

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

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Využití metodiky burnup credit pro ukládací obalový  
soubor**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra UNGROVÁ**  
Osobní číslo: **E14N0055P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Využití metodiky burnup credit pro ukládací obalový soubor**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s výpočtním kódem Serpent a s metodikou výpočtů kritičnosti a burnup creditu.
2. Seznamte se s konstrukcí ukládacího obalového souboru pro palivo VVER-440.
3. Vypočtete podkritičnost UOS během provozu v hlubinném úložišti pro plný burnup credit bez uvažování neurčitostí.
4. Pro konzervativní dobu chlazení paliva určete vliv jednotlivých nuklidů na podkritičnost UOS.
5. Vyberte skupinu nuklidů pro burnup credit a na základě dostupných srovnání výpočetních a experimentálních dat VVER oceňte neurčitosti výpočtu podkritičnosti UOS.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**


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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na výpočet podkritičnosti a na ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. V diplomové práci je popsán ukládací obalový soubor, metodika výpočtu kritičnosti a burnup creditu a výpočetní program Serpent. V tomto programu jsou provedeny výpočty a konstrukce modelu ukládacího obalového souboru. Vypočítané výsledky budou zhodnoceny na závěr diplomové práce.

## **Klíčová slova**

Ukládací obalový soubor, burnup credit, Serpent, koeficient násobení, kritičnost.

**Abstract**

This diploma thesis is focused on the calculation of subcriticality and of the storage package for deep repository. The diploma thesis describes the storage packaging set, methodology of criticality calculation and of a burnup credit and also Serpent computing program. In this program, calculations and constructions of the storage packet model are performed. Calculated results will be evaluated at the conclusion of the thesis.

**Key words**

Disposal cask, burnup credit, Serpent, multiplication coefficient, criticality.

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 11. 5. 2017

Bc. Petra Ungrová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za profesionální připomínky a rady a především Ing. Martinu Loveckému za provedení problematikou, cenné rady a připomínky, metodické vedení práce a za vstřícnost při konzultacích.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b> .....	<b>11</b>
1.1. ŘETĚZOVÁ ŠTĚPNÁ REAKCE A MULTIPLIKAČNÍ FAKTOR .....	11
1.1.1 Účinný průřez .....	12
1.2. METODIKA BURNUP CREDIT .....	13
1.2.1. Výběr a ověřování výpočetních postupů .....	14
1.2.2. Specifikace izotopů .....	15
1.2.3. Koncentrace izotopů.....	16
1.2.4. Citlivostní analýzy výpočtu kritičnosti .....	17
1.2.5. Specifikace bezpečnostních rezerv, vyhodnocení zavážecí křivky .....	18
1.2.6. Analýza abnormálních a havarijních podmínek .....	18
1.2.7. Shrnutí metodiky burnup credit .....	18
<b>2. UKLÁDACÍ OBALOVÝ SOUBOR PRO PALIVO VVER-440</b> .....	<b>19</b>
2.1. HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ .....	19
2.2. PALIVO GD-2M.....	21
2.3. UKLÁDACÍ OBALOVÝ SOUBOR .....	21
2.4. PALIVOVÝ SOUBOR .....	24
2.5. PALIVOVÝ PROUTEK.....	25
<b>3. SERPENT</b> .....	<b>27</b>
3.1. PALIVOVÉ PROUTKY .....	27
3.2. MŘÍŽKA/MATICE .....	28
3.3. ROZHŘANÍ POVRCHU (MATERIÁL) .....	29
3.4. BUŇKY/ROZHŘANÍ .....	31
3.5. TISK GEOMETRIE .....	32
3.6. MATERIÁLY A JEJICH SLOŽENÍ.....	33
<b>4. ANALÝZA PODKRITICNOSTI</b> .....	<b>35</b>
4.1. POUŽITÉ JADERNÉ PALIVO .....	35
4.2. PODKRITICNOST UKLÁDACÍHO OBALOVÉHO SOUBORU .....	36
4.3. VLIV NUKLIDŮ NA PODKRITICNOST .....	40
4.4. NEURČITOST VÝPOČTU PODKRITICNOSTI UOS .....	52
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Kvůli neustálému nárůstu spotřeby elektrické energie v ČR je nutné zvýšit i její výrobu. Dostavba jaderné elektrárny v ČR nejen zajistí pokrytí narůstající spotřeby, ale i vytvoří rezervy důležité pro stabilitu energetické soustavy. S tím souvisí i nárůst radioaktivního odpadu. Existují dvě možnosti jak nakládat s radioaktivním odpadem. První možností je použité palivo přepracovat a znovu jej použít. Druhou možností je použité palivo bezpečně uložit na takovou dobu, kdy se radioaktivní nuklidy rozpadnou na neradioaktivní. To však trvá tisíce let a je nutné po tuto dobu zajistit palivo tak, aby nedošlo k úniku nebezpečných látek do okolí.

V současné době se považuje hlubinné úložiště jako nejvhodnější možnost uložení radioaktivního odpadu. První zemí stavící hlubinné úložiště je Finsko. Uvedení finského hlubinného úložiště do provozu se předpokládá v roce 2023. V České republice se plánuje začátek výstavby na rok 2050.

Použité palivo se umístí do speciálních obalových souborů, které budou umístěny hluboko pod zemským povrchem. Ukládací obalové soubory budou zasypány bentonitem a granitem. Na tyto obalové soubory jsou kladeny velké nároky v několika oblastech jako je těsnost, odolnost vůči mechanickému namáhání, odolnost vůči okolnímu tlaku a chemickému namáhání. Takový obalový soubor je vyvíjen ve firmě Škoda JS.

Pro vývoj obalového souboru je důležité znát nuklidy a jejich následné chování po dobu uložení v meziskladu jaderného paliva a pro uložení v hlubinném úložišti. To předpovídají různé počítačové simulace.

V této diplomové práci se budu zabývat metodikou burnup credit, která se převážně využívá při výpočtu kritičnosti v ukládacím obalovém souboru, a následnou analýzou dat.

## Seznam symbolů a zkratek

VVER .....	Typ tlakovodního reaktoru
UOS .....	Ukládací obalový soubor
PS .....	Palivový soubor
MTU .....	Metrická tuna uranu (metric tonnes of uranium)
MWd/MTU .....	Jednotka vyhoření, Megawatt-den na metrickou tunu uranu
PP .....	Palivový proutek
SÚRAO .....	Správa úložiště radioaktivního odpadu
HÚ .....	Hlubinné úložiště
$k_{\infty}$ .....	Multiplikační koeficient, koeficient násobení v nekonečné soustavě
$k_{\text{eff}}$ .....	Efektivní koeficient násobení
Gd-2M .....	Typ jaderného paliva
SÚJB .....	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
$N_i$ .....	Jaderná hustota i-tého nuklidu (at/bcm)
$\sigma$ .....	Účinný průřez (b)
SFCOMPO .....	Databáze kompozic izotopů použitého paliva (Spent fuel isotopic composition database)

# 1. Úvod do problematiky

## 1.1. Řetězová štěpná reakce a multiplikační faktor

Řetězová jaderná reakce nastává v případě, když při rozštěpení jádra neutronem dojde k uvolnění dalších neutronů. Tyto neutrony mohou vyvolat další štěpení jader, kde vznikají další neutrony a takto roste reakce štěpení jader. Aby štěpná reakce zůstala zachována, musí alespoň jeden neutron, který byl uvolněn při štěpení, vstoupit do jádra štěpného materiálu a spustit novou štěpnou reakci. V dynamice řetězové reakce je důležitou veličinou multiplikační faktor  $k$ . Jedná se o poměr počtu dvou generací následujících neutronů. Multiplikační faktor  $k$  udává dynamiku řetězové reakce. Pokud je  $k = 1$ , pak je počet neutronů ustálený a reakce se konstantě udržuje. Počet štěpných reakcí v druhé generaci způsobené neutrony při první generaci štěpení je shodný jako počet štěpných reakcí v generaci první. Jedná se o konstantní výkon aktivní zóny reaktoru. Tento stav označujeme jako kritický. Jestliže je  $k < 1$ , počet neutronů klesá. Tento stav nastává, když množství štěpných reakcí způsobené neutrony, které se uvolnily při štěpení v generaci první je menší než množství štěpných reakcí v první generaci. To může být způsobeno spotřebou paliva a nebo pohlcením neutronů moderátorem. Jedná se o podkritický stav. Když je  $k > 1$ , počet neutronů roste. Množství štěpných reakcí v první generaci je nižší než množství štěpných reakcí v generaci druhé. Tento stav se označuje jako nadkritický a zvyšuje se výkon v aktivní zóně reaktoru.

V nekonečné soustavě označujeme multiplikační koeficient jako koeficient násobení v nekonečné soustavě  $k_{\infty}$ . Reálně má ale soustava konečné rozměry a z reaktoru vždy unikají skupiny neutronů a proto je zaveden efektivní koeficient násobení  $k_{eff}$ . Vždy platí, že efektivní koeficient násobení je menší než koeficient násobení pro soustavu nekonečnou. Únik neutronů je charakterizován pravděpodobností  $P$ . Jedná se o pravděpodobnost neúniku neutronů z reaktoru. Multiplikační koeficient a efektivní koeficient násobení jsou dány následujícími vztahy. [1] [2] [4] [18]

$$k_{\infty} = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (1)$$

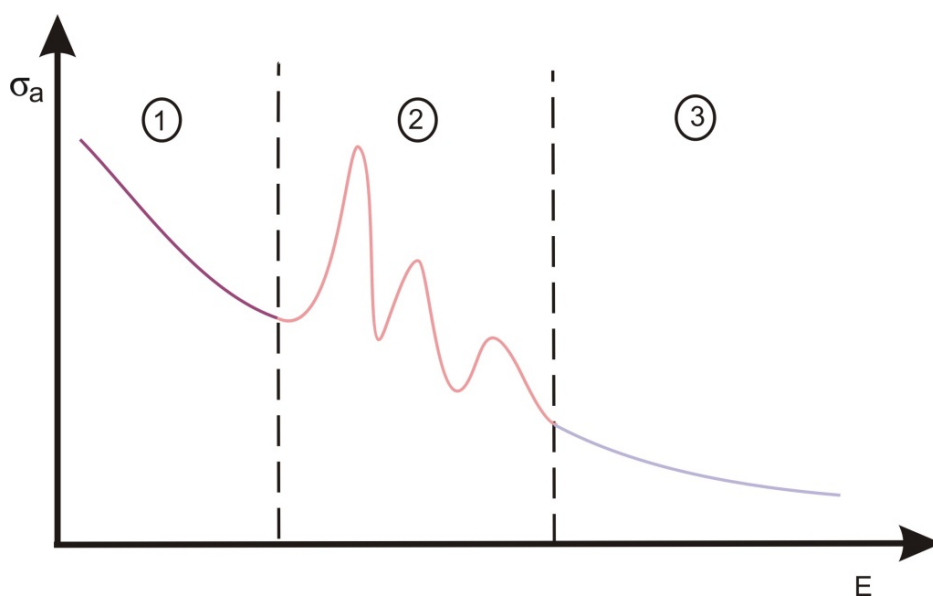
$$k_{eff} = k_{\infty} \cdot P \quad (2)$$

### 1.1.1 Účinný průřez

Mikroskopický účinný průřez se vztahuje k jednomu jádru a udává pravděpodobnost interakce mezi jedním jádrem a jedním dopadajícím neutronem. Jádro se nachází na ploše  $1 \text{ m}^2$  a neutron prolétá touto plochou kolmo. V praxi však vychází velmi malá čísla, proto se účinný průřez udává v barnech. Platí, že 1 barn je roven  $10^{-28} \text{ m}^2$ . Účinný průřez jádra je veličina závislejší na energii, kterou má neutron při dopadu.

$$\sigma = \sigma(A, E) \quad (3)$$

$A$  je atomová hmotnost terčového jádra a  $E$  je energie dopadajícího neutronu. Na Obrázku 1.1 je znázorněná typická závislost účinného průřezu absorpci neutronů na energii. Energie se rozděluje do tří intervalů. První interval se nazývá oblast zákona  $1/v$  a patří sem neutrony s energií do 1 eV. Druhý interval se nazývá rezonanční oblast a je určená pro neutrony s energií od 1 eV do  $10^3$  eV. Třetí interval je oblast neutronů s vysokou energií (střední a rychlé neutrony) s energií od  $10^3$  eV až do  $10^7$  eV.



Obr. 1.1: Závislost účinného průřezu na energii [11]

Radioaktivní přeměna nuklidů v použitém palivu je zdrojem neutronů a fotonů. Spontánní štěpení aktinidů je zdrojem neutronů, zatímco zdroje fotonů jsou způsobeny radioaktivním rozpadem štěpných produktů. Neutronové zdroje mají delší poločasy rozpadu a proto velikost fotonového zdroje klesá s časem rychleji. [3] [11]

## 1.2. Metodika burnup credit

Metodika burnup credit se využívá převážně při výpočtech a analýzy kritičnosti při ukládání použitého jaderného paliva v obalovém souboru. Tato metodika lze také uplatnit při přepravě a skladování použitého jaderného paliva. Při udržení podkritického stavu můžeme zmenšit místo pro ukládání a tím dosáhnout větší ekonomické efektivity. Koncept metodiky burnup credit bere v potaz snížení reaktivity v důsledku ozáření jaderného paliva, pokud je analýza kritičnosti provedena výhradně pro použité palivo. Redukce je kombinací tří efektů: snížení koncentrace štěpných nuklidů, produkce absorbujících nuklidů (neštěpitelné aktinidy a štěpné produkty) a tvorba štěpných aktinidů. První dva efekty přispívají ke snížení reaktivity a poslední efekt přispívá k jejímu nárůstu. Metodika burnup credit se nesnaží snížit bezpečnostní limity v oblasti kritičnosti, ale snižuje nejistoty bezpečnostních rezerv o přesnější analýzu. Tato přesnější analýza však vyžaduje více znalostí, zkušeností a přesnějších nástrojů. [3] [10]

V praxi požadujeme pro přijetí metodiky burnup credit dvou-krokový proces:

- 1) Určení složení použitého paliva pomocí analýzy vyhořívání
- 2) Výpočet multiplikačního faktoru  $k$  pro systém použitého paliva na základě předpovědi složení použitého paliva

Důležité kroky při aplikaci burnup credit metodiky na analýzu kritičnosti jsou:

- a) Výběr a ověřování výpočetních postupů
- b) Specifikace izotopů
- c) Koncentrace izotopů

- d) Citlivostní analýzy pro výpočet izotopových zásob
- e) Výpočet podkritičnosti pro systém použitého paliva
- f) Citlivostní analýzy výpočtu kritičnosti
- g) Stanovení vlivu axiálního a radiálního profilu vyhoření
- h) Specifikace bezpečnostních rezerv, vyhodnocení zavážecí křivky
- i) Analýza abnormálních a havarijních podmínek [3] [10]

### 1.2.1. Výběr a ověřování výpočetních postupů

Obecně platí, že data po ozáření se používají k ověření výpočtů vyhořívání. Předpokládaná koncentrace nuklidů z výpočetních kódů se srovnává s naměřenými daty. SFCOMPO (Spent Fuel Isotopic Composition Database) je internetová databáze, která poskytuje data o složení izotopů. Tato databáze obsahuje izotopové složení různých experimentů a hodnoty jejich koncentrací v jaderném palivu, které jsou potřebné pro ověření vyhořívacích kódů. Ověření výpočtu kritičnosti požaduje, aby se porovnal s akceptovatelnými ukazateli. Ukazatele mohou být jak experimentální data, tak výsledky z přijatelných kódů. Experimentální data se mohou získávat čtyřmi způsoby. Jedním ze způsobů je kritický experiment s vyhořelým palivem. Tyče s použitým palivem jsou smontovány a umístěny do experimentálního zařízení s podobnou konfigurací jakou mají ve skladovacím obalovém souboru. Tyto data jsou však obtížně získatelné a proto jich je málo. Druhým způsobem je hodnota reaktivity měřená pro jednotlivé nuklidy. Jedná se o experiment kritičnosti s čerstvým palivem smíšený s jednotlivými štěpnými produkty. Dalším možným způsobem získání dat kritičnosti je měření v provozních reaktorech. Nevýhodou těchto dat je rozdílnost podmínek v reaktoru a podmínek pro skladování použitého paliva. Poslední způsob získávání dat jsou experimenty kritičnosti s čerstvým palivem. [3] [10]

### 1.2.2. Specifikace izotopů

V průběhu ozařování vzniká přibližně 1 300 izotopů v ozářeném palivu. V modelech však nemůžou být představeny všechny tyto izotopy. Výběr izotopů, které mají zastupovat reaktivitu použitého paliva, jsou velmi závislé na zvolené úrovni burnup creditu. Ten souvisí s analyzovaným skladováním použitého paliva (počáteční obohacení, provozní historie a doba chlazení) a s přesností výpočetního kódu podpořeného experimentálními daty. Například aktinidy a štěpné produkty by měly být uvažovány pro tlakovodní reaktor a mokré skladování, ale obvykle uvažujeme aktinidy pro tlakovodní reaktor a suché skladování. Výběr izotopů závisí na hodnotě reaktivity nuklidů a na jejich fyzikální a chemické stabilitě. Výběr izotopů pro výpočet kritičnosti musí dodržovat následující čtyři nároky. Prvním z nároků je zařazení všech nuklidů, které mají významnou pozitivní reaktivitu jedná se například o nuklidy U-235, Pu-239, Pu-241 a další. Druhý nárok zahrnuje stabilní nuklidy s negativní hodnotou reaktivity nebo nuklidy s poločasy rozpadu výrazně delší než je životnost systému řízení použitého paliva. Třetí nárok je zaměřen na radionuklidy s negativní reaktivitou, ale poločas rozpadu není výrazně větší než u životnosti obalového ukládacího souboru. Mohou být tedy zahrnuty, pokud je to odůvodněno vlastnostmi absorpčních dceřiných produktů. Posledním nárok je kladen na nuklidy, které nesmí být zahrnuty. Jedná se o nuklidy se zápornou reaktivitou. Tyto nuklidy jsou izotopy prvků nebo jejich sloučenin, které jsou nestálé při normálních provozních podmínkách. Také je nutné znát pro předpověď izotopů v obsahu použitého paliva neutronové průřezy a poločasy rozpadu. Tento postup vede k výběru 11 aktinidů, které jsou uvedeny v *Tabulce 1.2*. Pokud však nejsou tyto izotopy brány jako dostatečné, přidávají se vybrané štěpné produkty, které jsou spolu uvedeny spolu s aktinidy v *Tabulce 1.3*. Skupina štěpných produktů je vysoce radioaktivní a je pro své okolí velmi nebezpečná. Nuklidy v této skupině produkují všechny druhy záření a má 3% zastoupení v použitém jaderném palivu. Mezi štěpnými produkty jsou i takové nuklidy, které mají dlouhý poločas rozpadu a proto se kritičnost obalového souboru musí počítat až na několik statisíců let. [3] [10]

Tab.1.2 Tabulku aktinidů

U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-238
Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
Np-237				

(Zdroj: Criticality safety calculations of disposal canisters) [3]

Tab. 1.3 Tabulka aktinidů a štěpných produktů

Mo-95	Nd-145	Nd-143	Eu-151	Eu-153
U-236	U-238	U-233	U-234	U-235
Pu-241	Pu-242	Pu-238	Pu-239	Pu-240
Tc-99	Sm-147	Sm-149	Sm-150	Sm-151
Sm-152	Gd-155	Np-237	Am-241	Am-242m
Am-243	Ag-109	Rh-103	Ru-101	

(Zdroj: Disposal criticality analysis methodology's principal isotope burnup credit )

[10]

### 1.2.3. Koncentrace izotopů

Koncentrace izotopů závisí na podmínkách, které panují při provozu jaderné elektrárny. Tyto podmínky jsou dány následujícím:

- a) měrným výkonem a historií provozu
- b) teplotou jaderného paliva
- c) hustotou a teplotou moderátoru
- d) přítomností rozpustného boru v jádru
- e) přítomností pevných neutronových absorbátorů - řídicí tyče
- f) přítomnost vyhořívajících absorbátorů - palivové tyče



V případě změny některého z parametrů může dojít ke zvýšení kritičnosti použitého paliva. Například zvýší-li se produkce plutonia dojde tím ke snížení rychlosti štěpení nuklidu U-235. Z toho vyplývá, že důsledek zvýšení štěpení plutonia je zvýšení reaktivity jaderného paliva. [3] [10]

#### 1.2.4. Citlivostní analýzy výpočtu kritičnosti

Ve výpočtech kritičnosti se běžně používá takové uspořádání, které je nejvíce reaktivní. Konstrukce ukládacích palivových souborů a systém řízení použitého paliva ovlivňuje multiplikační faktor  $k$ .

