# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING


# ANALÝZA ZDROJOVÉHO ČLENU VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA JE DUKOVANY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ S UVAŽOVÁNÍM VARIANT LTO

THE DUKOVANY NPP SPENT NUCLEAR FUEL SOURCE TERM INVESTIGATION FOR DEEP REPOSITORY NEEDS ACCORDING TO LTO OPTIONS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**
MASTER'S THESIS


**AUTOR PRÁCE** — **Bc. Pavel Penzinger**
AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE** — **Ing. Karel Katovský, Ph.D.**
SUPERVISOR



**BRNO 2018**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

***Student:*** Bc. Pavel Penzinger ***ID:*** 146926
***Ročník:*** 2 ***Akademický rok:*** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Analýza zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva JE Dukovany pro hlubinné úložiště s uvažováním variant LTO

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Stručný popis EDU a uvažovaných variant LTO
2. Palivový cyklus EDU – od začátku provozu do 2017
3. Odhad sortimentu VJP pro varianty LTO 40, 50, 60
4. Výpočty aktivit a zbytkového tepla VJP
5. Návrh předání VJP do hlubinného úložiště

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

***Termín zadání:*** 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 21.5.2018

***Vedoucí práce:*** Ing. Karel Katovský, Ph.D.
***Konzultant:***

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

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

Bibliografická citace práce:

PENZINGER, P. *Analýza zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva JE Dukovany pro hlubinné úložiště s uvažováním variant LTO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 66 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jiřímu Geržovi ze společnosti ČEZ, a.s., bez kterého by tato diplomová práce vůbec nevznikla, za poskytnutí veškeré podpory při jejím vypracování. Poděkování náleží také vedoucímu mé práce, panu Ing. Karlu Katovskému Ph.D. za odbornou pomoc a podporu.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva JE Dukovany pro hlubinné úložiště s uvažováním variant LTO jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 21.05.2018 ……

# ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analyzováním zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva Jaderné elektrárny Dukovany za účelem stanovení návrhů předávání vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště v České republice. Pro uvedení čtenáře do problematiky jsou stručně popsány hlavní aspekty, mezi které spadá například vývoj jaderného paliva využívaného v historii Jaderné elektrárny Dukovany. Tyto aspekty ovlivňují samotný návrh finálního harmonogramu. Jedním z významných dílčích úkolů je zpracování odhadu budoucího sortimentu vyhořelého jaderného paliva, který je postaven na současných představách společnosti ČEZ, a.s. o budoucím směřování palivového cyklu na jaderné elektrárně Dukovany.

Pro účely této práce jsou klíčová data v podobě časových závislostí aktivit a vývinu zbytkového tepla v jednotlivých palivových souborech. Tato data jsou vypočítána k tomu určeným softwarem PAL440_R4 na základě zpracovaných odhadů sortimentu vyhořelého jaderného paliva. Vypočtená data jsou následně upravována a tříděna pomocí programu MS excel. Pro úplnost jsou pro vybrané scénáře také uvedeny charakteristické hodnoty a průběhy časových závislostí aktivity a vývinu zbytkového tepla u palivových souborů. Výsledné harmonogramy předávání vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště jsou zpracovány ve více variantách a je odůvodněno jejich zvolení a možnosti využití. Pro názornost jsou důležité parametry uvedeny ve formě tabulek a grafů.



**KLÍČOVÁ SLOVA**: VVER-440; Elektrárna Dukovany; vyhořelé jaderné palivo; hlubinné úložiště

# ABSTRACT

The master's thesis deals with the analysis of source term of the spent nuclear fuel of the Dukovany Nuclear Power Plant in order to determine the proposals for the transfer of spent nuclear fuel to a deep geological repository in the Czech Republic. To introduce the reader into the issue are briefly described the main aspects, such as the development of the nuclear fuel used in the history of the Dukovany Nuclear Power Plant. These aspects have an influence on the final draft of the timetable. One of the important partial tasks is the processing of an estimate of the future range of spent nuclear fuel, which is based on the current ideas of company ČEZ, a.s. for the future direction of the fuel cycle at the Dukovany nuclear power plant.

For the purposes of this work, the key data are the time dependencies of radioactivity and the development of residual heat in individual fuel assemblies. This data are calculated by the software called PAL440_R4, based on the prepared estimates of the spent nuclear fuel assortment. The calculated data are then edited and sorted by MS Excel. For the sake of completeness, the characteristic values and the time dependencies of the radioactivity and the development of residual heat in fuel assemblies. Final timetables for the transfer of spent nuclear fuel to a deep geological repository are processed in several variants, and their selection and application options are justified. For illustration are important parameters given in the form of tables and charts.



**KEY WORDS**: VVER-440; Dukovany Nuclear Power Plant; spent nuclear fuel; deep geological repository

# OBSAH

**SEZNAM OBRÁZKŮ** ..... **8**

**SEZNAM TABULEK** ..... **9**

**SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK** ..... **10**

**1 ÚVOD** ..... **11**

**2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY** ..... **12**

**2.1 REAKTORY A PALIVO** ..... **12**

**2.2 EDU 5** ..... **12**

**3 VÝPOČETNÍ PROGRAM PAL440_R4** ..... **13**

**4 LTO DUKOVANY** ..... **14**

**5 SLOŽENÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA** ..... **15**

**6 SORTIMENT JADERNÉHO PALIVA** ..... **18**

**6.1 JADERNÉ PALIVO VYUŽÍVANÉ V MINULOSTI EDU** ..... **20**

6.1.1 PROJEKTOVÁ PALIVOVÁ VSÁZKA ..... 20

6.1.2 MODERNIZACE PALIVOVÝCH VSÁZEK ..... 20

**6.2 SOUČASNÉ JADERNÉ PALIVO** ..... **21**

**6.3 JADERNÉ PALIVO UVAŽOVANÉ V BUDOUCNU** ..... **21**

**7 ODHAD SORTIMENTU VJP** ..... **24**

**7.1 VARIANTA LTO +10** ..... **27**

**7.2 VARIANTA LTO +20** ..... **29**

**7.3 VARIANTA LTO +30** ..... **31**

**7.4 NEUVAŽOVANÉ ASPEKTY MAJÍCÍ VLIV NA SORTIMENT VJP** ..... **33**

**8 LIMITY A OMEZENÍ PRO NÁVRH PŘEDÁVÁNÍ VJP** ..... **34**

**8.1 NÁVRH HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ** ..... **34**

**8.2 UKLÁDACÍ OBALOVÝ SOUBOR** ..... **36**

**8.3 PŘEPRAVA OBALOVÝCH SOUBORŮ** ..... **38**

**9 VÝPOČTY AKTIVIT A ZBYTKOVÉHO TEPLA** ..... **40**

**9.1 MINIMÁLNÍ DOBA CHLAZENÍ PS PRO ULOŽENÍ DO OS** ..... **44**

**9.2 MEZNÍ DOBA CHLAZENÍ PS PRO ULOŽENÍ DO HU** ..... **46**

**9.3 STATISTICKÉ PŘEHLEDY** ..... **47**

**10 NÁVRH PŘEDÁVÁNÍ VJP DO HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ** ..... **49**

**10.1 REFERENČNÍ HARMONOGRAM** ..... **50**

**10.2 RYCHLOST UKLÁDÁNÍ UOS** ..... **50**

**10.3 VARIANTA 1 – POSTUPNÉ UKLÁDÁNÍ** ..... **51**

10.3.1 METODA NEROVNOMĚRNÉHO UKLÁDÁNÍ ..... 52

10.3.2 METODA LINEÁRNÍHO UKLÁDÁNÍ ..... 54

**10.4 VARIANTA 2 – KOMBINACE DRUHŮ UKLÁDANÉHO VJP ..... 55**
10.4.1 LTO +10 – NEJRYCHLEJŠÍ ULOŽENÍ ..... 57
10.4.2 LTO +10 – PODLE REFERENČNÍHO HARMONOGRAMU ..... 58
10.4.3 LTO +20 – NEJRYCHLEJŠÍ ULOŽENÍ ..... 59
10.4.4 LTO +30 – NEJRYCHLEJŠÍ ULOŽENÍ ..... 60
10.4.5 OVĚŘENÍ REFERENČNÍHO HARMONOGRAMU PRO LTO +20 A LTO +30 ..... 61

**11 ZÁVĚR ..... 62**

**POUŽITÁ LITERATURA ..... 64**

**PŘÍLOHY ..... 66**

# SEZNAM OBRÁZKŮ

*Obr. 5-1 Kumulativní výnos štěpných produktů pro $^{235}U$ ..... 15*
*Obr. 6-1 Palivový proutek a palivový soubor ..... 18*
*Obr. 6-2 Radiální řezy jednotlivými typy palivových souborů ..... 22*
*Obr. 6-3 Radiální řezy jednotlivými typy palivových souborů ..... 23*
*Obr. 8-1 Bariéry VJP v HÚ ..... 36*
*Obr. 8-2 Model ukládání UOS v HÚ ..... 37*
*Obr. 8-3 Model UOS typu KBS-3 pro finské HÚ Onkalo ..... 38*
*Obr. 9-1 Formát poskytnutých dat pro výpočty ..... 40*
*Obr. 9-2 Data ve formátu vhodném pro výpočet ..... 41*
*Obr. 9-3 Data připravená pro export a exportovaný textový soubor ..... 41*
*Obr. 9-4 Vypočtené aktivity a zbytkové výkony v jednotlivých letech přiřazené k PS ..... 43*
*Obr. 9-5 Ukázka výsledného souboru členěného po jednotlivých OS ..... 43*
*Obr. 9-6 Grafické znázornění zbytkových výkonů a aktivit v závislosti na době chlazení ..... 45*
*Obr. 9-7 Grafické znázornění zbytkových výkonů a aktivit v závislosti na době chlazení ..... 48*
*Obr. 10-1 Vývoj počtu OS s PS splňujícími limit 93,5 W pro uložení v HÚ ..... 51*
*Obr. 10-2 Vývoj počtu ročně zpracovaných OS v HÚ ..... 53*
*Obr. 10-3 Využití skladu VJP v HÚ – nerovnoměrné ukládání ..... 53*
*Obr. 10-4 Vývoj počtu OS s možností předání k uložení v daném roce – lineární ukládání ..... 54*
*Obr. 10-5 Využití skladu VJP v HÚ – lineární ukládání ..... 55*
*Obr. 10-6 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 3+4 ..... 56*
*Obr. 10-7 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 4+3 ..... 56*
*Obr. 10-8 Průběh počtu uvolněných OS pro nejrychlejší možnou variantu uložení, LTO +10 ..... 57*
*Obr. 10-9 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 4+3 a 3+4, LTO +10 ..... 58*
*Obr. 10-10 Počty ročně ukládaných OS pro nejrychlejší varianty, LTO +20 a LTO +30 ..... 61*

