

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Degradace absorpčního materiálu vestavby ukládacího
obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého
jaderného paliva**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek MĚKUTA**
Osobní číslo: **E13N0079P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Degradace absorpčního materiálu vestavby ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva**
Zadávací 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 :

Ve vestavbě UOS se z důvodu zajištění bezpečné podkritičnosti pravděpodobně použije bórováné slitiny jako absorpčního materiálu. Vlivem neutronového toku z vyhořelého jaderného paliva se obsah bóru ve slitině vlivem neutronové aktivace snižuje a snižuje se tak i absorpční schopnost slitiny. Cílem je určit míru poklesu obsahu bóru ve slitině a případně navrhnout úpravu obsahu bóru.

1. Seznamte se s konstrukcí ukládacího obalového souboru pro palivo VVER-440.
2. Seznamte se s metodikou výpočtů aktivace materiálu vystavenému neutronovému toku.
3. Vypočtete izotopické změny absorpčního materiálu vestavby UOS vlivem neutronové aktivace.
4. Vypočtete podkritičnost UOS během provozu v hlubinném úložišti.
5. Určete vliv degradace materiálu na podkritičnost UOS.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 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: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Obsah této diplomové práce je zaměřen na ukládání vyhořelého jaderného paliva do úložných obalových souborů, které budou ukládány do hlubinných úložišť. V diplomové práci je popsán úložný obalový soubor, hlubinné úložiště, neutronová aktivační analýza, která slouží k výpočtu změn prvků vlivem radioaktivních reakcí. Konstrukce modelu a samotný výpočet je prováděn ve výpočetním skriptu Serpent. V závěru práce budou zhodnoceny získané výsledky z výpočtů.

Klíčová slova

Úložný obalový soubor, hlubinné úložiště, Serpent, neutronová aktivační analýza.

Abstract

The content of this diploma thesis is focused on the storage of spent nuclear fuel into storage overpack, which will be stored in deep geological repositories. In this thesis is described storage cask, deep repository, neutron activation analysis, which is used to calculate the chase due to radioactive elements reactions. Construction of the model and the calculation itself is taken place in computational script Serpent. The conclusion will be evaluated results obtained from the calculations.

Key words

Final disposal cask, deep geological repositories, Serpent, neutron activation analysis.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.5.2015

Marek Měkuta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a zejména Ing. Martinu Loveckému za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Diplomová práce byla podporována z prostředků Technologické agentury České Republiky (TAČR), součást projektu CANUT TE01020455.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 JADERNÉ PALIVO	11
1.1 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ V ČR	11
1.2 UKLÁDACÍ OBALOVÝ SOUBOR	12
1.3 PALIVOVÉ SOUBORY	16
1.4 PALIVOVÝ PROUTEK	17
1.4.1 Vyhořívající absorbátor	18
1.4.2 Gadolinium	18
1.4.3 Účinný průřez	19
2 VYHOŘÍVÁNÍ NUKLIDŮ	21
2.1 RADIOAKTIVNÍ ZÁKON	22
2.1.1 Vznik dceřiných nuklidů	23
2.1.2 Vícenásobný rozpad	24
2.1.3 Transformace v neutronový tok	25
2.2 REAKCE BÓRU	26
3 SERPENT	28
3.1 DEFINICE PALIVOVÝCH PROUTKŮ	28
3.2 DEFINICE ROZLOŽENÍ PALIVOVÝCH PROUTKŮ V PALIVOVÉM SOUBORU	29
3.3 DEFINICE ROZHRANÍ (POVRCHŮ) MATERIÁLŮ	30
3.4 DEFINICE BUNĚK A JEJICH VYPLNĚNÍ	31
3.5 DEFINICE MATERIÁLŮ A JEJICH SLOŽENÍ	32
3.6 DETEKTORY	33
4 ZMĚNY BĚHEM VYHOŘÍVÁNÍ	35
4.1 VYHOŘELÉ JADERNÉ PALIVO	35
4.2 REAKČNÍ RYCHLOSTI	36
4.3 ZMĚNY BÓRU V HEXAGONÁLNÍCH TRUBKÁCH	41
4.4 PODKRITICNOST UKLÁDACÍHO OBALOVÉHO SOUBORU	43
4.5 DEGRADACE MATERIÁLU	49
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

MOX	Přepracované jaderné palivo
UOS	Ukládací obalový soubor
KBS	Jaderná bezpečnost (kärnbränslesäkerhet)
VVER	Tlakovodní reaktor ruského typu s moderátorem v podobě lehké vody
AlMgSi	Konstrukční korozivzdorná hliníková slitina
B ₄ C	Karbid bóru
PS	Palivový soubor
RR	Reakční rychlost
HÚ	Hlubinné úložiště
E110	Slitina zirkonia ruské specifikace
NAA	Neutronová aktivační analýza
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
PP	Palivový proutek
TVEL	Palivové proutky ruské specifikace
TVEG	Palivové proutky s obsahem gadolinia ruské specifikace

Úvod

V důsledku zvyšující se potřeby elektrické energie přibývá otázka, jak tuto energii získat co nejefektivněji. Jako dobrou variantou se za posledních zhruba 60 let ukázalo využití jaderné energie, která s sebou ovšem kromě výhod, nese i zápory. Jedním z těchto záporů je beze slova otázka, jak zacházet s vyhořelým jaderným palivem.

Čerstvé jaderné palivo, které se využívá v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín, je vyráběno z uranové rudy a je obohaceno o izotop ^{235}U . V okamžiku, kdy je palivo ozářeno, dochází ke změně jeho složení. Většina vzniklých štěpných produktů je radioaktivních a v případě uvolnění do životního prostředí by představovaly pro život na zemi velké nebezpečí. Z tohoto důvodu poté vznikají dva způsoby odstranění vyhořelého jaderného paliva. Jeden z nich je uzavřený palivový cyklus, kdy se palivo přepracuje a může být znova použito jako typ paliva MOX v jaderných reaktorech. Druhou variantou je otevřený cyklus, kdy se vyhořelé jaderné palivo bude ukládat tak, aby nemohlo ohrozit již zmiňovaný život na zemi.

Jedna z možností uložení se skrývá v uložení paliva do granitického prostředí hluboko pod zem v korozivzdorném kontejneru. Tento typ úložišť dnes v ČR dosud nefunguje, ale do roku 2050 by toto úložiště již mělo existovat. Kromě hloubky uložení a okolního prostředí jsou kladeny velké nároky na samotný ukládací obalový soubor, který musí vyhovět řadě požadavků, jako je těsnost, odolnost vůči chemickému poškození nebo odolnost vůči okolnímu tlaku.

Vývojem ukládacího obalového souboru se v současné době zabývá firma Škoda jaderné strojírenství.

Prvky a jejich reakce, které vznikají během ozáření a jejich následná radioaktivita při uložení v meziskladech jaderného paliva nebo v samotných hlubinných úložištích nám napomáhá určovat neutronová aktivační analýza.

V této diplomové práci jsou znalosti ověřeny ve výpočtovém a modelovacím skriptu Serpent a výstupy a výsledky jsou zhodnoceny a analyzovány.

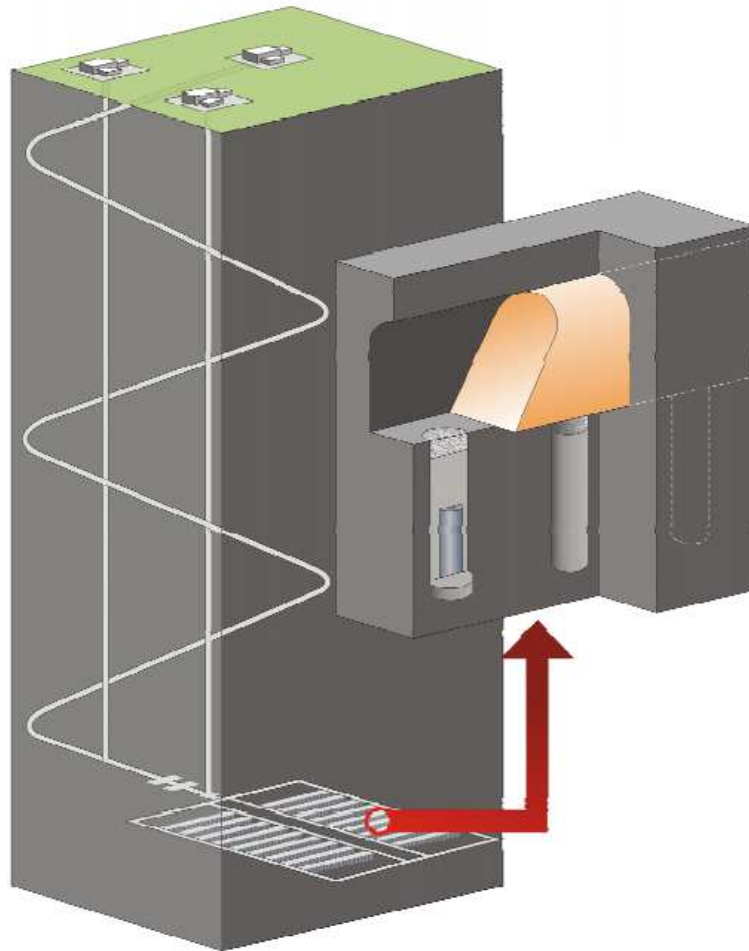
1 Jaderné palivo

Jaderné palivo, které se používá v jaderných elektrárnách, je vyráběno z uranové rudy obohacením o izotop ^{235}U . Obohacování se dá provést mnoha různými metodami. Mezi tyto metody řadíme metodu difúzní, odstředivkovou, aerodynamickou, laserovou a chemickou. Poté, co se palivo vloží do aktivní zóny reaktoru, a ten se uvede v činnost, začne docházet k jaderným reakcím typu absorpce a rozptyl. Absorpce se dále dělí na štěpnou a neštěpnou a rozptyl na pružný a nepružný. Palivo ozářené v reaktoru mění svoje složení a při obecném náhledu lze konstatovat, že obsahuje téměř všechny prvky z Mendělejevovy tabulky. Mnoho těchto štěpných produktů jsou radioaktivní izotopy, které by mohly znamenat, v případě uvolnění do okolí, vážné nebezpečí pro člověka. S vyhořelým palivem vyvezeným z reaktoru může být nakládáno dvěma způsoby. Prvním z nich je uzavřený palivový cyklus, kdy dochází k opětovnému zpracování vyhořelého paliva. Z tohoto procesu pak zůstávají jen radioaktivní odpady. Druhou, ČEZem využívanou variantou, je otevřený palivový cyklus, kdy vyhořelé palivo je po určitou dobu skladováno a poté navždy uloženo do hlubinných úložišť. [1][2][3]

1.1 Hlubinné úložiště v ČR

Podle současného návrhu by hlubinné úložiště mělo představovat jednoúrovňový komplex v granitovém masívu. Umístěno by mělo být v hloubce 500 metrů pod povrchem. Tyto ukládací povrchy budou propojeny s areálem na povrchu pomocí svislých přístupových šachet a tunelem ve tvaru šroubovice. Na hlavní, tzv. páteřní chodby budou kolmo napojené ukládací chodby. V těchto chodbách budou prováděny vrty, do kterých se následně budou ukládat úložné obalové soubory s vyhořelým jaderným palivem, které musí zajistit dlouhodobou bezpečnost. Jako těsnicí materiál pro UOS ve vrtech poslouží bentonit a betonové zátky. Rozteč mezi jednotlivými vrty závisí na teplotě na povrchu mezi rozhraními UOS a bentonitu, která nesmí přesáhnout teplotu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto rozteče se budou pohybovat od 3 metrů.

Na obr. 1 je znázorněn koncept hlubinného úložiště, který byl vyvinut pro ukládání vyhořelého jaderného paliva ve stabilní krystalické hornině ve Švédsku ve studiích KBS na přelomu 70. a 80. let.[17][18]



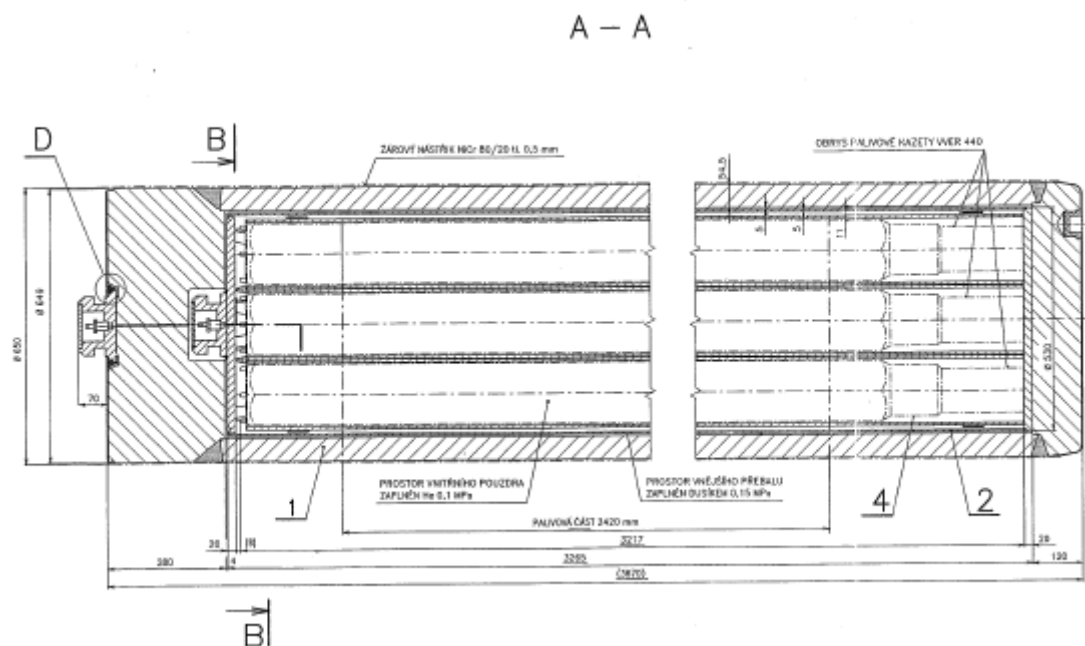
Obr. 1: Koncepce hlubinného úložiště s vertikálním uložením UOS[18]

1.2 Ukládací obalový soubor

Ukládací obalový soubor musí vždy sloužit jako zábrana proti úniku radioaktivních látek do okolního prostředí. Jedná se o hermetické pouzdro, do kterého je ukládáno vyhořelé jaderné palivo. V následujícím textu bude popsán typ UOS Škoda 440/7. Je složen ze 2 klíčových částí. První část je vnitřní pouzdro, které je uděláno z korozivzdorné oceli dle normy ČSN 17381, a druhá část je vnější přebal vytvořen z uhlíkové oceli No. 1.6338 podle normy ČSN 12022 o průměru 650 mm a tloušťce stěny 54,5 mm, na kterém je ochranná antikoroziční vrstva. Tato vrstva byla nanášena pomocí povlaků, které jsou založeny na bázi kovů, kovokeramických materiálů a neoxidické keramiky. Plášť je zhotoven zkroužením z plechu o tloušťce 5 mm. K tomuto plášti je poté přivařeno ploché dno. Vestavba, která se nachází uvnitř pouzdra, je zhotovena ze slitiny hliníku a slouží jako lůžko pro ukládání 7 palivových souborů (pro VVER 440). Dále tato vestavba umožňuje lepší přestup tepla,

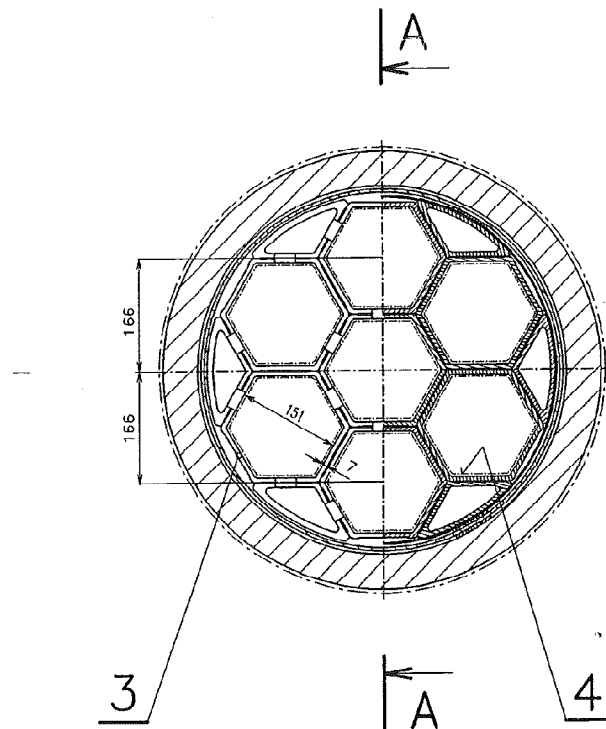
zlepšuje navádění palivových souborů při vkládání do pouzdra a fixuje polohu souboru z hlediska natáčení v tolerancích nutných pro spolehlivou funkci záchytu. Ukládací obalový soubor je uzavřen víkem, které je hermeticky přivařeno k jeho plášti. Na víku se také nachází manipulační záchyt a ventil, který umožňuje v případě potřeby vyvacování vnitřního prostoru pouzdra a jeho následné naplnění heliem. Naplnění heliem se provádí pro zkoušky těsnosti hermeticky zavařeného pouzdra.

Na následujícím obrázku je vidět konstrukce ukládacího obalového souboru.



Obr. 2: Ukládací obalový soubor pro 7 palivových souborů VVER 440[5]

Na dalším obrázku je zobrazen příčný řez UOS, kde je vidět rozložení sedmi PS včetně roztečí mezi nimi, které jsou 16,6 cm. Dále je zde vidět zmiňovaný palivový soubor VVER440 (4) a profilovaná trubka ze slitiny AlMgSi, případně AlMgSi+B4C, kde bude uvažován 0,5 % podíl bóru (3). [5]



Obr. 3: Příčný řez UOS pro 7 palivových soubor VVER 440[5]

Před uložením pouzdra do vrtu, je vnitřní pouzdro naplněno Heliem o tlaku 0,1 MPa(atmosferický tlak) pro zajištění inertní atmosféry a zlepšení přestupu tepla v počátcích, kdy je vznik tepla největší. Prostor mezi přebalem a vnitřním pouzdrem je vyplněn dusíkem o tlaku 0,05 MPa, který plní funkci suchého prostředí mezi těmito dvěma prostory a také zabraňuje úniku He z výše zmíněného vnitřního obalu. Okolí vrtu, kde je uložen UOS, bude vyplněno bentonitem ve formě lisovaných prefabrikátů a betonovými zátkami. Průměr vrtu, do kterého bude ukládáno vyhořelé jaderné palivo v UOS je 132cm a jeho hloubka činí 477 cm. Na dně vrtu bude také nanesená vrstva bentonitu o výšce 30 cm a to samé potom bude platit o vrchní části nad UOS. Na svrchní vrstvu bentonitu se na závěr nanese pod tlakem zmiňovaná betonová zátka, která bude mít výslednou výšku 50 cm. [4][6]

Složení uhlíkové oceli No.16338 je vidět v následující tabulce:

Tab. 1: Složení oceli No.16338

Název prvku	Podíl prvku[%]
C	0,185
Mn	0,55
Si	0,27
Cr	0,125
Ni	0,125
Cu	0,125
P	0,020
S	0,020
Fe	98,25

Následující tabulka ukazuje shrnutí základních parametrů úložných obalových soborů pro vyhořelé jaderné palivo VVER 440. Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny stejné parametry pro vyhořelé palivo VVER 1000.