Důležité konstrukční parametry palivových ukládacích souborů:

- a) specifikace palivových tyčí (průměr a hustota pelety, materiál a tloušťka pláště, průměr palivové tyče)
- b) specifikace palivových článků (počet palivových tyčí, aktivní délka paliva, rozměr a pozice distanční mřížky)
- c) počáteční obohacení

Konstrukční parametry systému s použitým palivem:

- a) vnitřní šířka použitých palivových článků
- b) tloušťka a hmotnost neutronového absorbátoru
- c) mezery mezi použitými palivovými články
- d) rozmístění a materiál
- e) výška použitých palivových článků

Tyto konstrukční parametry lze považovat za mezní hodnoty. Jestliže jsou tyto mezní hodnoty vyhovující, musí být zahrnuty ve výpočtech citlivostní analýzy. [3] [10]

### 1.2.5. Specifikace bezpečnostních rezerv, vyhodnocení zavážecí křivky

Dostatečná míra bezpečnosti závisí na analyzovaných podmínkách. Tato hodnota je vždy stanovená v předpisech. Výsledek analýzy bezpečnosti se vyhodnocuje pomocí zavážecí křivky. Tato křivka udává minimální vyhoření nezbytné pro použité palivo, které má určitou hodnotu počátečního obohacení. Zavážecí křivka by správně měla obsahovat všechny možné mechanické a výpočetní nejistoty. [3] [10]

### 1.2.6. Analýza abnormálních a havarijních podmínek

V bezpečnostní analýze kritičnosti je nutné zvážit všechny možné nehody a události, které by mohli následovat. V analýze se používá princip dvojité nepředvídatelné události. Tento princip spočívá v tom, že by se musely stát nejméně dvě nepravděpodobné a souběžné události, aby způsobily nehodu. Princip dvojité nepředvídatelné události se vždy jeví jako aktuální stav.

### 1.2.7. Shrnutí metodiky burnup credit

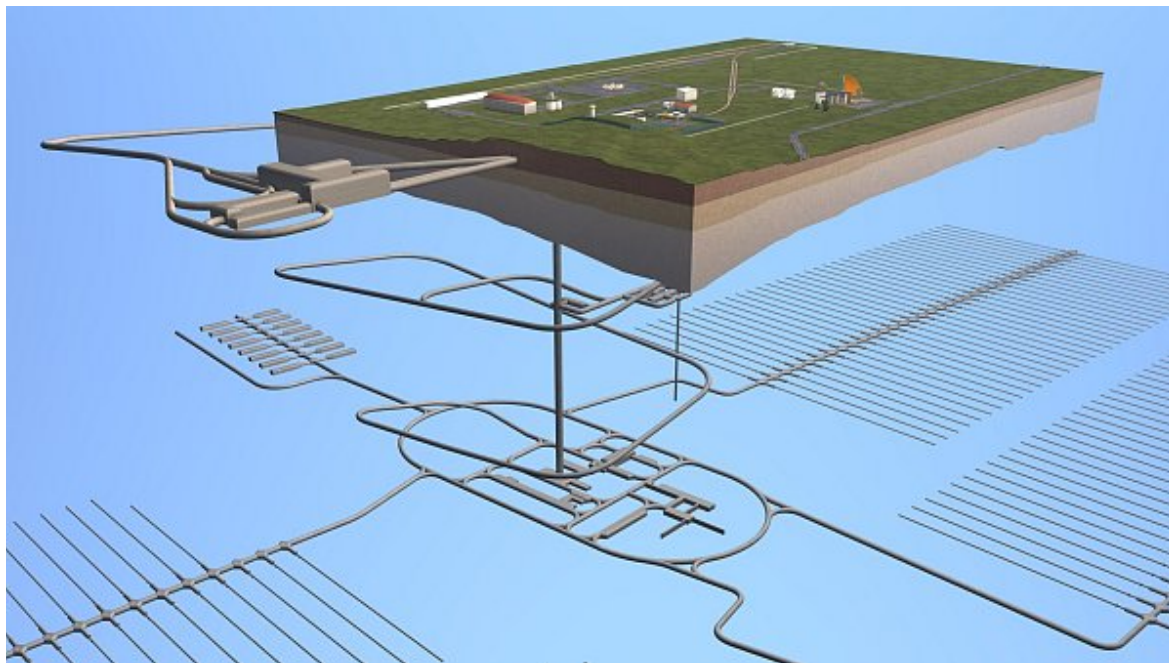
Velmi důležitým úkolem metodiky burnup credit je tvorba zavážecí křivky s minimálním vyhoříváním v porovnání s počátečním obohacením a s ohledem na všechny mechanické a výpočetní nejistoty. Její hlavní výhodou je realističtější předpověď kritičnosti na dlouhé časové úseky. V ukládání použitého jaderného paliva se jedná řádově až o statisíce let. Díky této realističtější předpovědi se může metodika burnup credit aplikovat i do přepravy použitého jaderného paliva a na dočasné skladování před trvalým uložením do hlubinného úložiště. Metodika burnup credit má nejen velký ekonomický přínos, ale výrazně přispívá i k bezpečnosti a udržení kvality životního prostředí. [3] [10]

## 2. Ukládací obalový soubor pro palivo VVER-440

### 2.1. Hlubinné úložiště

Radioaktivní odpad nevzniká pouze v jaderných elektrárnách, ale i ve zdravotnictví, výzkumu a průmyslu. Jedná se například o použité palivo, měřicí přístroje, oděvy a pevné a kapalné látky. Ukládání radioaktivních odpadů má na starosti SÚRAO podle zákona 263/2016 Sb. Zákon atomový zákon. V České republice je vyprodukováno přibližně 100 tun vysokoaktivního odpadu z jaderných elektráren a 450 tun středněaktivního a nízkoaktivního odpadu. Středně a nízkoaktivní odpad je zpracován, vložen do sudů a uložen do skladu radioaktivního odpadu. Vysokoaktivní odpad z jaderných elektráren, tedy použité palivo, se nejdříve 5 let chladí v bazénu vedle reaktoru a poté se skladuje v kontejneru 50 až 60 let v meziskladech pro použité palivo na území elektrárny. [13] [14]

Hlubinné úložiště bude mít nadzemní a podzemní část. V nadzemní části se budou radioaktivní materiály překládat do speciálních velmi odolných ukládacích kontejnerů a poté budou přesunuty a uloženy v podzemí. Nadzemní a podzemní část areálu bude propojena soustavou šachet a tunelem ve tvaru šroubovice. Na hlavní chodby budou navazovat kolmé ukládací chodby. Ukládací chodby budou přibližně v hloubce 0,5 km pod zemským povrchem. V těchto ukládacích chodbách budou vytvořeny vrty, ve kterých budou uloženy ukládací obalové soubory. UOS bude obklopen bentonitem. Jedná se o jílovitou zeminu, která nepropouští vodu, velmi dobře vede teplo a dokáže vázat radioaktivní látky až na desítky tisíc let. Pokud bentonit zvlhne, nabobtná a utěsní tak prostor kolem UOS. Teoretické složení bentonitu je  $\text{Al}_2\text{C}_3$ ,  $4\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{Fe}$ . HÚ bude postaveno ve stabilním horninovém podloží, kvůli možným nepříznivým geologickým vlivům. V České republice se jedná o krystalické horniny (granit), které zabrání šíření radioaktivních nuklidů. Chemické složení granitu je 85,9 %  $\text{SiO}_2$ , 14 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 0,1 %  $\text{H}_2\text{O}$ . Na obrázku 2.1. je znázorněn koncept hlubinného úložiště jaderného odpadu. [13] [14]



Obr. 2.1: Koncept hlubinného úložiště [15]

V následující tabulce jsou uvedeny parametry pro ukládací obalový soubor pro použité jaderné palivo z reaktoru VVER-440.

Tab. 2.1 Parametry pro ukládání UOS

	<b>VVER-440</b>
počet uložených PS	7
mechanické zatížení (MPa)	20
minimální teplota okolí (°C)	-40
teplota prostředí (°C)	100
maximální vyhoření paliva (MWd/MTU)	58 500
rozměry UOS (cm)	65,0 x 40,25
hmotnost UOS bez paliva (kg)	3 500
hmotnost UOSs palivem (kg)	5 000

## 2.2. Palivo Gd-2M

Palivo do jaderné elektrárny Dukovany dodává společnost TVEL. V roce 2006 začalo být do elektrárny dodáváno palivo typu Gd-2M s pětiletým cyklem. Je to palivo s profilovým obohacením a s vyhořívajícími absorbátory. U profilového obohacení se mění obohacení v souboru radiálně. Vyhořívající absorbátory jsou látky, které mají velmi vysokou pravděpodobnost, že neutron po srážce s jádrem absorbátoru bude pohlcen. To způsobí přeměnu na látku, která má naopak tuto pravděpodobnost malou. Takto se vyrovnává přebytek reaktivity čerstvého paliva, což usnadňuje řízení reaktoru. Díky vyhořívajícím absorbátorům je možné využít víceletý palivový cyklus (V Dukovanech tak mohli přejít ze tříletého palivového cyklu na pětiletý palivový cyklus.). Při nové vsázce je možné vložit menší množství palivových souborů. Tímto se sníží náklady na nové palivo a ušetří se čas při odstávkách na výměnu paliva. Palivové soubory ale mají vyšší hodnotu vyhoření, proto je zapotřebí dělat kontejnery na použité palivo s lepším odstíněním. Vyhořívající absorbátor pro palivo Gd-2M je ve formě  $Gd_2O_3$ . Typ zvoleného absorbátoru má vliv na vyhořívání a na hodnotu nekonečného koeficientu násobení  $k_\infty$ . Hodnota toho koeficientu je závislá i na rozložení proutků s vyhořívajícím absorbátorem v PS. Maxima multiplikačního koeficientu je dosaženo pro vyhoření 8 000 MWd/MTU. Toto palivo má střední obohacení 4,38 %. [7] [8] [18]

## 2.3. Ukládací obalový soubor

Ukládací obalový soubor slouží jako ochrana proti úniku radioaktivních látek do okolí. Je první bariérou v ukládání použitého jaderného paliva v hlubinném úložišti. Druhou bariérou jsou jílové materiály a třetí stabilní horninové prostředí 0,5 km pod zemským povrchem. Na UOS jsou kladeny tři základní požadavky. První požadavek je zajištění jaderné bezpečnosti. Jedná se o zajištění odvodu zbytkového tepla a udržení podkritičnosti během manipulací a s následným uložením. Tento požadavek musí platit jak při normálním provozu, tak i při haváriích (například zaplavení UOS vodou). Druhým požadavkem je zajištění radiační ochrany. To znamená, že obalový soubor musí zamezit úniku radioaktivních látek do okolí. Jedná se tak o zajištění těsnosti UOS po dobu několik tisíců

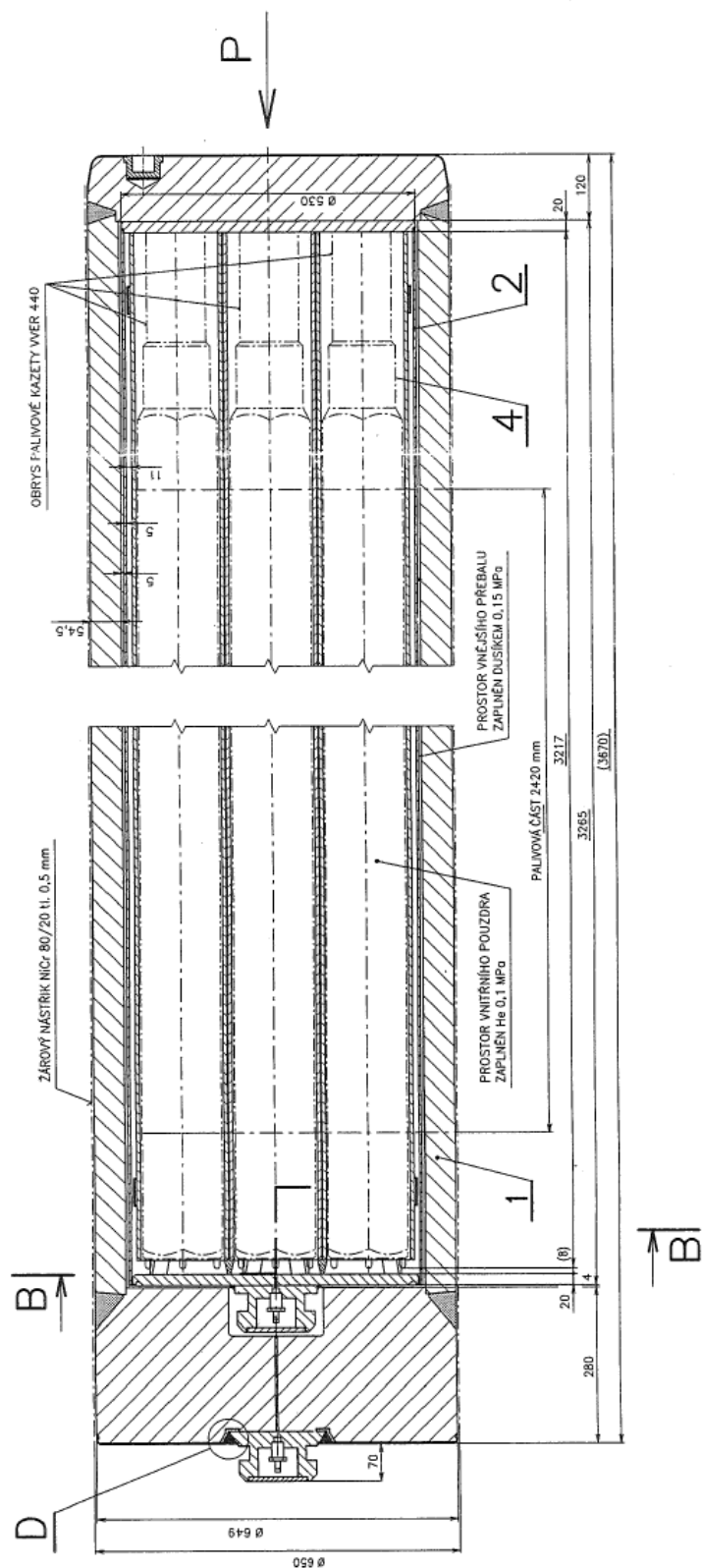
let. Poslední požadavek spočívá v zajištění provozní bezpečnosti. Jde o bezpečnou manipulaci s obalovým souborem během všech fází nakládání s použitým jaderným palivem. [6]

Design UOS je ovlivněn izotopickým složením paliva, které je závislé na typu paliva, dosaženém vyhoření paliva a na době chlazení paliva. Použité palivo se před uložením do obalového souboru skladuje v reaktorové hale minimálně pět let. Dále je skladováno po několik desítek let ve skladu použitého paliva v obalovém souboru. Ukládací obalový soubor by měl mít životnost nejméně 10 000 nebo 100 000 let.

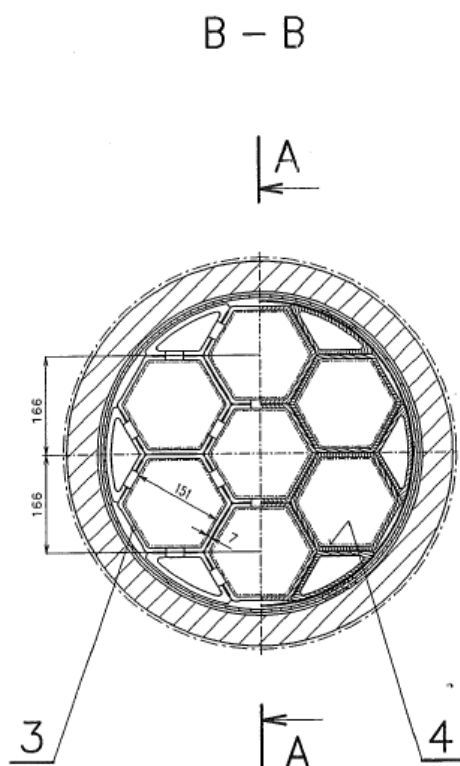
Do ukládacího obalového souboru ŠKODA-440/7 se ukládá 7 palivových souborů typu VVER-440. Tento obalový soubor je složen ze dvou hlavních částí a to z vnitřní obálky a vnější obálky. Vnitřní obálka je tvořena z dvoufázové korozivzdorné oceli dle normy ČSN 17 381 o tloušťce 10,90 mm a hustotě 7,80 g/cm<sup>3</sup>. Vnější obálka je tvořena z uhlíkové oceli dle normy ČSN 12 022 o tloušťce 16,00 mm a hustoty 7,85 g/cm<sup>3</sup>. Vnější průměr UOS je 80,50 cm. Dno je přivařeno k plášti, který je vyroben z plechu o tloušťce 0,5 cm. Ve vnitřní obálce se nachází vestavba z hliníku, do které se ukládají palivové soubory. Ta má za úkol fixovat polohu palivových souborů a zlepšuje přestup tepla. Hexagonální vestavba má vnitřní rozměr 15,10 cm a vnější rozměr 16,5 cm s roztečí 16,6 cm. Před hermetickým přivařením víka k plášti se vnitřní pouzdro naplní heliem o tlaku 0,1 MPa. Helium zajišťuje lepší vedení tepla na začátku, kdy vzniká tepla nejvíce. V prostoru mezi vnější a vnitřní obálkou je dusík o tlaku 0,05 MPa. Jeho hlavní funkcí je zabránit úniku helia z vnitřní obálky. Zde uvedené parametry UOS jsou pro současný design (2017). UOS je však stále ve vývoji a tyto parametry se mohou měnit. Na následujících obrázcích je vidět konstrukce UOS.