# SEZNAM TABULEK

*Tab. 5-1 Významné izotopy ve VJP – aktivační produkty* ..... *16*
*Tab. 5-2 Významné izotopy ve VJP – aktinoidy* ..... *16*
*Tab. 5-3 Významné izotopy ve VJP - štěpné produkty* ..... *17*
*Tab. 6-1 Složení palivových souborů* ..... *19*
*Tab. 6-2 Střední vyhoření jednotlivých typů PS pro EDU* ..... *22*
*Tab. 7-1 Počty PS a jejich umístění k 31. 12. 2017* ..... *24*
*Tab. 7-2 Systém pojmenování OS pro VJP* ..... *25*
*Tab. 7-3 Ověřovací výpočet poslední kampaně LTO +10* ..... *27*
*Tab. 7-4 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +10* ..... *29*
*Tab. 7-5 Ověřovací výpočet posledních 2 kampaní LTO +20* ..... *30*
*Tab. 7-6 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +20* ..... *31*
*Tab. 7-7 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +30* ..... *32*
*Tab. 8-1 Srovnání základních parametrů UOS pro HÚ v ČR a ve Finsku (KBS-3V)* ..... *37*
*Tab. 8-2 Základní parametry OS CASTOR* ..... *39*
*Tab. 8-3 Parametry železničního vagónu pro přepravu OS typu CASTOR* ..... *39*
*Tab. 9-1 Výchozí hodnoty pro stanovení minimální doby chlazení PS pro uložení do OS* ..... *44*
*Tab. 9-2 Minimální doba chlazení PS pro uložení do OS* ..... *44*
*Tab. 9-3 Závislost aktivity a vývinu zbytkového tepla na době chlazení* ..... *45*
*Tab. 9-4 Minimální doby chlazení VJP pro uložení do HÚ* ..... *46*
*Tab. 9-5 Počty stávajících a nových PS dle varianty LTO* ..... *47*
*Tab. 9-6 Sumární hodnoty aktivit VJP (počty PS ke dni 31.12.2017 + odhady)* ..... *47*
*Tab. 9-7 Podíl aktivit jednotlivých skupin izotopů na celkové aktivitě (palivo 4.38Gd-2M+)* ..... *48*
*Tab. 10-1 Statistické zhodnocení souboru dat OS* ..... *49*
*Tab. 10-2 Provozní parametry HÚ pro různé kapacity zpracování OS* ..... *50*
*Tab. 10-3 Provozní parametry HÚ pro různé kapacity zpracování UOS* ..... *50*
*Tab. 10-4 Přepočtené parametry referenčního harmonogramu* ..... *51*
*Tab. 10-5 Přehledová tabulka pro metodu nerovnoměrného ukládání* ..... *52*
*Tab. 10-6 Přehledová tabulka pro lineární metodu* ..... *54*
*Tab. 10-7 Přehledová tabulka pro nejrychlejší možnou variantu uložení, LTO +10* ..... *57*
*Tab. 10-8 Přehledová tabulka pro referenční harmonogram, LTO +10* ..... *58*
*Tab. 10-9 Přehledová tabulka – návrh nejrychlejšího harmonogramu, LTO +20* ..... *59*
*Tab. 10-10 Přehledová tabulka – návrh nejrychlejšího harmonogramu, LTO +30* ..... *60*
*Tab. 10-11 Kapacita zpracování dle referenčního harmonogramu* ..... *61*

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|---|---|
| AZ | Aktivní zóna reaktoru |
| BS | Bazén skladování jaderného paliva u reaktoru |
| ČR | Česká republika |
| EDU | Elektrárna Dukovany |
| EU | Evropská unie |
| HÚ | Hlubinné úložiště |
| JE | Jaderná elektrárna |
| LTO | Long Term Operation – Dlouhodobý provoz JE za hranicí její projektové životnosti |
| MAAE | Mezinárodní agentura pro atomovou energii |
| MOX | Směsné jaderné palivo (Mixed Oxide Fuel) |
| MPO | Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR |
| MSVP | Mezisklad vyhořelého paliva Dukovany |
| NEA | Agentura pro atomovou energii při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj |
| OS | Obalový soubor pro vyhořené jaderné palivo |
| PS | Palivový soubor jaderného paliva |
| RAO | Radioaktivní odpad |
| SÚJB | Státní úřad pro jadernou bezpečnost |
| SÚRAO | Správa úložišť radioaktivních odpadů |
| SVP | Sklad vyhořelého paliva Dukovany |
| UOS | Ukládací obalový soubor |
| VJP | Vyhořelé jaderné palivo |
| VVER | Vodo-vodní energetický reaktor |
| Bq | Becquerel – Jednotka aktivity zdroje radioaktivního záření |
| kg | Kilogram – jednotka hmotnosti |
| kPa | Kilopascal – jednotka tlaku |
| kW | Kilowatt – jednotka výkonu |
| MWd | Jednotka vyhoření jaderného paliva (Megawatt-day) |
| MWe | Megawatt – jednotka elektrického výkonu |
| MWt | Megawatt – jednotka tepelného výkonu |
| W | Watt – jednotka výkonu |

# 1 ÚVOD

V oblasti mírového využití jaderné energie na území České republiky jsou v současné době velmi diskutována dvě hlavní témata. Jedním z těchto témat je plánovaná výstavba nových jaderných zdrojů elektrické energie. Mezi zvažované lokality pro výstavbu tohoto nového zdroje patří i lokalita Jaderné elektrárny Dukovany. Ačkoli se tato diplomová práce přímo nezabývá činnostmi spojenými s budování nového zdroje v lokalitě Jaderné elektrárny Dukovany, je potřeba s těmito případnými plány počítat a zohlednit je.

Druhým, neméně významným tématem je výběr oblasti pro stavbu budoucího hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů. Výběr z kandidátních oblastí na území České republiky je po mnoha letech opět na svém počátku a seznam oblastí byl vůči původnímu seznamu dokonce o několik míst rozšířen. Vybraná lokalita musí splňovat přísné geologické požadavky potvrzené právě probíhajícími průzkumy. Za neméně důležitý aspekt je považován názor veřejnosti k plánované výstavbě hlubinného úložiště, který v dnešní době nebývá pozitivní. Třebaže se plánovaný termín zprovoznění hlubinného úložiště v roce 2065 zdá být vzdálený, při uvážení činností souvisejících s výstavbou, je tato doba přiměřená k úspěšnému dokončení všech prací. K datu sepsání této diplomové práce tak zbývá necelých 47 let na proinvestování desítek miliard českých korun vedoucí k vybudování bezpečného hlubinného úložiště. Doposud zveřejněné údaje a informace o hlubinném úložišti jsou využity jako jedny ze základních zdrojů, na kterých je v této práci postaven návrh harmonogramu předávání vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště.

Nelze opomenout stávající stav první jaderné elektrárny v České republice – Jaderné elektrárny Dukovany. Všechny bloky jaderné elektrárny dnes již přesluhují svoji původní třicetiletou projektovou životnost. Majitel ČEZ, a.s. se netají svými plány prodloužit bezpečný chod elektrárny až na dvojnásobek původní životnosti. Historie plánu prodloužení životnosti sahá až k přelomu tisíciletí a samotné provedení bývá běžně označováno zkratkou LTO. Jednotlivé varianty prodloužení životnosti elektrárny jsou zpracovány ve třech variantách, kde každá z variant představuje prodloužení životnosti o deset, dvacet a třicet let nad původní projektovou hodnotu.

Obsah této diplomové práce se přímo netýká ani jednoho z výše uvedených témat, nicméně bez nich by prezentované výsledky postrádaly smysl nebo by byly neúplné. Cílem této diplomové práce je prezentovat různé varianty návrhů předávání vyhořelého jaderného paliva z Jaderné elektrárny Dukovany pro uložení v hlubinném úložišti s ohledem na uvedená témata. Zadání práce vychází z potřeb Jaderné elektrárny Dukovany na zpracování předběžného návrhu předávání vyhořelého jaderného paliva k uložení do hlubinného úložiště.

# 2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY

Jaderná elektrárna Dukovany (EDU) je starší ze dvou jaderných elektráren provozovaných na území ČR. EDU se nachází v kraji Vysočina, na hranici s Jihomoravským krajem. Elektrárna je pojmenována podle obce Dukovany, v jejíž blízkosti se nachází.

Historie EDU sahá do počátku 70. let 20. století, kdy se zrodily plány na výstavbu jaderných zdrojů na území tehdejší Československé republiky. Samotná výstavba byla z důvodů změn projektu zahájena až v roce 1978. První blok byl spuštěn v květnu roku 1985, poslední pak v červenci 1987. EDU se svými čtyřmi reaktory byla původně projektována s výkonem 1760 MWe. Během následujících let byl se zavedením modernějších technologií a s využitím projektových rezerv výkon navýšen na současných 2040 MWe. Jaderná elektrárna Dukovany má také jedno významné světové prvenství, kterým je spuštění dvou reaktorů v témže roce v jedné lokalitě (bloky 2 a 3 v roce 1986). Z dnešního pohledu je navíc zajímavé, že přibližně 80 % všech komponent bylo vyrobeno v tehdejším Československu. [1]

## 2.1 Reaktory a palivo

EDU disponuje čtyřmi reaktory v tzv. dvojblokovém uspořádání. Provozované reaktory jsou typu VVER 440/213 o projektovém tepelném výkonu 1375 MWt. Aktivní zóna reaktoru má výšku 2,5 m a průměr 2,88 m. V aktivní zóně se nachází 312 palivových souborů a 37 souborů regulačních, celkem tedy 349 palivových souborů. Moderace i chlazení je zajištěno pomocí vody s náležitou chemickou úpravou a čištěním. [1]

Jako jaderné palivo je využíván obohacený uran. Maximální hodnota obohacení je stanovena na hodnotu 5 % $^{235}$U. U nyní využívaného paliva je obohacení jednotlivých palivových souborů progresivní. O jaderném palivu je více pojednáno dále v kapitole č. 5. Celková hmotnost projektové vsázky paliva je 42 tun. [1]

## 2.2 EDU 5

V lokalitě EDU je dle platné Státní energetické koncepce uvažováno s výstavbou nového jaderného bloku pod zkratkou EDU 5. Samotná výstavba nových bloků je mnohaletou záležitostí a za současné situace nelze předpokládat uvedení EDU 5 do provozu dříve jak za 20 roků. Nové bloky jaderných elektráren se dnes již téměř výhradně staví ve velikostech nad 1000 MWe. Provoz stávajících bloků současně s novým blokem EDU 5 by však nebyl z důvodu nedostatku chladící vody z řeky Jihlavy umožněn. Lze tedy přepokládat, že potencionální výstavba EDU 5 sice nijak neovlivní produkci ani skladbu VJP stávajících bloků, ale případné zprovoznění nového bloku, by již mohlo vést k předčasnému ukončení provozu některých stávajících bloků EDU. Vybudování EDU 5 také může značně ovlivnit způsob a záměry v oblasti nakládání s obalovými soubory s VJP. Za předpokladu dalšího provozu jaderného zdroje v lokalitě EDU, by se do velké míry snížily náklady na skladování OS ze stávajícího provozu, což by mohlo vést ke snahám o oddálení konečného uložení VJP. [2]

