitřních a vnějších rozměrů pokrytí, použité hodnoty závisely na konkrétní kombinaci hodnot v parametrech C a D. Následně byly určeny okrajové podmínky, pro vnější okraj buňky byla vybrána možnost *White*, tedy izotropní návrat unikajících neutronů, tak aby celkový tok neutronů přes stěnu modelu byl roven nule.[18]

V nastavení geometrie byly vytvořeny soustředné kružnice obdobně jako v nastavení buňky. Z důvodů nemožnosti vytvoření dokonalé kružnice bylo použito 12ti úhelníkové přiblížení. Vnější okraj jednotky tvoří šestiúhelník, vzdálenost jeho protějších stěn je 12,75 mm, tedy shodná jako je vzdálenost sousedních palivových proutků v souboru. Geometrie problému je zobrazena na obrázku 4-1. Okrajová podmínka byla opět nastavena na možnost *White*.

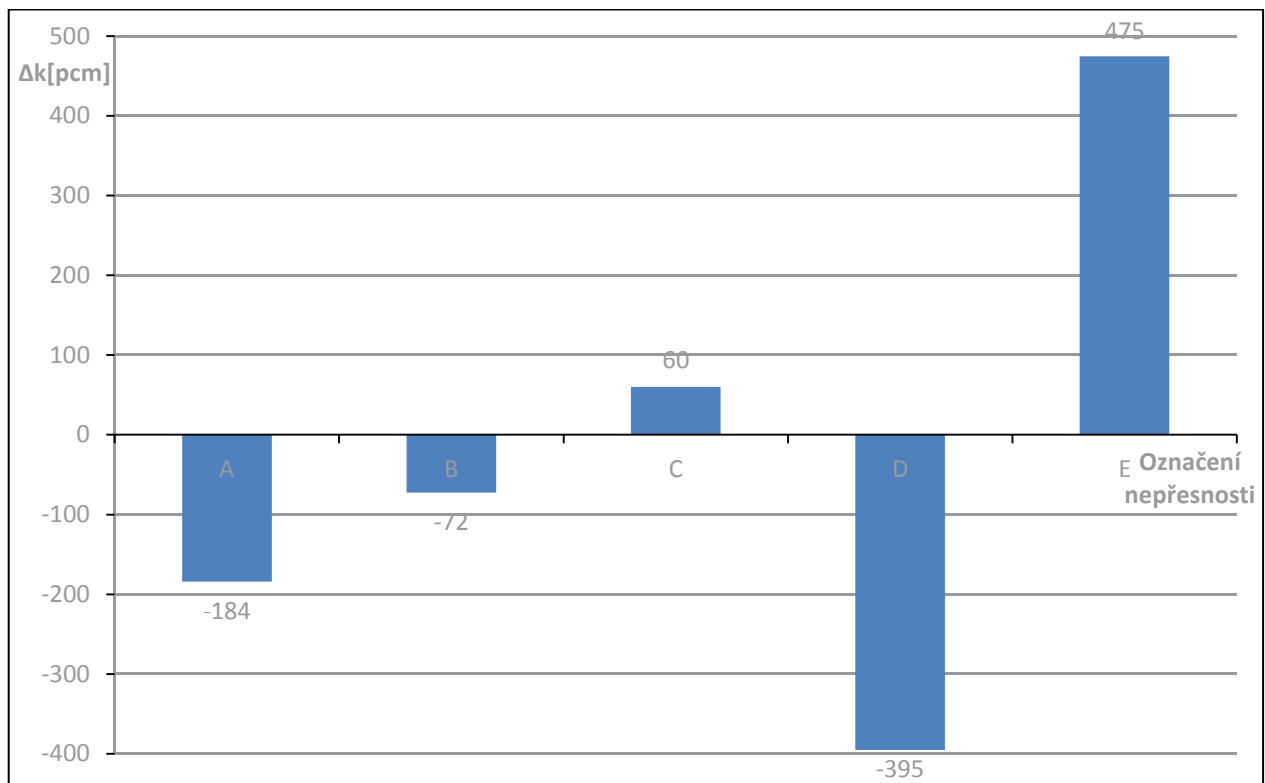


Obr. 4-1 Řez palivovým proutkem použitým při citlivostní analýze

### 4.2.1 Vyhodnocení výsledků výpočtu kritičnosti pro čerstvé palivo

V následující kapitole jsou uvedeny stručné výsledky a vyhodnocení význam jednotlivých výrobních nepřesností. Podrobné výsledky je možné dohledat v příloze A tabulce I-1. Vliv jednotlivých odchylek byl vyhodnocen, pomocí rozdílu mezi průměrem výsledků kombinací s vyššími hodnotami a nižšími hodnotami daného parametru. Tyto rozdíly byly poté vyneseny do grafu 4-2, v jednotce pcm (reaktivita  $\cdot 10^{-5}$ ). Kladná hodnota znamená, že se zvyšováním hodnoty daného parametru reaktivita roste. Záporná hodnota znamená, že reaktivita klesá se zvyšováním hodnoty konkrétního parametru.

- A - Hustota paliva
- B - Průměr palivové peletky
- C - Vnitřní průměr pokrytí
- D - Vnější průměr pokrytí
- E - Koncentrace  $^{235}\text{U}$



Obr. 4-2 Graf vlivu změn jednotlivých parametrů

Jak je z grafu patrné, nejvýznamnější vliv na reaktivitu má obohacení paliva izotopem  $^{235}\text{U}$  (E). Průměrný rozdíl mezi kombinací s obohacením na vyšší a nižší hranici tolerancí, tedy 4,05% a 3,95%  $^{235}\text{U}$  je 475 pcm. Tento jev je poměrně snadno vysvětlitelný, neboť je to právě  $^{235}\text{U}$ , který se štěpí a uvolňuje nové neutrony pro udržení štěpné řetězové reakce.

Parametrem s druhým nejvýznamnějším vlivem je vnější průměr pokrytí paliva (D). Průměrný rozdíl mezi kombinací s vyšším a nižším rozměrem, tedy 9,15 mm a 9,05 mm je -395 pcm. Tento poměrně zásadní vliv se dá vysvětlit tím, že při zmenšení vnějšího průměru pokrytí zaujímá více prostoru moderátor a dochází tedy k efektivnějšímu moderování neutronů.

Třetím nejvýznamnějším parametrem (A) je hustota paliva. Průměrný rozdíl mezi 10,526 g/cm<sup>3</sup> a 10,226 g/cm<sup>3</sup> je -184 pcm. Platí tedy, že se zvyšující hustotou paliva klesá reaktivita. Tato závislost se dá vysvětlit vyšším záchytem neutronů v UO<sub>2</sub> o vyšší hustotě.

Dalším v pořadí významu je vnější průměr palivové peletky (B). Rozdíl mezi průměrnými multiplikačního činitele pro simulace s vyšší a nižší hodnotou 7,56 mm a 7,53 mm je -72 pcm. Tento jev se dá opět vysvětlit vyšším záchytem neutronů v UO<sub>2</sub>, je zajímavé, že tento jev převládá nad přítomností většího množství uranu a tedy i jeho izotopu <sup>235</sup>U.