Celkové rozměry UOS pro VVER-440 jsou 80,50 x 367,00 cm. Hmotnost bez paliva činí 3 500 kg a hmotnost s palivem je 5 000 kg. Limit vyhoření palivového souboru je 58 500 MWd/MTU. [8] [9]

A - A



Obr. 2.2: Ukládací obalový soubor VVER-440

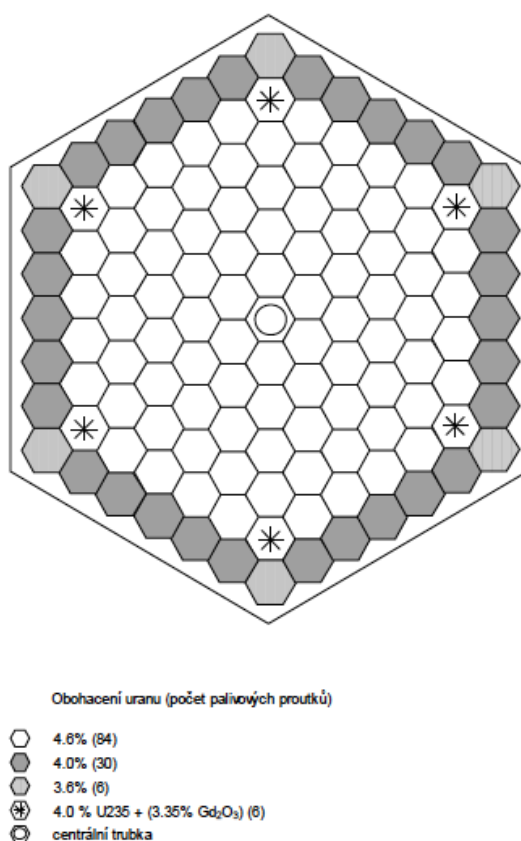


Obr. 2.3: Příčný řez ukládacího obalového souboru VVER-440

## 2.4. Palivový soubor

Ukládací obalový soubor je tvořen sedmi palivovými soubory, které mají hexagonální tvar. V jednom PS je umístěno 126 palivových proutků, které mají různá obohacení. Soubory tvoří čtyři druhy rozdílně obohacených palivových proutků. Jsou zde palivové proutky typu 3 s obohacením 4,6 %, proutky typu 2 rozmístěné po obvodu s obohacením 4 %, proutky typu 1 v rozích mají obohacení 3,6 %. V PS jsou také proutky, které mají funkci vyhořívajících absorbátorů. Je jich šest, jsou typu 4, mají obohacení 4 % a jsou směsicí 4% U-235 a 3,35% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Počet PP typu 1 je 6, typu 2 je 30, typu 3 je 84 a typu 4 je 6. Střední obohacení souborů je 4,38 %. Na následujícím obrázku je vidět příčný řez palivovým souborem. [8] [9]





Obr. 2.4: Příčný řez palivového souboru Gd-2M [8]

## 2.5. Palivový proutek

Palivový proutek je tvořen palivovými tabletkami. Proutky jsou uloženy v trubce, které jsou na obou koncích hermeticky uzavřeny. Tabletka je vysoká 1,00 cm a její průměr je 0,76 cm. Mezi palivovými tabletkami a zirkonovým obalem je mezera, proto vnější průměr proutku činí 0,91 cm. Palivový proutek je tvořen ze slitiny E110. Ta je sloučeninou 98,99 % zirkonu, 1 % niobu a 0,01 % hafnia. Centrální trubka má vnější průměr 1,03 cm a tloušťka její stěny je 0,075 cm. Materiál centrální trubky je slitina E635. To je sloučenina tvořena z 97,49 % zirkonem, 2,5 % niobem a 0,01 % hafniem. [8]

V následující tabulce jsou shrnuty důležité parametry UOS.

Tab. 2.2 Tabulka důležitých parametrů UOS

<b>UOS</b>	
počet palivových souborů	7,00
vnitřní obálka (korozi-vzdorná ocel ČSN 17 381) tloušťka (cm)	0,50
vnější obálka (uhlíková ocel ČSN 12 022) tloušťka (cm)	5,50
vnější poloměr UOS (cm)	32,50
rozteč PS v UOS (cm)	16,60
vnitřní poloměr vnitřní obálky stěny tělesa (cm)	26,75
vnější poloměr vnitřní obálky stěny tělesa (cm)	32,20
vnitřní poloměr vnější obálky stěny tělesa (cm)	32,25
vnější poloměr vnější obálky stěny tělesa (cm)	40,25
<b>PS</b>	
počet palivových proutků v 1 PS	126,00
vnitřní poloměr hexagonální trubky (cm)	7,55
vnější poloměr hexagonální trubky (cm)	8,25
tloušťka obálky (cm)	0,15
střední obohacení PS (%)	4,38
výška PS (cm)	321,70
výška palivového sloupce (cm)	248,00
limit vyhoření (MWd/MTU)	58 500
<b>PP</b>	
vnější poloměr proutku (cm)	0,455
poloměr centrální trubky (cm)	0,515
tloušťka stěny centrální trubky (cm)	0,075
rozteč (cm)	1,23

### 3. Serpent

Serpent je výpočetní tří-dimenzionální kód vyhořívání. Tento kód byl vyvinut ve Finsku v roce 2004. V roce 2009 byla vyvinuta další verze systému - Serpent 2, který je v současné době v testovací fázi. Kód Serpent například umožňuje studie palivového cyklu, které obsahují výpočty vyhoření, modelování výzkumných reaktorů a slouží ke vzdělávacím účelům a demonstraci reaktorové fyziky. [5]

#### 3.1. Palivové proutky

Pro definici palivového proutku je důležité znát materiál a jeho rozměry, které jsou uvedeny výše. Jelikož je program Serpent především fyzikální kód, má zjednodušenou definici paliva. Palivové proutky jsou tvořeny z vnořených kruhových vrstev materiálu. Dále bude popsána definice palivového proutku a budou vysvětleny části kódu.

Pin <id>	číselná identifikace proutku
<mat 1> <r1>	„mat 1” je název materiálu a „r1” je poloměr udávaný v cm
<mat 2> <r2>	„mat 2” je materiál nacházející se z vnější strany „mat 1” a „r2” je poloměr tohoto materiálu
<mat n> <rn>	

Pro definici palivového proutku jsou velmi důležité následující podmínky. Číselná identifikace proutku (pin) je číslo prostoru (vesmíru), který se nesmí shodovat s číslem jiného prostoru (vesmíru). Nejbližší oblast materiálu je uvedena bez poloměru a vyplňuje zbytek prostoru. Pokud je v palivovém proutku prázdný prostor, materiál označíme jako „void”. Tento prostor už dále nedefinujeme, protože se chová jako vakuum. Definice palivového proutku pro VVER-440, která odpovídá popisu proutku v předchozí kapitole:

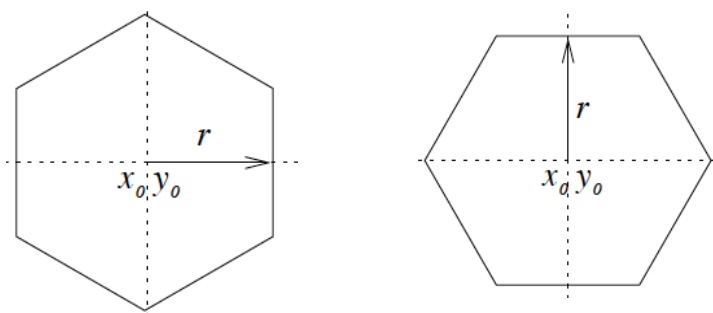
pin 3 void 0.06 palivo1 0.38 void 0.3865 e110 0.455 water. [12]

### 3.2. Mřížka/matice

Nadefinované palivové proutky jsou umístěny v palivovém souboru. Pro správné umístění palivového proutku slouží mříž/matice (lattice). V programu Serpent je sedm typů mřížek: čtvercová mřížka (typ číslo 1), dvě šestihorné mřížky (hexagonální matice ve směru osy X je typ číslo 2 a hexagonální matice ve směru osy Y je typ číslo 3), kruhová mříž (typ číslo 4) a tři nekonečné 3D mřížky. Reaktor VVER-440 používá hexagonální mřížky, jejíž definice a jednotlivé příkazy budou vysvětleny níže.

lat <u0> <type> <x0> <y0> <nx> <ny> <p>

Lat	označení mřížky
<u0>	číselné označení mřížky (1,2, ...)
<type>	typ mřížky (1,2, nebo 3)
<x0>	souřadnice umístění mřížky ve směru osy X
<y0>	souřadnice umístění mřížky ve směru osy Y
<nx>	počet prvků mřížky ve směru osy X
<ny>	počet prvků mřížky ve směru osy Y
<p>	rozteč mezi jednotlivými mřížkami (tzv. pitch) [12]



Obr. 3.1: Mřížka typu 2 a mřížka typu 3 [12]

### 3.3. Rozhraní povrchu (materiál)

Dále je nutné nadefinovat konstrukční rozhraní materiálů. U konstrukčního rozhraní se definuje tvar a poloměr rozhraní. To je pak vyplněno konkrétním materiálem nebo uskupením palivových proutků. V tabulce 3.1 jsou popsány druhy rozhraní a jejich parametry. [12]

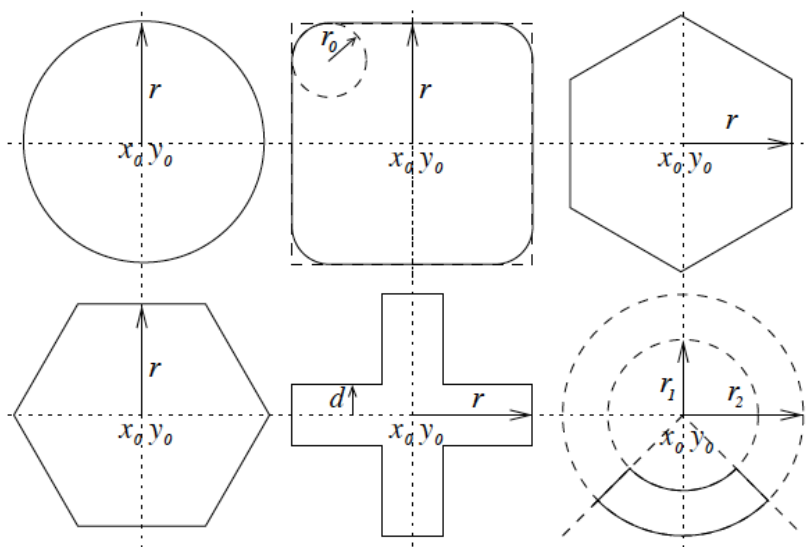
Tab. 3.1 Tabulka druhů rozhraní (povrchů)

Typ	Popis	Parametry
inf	celý prostor	-
px	rovina kolmá k ose X	$x_0$
py	rovina kolmá k ose Y	$y_0$
pz	rovina kolmá k ose Z	$z_0$
sph	koule	$x_0, y_0, z_0, r$
cyl	válec rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r$
sqc	čtvercový válec rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r, r_0$
cube	krychle	$x_0, y_0, z_0, r$
hexxc	šestihranný válec typu x rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r, r_0$
hexyc	šestihranný válec typu y rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r, r_0$
cross	křížový válec rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r, d, r_0$
pad	válcový povrch (použití pro výpočet reaktorové dosimetrie)	$x_0, y_0, r_1, r_0, \theta_1, \theta_2$
code	kužel orientovaný ve směru osy Z	$x_0, y_0, z_0, r, h$
dode	dvanáctihram rovnoběžný s osou Z	$x_0, y_0, r_1, r_2$

(Zdroj: PSG2/Serpent)[12]

Pro tři základní typy rovin souřadnice  $x_0, y_0, z_0$  ukazují vzdálenosti od počátku. Pro kouli, krychli a válcový povrch tyto souřadnice definují střed rozhraní a poloměr je dán souřadnicí  $r$ . Parametr  $r_0$  definuje poloměr zaoblených hran u čtvercového válce,

šestihranného válce a u křížového válce. Když se tento parametr vynechá, rohy budou automaticky ostré. Na následujícím obrázku jsou znázorněny základní typy rozhraní. [12]



Obr. 3.2: Základní typy rozhraní. Z prava válec, čtvercový válec, šestihranný válec typu x, šestihranný válec typu y, křížový válec a válcový povrch.

Zde je uveden příklad definující rozhraní:

surf <id> <type> <param 1> <param 2> ...

<id> číselné označení rozhraní

<type> druh rozhraní

<param 1>, <param 2> parametry jednotlivých rozhraní

surf 1 hexyc 0.0 0.0 5.3 - šestihran s počátečními souřadnicemi  $x = 0$ ,  $y = 0$  a s poloměrem  $r = 5,3$  cm

surf 6 cyl 0.0 0.0 31.0 - válec s počátečními souřadnicemi  $x = 0$ ,  $y = 0$  a s poloměrem  $r = 31$  cm. [12]

### 3.4. Buňky/rozhraní

Dále je třeba nadefinovat buňky (cell). Popis geometrie v programu Serpent je tvořena ze dvou až tří oblastí, které jsou označovány jako buňky. Buňka se definuje pomocí záporných a kladných čísel rozhraní. Záporná čísla udávají výplň směrem dovnitř plochy a kladná čísla uvádějí směr ven z plochy. Pokud jsou hraniční buňky větší než mřížky, neutrony se mohou přenášet do nedefinované pozice a to může způsobit chyby v geometrii. Definice buňky je uvedena v následujícím příkladu. [12]

```
cell <name> <u0> <mat> <surf 1> <surf 2> ...
```

<name>	název buňky
<u0>	číslo prostoru (vesmíru), ve kterém jsou poskládané buňky
<mat>	název materiálu, který vyplňuje buňku
<surf 1>, <surf 2>	rozhraní, ve kterém bude vyplněna buňka

Jestliže chceme, aby buňka zůstala prázdná, zapíšeme příkaz *void* do kolonky názvu materiálu <mat>. Pokud chceme mít buňku vyplněnou maticí, napíšeme příkaz *fill*. Okolí mimo řešený příklad má příkaz *outside*. Používáme ho tam, kde okolí není důležité pro výpočet. [12]

Prostory (vesmíry) aplikujeme tehdy, pokud matici zaplněnou palivovými proutky, vzniká tak palivový soubor, dosazujeme do další matice. V prostoru, kde budou uloženy tyto matice vzniká UOS.

Zde jsou uvedeny jednoduché příklady definování buněk:

```
cell 10 15 fill 8 -1 - buňka, která má označení 10, v prostoru (vesmíru) 15, bude vyplněna maticí 8 do rozhraní 1
```

cell 30 15 e110 2 -3 - buňka, která má označení 30, v prostoru 15, vyplněna materiálem E110, která bude ležet mezi rozhraním 2 a 3.

Každá mřížka definuje vesmír, který musí být vložen do buňky pomocí příkazu *fill*. Každý vesmír je definován nezávisle a musí pokrýt celý prostor. Vesmíry jsou definovány počtem buněk vesmíru a geometrie jsou vrstvy nahrazené materiálem pomocí příkazu *fill*. Každý vesmír má svůj vlastní původ. Díky tomu může být posunut pomocí příkazu *transformation*, ale nejnižší úroveň geometrie spadá do vesmíru 0. [12]

```
cell <name> <u0> fill <u1> <surf 1> <surf 2>
```

### 3.5. Tisk geometrie

Tisk geometrie používá grafickou knihovnu, která musí být zkompileovaná se zdrojovým kódem. Výsledný obrázek je ve formátu PNG. Následně je uveden zdrojový kód pro tisk a jeho vysvětlení.

```
plot <or> <nx> <ny> [<p> <min1> <max1> <min2> <max2>]
```

<or>	orientace plochy (1,2 nebo 3)
<nx>	šířka plochy v pixelech
<ny>	výška plochy v pixelech
<p>	poloha na ose kolmé k rovině plochy
<min1>	minimální hodnota první souřadnice
<max1>	maximální hodnota první souřadnice
<min2>	minimální hodnota druhé souřadnice
<max2>	maximální hodnota druhé souřadnice

Barvy v obrázku představují různé materiály. Barva pro každý materiál je vybrána náhodně. Například chyby geometrie jsou světle zelené nebo červené. Povrchy jsou kresleny černými čarami. [12]



### 3.6. Materiály a jejich složení

Dalším velmi důležitým krokem je nadefinování materiálu UOS. Musíme znát složení všech materiálů, ze kterého je UOS tvořen. Každý materiál se skládá ze seznamu nuklidů. Zde je uveden příklad definice nuklidu. [12]

```
<Z><A>. <id>
<Z>          prvek Z
<A>          hmotnostní číslo izotopu
<id>         identifikační číslo knihovny
```

U-235 se označuje 92235.03c 9.39631E-04. Kde 92 je protonové číslo uranu. 235 je izotopové číslo uranu. Označení 03c je identifikační označení používané pro vyhodnocování dat z knihovny ENDF/B nebo pro teploty (09c je pro teplotu 900 K). Přírodní prvky se označují koncovým dvojčíslem 00. Například přírodní zirkonium má označení 40000.06c. Označení nuklidů slouží pouze pro identifikaci, neobsahuje žádné informace o výpočtu. A číslo 9.39631E-04 je atomová hustota izotopu uranu. Ta se udává v jednotkách 1/(barn\*cm). [12]

Následuje příklad definice materiálu.

```
mat <name> <dens> [<options>]
<iso 1> <frac 1>
<iso 2> <frac 2>
```

mat	označení pro definování materiálu
<name>	název materiálu
<dens>	hustota
<options>	volby v závislosti na případě např. <i>sum</i> udává styl výpočtu izotopového složení

<iso 1> <iso 2> jména nuklidů

<frac 1> <frac 2> odpovídající frakce (hmotnostní nebo atomová)

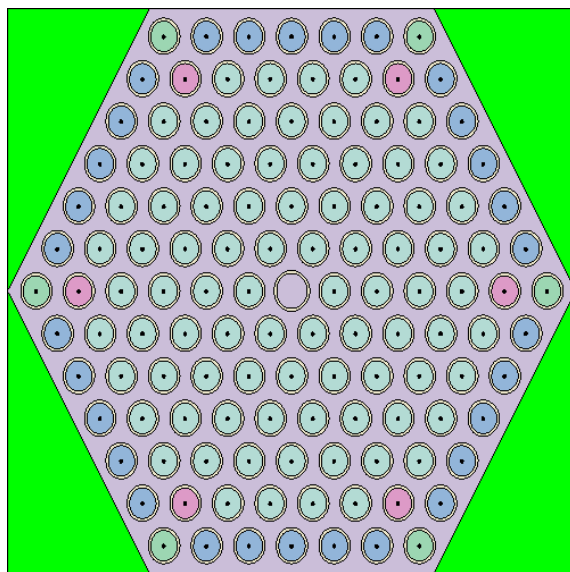
Mat palivo1 sum

92235.03c 9.39631E-04 % atomová hustota U-235

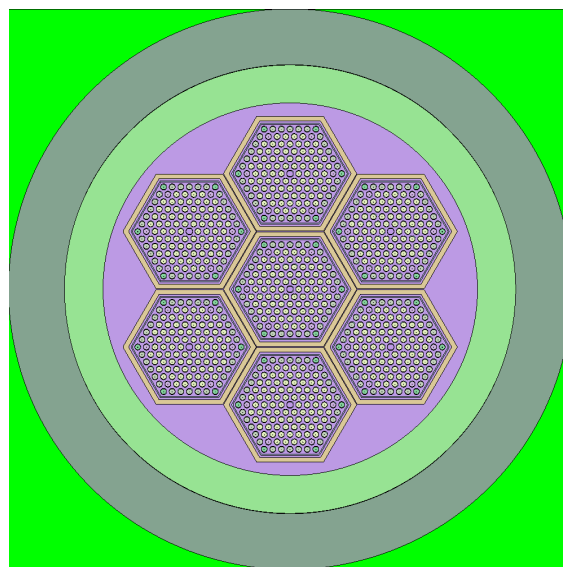
64155.03c 1.688E-07 % atomová hustota Gd-155 [12]

Pro lepší představivost a lepší pochopení programu Serpent se v příloze nachází vstupní program, kde je nadefinován výpočet pro čerstvé palivo.

Na následujících obrázcích je vidět geometrie jednoho palivového souboru a ukládacího obalového souboru bez vnějšího prostředí vygenerované programem Serpent. Další obrázky vygenerované v programu se nachází v příloze.