# 3 VÝPOČETNÍ PROGRAM PAL440_R4

Výpočetní program PAL440_R4 je výpočetní software určený ke stanovování vybraných veličin u paliva VVER-440. Jeho primárním účelem je výpočet požadovaných hodnot u každého jednotlivého palivového souboru, pro účely plnění OS a evidenci nuklidů při správě paliva. Samotná funkce programu PAL440_R4 je založena na vyhledávání ve zdrojových souborech, které byly připraveny pomocí programu Origen Arp z kódu SCALE 6.1.3 (účinné průřezy pro každý typ palivového souboru byly vypočteny 2D transportním kódem TRITON/NEWT). Zdrojové soubory ve formě textových souborů s vypočtenými hodnotami pak slouží jako podklad pro jednotlivé výpočty založené na interpolaci mezi nejbližšími vypočtenými hodnotami, případně také pro extrapolaci. Zdrojové soubory byly napočítány pro všechny využívané typy paliva i pro palivo 4.76%Gd2X, jehož využití se předpokládá v brzké budoucnosti. [3]

Pro účely této práce jsou využívány výpočty celkové aktivity a celkového zbytkového výkonu. Všechny stanovované veličiny na jeden PS dle [3] pak jsou:

- Aktivity (Bq) a hmoty (kg) 19 vybraných nuklidů ($^{3}$H, $^{85}$Kr, $^{90}$Sr, $^{106}$Ru, $^{129}$I, $^{134}$Cs, $^{137}$Cs, $^{144}$Ce, $^{235}$U, $^{236}$U, $^{238}$U, $^{238}$Pu, $^{239}$Pu, $^{240}$Pu, $^{241}$Pu, $^{242}$Pu, $^{241}$Am, $^{242}$Cm, $^{244}$Cm).
- Zdroje fotonů v 7 energetických grupách (hranice grup (MeV): 0.45, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0).
- Zdroje neutronů ze spontánního štěpení (1/s).
- Zdroje neutronů z (α,n) reakce na $UO_2$.
- Aktivita od štěpných produktů (1/s).
- Aktivita od transuranů (1/s).
- Aktivita od aktivace konstrukčních materiálů (1/s).
- Celkový zdroj fotonů (1/s).
- Celkový zdroj neutronů (1/s).
- Celková aktivita (Bq).
- Celkový zdroj uvolňované energie z PS – zbytkový výkon (W).

Rozsah vypočtených hodnot zdrojových souborů a jejich omezení [3]:

- Vyhoření 5 MWd/$kg_U$ až 72 MWd/$kg_U$.
- Doba chlazení 0,01 roku až 80 roků. Pro doby chlazení nad 80 roků se provádí extrapolace z posledního vypočteného intervalu (70 – 80 roků). Extrapolace pro aktivitu štěpných produktů využívá mocninné funkce, pro aktivitu celkovou a pro zbytkový výkon pak exponenciální funkce.
- Provozování PS při nominálním výkonu (vliv především na krátké doby chlazení).

Pro samotný výpočet je vždy nutné stanovit základní parametry [3]:

- Typ palivového souboru.
- Doba chlazení (tj. doba od ukončení poslední kampaně v reaktoru).
- Vyhoření (vypočtené hodnoty na základě návrhu dané kampaně).

# 4 LTO DUKOVANY

Program LTO (z anglického originálu Long Term Operation), neboli dlouhodobý provoz EDU za hranicí původní projektové životnosti, je program s cílem zajistit další provoz stávajících bloků. Při výstavbě jaderné elektrárny byla uvažována její životnost na dobu 30 let, jedná se o tzv. projektovou životnost. Tomu by odpovídaly v čase psaní této práce spíše úvahy o způsobu nakládání s VJP z již uzavřené elektrárny, ale vzhledem k údržbě a celkovému vývoji v odvětví jaderné energetiky, je možné uvažovat o dalším provozu za projektovou životnost. Důležitým aspektem pro LTO je životnost klíčových částí jaderné elektrárny, které nejsou díky své konstrukci nahraditelné, respektive nahraditelnost je ekonomicky velmi náročná a technologicky složitá. Stejně jako jinde ve světě i v případě EDU se jedná o jadernou část elektrárny a její největší tzv. limitní prvky, kterými jsou reaktorové nádoby a parogenerátory. [1], [4]

Samotné prodloužení provozu je závislé na udělení povolení k provozování jednotlivých bloků, kterou v ČR uděluje SÚJB na základě žádosti a podkladů navrhovatele (společnost ČEZ, a.s., vlastník a provozovatel EDU). Pro rozhodnutí je nejpodstatnější dokladová část žádosti (Program zajištění LTO EDU), podle níž SÚJB posuzuje hlavní kritérium spojené s provozem – bezpečnost dalšího provozu. [4]

Vzhledem k uvážení podobných procesů v zahraničí je obvykle možné, s respektováním dodržení řádné údržby komponent, prodloužit životnost o desítky let oproti projektové životnosti zařízení. V současné době se jak ve světě tak i u nás běžně uvažuje o prodloužení provozu na dobu 60 let, některé úvahy a plány sahají až na období 80 let. Proces udělování povolení k provozu je velmi složitý a finančně i časově náročný a z těchto důvodů bývá licence k provozu bloku jaderné elektrárny obvykle udělována na dobu 10 let. V roce 2017 již měla společnost ČEZ, a.s. povolení k provozu za projektovou životnost pro všechny čtyři bloky EDU. [5]

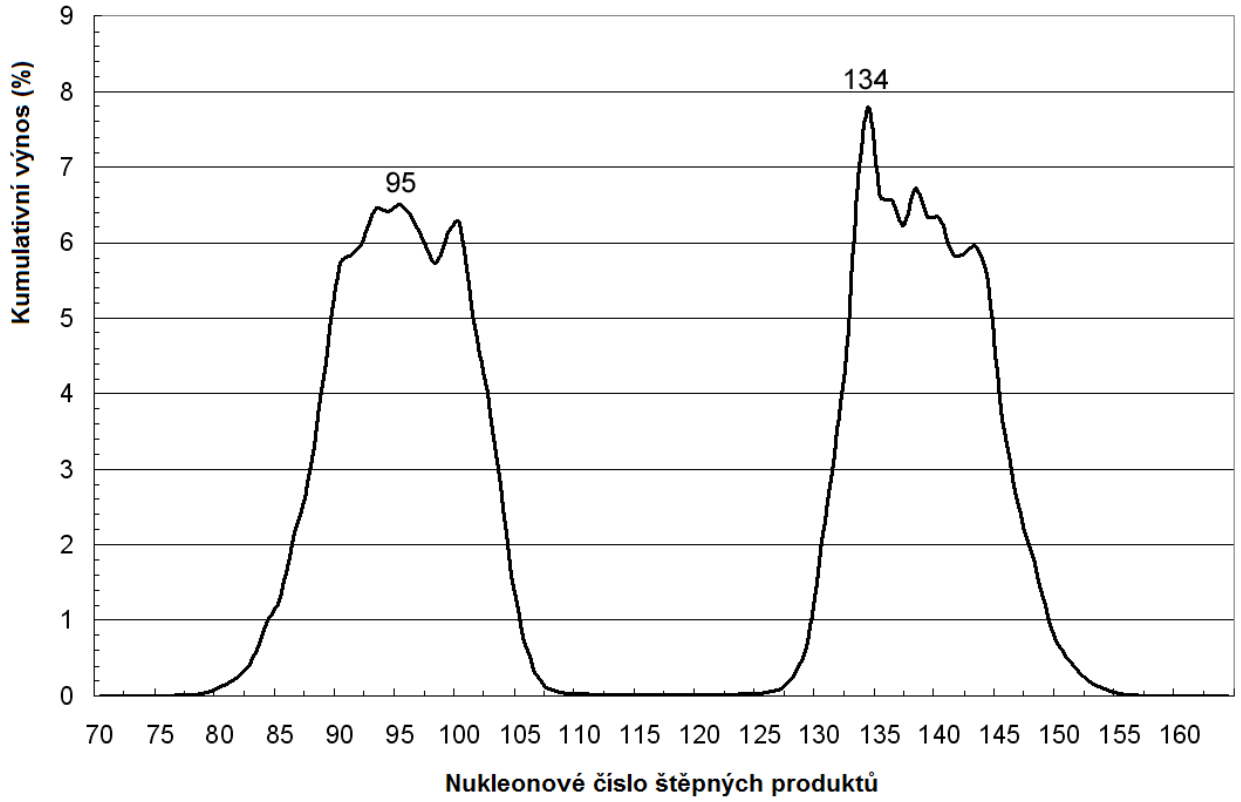
Z pohledu navrhovatele je základním kritériem prodlužování provozu technicko-ekonomické zhodnocení. Pro všechny úvahy je zásadní hodnocení ekonomické výhodnosti, jenž je uvažováno ve třech základních variantách (LTO +10, +20, +30; kde číslovka vždy značí plánové prodloužení v letech za projektovou životnost 30 let). Tyto varianty s desetiletým odstupem byly zvoleny záměrně především z důvodu udělování původních povolení k provozu právě na dobu 10 let. S jednotlivými variantami značně souvisí nutnost výměny některých důležitých komponent a částí, které mohou být nákladově tak významné, že se další prodlužovaní životnosti i přes technologickou zvládnutelnost nevyplatí. [4]

Základní cíl programu LTO v podobě získání povolení k provozu na dalších 10 let je již splněn. Tento úkol může být považován za splněný, přestože jsou povolení k provozu pro všechny čtyři bloky EDU udělena na dobu neurčitou. Ostatní varianty LTO budou i nadále rozvíjeny a rozšiřovány o dílčí varianty uvažujícími s dobami prodlužování i jinými, než +20 a +30. Vzhledem ke stávající situaci programu LTO a povolením na dobu neurčitou, budou pro účely této práce využity původní varianty LTO s desetiletými odstupy. [4], [5]

# 5 SLOŽENÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

Složení vyhořelého jaderného paliva je velmi rozmanité a závisí na mnoha faktorech, mezi které můžeme zařadit původní procento obohacení, materiálové složení samotného paliva v podobě různých příměsí, konstrukci PS a způsob využití v AZ, které ovlivňuje způsob ozařování jednotlivých částí. [6]

Hlavní podíl na obsahu radioaktivních izotopů v palivu má míra využití paliva označovaná jako vyhoření s jednotkou $MWd/kg_U$. Množství vzniklých radioaktivních izotopů ze štěpné reakce je pak přímo závislé na hloubce vyhoření konkrétního paliva. Pro štěpnou reakci $^{235}U$ je graficky znázorněn kumulativní výnos jednotlivých izotopů na obr. 5-1.