Tab. 2: Základní parametry pro ukládání VJP

	VVER 440	VVER 1000
počet uložených PS	7	3
typ paliva	UO2	UO2
stav paliva	celý PS (nedemontován)	celý PS (nedemontován)
mechanické zatížení	20 MPa	20 MPa
teplota okolního prostředí	100 °C	100 °C
minimální teplota okolí	-40°C	-40°C
limitní vyhoření paliva	58 500 MWd/MTU	48 000 MWd/MTU
doba skladování paliva	65 let	65 let

	VVER 440	VVER 1000
rozměry	650 x 3670 mm	701 x 5050 mm
hmotnost	3500 kg (bez paliva) 5000 kg (s palivem)	5430 kg (bez paliva) 7770 kg (s palivem)

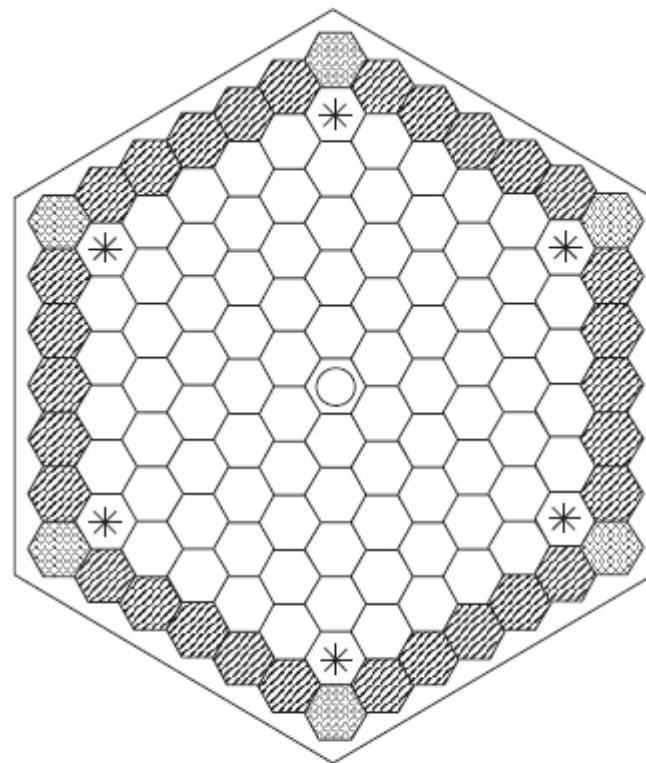
Hodnoty limitního vyhoření paliva, které jsou uvedeny v tabulce, jsou vztažené k prvnímu konceptu návrhu. V současné době jsou tyto hodnoty vyšší.

Předpokládaná doba uložení pro VVER 440, tak i pro VVER 1000, je 65 let od doby, kdy bylo palivo vyjmuta z reaktoru. V době prvních 65 je palivo skladováno 5 let v bazénu skladování v reaktorovně a zbylých 60 let v meziskladu VJP.




UOS se bude nacházet v granitovém masivu v hloubce 500m, jehož chemické složení je 85,9 % SiO₂, 14% Al₂O₃ a 0,1% H₂O.

1.3 Palivové soubory

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že ukládací obalový soubor se skládá ze 7 palivových souborů. Tyto soubory mají hexagonální tvar a v každém souboru se nachází 126 palivových proutků s různým obohacením. V této práci se budu zabývat palivovými soubory Gd-2M. Tyto soubory jsou složeny celkem ze 4 druhů palivových proutků s různým obohacením. Nachází se zde proutky s obohacením 4.6%, dále pak proutky s obohacením 4.0%, které jsou umístěny po obvodu palivového souboru. V každém rohu PS se poté nachází proutky s obohacením 3.6%. Na středu PS se nachází centrální trubka a dále je v PS umístění 5 palivových proutků, které jsou směsí 4% U235 s váhovým podílem 3.35% Gd₂O₃ a zastávají funkci vyhořívajících absorbátorů. Proutky bez přidaného oxidu gadolinia se nazývají TVEL, proutky s přidaným oxidem gadolinia se nazývají TVEG. Střední obohacení těchto souborů je 4.38%. Pro lepší představu rozložení proutků a jejich počet v PS je na následujícím obrázku uveden příčný řez PS pro palivo Gd-2M.[7]



Obohacení uranu (počet palivových proutků)

-  4.6% (84)
-  4.0% (30)
-  3.6% (6)
-  4.0 % U235 + (3.35% Gd₂O₃) (6)
-  centrální trubka

Obr. 4: Příčný řez PS pro palivo Gd-2M

1.4 Palivový proutek

Jednotlivé palivové proutky se skládají z palivových tablet, které jsou vyráběny ruskou firmou TVEL. Tyto proutky jsou uloženy v povlakové trubce. V horní části trubky se nachází pružina, která udržuje palivové proutky v pracovní poloze. Na oba konce trubky jsou hermeticky přivařeny zátky. Vnější průměr tabletky je 7.6 mm a její výška 10 mm. Vnější průměr proutku je 9.1 mm. Rozdíl mezi poloměry tvoří mezera mezi palivem a samotným obalem ze slitiny E110, která je sloučeninou 98,99% zirkonu, 0,01% hafnia a 1% niobu.

Na rozdíl od palivových proutků má centrální trubka obal ze slitiny E635, která se skládá z 97,49% zirkonu, 0,01 hafnia a 2,5% niobu a její vnější průměr je 10,3 mm. Tloušťka stěny je 0,75 mm. [7][14]

1.4.1 Vyhořívající absorbátor

Hlavním úkolem absorbátorů je snížení přebytečné reaktivity na počátku palivové kampaně, kdy je palivo ještě čerstvé. Tyto absorbátory by neměly sloužit jako radiační zdroj ve vyhořelém palivu. Jedná se o takové prky, které mají před absorpcí neutronů velký účinný průřez, avšak po jejich absorpci se zmenší natolik, že už nejsou schopny další neutrony pohltit.

Máme dvě možnosti použití vyhořívajících absorbátorů, které nazýváme blokovou a integrální. Koncepce integrálního řešení spočívá v nanesení vrstvy absorbátoru na povrch tabletky nebo jeho přimícháním přímo do paliva během výroby palivové tabletky. Blokované řešení spočívá v použití celých palivových proutků anebo dokonce souborů jako vyhořívajících absorbátorů.

1.4.2 Gadolinium

Gadolinium se v podobě oxidu nachází v PS jako vyhořívající absorbátor. V následujícím textu bude jeho základní popis.

Gadolinium s protonovým číslem 64 je kovový feromagnetický prvek, který patří do skupiny nazvané lanthanoidy. Jeho využití je převážně v jaderné technice a pro výrobu paměťových medií do počítačů. Z hlediska pro vyhořívající absorbátor jsou nejzajímavější dva izotopy gadolinia ^{155}Gd a ^{157}Gd . V přírodě gadolinium nalezneme jen jako sloučeninu ve spojení s ostatními lanthanoidy. Jeho podstatnou vlastností je nejvyšší účinný průřez ze všech známých použitelných prvků, díky němuž ale také dochází k nejrychlejšímu vyhoření. [8][9]

V následující tabulce budou uvedeny základní izotopy Gadolinia, jejich účinné průřezy a přírodní zastoupení:

Tab. 3: Izotopy Gadolinia[10]

Izotop	Přírodní zastoupení[atom %]	Účinný průřez[barn]
¹⁵² Gd	0,2	
¹⁵⁴ Gd	2,18	81,19
¹⁵⁵ Gd	14,8	61 000
¹⁵⁶ Gd	20,47	1,8
¹⁵⁷ Gd	15,65	255 00
¹⁵⁸ Gd	24,84	2,2
¹⁶⁰ Gd	21,86	1,41

1.4.3 Účinný průřez

Vyjadřuje pravděpodobnost, kdy dojde k vzájemné interakci mezi jádrem a jedním dopadajícím neutronem. Ze vztahu uvedeného níže vyplývá, že průřez vychází v m². Prakticky vychází velmi malá čísla, a tak se převážně průřez udává v jednotkách *barn*. Jeden *barn* se poté rovná 10⁻²⁸m². [12]

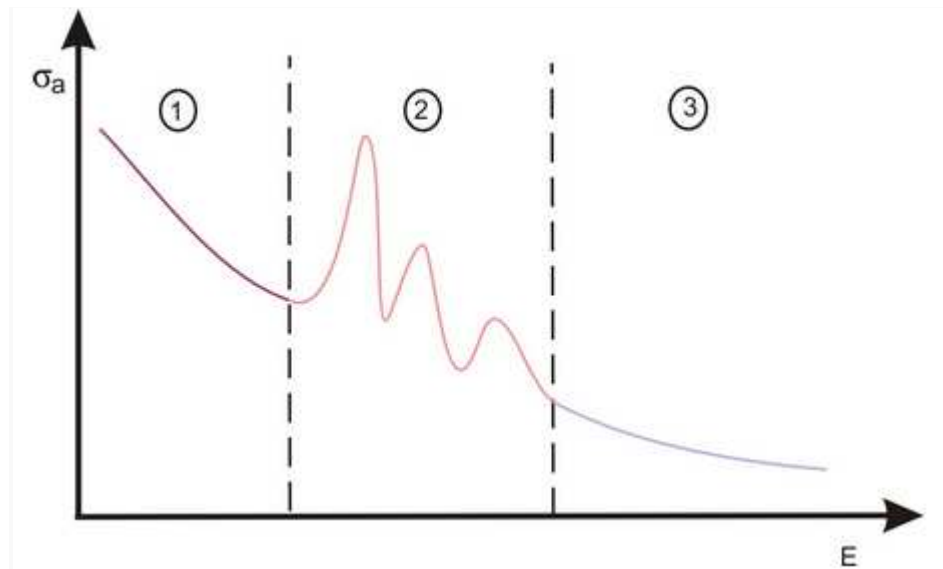
$$\sigma = \frac{R}{N \cdot \Gamma}$$

Průřez, který je vztažený k jednomu jádru pro určitou reakci, je nazýván mikroskopickým účinným průřezem. Účinný průřez bude podstatnou součástí diplomové práce, protože ho chápeme jako charakteristiku jádra a je závislý na energii dopadajícího neutronu.

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

kde A je atomová hmotnost terčového jádra a E je energie neutronu vstupujícího do interakce.

Na obrázku 5 lze vidět závislost účinného průřezu pro absorpci neutronů na energii, kde oblast 1 vyjadřuje velikost energie okolo 1eV, oblast 2 energii v rozmezí 1 až 10 000 eV a do 3. oblasti řadíme neutrony s velkou energií (10 000 až 100 00 000 eV).

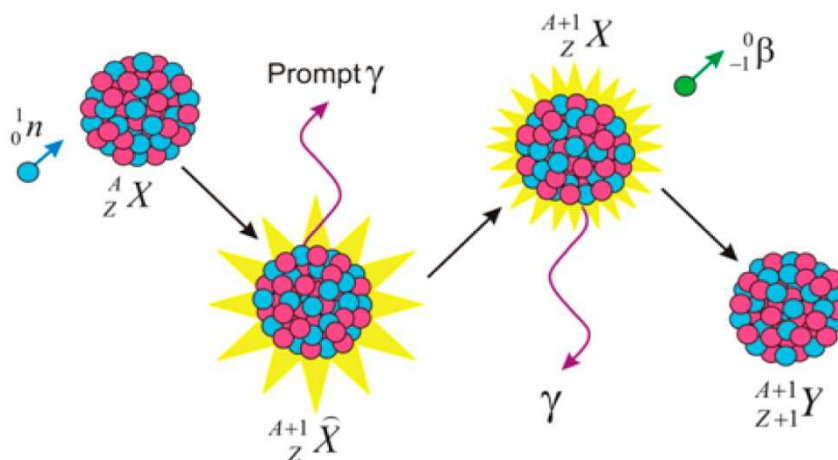


Obr. 5: Závislost účinného průřezu pro absorpci neutronu na energii[12]

2 Vyhořívání nuklidů

Roku 1896 známý fyzik Henri Becquerel objevil, že některé látky produkují speciální záření, které je nazýváno radioaktivní. Povahu tohoto záření určují nuklidy, které toto záření vysílají. Nebyla prokázána závislost záření na teplotě, tlaku, chemické vazbě. Také nebyl zjištěn vliv elektrického a magnetického pole. Během procesu radiace se mění chemické složení prvku, který emituje záření. Tento fakt svědčí o tom, že radioaktivní záření pochází z jádra prvku. [13]

Neutronová aktivační analýza (NAA) je analytická metoda, sloužící ke stanovení mnoha prvků (více než 60). Stanovení kvality a kvantity těchto prvků se provádí pomocí jaderných reakcí izotopů, které přísluší daným prvkům. Metoda je založena na konverzi stabilních jader do radioaktivních, vlivem neutronového záchytu a následné měření vyzářené radioaktivity ve zbytkovém nebo dceřiném jádře. Po neutronové interakci je nejprve zformována směs jader s dobou života v řádech jednotek sekund (10-14s), které během své existence vyzářují tzv. gamma paprsky. Z měření tohoto záření lze stanovit některé prvky pomocí metody nazývané rychlá gamma neutronová aktivační analýza (PGNAA). Vlivem znovu vybuzení složených jader vznikají radioaktivní jádra, která mají poločas rozpadu od několika sekund až po několik let. Vlivem procesu beta-rozpadu (emise elektronu, pozitronu, elektronového záchytu), který je většinou doprovázen nějakou emisí (sekundární, zpožděnou) gama záření, vzniká stabilní (popřípadě radioaktivní) jádro.[15]



Obr. 6: Rozklad radioaktivního jádra vlivem emise elektronu a vznik stabilního[15]

Nedílnou a velmi potřebnou součástí NAA jsou neutronové zdroje. Jejich hlavní parametr je vydatnost, která je definována množstvím vyprodukovaných neutronů za jednotku času. Mezi nejvhodnější zdroje jsou řazené právě ty, které mají neutronový tok co nejvyšší v místě ozařování. V následující tabulce jsou uvedeny zdroje, jejich základní reakce a vydatnost.

Tab. 4: Charakteristika nejpoužívanějších neutronových zdrojů[16]

Typ zdroje	Reakce	Vydatnost[n/s]
Radioizotopové	$(\alpha, n), (\gamma, n)$	$10^6-10^8, 10^4-10^5$
Spontánně-štěpné	štěpení $^{252}\text{Cf}, ^{242}\text{Cm}$	10^9-10^{10}
Množiče neutronů	štěpení $^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$	Nad 10^8
Urychlovače	$(d, n), (p, n)$	10^9-10^{10}
Reaktorové	štěpení $^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$	10^{17}
Impulzní	štěpení $^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$	$8 \cdot 10^{18}$
Jaderný výbuch	štěpení	10^{24}

Jako další důležitý parametr pro NAA se uvádí energie neutronů, které jsou používány během aktivace. Nejčastější využití mají neutrony s energií v rozmezí 0,5 – 20 MeV a s tepelnou energií 0,005 – 0,05 eV.

Vlastní aktivace probíhají jako jaderné reakce, které jsou uvedeny v tabulce 3.. U všech aktivací je velmi důležitá závislost mezi aktivitou zbytkového jádra, hustotou neutronového toku, účinným průřezem reakce, během které vznikají radioaktivní jádra, a počtem atomů izotopu, který je vystaven působení neutronů. Reakční rychlost potom určuje rychlost akumulace zbytkových jader, během které vznikají.[16]

2.1 Radioaktivní zákon

Konstanta λ vyjadřuje míru nestability radioaktivních materiálů. Pro každý nuklid nabývá jiné charakteristické hodnoty. V případě označení počtu atomů radionuklidů symbolem N a při rychlosti rozpadu dN/dt můžeme následně napsat

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = D \quad (2.1)$$

Z rovnice plyne, že počet rozpadů za čas je tedy úměrný celkovému počtu radioaktivních atomů. Přeměnová konstanta $\lambda[\text{s}^{-1}]$ nám právě představuje tuto úměrnost. [23]

Integrální tvar stejné diferenciální rovnice se píše jako

$$N(t) = N^0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

N [at·bcm⁻¹] představuje počet atomů v čase t , N^0 představuje počet atomů v čase 0 a λ přeměnovou konstantu. Po složení rovnic (2.1) a (2.2) dostáváme tvar rovnice

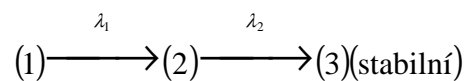
$$D(t) = D^0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

Výpočet aktivity je pak dán následujícícm vztahem:

$$A = \lambda N \quad (2.4)$$

2.1.1 Vznik dceřiných nuklidů

Rozpad radioaktivního druhu, který vyprodukuje jiný druh je znázorněn na následujícím schématu.



Rovnice popisující tento děj bude mít v diferenciálním stavu následující tvar.

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \quad (2.5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.6)$$

Po úpravách a použitím rovnice (2.2) dostáváme výsledný tvar rovnice

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t}. \quad (2.7)$$

Obecný tvar této rovnice se zapíše ve tvaru

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q. \quad (2.8)$$

Jedná se o tzv. Leibnitzovu rovnici, kde P a Q jsou funkcemi x a y , nebo jsou konstantami. Po provedení integrace a úpravách ve smyslu rovnice (2.7) vzniká další rovnice, která obecně popisuje rozklad radionuklidu v radionuklid jiný.

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad N_2^0 = 0, t=0 \quad (2.9)$$

V případě, kdy se poločas rozpadu mateřské frakce liší od poločasu dceřiné ($T_1=5$ hodin; $T_2=0,5$ hodiny), je $e^{-\lambda_2 t}$ v rovnici (2.9) zanedbatelné a po úpravách vzniká výraz

$$A_2 \approx \frac{10}{9} \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t}. \quad (2.10)$$

Takové způsoby výpočtů se používají pro určení přechodné rovnováhy. Pro malé rozdíly poločasů výraz $e^{-\lambda_2 t}$ nezaniká a výsledné A_2 se spočítá po dosazení rovnice (2.8) do rovnice (2.4).