Obr. 3.3: Geometrie PS



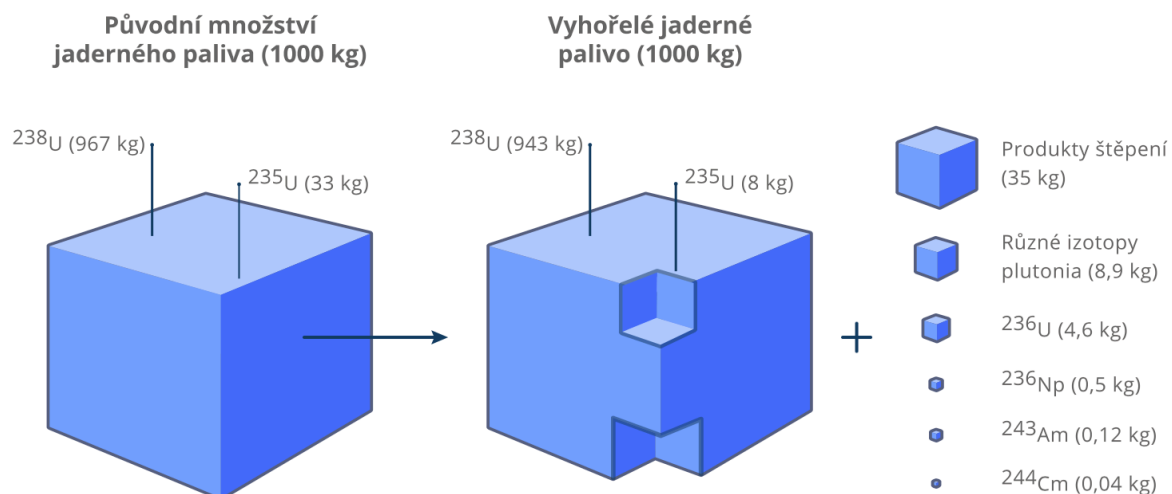
Obr. 3.4: Geometrie UOS

## 4. Analýza podkritičnosti

### 4.1. Použité jaderné palivo

Dle atomového zákona č. 263/2016 Sb. se o použité jaderné palivo musí starat provozovatel jaderného zařízení. V případě jaderných elektráren je to společnost ČEZ, a. s., která hradí všechny náklady související s manipulací a uložením jaderného paliva a zabezpečením úložišť radioaktivního odpadu. Z použitého jaderného paliva se stává odpad v okamžiku, kdy ho jeho majitel za odpad prohlásí. Podle atomového zákona se pak novým majitelem stává SÚRAO. Za bezpečné uložení radioaktivního odpadu ručí stát a z tohoto důvodu zřídil SÚRAO. Jeho činnost a jednání je hrazeno z jaderného účtu, který má na starost Ministerstvo financí ČR. Na tento účet provozovatel jaderného zařízení posílá peníze. Jedná se přibližně o 50 Kč z každé MWh, která byla vyrobena v jaderné elektrárně. [19]

Na první pohled není patrný rozdíl mezi čerstvým a použitým jaderným palivem. Po použití jaderného paliva v reaktoru se však palivo stává vysoce radioaktivním a výrazně se změní jeho složení. V použitém palivu je přibližně 95 % U-238, 1 % nově vzniklého plutonia a 4 % štěpných produktů. Uran a plutonium můžou být dále přepracovány a použity na výrobu dalšího paliva do jaderných reaktorů. To je ale nákladnější, než vytěžit uran nový. U-238 je hojně zastoupen ve vytěžené uranové rudě. V použitém palivu vzniká celá řada prvků a probíhá přirozený radioaktivní rozpad za vzniku radiačního záření a tepla. Z toho důvodu se palivové soubory po vyjmutí z reaktoru stále chladí v bazénu vedle reaktoru po dobu 3 až 5 let. Za tuto dobu klesne radioaktivita PS zhruba o polovinu. Jedním z největších podílů na radioaktivitě mají nuklidy Cs-137 a Sr-90, které mají poločas rozpadu přibližně 30 let. Dále se použité palivo skladuje v kontejnerech 50 až 60 let na území jaderné elektrárny. Po tuto dobu skladování klesne aktivita použitého paliva přibližně dvěstěkrát. Na následujícím obrázku 4.1. je patrný rozdíl ve složení použitého a čerstvého paliva. [16] [14] [19]



Obr. 4.1: Složení čerstvého a použitého paliva [16]

## 4.2. Podkritičnost ukládacího obalového souboru

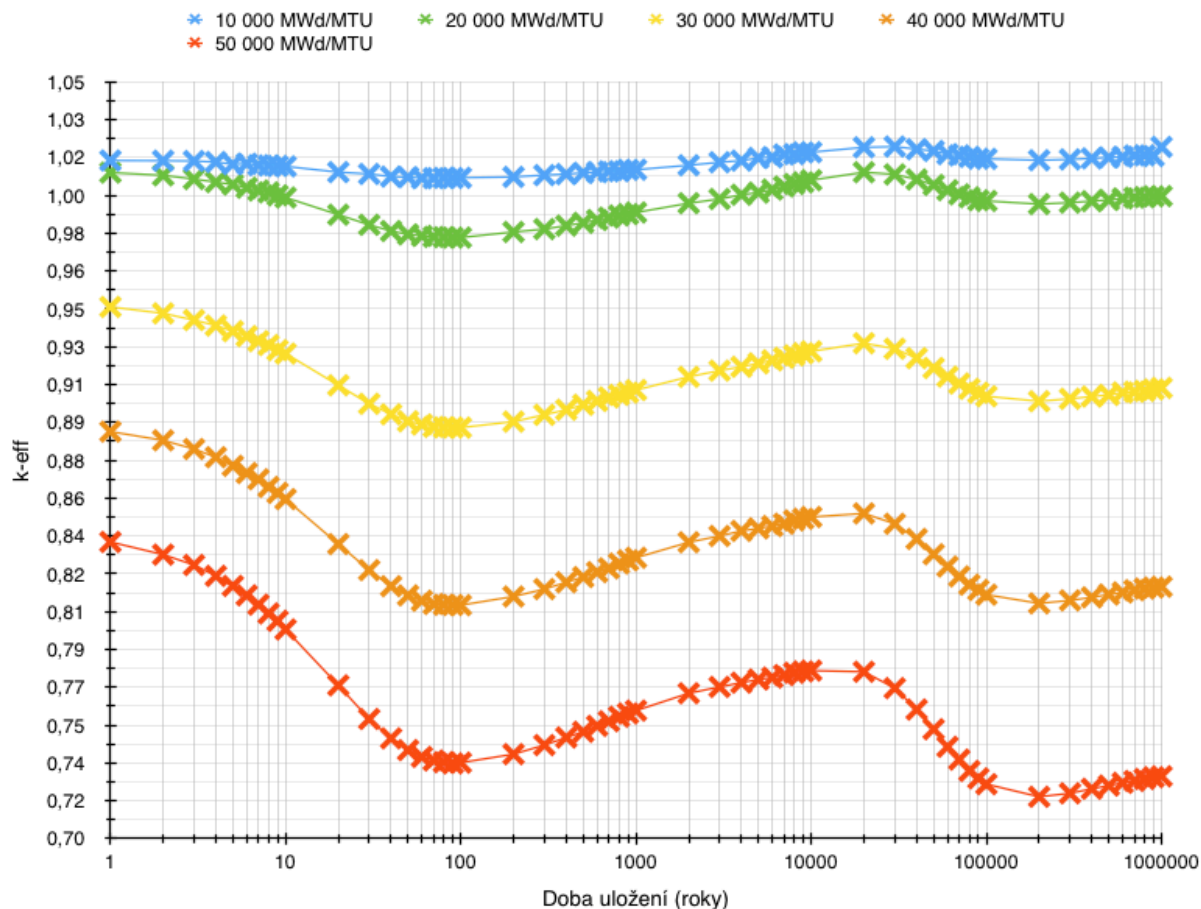
Z bezpečnostních důvodů je důležité, aby koeficient podkritičnosti  $k_{eff}$  byl menší než je hodnota 0,95 a to proto, aby nedocházelo k dalším štěpným reakcím. Tato hodnota je podle limit SÚJB. Při výpočtu  $k_{eff}$  je uvažována nejhorší možná varianta a to zaplavení kontejneru vodou. Voda slouží jako moderátor štěpné reakce, bez které by v UOS byly pouze zrychlené neutrony a  $k_{eff}$  by byl zanedbatelný. Tento koeficient byl počítán v programu Serpent pro vyhoření 10 000, 20 000, 30 000, 40 000 a 50 000 MWd/MTU. Vyhoření 10 000 MWd/MTU představuje palivo po 1. roce vyhořívání, vyhoření 20 000 MWd/MTU zastupuje palivo po 2. roce používání, vyhoření 30 000 MWd/MTU odpovídá palivu po 3 letech používání, vyhoření 40 000 MWd/MTU charakterizuje palivo po 4 letech používání a vyhoření 50 000 MWd/MTU zastupuje palivo po 5 letech v provozu v jaderném reaktoru. Pro každou dobu byla započítána změna složení paliva a bylo počítáno s plným burnup creditem tzn. že bylo počítáno se všemi nuklidy v palivu. Jedná se přibližně o 400 nuklidů, které jsou k dispozici v knihovně ENDF/B-VII.1. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty  $k_{eff}$ .

Tab. 4.2  $k_{eff}$  pro různé hodnoty vyhoření

roky	10 000 MWd/MTU	20 000 MWd/MTU	30 000 MWd/MTU	40 000 MWd/MTU	50 000 MWd/MTU
1	1,01360E+00	1,00801E+00	9,45871E-01	8,88221E-01	8,37177E-01
2	1,01351E+00	1,00674E+00	9,42915E-01	8,84182E-01	8,31333E-01
3	1,01337E+00	1,00503E+00	9,39806E-01	8,80153E-01	8,26532E-01
4	1,01289E+00	1,00362E+00	9,37276E-01	8,76375E-01	8,21487E-01
5	1,01189E+00	1,00249E+00	9,34677E-01	8,72396E-01	8,16841E-01
6	1,01212E+00	1,00101E+00	9,32385E-01	8,69060E-01	8,12490E-01
7	1,01145E+00	9,99730E-01	9,30059E-01	8,66165E-01	8,08198E-01
8	1,01130E+00	9,98862E-01	9,28252E-01	8,62627E-01	8,04115E-01
9	1,01107E+00	9,97510E-01	9,25888E-01	8,59882E-01	8,00721E-01
10	1,01089E+00	9,96481E-01	9,24324E-01	8,56990E-01	7,96713E-01
20	1,00822E+00	9,88545E-01	9,09645E-01	8,36199E-01	7,70865E-01
30	1,00738E+00	9,83859E-01	9,01092E-01	8,24141E-01	7,55288E-01
40	1,00615E+00	9,80989E-01	8,96228E-01	8,16720E-01	7,46349E-01
50	1,00590E+00	9,79421E-01	8,92985E-01	8,12467E-01	7,40898E-01
60	1,00543E+00	9,78734E-01	8,91513E-01	8,09977E-01	7,37751E-01
70	1,00543E+00	9,78259E-01	8,90405E-01	8,08499E-01	7,36111E-01
80	1,00559E+00	9,78122E-01	8,90157E-01	8,08117E-01	7,35318E-01
90	1,00552E+00	9,77949E-01	8,90093E-01	8,08021E-01	7,34758E-01
100	1,00561E+00	9,77972E-01	8,90056E-01	8,07947E-01	7,35099E-01
200	1,00602E+00	9,80553E-01	8,92837E-01	8,11949E-01	7,39028E-01
300	1,00684E+00	9,81885E-01	8,95982E-01	8,15379E-01	7,43230E-01
400	1,00732E+00	9,83486E-01	8,98331E-01	8,18541E-01	7,46753E-01
500	1,00790E+00	9,84773E-01	9,00620E-01	8,20924E-01	7,49367E-01
600	1,00819E+00	9,86077E-01	9,02379E-01	8,23233E-01	7,52113E-01
700	1,00860E+00	9,87189E-01	9,04024E-01	8,24974E-01	7,54264E-01
800	1,00865E+00	9,88175E-01	9,05196E-01	8,27191E-01	7,56357E-01
900	1,00929E+00	9,88806E-01	9,06274E-01	8,28668E-01	7,57864E-01
1 000	1,00935E+00	9,89567E-01	9,07431E-01	8,29880E-01	7,59177E-01
2 000	1,01141E+00	9,93839E-01	9,13553E-01	8,37036E-01	7,67200E-01

<b>3 000</b>	1,01279E+00	9,95799E-01	9,16426E-01	8,39949E-01	7,70122E-01
<b>4 000</b>	1,01355E+00	9,97791E-01	9,18191E-01	8,42277E-01	7,72103E-01
<b>5 000</b>	1,01478E+00	9,98747E-01	9,19785E-01	8,43467E-01	7,73556E-01
<b>6 000</b>	1,01513E+00	1,00017E+00	9,21183E-01	8,44519E-01	7,74439E-01
<b>7 000</b>	1,01639E+00	1,00158E+00	9,22359E-01	8,45624E-01	7,75607E-01
<b>8 000</b>	1,01657E+00	1,00276E+00	9,23474E-01	8,47149E-01	7,76675E-01
<b>9 000</b>	1,01734E+00	1,00349E+00	9,24479E-01	8,47891E-01	7,77293E-01
<b>10 000</b>	1,01745E+00	1,00450E+00	9,25337E-01	8,48715E-01	7,77688E-01
<b>20 000</b>	1,01970E+00	1,00819E+00	9,29107E-01	8,50378E-01	7,77142E-01
<b>30 000</b>	1,02005E+00	1,00719E+00	9,26531E-01	8,45588E-01	7,69572E-01
<b>40 000</b>	1,01884E+00	1,00483E+00	9,22197E-01	8,38562E-01	7,59667E-01
<b>50 000</b>	1,01803E+00	1,00232E+00	9,17632E-01	8,31503E-01	7,50558E-01
<b>60 000</b>	1,01655E+00	9,99872E-01	9,13657E-01	8,25818E-01	7,42439E-01
<b>70 000</b>	1,01596E+00	9,97958E-01	9,10446E-01	8,21242E-01	7,36525E-01
<b>80 000</b>	1,01527E+00	9,96588E-01	9,07990E-01	8,17418E-01	7,31270E-01
<b>90 000</b>	1,01442E+00	9,95206E-01	9,06198E-01	8,14956E-01	7,27852E-01
<b>100 000</b>	1,01436E+00	9,94900E-01	9,04572E-01	8,12792E-01	7,25160E-01
<b>200 000</b>	1,01374E+00	9,93454E-01	9,02264E-01	8,08771E-01	7,19322E-01
<b>300 000</b>	1,01411E+00	9,94110E-01	9,03399E-01	8,10144E-01	7,20932E-01
<b>400 000</b>	1,01458E+00	9,94808E-01	9,04447E-01	8,11548E-01	7,23007E-01
<b>500 000</b>	1,01501E+00	9,95374E-01	9,05185E-01	8,12872E-01	7,24498E-01
<b>600 000</b>	1,01526E+00	9,96045E-01	9,06307E-01	8,13840E-01	7,25770E-01
<b>700 000</b>	1,01594E+00	9,96437E-01	9,06652E-01	8,14851E-01	7,26650E-01
<b>800 000</b>	1,01601E+00	9,96664E-01	9,07049E-01	8,15615E-01	7,27560E-01
<b>900 000</b>	1,01565E+00	9,97035E-01	9,07734E-01	8,16097E-01	7,28377E-01
<b>1 000 000</b>	1,01989E+00	9,97129E-01	9,08411E-01	8,16487E-01	7,28786E-01

V následujícím grafu jsou přehledně znázorněny průběhy  $k_{eff}$  pro různé hodnoty vyhoření.



Graf 4.2: Průběh  $k_{eff}$  pro vyhoření 10 000, 20 000, 30 000, 40 000 a 50 000 MWd/MTU

Z grafu je patrné, že efektivní koeficient násobení  $k_{eff}$  klesá s narůstající hodnotou vyhořívání. Tvar křivek je ovlivněn rozpadem nuklidů a změnou jejich koncentrace v palivovém souboru. Z grafu je dále patrné, že  $k_{eff}$  má maximum pro dobu chlazení 20 000 let. Je to z důvodu poločasu rozpadu aktinidů např. plutonia, který má poločas rozpadu několik desítek tisíc let. Jedná se tedy tak o konzervativní dobu chlazení. Bylo počítáno s relativní chybou  $\pm 0,018 \%$ . Pro další výpočty budou použity hodnoty pro vyhoření 40 000 MWd/MTU s maximální hodnotou  $k_{eff} = 0,850378$ . Protože pro vyhoření 30 000 MWd/MTU je maximální hodnota  $k_{eff} = 0,929107$ . Tato hodnota je těsně pod dovolenou hranicí  $k_{eff} = 0,95$  od SÚJB a její rezerva je příliš malá na to, aby se mohlo počítat s neurčitostí do výpočtu. Pro hodnotu vyhoření 40 000 MWd/MTU bude limit pro vyhoření splněn s rezervou a s jistotou lze říci, že štěpné reakce budou klesat a nebude dále docházet k jejich rozvoji.

### 4.3. Vliv nuklidů na podkritičnost

Pro výpočet vlivu nuklidů na podkritičnost UOS byly vybrány hodnoty nuklidů pro vyhoření 40 000 MWd/MTU a 20 000 let, z důvodů, které byly zmíněny výše. Ze všech nuklidů byly nejdříve vyloučeny všechny nuklidy s nulovou jadernou hustotou  $N_i$ . Po té byli dány do jedné skupiny nuklidy s jadernou hustotou  $N_i > 1E-30$ . Tato skupina nuklidů by měla mít minimální vliv na změnu efektivního koeficientu násobení. Pro další zjednodušení výpočtu byly vybrány nuklidy s nízkými hodnotami účinného průřezu a byly dány do jedné skupiny. Tato skupina nuklidů by taktéž měla mít minimální vliv na změnu  $k_{eff}$ . Hodnoty účinného průřezu byly brány z programu JANIS ze stránek NEA z knihovny ENDF/B-VII. [17] Tabulka hodnot účinných průřezů pro různé nuklidy je v příloze. Všechny výpočty byly provedeny v programu Serpent s chybou  $\pm 0,018 \%$ .

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu nuklidů na podkritičnost.