*Obr. 5-1 Kumulativní výnos štěpných produktů pro $^{235}U$, převzato z [7]*

Izotopy vznikající štěpením uranu $^{235}U$ jsou nazývány štěpné produkty. Vysoká aktivita v jaderném palivu způsobuje aktivaci některých stabilních izotopů z konstrukčních materiálů a chladiva. Těmto izotopům se pak říká aktivační. Složení aktivačních produktů je dáno čistě jen materiálovým složením okolí jaderného paliva. Poslední skupinou radioaktivních izotopů jsou aktinoidy vznikající radiačním záchytem především na $^{238}U$, ale také na dalších izotopech s vysokým protonovým číslem. Aktinoidy jsou prvky s protonovým číslem 90 až 103. Aktinoidy a jejich štěpné produkty jsou ve VJP značně zastoupeny a nelze je opominout. [6]

Jednotlivé skupiny radioaktivních izotopů a jejich nejvýznačnější představitelé jsou uvedeny v následujících tabulkách. Seznam izotopů a jejich zatřídění bylo převzato z [6], poločasy přeměny a energie uvolněná při přeměně pak z [8].

*Tab. 5-1 Významné izotopy ve VJP – aktivační produkty*

| Prvek | Izotop | Poločas přeměny | Poznámka |
|---|---|---|---|
| vodík | $^{3}H$ | 12,32 r | chladivo |
| uhlík | $^{14}C$ | 5 700 r | chladivo |
| chrom | $^{51}Cr$ | 27,7 d | matriál AZ |
| mangan | $^{54}Mn$ | 312,3 d | matriál AZ |
| železo | $^{55}Fe$ | 2,75 r | matriál AZ |
| | $^{59}Fe$ | 44,49 d | matriál AZ |
| kobalt | $^{60}Co$ | 5,27 r | matriál AZ |
| zinek | $^{65}Zn$ | 243,8 d | matriál AZ |
| zirkonium | $^{93}Zr$ | $1{,}61\cdot10^{6}$ r | Materiál PS |
| | $^{95}Zr$ | 64,03 d | Materiál PS |
| niob | $^{95}Nb$ | 34,99 d | Materiál PS |

*Tab. 5-2 Významné izotopy ve VJP – aktinoidy*

| Prvek | Izotop | Poločas přeměny | Zastoupení (%)[1)] |
|---|---|---|---|
| uran | $^{233}U$ | $1{,}592\cdot10^{5}$ r | <0,01 |
| | $^{235}U$ | $7{,}04\cdot10^{8}$ r | 1,0245 |
| | $^{236}U$ | $2{,}342\cdot10^{7}$ r | <0,01 |
| | $^{238}U$ | $4{,}468\cdot10^{9}$ r | 96,547 |
| neptunium | $^{236}Np$ | $1{,}54\cdot10^{5}$ r | 0,119 |
| | $^{237}Np$ | $2{,}14\cdot10^{6}$ r | |
| | $^{239}Np$ | 2,356 d | |
| plutonium | $^{236}Pu$ | 2,858 r | <0,01 |
| | $^{238}Pu$ | 87,7 r | 0,0626 |
| | $^{239}Pu$ | $2{,}41\cdot10^{4}$ r | 1,4177 |
| | $^{240}Pu$ | 6 561 r | 0,3760 |
| | $^{241}Pu$ | 14,33 r | 0,3014 |
| | $^{242}Pu$ | $3{,}73\cdot10^{5}$ r | 0,0899 |
| | $^{244}Pu$ | $8{,}08\cdot10^{7}$ r | <0,01 |
| americium | $^{241}Am$ | 432 r | 0,039 |
| | $^{242}Am$ | 141 r | |
| | $^{243}Am$ | 7 370 r | |
| curium | $^{242}Cm$ | 162,8 d | 0,022 |
| | $^{243}Cm$ | 29,1 r | |
| | $^{244}Cm$ | 18,1 r | |

[1)] Data převzata z [9], palivo typu 4.38%Gd-2M+

Následující tabulka má sloužit především pro ilustraci rozmanitého spektra radioaktivních izotopů a také jako ukázka příspěvku jednotlivých izotopů do výsledné aktivity a produkce tepelné energie VJP. Pro účely této práce jsou nejvýznamnější radioaktivní izotopy s poločasem přeměny v hodnotách desítek roků, mezi které patří především $^{90}$Sr, $^{137}$Cs, $^{151}$Sm.

*Tab. 5-3 Významné izotopy ve VJP - štěpné produkty*

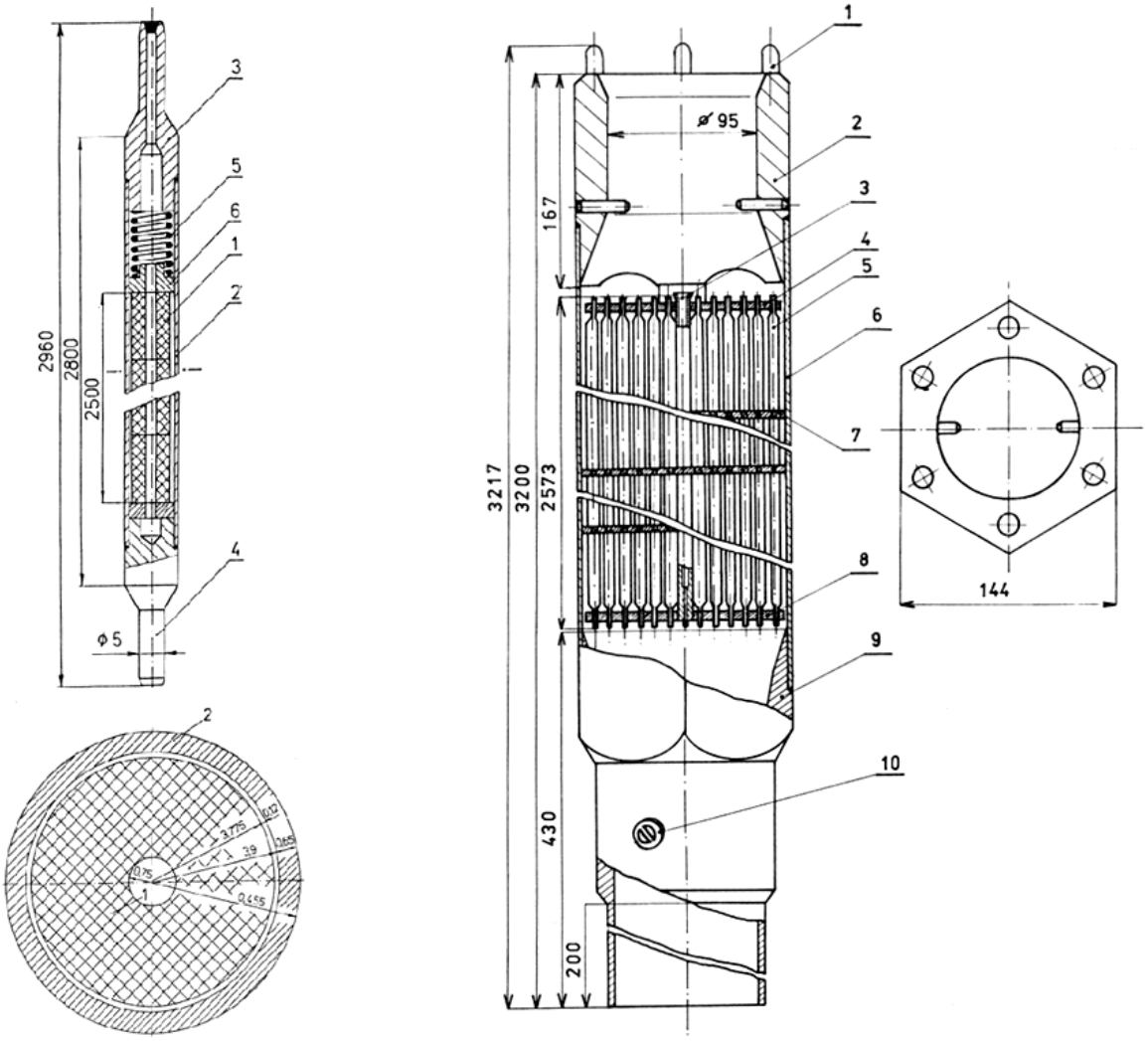
| **Prvek** | **Izotop** | **Poločas přeměny** | **Energie uvolněná při přeměně** | **Zastoupení ve štěpných produktech (%)[1)]** |
|---|---|---|---|---|
| selen | $^{79}$Se | $1{,}13\cdot10^{6}$ r | 151 keV | 0,051 |
| krypton | $^{85}$Kr | 10,756 r | 687 keV | 0,286 |
| stroncium | $^{90}$Sr | 28,79 r | 2826 keV | 5,735 |
| zirkonium | $^{93}$Zr | $1{,}53\cdot10^{6}$ r | 91 keV | 6,295 |
| technecium | $^{99}$Tc | $2{,}11\cdot10^{5}$ r | 297 keV | 6,132 |
| ruthenium | $^{106}$Ru | 375,59 d | 3001 keV | 0,411 |
| palladium | $^{107}$Pd | $6{,}5\cdot10^{6}$ r | 33 keV | 0,163 |
| cín | $^{126}$Sn | $2{,}3\cdot10^{5}$ r | 4050 keV | 0,023 |
| tellur | $^{132}$Te | 3,2 d | 515 keV | 4,276 |
| jód | $^{129}$I | $1{,}57\cdot10^{7}$ r | 194 keV | 0,706 |
| cesium | $^{134}$Cs | 2,0648 r | 2058 keV | 6,789 |
| | $^{135}$Cs | $2{,}3\cdot10^{6}$ r | 269 keV | 6,333 |
| | $^{137}$Cs | 30,07 r | 1176 keV | 6,221 |
| baryum | $^{140}$Ba | 12,751 dne | 734 keV | 6,314 |
| cer | $^{144}$Ce | 284,89 d | 318 keV | 5,474 |
| neodym | $^{147}$Nd | 11 d | 895 keV | 2,232 |
| promethium | $^{147}$Pm | 2,623 r | 224 keV | 2,232 |
| samarium | $^{151}$Sm | 90 r | 390 keV | 0,420 |
| europium | $^{155}$Eu | 4,753 r | 252 keV | 0,033 |

[1)] Jedná se o podíl produktů při samotném štěpení, bez uvažování časového odstupu.