V případech, kdy se poločas rozpadu mateřské frakce zdatelně liší od poločasu rozpadu dceřiné ($T_1 \gg T_2$), zcela zaniká exponenciála a aktivita mateřské frakce se stává konstantním ($N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$; $A_1 = \text{konst} = R$). Aktivita dceřiné frakce se získá následujícím výpočtem:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t}) \approx \frac{R}{\lambda_2}; A_2 = R \quad (2.11)$$

Pro malé časy t se použije obecný tvar rovnice (2.7) pro sumarizaci N_2 a A_2 [$\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$]. Výsledný tvar upravené rovnice je potom

$$N_2 \approx \frac{R}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.12)$$

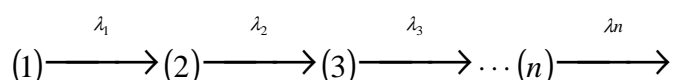
$$A_2 = R(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.13)$$

Tento způsob výpočtu se používá pro určení dlouhotrvající rovnováhy.

Pro vícenásobné radioaktivní rozpady prvků vznikají složitější rovnice, které budou pro představu znázorněny v následujícím textu.

2.1.2 Vícenásobný rozpad

Následující schéma názorně ukazuje tyto rozpady, které budou následně popsány diferenciálními rovnicemi.



$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \quad (2.14)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.15)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.16)$$

Řešení těchto rovnic o n členech, které definoval H. Bateman, za předpokladu, že v čase $t=0$ budou mateřská jádra rovna 0 ($N_2^0 = N_3^0 = \dots N_n^0 = 0$), je uvedeno níže.

$$N_n(t) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1} N_1^0 \sum_{i=1}^{i=n} C_i e^{-\lambda_i t}, \quad (2.17)$$

kde C_i je

$$C_i = \prod_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j - \lambda_i} \quad i \neq j. \quad (2.18)$$

2.1.3 Transformace v neutronový tok

Transformační rovnice, které budou uvedeny níže, jsou určeny pro výpočet neutronového toku. Jsou ovšem využitelné pro jakýkoliv případ výpočtu aktivace. Nejprve bude uveden případ pro jednoduchý řetězec. [23]

2.1.3.1 Jednoduchý řetězec

Principiální schéma transformace tohoto řetězce pro tento případ je uvedeno níže.

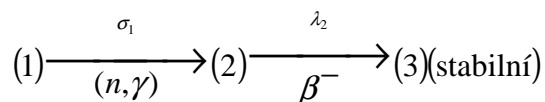


Schéma popisuje vznik radioaktivního nuklidu (2) vlivem jaderné reakce, v tomto případě (n, γ) , z nuklidu (1), jehož účinný průřez je σ_1 , a následným radioaktivním rozpadem s rozpadovou konstantou λ_2 na stabilní nuklid (3).

Růst nuklidů je během ozařování úměrný účinnému průřezu σ_1 , neutronovému toku φ a počtu atomů N_1 . Předpoklad je takový, že během ozařování zůstává počet atomů stejný ($N_1^0 \approx N_1$). Zároveň se uvažuje, že rozpad jádra (2) závisí na rychlosti $\lambda_2 N_2$.

Použitím rovnice (2.8) a předchozí úvahy dostáváme následující řešení ve tvaru

$$\frac{dN_2}{dt_b} = \varphi \sigma_1 N_1^0 - \lambda_2 N_2, \quad (2.19)$$

kde čas t je čas ozařování materiálu UOS, ve kterém je skladováno vyhořelé palivo. Řešení této rovnice vychází z rovnice

$$N_2(t_b) = e^{-\lambda_2 t_b} \int \varphi \sigma_1 N_1^0 e^{\lambda_2 t_b} + C e^{-\lambda_2 t_b} , \quad (2.20)$$

kteřá po úpravách přechází do tvaru

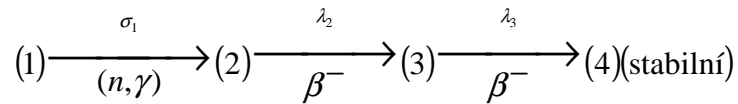
$$N_2(t_b) = \frac{\varphi \sigma_1 N_1^0}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_b}) \quad (2.21)$$

Rychlost rozpadu, jako funkce doby ozařování, po úpravách rovnice (2.18), je dána vztahem

$$D_2(t_b, t) = \lambda_2 N_2(t_b) = \varphi \sigma_1 N_1^0 [1 - e^{-\lambda_2 t_b}] \cdot e^{-\lambda_2 t} \quad (2.22)$$

2.1.3.2 Růst dceřiných nuklidů v neutronovém toku

Tuto praktickou transformaci, která je znázorněná na následujícím schématu



lze popsat opět použitím a úpravou rovnice (2.8). Vzniká diferenciální rovnice v následujícím tvaru

$$\frac{dN_3}{dt_b} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.23)$$

Po dosazení rovnice (2.20) do předchozí rovnice (2.22) získáme obecný tvar rovnice vycházející z Leibnitzovy rovnice.

$$\frac{dN_3}{dt_b} = \varphi \sigma_1 N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t_b}) - \lambda_3 N_3 \quad (2.24)$$

Integrací předchozí rovnice a po následných úpravách ($N_3^0 = 0$) dostáváme rovnici

$$N_3(t_b) = \frac{\varphi \sigma_1 N_1^0}{\lambda_3(\lambda_3 - \lambda_2)} [\lambda_3 (1 - e^{-\lambda_2 t_b}) - \lambda_2 (1 - e^{-\lambda_3 t_b})] \quad (2.25)$$

Pro výpočet rozpadové rychlosti v závislosti na době ozařování je použita následující rovnice, která je úpravou rovnice (2.24)

$$D_3(t_b) = \frac{\varphi \sigma_1 N_1^0}{\lambda_3 - \lambda_2} [\lambda_3 (1 - e^{-\lambda_2 t_b}) - \lambda_2 (1 - e^{-\lambda_3 t_b})] \quad (2.26)$$

2.2 Reakce bóru

Pro případ v této diplomové práci jsou nejdůležitější reakce, které nějak zásadně ovlivní vlastnosti chemického prvku bóru. V potaz jsou brány pouze ty izotopy, které mají přírodní

zastoupení, tedy izotop ^{10}B a ^{11}B . Tyto reakce byly dohledány pomocí programu JANIS, z kterého byly následně dohledány účinné průřezy. Mezi nejvíce zásadní reakce tedy patří $(n, \gamma)=102$, $(n, p)=103$, $(n, d)=104$, $(n, \alpha)=107$, $(n, t+2\alpha)=113$. O jaký druh reakcí jde, je popsáno na začátku kapitoly 2. Číselné označení 103-107 je označení MT pro reakce formátu ENDF-6, ve kterém jsou ukládána jaderná data.

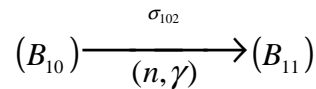
Použitím a úpravou rovnic z předchozích kapitol dostáváme následující tvary rovnic pro zmíněné reakce izotopů bóru.

$$\frac{dN_{B10}(t)}{dt} = -\sum_i \int \varphi(E)\sigma_i(E)dEN_{B10}(t), \quad (2.27)$$

kde $i= 102, 103, 104, 107, 113$.

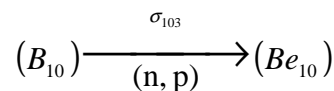
$$N_{B10}(t) = N_{B10}(0)e^{(-\sum_i \int \varphi(E)\sigma_i(E)dE)\cdot t} \quad (2.28)$$

$i=102$



$$\frac{dN_{B11}(t)}{dt} = \int \varphi(E)\sigma_{102}(E)dEN_{B10}(t) - \lambda_{B11}N_{B11}(t) \quad (2.29)$$

$i=103$



$$\frac{dN_{Be10}(t)}{dt} = \int \varphi(E)\sigma_{103}(E)dEN_{B10}(t) - \lambda_{Be10}N_{Be10}(t) \quad (2.30)$$

Izotop B-11 je stabilní, proto se zde $\lambda_{B11} = 0$

Obdobně by se stanovil výpočet pro reakce 104,107 a 113.

3 Serpent

Jedná se o tří-dimenzionální kontinuálně-energetický výpočetní kód vyhořívání. Byl navržen ve VTT (Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus) technickém výzkumném centru ve Finsku v roce 2004. Tento kód je naprogramován v jazyku C a běží na platformách Linux. Serpent je doporučen k využití pro studie palivových cyklů, zahrnujících výpočty vyhoření, vzdělávací účely a demonstraci jevů reaktorové fyziky a dále také například pro multi-fyzikální sdružené aplikace.

3.1 Definice palivových proutků

Pro definování palivového proutku, popřípadě centrální trubky, musíme znát jeho přesné rozměry včetně materiálů, ze kterých se skládá. Rozměry palivového proutku a centrální trubky již byly zmíněny výše. Níže si ukážeme, jak se takový proutek definuje včetně vysvětlení jednotlivých částí kódu.[24]

Pin <id>	číselné označení proutků, popřípadě trubky
mat ₁ <r ₁ >	název materiálu „mat1“ a jeho poloměr v cm
mat ₂ <r ₂ >	název materiálu, který se bude nacházet z vnější strany materiálu mat1 a jeho poloměr
mat _n <r _n >	

V případě, že v některé části PP je prázdný prostor, materiál nazveme void a dále nemusíme tento materiál definovat (prostor se chová jako vakuum). Následuje ukázka definice palivového proutku pro reaktor VVER 440:

```
pin 003 void 0.06 palivo1 0.38 void 0.3865 e110 0.455 voda
```

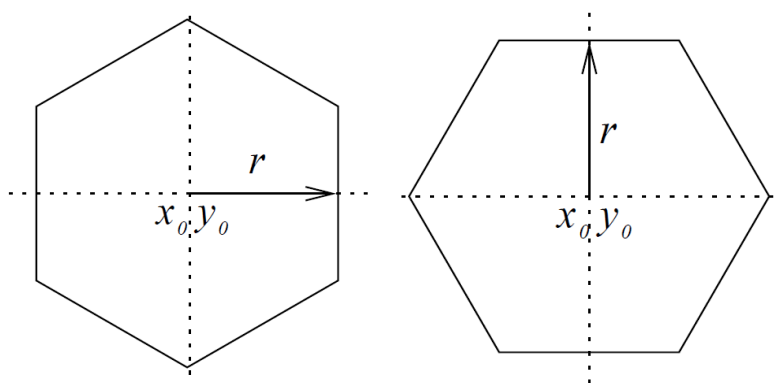
Definice PP odpovídá jeho dřívějšímu popisu v kapitole 1.4.

3.2 Definice rozložení palivových proutků v palivovém souboru

V předešlé kapitole byly nadefinovány PP a nyní se musí geometricky správně umístit do PS. K těmto účelům slouží tzv. mříže/matice (lattice). Opět bude ukázána definice lattice včetně vysvětlení jednotlivých příkazů.

Lat	označení matice- vždy stejné
<u _n >	číselné označení matice (1,2,3, ...)
<type>	typ matice (1,2,3)
<x ₀ >	souřadnice umístění matice ve směru osy x
<y ₀ >	souřadnice umístění matice ve směru osy y
<n _x >	počet prvků matice ve směru osy x
<n _y >	počet prvků matice ve směru osy y
<p>	rozteč mezi jednotlivými maticemi, tzv. pitch

Jsou 4 typy matic, jak lze vidět z popisu výše. Typ číslo 1 je čtvercová matice, která se například využívá pro PWR reaktory. Typ číslo 2 je hexagonální matice ve směru osy X a hexagonální matice ve směru osy Y je typ číslo 3. Typ matice 4 je kruhový a používán například pro modelaci reaktorů CANDU.



Obr. 7: Matice typu 2(vlevo) a typu 3(vpravo)

3.3 Definice rozhraní (povrchů) materiálů

Poté, co bylo nadefinováno rozložení PP v PS, je zapotřebí nadefinovat konstrukční rozhraní materiálů. V zásadě se definuje poloměr rozhraní a jeho tvar, které bude následně vyplněno seskupením PP nebo konkrétním materiálem. Jak se tato rozhraní definují, bude popsáno v následujícím příkladu.

Zápis definice rozhraní (surface) má následující tvar:

surf <id> <type> <param1> <param2> ...

<id> je číselné označení příslušného rozhraní

<type> je druh rozhraní

<param1>, <param2> jsou, jak už je z názvu patrné, parametry jednotlivých rozhraní

V následující tabulce budou uvedeny jednotlivé druhy rozhraní, včetně parametrů, které musejí být zadávány.

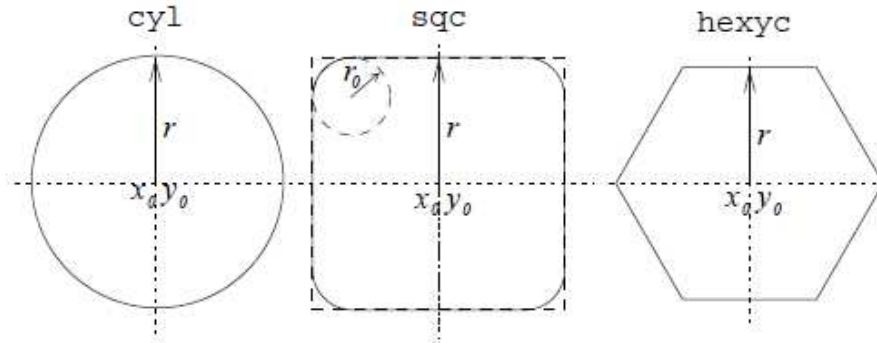
Tab. 5: Druhy rozhraní (povrchů), včetně popisu a jejich parametrů

Druh	Popis	Parametry
px	rovina kolmá na osu x	x ₀
py	rovina kolmá na osu y	y ₀
pz	rovina kolmá na osu z	z ₀
sph	koule	x ₀ , y ₀ , z ₀ , r
cyl	kruh rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r
sqc	čtverec rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r ₀ , r
cube	kostka	x ₀ , y ₀ , z ₀ , r
hexxc	šestihran rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r ₀ , r
hexyc	šestihran rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r ₀ , r
cross	kříž rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r ₀ , r, d
cone	kužel	x ₀ , y ₀ , r ₀ , r, h
dode	dvanáctihran rovnoběžný s osou z	x ₀ , y ₀ , r ₁ , r ₂

V diplomové práci jsou využity druhy rozhraní hexyc, sqc, cyl a zde je jejich krátký příklad, po kterém následují zobrazená tyto 3 rozhraní.

Surf 1 hexyc 0.0 0.0 7.1 – šestihran s počátkem v souřadnicích x = 0, y = 0
s poloměrem r = 7,1 cm

surf 6 cyl 0.0 0.0 26.0 – kruh s počátkem v souřadnicích $x = 0, y = 0$
s poloměrem $r = 26$ cm



Obr. 8: Rozhraní využitá pro modelování UOS pro VVER 440 a okolí HÚ

3.4 Definice buněk a jejich vyplnění

Poté, co je nadefinováno rozložení PP, rozhraní materiálů, se přistoupí k definici buněk (cell). Každá buňka je definována za použití kladných a záporných čísel rozhraní, kde kladná čísla znamenají směr ven z dané plochy a čísla se záporným znaménkem znamenají výplň směrem dovnitř plochy. Jak se tato definice zapisuje, bude uvedeno na následujícím příkladu.

Cell <name> <u0> <mat> <surf1> <surf2>

<name> je název buňky, v této DP jen číselné

<u0> je číslo „vesmíru“, kde budou buňky poskládány

<mat> název materiálu, kterým bude buňka vyplněna

<surf1> <surf2> je udané rozhraní, odkud kam bude buňka vyplněna

V případě, že má být buňka prázdná, tak se do kolonky <mat> píše příkaz *void*, v případě, že chceme vyplnit buňku maticí (lattice), zadává se *fill*. Pro okolí vně řešeného případu, které není pro výpočet nutné, se zadá *outside*.

Potřeba zavedení různých vesmírů (universe) se využívá tehdy, když je potřeba maticí, které je zaplněna PP (vzniká PS), dosadit do další matice, kde budou uloženy tyto matice (vzniká UOS). Pro lepší pochopení je nejlépe nahlédnout do přílohy.

Pár příkladů definování buněk:

cell 10 15 fill 8 -1 – buňka s označením 10 ve vesmíru 15, která bude vyplněna maticí 8 až do rozhraní 1, které je již nadefinováno

cell 30 15 e110 2 -3 – buňka s označením 30 ve vesmíru 15, která bude vyplněna materiálem E110, které bude mezi rozhraním 2 a 3.

3.5 Definice materiálů a jejich složení

Nedílnou součástí při sestavování modelu UOS v Serpentu je definice materiálů. Je potřeba znát složení všech materiálů, které jsou obsaženy v našem modelu. Poté se pro každý materiál do modelu vloží všechny jeho izotopy, které mají přírodní zastoupení.

Příklad definice materiálů bude uveden v následující ukázce.

```
Mat palivo2 sum
8016.03c 4.64119E-02
92235.03c 9.39631E-04
92238.03c 2.22663E-02
```

mat je označení pro definici materiálu

palivo2 je název materiálu

sum udává styl výpočtu z izotopového složení

Zde je definováno oxid uranu UO_2 s 4% obohacením uranu. 8016.03c odpovídá izotopu kyslíku, který má protonové číslo 8, přírodní zastoupení má v podobě izotopu s číslem 16, 03c je id označení, které se používá pro vyhodnocování dat z knihovny ENDF/B nebo pro teploty (09c=900 K).

Číslo 4.64119E-02 je atomová hustota pro izotop kyslíku, která se udává v jednotkách $1/(\text{barn} \cdot \text{cm})$. Pokud není známá atomová hustota, může se vypočítat podle následujícího vzorce:

$$N_i = \rho N_A \frac{W_i}{A_r} \quad (2.31)$$

kde ρ je hustota materiálu v g/cm^3 , N_A Avogadrovo číslo v kompatibilních jednotkách, W_i hmotnostní podíl prvku a A_r je relativní atomová hmotnost v g/mol . V případě, že má prvek přírodní zastoupení ve více izotopech, musí se ještě provést přepočítání hmotnostního podílu podle následujícího vzorce:

$$A_{f,i} = \frac{A_i}{A_r} A_{w,i} \quad , \quad (2.32)$$

kde A_i je atomová hmotnost i -tého nuklidu prvku, $A_{w,i}$ je hmotnostní podíl izotopu prvku v přírodním zastoupení.