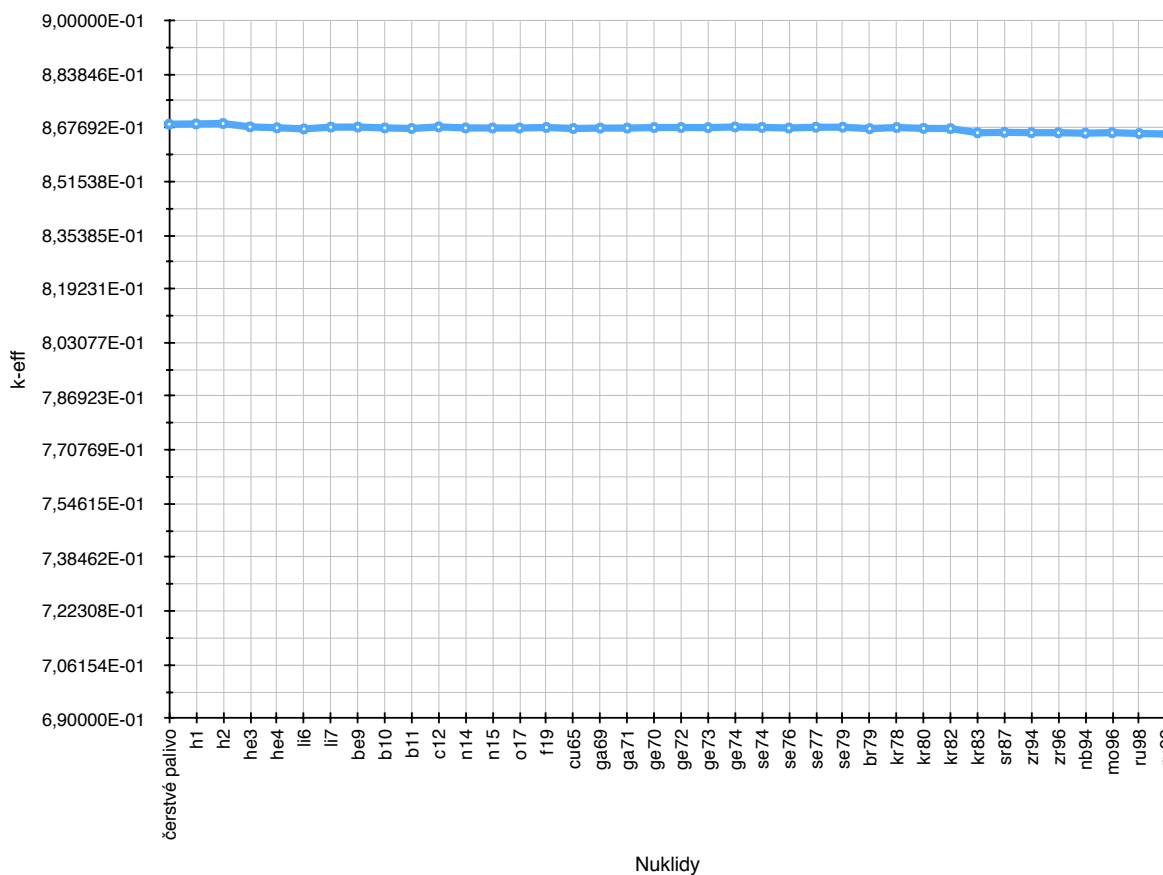
Tab. 4.3 Vliv nuklidů na podkritičnost

Nuklidy	$k_{eff} (-)$	Nuklidy	$k_{eff} (-)$
čerstvé palivo	8,68789E-01	sm154	7,60697E-01
h1	8,68868E-01	eu151	7,53136E-01
h2	8,68984E-01	eu153	7,49465E-01
he3	8,67977E-01	gd152	7,49788E-01
he4	8,67718E-01	gd154	7,49462E-01
li6	8,67369E-01	gd155	7,30928E-01
li7	8,67904E-01	gd157	7,29887E-01
be9	8,6792E-01	gd160	7,29705E-01
b10	8,67669E-01	tb159	7,29752E-01
b11	8,67495E-01	dy156	7,29616E-01
c12	8,67973E-01	dy158	7,29721E-01
n14	8,67661E-01	dy160	7,29848E-01
n15	8,67639E-01	dy161	7,29711E-01
o17	8,67637E-01	dy162	7,29776E-01
f19	8,67802E-01	dy163	7,29486E-01

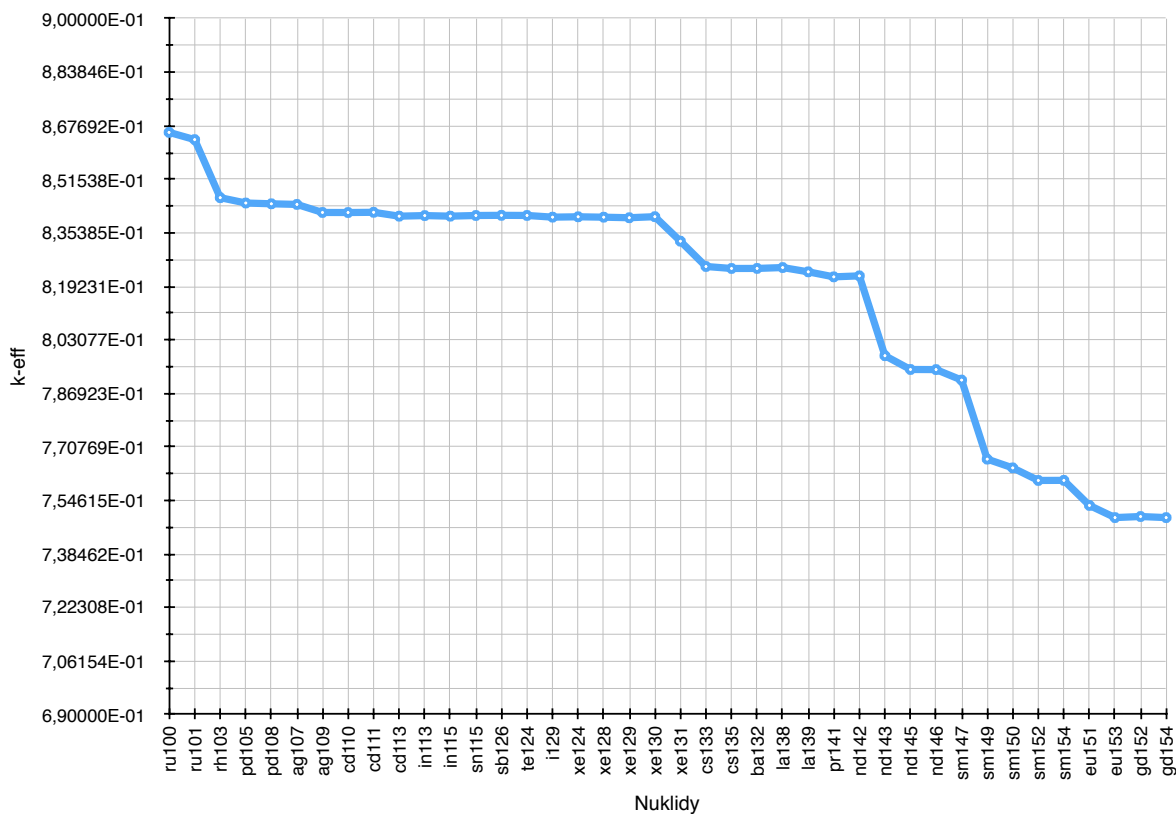


cu65	8,67495E-01	ho165	7,29757E-01
ga69	8,67622E-01	ho166m	7,29767E-01
ga71	8,67623E-01	er162	7,29599E-01
ge70	8,67783E-01	er164	7,29688E-01
ge72	8,6779E-01	er166	7,2953E-01
ge73	8,67753E-01	er167	7,2975E-01
ge74	8,67952E-01	er168	7,29761E-01
se74	8,6782E-01	er170	7,29833E-01
se76	8,67644E-01	pb204	7,29571E-01
se77	8,67868E-01	pb206	7,29527E-01
se79	8,67881E-01	pb207	7,2979E-01
br79	8,67455E-01	pb208	7,30053E-01
kr78	8,67784E-01	ra223	7,29742E-01
kr80	8,67534E-01	ra224	7,29793E-01
kr82	8,67469E-01	ra225	7,29669E-01
kr83	8,66215E-01	ra226	7,2958E-01
sr87	8,66331E-01	ac225	7,2997E-01
zr94	8,66237E-01	ac227	7,29826E-01
zr96	8,66217E-01	th227	7,29656E-01
nb94	8,66091E-01	th228	7,29696E-01
mo96	8,66241E-01	th229	7,29766E-01
ru98	8,65992E-01	th230	7,29591E-01
ru99	8,65821E-01	th232	7,29573E-01
ru100	8,65701E-01	th234	7,29869E-01
ru101	8,63517E-01	pa231	7,29827E-01
rh103	8,45999E-01	pa232	7,29649E-01
pd105	8,44384E-01	pa233	7,29539E-01
pd108	8,4415E-01	u232	7,29351E-01
ag107	8,43962E-01	u233	7,29799E-01

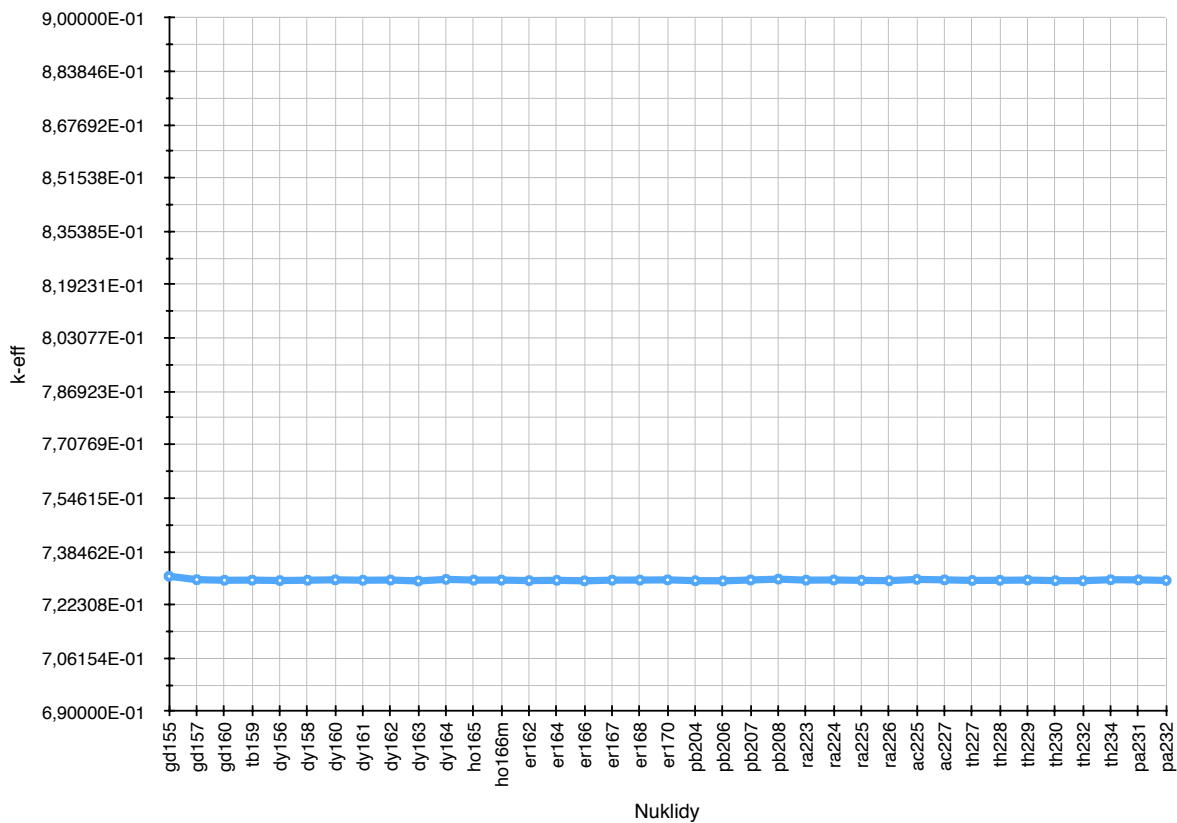
ag109	8,41534E-01	u234	7,27798E-01
cd110	8,41516E-01	u236	7,20599E-01
cd111	8,41581E-01	u237	7,20616E-01
cd113	8,40414E-01	u240	7,20597E-01
in113	8,40593E-01	np236	7,2041E-01
in115	8,40419E-01	np237	7,01068E-01
sn115	8,40619E-01	np239	7,00716E-01
sb126	8,40667E-01	pu236	7,00821E-01
te124	8,40632E-01	pu239	8,28443E-01
i129	8,40119E-01	pu240	8,15822E-01
xe124	8,4023E-01	pu241	8,15301E-01
xe128	8,40107E-01	pu242	8,12335E-01
xe129	8,39943E-01	pu243	8,1223E-01
xe130	8,40262E-01	pu244	8,12838E-01
xe131	8,32867E-01	pu246	8,12203E-01
cs133	8,25233E-01	am241	8,12576E-01
cs135	8,24634E-01	am243	8,12296E-01
ba132	8,24647E-01	cm245	8,12036E-01
la138	8,2491E-01	cm246	8,12551E-01
la139	8,2362E-01	cm247	8,12168E-01
pr141	8,22103E-01	cm248	8,12424E-01
nd142	8,22401E-01	cm250	8,12393E-01
nd143	7,98314E-01	bk247	8,12268E-01
nd145	7,94154E-01	bk250	8,1212E-01
nd146	7,94125E-01	cf250	8,12162E-01
sm147	7,9096E-01	cf251	8,12348E-01
sm149	7,67104E-01	skupina s nízkým jadernou hustotou	8,12354E-01
sm150	7,64465E-01	skupina s nízkým účinným průřezem	8,04421E-01
sm 152	7,60673E-01		



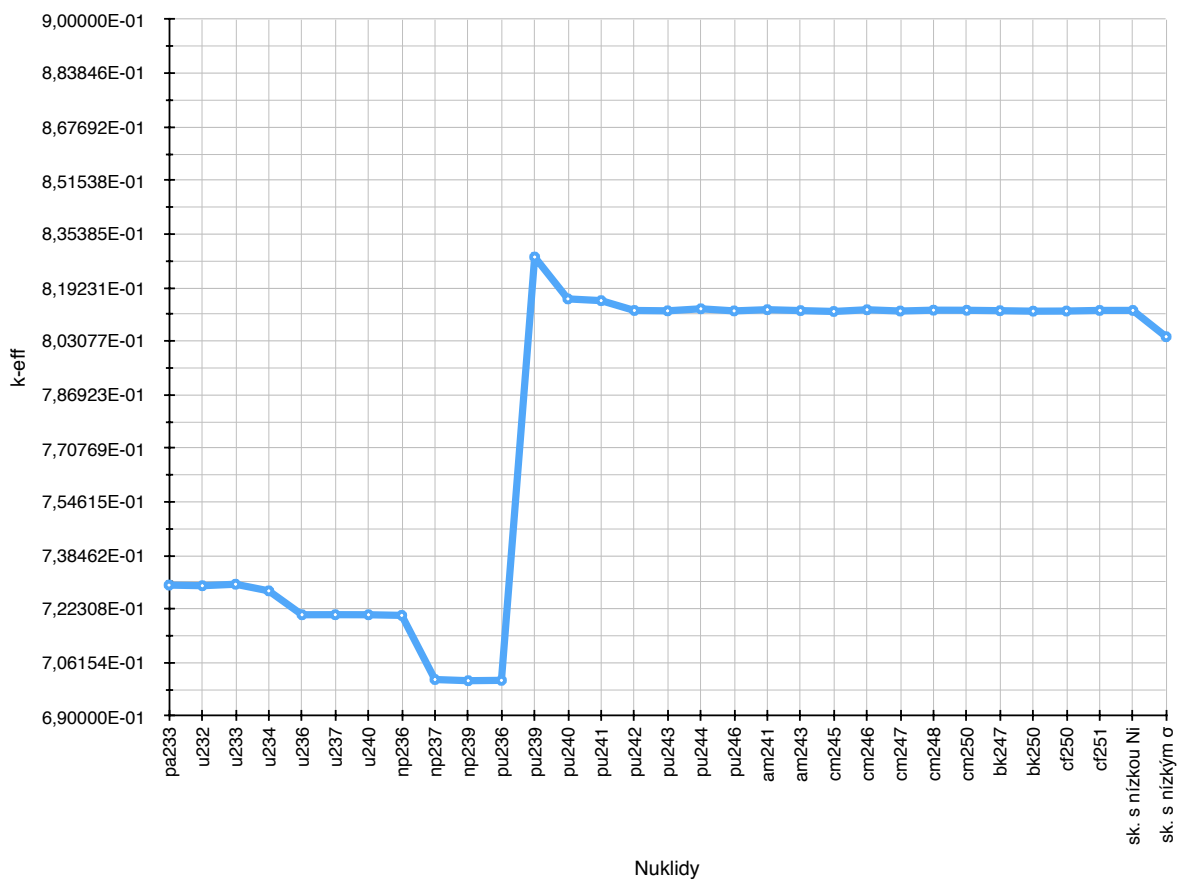
Graf 4.3: Vliv nuklidů na podkritičnost 1. část



Graf 4.4: Vliv nuklidů na podkritičnost 2. část



Graf 4.5: Vliv nuklidů na podkritičnost 3. část



Graf 4.6: Vliv nuklidů na podkritičnost 4. část

V grafech uvedených výše, je znázorněn vliv jednotlivých nuklidů na podkritičnost ukládacího obalového souboru. Hodnoty byly rozděleny do čtyř grafů pro větší přehlednost a čitelnost výsledků. Dále bylo třeba vypočítat pro každý nuklid jeho relativní váhu a váhu normovanou. Bylo třeba rozdělit nuklidy na zápornou relativní váhu a na nuklidy s kladnou relativní váhou. Normovaná váha ukazuje jaký procentuální vliv má jednotlivý nuklid na podkritičnost. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce uvedené níže. Z této tabulky je patrné, které nuklidy mají největší normovanou váhu a jak velkou celkovou část efektivního koeficientu násobení  $k_{eff}$  ovlivňují. Jsou to především nuklidy patřící do skupiny aktinidů a štěpných produktů. Skupina aktinidů a skupina štěpných produktů má poločas rozpadu desítky až tisíce let. Pokud je aktinid rozštěpen dostatečnou silou, rozpadne se na lehčí prvky. Ty mají kratší poločas rozpadu a nepředstavují do budoucna tak velký problém při ukládání použitého jaderného paliva. V jaderných reaktorech se však štěpí uran pouze takovou energií, která stačí ke štěpení dalšího uranu, ale nestačí už ke štěpení těchto těžkých aktinidů. Tyto aktinidy pak zůstávají v použitém jaderném palivu po tisíce let.

Tab. 4.4 Relativní váha jednotlivých nuklidů

Nuklid	Relativní váha (-)	Váha normovaná (-)	Zvýšení $k_{eff}$ (-)	Nuklid	Relativní váha (-)	Váha normovaná (-)	Snížení $k_{eff}$ (-)
pu239	-0,127622	0,929	126	nd143	0,024087	0,119	66
pu244	-0,000608	0,004	131	sm149	0,023856	0,118	70
li7	-0,000535	0,004	6	np237	0,019342	0,096	123
cm246	-0,000515	0,004	136	gd155	0,018534	0,092	78
dy164	-0,000494	0,004	88	rh103	0,017518	0,087	40
c12	-0,000478	0,003	10	pu240	0,012621	0,063	127
u233	-0,000448	0,003	117	skupina s nízkým účinným průřezem	0,007933	0,039	145
ac225	-0,00039	0,003	105	cs133	0,007634	0,038	59
am241	-0,000373	0,003	133	eu151	0,007561	0,037	74
kr78	-0,000329	0,002	27	xe131	0,007395	0,037	58

gd152	-0,000323	0,002	76	u236	0,007199	0,036	119
xe130	-0,000319	0,002	57	nd145	0,00416	0,021	67
nd142	-0,000298	0,002	65	sm152	0,003792	0,019	72
th234	-0,000296	0,002	112	eu153	0,003671	0,018	75
la138	-0,000263	0,002	62	sm147	0,003165	0,016	69
pb207	-0,000263	0,002	99	pu242	0,002966	0,015	129
pb208	-0,000263	0,002	100	sm150	0,002639	0,013	71
cm248	-0,000256	0,002	138	ag109	0,002428	0,012	44
se77	-0,000224	0,002	24	ru101	0,002184	0,011	39
er167	-0,00022	0,002	94	u234	0,002001	0,010	118
sn115	-0,0002	0,001	50	pd105	0,001615	0,008	41
ge74	-0,000199	0,001	21	pr141	0,001517	0,008	64
cf251	-0,000186	0,001	143	la139	0,00129	0,006	63
in113	-0,000179	0,001	48	kr83	0,001254	0,006	30
f19	-0,000165	0,001	14	cd113	0,001167	0,006	47
ge70	-0,00016	0,001	18	gd157	0,001041	0,005	79
mo96	-0,00015	0,001	35	he3	0,001007	0,005	3
ga69	-0,000127	0,001	16	pu246	0,000635	0,003	132
dy160	-0,000127	0,001	84	cs135	0,000599	0,003	60
h2	-0,000116	0,001	2	pu241	0,000521	0,003	128
sr87	-0,000116	0,001	31	i129	0,000513	0,003	53
xe124	-0,000111	0,001	54	br79	0,000426	0,002	26
dy158	-0,000105	0,001	83	cm247	0,000383	0,002	137
pu236	-0,000105	0,001	125	np239	0,000352	0,002	124
er164	-0,000089	0,001	92	li6	0,000349	0,002	5
h1	-0,000079	0,001	1	gd154	0,000326	0,002	77
er170	-0,000072	0,001	96	n14	0,000312	0,002	11
th229	-0,00007	0,001	109	ra223	0,000311	0,002	101
cd111	-0,000065	0,000	46	cu65	0,000307	0,002	15
dy162	-0,000065	0,000	86	dy163	0,00029	0,001	87
ra224	-0,000051	0,000	102	am243	0,00028	0,001	134