Diplomová práce se věnuje analyzování zdrojového členu vyhořelého jaderné paliva a tak je namístě alespoň krátké vysvětlení pojmu, jak bývá všeobecně přijímán: "Zdrojový člen představuje generaci energie na vztažný element" Jako vztažný element v této práci předpokládáme jednotlivé palivové soubory.

# 6 SORTIMENT JADERNÉHO PALIVA

Sortiment využívaného jaderného paliva byl ovlivněn velkým množstvím událostí, které měly zásadní vliv na vývoj a složení využívaných paliv. V následující kapitole je uveden zkrácený popis vývoje a zdůrazněny změny, které vedly především k prodloužení jednotlivých kampaní, ke zvýšení výkonu tepelného i elektrického, a také ke zmenšení produkce VJP. Pro představu čtenáře je níže také uveden nákres konstrukčního uspořádání palivového proutku a palivového souboru.




*Obr. 6-1 Palivový proutek a palivový soubor, převzato z [10]*

V následující tabulce jsou uvedeny základní výkonnostní parametry a přibližné hmotnostní složení pro všechny typy již využitých PS i pro typ, který se teprve plánuje zavádět. Tabulka má posloužit především pro dokreslení jednotlivých změn popsaných v následujících kapitolách.

*Tab. 6-1 Složení palivových souborů, dle [3], [10](upraveno)*

| **Typ PS** | **1.60% klasické** | **2.40% klasické** | **3.60% klasické** | **3.82% profil.** | **4.38% Gd1** | **4.25% Gd2** | **4.38% Gd2M** | **4.25% Gd2+** | **4.38% Gd2M+** | **4.76% Gd2X** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $MW/t_u$ | 32,77 | 32,77 | 32,77 | 32,77 | 32,77 | 31,19 | 32,76 | 31,19 | 31,4 | 31,4 |
| MW/PS | 3,939 | 3,939 | 3,939 | 3,939 | 3,939 | 3,.939 | 4,137 | 3,939 | 4,225 | 4,225 |
| Nominální výkon reaktoru (MWt) | 1375 | 1375 | 1375 | 1375 | 1375 | 1375 | 1444 | 1444 | 1485 | 1485 |
| Průměr pal. tablety max. (mm) | 7,60 | 7,60 | 7,60 | 7,57 | 7,57 | 7,60 | 7,60 | 7,60 | 7,80 | 7,80 |
| Centrální otvor pal. tablety (mm) | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 0 | 0 |
| Tloušťka pokrytí min. (mm) | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,54 | 0,54 |
| Výška sloupce paliva (mm) | 2420 | 2420 | 2420 | 2420 | 2420 | 2480 | 2480 | 2480 | 2480 | 2480 |
| Tloušťka obálky PS (mm) | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Krok mříže proutků (mm) | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 12,3 | 12,3 | 12,3 | 12,3 | 12,3 |
| **Prvek** | **Složení jednotlivých typů PS (g/PS)** | | | | | | | | | |
| $^{235}U$ | 1 923 | 2 884 | 4 327 | 4 591 | 5 264 | 5 367 | 5 533 | 5 364 | 5 935 | 6 450 |
| $^{238}U$ | 118 276 | 117315 | 115872 | 115 608 | 114864 | 120849 | 120 766 | 120 935 | 129 565 | 129 050 |
| O | 16 164 | 16 166 | 16 168 | 16 169 | 16 170 | 17 020 | 17 020 | 17 020 | 18229 | 18229 |
| Fe | 2 708 | 2 708 | 2 708 | 2 543 | 2 543 | 2 546 | 2 546 | 2 546 | 2 546 | 2 546 |
| Cr | 778 | 778 | 778 | 736 | 736 | 737 | 737 | 737 | 737 | 737 |
| Ni | 435 | 435 | 435 | 411 | 411 | 412 | 412 | 412 | 412 | 412 |
| Mn | 75,2 | 75,2 | 75,2 | 71,7 | 71,7 | 71,8 | 71,8 | 71,8 | 71,8 | 71,8 |
| Zr | 54 979 | 54 979 | 54 979 | 50 8743 | 51 351 | 49 743 | 49 743 | 49 743 | 45 108 | 45 108 |
| Nb | 817,4 | 817,4 | 817,4 | 712,1 | 716,9 | 700,6 | 700,6 | 700,6 | 639,7 | 639,7 |
| Hf | 16,74 | 16,74 | 16,74 | 15,48 | 15,63 | 7,81 | 7,81 | 7,81 | 7,81 | 7,81 |
| Cu | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 4,81 | 5,05 | 5,05 | 5,05 | 5,42 | 5,42 |
| Cl | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 2,03 | 2,03 |
| Ca | 18,03 | 18,03 | 18,03 | 18,03 | 18,03 | 18,95 | 18,95 | 18,95 | 20,33 | 20,33 |
| Er | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1,36 | 1,36 |
| Gd | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 197.37 | 197.37 | 197.37 | 197.37 | 197.37 |
| He | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0,60 | 0,60 |

## 6.1 Jaderné palivo využívané v minulosti EDU

Ve více než třicetileté historii EDU bylo využito mnoho různých typů jaderného paliva. Krátké popisy jednotlivých typů paliva s uvedením změn a případných vlivů na provozní parametry elektrárny jsou popsány v následujících odstavcích.

### 6.1.1 Projektová palivová vsázka

Pro reaktory EDU byla první vsázka navržena s PS se třemi různými stupni obohacení, a to 1,6 %, 2,4 % a 3,6 % $^{235}$U. Projektový palivový cyklus byl navržen jako tříletý s délkou trvání jedné kampaně 12 měsíců. Po první roční kampani byly vyjmuty PS s původním obohacením 1,6 % a zavezeny nové PS. Nové PS se do reaktoru zavážely v počtech 114, 114 a 121 nových PS. Průměrně se tedy uvažovalo s roční zavážkou 116 nových PS z čehož bylo 80 PS s obohacením 3,6 % a 36 PS s obohacením 2,4 %. Nové PS byly v AZ umísťovány dle schématu out-in, což znamená zavezení nových PS na okraj aktivní zóny a jejich přesun v dalších kampaních směrem do středu aktivní zóny. [10]

### 6.1.2 Modernizace palivových vsázek

Projektová vsázka byla navržena v době vypracování projektu na přelomu 70. a 80. let 20. století. S uvážením délky výstavby byla přirozená snaha o zvýšení efektivity a uplatnění nových znalostí dostupných v době zprovoznění bloků. Tyto znalosti společně s možnostmi výpočetní techniky vedly k využití optimalizačních výpočtů pro návrh rozmístění aktivní zóny. Již tedy nebylo nutné se striktně držet projektové vsázky a hlavní snahou bylo neumisťovat nové PS na okraj aktivní zóny, ale naopak do její vnitřní části. Umístění již částečně vyhořelých PS na okraj namísto nových PS vede k nižší dávce záření na reaktorovou nádobu, což přispívá k její delší životnosti. Dále také inovativní schéma uspořádání umožňuje lepší využití paliva. Optimalizační výpočty již od roku 1987 vedly ke snaze prodloužit palivový cyklus na 4 roky a později se také otevřela možnost využití nových typů paliva, čehož bylo využito. [11]

Základním předpokladem pro další optimalizace byl nový software - program MOBY-DICK. Program MOBY-DICK je český software vyvíjený od 80. let 20. století inspirovaný ruským programem BIPR. Program BIPR byl využíván již v 70. letech a z toho plynuly některé jeho nevýhody a hlavně omezení pro další vývoj jaderného paliva. Možnosti tehdejší doby neumožňovaly komplexní řešení, a tak byl BIPR provozován s velkým množstvím bezpečnostních rezerv nejen fyzikálních, ale i technických.

S využitím programu MOBY-DICK tak bylo již na konci 80. let dosaženo 3,5letého palivového cyklu jen na základě jiného uspořádání PS v aktivní zóně. Pro přechod na 4letý palivový cyklus již nestačilo pouze upravit uspořádání PS v aktivní zóně, ale bylo také potřeba inovovat samotnou konstrukci PS. [11]

Inovace PS pro přechod na 4letý palivový cyklus [11]:

- Palivová část regulačních PS s obohacením 3,6 % (původně 2,4 %).
- Záměna ocelových distančních mřížek za zirkoniové.
- Snížení tloušťky obálky paliva na 1,5 mm (původně 2 mm)
- Zvýšení plnícího tlaku hélia na 500–700 kPa (původně 107–147 kPa)
- Zavezení paliva s radiálně profilovaným obohacením, střední obohacení 3,82 % $^{235}$U.
- Změna překládkového schéma na in-out vedoucí ke zlepšení neutronové bilance.

U nového typu paliva s obohacením 3,82 % $^{235}U$ došlo také ke snížení průměru centrálního otvoru z 1,6 mm na 1,4 mm, což vedlo k mírnému navýšení množství uranu. U palivových částí regulačních PS bylo v roce 1999 také nově využito radiálně profilované palivo s průměrným obohacením 3,82 % $^{235}U$.[10], [11]

Další výrazná změna proběhla v roce 2003, kdy se začalo se zavážením nového typu paliva s vyhořívajícím absorbátorem. Palivo nese označení 4.38%Gd-1 a je radiálně profilované, s vyhořívajícím absorbátorem ve formě oxidu gadolinitého ($Gd_2O_3$), s průměrným obohacením 4,38 %. Konkrétní uspořádání PS je uvedeno na obr. 6-1. S novým typem paliva již bylo možné dosáhnout 5letého palivového cyklu. Během doby několika let tak došlo k výraznému prodloužení palivového cyklu a ke značné úspoře nejen financí nutných na pořízení nových PS, ale pro účely této práce především ke znatelnému omezení počtu PS VJP. [11]

Od roku 2003, kdy bylo poprvé zavezeno palivo pracovně označené 4.38%Gd-1 se vývoj a úpravy jaderných paliv značně urychlil. Důležitým aspektem ve vývoji jaderného paliva hrál i požadavek na využití projektových rezerv technologického vybavení, a z toho plynoucí navýšení výkonu EDU. Již v roce 2005 byla dodavatelem paliva nabídnuta další vylepšení paliva v podobě snížení středního obohacení na 4,25 % spojeného s prodloužením palivového sloupce o 6 cm a snížením centrálního otvoru z 1,4 mm na 1,2 mm, čímž dokonce došlo k navýšení množství $^{235}U$ o 6 kg v jednom PS. Snížení obohacení má vliv především na snížení ceny, která je z velké části tvořena položkou za obohacení na požadovanou hodnotu. Vylepšené palivo pod pracovním označením 4.25%Gd-2 bylo využíváno jen krátce a bylo brzy nahrazeno palivem 4.25%Gd-2+. [6], [11]