Po přepočtu se dosadí výsledek do rovnice (2.26) a vzniká výsledný tvar:

$$N_i = \rho N_A \frac{W_i A_{f,i}}{A_r} \quad (2.33)$$

3.6 Detektory

Po nadefinování geometrie, včetně složení materiálů, jak je popsáno v předchozích kapitolách, zbývá nadefinovat detektory. Detektory slouží k výpočtu reakční rychlosti a pracují na principu odhadu srážek v neutronovém toku.

Výpočet v kódu Serpent je stanoven rovnicí

$$RR = \frac{1}{V} \int_V \int_{E_{i+1}}^{E_i} f(\mathbf{r}, E) \varphi(\mathbf{r}, E) d^3r dE \quad (2.34)$$

Odpovídající funkce $f(\mathbf{r}, E)$, prostorové a energetické domény jsou definovány pomocí parametrů:

`det <name> <param1> <param2>`

`<name>` je jméno příslušného detektoru (v DP číselné 1-35)

`<param1> <param2>` viz tabulka 5

Tab. 6: Druhy detektorů

Parametr	Druh	Význam
dr	Volba reakce	Určuje odpovídající funkce reakcí
dv	Objem detektoru	Používán pro normalizaci
dc	Detektor buněk (cell)	Definuje buňku, vesmír, mřížku, souřadnice, kde bude počítána reakční rychlost
du	Detektor vesmíru (universe)	
dm	Detektor materiálu	
dl	Detektor mříže/matice (lattice)	
de	Detektor volené energie pro funkci	
dx	Detektor souřadnice x	
dy	Detektor souřadnice y	
dz	Detektor souřadnice z	
dt	Typ detektoru	Speciální typ detektoru

Volba reakce je potřebná zadat, aby reakční rychlost odpovídala tomu, čemu má odpovídat. V kapitole 2.2 byly zmíněny reakce (n, γ) , (n, p) , (n, d) , (n, α) , $(n, t+2\alpha)$ a jejich číselné označení (102, 103, 104, 107, 113). Toto číselné označení právě využijeme v Serpentu.

Vzor definice reakce:

```
det <name> dr <mt> <mat>
```

<name> jméno detektoru

<mt> volba příslušné reakce (v této DP 102-113)

<mat> název materiálu v kterém bude počítána reakční rychlost (v této DP izotop bóru B)

Před samotnou definicí detektoru je potřeba nadefinovat meze integrálu (E_i , E_{i+1}), také jinak energii v MeV.

Vzor definice mezí energie:

```
ene <name> 1 <E1> <E2>
```

<name> název rozhraní energií

<E1> dolní mez

<E2> horní mez

Příklad definice detektoru:

```
ene 1 1 1E-11 20.0
```

```
mat B10 1.0 5010.03c 1
```

```
det 1 de 1 dm alum1 dr 102 B10 dv 2.68191E+02
```

Hranice energie nastavená od 1e-11 do 20 MeV, materiál, v kterém bude probíhat reakce nastaven jako izotop bóru B-10.

Detektor s názvem 1, který je umístěn do materiálu alum1, bude zde probíhat reakce (n, γ) s odkazem na zmiňovaný izotop bóru. Normalizováno pro objem detektoru s výškou 1cm. [24]

Pro lepší představu je celý vstupní soubor v příloze.

4 Změny během vyhořívání

V následující kapitole budou popsány změny probíhající během vyzařování v jaderném palivu, dále reakční rychlosti pro izotop bóru B-10, určení koncentrace bóru v hexagonálních trubkách a výpočet podkritičnosti v období 0 (65 let po vyjmutí paliva z reaktoru) až 1 000 000 let skladování paliva v HÚ.

4.1 Vyhořelé jaderné palivo

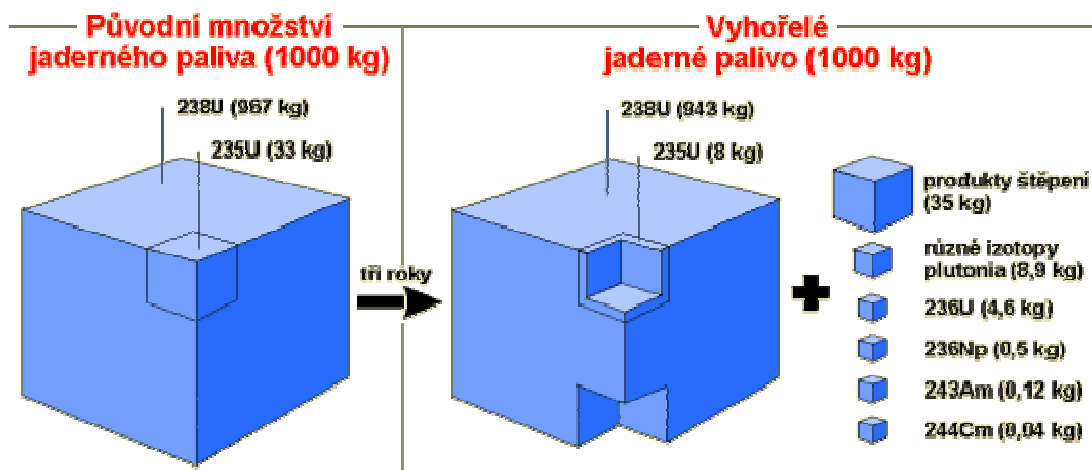
Čerstvé jaderné palivo, které je zaváženo do reaktoru se skládá z izotopů uranu 235 a 238. Po vyjmutí vyhořelého jaderného paliva se jeho složení zásadně mění. Vzniklé produkty se dají rozdělit do tří skupin. První z nich jsou aktivační, jejichž vznik je závislý na konstrukčním materiálu. Další skupinou jsou aktinidy, a poslední jsou štěpné produkty včetně jejich dceřiných produktů. Poslední skupina produktů je ta nejnebezpečnější pro okolí a má ve vyhořelém jaderném palivu 3% zastoupení. Tyto produkty jsou velice radioaktivní a produkují všechny druhy záření (α , β , γ) [19][20][21]

Následující tabulky zobrazují vzniklé produkty 2. A 3. Skupiny:

Tab. 7: Produkty vzniklé během vyhořívání paliva

Aktinidy	U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-242m, Am-243
Štěpné produkty	Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Nd-143, Nd-145, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Eu-151, Eu-153, Gd-155

Nuklidy uvedené v předchozí tabulce byly vybrány z celé knihovny (3820), které jsou v palivu, jelikož nejvýrazněji ovlivňují podkritičnost a byly vybrány pro metodu *burnup credit* (výpočet podkritičnosti s několika nuklidy v palivu)



Obr. 9: Rozdíl složení mezi čerstvým a vyhořelým jaderným palivem[22]

4.2 Reakční rychlosti

Určení RR během skladování paliva spočteno pomocí Serpentu použitím 20 000 neutronů v určitých letech skladování při dosažení relativní statistické chyby maximálně 0,75%. Výpočet je prováděn pro vyhoření 25 000 MWd/MTU a pro maximální vyhoření, tj. 58500 MWd/MTU [7]. Výpočet RR byl prováděn s uvažováním vyplnění UOS vzduchem. Získané hodnoty RR jsou znázorněny v následující tabulce:

Tab. 8: Reakční rychlosti v PS pro různé reakce s vyhořením 58500 MWd/MTU

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
1	58500	102	5,64935E-06	8,23512E-25	0
1	58500	103	1,38888E-05	2,02459E-24	0
1	58500	104	1,09048E-06	1,58961E-25	0
1	58500	107	4,38581E-02	6,39325E-21	0
1	58500	113	5,34081E-05	7,78536E-24	0
2	58500	102	5,65673E-06	8,24588E-25	0
2	58500	103	1,38725E-05	2,02221E-24	0
2	58500	104	1,08401E-06	1,58017E-25	0
2	58500	107	4,39146E-02	6,40148E-21	0
2	58500	113	5,33130E-05	7,77150E-24	0
3	58500	102	5,60871E-06	8,17588E-25	0
3	58500	103	1,38477E-05	2,01860E-24	0
3	58500	104	1,08481E-06	1,58134E-25	0

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
3	58500	107	4,35444E-02	6,34752E-21	0
3	58500	113	5,32623E-05	7,76411E-24	0
4	58500	102	3,47337E-06	5,06317E-25	0
4	58500	103	1,93808E-05	2,82516E-24	0
4	58500	104	1,54183E-06	2,24754E-25	0
4	58500	107	2,72327E-02	3,96974E-21	0
4	58500	113	7,49638E-05	1,09276E-23	0
5	58500	102	5,67462E-06	8,27196E-25	0
5	58500	103	1,38136E-05	2,01362E-24	0
5	58500	104	1,07233E-06	1,56315E-25	0
5	58500	107	4,40512E-02	6,42139E-21	0
5	58500	113	5,31011E-05	7,74061E-24	0
6	58500	102	5,61009E-06	8,17789E-25	0
6	58500	103	1,38767E-05	2,02282E-24	0
6	58500	104	1,08614E-06	1,58328E-25	0
6	58500	107	4,35552E-02	6,34909E-21	0
6	58500	113	5,34000E-05	7,78418E-24	0
7	58500	102	5,63845E-06	8,21923E-25	0
7	58500	103	1,38403E-05	2,01752E-24	0
7	58500	104	1,07554E-06	1,56783E-25	0
7	58500	107	4,37736E-02	6,38093E-21	0
7	58500	113	5,31960E-05	7,75444E-24	0
1	58500	102	6,29298E-06	1,46756E-27	1,00E+06
1	58500	103	1,36370E-05	3,18023E-27	1,00E+06
1	58500	104	1,02595E-06	2,39258E-28	1,00E+06
1	58500	107	4,88165E-02	1,96940E-22	1,00E+06
1	58500	113	5,22342E-05	1,21813E-26	1,00E+06
2	58500	102	6,27745E-06	1,46394E-27	1,00E+06
2	58500	103	1,36723E-05	3,18846E-27	1,00E+06
2	58500	104	1,00588E-06	2,34577E-28	1,00E+06
2	58500	107	4,86980E-02	1,13567E-23	1,00E+06
2	58500	113	5,23084E-05	1,21986E-26	1,00E+06
3	58500	102	6,30567E-06	1,47052E-27	1,00E+06
3	58500	103	1,37041E-05	3,19588E-27	1,00E+06
3	58500	104	1,02383E-06	2,38763E-28	1,00E+06
3	58500	107	4,89162E-02	1,14076E-23	1,00E+06

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
3	58500	113	5,25267E-05	1,22495E-26	1,00E+06
4	58500	102	4,05365E-06	9,45336E-28	1,00E+06
4	58500	103	1,93117E-05	4,50361E-27	1,00E+06
4	58500	104	1,47771E-06	3,44611E-28	1,00E+06
4	58500	107	3,17091E-02	7,39476E-24	1,00E+06
4	58500	113	7,44191E-05	1,73550E-26	1,00E+06
5	58500	102	6,29896E-06	1,46896E-27	1,00E+06
5	58500	103	1,37597E-05	3,20885E-27	1,00E+06
5	58500	104	1,02754E-06	2,39629E-28	1,00E+06
5	58500	107	4,88656E-02	1,13958E-23	1,00E+06
5	58500	113	5,27005E-05	1,22901E-26	1,00E+06
6	58500	102	6,31154E-06	1,47189E-27	1,00E+06
6	58500	103	1,37623E-05	3,20945E-27	1,00E+06
6	58500	104	1,03581E-06	2,41557E-28	1,00E+06
6	58500	107	4,89623E-02	1,14183E-23	1,00E+06
6	58500	113	5,26856E-05	1,22866E-26	1,00E+06
7	58500	102	6,34219E-06	1,47904E-27	1,00E+06
7	58500	103	1,38119E-05	3,22102E-27	1,00E+06
7	58500	104	1,03154E-06	2,40561E-28	1,00E+06
7	58500	107	4,92000E-02	1,14737E-23	1,00E+06
7	58500	113	5,29115E-05	1,23393E-26	1,00E+06

Tab. 9: Reakční rychlosti v PS pro různé reakce s vyhořením 25000 MWd/MTU

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
1	25000	102	5,64324E-06	8,22622E-25	0
1	25000	103	1,37401E-05	2,00291E-24	0
1	25000	104	1,06278E-06	1,54923E-25	0
1	25000	107	4,38106E-02	6,38632E-21	0
1	25000	113	5,28646E-05	7,70613E-24	0
2	25000	102	5,60333E-06	8,16804E-25	0
2	25000	103	1,37349E-05	2,00215E-24	0
2	25000	104	1,06897E-06	1,55825E-25	0
2	25000	107	4,35029E-02	6,34147E-21	0
2	25000	113	5,27948E-05	7,69596E-24	0
3	25000	102	5,65842E-06	8,24835E-25	0

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
3	25000	103	1,37328E-05	2,00185E-24	0
3	25000	104	1,05592E-06	1,53923E-25	0
3	25000	107	4,39272E-02	6,40332E-21	0
3	25000	113	5,28377E-05	7,70221E-24	0
4	25000	102	3,47312E-06	5,06281E-25	0
4	25000	103	1,89900E-05	2,76819E-24	0
4	25000	104	1,48521E-06	2,16501E-25	0
4	25000	107	2,72253E-02	3,96866E-21	0
4	25000	113	7,33617E-05	1,06940E-23	0
5	25000	102	5,63708E-06	8,21724E-25	0
5	25000	103	1,37001E-05	1,99708E-24	0
5	25000	104	1,06600E-06	1,55392E-25	0
5	25000	107	4,37617E-02	6,37919E-21	0
5	25000	113	5,26184E-05	7,67025E-24	0
6	25000	102	5,65025E-06	8,23644E-25	0
6	25000	103	1,36756E-05	1,99351E-24	0
6	25000	104	1,05844E-06	1,54290E-25	0
6	25000	107	4,38639E-02	6,39409E-21	0
6	25000	113	5,25031E-05	7,65344E-24	0
7	25000	102	5,61292E-06	8,18202E-25	0
7	25000	103	1,36577E-05	1,99090E-24	0
7	25000	104	1,05058E-06	1,53144E-25	0
7	25000	107	4,35743E-02	6,35188E-21	0
7	25000	113	5,24328E-05	7,64319E-24	0
1	25000	102	6,02950E-06	1,40612E-27	1,00E+06
1	25000	103	1,36429E-05	3,18161E-27	1,00E+06
1	25000	104	1,03019E-06	2,40247E-28	1,00E+06
1	25000	107	4,67877E-02	1,96940E-22	1,00E+06
1	25000	113	5,23155E-05	1,22003E-26	1,00E+06
2	25000	102	6,05361E-06	1,41174E-27	1,00E+06
2	25000	103	1,36770E-05	3,18956E-27	1,00E+06
2	25000	104	1,03503E-06	2,41375E-28	1,00E+06
2	25000	107	4,69734E-02	1,09545E-23	1,00E+06
2	25000	113	5,24668E-05	1,22356E-26	1,00E+06
					1,00E+06
3	25000	102	6,08102E-06	1,41813E-27	1,00E+06
3	25000	103	1,36178E-05	3,17575E-27	1,00E+06

PS	Vyhoření [MWd/MTU]	Reakce	RR_Serpent	RR_přepočet [$10^{-24} \text{ at}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ cm}^3$]	Doba uložení [roky]
3	25000	104	1,02255E-06	2,38465E-28	1,00E+06
3	25000	107	4,71845E-02	1,10037E-23	1,00E+06
3	25000	113	5,22218E-05	1,21784E-26	1,00E+06
4	25000	102	3,84081E-06	8,95701E-28	1,00E+06
4	25000	103	1,89221E-05	4,41275E-27	1,00E+06
4	25000	104	1,46240E-06	3,41041E-28	1,00E+06
4	25000	107	3,00611E-02	7,01043E-24	1,00E+06
4	25000	113	7,29115E-05	1,70034E-26	1,00E+06
5	25000	102	6,04026E-06	1,40863E-27	1,00E+06
5	25000	103	1,36058E-05	3,17296E-27	1,00E+06
5	25000	104	1,02873E-06	2,39906E-28	1,00E+06
5	25000	107	4,68691E-02	1,09302E-23	1,00E+06
5	25000	113	5,21180E-05	1,21542E-26	1,00E+06
6	25000	102	6,02392E-06	1,40482E-27	1,00E+06
6	25000	103	1,35821E-05	3,16743E-27	1,00E+06
6	25000	104	1,02116E-06	2,38141E-28	1,00E+06
6	25000	107	4,67435E-02	1,09009E-23	1,00E+06
6	25000	113	5,19616E-05	1,21178E-26	1,00E+06
7	25000	102	6,00239E-06	1,39979E-27	1,00E+06
7	25000	103	1,36683E-05	3,18753E-27	1,00E+06
7	25000	104	1,03368E-06	2,41061E-28	1,00E+06
7	25000	107	4,65794E-02	1,08626E-23	1,00E+06
7	25000	113	5,23137E-05	1,21999E-26	1,00E+06

Hodnoty RR v době skladování po 0 a po 1 000 000 letech se liší o v jednotkách %, proto bude uvažován lineární průběh mezi těmito lety. Pomocí lineární interpolace jsou doloženy další hodnoty RR, které jsou následně využity pro určení koncentrace B-10 v hexagonální trubce.

Z tabulek je dále patrné, že největší vliv bude mít reakce 107(z, α), proto budou lineární interpolace tvořeny právě z těchto reakcí pro všech 7 hexagonálních trubek.

Přepočtené hodnoty vychází ze vzorce

$$RR = RR_{DET} \frac{N_{SRC}}{(1-0,2)} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-24}}{248}, \quad (2.35)$$

kde RR_{det} značí RR spočtenou Serpentem pomocí detektorů, N_{SRC} vydatnost neutronového zdroje závislá na čase, která byla odečtena z tabulek pro palivo Gd2m [7], $1/(1-02)=k$ je konzervativní hodnota podkritického násobení, 248 udává výšku sloupce uranového paliva v cm a koeficient $1 \cdot 10^{-24}$ slouží pro přepočítání barn na cm^2 .