Nejméně významným parametrem je vnitřní tloušťka pokrytí (C). Rozdíl mezi hodnotami 7,78 mm a 7,72 mm je pouze 60 pcm. Tento jev je možné vysvětlit tím, že dotčené materiály (slitina zirkonia a helium) nejsou ani palivem ani se nepodílejí na moderaci. Přičemž v heliu dochází k menšímu záchytem neutronů.

Kombinací výrobních nejistot s nejvyšším multiplikačním činitelem byla kombinace označená jako „A1B1C2D1E2“. Její multiplikační činitel byl  $k_{\infty} = 1,41423$ . Kombinací výrobních nejistot s nejnižším multiplikačním činitelem byla kombinace označená jako „A2B2C2D2E1“. Její multiplikační činitel byl  $k_{\infty} = 1,40246$ . Rozdíl mezi nimi tedy je 1176,29 pcm, což představuje poměrně velkou změnu reaktivity. Jejich parametry jsou shrnuty v tabulce 4-3. Za povšimnutí stojí, že obě varianty obsahují vyšší hodnotu vnitřního průměru pokrytí (C). Z toho je možné vyvodit, že při určité kombinaci ostatních parametrů tato nejistota reaktivitu zvyšuje a při jiné kombinaci snižuje. Z tohoto důvodu je zajímavá i přesto, že má nejmenší vliv na výslednou reaktivitu.

Tab. 4-3 Hodnoty výrobních parametrů pro kombinace s nejvyšším a nejnižším multiplikačním činitelem

Označení parametru:	Český název parametru	Anglický ekvivalent	Hodnota pro A1B1C2D1E2	Hodnota pro A2B2C2D2E1	Jednotka
A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	10,226	g/cm <sup>3</sup>
B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	0,756	cm
C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	0,778	cm
D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	0,915	cm
E	Koncentrace <sup>235</sup> U	Concentration <sup>235</sup> U	4,05	3,95	%hm

### 4.3 Rozšíření analýzy pro změny v průběhu vyhoření

Po vypočtení multiplikačních činitelů pro čerstvé palivo, bylo rozhodnuto dále zjistit, jak se mění reaktivita paliva v průběhu vyhořívání.

#### 4.3.1 Nastavení SCALE pro výpočty vyhoření

Ve výpočetním prostředí SCALE je také možné provádět výpočet změn multiplikačního činitele v závislosti na vyhoření. Pro tento typ výpočtů je potřeba použít modul T-DEPL. Při použití tohoto modulu se výpočet skládá ze dvou hlavních kroků. Nejprve T-NEWT provede výpočet toku neutronů a multiplikačního činitele a předá tyto data modulům COUPLE a ORIGEN. Moduly COUPLE/ORIGEN jsou poté využity k výpočtům vyhoření (změny v rozložení izotopů) a obnovení knihoven účinných průřezů pro nový výpočet modulu T-NEWT, toto se opakuje, dokud výpočet neprojde všechny požadované kroky vyhoření.

Pro využití tohoto modulu je nutné nastavit několik dalších parametrů, hlavně kterých látek se bude vyhořívání týkat. Následně v okně *Burn Data* nastavit počet vyhořívacích intervalů. Pro každý interval je možnost nastavit vlastní specifický výkon v MW na metrickou tunu uranu, délku intervalu vyhořívání ve dnech, počet kratších intervalů, na které má být interval rozdělen pro výpočty a klidovou dobu mezi jednotlivými intervaly, kdy dochází pouze k přirozené přeměně izotopů.

#### 4.3.2 Tvorba modelu

Z důvodů náročnosti na výpočetní čas bylo rozhodnuto tuto variantu prozkoumat jen pro některé kombinace výrobních nepřesností. Konkrétně byly vybrány konfigurace s nejvyšším a nejnižším multiplikačním činitelem. Dále konfigurace s přesnými nominálními parametry. Z vyhodnocení výsledků pro čerstvé palivo (kapitola 4.2.1) vyšlo, že nejvýznamnějším parametrem je obohacení. Bylo tedy rozhodnuto prozkoumat vliv obohacení detailněji a do výpočtu byly zařazeny konfigurace jinak stejné jako ta s nejvyšším a nejnižším multiplikačním činitelem lišící se právě obohacením.

Pro simulaci byl využit výše popsany modul T-DEPL. Jako materiály určené k vyhořívání byly označeny všechny vrstvy oxidu uraničitého. V nastavení Burnup byl specifický výkon (MW/tU) určen z hodnot použitých v tabulkách 2-3 a 2-4 dle rovnice 4.4. Následně bylo po poradě s vedoucím práce určeno počítat vyhoření do 10 GWd/tU přesněji s rozdělením na 30 kroků a pokračovat do hodnoty cca 60 GWd/tU v 8mi krocích. Z toho vyplynulo nastavení prvního intervalu pro vyhořívání na hodnotu 270 dní a druhého na 1256 dní, viz rovnice 4.5 a 4.6.



Výpočet specifického výkonu (MW/tU)

$$P_V = \frac{P}{m} = \frac{3000 \text{ MW}}{75,5 \text{ tU}} = 39,735 \text{ MW/tU} \quad (4.4)$$

Počet dní 1. interval

$$dny = \frac{\frac{\text{maximální vyhoření}}{\text{počet kroků}}}{P_V} \cdot \text{počet kroků} = \frac{\frac{10 \frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}}{30 \text{ kroků}}}{0,039735 \frac{\text{MW}}{\text{kgU}}} \cdot 30 \text{ kroků} \doteq 270 \text{ dní} \quad (4.5)$$