Další vývojovým stupněm bylo palivo 4.38%Gd-2M poprvé využité u bloku č. 3 v roce 2009, na ostatních blocích v roce 2010. S novým palivem byla také spojená etapa modernizace vedoucí k navýšení výkonu reaktorů na 1444 MWt. Navýšení tepelného výkonu reaktoru o 5 % bylo pokryto čistě změnou paliva. Řezy jednotlivými palivy jsou uvedeny na obr. č. 6-1; 6-2. [11]

## 6.2 Současné jaderné palivo

Současné jaderné palivo, pracovně označené jako 4.38%Gd-2M+, je využíváno od roku 2014. Nejvýraznější změnou vůči předešlým typům paliva je odstranění centrálního otvoru palivové tablety, přičemž konce palivových tablet jsou nově čočkovitě vykrojené. Zároveň došlo k navýšení vnějšího průměru palivové tablety na 7,8 mm z původních 7,6 mm. Uvedené změny vedly k navýšení množství 235U o dalších 9 kg. Celkově tak již aktivní zóna obsahuje 47,2 tun uranu, což je o 12,3 % více než projektová vsázka. S palivem 4.38%Gd-2M+ je délka palivového cyklu stále 5letá, se současným navýšením tepelného výkonu reaktoru na 1485 MWt a 510 MWe (Pozn. navýšení elektrického výkonu bylo dosaženo především změnami na turbíně). [11]

## 6.3 Jaderné palivo uvažované v budoucnu

S cílem bezpečného provozu a zvýšení efektivity je další vývoj paliva nezbytnou záležitostí. Projektové rezervy pro případné další navyšování výkonu již byly téměř vyčerpány, respektive další navyšování výkonu by zahrnovalo značné investice s nejistou návratností. Další vývoj jaderného paliva tedy bude směřovat spíše k navyšování obohacení a tím i k možnosti prodloužení délky jednotlivých kampaní a palivového cyklu. Vyjma již používaných typů jaderného paliva se výhledově uvažuje pouze o jednom novém typu paliva pracovně označeného jako 4.76%Gd-2X. Jedná se palivo vycházející z 4.38%Gd-2M+, u kterého je navýšeno průměrné

obohacení na 4,76 %. Zvýšením průměrného obohacení se tak dostaneme na možnou délku palivového cyklu 16 měsíců oproti stávajícím 12 měsícům. [13]

Pro ukázku technologického provedení jsou na obr. 6-2 a 6-3 znázorněny radiální řezy jednotlivými profilovanými typy PS. Níže je uvedena tabulka s hodnotami středního vyhoření PS z EDU. Hodnoty jsou stanoveny z poskytnutých dat nutných pro výpočty aktivity a zbytkového tepla. Pro PS 4.38% Gd-2M+ a 4.73% Gd-2X je průměrné střední vyhoření aplikováno i pro všechny následující výpočty. Velký rozptyl hodnot vyhoření u staršího typu PS je dán především nevyužitím plného potenciálu daných PS při přechodu na delší palivový cyklus, kde by již svými výkonnostními parametry nedostačovaly požadavkům.

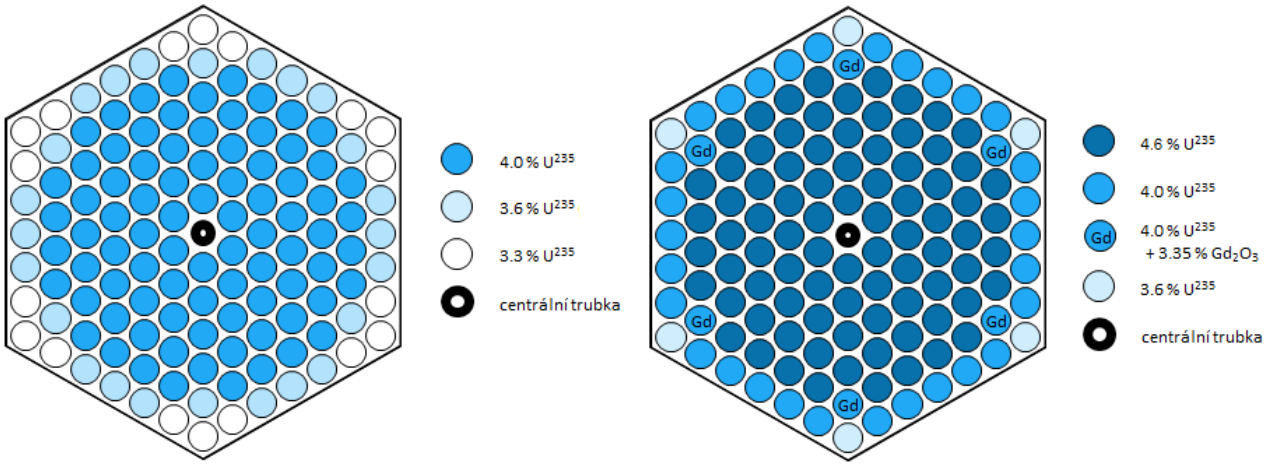
*Tab. 6-2 Střední vyhoření jednotlivých typů PS pro EDU*

| **Typ paliva** | **Střední vyhoření PS (MWd/kg$_U$)** | | | **Pozn.** |
|---|---|---|---|---|
| | **Min.** | **Průměrné** | **Max.** | |
| 1.6% klasické | 7,63 | 11,21 | 20,49 | |
| 2.4% klasické | 18,72 | 25,75 | 38,14 | |
| 3.6% klasické | 19,63 | 35,16 | 45,48 | |
| 3.82% profilované | 34,04 | 44,95 | 52,04 | Některé PS stále v provozu |
| 4.38% Gd-1 | 49,15 | 51,11 | 56,34 | |
| 4.25% Gd-2 | 48,49 | 49,99 | 51,18 | Některé PS stále v provozu |
| 4.38% Gd-2M | 44,98 | 50,81 | 53,85 | Některé PS stále v provozu |
| 4.25% Gd-2+ | 48,58 | 50,70 | 52,79 | Některé PS stále v provozu |
| 4.38% Gd-2M+ | - | 52 | - | Nyní provozované[1)] |
| 4.73% Gd-2X | - | 55 | - | Výhled[2)] |

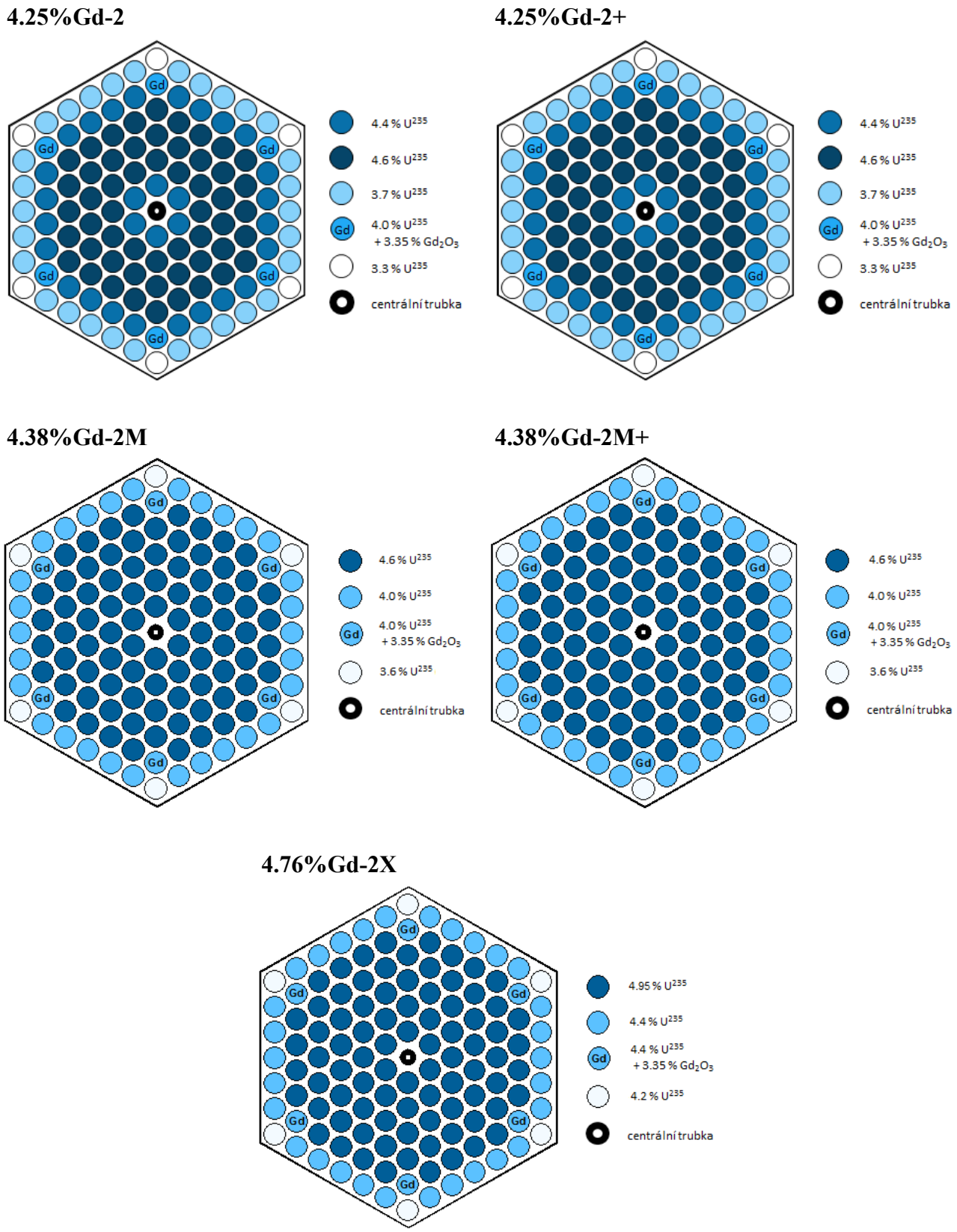
[1)] U nyní provozovaných PS zatím není žádný, který by plně využil svůj potenciál a již nebyl opětovně použit.

[2)] U paliva ve výhledu nelze stanovit předpokládaný rozsah vyhoření.

**3.82% profilované** **4.38%Gd-1**




*Obr. 6-2 Radiální řezy jednotlivými typy palivových souborů, [12] upraveno*




*Obr. 6-3 Radiální řezy jednotlivými typy palivových souborů, [12] upraveno*

# 7 ODHAD SORTIMENTU VJP

Odhad budoucího sortimentu VJP je založen na předpokladech o směřování vývoje palivového cyklu od společnosti ČEZ, a.s. Výchozí bod společný pro všechny varianty je aktuální stav čerstvého paliva přímo ve skladu na EDU a také již uzavřené kontrakty na dodávku paliva nového. Obojí je jasným omezením stanovující využití paliva typu 4.38%Gd2M+ po následující přibližně 3 roky. Z ekonomických důvodů nelze předpokládat, že by již uzavřené kontrakty byly jakkoli měněny. [13]

Pod odhadem sortimentu VJP pro účely této práce je nutné pojem sortiment chápat jako status quo ke dni ukončení provozu posledního bloku EDU v jednotlivých variantách. Až teprve po ukončení provozu všech bloků EDU bude znám konkrétní sortiment VJP. Nyní je pouze jistota u PS využívaných v minulosti, u nichž nelze předpokládat další využití. Ke dni 31. 12. 2017 je za VJP bez dalšího použití v EDU považováno VJP uložené v MSVP, SVP a většina PS v BS, přehledně zatřízeno v následující tab. 7-1.