sb126	-0,000048	0,000	51	pb204	0,000262	0,001	97
tb159	-0,000047	0,000	81	cm245	0,00026	0,001	135
cf250	-0,000042	0,000	142	he4	0,000259	0,001	4
th228	-0,00004	0,000	108	b10	0,000251	0,001	8
sm154	-0,000024	0,000	73	kr80	0,00025	0,001	28
u237	-0,000017	0,000	120	ru98	0,000249	0,001	36
be9	-0,000016	0,000	7	pd108	0,000234	0,001	42
se79	-0,000013	0,000	25	ho165	0,000223	0,001	89
ba132	-0,000013	0,000	61	ag107	0,000188	0,001	43
er168	-0,000011	0,000	95	u232	0,000188	0,001	116
ho166m	-0,00001	0,000	90	np236	0,000187	0,001	122
ge72	-0,000007	0,000	19	gd160	0,000182	0,001	80
skupina s nízkým obsahem	-0,000006	0,000	144	pa232	0,000178	0,001	114
ga71	-0,000001	0,000	17	se76	0,000176	0,001	23
ru100	0,00012	0,001	38	th230	0,000175	0,001	110
pa233	0,00011	0,001	115	b11	0,000174	0,001	9
pu243	0,000105	0,001	130	in115	0,000174	0,001	49
zr94	0,000094	0,000	32	ru99	0,000171	0,001	37
ra226	0,000089	0,000	104	th227	0,00017	0,001	107
kr82	0,000065	0,000	29	er162	0,000168	0,001	91
pb206	0,000044	0,000	98	xe129	0,000164	0,001	56
pa231	0,000042	0,000	113	er166	0,000158	0,001	93
ge73	0,000037	0,000	20	bk250	0,000148	0,001	141
te124	0,000035	0,000	52	ac227	0,000144	0,001	106
cm250	0,000031	0,000	139	dy161	0,000137	0,001	85
nd146	0,000029	0,000	68	dy156	0,000136	0,001	82
n15	0,000022	0,000	12	se74	0,000132	0,001	22
zr96	0,00002	0,000	33	nb94	0,000126	0,001	34
u240	0,000019	0,000	121	bk247	0,000125	0,001	140
cd110	0,000018	0,000	45	ra225	0,000124	0,001	103

th232	0,000018	0,000	111	xe128	0,000123	0,001	55
o17	0,000002	0,000	13				

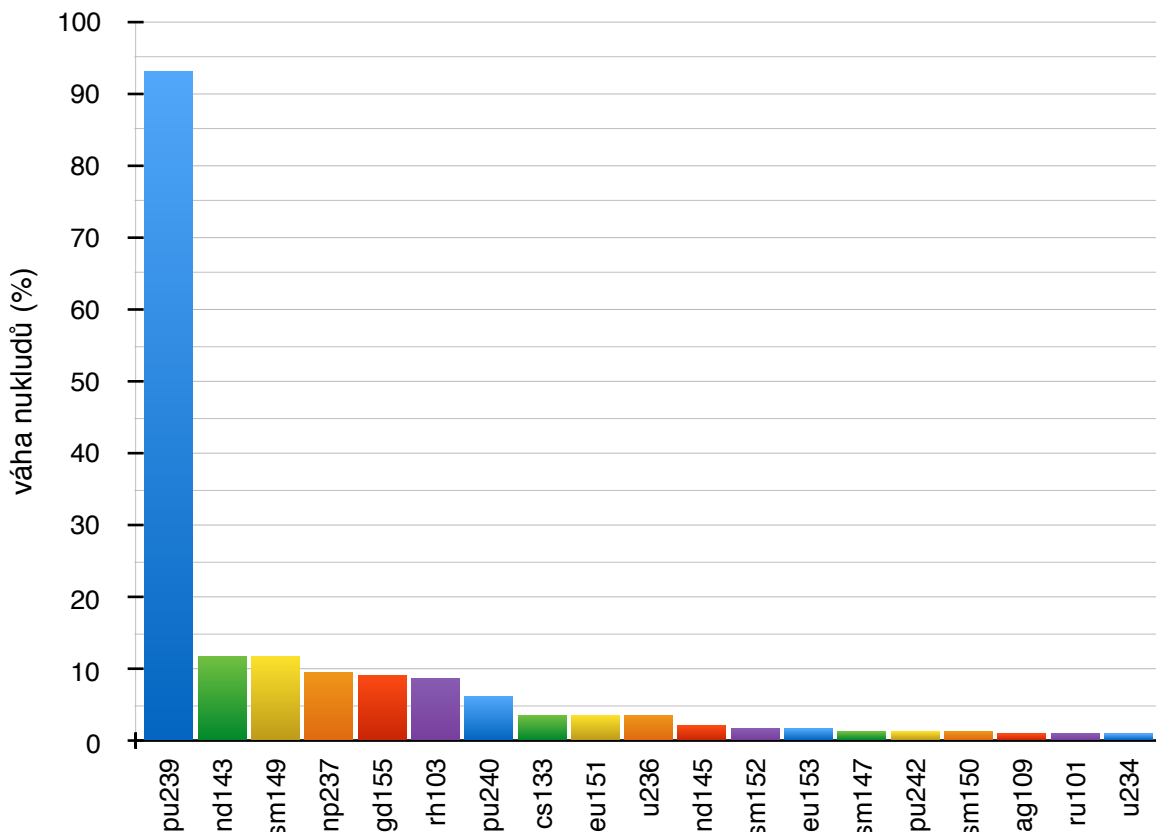
Níže je uvedena tabulka nuklidů nejvíce ovlivňující podkritičnost UOS. Tyto nuklidy budou použity k dalším výpočtům. V této skupině neuvažujeme plyny a nuklidy ve skupině s nízkým účinným průřezem. Z tabulky uvedené výše je parné, že největší vliv na podkritičnost má nuklid Pu-239. Tento nuklid, který výrazně navyšuje hodnotu  $k_{eff}$  má téměř 93 % štěpného vlivu. Naopak na snížení efektivního koeficientu násobení má největší vliv skupina nuklidů, které jsou uvedeny spolu s Pu-239 v tabulce níže. Tyto nuklidy mají hodnotu normované váhy větší než 1 % a dohromady mají přes 80 % absorpčního vlivu. Až na nuklid Cs-133 se všechny nuklidy shodují s americkým výběrem nuklidů nejvíce ovlivňujících (ta to tabulka je uvedena v kapitole 1.2.2. *Specifikace izotopů*) výpočet kritičnosti.

Tab. 4.5 Tabulka nuklidů s největším vlivem na podkritičnost

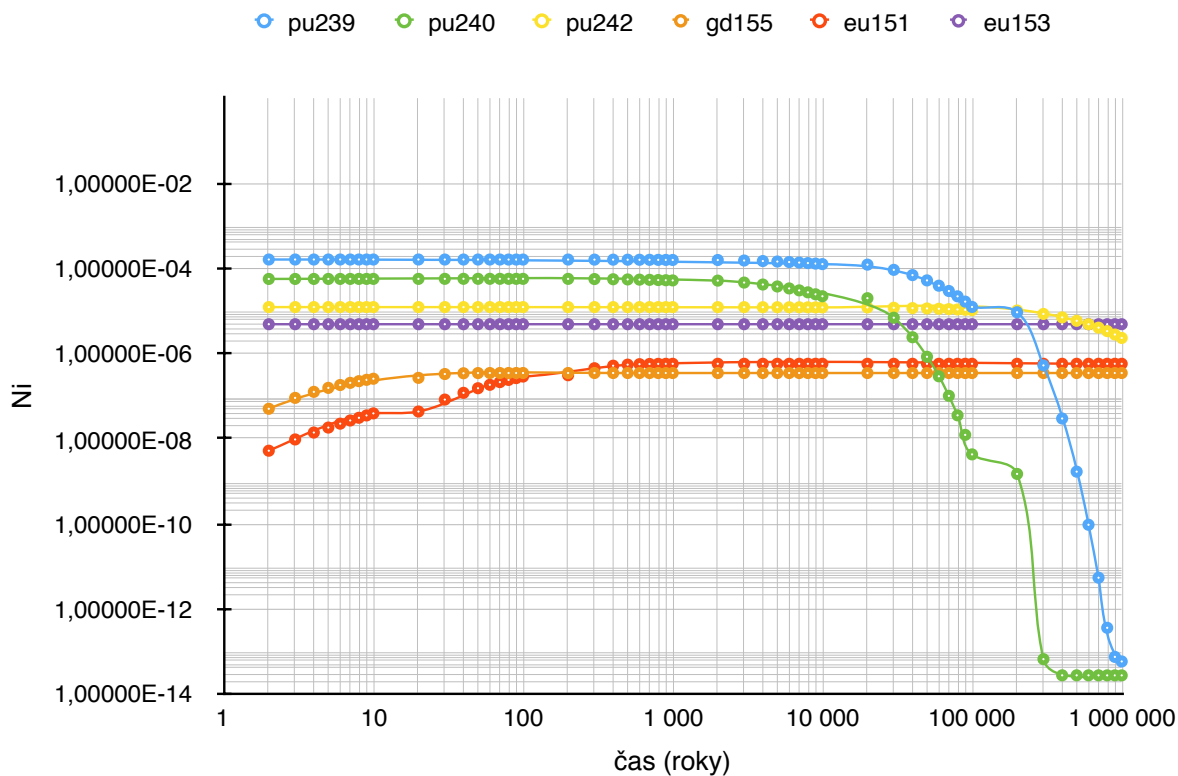
pu239	nd143	sm149	np237
gd155	rh103	pu240	cs133
eu151	u236	nd145	sm152
eu153	sm147	pu242	sm150
ag109	ru101	u234	

Pro názornost a jasný přehled vlivu jednotlivých vybraných nuklidů na podkritičnost UOS je zde uveden *Graf 4.7*. Dále jsou zde uvedeny grafy pro vybrané nuklidy v palivu používané 4 roky. Ty znázorňují závislost atomové hustoty  $N_i$  na vyhoření respektive na čase. Maximum 20 000 let chlazení je kvůli poklesu koncentrace nuklidu Pu-239, který má poločas rozpadu 24 110 let. Pro lepší čitelnost byly tyto grafy rozděleny do tří částí. Tabulky k příčinným grafům jsou uvedeny v příloze.

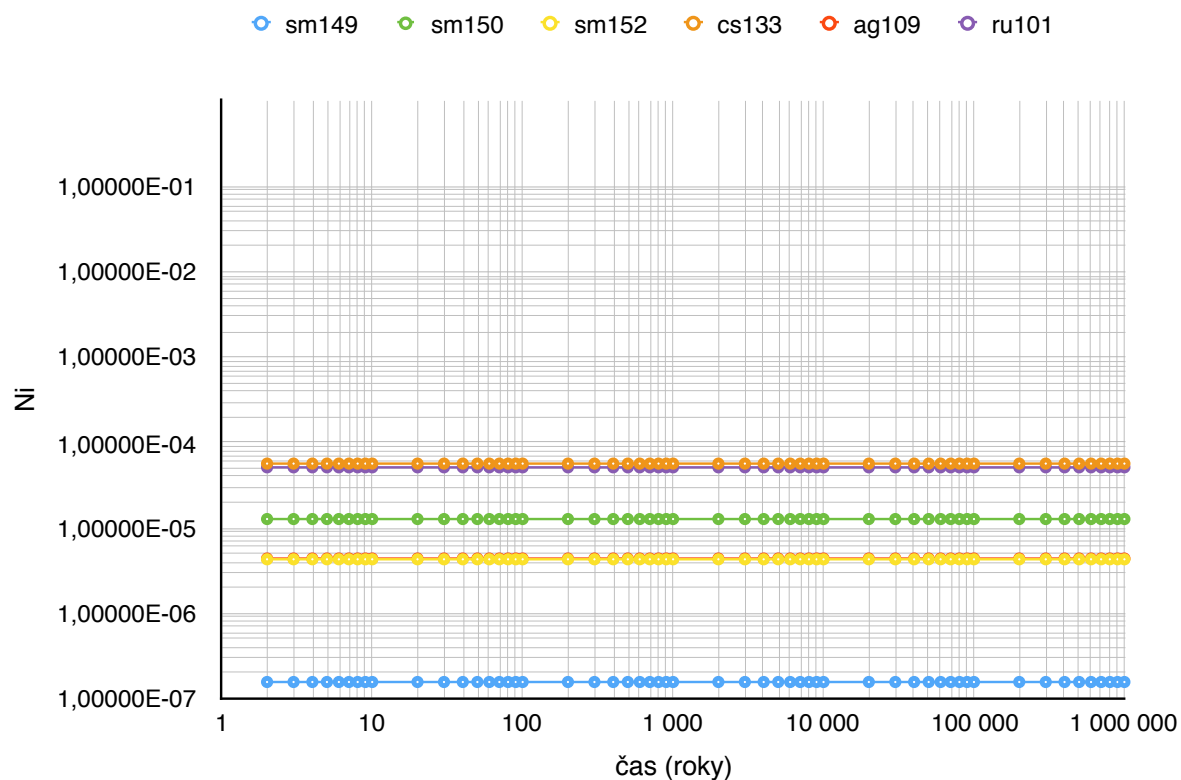




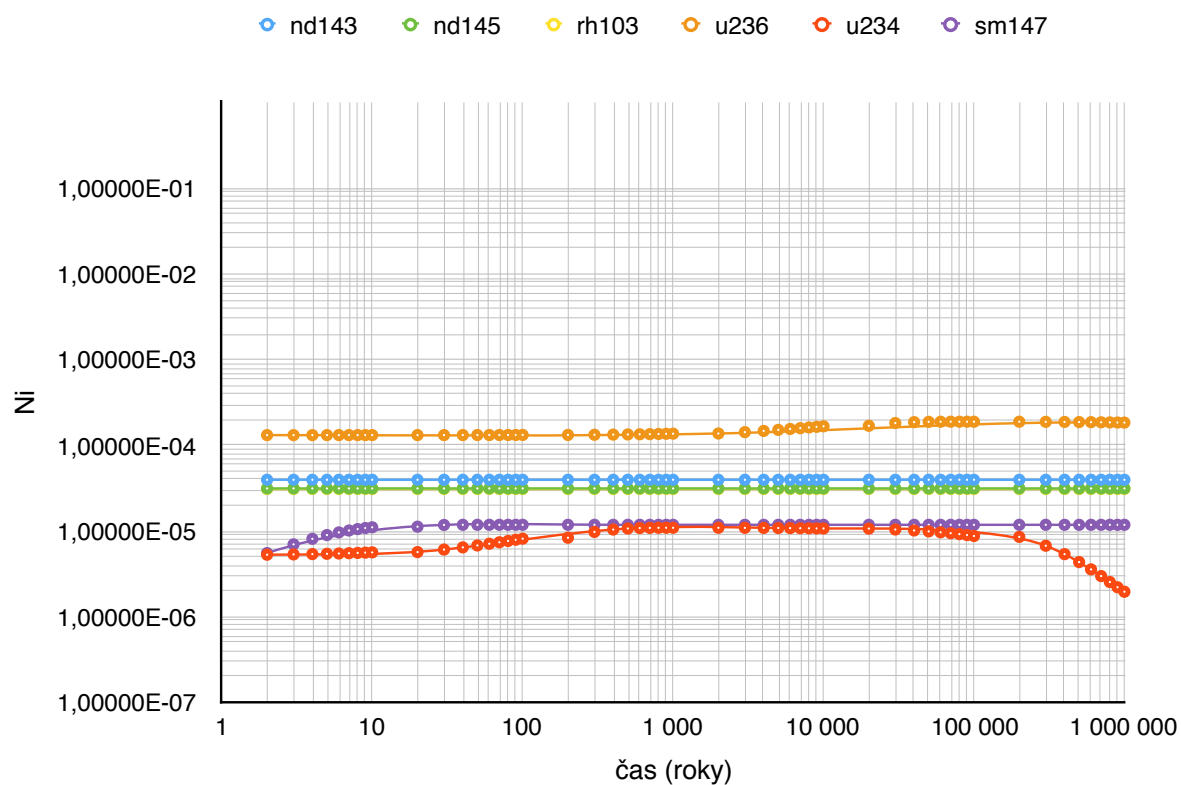
Graf 4.7: Vliv jednotlivých vybraných nuklidů na podkritičnost UOS



Graf 4.8: Závislost  $N_i$  na čase 1. část.



Graf 4.9: Závislost  $N_i$  na čase 2. část

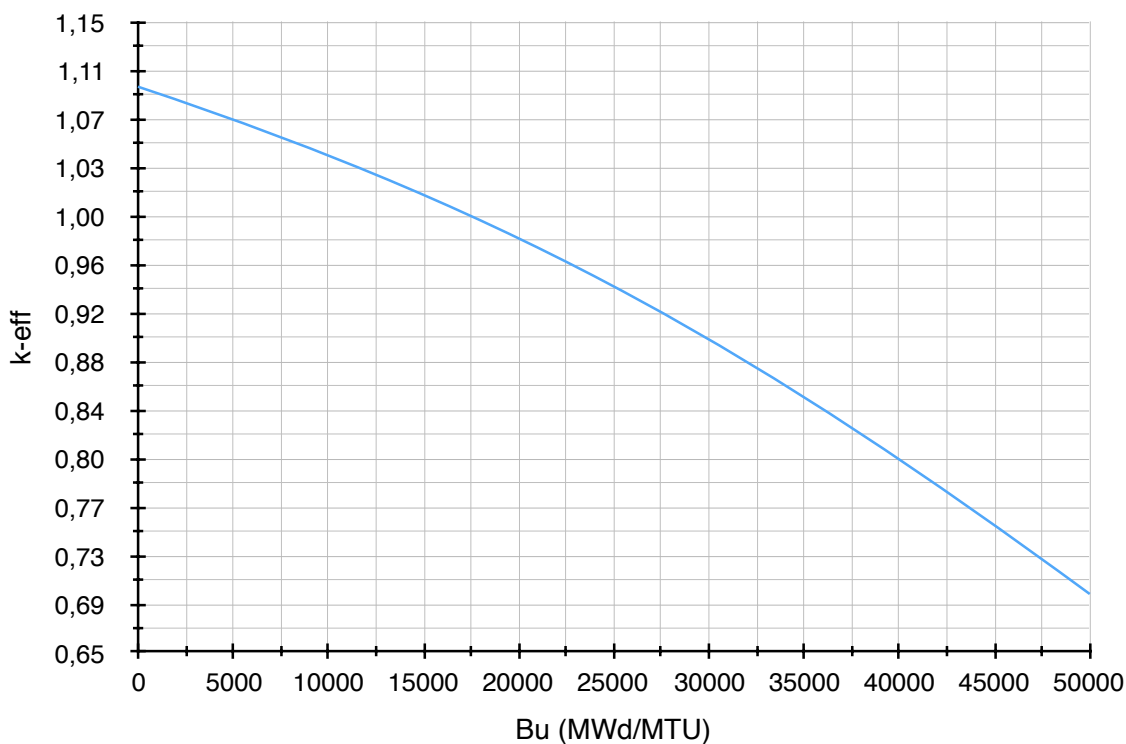


Graf 4.10: Závislost  $N_i$  na čase 3. část

Následně je zde uvedena křivka  $k_{eff}$  pro čerstvé palivo a různé hodnoty vyhořívání. Pro konzervativní variantu je zde zvolen výpočet bez absorbátoru  $Gd_2O_3$ . Absorbátor by zkreslil křivku a nedal by se odečíst efektivní koeficient násobení pro čerstvé palivo v počátečních hodnotách vyhořívání. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty efektivního koeficientu násobení pro čerstvé palivo. Tyto hodnoty jsou znázorněny v *Grafu 4.7*. Nulová hodnota vyhořívání je pro čerstvé a neozářené palivo. Následující hodnoty jsou již pro ozářené palivo a různé hodnoty vyhořívání, tedy pro různou dobu používání jaderného paliva.