Počet dní 2. interval

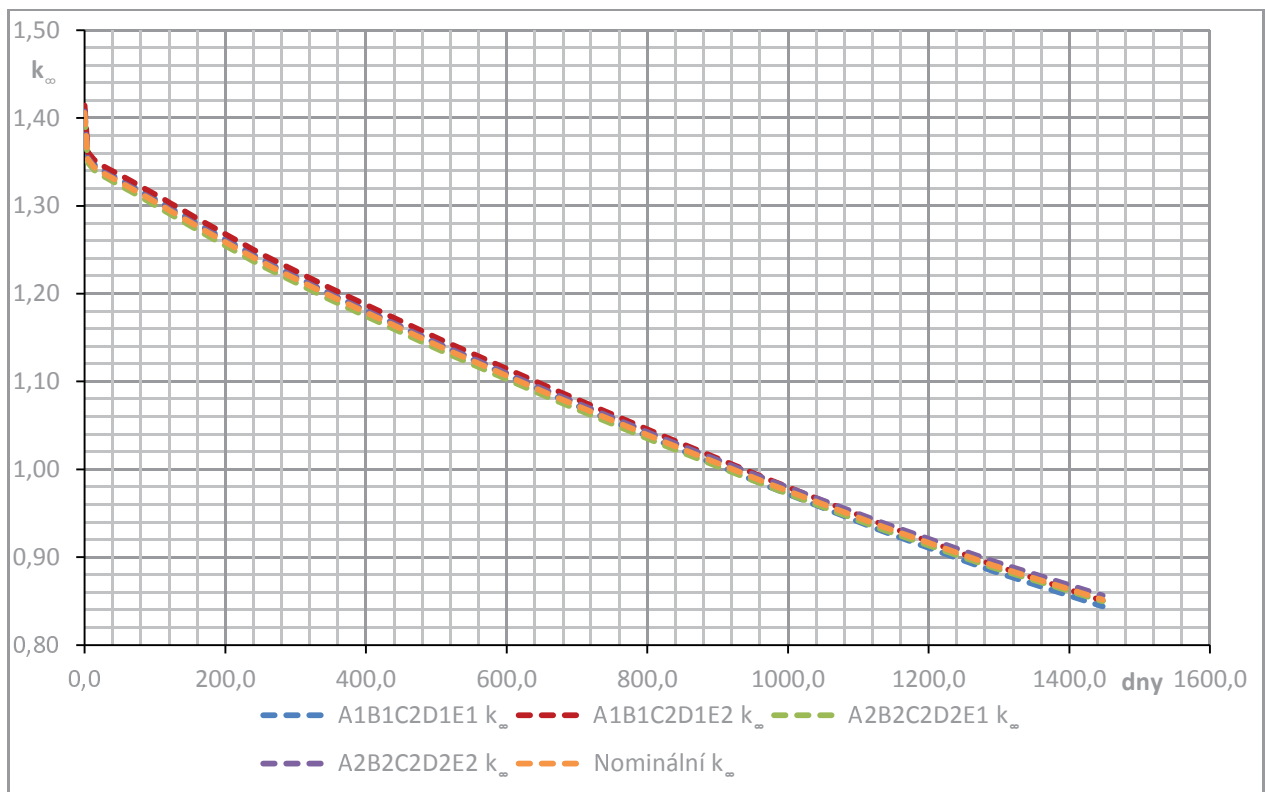
$$dny = \frac{\frac{\text{maximální vyhoření}}{\text{počet kroků}}}{P_V} \cdot \text{počet kroků} = \frac{\frac{50 \frac{\text{MWd}}{\text{kgU}}}{8 \text{ kroků}}}{0,039735 \frac{\text{MW}}{\text{kgU}}} \cdot 8 \text{ kroků} \doteq 1256 \text{ dní} \quad (4.6)$$

### 4.3.3 Vyhodnocení výsledků změn kritičnosti v průběhu vyhořívání

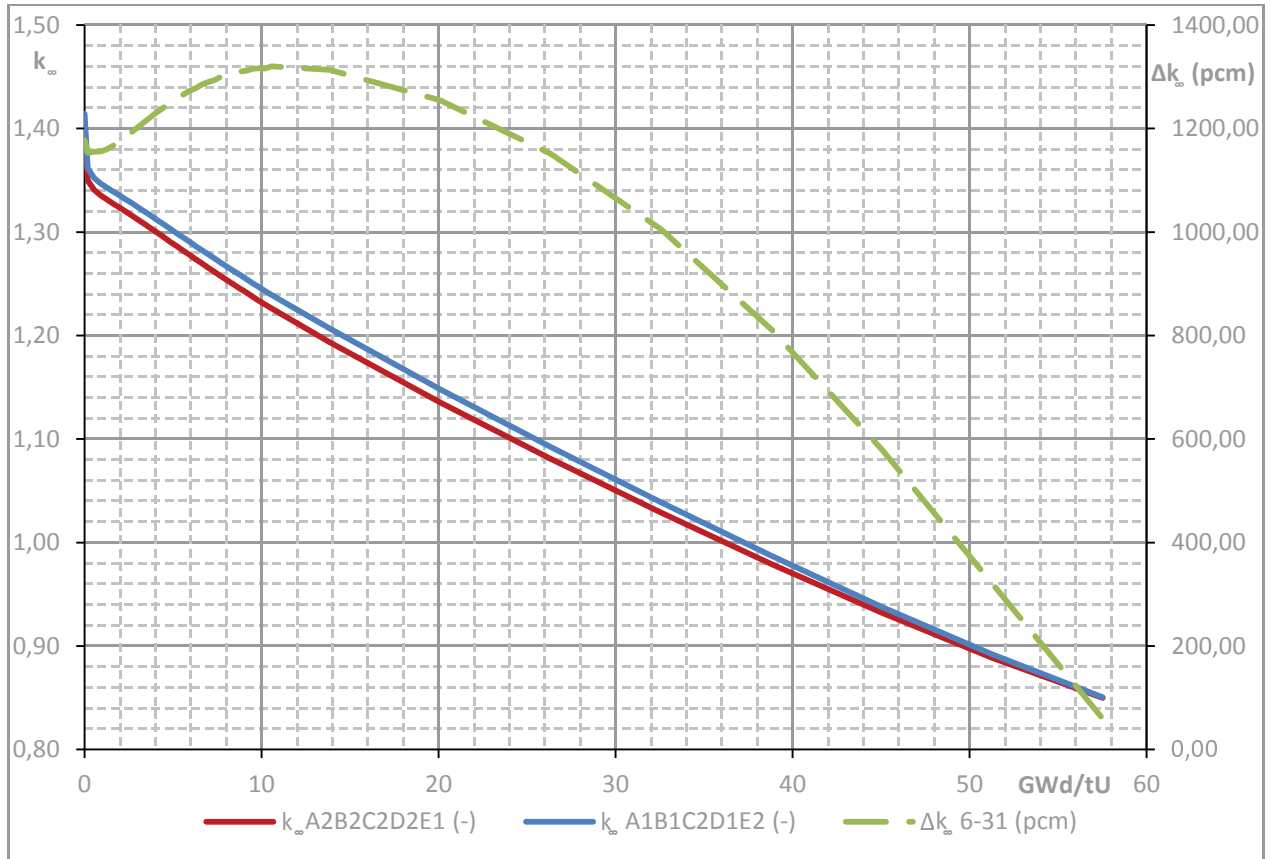
Tato kapitola obsahuje přehledně zpracované výsledky z výpočtů změn kritičnosti v průběhu vyhořívání. Podrobnější výsledky je možné dohledat v přílohách. Vypočtená data v příloze A tabulka I-2. Grafy v plné velikosti se nacházejí v příloze B.

Mimo vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu čerstvého paliva, bylo v práci prozkoumáno i chování některých kombinací nepřesností v průběhu vyhořívání. Jednalo se o variantu se jmenovitými hodnotami, nejvyšším a nejnižším  $k_{\infty}$ . Vzhledem k tomu, že nejvýznamnější vliv mělo v předchozí části práce obohacení izotopem  $^{235}\text{U}$ , byly vybrány také kombinace jinak identické, lišící se od nejvíce a nejméně reaktivní pouze svým obohacením.

V grafu 4-3 jsou vyneseny průběhy multiplikačního činitele jednotlivých variant. V závislosti na čase, je uvažován provoz reaktoru na jmenovitém výkonu 3000MW (před modernizací) a je uvažován bez odstávek. V grafu 4-3 lze vidět úvodní pád reaktivity při vzniku izotopů pohlcujících neutrony a následné postupné klesání v důsledku vyhořívání, ale pro vyhodnocování vlivu nepřesností není příliš vhodný.