*Tab. 7-1 Počty PS a jejich umístění k 31. 12. 2017*

| Umístění | Palivových souborů | Obalových souborů | Poznámka |
|---|---|---|---|
| MSVP | 5040 | 60 | |
| SVP | 3192 | 38 | |
| BS | 2079 | - | PS určené k uložení do OS |
| | 131 | - | PS určené k dalšímu využití v AZ |
| AZ-1 | 349 | - | PS různého stáří. Lze předpokládat roční výměnu na úrovni 72 PS. |
| AZ-2 | 349 | - | |
| AZ-3 | 349 | - | |
| AZ-4 | 349 | - | |

Veškeré další výpočty a úvahy jsou všeobecně postavené na údajích platných k 31. 12. 2017. Využití tohoto data má výhodu především ve snadné dostupnosti dat a pro účely této práce, která pracuje s časovými horizonty desítek let, jsou i dostatečně přesná.

Jako výchozí bod jsou také zvoleny odstávky bloků dle harmonogramu pro rok 2018 [13]:

- Blok č. 1 – březen
- Blok č. 2 – květen
- Blok č. 3 – září
- Blok č. 4 – prosinec

Odhad budoucího sortimentu VJP je přehledně členěn po jednotlivých uvažovaných variantách LTO a vždy vychází z uvažovaného plánu zavážky nových PS do reaktorů. Návrh samotné zavážky je hrubým způsobem zjednodušen na pouhý návrh počtu nově zavezených PS bez respektování konkrétních požadavků jednotlivých kampaní. Přesnější návrh počtu nově zavezených PS u jednotlivých kampaní na budoucí roky je ovšem nemožný z důvodu velkého množství proměnných vstupujících do výpočtu každé kampaně, jako je např. uvažovaná délka kampaně, plán odstávek, případné vynucené odstávky mimo plánované termíny. Nutno zmínit, že samotné zjednodušení a případné nepřesnosti v řádech měsíců nebo jednotek kusů PS ovlivňují další výsledky jen minimálně, možno říci až zanedbatelně. Výsledkem návrhu je pak u každé varianty přehledová tabulka s přiřazením VJP do jednotlivých OS, se kterými je pak dále pracováno. U stávajících OS je pro zpracování využíváno jejich stávající pojmenování.

Konkrétní přiřazení a určení vybraných parametrů VJP v jednotlivých PS je uvedeno v kapitole Výpočty aktivit a zbytkového tepla. Pro OS určené pro VJP v budoucnu byl zvolen následující systém pojmenování:

*Tab. 7-2 Systém pojmenování OS pro VJP*

| **Pojmenování** | **Význam** |
|---|---|
| **OS-xx/y-zz** | Celá struktura názvu OS |
| **OS** | Zkratka názvu obalový soubor. Značí pouze, že se jedná o standardní obalový soubor pro VJP s kapacitou 84 PS. |
| **xx** | Upřesnění zdroje ukládaných PS, nabývá hodnot:<br>• **BS** – bazén skladování, tj. PS uložené v bazénu skladování<br>• **10** – varianta LTO +10, tj. PS vzniklé při uvažování provozu s touto variantou<br>• **20** – varianta LTO +10, tj. PS vzniklé při uvažování provozu s touto variantou<br>• **30** – varianta LTO +10, tj. PS vzniklé při uvažování provozu s touto variantou |
| **y** | Upřesnění bloku, že kterého VJP pochází. Čísla **1, 2, 3, 4**. Neuplatňuje se u využití zkratky BS. |
| **zz** | Pořadové číslo OS, raženo vzestupně od č. **01** dle data posledního vyvezení z AZ reaktoru. |

Před samotným stanovováním sortimentu pro jednotlivé varianty LTO je ještě nutné rozřadit PS umístěné v BS. Jak uvádí tabulka 7-2 je v bazénu skladování 2210 PS, z čehož 131 je ještě možné využít v AZ reaktoru. Zbývajících 2079 je vzestupně podle data ukončení poslední kampaně přiřazeno jednotlivým OS s označením OS-BS-01 až OS-BS-24. Zůstatek 63 PS je pak rozložen v poměru (14-15-15-15) PS na jednotlivé reaktorové bloky a přiřazeno do OS s označením OS-BS-25 až 28. Tyto OS také obsahují 131 PS v poměru (34-33-32-32) z BS, u kterých je předpoklad jejich dalšího využití. Aby se reflektovalo jejich další využití, bylo každému ze 131 PS přiřazeno vyhoření na úrovni předpokládaného vyhoření daného typu paliva a rok poslední činnosti v reaktoru posunut na rok 2020. Zbylá kapacita OS-BS-25 až 28 je pak určena pro PS z jednotlivých bloků ukončených v roce 2018. Názorněji bude toto rozdělení vidět v kapitole Výpočty aktivit a zbytkového tepla.

Samostatnou kapitolou odhadu je návrh několika posledních kampaní před uvažovaným ukončením provozu. Do úvah vstupuje velké množství často protichůdných požadavků. Výsledný návrh byl zvolen v konzervativních duchu typickém pro oblast jaderné energetiky. Z pohledu nákladů a produkce VJP by bylo možné zvolenou variantu považovat za variantu pesimistickou, neboť spočívá v nutnosti pořízení většího množství PS o vyšším obohacení, a s tím souvisejících vyšších nákladech. Návrh poslední kampaně je v základech společný pro všechny bloky EDU. Při uvážení neomezené platnosti současných povolení k provozu všech bloků nejsou ani stanoveny konkrétní měsíce, ke kterým by měl být provoz jednotlivých bloků ukončen. Vychází se tedy z předpokladu ukončení provozu ve stejném měsíci, na který vychází odstávky v roce 2018.

Jakožto dvě krajní varianty byly pro stanovení výsledného návrhu uvažovány:

I. Varianta – chod až do úplného konce pouze s palivem 4.38%Gd-2M+ v takové podobě, že by toto palivo bylo využito i na jednu poslední kampaň a zdaleka by se nevyužil jeho potenciál.

II. Varianta – co největší omezení potřeby nákupu nového paliva, která by byla postavená na větším počtu krátkých kampaní v délce několika měsíců s přeskládáním již využitého paliva. Tento způsob provozu by znamenal větší využití, a s tím spojené větší vyhoření již nakoupeného paliva a také provoz pod nominálními parametry bloku.

**Hlavní aspekty mající vliv na stanovení posledních kampaní před ukončením provozu:**

1. Náklady na technologii elektrárny
   Je vcelku pochopitelné, že majitel jakéhokoli zařízení chce investovat co nejmenší množství prostředků a úsilí na udržení zařízení v provozu. Tyto snahy budou u zařízení se známým datem ukončení provozu obzvlášť silné. Pro variantu II. je nutné uvažovat s vyšším rizikem potřeby neplánovaných zákroků a oprav technologie z důvodu vyššího namáhání některých komponentů během odstavování a najíždění reaktoru.
2. Náklady na jaderné palivo
   Nejen náklady na samotné pořízení čerstvého paliva jsou vysoké, ale i veškeré činnosti spojené s manipulací a následným uložením VJP do OS a jejich uskladnění. Tento argument znevýhodňuje I. variantu.
3. Výroba elektrické energie
   Potřeba výroba elektrické energie v době uzavření EDU je nepredikovatelná. Vstupují zde do hry nejen aspekty tržní ceny elektrické energie, ale také stabilita sítě a potřeba dodávek elektrické energie v oblasti s velmi slabou zdrojovou základnou.
4. Bezpečnost provozu
   U bezpečnosti provozu je důležitá především oblast jaderné bezpečnosti. Z tohoto pohledu je významným subjektem SÚJB, který by pro provoz dle možné II. varianty musel vydat souhlasné stanovisko.
5. Parametry VJP
   Pro II. variantu by parametry VJP určené především hodnotou vyhoření byly mírně vyšší, než u paliva se standardním vyhořením. Toto by s sebou neslo nároky na následnou delší dobu pobytu PS v BS a vyšší hodnoty aktivity i zbytkového výkonu.
6. Využití PS v jiném reaktoru
   Možnost využití PS z jednoho reaktoru v reaktoru jiném (vše v rámci EDU) není uvažována. Čistě teoreticky by to možné bylo, ovšem opatření nutná pro převoz čerstvě vyvezeného PS do jiného reaktoru by byly nákladnější, než využití paliva čerstvého.
7. Reverzní využití projektové vsázky
   Tato možnost je neefektivní z pohledu nynějších parametrů bloků a potřeby úpravy původních PS – návrh zcela nových PS v jednotkách kusů by sebou nesl příliš velké náklady. Tato varianta je tedy z pohledu předpokládaných vysokých nákladů zavržena.

## 7.1 Varianta LTO +10

Varianta LTO +10 by znamenala ukončení provozu bloků v letech 2025 až 2027, tedy začátek odstavování prvního bloku již za 7 let. Při uvážení skladových a kontraktovaných zásob jaderného paliva není smysluplné pro variantu LTO +10 uvažovat se změnami v již zavedeném sortimentu. Bude tedy dle [13] uvažováno využití pouze paliva 4.38%Gd-2M+, a také stejný způsob provozu bloku, tj. 12 měsíční kampaně.

Poslední kampaně jsou konzervativním způsobem navrženy následovně:

- Po dobu poslední kampaně bude reaktor po celou dobu pracovat na nominálních hodnotách.
- Všechny výměny paliva včetně předposlední jsou prováděny standardním způsobem jako pro kontinuální provoz s 12měsíční kampaní.
- U poslední výměny paliva (poslední palivová vsázka) je uvažováno pro účely výpočtu s palivem 2.4% klasické v počtu 48 PS. Přestože by nebylo možné využít přesně tento typ PS, ale software PAL440_R4 neumí s jiným palivem obohaceným na 2,4 % procenta pracovat.
- Pro palivo 4.38%Gd-2M+ bylo stanoveno vyšší než skutečné průměrné vyhoření na úrovni 52 MWd/$kg_U$, u paliva 2.4% klasické pak po korekci 20 MWd/$kg_U$. Korekce je provedena z důvodu rozdílných parametrů, kdy starší palivo obsahovalo o cca 12 % méně uranu než stávající provedení.