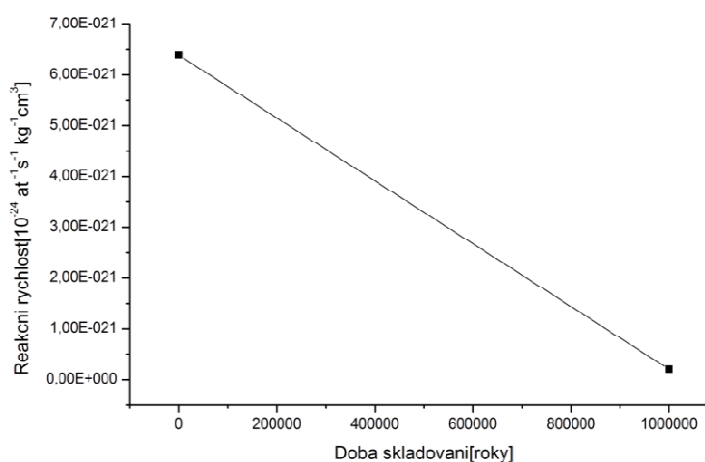
4.3 Změny bóru v hexagonálních trubkách

Reakční rychlosti, které byly vypočítány v předchozí kapitole pomocí Serpentu a uvedených vzorců, použijeme pro výpočet koncentrace izotopu bóru B-10 v 7 hexagonálních trubkách. Pro výpočet koncentrace použijeme následující vzorec:

$$N = N_0 e^{-RR(t_1-t_2)T}, \quad (2.36)$$

kde N_0 je počáteční koncentrace vypočtená pomocí rovnic (2.31) - (2.33), RR vypočtená pomocí rovnice (2.30), t_1-t_2 je rozdíl dob uložení VJP v UOS v HÚ a T je délka roku v sekundách.

Hodnoty RR byly pro rok 0 a 1e6 uložení spočteny pomocí Serpentu. Ostatní hodnoty, jak bylo zmíněno v kapitole 4.2., byly dopočteny pomocí lineární interpolace, která byla provedena v programu OriginLab.



Obr. 10: Lineární průběh RR v době skladování 0-1 000 000 let

V následující tabulce jsou uvedeny RR získané pomocí interpolace a dopočtené hodnoty koncentrace bóru pro vyhoření 58500 MWd/MTU.

Tab. 10: Reakční rychlostí interpolací, koncentrace izotopu bóru B-10 v PS 1

Doba uložení [roky]	Koncentrace B-10 [at·bcm ⁻¹]	RR _{interpolace} [10 ⁻²⁴ at ⁻¹ s ⁻¹ kg ⁻¹ cm ³]	PS
0	1,171190000000000E-04	6,39300E-21	1
10	1,17118999999764E-04	6,39318E-21	1
20	1,17118999999528E-04	6,39312E-21	1
50	1,17118999998819E-04	6,39294E-21	1
100	1,17118999997639E-04	6,39263E-21	1
200	1,17118999995278E-04	6,39201E-21	1
500	1,17118999988197E-04	6,39015E-21	1
1000	1,17118999976402E-04	6,38705E-21	1
2000	1,17118999952835E-04	6,38085E-21	1
5000	1,17118999882338E-04	6,36226E-21	1
8000	1,17118999812048E-04	6,34368E-21	1
10000	1,17118999765279E-04	6,33128E-21	1
15000	1,17118999648930E-04	6,30030E-21	1
20000	1,17118999533152E-04	6,26932E-21	1
25000	1,17118999417947E-04	6,23834E-21	1
30000	1,17118999303313E-04	6,20736E-21	1
40000	1,17118999076335E-04	6,14539E-21	1
45000	1,17118998963419E-04	6,11441E-21	1
50000	1,17118998851074E-04	6,08343E-21	1
100000	1,17118997784841E-04	5,77362E-21	1
500000	1,17118992916722E-04	3,29509E-21	1
1000000	1,17118992553026E-04	1,96940E-22	1

Obdobné hodnoty jsou získány pro PS 2-7. Vyjimku tvoří PS 4, který se nachází uprostřed UOS mezi zbylými 6 soubory. Hodnoty RR se zde liší až o polovinu. Na výsledku koncentrace izotopu bóru to zdaleka nemá takový vliv, protože se jedná o velmi malá čísla.

Tab. 11: Reakční rychlostí interpolací, koncentrace izotopu bóru B-10 v PS 4

Doba uložení [roky]	Koncentrace B-10 [at·bcm ⁻¹]	RR _{interpolace} [10 ⁻²⁴ at ⁻¹ s ⁻¹ kg ⁻¹ cm ³]	PS
0	1,171190000000000E-04	3,969740E-21	4
10	1,171189999998530E-04	3,969700E-21	4
20	1,171189999997070E-04	3,969660E-21	4
50	1,171189999992670E-04	3,969540E-21	4
100	1,171189999985340E-04	3,969350E-21	4

Doba uložení [roky]	Koncentrace B-10 [at·bcm ⁻¹]	RR _{interpolace} [10 ⁻²⁴ at ⁻¹ s ⁻¹ kg ⁻¹ cm ³]	PS
200	1,171189999970680E-04	3,968950E-21	4
500	1,171189999926720E-04	3,967760E-21	4
1000	1,171189999853480E-04	3,965780E-21	4
2000	1,171189999707150E-04	3,961820E-21	4
5000	1,171189999269480E-04	3,949930E-21	4
8000	1,171189998833130E-04	3,938040E-21	4
10000	1,171189998542820E-04	3,930120E-21	4
15000	1,171189997820690E-04	3,910310E-21	4
20000	1,171189997102220E-04	3,890500E-21	4
25000	1,171189996387400E-04	3,870680E-21	4
30000	1,171189995676250E-04	3,850870E-21	4
40000	1,171189994268580E-04	3,811250E-21	4
45000	1,171189993568400E-04	3,791440E-21	4
50000	1,171189992871880E-04	3,771630E-21	4
100000	1,171189986272570E-04	3,573510E-21	4
500000	1,171189956893710E-04	1,988570E-21	4
1000000	1,171189956757150E-04	7,394760E-24	4

Z vypočtených hodnot uvedených v tabulkách lze vidět, že koncentrace bóru poklesne za milion let jen o nepatrné množství, konkrétně o 4,324284691176880E-12 v případě PS 4.

Hodnoty koncentrací a RR pro zbylé PS jsou uvedeny v příloze.

4.4 Podkritičnost ukládacího obalového souboru

Po dopočtení jednotlivých koncentrací pro příslušné vyhoření v příslušném časovém intervalu zbývá ověřit, zdali jsou veškerá konstrukční opatření dostačující pro to, aby se nám koeficient podkritičnosti (k_{eff}) držel v takových mezích, aby nedocházelo k dalším štěpným reakcím. Hodnota dle limit SÚJB má být menší než 0,95.

Při výpočtu k_{eff} je uvažováno několik možných případů. V prvním případě je uvažována změna paliva i koncentrace bóru. V druhém případě je uvažována změna paliva, koncentrace bóru zůstává během 1 000 000 let konstantní. Poslední uvažovaný případ je čerstvé palivo (vyhoření 0 MWd/MTU) a koncentrace bóru se mění, stejně jako bylo spočteno pro vyhoření 58500 MWd/MTU. Prakticky poslední případ nemůže nastat, je s ním ovšem z bezpečnostních hledisek uvažováno při výpočtech jako s nejhorší variantou. Pro všechny

počítané případy je uvažováno zaplavení UOS vodou. Zaplavení vodou je v tomto případě uvažována jako konzervativně nejhorší varianta.

V následující tabulce budou uvedeny k_{eff} pro jednotlivé případy.

Tab. 12: k_{eff} pro různá vyhoření

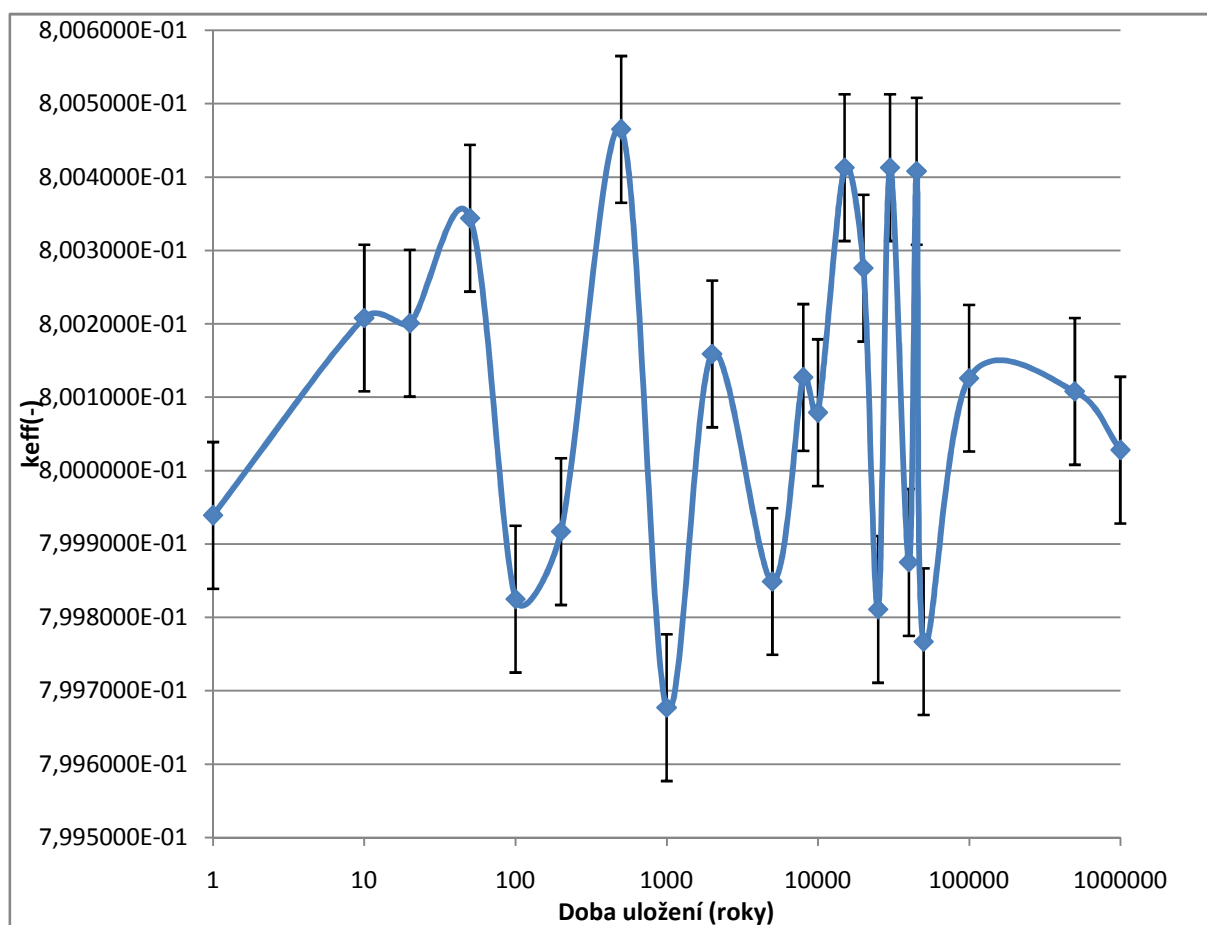
Vyhoření 0 MWd/MTU			
Doba uložení [roky]	k_{eff}		
0	7,999390E-01		
10	8,002080E-01		
20	8,002010E-01		
50	8,003440E-01		
100	7,998250E-01		
200	7,999170E-01		
500	8,004650E-01		
1000	7,996770E-01		
2000	8,001590E-01		
5000	7,998490E-01		
8000	8,001270E-01		
10000	8,000790E-01		
15000	8,004130E-01		
20000	8,002760E-01		
25000	7,998110E-01		
30000	8,004130E-01		
40000	7,998750E-01		
45000	8,004080E-01		
50000	7,997670E-01		
100000	8,001260E-01		
500000	8,001080E-01		
1000000	8,000280E-01		
Vyhoření 25000 MWd/MTU			
Bór vyhořívá		Bór nevyhořívá	
Doba uložení [roky]	k_{eff}	Doba uložení [roky]	k_{eff}
0	7,169120E-01	0	7,169120E-01
10	7,16141E-01	10	7,160400E-01
20	7,16426E-01	20	7,164190E-01
50	7,16244E-01	50	7,166230E-01
100	7,17003E-01	100	7,172490E-01
200	7,18962E-01	200	7,191110E-01
500	7,19277E-01	500	7,188810E-01
1000	7,27140E-01	1000	7,267690E-01
2000	7,30292E-01	2000	7,302920E-01

Doba uložení [roky]	Koncentrace B-10 [at·bcm ⁻¹]	RR _{interpolace} [10 ⁻²⁴ at ⁻¹ s ⁻¹ kg ⁻¹ cm ³]	PS
5000	7,33561E-01	5000	7,335610E-01
8000	7,35084E-01	8000	7,353820E-01
10000	7,36115E-01	10000	7,361720E-01
15000	7,37088E-01	15000	7,376900E-01
20000	7,36665E-01	20000	7,368060E-01
25000	7,35549E-01	25000	7,355490E-01
30000	7,32920E-01	30000	7,331740E-01
40000	7,29019E-01	40000	7,285650E-01
45000	7,26397E-01	45000	7,265780E-01
50000	7,23937E-01	50000	7,244340E-01
100000	7,11713E-01	100000	7,117130E-01
500000	7,105640E-01	500000	7,104330E-01
1000000	7,119660E-01	1000000	7,120840E-01
Vyhoření 58500 MWd/MTU			
Bór vyhořívá		Bór nevyhořívá	
Doba uložení [roky]	k _{eff}	Doba uložení [roky]	k _{eff}
0	5,428900E-01	0	5,428900E-01
10	5,418970E-01	10	5,416890E-01
20	5,410550E-01	20	5,411860E-01
50	5,412950E-01	50	5,411990E-01
100	5,425610E-01	100	5,428130E-01
200	5,461070E-01	200	5,461700E-01
500	5,532810E-01	500	5,534070E-01
1000	5,542230E-01	1000	5,545590E-01
2000	5,655250E-01	2000	5,655000E-01
5000	5,692840E-01	5000	5,692840E-01
8000	5,705310E-01	8000	5,703560E-01
10000	5,699110E-01	10000	5,700260E-01
15000	5,690030E-01	15000	5,690340E-01
20000	5,660000E-01	20000	5,654860E-01
25000	5,618970E-01	25000	5,613430E-01
30000	5,562680E-01	30000	5,560170E-01
40000	5,558020E-01	40000	5,559790E-01
45000	5,390600E-01	45000	5,394300E-01
50000	5,388530E-01	50000	5,389590E-01
100000	5,033120E-01	100000	5,030590E-01
500000	4,995700E-01	500000	4,990860E-01
1000000	5,033260E-01	1000000	5,033180E-01

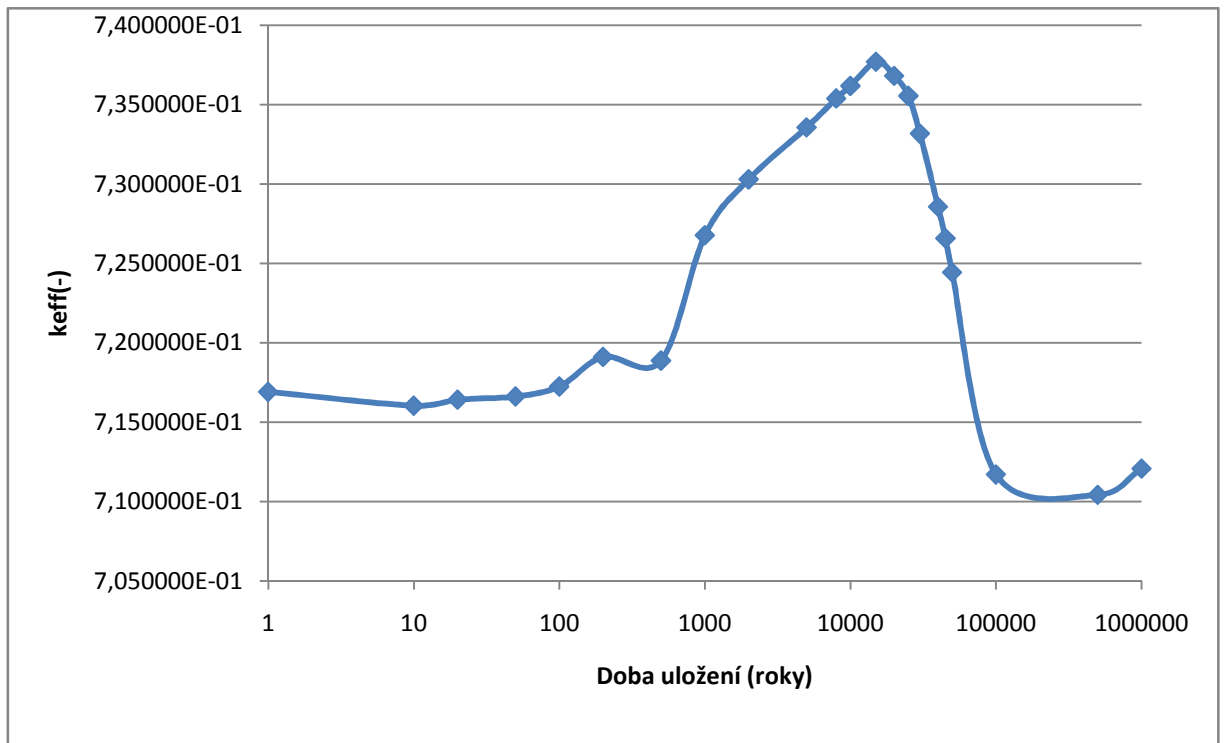
Ze získaných hodnot, které byly spočteny pomocí Serpentu je vidět, že k_{eff} se pohybuje maximálně do hodnoty přibližně 0,8 s relativní statistickou chybou v rozmezí od 0,027 do 0,030 %. Tato hodnota zajišťuje podkritičnost během celé doby uložení v HÚ. Legislativné limit je 0,95 a je tedy s rezervou splněn. Z výsledků lze konstatovat, že nebude docházet k žádným dalším řetězovým štěpným reakcím. Pro lepší představu jsou níže uvedeny grafy.

Tvar průběhů je způsoben radioaktivním rozpadem inventáře PS a změnou koncentrace jednotlivých izotopů prvků (absorpční a štěpné produkty), které byly uvedeny na začátku kapitoly 4.1.