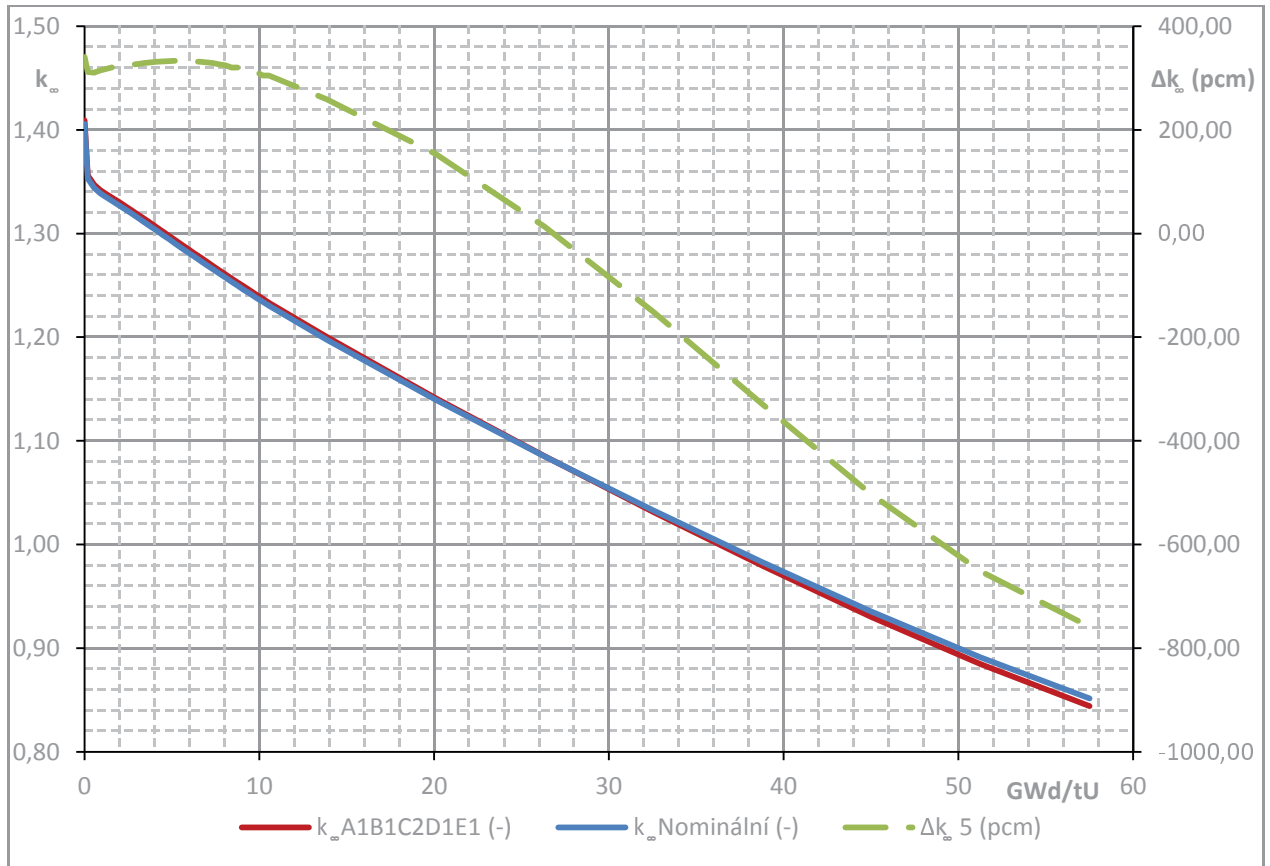


Obr. 4-3 Graf kritičnosti v závislosti na době vyhořívání



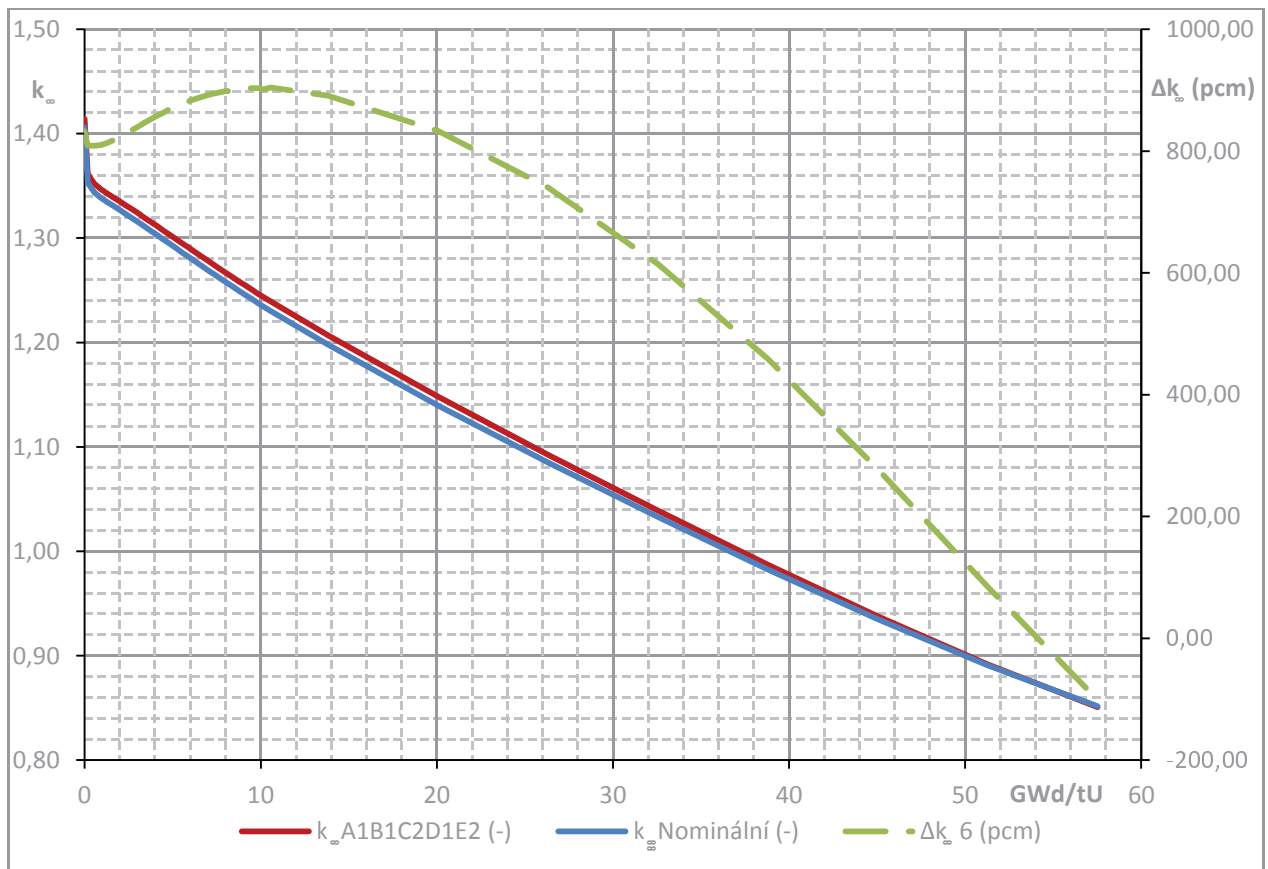
Obr. 4-4 Srovnání průběhů s maximální a minimální počáteční reaktivitou