Tab. 4.6 Vliv vyhořívání na čerstvé paliv

Bu (MWd/MTU)	$k_{eff}$ (-)
0	1,09917E+00
10 000	1,04886E+00
20 000	9,83423E-01
30 000	9,0341E-01
40 000	8,0715E-01
50 000	6,96381E-01



Graf 4.11: Vliv vyhořívání na reaktivitu paliv

#### 4.4. Neurčitost výpočtu podkritičnosti UOS

Pro výpočet neurčitosti byly zvoleny nuklidy uvedené v *Tabulce 4.6*. Pro výpočet neurčitosti byla atomová hustota pro vyhoření 40 000 MWd/MTU a 20 000 let vynásobena koeficientem neurčitosti  $CF$ . Nejdříve byl spočítán efektivní koeficient násobení pro zvolenou skupinu nuklidů bez koeficientu neurčitosti  $CF$ . Poté byl spočítán  $k_{eff}$  s koeficientem neurčitosti. Tabulka nuklidů s jejich koeficientem neurčitosti a atomovou hustotou  $N_i$  je uvedena níže. Koeficientu neurčitosti  $CF$  byl vypočten sadou kódu SCALE z databáze SFCOMPO pro palivo VVER ve ŠKODA JS.

Tab. 4.7 Vliv vyhořívání na čerstvé paliv

Nuklid	CF	$N_i$	$N_i*CF$
o16	1,000	4,64900E-02	4,64900E-02
ru101	0,939	5,11300E-05	4,80111E-05
rh103	0,311	3,08200E-05	9,58502E-06
ag109	0,311	4,37000E-06	1,35907E-06
cs133	0,938	5,65500E-05	5,30439E-05
nd143	0,912	3,95200E-05	3,60422E-05
nd145	0,962	3,13100E-05	3,01202E-05
sm147	0,769	1,17800E-05	9,05882E-06
sm149	0,654	1,56600E-07	1,02416E-07
sm150	0,814	1,26800E-05	1,03215E-05
sm152	0,757	4,28400E-06	3,24299E-06
eu151	0,000	5,72600E-07	0,00000E+00
eu153	0,000	4,87100E-06	0,00000E+00
gd155	0,086	3,47200E-07	2,98592E-08
u234	0,801	1,03800E-05	8,31438E-06
u235	1,048	3,78000E-04	3,96144E-04
u236	0,945	1,81500E-04	1,71518E-04
u238	1,000	2,15400E-02	2,15400E-02
np237	0,627	5,21200E-05	3,26792E-05
pu239	1,089	9,23100E-05	1,00526E-04

pu240	0,906	6,92400E-06	6,27314E-06
pu242	0,787	1,18600E-05	9,33382E-06

Po výpočtech v programu Serpent vyšel  $k_{eff} = 0,827245$  a  $k_{eff*CF} = 0,893821$ . Výsledná neurčitost výpočtu je tedy 0,066576. Z výsledků je patrné, že je hranice, která je dána SÚJB, kde  $k_{eff}$  musí být menší než 0,95 je splněna s rezervou i s uvažováním neurčitosti při výpočtu.

## Závěr

Cílem této diplomové práce byl výpočet kritičnosti ukládacího obalového souboru pomocí metodiky burnup credit ve výpočetním programu Serpent. První část práce je věnována základní teorii, kde je popsána štěpná reakce, koeficient násobení a účinný průřez. V této části práce je také popsána metodika burnup credit, která se používá pro výpočet kritičnosti v ukládacím obalovém souboru. Důležitou součástí této metodiky je vytvoření zavážecí křivky, která porovnává hodnoty  $k_{eff}$  pro různá vyhoření a obohacení s ohledem na mechanické vlastnosti, počátečním obohacením a výpočetními nejistotami. Díky tomu má metodika burnup credit realistickou předpověď na dlouhé časové úseky.

V druhé části práce bylo nejdříve popsáno hlubinné úložiště, kde byla popsána nadzemní a podzemní část, geologický materiál a je zde i jeho grafický návrh. Dále je v druhé části popsáno palivo Gd-2M, jeho složení a absorbátory. Absorbátory usnadňují řízení reaktoru, umožňují provozovat víceletý palivový cyklus a umožňují použití menšího množství nového paliva při vsázce do reaktoru, čímž zkracují dobu odstavení při výměně paliva. Poté je zde popsán ukládací obalový soubor pro palivo z reaktoru VVER-440, který obsahuje 7 palivových souborů a ty se skládají z palivových proutků. Všechny tyto části jsou zde popsány geometricky i konstrukčně.

Třetí část diplomové práce je zaměřena na popis programu Serpent. V tomto programu probíhali veškeré výpočty. Je zde podrobný popis všech důležitých částí programu, které byly potřeba k sestavení reálného a funkčního modelu ukládacího obalového souboru.

Čtvrtá kapitola je zaměřená na výpočet kritičnosti. Nejdříve je zde popsáno použité palivo a jeho změny během vyhořívání. Použité palivo se velmi liší ve složení od paliva čerstvého. V použitém palivu vzniká celá řada prvků, zejména pak skupina aktinidů má velký vliv na průběh efektivního koeficientu násobení během několika desítek tisíc let. Nejdříve byla spočítána podkritičnost ukládacího obalového souboru s plným burnup creditem, tedy se všemi nuklidy obsaženými v palivu. Z těchto vypočítaných výsledků připadaly v úvahu pro další výpočet dvě možnosti. A to křivka pro hodnotu vyhoření

40 000 MWd/MTU. Tato křivka dosahovala maximum efektivního koeficientu násobení  $k_{\text{eff}} = 0,85$  v období 20 000 let. A křivka pro hodnotu vyhoření 30 000 MWd/MTU měla maximum též pro 20 000 let, ale hodnota efektivního koeficientu násobení byla  $k_{\text{eff}} = 0,92$ . Z bezpečnostních důvodů Státní úřad pro jadernou bezpečnost stanovil limit  $k_{\text{eff}} = 0,95$ . Protože hodnota pro vyhoření 30 000 MWd/MTU byla těsně pod limitem, bylo zvoleno pro další výpočty vyhoření 40 000 MWd/MTU. Další částí diplomové práce je určení vlivu jednotlivých nuklidů na podkritičnost ukládacího obalového souboru. Nejdříve byl spočítán vliv jednotlivých nuklidů a dále byla spočítána jejich normovaná váha. Dle normované váhy byla vybrána skupina nuklidů, které byly použity pro výpočet neurčitosti výpočtu podkritičnosti ukládacího obalového souboru. Jedná se především o skupinu aktinidů a skupinu štěpných produktů. Neurčitost výpočtu vyšla 0,066576. Hodnota efektivního koeficientu násobení s neurčitostí je  $k_{\text{eff}} \cdot \text{CF} = 0,89$ . Z toho vyplývá, že je splněn bezpečnostní limit, který je dán Státním úřadem pro jadernou bezpečnost s rezervou i při uvažování neurčitostech výpočtu podkritičnosti ukládacího obalového souboru.

S uvážením rezervy pro palivo s vyhořením 40 000 MWd/MTU by bylo možné palivo zavést do hlubinného úložiště bez omezení. Vyhoření 40 000 MWd/MTU dosahuje palivo po 4 letech provozu. Vzhledem k tomu, že v reaktoru se provozuje palivo s pětiletým cyklem je možné uložit všechno použité jaderné palivo z reaktoru. Z výpočtů metodiky burnup credit je patrné, že efektivní koeficient násobení není vysoký. Není tedy třeba provádět žádná opatření, jako například pro jeho snížení použít absorbátor ve formě bórových trubek, které jsou velmi drahé.

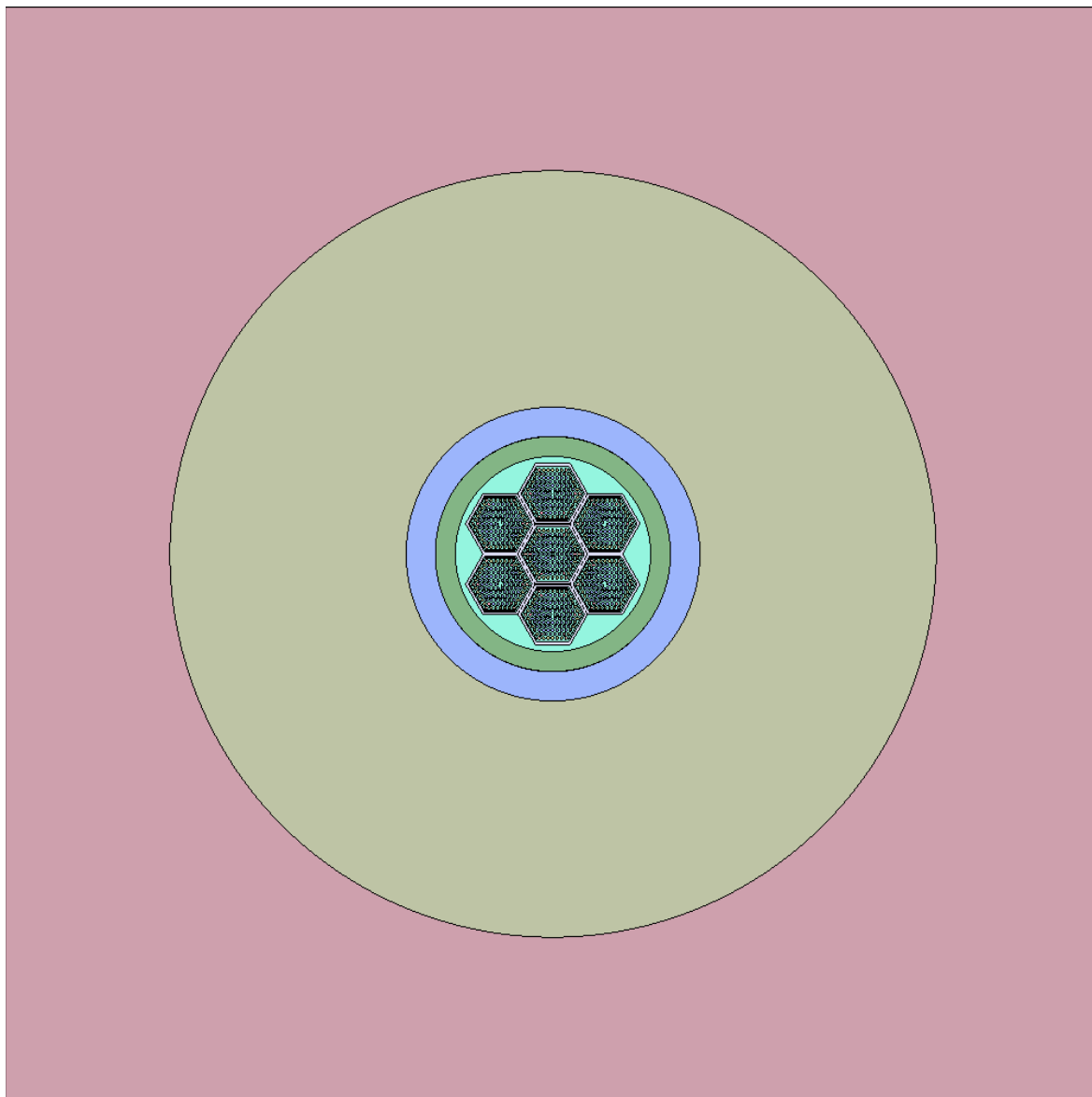
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Astronuklfyzika [online] [cit. 11.11.2016] dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- [2] Energetika [online] [cit. 11.11.2016] dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/JE%20-%20prednaska-02%20Zacha%20\(ZS%202015\).pdf](http://energetika.cvut.cz/files/JE%20-%20prednaska-02%20Zacha%20(ZS%202015).pdf)
- [3] You G., Zhang Ch., Pan X., Introduction of Burnup Credit in Nuclear Criticality Safety Analysis
- [4] Transformační technologie [online] [cit. 5.12.2016] dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energie-a-ionizujici-zareni.html>
- [5] Serpent [online] [cit. 4.2.2017] dostupné z: <http://montecarlo.vtt.fi>
- [6] UOS [online] [cit. 4.2.2017] dostupné z: <http://www.energeticketrebitsko.cz/radioaktivni-odpady/projekt-bezpecneho-ulozeni-vyhoreleho-jaderneho-paliva-v-hlubinnem-ulozisti/>
- [7] Jaderné palivo [online] [cit. 19.2.2017] dostupné z: <http://www.obkjedu.cz/zaujalo-nas/vyvoj-jaderneho-paliva-pro-dukovany/>
- [8] Kotnour, P., Müller J. *VAV UOS PRO HU - PRŮBĚŽNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA 1. ETAPA*. Zpráva ŠKODA JS Ae15534/Dok Rev. 00
- [9] Měkuta, Marek. Degradace absorpčního materiálu vestvaby ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva, diplomová práce [online] [cit. 19.2.2017] Diplomová práce. ZČU
- [10] Doering T.W., Thomas D.A. Disposal criticality analysis methodology's principal isotope burnup credit
- [11] Mikroskopický účinný průřez [online] [cit. 26.2.2017] dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/news/mikroskopicky-ucinny-prurez/>
- [12] Leppänen J. PSG2/Serpent - a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code
- [13] Radioaktivní odpad [online] [cit. 20.4.2017] dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/uloziste-jaderneho-odpadu-obecny-popis-situace-v-cr/>
- [14] Hlubinné úložiště [online] [cit. 21.4.2017] dostupné z: <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/brozury/brozura-hlubinne-uloziste-2016.pdf>
- [15] Hlubinné úložiště [online] [cit. 21.4.2017] dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/04/v-sedmi-oblastech-cr-probehne-zitra-druhy-den-proti-ulozisti/>
- [16] Použité a čerstvé palivo [online] [cit. 21.4.2017] dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/pouzite-jaderne-palivo>
- [17] JANIS [online] [cit. 27.4.2017] dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/janisweb/search/endl?lib=ENDF%2FB-VII.1&mf=3&mt=1&pg=1>
- [18] Melka, Jiří. Porovnání výpočetních kódů pro vyhořívající absorbátory, diplomová práce [online] [cit. 28.4.2017] Diplomová práce ZČU
- [19] použité palivo [online] [cit. 4.5.2017] dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/sprava-vyhoreleho-jaderneho-paliva-a-monitoring-je.html>

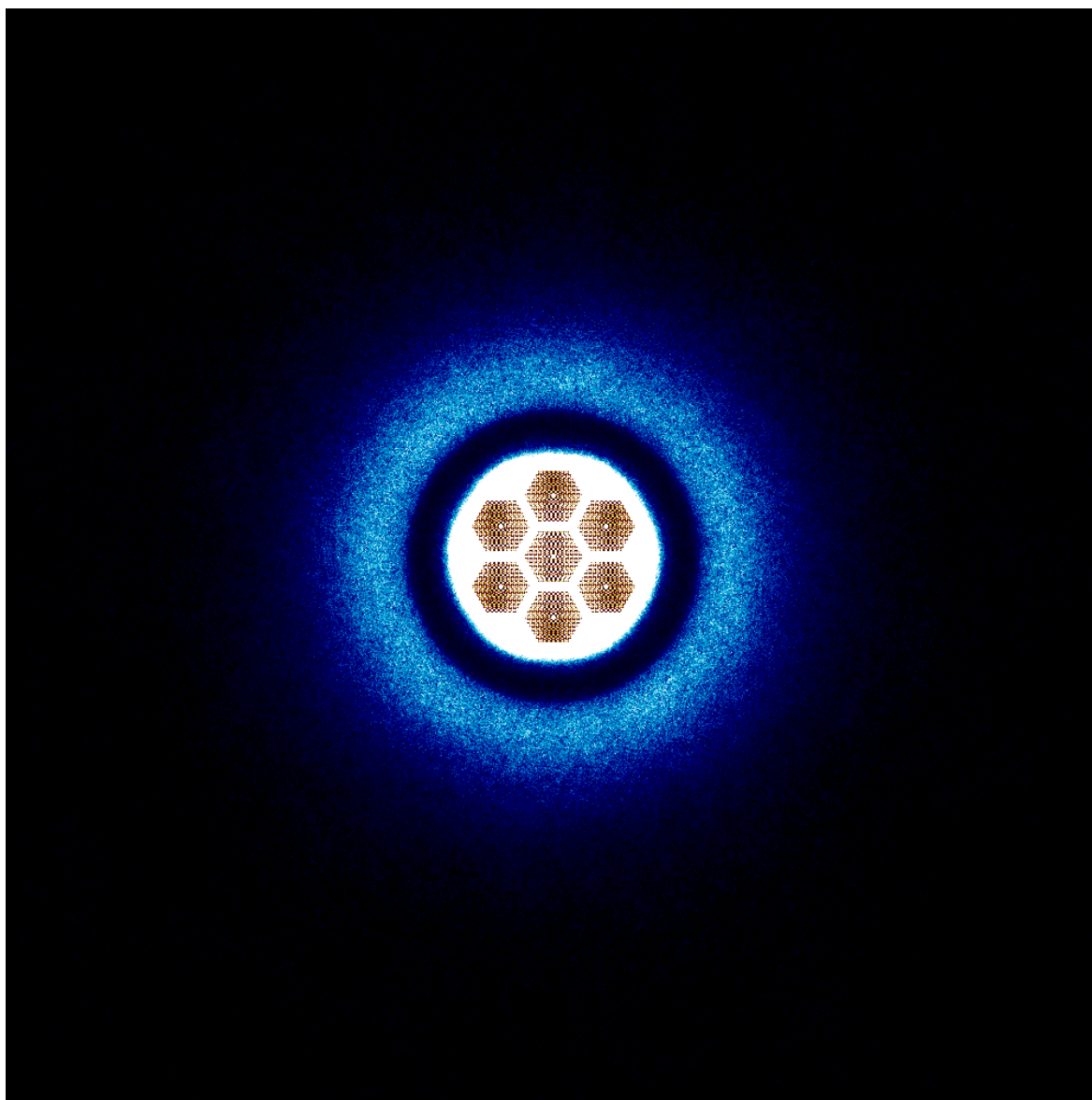


## Přílohy

### A. Geometrie UOS v programu Serpent s okolním prostředím



## B. Hustota toku tepelných neutronů v UOS



C. Vstupní soubor pro program Serpent pro výpočet čerstvého paliva.

% --- VVER-440 Assembly -----

set title "VVER-440"

% --- centrální trubka:

pin 1 water 0.44000 clad 0.51500 water

% ----- palivové proutky

pin 2 void 0.06 palivo4 0.38 void 0.3865 clad 0.455 water

pin 3 void 0.06 palivo3 0.38 void 0.3865 clad 0.455 water

pin 4 void 0.06 palivo1 0.38 void 0.3865 clad 0.455 water

pin 5 void 0.06 palivo2 0.38 void 0.3865 clad 0.455 water

% --- okolní prostor:

pin 6 water

% --- palivový soubor - rozložení proutků:

lat 110 2 0.0 0.0 15 15 1.23

```

6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 3 5 5 5 5 5 3 6
6 6 6 6 6 6 5 4 2 2 2 2 4 5 6
6 6 6 6 6 5 2 2 2 2 2 2 2 5 6
6 6 6 6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6
6 6 6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6
6 6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6
6 3 4 2 2 2 2 1 2 2 2 2 4 3 6
6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6 6
6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6 6 6
6 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 6 6 6 6
6 5 4 2 2 2 2 4 5 6 6 6 6 6 6
6 3 5 5 5 5 5 3 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
    
```