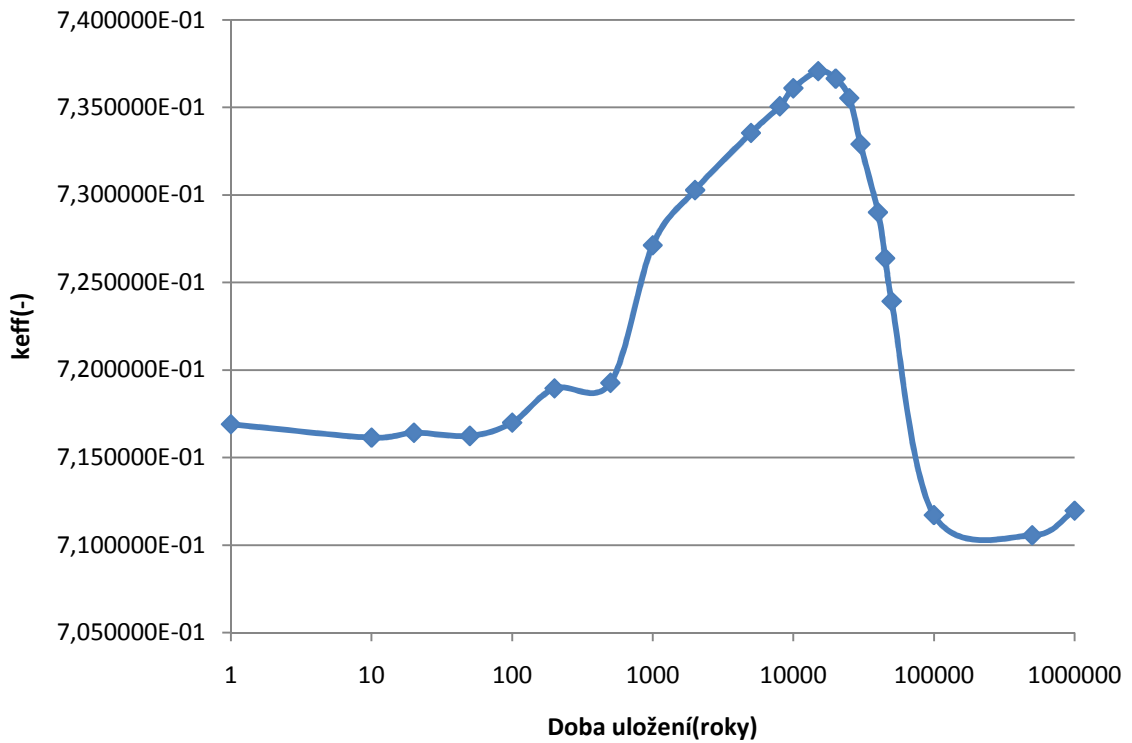
Graf 1: Průběh k_{eff} během 0-1e6 let pro čerstvé palivo



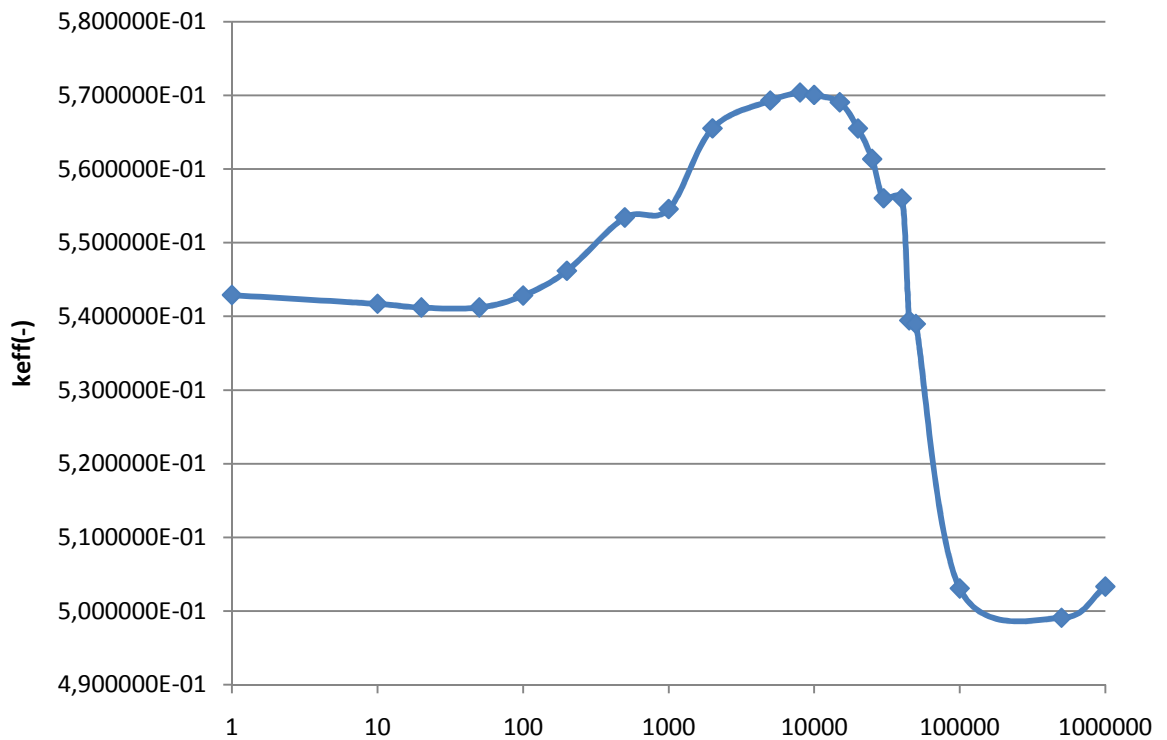
Graf 2: Průběh k_{eff} během 0-1e6 let pro palivo s vyhořením 25 000 MWd/MTU, bór vyhořívá



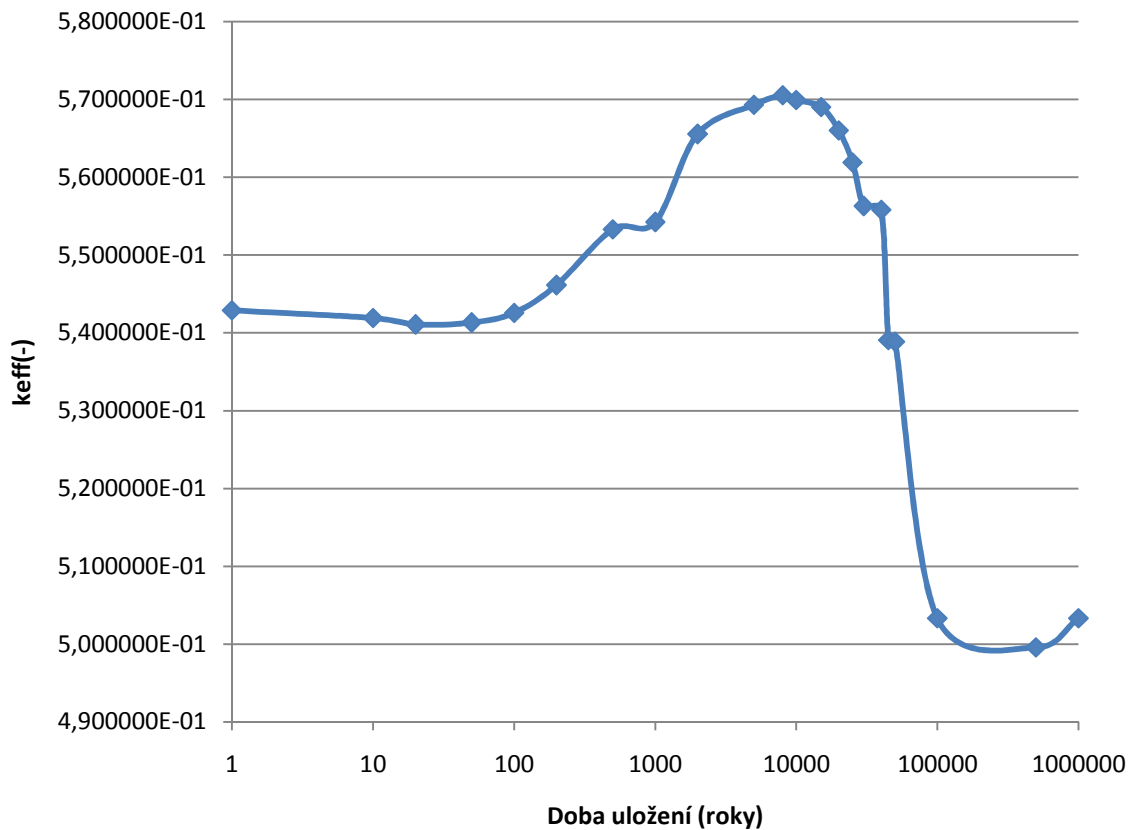
Graf 3: Průběh k_{eff} během 0-1e6 let pro palivo s vyhořením 25 000 MWd/MTU, bór nevyhořívá



Graf 4: Průběh k_{eff} během 0-1e6 let pro palivo s vyhořením 58 500 MWd/MTU, bór vyhořívá



Graf 5: Průběh k_{eff} během 0-1e6 let pro palivo s vyhořením 58500 MWd/MTU, bór nevyhořívá



Z průběhů vždy pro stejné vyhoření, jen s rozdílem vyhoření/nevyhoření bóru je vidět, že jsou si křivky velmi podobné. Minimální rozdíly mohou být způsobeny statistickou chybou výpočtu, čtením dat pro výpočet z různých knihoven nebo samotným rozdílem mezi vyhořelým a nevyhořelým bórem.

4.5 Degradace materiálu

Změna materiálových vlastností a samotného složení materiálů hraje velkou roli při návrhu konstrukce. Z hlediska degradace materiálu je nejdůležitější ověření degradace bóru, který byl zmiňován již v předchozích kapitolách, jelikož právě bór slouží jako absorbátor pohybujících se neutronů.

Na konci kapitoly 4.4. byly zmíněny rozdíly mezi jednotlivými grafy, které měly společné vyhoření, jen byla pro jeden případ uvažována konstantní koncentrace bóru a pro případ druhý vyhořívání a následná degradace (změna koncentrace) bóru.

Porovnáním hodnot obou případů se následně zjistí rozdíl a tím vliv na celkové hodnocení.

Tab. 13: Rozdíl k_{eff} při vyhořívání a bez vyhořívání bóru při vyhoření 25 000 MWd/MTU

$k_{effb}-k_{effwb}$	Doba uložení [roky]
0,000000	0
0,000101	10
0,000007	20
0,000379	50
0,000246	100
0,000149	200
0,000396	500
0,000371	1000
0,000000	2000
0,000000	5000
0,000298	8000
0,000057	10000
0,000602	15000
0,000141	20000
0,000000	25000
0,000254	30000
0,000454	40000

$k_{effb}-k_{effwb}$	Doba uložení [roky]
0,000181	45000
0,000497	50000
0,000000	100000
0,000131	500000
0,000118	1000000

Tab. 14: Rozdíl k_{eff} při vyhořívání a bez vyhořívání bóru při vyhoření 58 500 MWd/MTU

$k_{effb}-k_{effwb}$	Doba uložení [roky]
0,000000	0
0,000208	10
0,000131	20
0,000096	50
0,000252	100
0,000063	200
0,000126	500
0,000336	1000
0,000025	2000
0,000000	5000
0,000175	8000
0,000115	10000
0,000031	15000
0,000514	20000
0,000554	25000
0,000251	30000
0,000177	40000
0,000370	45000
0,000106	50000
0,000253	100000
0,000484	500000
0,000008	1000000

Rozdíl hodnot pro vyhoření 25 000, respektive 58 500 MWd/MTU dosahuje maximálně 0,0006. Tato hodnota je malá, je na úrovni statistické chyby a ve výpočtech tedy není nutno uvažovat vyhořívání bóru.

Závěr

V diplomové práci jsem v úvodní první kapitole popsal teorii, jako je popis palivového souboru, geologického hlubinného úložiště a v neposlední řadě ukládacího obalového souboru.

Palivový soubor byl popsán geometricky, dále byly popsány jeho konstrukční materiály a jeho výplň z palivových proutků, o kterých je také v úvodu práce zmínka.

V případě geologického hlubinného úložiště byl popsán návrh na jeho provedení do budoucna v České republice.

Ukládací obalový soubor Škoda 440/7, který by měl obsahovat 7 palivových souborů a měl by být uložen do hlubinného úložiště, byl opět popsán jak geometricky, tak konstrukčně.

Po teoretické úvodní kapitole jsem popsal neutronovou aktivační analýzu, která slouží k určení změny prvků, během jejich použití v reaktorech nebo samotném skladování, popřípadě uložení po skončení kampaně. Byly zde zmíněny výpočty jak pro jednoduché, tak i vícenásobné řetězce rozpadu prvků, které slouží k určení koncentrace a také reakční rychlosti, kterou jsem využíval v dalších částech diplomové práce. Závěrem této kapitoly jsem zmínil konkrétní druhy reakcí, které budou zajímavé z hlediska určování koncentrace bóru v obalu hexagonálních trubek.

Ve třetí kapitole jsem přistoupil k popisu výpočetního skriptu *Serpent*, který byl nedílnou součástí mé diplomové práce. Byly popsány jednotlivé kroky, které jsem musel provést, abych mohl sestavit funkční reálný model ukládacího obalového souboru dle podkladů. Po popisu geometricky konstrukčních částí byly popsány detektory, které slouží k určování reakčních rychlostí v místě, kde je žádáno.

V další kapitole popisují výstupní hodnoty reakčních rychlostí, které byly získány pomocí *Serpentu*. Reakční rychlosti dosahují největších hodnot pro reakce n, α a proto jsem v následných výpočtech uvažoval jen s nimi. Postup výpočtu a zjišťování reakčních rychlostí je zmíněn na začátku kapitoly 4. Po dopočtení všech potřebných reakčních rychlostí jsem dopočítával koncentraci izotopu bóru pro jednotlivé časové intervaly a jednotlivá vyhoření. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách v příslušné kapitole, popřípadě jsou uvedeny v příloze. Po dopočtení koncentrací jsem si připravil vstupy pro jednotlivé časové intervaly, kde se měnilo složení paliva a zmiňovaná koncentrace bóru. Následně proběhla příprava dalších vstupů, kde se měnilo palivo, ale koncentrace bóru zůstala konstantní po celou uvažovanou dobu uložení 0 až 1 000 000 let. Poslední připravené vstupy byly pro čerstvé palivo a koncentraci bóru, která byla spočtena pro vyhoření 58 500 MWd/MTU. Po výpočtech jsem z výstupu zpracoval

do tabulek a do grafů koeficienty podkritičnosti pro jednotlivá vyhoření. Výsledky jsou zhodnoceny v kapitole 4.4. V poslední části diplomové práce je zhodnocen vliv degradace materiálu na podkritičnost UOS, kde jsem dospěl k závěru, že není potřeba uvažovat změny koncentrace bóru (podíl jader bóru v centrálním PS se změnil za 1 milion let zhruba jen o 4e-8) ke stanovení podkritičnosti UOS, kde nejvyšší rozdíl mezi uvažováním a bez uvažování vyhořívání bóru pro výpočet k_{eff} činí 0,0006 pro vyhoření 25 000 MWd/MTU.

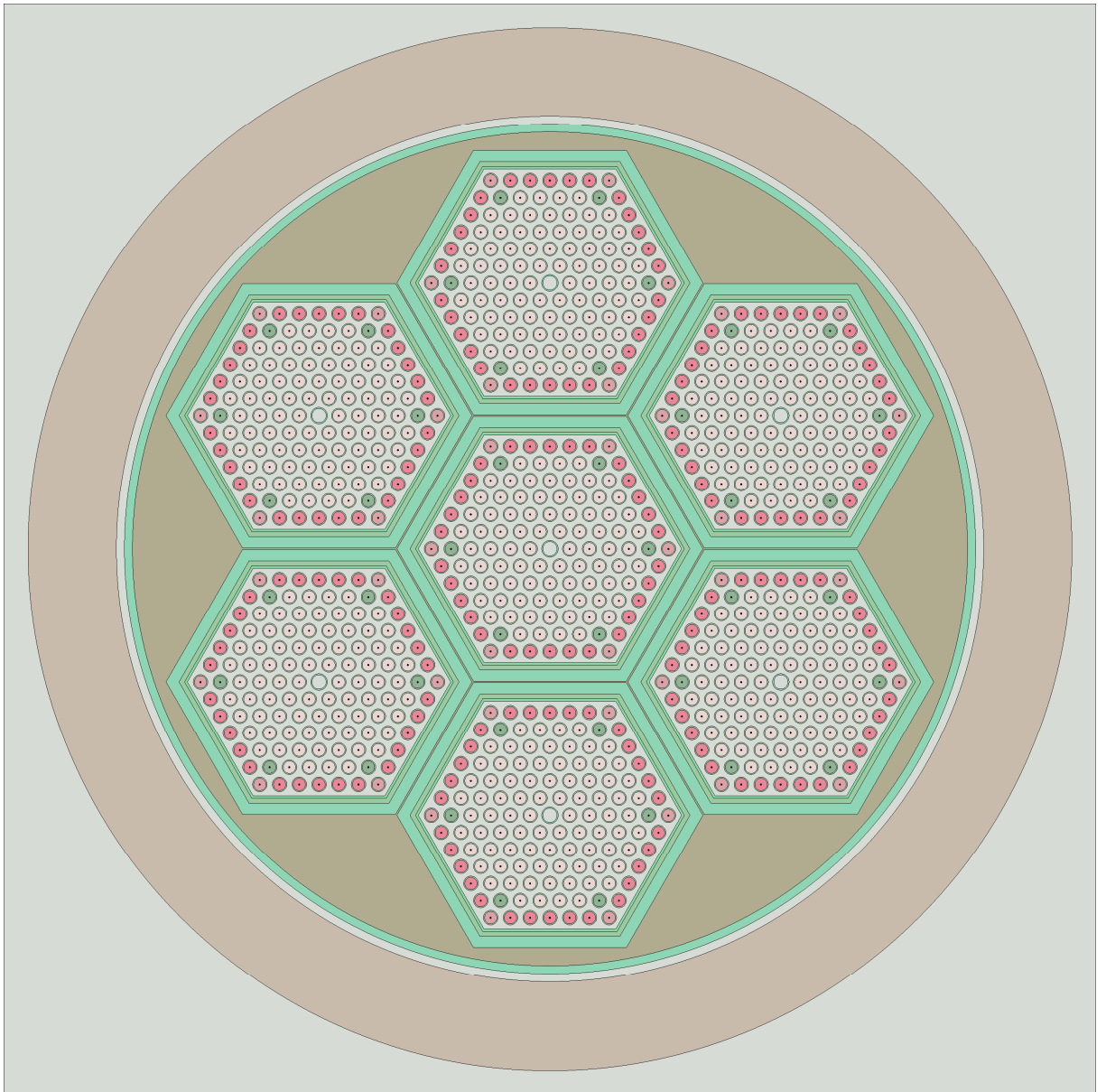
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Laciok, A., Marková, L., Vokál, A.: *Co s vyhořelým jaderným palivem?* Vesmír[online]. 2000/4,79[cit. 10.10.2014]. Dostupný z WWW: <<http://casopis.vesmir.cz/clanek/co-s-vyhorelym-jadernym-palivem>>
- [2] Sklenka, L.: *Provozní reaktorová fyzika*, učební texty vysokých škol, Vydavatelství ČVUT, 2000
- [3] Bátěk, D.: *Paliva jaderných reaktorů a palivový cyklus*, VUT, 2010
- https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29924 cit. 10.10.2014
- [4] Šišpera, D.: *Referenční projekt hlubinného úložiště: Souhrnné řešení stavby*. SURAO[online]. 1999/11 [cit. 29.10.2014]. Dostupný z WWW: <http://www.surao.cz/cze/content/download/265/1562/file/b_souhrnne_reseni_stavby_rp_99.pdf>
- [5] Holub, J.: *Úložný obalový soubor pro 7 palivových kazet VVER 440*. EGP INVEST, 1999/1
- [6] Vavřina, V.: *Referenční projekt hlubinného úložiště: Technologická zpráva*. SURAO[online]. 1999/11 [cit. 10.11.2014] Dostupné z WWW: <http://www.surao.cz/cze/content/download/329/1818/file/c_technologicka_cast_rp_99.pdf>
- [7] Lovecký, M. *Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet inventáře pro palivo Gd-2M*. Zpráva ŠKODA JS Ae15514/Dok Rev. 0, 2014.
- [8] Chemické prvky: Gadolinium. Dostupné z: http://amapro.cz/datove_zdroje/stranky/chemicke_prvky/chemicprvek_64.php
- [9] Ježek, Martin. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín*, bakalářská práce [online]. Brno, 2012 [cit. 2.12.2014]. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [10] Chemické prvky: Izotopy gadolinia [online]. [cit. 1.12.2014] Dostupné z WWW: <<http://www.webelements.com/gadolinium/isotopes.html>>
- [11] Chemické prvky: Gadolinium.[online]. [cit. 1.12.2014] Dostupné z WWW: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/223328/gadolinium-Gd>>
- [12] *Reaktorová fyzika 1: Neutronové účinné průřezy* [online] [cit. 2.12.2014]. Dostupné z WWW: <http://www.fjfi.cvut.cz/reaktorova_fyzika1/>