V grafu 4-4 je zobrazen průběh multiplikačního činitele pro kombinace nejistot s nejvyšší a nejnižší reaktivitou v závislosti na vyhoření a na vedlejší ose je vynesena jejich rozdíly v jednotkách pcm. Lze si povšimnout, že rozdíly v reaktivitě se poměrně významně mění v průběhu vyhoření. Průběh začíná na hodnotě  $\Delta k_{\infty} = 1178$  pcm. Nejvyšší odchylka nastala ve výpočtu pro 265 den, vyhoření zhruba 10,55 GWd/tU a byla 1320 pcm. Po té začal rozdíl v reaktivitě klesat a při posledním výpočtu den 1447 vyhoření zhruba 57,52 GWd/tU je rozdíl již pouze 59 pcm.



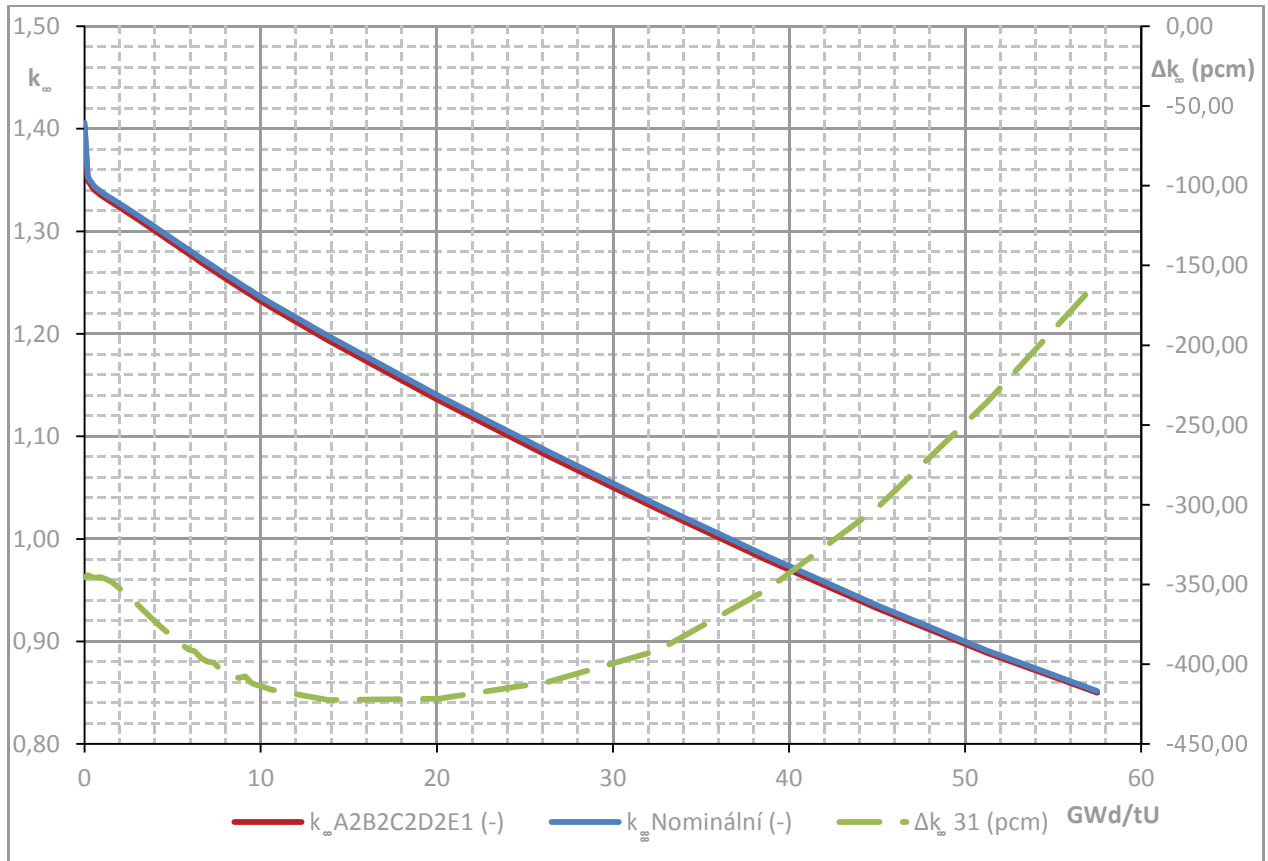
Obr. 4-5 Srovnání varianty A1B1C2D1E1 s nominální variantou

Graf 4-5 srovnává průběh multiplikačního koeficientu varianty A1B1C2D1E1 s nominální variantou. Grafický průběh rozdílu multiplikačních koeficientů  $\Delta k_{\infty}$  je poměrně zajímavý neboť začíná v kladných hodnotách (soubor je reaktivnější než by měl být), po mírném růstu dosáhne svého maxima ve výpočtu pro 157. den, vyhoření cca 6,26 GWd/tU  $\Delta k_{\infty} = 332 \text{ pcm}$ . Následně klesá zhruba při vyhoření 27 GWd/tU je reaktivita obou modelů shodná. Po té klesá do poměrně velkých záporných hodnot pro poslední výpočet 1447. den, vyhoření cca 57,52 GWd/tU je již  $\Delta k_{\infty} = -758 \text{ pcm}$  tedy velmi výrazně méně reaktivní než by měl být.