% ----- UOS

lat 200 3 0.0 0.0 5 5 16.6

21 21 21 21 21  
21 21 20 20 21  
21 20 20 20 21  
21 20 20 21 21  
21 21 21 21 21

% --- Surfaces and cell:

surf 1 hexyc 0.0 0.0 7.100

surf 2 hexyc 0.0 0.0 7.250

surf 3 hexyc 0.0 0.0 7.550

surf 4 hexyc 0.0 0.0 8.250

cell 100 20 fill 110 -1

cell 101 20 tube 1 -2

cell 102 20 water 2 -3

cell 103 20 al 3 -4

cell 104 20 water 4

cell 150 21 water -4

cell 151 21 water 4

surf 6 cyl 0.0 0.0 26.75

surf 7 cyl 0.0 0.0 32.2

surf 8 cyl 0.0 0.0 32.25

surf 9 cyl 0.0 0.0 40.25

surf 10 cyl 0.0 0.0 105

surf 11 sqc 0.0 0.0 150

cell 200 0 fill 200 -6

cell 201 0 koroc 6 -7

cell 202 0 water 7 -8

cell 203 0 uhloc 8 -9

cell 34 0 ben 9 -10

cell 35 0 gran 10 -11

cell 206 0 outside 11

% --- Palivový proutek

mat clad -6.55000

40000.03c -0.98990

41093.03c -0.01000

72000.03c -0.001

% —— centrální trubka

mat tube -6.58000

40000.03c -0.97490

41093.03c -0.02500

72000.03c -0.001

% —— palivo Gd-2M

mat palivo1 -10.4

92238.03c -96.0

92235.03c -4.0

8016.03c -13.5

mat palivo2 -10.4

92238.03c -96.0

92235.03c -4.0

8016.03c -13.5

mat palivo3 -10.4

92238.03c -96.4

92235.03c -3.6

8016.03c -13.5

mat palivo4 -10.4

92238.03c -95.4

92235.03c -4.6

8016.03c -13.5

% ——— uhlíkova ocel

mat uhloc sum

6000.03c 7.28155E-04

14028.03c 4.19123E-04

14029.03c 2.12918E-05

14030.03c 1.40521E-05

15031.03c 3.05251E-05

16032.03c 2.80092E-05

16033.03c 2.21148E-07

16034.03c 1.25317E-06

16036.03c 2.94864E-09

24050.03c 4.93798E-06

24052.03c 9.52240E-05

24053.03c 1.07976E-05

24054.03c 2.68776E-06

25055.03c 4.73271E-04

26054.03c 4.87763E-03

26056.03c 7.65683E-02

26057.03c 1.76830E-03

26058.03c 2.35328E-04

28058.03c 6.85396E-05

28060.03c 2.64013E-05

28061.03c 1.14765E-06

28062.03c 3.65920E-06

28064.03c 9.31891E-07

29063.03c 6.43035E-05

29065.03c 2.86878E-05

% ---- korozivzdorná ocel

mat koroc sum

6000.03c 5.86636E-05

7014.03c 5.34621E-04

7015.03c 1.95313E-06

14028.03c 7.71210E-04

14029.03c 3.91781E-05

14030.03c 2.58567E-05

15031.03c 2.65393E-05

16032.03c 1.04365E-05

16033.03c 8.24024E-08

16034.03c 4.66947E-07

16036.03c 1.09870E-09

24050.03c 8.63549E-04

24052.03c 1.66527E-02

24053.03c 1.88828E-03

24054.03c 4.70033E-04

25055.03c 8.55012E-04

26054.03c 3.33330E-03

26056.03c 5.23257E-02

26057.03c 1.20843E-03

26058.03c 1.60820E-04

28058.03c 2.99653E-03

28060.03c 1.15426E-03

28061.03c 5.01749E-05

28062.03c 1.59979E-04

28064.03c 4.07420E-05

42092.03c 2.16949E-04

42094.03c 1.35575E-04

42095.03c 2.33547E-04

42096.03c 2.45005E-04

42097.03c 1.40422E-04

42098.03c 3.55315E-04

42100.03c 1.42038E-04

% —— materiál vestvaby hliník

mat al sum

13027.03c 5.906e-2

% —— bentonit

mat ben sum

1001.03c 1.47790E-02

8016.03c 3.48840E-02

13027.03c 3.41429E-03

14028.03c 9.42962E-03

14029.03c 4.79032E-04

14030.03c 3.16151E-04

26054.03c 7.49511E-05

26056.03c 1.17657E-03

26057.03c 2.71721E-05

26058.03c 3.61611E-06

% —— granit

mat gran sum

1001.03c 1.80558E-04

8016.03c 5.32877E-02

13027.03c 4.46576E-03

14028.03c 2.14413E-02

14029.03c 1.08923E-03

14030.03c 7.18872E-04

% --- Water:

mat water -1.0 moder lwtr 1001

1001.03c 2.0



8016.03c 1.0

% --- Thermal scattering data for light water:

therm lwtr lwj3.11t

% --- Cross section library file path:

set acelib "/Users/petra1staryss/Desktop/serpent\_data/sss\_endfb7u.xsdata"

% --- Periodic boundary condition:

set bc 3

% --- Group constant generation:

% universe = 0 (homogenization over all space)

% symmetry = 12

% 2-group structure (group boundary at 0.625 eV)

%set gcu 0

%set sym 12

%set nfg 2 0.625E-6

% --- Neutron population and criticality cycles:

set pop 25000 1000 10

% --- Geometry and mesh plots:

plot 3 1000 1000

mesh 3 1000 1000

% \_\_\_\_\_

## D. Tabulka účinných průřezů vybraných nuklidů

Nuklidy	$\sigma$ (b)	Nuklidy	$\sigma$ (b)
h1	30.41372	i129	40.67424
h2	4.235787	xe124	150.3184
he3	5321.453	xe126	8.550197
he4	0.8635387	xe128	12.04828
li6	939.5923	xe129	24.57108
li7	1.085145	xe130	11.04081
be9	6.508295	xe131	91.2192
b10	3846.321	xe132	4.223527
b11	5.067232	xe134	4.779543
n14	12.17104	xe136	8.505735
n15	4.563551	cs133	33.03954
o16	3.973459	cs135	15.03886
o17	4.089862	ba132	14.38745
f19	3.747533	ba134	6.727206
cu65	16.04143	ba135	8.621737
ga69	9.855877	ba136	3.683997
ga71	10.00779	ba137	9.833112
ge70	16.94637	ba138	4.482346
ge72	9.812923	la138	70.12436
ge73	19.51905	la139	19.2464
ge74	7.741516	ce138	3.632903
ge76	8.571072	ce140	4.193142
as75	9.967989	ce142	3.821055
se74	59.14011	pr141	14.22511
se76	103.5461	nd142	26.66087
se77	50.4927	nd143	405.5763
se78	8.884505	nd144	5.04828
se79	56.3561	nd145	58.70015

se80	7.604034	nd146	11.77271
se82	5.071225	nd148	6.980498
br79	14.29291	nd150	5.673124
br81	8.154262	sm144	4.382932
kr78	15.01144	sm147	64.1915
kr80	18.83887	sm148	6.873251
kr82	33.94932	sm149	40697.46
kr83	211.6736	sm150	122.8124
kr84	3.850701	sm152	209.1002
kr86	5.47332	sm154	19.16315
rb85	6.783595	eu151	9189.509
rb87	4.504344	eu153	367.0956
sr84	6.309017	gd152	1036.609
sr86	3.806181	gd154	90.9316
sr87	22.94491	gd155	60797.69
sr88	7.307154	gd156	6.694219
y89	5.538455	gd157	253913.3
zr90	7.378399	gd158	7.857753
zr91	6.934177	gd160	10.78585
zr92	5.758559	tb159	30.30623
zr93	7.520214	dy156	37.15494
zr94	12.73245	dy158	49.60775
zr96	11.12805	dy160	61.71674
nb93	7.520214	dy161	617.7429
nb94	12.73245	dy162	194.1512
mo92	6.119455	dy163	126.7092
mo94	6.119455	dy164	2981.596
mo95	6.19546	ho165	73.51417
mo96	19.52036	ho166m	3612.965

mo97	5.347322	er162	26.94384
mo98	8.884464	er164	22.08183
mo100	5.800953	er166	31.15355
tc99	5.526165	er167	652254
ru96	5.416909	er168	12.40313
ru98	13.1287	er170	20.55507
ru99	11.01562	pb204	11.88504
ru100	15.25642	pb206	11.29385
ru101	10.83364	pb207	11.48563
ru102	9.819739	pb208	11.39923
ru104	5.732756	bi209	9.356445
rh103	146.4625	ra223	143.1612
pd102	7.828573	ra224	24.53118
pd104	5.443427	ra225	112.4432
pd105	28.23884	ra226	22.61297
pd106	4.93558	ac225	52.63956
pd107	5.342282	ac227	812.6709
pd108	10.92214	th227	619.6807
pd110	5.916169	th228	154.3361
ag107	44.97749	th229	111.9007
ag109	92789	th230	33.8116
cd106	5.548901	th232	20.38142
cd108	4.251928	th234	13.73114
cd110	15.25432	pa231	211.9188
cd111	12.48857	pa232	2099.961
cd112	7.296433	pa233	54.94917
cd113	19994.01	u232	162.7088
cd114	6.016043	u233	588.7351
cd116	5.040519	u234	118.2519
in113	15.81755	u235	698.7755
in115	204.7938	u236	14.02156

sn112	5.294918	u237	478.4377
sn114	4.691185	u238	11.98276
sn115	67.0953	u240	26.84529
sn116	4.447358	np236	2938.589
sn117	6.3992	np237	191.2893
sn118	4.903636	np239	56.05912
sn119	7.183214	pu236	176688
sn120	5.77596	pu239	1026.526
sn122	4.606823	pu240	288.5611
sn124	4.939041	pu241	1386.548
sn126	4.106049	pu242	29.99606
sb121	9.815318	pu243	288.5611
sb123	7.568535	pu244	1386.548
sb126	16.89419	pu246	289.3081
te120	5.995998	am241	699.1845
te122	4.994883	am243	88.38071
te123	419.0146	cm245	2411.35
te124	13.50175	cm246	10.4444
te125	4.569628	cm247	163.0055
te126	4.372096	cm248	10.19736
te128	4.608379	cm250	92.24818
te130	4.800814	bk247	1014.057
i127	9.815318	bk250	1770.49
cf251	7811.727	cf250	2132.003

E. Tabulka závislosti  $N_i$  na vyhoření část 1.

	<b>pu-239</b>	<b>pu-240</b>	<b>pu-242</b>	<b>gd-155</b>	<b>eu-151</b>	<b>eu-153</b>
1,000E+00	1,615E-04	5,641E-05	1,230E-05	5,015E-08	5,183E-09	4,871E-06
2,000E+00	1,615E-04	5,644E-05	1,230E-05	9,046E-08	9,537E-09	4,871E-06
3,000E+00	1,615E-04	5,647E-05	1,230E-05	1,253E-07	1,386E-08	4,871E-06
4,000E+00	1,615E-04	5,649E-05	1,230E-05	1,554E-07	1,814E-08	4,871E-06
5,000E+00	1,615E-04	5,651E-05	1,230E-05	1,814E-07	2,240E-08	4,871E-06
6,000E+00	1,615E-04	5,653E-05	1,230E-05	2,039E-07	2,662E-08	4,871E-06
7,001E+00	1,615E-04	5,656E-05	1,230E-05	2,234E-07	3,081E-08	4,871E-06
8,001E+00	1,615E-04	5,658E-05	1,230E-05	2,402E-07	3,497E-08	4,871E-06
9,001E+00	1,615E-04	5,659E-05	1,230E-05	2,547E-07	3,909E-08	4,871E-06
1,000E+01	1,615E-04	5,661E-05	1,230E-05	2,672E-07	4,319E-08	4,871E-06
2,000E+01	1,614E-04	5,675E-05	1,230E-05	3,286E-07	8,244E-08	4,871E-06
3,000E+01	1,614E-04	5,682E-05	1,230E-05	3,428E-07	1,188E-07	4,871E-06
4,000E+01	1,613E-04	5,685E-05	1,230E-05	3,462E-07	1,524E-07	4,871E-06
5,000E+01	1,613E-04	5,685E-05	1,230E-05	3,469E-07	1,836E-07	4,871E-06
6,000E+01	1,613E-04	5,683E-05	1,230E-05	3,471E-07	2,124E-07	4,871E-06
7,001E+01	1,612E-04	5,680E-05	1,230E-05	3,472E-07	2,391E-07	4,871E-06
8,001E+01	1,612E-04	5,676E-05	1,230E-05	3,472E-07	2,638E-07	4,871E-06
9,001E+01	1,611E-04	5,672E-05	1,230E-05	3,472E-07	2,867E-07	4,871E-06
1,000E+02	1,611E-04	5,666E-05	1,230E-05	3,472E-07	3,079E-07	4,871E-06
2,000E+02	1,606E-04	5,609E-05	1,230E-05	3,472E-07	4,501E-07	4,871E-06
3,000E+02	1,602E-04	5,550E-05	1,229E-05	3,472E-07	5,159E-07	4,871E-06
4,000E+02	1,598E-04	5,492E-05	1,229E-05	3,472E-07	5,464E-07	4,871E-06
5,000E+02	1,593E-04	5,434E-05	1,229E-05	3,472E-07	5,605E-07	4,871E-06
6,000E+02	1,589E-04	5,377E-05	1,229E-05	3,472E-07	5,670E-07	4,871E-06
7,001E+02	1,585E-04	5,320E-05	1,229E-05	3,472E-07	5,700E-07	4,871E-06
8,001E+02	1,580E-04	5,264E-05	1,228E-05	3,472E-07	5,714E-07	4,871E-06
9,001E+02	1,576E-04	5,209E-05	1,228E-05	3,472E-07	5,721E-07	4,871E-06
1,000E+03	1,572E-04	5,154E-05	1,228E-05	3,472E-07	5,724E-07	4,871E-06
2,000E+03	1,529E-04	4,637E-05	1,226E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06

3,000E+03	1,487E-04	4,172E-05	1,223E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
4,000E+03	1,447E-04	3,754E-05	1,221E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
5,000E+03	1,407E-04	3,378E-05	1,219E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
6,000E+03	1,369E-04	3,039E-05	1,217E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
7,001E+03	1,331E-04	2,734E-05	1,215E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
8,001E+03	1,295E-04	2,460E-05	1,212E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
9,001E+03	1,259E-04	2,213E-05	1,210E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
1,000E+04	1,224E-04	1,992E-05	1,208E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
2,000E+04	9,231E-05	6,924E-06	1,186E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
3,000E+04	6,944E-05	2,407E-06	1,164E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
4,000E+04	5,216E-05	8,368E-07	1,143E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
5,000E+04	3,916E-05	2,909E-07	1,122E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
6,000E+04	2,938E-05	1,011E-07	1,101E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
7,001E+04	2,204E-05	3,516E-08	1,081E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
8,001E+04	1,654E-05	1,222E-08	1,061E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
9,001E+04	1,241E-05	4,249E-09	1,041E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
1,000E+05	9,306E-06	1,477E-09	1,022E-05	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
2,000E+05	5,249E-07	6,538E-14	8,490E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
3,000E+05	2,961E-08	2,728E-14	7,052E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
4,000E+05	1,670E-09	2,727E-14	5,857E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
5,000E+05	9,425E-11	2,726E-14	4,865E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
6,000E+05	5,371E-12	2,724E-14	4,041E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
7,001E+05	3,570E-13	2,722E-14	3,356E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
8,001E+05	7,399E-14	2,721E-14	2,788E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
9,001E+05	5,779E-14	2,719E-14	2,316E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06
1,000E+06	5,664E-14	2,717E-14	1,923E-06	3,472E-07	5,726E-07	4,871E-06

F. Tabulka závislosti  $N_i$  na vyhoření část 2.

	<b>nd-143</b>	<b>nd-145</b>	<b>rh-103</b>	<b>u-236</b>	<b>u-234</b>	<b>sm-147</b>
1,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,312E-04	5,276E-06	5,513E-06
2,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,312E-04	5,319E-06	6,968E-06
3,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,312E-04	5,363E-06	8,086E-06
4,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,407E-06	8,944E-06
5,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,450E-06	9,603E-06
6,000E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,493E-06	1,011E-05
7,001E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,535E-06	1,050E-05
8,001E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,577E-06	1,080E-05
9,001E+00	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,619E-06	1,102E-05
1,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	5,661E-06	1,120E-05
2,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,313E-04	6,058E-06	1,174E-05
3,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,314E-04	6,426E-06	1,178E-05
4,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,315E-04	6,765E-06	1,178E-05
5,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,315E-04	7,079E-06	1,178E-05
6,000E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,316E-04	7,368E-06	1,178E-05
7,001E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,316E-04	7,636E-06	1,178E-05
8,001E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,317E-04	7,884E-06	1,178E-05
9,001E+01	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,318E-04	8,113E-06	1,178E-05
1,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,318E-04	8,324E-06	1,178E-05
2,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,324E-04	9,729E-06	1,178E-05
3,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,330E-04	1,037E-05	1,178E-05
4,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,336E-04	1,066E-05	1,178E-05
5,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,342E-04	1,079E-05	1,178E-05
6,000E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,347E-04	1,084E-05	1,178E-05
7,001E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,353E-04	1,087E-05	1,178E-05
8,001E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,359E-04	1,088E-05	1,178E-05
9,001E+02	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,364E-04	1,088E-05	1,178E-05
1,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,370E-04	1,088E-05	1,178E-05
2,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,421E-04	1,086E-05	1,178E-05



3,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,468E-04	1,083E-05	1,178E-05
4,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,510E-04	1,080E-05	1,178E-05
5,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,547E-04	1,078E-05	1,178E-05
6,000E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,581E-04	1,075E-05	1,178E-05
7,001E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,611E-04	1,072E-05	1,178E-05
8,001E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,639E-04	1,069E-05	1,178E-05
9,001E+03	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,663E-04	1,067E-05	1,178E-05
1,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,686E-04	1,064E-05	1,178E-05
2,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,815E-04	1,038E-05	1,178E-05
3,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,860E-04	1,012E-05	1,178E-05
4,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,875E-04	9,873E-06	1,178E-05
5,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,880E-04	9,631E-06	1,178E-05
6,000E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,881E-04	9,395E-06	1,178E-05
7,001E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,881E-04	9,167E-06	1,178E-05
8,001E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,881E-04	8,945E-06	1,178E-05
9,001E+04	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,880E-04	8,729E-06	1,178E-05
1,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,880E-04	8,518E-06	1,178E-05
2,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,874E-04	6,714E-06	1,178E-05
3,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,869E-04	5,354E-06	1,178E-05
4,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,863E-04	4,328E-06	1,178E-05
5,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,858E-04	3,555E-06	1,178E-05
6,000E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,852E-04	2,971E-06	1,178E-05
7,001E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,847E-04	2,532E-06	1,178E-05
8,001E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,841E-04	2,200E-06	1,178E-05
9,001E+05	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,836E-04	1,950E-06	1,178E-05
1,000E+06	3,952E-05	3,952E-05	3,131E-05	1,830E-04	1,762E-06	1,178E-05

G. Tabulka závislosti  $N_i$  na vyhoření část 3.

	<b>sm-149</b>	<b>sm-150</b>	<b>sm-152</b>	<b>cs-133</b>	<b>ag-109</b>	<b>ru-101</b>
1,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
3,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+00	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
3,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+01	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
3,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+02	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05

3,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+03	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
3,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+04	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
2,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
3,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
4,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
5,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
6,000E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
7,001E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
8,001E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
9,001E+05	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05
1,000E+06	1,566E-07	1,268E-05	4,284E-06	5,655E-05	4,370E-06	5,113E-05