- [13] ÚJI Zbraslav: *Učební testy a soubory otázek* [online] 1994[cit. 2.12.2014]. Dostupné z WWW:
<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/017/26017754.pdf>
- [14] Kobzar, D., Oleksyuk, D.: *EXPERIMENTS ON SIMULATION OF COOLANT MIXING IN FUEL ASSEMBLY HEAD AND CORE EXIT CHANNEL OF VVER-440 REACTOR* [online]2006/8.[cit 1.12.2014]
Dostupné z WWW: < http://www.vuje.sk/aer16/reports/2_4.pdf>
- [15] Kubešová, M.: *Neutron activation analysis*[online]. 2013/12 [cit. 15.3. 2015]
Dostupné z WWW: <<http://www.naa-online.net/theory/introduction/>>
- [16] Hinca, R.: *Neutronová aktivační analýza* [online] [cit 15.3. 2015] Dostupné z WWW:
<<http://edu.snus.sk/cvicenia/23.%20Neutr%C3%B3nov%C3%A1%20aktiva%C4%8Dn%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>>
- [17] SÚRAO: *Co je hlubinné úložiště?*[online].[Cit 12.1.2015]. Dostupné z WWW:
<<http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste/Co-je-hlubinne-uloziste>>
- [18] Baldwin, T., Chapman, N., Neall, F.: *Geological disposal options for high-level waste and spent fuel.*[online]2008/1[cit 12.1.2015]. Dostupné z WWW:
<<http://www.nda.gov.uk/publication/geological-disposal-options-for-high-level-waste-and-spent-fuel-january-2008/?download>>
- [19] Lovecký, M. *Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet podkritičnosti pro palivo Gd-2M. Zpráva ŠKODA JS Ae15515/Dok Rev. 0, 2014.*
- [20] Mandlík, F.:*Průvodní zpráva SÚRAO.*[online]1999/11[cit. 8.4.2015] Dostupné z WWW: < <http://www.surao.cz/cze/Informacni-koutek/Dokumenty-ke-stazeni/Referencni-projekt/REFERENCNI-PROJEKT-HLUBINNEHO-ULOZISTE-A>>
- [21] Mácová, P.: *Ekologicky významné vlivy skladování vyhořelého jaderného paliva*[online]Brno, 2011[cit. 8.4.2015] Diplomová práce. Dostupné z WWW:
<https://is.muni.cz/th/142012/pedf_m/Diplomova_prace_-_text.txt>
- [22] Vyhořelé palivo.ČEZ[online][cit. 10.4. 2015] Dostupné z WWW:
<http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html>
- [23] De Soete, D., Gijebels, R., Hoste, J.: *Neutron activation analysis.* John Wiley & Sons Ltd., Londýn, 1972.
- [24] Leppänen, J.: *PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation,* Finsko, 2009.

Přílohy

A. UOS v Serpentu bez okolního prostředí v HÚ



B. Vstupní soubor Serpent pro výpočet RR

set title "UOS VVER 440"

% centralni trubka

pin 001
vzduch 0.44
e110 0.515
vzduch

% palivove proutky

pin 003 void 0.06 palivo1 0.38 void 0.3865 e110 0.455 vzduch
pin 004 void 0.06 palivo2 0.38 void 0.3865 e110 0.455 vzduch
pin 005 void 0.06 palivo3 0.38 void 0.3865 e110 0.455 vzduch
pin 006 void 0.06 palivo4 0.38 void 0.3865 e110 0.455 vzduch

% empty pin

pin 7
vzduch

% paliovy soubor-rozlozeni proutku

lat 8 2 0.0 0.0 15 15 1.23
7777777777777777
7777777754444457
777777436666347
777774666666647
777746666666647
777466666666647
774666666666647
753666616666357
746666666666477
746666666664777
746666666647777
746666666477777
743666634777777
754444457777777
7777777777777777

lat 9 2 0.0 0.0 15 15 1.23
7777777777777777
7777777754444457
777777436666347
777774666666647

77774666666647
77746666666647
77466666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
74666666666647777
746666666666477777
7436666347777777
7544444577777777
7777777777777777

lat 10 2 0.0 0.0 15 15 1.23

7777777777777777
777777754444457
777777436666347
777774666666647
777746666666647
777466666666647
774666666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
74666666666647777
746666666666477777
7436666347777777
7544444577777777
7777777777777777

lat 11 2 0.0 0.0 15 15 1.23

7777777777777777
777777754444457
777777436666347
777774666666647
777746666666647
777466666666647
774666666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
74666666666647777
746666666666477777
7436666347777777
7544444577777777
7777777777777777

lat 12 2 0.0 0.0 15 15 1.23

7777777777777777
777777754444457

777777436666347
77777466666647
77774666666647
77746666666647
77466666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
7466666666647777
746666666477777
743666634777777
754444457777777
777777777777777

lat 13 2 0.0 0.0 15 15 1.23
777777777777777
777777754444457
777777436666347
77777466666647
77774666666647
77746666666647
77466666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
7466666666647777
746666666477777
743666634777777
754444457777777
777777777777777

lat 14 2 0.0 0.0 15 15 1.23
777777777777777
777777754444457
777777436666347
77777466666647
77774666666647
77746666666647
77466666666647
753666616666357
746666666666477
7466666666664777
7466666666647777
746666666477777
743666634777777
754444457777777
777777777777777

%UOS

lat 23 3 0.0 0.0 5 5 16.6
20 20 20 20 20
20 20 15 16 20
20 17 18 19 20
20 21 22 20 20
20 20 20 20 20

% Palivovy soubor

surf 1 hexyc 0.0 0.0 7.1
surf 2 hexyc 0.0 0.0 7.25
surf 3 hexyc 0.0 0.0 7.55
surf 4 hexyc 0.0 0.0 8.25

cell 10 15 fill 8 -1
cell 20 15 zr25nb 1 -2
cell 30 15 vzduch 2 -3
cell 40 15 B4C 3 -4
cell 45 15 vzduch 4
cell 35 20 vzduch -4
cell 36 20 vzduch 4

cell 100 16 fill 9 -1
cell 200 16 zr25nb 1 -2
cell 300 16 vzduch 2 -3
cell 400 16 B4C1 3 -4
cell 405 16 vzduch 4

cell 110 17 fill 10 -1
cell 210 17 zr25nb 1 -2
cell 310 17 vzduch 2 -3
cell 410 17 B4C2 3 -4
cell 415 17 vzduch 4

cell 120 18 fill 11 -1
cell 220 18 zr25nb 1 -2
cell 320 18 vzduch 2 -3
cell 420 18 B4C3 3 -4
cell 425 18 vzduch 4

cell 130 19 fill 12 -1
cell 230 19 zr25nb 1 -2
cell 330 19 vzduch 2 -3
cell 430 19 B4C4 3 -4
cell 436 19 vzduch 4

cell 140 21 fill 13 -1
cell 240 21 zr25nb 1 -2

cell 340 21 vzduch 2 -3
cell 440 21 B4C5 3 -4
cell 446 21 vzduch 4

cell 150 22 fill 14 -1
cell 250 22 zr25nb 1 -2
cell 350 22 vzduch 2 -3
cell 450 22 B4C6 3 -4
cell 456 22 vzduch 4

surf 6 cyl 0.0 0.0 26.0
surf 7 cyl 0.0 0.0 26.5
surf 8 cyl 0.0 0.0 27
surf 9 cyl 0.0 0.0 32.5
surf 10 cyl 0.0 0.0 105
surf 11 sqc 0.0 0.0 300

cell 50 0 fill 23 -6
cell 60 0 kor_oc 6 -7
cell 70 0 vzduch 7 -8
cell 80 0 uhl_oc 8 -9
cell 90 0 ben 9 -10
cell 91 0 granit 10 -11
cell 99 0 outside 11

%palivo

mat palivo1 sum
92233.03c 1.953E-10
92234.03c 6.965E-07
92235.03c 5.053E-04
92236.03c 9.763E-05
92238.03c 2.186E-02
93237.03c 8.944E-06
94238.03c 9.634E-07
94239.03c 1.494E-04
94240.03c 3.586E-05
94241.03c 9.617E-07
94242.03c 3.946E-06
95241.03c 2.051E-05
95242.03c 5.868E-09
95243.03c 5.707E-07
42095.03c 3.684E-05
43099.03c 3.486E-05
44101.03c 3.239E-05
45103.03c 2.048E-05
47109.03c 2.205E-06

55133.03c	3.771E-05
60143.03c	2.868E-05
60145.03c	2.094E-05
62147.03c	9.162E-06
62149.03c	1.636E-07
62150.03c	7.752E-06
62151.03c	3.106E-07
62152.03c	3.052E-06
63151.03c	2.026E-07
63153.03c	2.769E-06
64155.03c	1.688E-07
8016.03c	4.645E-02

mat palivo2 sum

92233.03c	1.953E-10
92234.03c	6.965E-07
92235.03c	5.053E-04
92236.03c	9.763E-05
92238.03c	2.186E-02
93237.03c	8.944E-06
94238.03c	9.634E-07
94239.03c	1.494E-04
94240.03c	3.586E-05
94241.03c	9.617E-07
94242.03c	3.946E-06
95241.03c	2.051E-05
95242.03c	5.868E-09
95243.03c	5.707E-07
42095.03c	3.684E-05
43099.03c	3.486E-05
44101.03c	3.239E-05
45103.03c	2.048E-05
47109.03c	2.205E-06
55133.03c	3.771E-05
60143.03c	2.868E-05
60145.03c	2.094E-05
62147.03c	9.162E-06
62149.03c	1.636E-07
62150.03c	7.752E-06
62151.03c	3.106E-07
62152.03c	3.052E-06
63151.03c	2.026E-07
63153.03c	2.769E-06
64155.03c	1.688E-07
8016.03c	4.645E-02

mat palivo3 sum

92233.03c	1.953E-10
-----------	-----------

92234.03c	6.965E-07
92235.03c	5.053E-04
92236.03c	9.763E-05
92238.03c	2.186E-02
93237.03c	8.944E-06
94238.03c	9.634E-07
94239.03c	1.494E-04
94240.03c	3.586E-05
94241.03c	9.617E-07
94242.03c	3.946E-06
95241.03c	2.051E-05
95242.03c	5.868E-09
95243.03c	5.707E-07
42095.03c	3.684E-05
43099.03c	3.486E-05
44101.03c	3.239E-05
45103.03c	2.048E-05
47109.03c	2.205E-06
55133.03c	3.771E-05
60143.03c	2.868E-05
60145.03c	2.094E-05
62147.03c	9.162E-06
62149.03c	1.636E-07
62150.03c	7.752E-06
62151.03c	3.106E-07
62152.03c	3.052E-06
63151.03c	2.026E-07
63153.03c	2.769E-06
64155.03c	1.688E-07
8016.03c	4.645E-02

mat palivo4 sum

92233.03c	1.953E-10
92234.03c	6.965E-07
92235.03c	5.053E-04
92236.03c	9.763E-05
92238.03c	2.186E-02
93237.03c	8.944E-06
94238.03c	9.634E-07
94239.03c	1.494E-04
94240.03c	3.586E-05
94241.03c	9.617E-07
94242.03c	3.946E-06
95241.03c	2.051E-05
95242.03c	5.868E-09
95243.03c	5.707E-07
42095.03c	3.684E-05
43099.03c	3.486E-05
44101.03c	3.239E-05

45103.03c 2.048E-05
47109.03c 2.205E-06
55133.03c 3.771E-05
60143.03c 2.868E-05
60145.03c 2.094E-05
62147.03c 9.162E-06
62149.03c 1.636E-07
62150.03c 7.752E-06
62151.03c 3.106E-07
62152.03c 3.052E-06
63151.03c 2.026E-07
63153.03c 2.769E-06
64155.03c 1.688E-07
8016.03c 4.645E-02

% Uhlíkova ocel No 1.6338

mat uhl_oc 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

%korozivzdorna ocel

mat kor_oc 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

% kryti e110

mat e110 sum

40090.03c 2.16860E-02
40091.03c 4.72920E-03
40092.03c 7.22867E-03
40094.03c 7.32562E-03
40096.03c 1.18019E-03
41093.03c 4.18086E-04
72174.03c 3.48200E-09
72176.03c 1.14471E-07
72177.03c 4.04783E-07
72178.03c 5.93681E-07
72179.03c 2.96405E-07
72180.03c 7.63429E-07

%kryti

mat zr25nb sum

40090.03c 2.13574E-02
40091.03c 4.65754E-03
40092.03c 7.11914E-03
40094.03c 7.21461E-03
40096.03c 1.16231E-03
41093.03c 1.04521E-03
72174.03c 3.48200E-09
72176.03c 1.14471E-07
72177.03c 4.04783E-07
72178.03c 5.93681E-07
72179.03c 2.96405E-07
72180.03c 7.63429E-07

%AlMgSi + B4C

mat B4C sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C1 sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6

22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C2 sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C3 sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04

5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C4 sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C5 sum

12024.03c 3.372e-4
12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

mat B4C6 sum

12024.03c 3.372e-4

12025.03c 4.448e-5
12026.03c 5.0923e-5
13027.03c 5.906e-2
14028.03c 2.6461e-4
14029.03c 1.3877e-5
14030.03c 9.5288e-6
22046.03c 3.2428e-6
22047.03c 3.0235e-6
22048.03c 3.1241e-5
22049.03c 2.3748e-6
22050.03c 2.3791e-6
26054.03c 3.6513e-6
26056.03c 5.9583e-5
26057.03c 1.4619e-6
26058.03c 1.8932e-7
5010.03c 1.17119E-04
5011.03c 4.71419E-04
6012.03c 1.4538e-4
%6013.03c 1.7562e-6

%vzduch v UOS

mat vzduch sum

8016.03c 1.06504E-05
6000.03c 7.61140E-09
7014.03c 3.96412E-05

% 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 granit 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

```
set acelib "/media/sf_work/serpent_data/sss_endfb7u.xsdata"  
set declib "/media/sf_work/serpent_data/sss_endfb7.dec"  
set nfylib "/media/sf_work/serpent_data/sss_endfb7.nfy"
```

```
set bc 3
```

```
set pop 20000 800 10
```

```
%parametry vykreslení
```

```
plot 3 3000 3000  
mesh 3 1000 1000
```

```
%detektory
```

```
ene 1 1 1E-11 20.0
```

```
mat B10 1.0  
5010.03c 1  
mat B10a 1.0  
5010.03c 1  
mat B10b 1.0  
5010.03c 1  
mat B10c 1.0  
5010.03c 1  
mat B10d 1.0  
5010.03c 1  
mat B10e 1.0  
5010.03c 1  
mat B10f 1.0  
5010.03c 1
```

```
det 1 de 1 dm B4C dr 102 B10 dv 2.68191E+02  
det 2 de 1 dm B4C dr 103 B10 dv 2.68191E+02  
det 3 de 1 dm B4C dr 104 B10 dv 2.68191E+02  
det 4 de 1 dm B4C dr 107 B10 dv 2.68191E+02  
det 5 de 1 dm B4C dr 113 B10 dv 2.68191E+02
```

```
det 6 de 1 dm B4C1 dr 102 B10a dv 2.68191E+02  
det 7 de 1 dm B4C1 dr 103 B10a dv 2.68191E+02  
det 8 de 1 dm B4C1 dr 104 B10a dv 2.68191E+02  
det 9 de 1 dm B4C1 dr 107 B10a dv 2.68191E+02  
det 10 de 1 dm B4C1 dr 113 B10a dv 2.68191E+02
```

```
det 11 de 1 dm B4C2 dr 102 B10b dv 2.68191E+02  
det 12 de 1 dm B4C2 dr 103 B10b dv 2.68191E+02  
det 13 de 1 dm B4C2 dr 104 B10b dv 2.68191E+02
```

det 14 de 1 dm B4C2 dr 107 B10b dv 2.68191E+02
 det 15 de 1 dm B4C2 dr 113 B10b dv 2.68191E+02

det 16 de 1 dm B4C3 dr 102 B10c dv 2.68191E+02
 det 17 de 1 dm B4C3 dr 103 B10c dv 2.68191E+02
 det 18 de 1 dm B4C3 dr 104 B10c dv 2.68191E+02
 det 19 de 1 dm B4C3 dr 107 B10c dv 2.68191E+02
 det 20 de 1 dm B4C3 dr 113 B10c dv 2.68191E+02

det 21 de 1 dm B4C4 dr 102 B10d dv 2.68191E+02
 det 22 de 1 dm B4C4 dr 103 B10d dv 2.68191E+02
 det 23 de 1 dm B4C4 dr 104 B10d dv 2.68191E+02
 det 24 de 1 dm B4C4 dr 107 B10d dv 2.68191E+02
 det 25 de 1 dm B4C4 dr 113 B10d dv 2.68191E+02

det 26 de 1 dm B4C5 dr 102 B10e dv 2.68191E+02
 det 27 de 1 dm B4C5 dr 103 B10e dv 2.68191E+02
 det 28 de 1 dm B4C5 dr 104 B10e dv 2.68191E+02
 det 29 de 1 dm B4C5 dr 107 B10e dv 2.68191E+02
 det 30 de 1 dm B4C5 dr 113 B10e dv 2.68191E+02

det 31 de 1 dm B4C6 dr 102 B10f dv 2.68191E+02
 det 32 de 1 dm B4C6 dr 103 B10f dv 2.68191E+02
 det 33 de 1 dm B4C6 dr 104 B10f dv 2.68191E+02
 det 34 de 1 dm B4C6 dr 107 B10f dv 2.68191E+02
 det 35 de 1 dm B4C6 dr 113 B10f dv 2.68191E+02