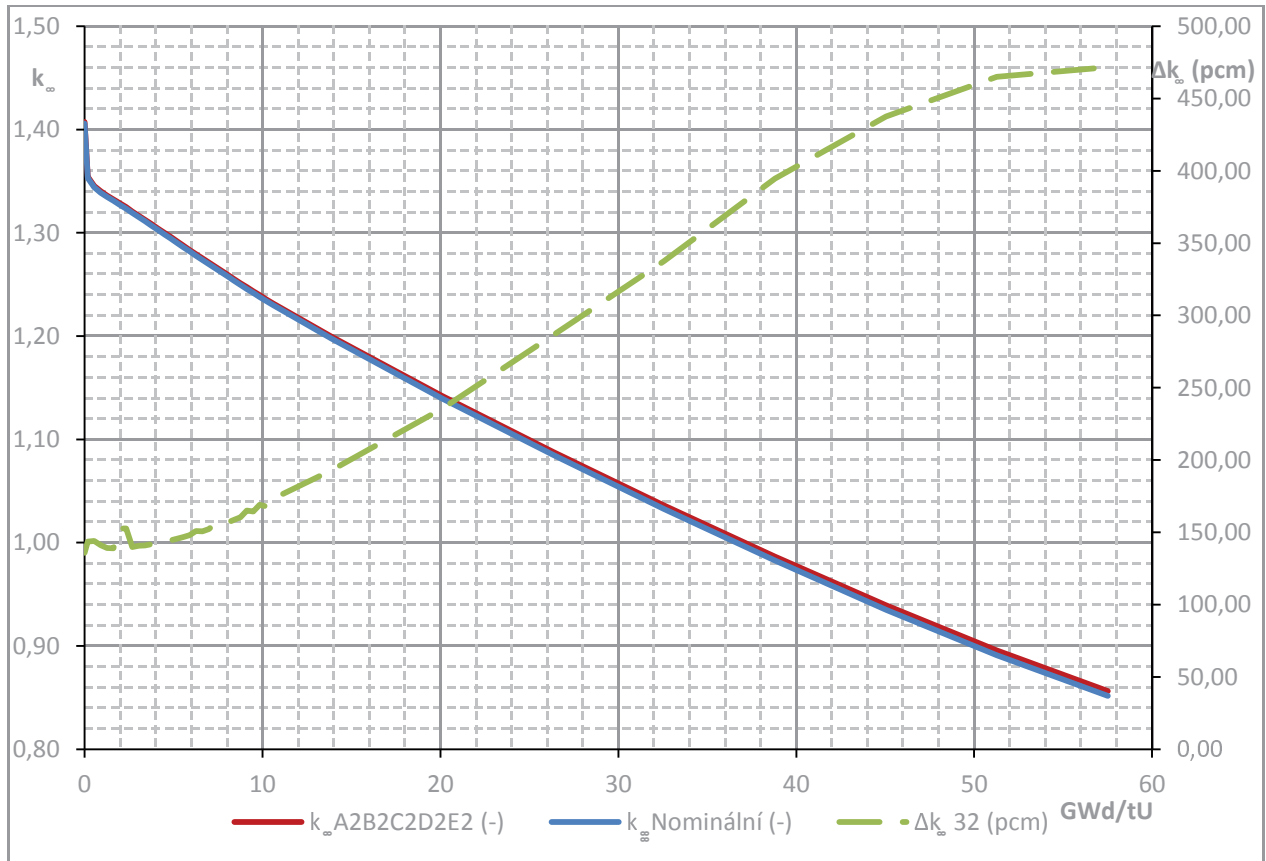
Obr. 4-6 Srovnání varianty A1B1C2D1E2 s nominální variantou

Graf 4-6 srovnává průběh multiplikačního koeficientu varianty A1B1C2D1E2 s nominální variantou. Tato kombinace představuje variantu s nejvyšší reaktivitou. Grafický průběh rozdílu multiplikačních koeficientů  $\Delta k_{\infty}$  začíná na hodnotě 832 pcm (výrazně reaktivnější než by měl být), roste až do 265. dne, vyhoření cca 10,55 GWd/tU, kdy dosáhne  $\Delta k_{\infty} = 904$  pcm. Následně klesá těsně před koncem simulace při vyhoření cca 54 GWd/tU protne nulu a skončí v záporných hodnotách pro den 1447, vyhoření cca 57,52 GWd/tU je  $\Delta k_{\infty} = -101$  pcm. Výrobní odchylky v modelu, který byl nejreaktivnější z výpočtů pro čerstvé palivo, mají v první třetině kampaně ještě větší vliv než by se dalo čekat z úvodního výpočtu, ale téměř ztratí význam ke konci palivové kampaně.



Obr. 4-7 Srovnání varianty A2B2C2D2E1 s nominální variantou

Graf 4-7 srovnává průběh multiplikačního koeficientu varianty A2B2C2D2E1 s nominální variantou. Tato kombinace představuje variantu s nejnižší reaktivitou. Průběh rozdílu multiplikačních koeficientů  $\Delta k_{\infty}$  začíná na hodnotě -346 pcm (méně reaktivní než by měl být) a dále klesá až do 348. dne, vyhoření cca 13,85 GWd/tU, kdy dosáhne  $\Delta k_{\infty} = -422$  pcm. Dále roste po celý zbývajících průběh kampaně. Při posledním výpočtu 1447. den, vyhoření cca 57,52 GWd/tU je  $\Delta k_{\infty} = -160$  pcm. Obdobně jako v minulém případě platí, že vliv odchylky se nejprve zvyšuje a je významný v první polovině kampaně, ale klesá k jejímu konci.



Obr. 4-8 Srovnání varianty A2B2C2D2E2 s nominální variantou

Graf 4-8 srovnává průběh multiplikačního koeficientu varianty A2B2C2D2E2 s nominální variantou. Grafický průběh rozdílu multiplikačních koeficientů  $\Delta k_{\infty}$  začíná na poměrně nízké hodnotě  $\Delta k_{\infty}=136$  pcm, ale jeho hodnota se zvyšuje v průběhu celé kampaně a končí 1447. den při vyhoření cca 57, 52 GWd/tU na hodnotě  $\Delta k_{\infty}=472$  pcm. Tento průběh opět prokazuje, že vliv jednotlivých nepřesností se může významně měnit v průběhu vyhořívání.

Celkově se dá shrnout, že výsledky výpočtů multiplikačního koeficientu v průběhu vyhoření přinesly zjištění, že o vlivu výrobních nepřesností na reaktivitu se nedá spolehlivě rozhodnout bez zkoumání jejich změn v průběhu vyhořívání. Obě varianty modelu, které byly vybrány pro svoji nejvyšší a nejnižší reaktivitu na počátku palivové kampaně, mají na jejím konci poměrně malou odchylku od nominálního stavu. Na druhou stranu varianty modelů, které byly původně vybrány pro studium vlivu obohacení a byly jinak nezajímavé, ukázaly, že se jejich absolutní odchylka výrazně zvětšila na konci kampaně.

Co se týká vlivu obohacení v průběhu vyhořívání platí, že je stále významné a stále kladné, varianty s vyšším obohacením mají vyšší reaktivitu v kterémkoliv bodě grafu, ale rozhodně není konstantní, což se dá odvodit z rozdílného tvaru průběhu  $\Delta k_{\infty}$  mezi variantami, které jsou jinak stejné lišící se pouze obohacením.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá vlivem výrobních nepřesností na reaktivitu jaderného paliva. Výzkum této problematiky by mohl poskytnout bližší informace o dopadu jednotlivých nepřesností a vést k budoucímu zpřesňování výroby v parametrech, které mají největší dopad na reaktivitu. Cíle bakalářské práce byly: Seznámit se s druhy paliva používanými v reaktorech VVER 1000. Seznámit se s metodikou citlivostních analýz. Detailně se seznámit s prostředím výpočetního balíku SCALE a jednotlivými moduly, které jsou potřebné k citlivostní analýze a provést analýzu jednotlivých palivových proutků paliva TVSA-T (z 1. kampaně na JE Temelín) a diskutovat vliv jednotlivých nepřesností na reaktivitu paliva.

Seznámení se s druhy paliva předcházelo seznámení se s reaktorem typu VVER, který je popsán a srovnán s dalšími typy tlakovodních reaktorů ve 2. kapitole. Následně bylo možné přejít k popisu paliva TVSA-T a jeho srovnání s předcházejícím VVanteg6 a několika dalšími moderními palivy pro reaktor VVER 1000. Seznámení se s metodikou citlivostních analýz je popsáno v kapitole 3, ve které je také zmíněno několik možných využití pro citlivostní analýzy a nastíněno několik postupů a metod citlivostních analýz.