C. Tabulky koncentrací bóru pro jednotlivé PS pro vyhoření 58 500 MWd/MTU

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
0	1,17119000000000E-04	6,39300E-21	1
10	1,1711899999764E-04	6,39318E-21	1
20	1,17118999999528E-04	6,39312E-21	1
50	1,1711899998819E-04	6,39294E-21	1
100	1,1711899997639E-04	6,39263E-21	1
200	1,1711899995278E-04	6,39201E-21	1
500	1,1711899988197E-04	6,39015E-21	1
1000	1,1711899976402E-04	6,38705E-21	1
2000	1,1711899952835E-04	6,38085E-21	1
5000	1,1711899882338E-04	6,36226E-21	1
8000	1,1711899812048E-04	6,34368E-21	1
10000	1,1711899765279E-04	6,33128E-21	1

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
15000	1,17118999648930E-04	6,30030E-21	1
20000	1,17118999533152E-04	6,26932E-21	1
25000	1,17118999417947E-04	6,23834E-21	1
30000	1,17118999303313E-04	6,20736E-21	1
40000	1,17118999076335E-04	6,14539E-21	1
45000	1,17118998963419E-04	6,11441E-21	1
50000	1,17118998851074E-04	6,08343E-21	1
100000	1,17118997784841E-04	5,77362E-21	1
500000	1,17118992916722E-04	3,29509E-21	1
1000000	1,17118992553026E-04	1,96940E-22	1
0	1,17119000000000E-04	6,4014800E-21	2
10	1,17118999999764E-04	6,4014200E-21	2
20	1,17118999999527E-04	6,4013500E-21	2
50	1,17118999998818E-04	6,4011600E-21	2
100	1,17118999997636E-04	6,4008400E-21	2
200	1,17118999995272E-04	6,4002000E-21	2
500	1,17118999988182E-04	6,3982900E-21	2
1000	1,17118999976372E-04	6,3950900E-21	2
2000	1,17118999952776E-04	6,3887000E-21	2
5000	1,17118999882199E-04	6,3695300E-21	2
8000	1,17118999811835E-04	6,3503600E-21	2
10000	1,17118999765019E-04	6,3375800E-21	2
15000	1,17118999648571E-04	6,3056300E-21	2
20000	1,17118999532713E-04	6,2736800E-21	2
25000	1,17118999417445E-04	6,2417300E-21	2
30000	1,17118999302767E-04	6,2097800E-21	2
40000	1,17118999075771E-04	6,1458800E-21	2
45000	1,17118998962863E-04	6,1139300E-21	2
50000	1,17118998850545E-04	6,0819800E-21	2
100000	1,17118997786371E-04	5,7624700E-21	2
500000	1,17118993049252E-04	3,2064200E-21	2
1000000	1,17118993028279E-04	1,1356700E-23	2
0	1,17119000000000E-04	6,347520E-21	3
10	1,17118999999766E-04	6,347450E-21	3
20	1,17118999999531E-04	6,347390E-21	3
50	1,17118999998828E-04	6,347200E-21	3
100	1,17118999997656E-04	6,346880E-21	3
200	1,17118999995312E-04	6,346250E-21	3
500	1,17118999988282E-04	6,344350E-21	3
1000	1,17118999976572E-04	6,341180E-21	3
2000	1,17118999953174E-04	6,334850E-21	3
5000	1,17118999883192E-04	6,315840E-21	3

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
8000	1,17118999813421E-04	6,296830E-21	3
10000	1,17118999767000E-04	6,284160E-21	3
15000	1,17118999651533E-04	6,252480E-21	3
20000	1,17118999536652E-04	6,220800E-21	3
25000	1,17118999422355E-04	6,189120E-21	3
30000	1,17118999308644E-04	6,157430E-21	3
40000	1,17118999083562E-04	6,094070E-21	3
45000	1,17118998971606E-04	6,062390E-21	3
50000	1,17118998860235E-04	6,030710E-21	3
100000	1,17118997805028E-04	5,713910E-21	3
500000	1,17118993107739E-04	3,179460E-21	3
1000000	1,17118993086672E-04	1,140760E-23	3
0	1,1711900000000000E-04	3,969740E-21	4
10	1,171189999998530E-04	3,969700E-21	4
20	1,171189999997070E-04	3,969660E-21	4
50	1,171189999992670E-04	3,969540E-21	4
100	1,171189999985340E-04	3,969350E-21	4
200	1,171189999970680E-04	3,968950E-21	4
500	1,171189999926720E-04	3,967760E-21	4
1000	1,171189999853480E-04	3,965780E-21	4
2000	1,171189999707150E-04	3,961820E-21	4
5000	1,171189999269480E-04	3,949930E-21	4
8000	1,171189998833130E-04	3,938040E-21	4
10000	1,171189998542820E-04	3,930120E-21	4
15000	1,171189997820690E-04	3,910310E-21	4
20000	1,171189997102220E-04	3,890500E-21	4
25000	1,171189996387400E-04	3,870680E-21	4
30000	1,171189995676250E-04	3,850870E-21	4
40000	1,171189994268580E-04	3,811250E-21	4
45000	1,171189993568400E-04	3,791440E-21	4
50000	1,171189992871880E-04	3,771630E-21	4
100000	1,171189986272570E-04	3,573510E-21	4
500000	1,171189956893710E-04	1,988570E-21	4
1000000	1,171189956757150E-04	7,394760E-24	4
0	1,1711900000000000E-04	6,421390E-21	5
10	1,17118999999763E-04	6,421330E-21	5
20	1,17118999999526E-04	6,421270E-21	5
50	1,17118999998814E-04	6,421070E-21	5
100	1,17118999997628E-04	6,420750E-21	5
200	1,17118999995257E-04	6,420110E-21	5
500	1,17118999988146E-04	6,418190E-21	5
1000	1,17118999976299E-04	6,414980E-21	5

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
2000	1,17118999952629E-04	6,408570E-21	5
5000	1,17118999881833E-04	6,389340E-21	5
8000	1,17118999811249E-04	6,370110E-21	5
10000	1,17118999764288E-04	6,357290E-21	5
15000	1,17118999647478E-04	6,325240E-21	5
20000	1,17118999531260E-04	6,293190E-21	5
25000	1,17118999415633E-04	6,261140E-21	5
30000	1,17118999300599E-04	6,229090E-21	5
40000	1,17118999072897E-04	6,164990E-21	5
45000	1,17118998959638E-04	6,132940E-21	5
50000	1,17118998846971E-04	6,100890E-21	5
100000	1,17118997779486E-04	5,780400E-21	5
500000	1,17118993027622E-04	3,216400E-21	5
1000000	1,17118993006577E-04	1,139580E-23	5
0	1,17119000000000E-04	6,349090E-21	6
10	1,17119000002533E-04	6,349030E-21	6
20	1,17119000004831E-04	6,348970E-21	6
50	1,17119000006425E-04	6,348780E-21	6
100	1,17119000006847E-04	6,348460E-21	6
200	1,17119000004925E-04	6,347820E-21	6
500	1,17118999995971E-04	6,345920E-21	6
1000	1,17118999975309E-04	6,342750E-21	6
2000	1,17118999931264E-04	6,336420E-21	6
5000	1,17118999817352E-04	6,317400E-21	6
8000	1,17118999633994E-04	6,298390E-21	6
10000	1,17118999404572E-04	6,285720E-21	6
15000	1,17118999060812E-04	6,254030E-21	6
20000	1,17118998603884E-04	6,222340E-21	6
25000	1,17118998034959E-04	6,190650E-21	6
30000	1,17118997355206E-04	6,158960E-21	6
40000	1,17118996457309E-04	6,095590E-21	6
45000	1,17118995452096E-04	6,063900E-21	6
50000	1,17118994340737E-04	6,032210E-21	6
100000	1,17118992232291E-04	5,715330E-21	6
500000	1,17118986360588E-04	3,180260E-21	6
1000000	1,17118986318420E-04	1,141830E-23	6
0	1,17119000000000E-04	6,380930E-21	7
10	1,1711899999764E-04	6,380870E-21	7
20	1,1711899999529E-04	6,380800E-21	7
50	1,17118999998822E-04	6,380610E-21	7
100	1,17118999997643E-04	6,380290E-21	7
200	1,17118999995287E-04	6,379650E-21	7

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
500	1,17118999988220E-04	6,377740E-21	7
1000	1,17118999976448E-04	6,374560E-21	7
2000	1,17118999952927E-04	6,368190E-21	7
5000	1,17118999882577E-04	6,349080E-21	7
8000	1,17118999812439E-04	6,329970E-21	7
10000	1,17118999765774E-04	6,317230E-21	7
15000	1,17118999649699E-04	6,285390E-21	7
20000	1,17118999534213E-04	6,253540E-21	7
25000	1,17118999419315E-04	6,221690E-21	7
30000	1,17118999305005E-04	6,189850E-21	7
40000	1,17118999078738E-04	6,126150E-21	7
45000	1,17118998966193E-04	6,094300E-21	7
50000	1,17118998854235E-04	6,062460E-21	7
100000	1,17118997793476E-04	5,743980E-21	7
500000	1,17118993071455E-04	3,196200E-21	7
1000000	1,17118993050266E-04	1,147370E-23	7

D. Tabulky koncentrací bóru pro jednotlivé PS pro vyhoření 25 000 MWd/MTU

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
0	1,17119000000000E-04	6,38632E-21	1
10	1,1711899999764E-04	6,38626E-21	1
20	1,1711899999528E-04	6,38620E-21	1
50	1,17118999998821E-04	6,38601E-21	1
100	1,17118999997641E-04	6,38570E-21	1
200	1,17118999995283E-04	6,38508E-21	1
500	1,17118999988210E-04	6,38323E-21	1
1000	1,17118999976428E-04	6,38013E-21	1
2000	1,17118999952886E-04	6,37394E-21	1
5000	1,17118999882466E-04	6,35538E-21	1
8000	1,17118999812251E-04	6,33681E-21	1
10000	1,17118999765533E-04	6,32443E-21	1
15000	1,17118999649310E-04	6,29348E-21	1
20000	1,17118999533657E-04	6,26253E-21	1
25000	1,17118999418577E-04	6,23159E-21	1
30000	1,17118999304067E-04	6,20064E-21	1
40000	1,17118999077335E-04	6,13875E-21	1
45000	1,17118998964540E-04	6,10780E-21	1
50000	1,17118998852317E-04	6,07685E-21	1
100000	1,17118997787236E-04	5,76738E-21	1
500000	1,17118992924229E-04	3,29163E-21	1

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
1000000	1,17118992560533E-04	1,96940E-22	1
0	1,17119000000000E-04	6,3414700E-21	2
10	1,17118999999766E-04	6,3414100E-21	2
20	1,17118999999532E-04	6,3413400E-21	2
50	1,17118999998829E-04	6,3411500E-21	2
100	1,17118999997658E-04	6,3408400E-21	2
200	1,17118999995316E-04	6,3402000E-21	2
500	1,17118999988293E-04	6,3383000E-21	2
1000	1,17118999976594E-04	6,3351400E-21	2
2000	1,17118999953219E-04	6,3288100E-21	2
5000	1,17118999883303E-04	6,3098200E-21	2
8000	1,17118999813599E-04	6,2908200E-21	2
10000	1,17118999767222E-04	6,2781600E-21	2
15000	1,17118999651866E-04	6,2465100E-21	2
20000	1,17118999537094E-04	6,2148600E-21	2
25000	1,17118999422907E-04	6,1832100E-21	2
30000	1,17118999309304E-04	6,1515500E-21	2
40000	1,17118999084437E-04	6,0882500E-21	2
45000	1,17118998972588E-04	6,0566000E-21	2
50000	1,17118998861323E-04	6,0249400E-21	2
100000	1,17118997807131E-04	5,7084200E-21	2
500000	1,17118993114643E-04	3,1762100E-21	2
1000000	1,17118993094413E-04	1,0954500E-23	2
0	1,17119000000000E-04	6,403320E-21	3
10	1,17118999999763E-04	6,403260E-21	3
20	1,17118999999527E-04	6,403190E-21	3
50	1,17118999998818E-04	6,403000E-21	3
100	1,17118999997635E-04	6,402680E-21	3
200	1,17118999995271E-04	6,402040E-21	3
500	1,17118999988179E-04	6,400120E-21	3
1000	1,17118999976366E-04	6,396930E-21	3
2000	1,17118999952762E-04	6,390530E-21	3
5000	1,17118999882165E-04	6,371360E-21	3
8000	1,17118999811781E-04	6,352180E-21	3
10000	1,17118999764952E-04	6,339400E-21	3
15000	1,17118999648470E-04	6,307430E-21	3
20000	1,17118999532579E-04	6,275470E-21	3
25000	1,17118999417278E-04	6,243510E-21	3
30000	1,17118999302568E-04	6,211550E-21	3
40000	1,17118999075507E-04	6,147630E-21	3
45000	1,17118998962567E-04	6,115670E-21	3
50000	1,17118998850217E-04	6,083700E-21	3

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
100000	1,17118997785744E-04	5,764090E-21	3
500000	1,17118993047531E-04	3,207160E-21	3
1000000	1,17118993027211E-04	1,100370E-23	3
0	1,1711900000000000E-04	3,968660E-21	4
10	1,171189999998530E-04	3,968620E-21	4
20	1,171189999997070E-04	3,968580E-21	4
50	1,171189999992670E-04	3,968470E-21	4
100	1,171189999985340E-04	3,968270E-21	4
200	1,171189999970690E-04	3,967870E-21	4
500	1,171189999926740E-04	3,966680E-21	4
1000	1,171189999853520E-04	3,964700E-21	4
2000	1,171189999707230E-04	3,960740E-21	4
5000	1,171189999269680E-04	3,948860E-21	4
8000	1,171189998833450E-04	3,936970E-21	4
10000	1,171189998543210E-04	3,929050E-21	4
15000	1,171189997821280E-04	3,909240E-21	4
20000	1,171189997103010E-04	3,889430E-21	4
25000	1,171189996388390E-04	3,869620E-21	4
30000	1,171189995677430E-04	3,849810E-21	4
40000	1,171189994270150E-04	3,810200E-21	4
45000	1,171189993570170E-04	3,790390E-21	4
50000	1,171189992873840E-04	3,770580E-21	4
100000	1,171189986276390E-04	3,572500E-21	4
500000	1,171189956908320E-04	1,987840E-21	4
1000000	1,171189956778860E-04	7,010430E-24	4
0	1,1711900000000000E-04	6,379190E-21	5
10	1,17118999999764E-04	6,379130E-21	5
20	1,17118999999529E-04	6,379070E-21	5
50	1,17118999998822E-04	6,378880E-21	5
100	1,17118999997644E-04	6,378560E-21	5
200	1,17118999995288E-04	6,377920E-21	5
500	1,17118999988223E-04	6,376010E-21	5
1000	1,17118999976455E-04	6,372830E-21	5
2000	1,17118999952940E-04	6,366460E-21	5
5000	1,17118999882609E-04	6,347350E-21	5
8000	1,17118999812490E-04	6,328250E-21	5
10000	1,17118999765837E-04	6,315510E-21	5
15000	1,17118999649795E-04	6,283670E-21	5
20000	1,17118999534340E-04	6,251830E-21	5
25000	1,17118999419474E-04	6,219990E-21	5
30000	1,17118999305195E-04	6,188150E-21	5
40000	1,17118999078990E-04	6,124460E-21	5

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
45000	1,17118998966476E-04	6,092620E-21	5
50000	1,17118998854550E-04	6,060780E-21	5
100000	1,17118997794088E-04	5,742370E-21	5
500000	1,17118993073751E-04	3,195060E-21	5
1000000	1,17118993053566E-04	1,093020E-23	5
0	1,17119000000000E-04	6,394090E-21	6
10	1,17119000002551E-04	6,394030E-21	6
20	1,17119000004865E-04	6,393960E-21	6
50	1,17119000006471E-04	6,393770E-21	6
100	1,17119000006896E-04	6,393450E-21	6
200	1,17119000004960E-04	6,392820E-21	6
500	1,17118999995943E-04	6,390900E-21	6
1000	1,17118999975134E-04	6,387710E-21	6
2000	1,17118999930777E-04	6,381330E-21	6
5000	1,17118999816057E-04	6,362180E-21	6
8000	1,17118999631399E-04	6,343030E-21	6
10000	1,17118999400352E-04	6,330260E-21	6
15000	1,17118999054157E-04	6,298340E-21	6
20000	1,17118998593991E-04	6,266430E-21	6
25000	1,17118998021035E-04	6,234510E-21	6
30000	1,17118997336466E-04	6,202600E-21	6
40000	1,17118996432209E-04	6,138760E-21	6
45000	1,17118995419876E-04	6,106850E-21	6
50000	1,17118994300647E-04	6,074930E-21	6
100000	1,17118992177282E-04	5,755770E-21	6
500000	1,17118986264518E-04	3,202500E-21	6
1000000	1,17118986224261E-04	1,090090E-23	6
0	1,17119000000000E-04	6,351880E-21	7
10	1,1711899999765E-04	6,351810E-21	7
20	1,1711899999531E-04	6,351750E-21	7
50	1,17118999998827E-04	6,351560E-21	7
100	1,17118999997654E-04	6,351240E-21	7
200	1,17118999995309E-04	6,350610E-21	7
500	1,17118999988274E-04	6,348710E-21	7
1000	1,17118999976555E-04	6,345540E-21	7
2000	1,17118999953142E-04	6,339190E-21	7
5000	1,17118999883112E-04	6,320170E-21	7
8000	1,17118999813293E-04	6,301150E-21	7
10000	1,17118999766840E-04	6,288470E-21	7
15000	1,17118999651295E-04	6,256760E-21	7
20000	1,17118999536334E-04	6,225060E-21	7
25000	1,17118999421960E-04	6,193350E-21	7

Roky uložení	Koncentrace B-10	RR	PS
30000	1,17118999308171E-04	6,161650E-21	7
40000	1,17118999082934E-04	6,098240E-21	7
45000	1,17118998970902E-04	6,066530E-21	7
50000	1,17118998859454E-04	6,034830E-21	7
100000	1,17118997803534E-04	5,717780E-21	7
500000	1,17118993103422E-04	3,181370E-21	7
1000000	1,17118993083362E-04	1,086260E-23	7