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit citlivostní analýzu pro PS typu TVSA-T, tomuto cíli předcházela popis prostředí SCALE, ve kterém byly provedeny potřebné výpočty. Popis prostředí je v kapitole 4.1 pro tvorbu modelů bylo využito grafické rozhraní GeeWiz. Následně je popsána tvorba modelu pro výpočty citlivostní analýzy. V modelu byl prozkoumán vliv pěti nepřesností, přičemž bylo provedeno 32 výpočtů jejich kombinací a jeden výpočet s nominálními parametry. Jako nejvýznamnější parametr se projevilo obohacení izotopem  $^{235}\text{U}$  přičemž platí, že se zvyšující koncentrací vzrůstá reaktivita. Druhý nejvýznamnější parametr je vnější průměr pokrytí, pro něj platí, že se zvyšujícími se rozměry dochází k výraznému snížení reaktivity, zřejmě v důsledku zmenšení místa pro moderátor. Další tři zkoumané nepřesnosti měly nižší vliv, v pořadí dle významu to byly: hustota paliva, průměr palivové peletky a vnitřní průměr pokrytí. Vnitřní průměr pokrytí je poměrně zajímavý neboť i nejreaktivnější i nejméně reaktivní kombinace obsahovaly jeho vyšší hodnotu, z toho vyplývá, že může mít kladný i záporný vliv. To jej činí zajímavým přesto, že v absolutní hodnotě je oproti ostatním nepřesnostem jeho vliv malý.

Po provedení citlivostní analýzy pro čerstvé palivo bylo rozhodnuto model rozšířit o simulaci vyhořívání. Pro tuto část simulace byl využit modul T-DEPL z prostředí SCALE. Z důvodů náročnosti na výpočetní čas bylo rozhodnuto provést tuto část simulace jen pro některé kombinace výrobních nepřesností. Byly vybrány varianty s přesnými nominálními parametry, s nejvyšší reaktivitou a nejnižší reaktivitou. Dále bylo rozhodnuto zkoumat podrobněji vliv obohacení a byly přidány varianty, které se od předchozích dvou lišily pouze obohacením. Výsledky je možné vidět přehledně v grafech v předcházející kapitole. Ukázalo se, že vliv výrobních nepřesností se může velmi významně měnit v závislosti na obohacení. U obou extrémních variant nejdříve došlo k určitému zvětšení jejich odchylek, ale následně se



zmenšovali a jejich vliv v druhé polovině palivové kampaně byl výrazně menší, než by se dalo předpokládat. Naopak při sledování zbylých dvou souborů se ukázalo, že ačkoliv byl vliv jejich nepřesností na počátku palivové kampaně relativně malý, zvyšoval se po celou dobu vyhořívání. Z toho vyplývá, že i kombinace, které se při výpočtech pro čerstvé palivo nejevili důležité, mohou mít ke konci palivové kampaně významný dopad. Co se týká vlivu obohacení v průběhu vyhořívání, je možné udělat závěr, že je stále významný a stále kladný, obohacenější soubor bude mít vždy reaktivitu vyšší než méně obohacený, ale rozhodně není konstantní, což je možné vidět z odlišného tvaru průběhu odchylek mezi variantami, které se liší právě jen obohacením.

Z výsledků této práce vyplývá několik dalších možností na budoucí výzkum. Poměrně jednoduchým a přínosným rozšířením by bylo pokračovat v simulacích vyhořívání pro všechny ostatní kombinace výrobních nepřesností a hledat která kombinace má nejvýznamnější vliv v průběhu kampaně. Další o něco složitější možností rozšíření by mohlo být vytvořit model celého palivového souboru. To by umožnilo umístit do něj také palivové proutky typu tveg s vyhořívajícími absorbátory a zkoumat vliv jejich výrobních nepřesností na reaktivitu celého palivového souboru.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. World Nuclear Association [online]. London, United Kingdom, 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>
- [2] RAČEK, J. Jaderné elektrárny. Vyd. 4. Brno: Novpress, 2013, 256 s. ISBN 978-80-214-4744-8.
- [3] DOLEŽAL, J. Jaderné a klasické elektrárny. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [4] RAHIMI, M.H. a G. JAHANFARNIA. Thermal-hydraulic core analysis of the VVER-1000 reactor using a porous media approach. Journal of Fluids and Structures [online]. 2014, 51: 85-96 [cit. 2015-12-28]. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.08.002. ISSN 08899746. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889974614001790>
- [5] DAHLHEIMER, J. A., a, E. E. ELHAUGE, J. H. JACOBS, W. J. KABBERT, H. R. KEEL, G. C. MASCHE, C. N. MORAN, D. H. PETRIE, et al. The westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant. Westinghouse Electric Corporation, 1984.
- [6] Nuclear energy in Finland [online]. Finsko: Ministry of employment and the economy, 2013, 2015-11-22 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: [https://www.tem.fi/files/30820/250811\\_Nuclear\\_web.pdf](https://www.tem.fi/files/30820/250811_Nuclear_web.pdf)
- [7] KOVAČ, M. Analýza možnosti provozu 18-ti měsíčních palivových cyklů pro Jadernou elektrárnu Temelín. Praha, 2010. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Libor Bittmann.
- [8] Status report 93 - VVER–1000 (V-466B) (VVER–1000 (V-466B)) [online]. In: . 2011, 2015-12-10 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/34.VVER-1000%28V-466B%29.pdf>
- [9] Nuclear fuel for VVER reactors [online]. Moscow: TVEL JSC, 2011, 2015-11-22 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: [http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/b00eb08047178c38abfbfb39942cc531/brochure\\_nuclea\\_eng.pdf](http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/b00eb08047178c38abfbfb39942cc531/brochure_nuclea_eng.pdf)
- [10] KUNA, M. Využití programu MOBY-DICK/1000 se zaměřením na nové palivové vsázky jaderné elektrárny Temelín. Praha, 2011. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [11] JEŽEK, M. Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

- [12] UGRYMOV, A. Nuclear fuel for NPP: Current status and main fields of development [online]. Rusii: JSC TVEL, 2013, 2015-12-1 [cit. 2015-12-1]. Dostupné z: <http://ftp.vver2013.com/VVER%202013%20-%20Day%20II.,%20Parallel%20Section%20II.,PDF/Ugryumov%20A.pdf>
- [13] Sensitivity Analysis. *Joint Research Center* [online]. 2015, 2015-12-29 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo>
- [14] Methods. *Joint Research Center* [online]. 2015, 2015-12-29 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/methods>
- [15] SCALE/TRITON Primer: A Primer for Light Water Reactor Lattice Physics Calculations: NUREG/CR-7041 [online]. US: NRC, 2012, 2015-12-19 [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1233/ML12338A215.pdf>
- [16] KRÝSL, V., P. MIKOLÁŠ, D. SPRINZL a J. ŠVARNÝ. 'MIDICORE' VVER-1000 core periphery power distribution benchmark proposal. ŠKODA JS a. s.
- [17] IVANOV, K., M. AVRAMOVA, S. KAMEROW, I. KODELI, E. SARTORI, E. IVANOV a O. CABELLOS. Benchmarks for uncertainty analysis in modelling (UAM) for the design, operation and safety analysis of LWRs: Volume I: Specification and Support Data for Neutronics Cases (Phase I) [online]. Version 2.1. OECD Nuclear Energy Agency, 2013 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/NSC/DOC%282013%297&docLanguage=En>
- [18] NEWT: A New Transport Algorithm for Two-Dimensional Discrete-Ordinates Analysis in Non-Orthogonal Geometries. Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design [DVD]. Version 6.1. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2011, s. 2783-2913 [cit. 2016-05-17].

# PŘÍLOHA A

Tab. I-1 Detailní výsledky provedených simulací

Č.:	1	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C1D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační čísel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40858281	-

Č.:	2	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C1D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační čísel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,41350578	-

Č.:	3	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C1D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační čísel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40456777	-

Č.:	4	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C1D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační čísel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40946151	-

Č.:	5	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C2D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40931298	-

Č.:	6	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C2D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,41423227	-

Č.:	7	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C2D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40529808	-

Č.:	8	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B1C2D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,41018710	-

Č.:	9	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C1D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40777375	-

Č.:	10	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C1D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,41268059	-

Č.:	11	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C1D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40373712	-

Č.:	12	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C1D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,40861383	-

Č.:	13	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C2D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,40850311	-

Č.:	14	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C2D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,41340510	-

Č.:	15	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C2D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,40446604	-

Č.:	16	TVEL	A40E6		
Označení:	A1B2C2D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,226	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4093388	-

Č.:	17	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C1D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4067065	-

Č.:	18	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C1D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4115743	-

Č.:	19	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C1D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4026175	-

Č.:	20	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C1D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4074571	-



Č.:	21	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C2D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4074272	-

Č.:	22	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C2D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4122907	-

Č.:	23	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C2D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4033396	-

Č.:	24	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B1C2D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,753	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4081746	-

Č.:	25	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C1D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4058593	-

Č.:	26	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C1D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4107103	-

Č.:	27	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C1D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4037371	-

Č.:	28	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C1D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,772	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel $k_{\infty}$	Multiplication factor $k_{\infty}$	1,4065720	-

Č.:	29	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C2D1E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,4065787	-

Č.:	30	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C2D1E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,905	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,4114262	-

Č.:	31	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C2D2E1	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	3,95	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,4024693	-

Č.:	32	A40E6	TVEL		
Označení:	A2B2C2D2E2	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,526	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,05	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,4072877	-

Č.:	x1	A40E6	TVEL		
Označení:	Nominální	Český název	Anglický ekvivalent	Hodnota	Jednotka
	A	Hustota paliva	Fuel density	10,376	g/cm <sup>3</sup>
	B	Průměr paliva	Fuel pellet diameter	0,756	cm
	C	Vnitřní průměr pokrytí	Clad inner diameter	0,778	cm
	D	Vnější průměr pokrytí	Clad outer diameter	0,915	cm
	E	Koncentrace U235	Concentration U235	4,00	%hm
	=	Multiplikační činitel k <sub>∞</sub>	Multiplication factor k <sub>∞</sub>	1,4059251	-

Tab. I-2 Hodnoty multiplikačního činitele v závislosti na čase

č:	5	6	31	32	x1
označení:	A1B1C2D1E1	A1B1C2D1E2	A2B2C2D2E1	A2B2C2D2E2	Nominální
den:	$k_{\infty}$	$k_{\infty}$	$k_{\infty}$	$k_{\infty}$	$k_{\infty}$
0,0	1,40927971	1,41419535	1,40241639	1,40723171	1,40587308
4,5	1,35610723	1,36107629	1,34954628	1,35442506	1,35298813
13,5	1,34714484	1,35213213	1,34058494	1,34548190	1,34404197
22,5	1,34199455	1,34694888	1,33539385	1,34025888	1,33884838
31,5	1,33799022	1,34294242	1,33134263	1,33620308	1,33481073
40,5	1,33420045	1,33917130	1,32750424	1,33238168	1,33099333
49,5	1,33037565	1,33538315	1,32362461	1,32867442	1,32714875
58,5	1,32647874	1,33152284	1,31967644	1,32476327	1,32323551
67,5	1,32251383	1,32759838	1,31566060	1,32065259	1,31925348
76,5	1,31848629	1,32361502	1,31158208	1,31661896	1,31521244
85,5	1,31441430	1,31958818	1,30745597	1,31253354	1,31112352
94,5	1,31029733	1,31551616	1,30328644	1,30841136	1,30699406
103,5	1,30615468	1,31141925	1,29909563	1,30426512	1,30283945
112,5	1,30199174	1,30730201	1,29489330	1,30010489	1,29867215
121,5	1,29781573	1,30317837	1,29067534	1,29593236	1,29448708
130,5	1,29365055	1,29905264	1,28647221	1,29177399	1,29031830
139,5	1,28947705	1,29492036	1,28226832	1,28761283	1,28614494
148,5	1,28531483	1,29080069	1,27807534	1,28346294	1,28198264
157,5	1,28116241	1,28669351	1,27392122	1,27934928	1,27784004
166,5	1,27704907	1,28262125	1,26977448	1,27524216	1,27373518
175,5	1,27294121	1,27855350	1,26565333	1,27115824	1,26963643
184,5	1,26884958	1,27450543	1,26157278	1,26711846	1,26556149
193,5	1,26480170	1,27049983	1,25750330	1,26308630	1,26153355
202,5	1,26076292	1,26649978	1,25346419	1,25908447	1,25751580
211,5	1,25675043	1,26252551	1,24947687	1,25513253	1,25354647
220,5	1,25278673	1,25860038	1,24549755	1,25118830	1,24958425
229,5	1,24882765	1,25467838	1,24156620	1,24729235	1,24564226
238,5	1,24488643	1,25080186	1,23765073	1,24341317	1,24176894
247,5	1,24101503	1,24693553	1,23376931	1,23959104	1,23790068
256,5	1,23713139	1,24309368	1,22993605	1,23576017	1,23408113
265,5	1,23331223	1,23930868	1,22610814	1,23199741	1,23026600
348,5	1,20039736	1,20671475	1,19358195	1,19973327	1,19780573
505,5	1,14116968	1,14796466	1,13541892	1,14198884	1,13963512
662,5	1,08514598	1,09241576	1,08090524	1,08787979	1,08501518
819,5	1,03126636	1,03892370	1,02886804	1,03615718	1,03278127
976,5	0,97932365	0,98721604	0,97909848	0,98657323	0,98262701
1133,5	0,93000506	0,93782052	0,93202313	0,93941469	0,93503961
1290,5	0,88446031	0,89182711	0,88862276	0,89562685	0,89097744
1447,5	0,84400060	0,85057478	0,84998212	0,85630198	0,85158513

## PŘÍLOHA B