*Tab. 7-3 Ověřovací výpočet poslední kampaně LTO +10*

| **Vstupní hodnoty** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Výkon reaktoru: | 1485 MWt | Typy paliva: | | 4.38%Gd-2M+ (301 PS)<br>2.4% klasické (48 PS) | | | |
| Požadovaná délka kampaně: | 335 dnů | | | | | | |
| Hmotnost vsázky: | 47200 kg | | | | | | |
| Hmotnost uranu v PS | 135,24 kg | | | | | | |
| Počet předešlých kampaní: | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Běžné vyhoření po ukončení další kampaně (MWd): | | 15 | 30 | 40 | 47 | 52 | 54 |
| Přírůstek vyhoření v rámci kampaně (MWd): | | 15 | 15 | 10 | 7 | 5 | 2 |
| PS v AZ před poslední kampaní: | | 48 | 72 | 72 | 72 | 72 | 13 |
| Navrhované vyhoření v poslední kampani (MWd): | | 17[1)] | 17[1)] | 11 | 7 | 5 | 2 |

[1)] Hodnota vychází z běžného provozování čerstvých PS na úrovni 1,6 až 1,7 násobku nominálního výkonu, viz výpočet níže.

Pozn.:Zde i v dále v textu může být využit zkrácený zápis MWd namísto MWd/kgU, obojí označení má totožný význam a to vztažení jednotky vyhoření na jeden kilogram uranu.

Výpočty využité pro návrhy je nutné brát s velkou rezervou. V žádném případě by podle nich nebylo možné stanovovat skutečnou palivovou vsázku pro další kampaň a už vůbec nejsou pro podobné účely využívány. Pro skutečné návrhy jsou využívány složité diferenciální rovnice implementované v jednotlivých výpočetních programech, jako je např. MOBY-DICK. Pro účely této práce, kde se operuje pouze s počty PS a jejich vyhořením, jsou provedené výpočty dostatečné. Kompletní navržený harmonogram kampaní, jak byl využit pro výpočet, je uveden v příloze 1.

Pro další výpočty jsou využity následující rovnice:

Maximální vyhoření PS:

$$BU_{PS} = \frac{P_{PS} \cdot k_P}{m_{U/PS}} \cdot t \qquad (\mathrm{MWd/kg_U};\ \mathrm{MWt};\ -;\ \mathrm{kg_U};\ \mathrm{dny}) \tag{7.1}$$

Kde $BU_{PS}$ je maximální vyhoření v rámci dané kampaně (MWd/kg$_U$)
$P_{PS}$ je nominální výkon PS (MWt)
$k_P$ je koeficient navýšení nominálního výkonu PS (–), hodnota vychází z maximálního zatížení PS
$m_{U/PS}$ je hmotnost uranu v PS (kg/PS)
$t$ je délka kampaně (dny)

Průměrná hodnota vyhoření na PS:

$$BU_{AVG} = \frac{t \cdot P_t}{m_U} \qquad (\mathrm{MWd/kg_U};\ \mathrm{dny};\ \mathrm{MWt};\ \mathrm{kg_U}) \tag{7.2}$$

Kde $BU_{AVG}$ je průměrná hodnota vyhoření na PS (MWd/kg$_U$)
$t$ je délka kampaně (dny)
$P_t$ je tepelný výkon reaktoru (MWt)
$m_U$ je hmotnost palivové vsázky reaktoru (kg$_U$)

Max. navrhované vyhoření

Nominální výkon dle tab. 5-1: 4,225 MW/PS

$$BU_{PS} = \frac{4{,}225\ \mathrm{MW/PS} \cdot 1{,}65}{135{,}24\ \mathrm{kg/PS}} \cdot 335\ \mathrm{d} = 17{,}26\ \mathrm{MWd/kg_U}$$

Průměrná hodnota vyhoření na PS pro zadané parametry:

$$BU_{AVG\ pož.} = \frac{335\ \mathrm{d} \cdot 1485\ \mathrm{MWt}}{47\,200\ \mathrm{kg_U}} = 10{,}54\ \mathrm{MWd/kg_U}$$

Průměrná hodnota vyhoření na PS pro navržené parametry:

$$BU_{AVG} = \left\{\frac{48 \cdot 17 + 72 \cdot 17 + 72 \cdot 11 + 72 \cdot 7 + 72 \cdot 5 + 13 \cdot 2}{349}\right\} = 10{,}66\ \mathrm{MWd/kg_U}$$

Výše uvedený návrh nevyužívá všechen potenciál PS a je tedy mírně naddimenzován. Přináší ovšem výhody pro samotný návrh harmonogramu předávání VJP do HÚ, kde tak bude počítáno s větším množstvím PS, a také s vyšším vyhořením u PS s počtem kampaní menším než 5. Využité hodnoty (52 MWd pro palivo 4.38%Gd2M+ a 20 MWd pro palivo 2.4%Klasické) tak budou s rezervou reflektovat průběh posledních kampaní.

*Tab. 7-4 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +10*

| Rok | Blok č. 1 | | Blok č. 2 | | Blok č. 3 | | Blok č. 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PS | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) |
| **2018** | 72 | 72 | 78 | 78 | 78 | 78 | 66 | 66 |
| **2019** | 72 | 72 | 60 | 60 | 72 | 72 | 66 | 66 |
| **2020** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2021** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2022** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2023** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2024** | 48[1)] | 48 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2025** | | 349 | 48[1)] | 48 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2026** | | | | 349 | 48[1)] | 48 | 48[1)] | 48 |
| **2027** | | | | | | 349 | | 349 |
| **Celkem** | **480** | **829** | **546** | **895** | **630** | **979** | **612** | **961** |

[1)] Palivo 2.4%Klasické s vyhořením 20 MWd/$kg_U$.

## 7.2 Varianta LTO +20

U varianty LTO +20 je již uvažováno s využitím nového typu jaderného paliva označeného 4.76%Gd-2X. U nového paliva je předpokládána délka jednotlivých kampaní 16 měsíců a první zavezení v roce 2022. Při návrhu bylo také počítáno s jistým přechodným obdobím, než se plně přejde na nové palivo. Přechodné období je typické různě dlouhými palivovými kampaněmi:

- 13 měsíců pro první kampaň s novým palivem (259 PS 4,38 % a 90 PS 4,76 %).
- 14 měsíců pro druhou kampaň (169 PS 4,38 % a 180 PS 4,76%).
- 16 měsíců pro třetí a každou další kampaň (79 PS 4,38 % a 270 PS 4,76 %).

V rámci přechodu na nové palivo nedojde k plnému využití veškerého potenciálu nového paliva a pro tyto PS je tedy uvažováno s dalším využitím. Tím dojde k posunutí jejich poslední aktivní kampaně na pozdější datum. Z tohoto důvodu je přesunuto předpokládané vyvezení 90 PS až do předposlední výměny paliva před ukončením provozu. 90 PS na každý reaktor je počet, který lze bez problémů umístit a skladovat v BS. Zároveň je na místě upozornit, že se v žádném případě nedá uvažovat o pouhém skladování těchto nevyužitých PS a jejich vyčkávání na výměnu v předposlední odstávce. Mnohem pravděpodobnější je varianta jejich postupného využívání a zase nahrazování jinými PS dle aktuálních potřeb jednotlivých kampaní. A proto lze přesun 90 PS ke konci provozu jednotlivých bloků považovat za spíše virtuální operaci čistě pro účely konzervativního odhadu v rámci dalších výpočtů. Zároveň se také jedná o postup, který je využíván i v současnosti, kdy je v BS uloženo 131 PS, u kterých je možnost jejich dalšího využití.

*Tab. 7-5 Ověřovací výpočet posledních 2 kampaní LTO +20*

| **Vstupní hodnoty** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Výkon reaktoru: | 1485 MWt | Typy paliva: | 4.76%Gd-2x+ (301 PS) 3.82% profilované (48 PS) | | | |
| Standardní délka kampaně: | 450 dnů | | | | | |
| Hmotnost vsázky: | 47200 kg | | | | | |
| Hmotnost uranu v PS | 135,24 kg | | | | | |
| Počet předešlých kampaní: | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Běžné vyhoření po ukončení další kampaně (MWd): | | 20 | 38 | 50 | 55 | 57 |
| Přírůstek vyhoření v rámci kampaně (MWd): | | 20 | 18 | 12 | 5 | 2 |
| PS v AZ v 3. kampani před ukončením (MWd) | | 60 | 90 | 90 | 90 | 19 |
| Navržená délka kampaně: | | 13 měsíců | | | | |
| PS v AZ v předposlední kampani: | | 48 | 60 | 90 | 90 | 61 |
| Navržená délka kampaně: | | 11 měsíců | | | | |
| PS v AZ v poslední kampani: | | 0 | 48 | 90 | 150 | 61 |
| Navržená délka kampaně: | | 9 měsíců | | | | |

[1)] Hodnota vychází z běžného provozování čerstvých PS na úrovni 1,6 až 1,7 násobku nominálního výkonu, viz výpočet níže.

Výpočty:

Pro další výpočty bude využito rovnice:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{j} n_i \cdot \Delta BU_i}{n_{PS} \cdot P_t} \text{ (dny; } -\text{; MWd /kg}_\text{U}\text{; } -\text{; MWt)} \tag{7.3}$$

Kde $t$ je počet dnů provozu bloku (dny)
$j$ je počet typů PS s různým počtem již absolvovaných kampaní (–)
$n_i$ je počet PS s různým počtem již absolvovaných kampaní (–)
$\Delta BU_i$ je průměrný přírůstek vyhoření v dané kampani (MWd/kg$_\text{U}$)
$n_{PS}$ je počet PS v AZ reaktoru, zde 349 (–)
$P_t$ Je tepelný výkon reaktoru (MWt)

Délka 3. kampaně před ukončení provozu bloku:

$$t_{-3} = \frac{(60 \cdot 20 + 90 \cdot 18 + 90 \cdot 12 + 90 \cdot 5 + 19 \cdot 2) \cdot 47\,200}{349 \cdot 1485} = 399 \text{ dnů} \sim 13 \text{ měsíců}$$

Průměrná hodnota vyhoření na PS pro zadané parametry:

$$t_{-2} = \frac{(48 \cdot 20 + 60 \cdot 18 + 90 \cdot 12 + 90 \cdot 5 + 61 \cdot 2) \cdot 47\,200}{349 \cdot 1485} = 336 \text{ dnů} \sim 11 \text{ měsíců}$$

Průměrná hodnota vyhoření na PS pro navržené parametry:

$$t_{-1} = \frac{(48 \cdot 18 + 90 \cdot 12 + 150 \cdot 5 + 61 \cdot 2) \cdot 47\,200}{349 \cdot 1485} = 257 \text{ dnů} \sim 9 \text{ měsíců}$$

*Tab. 7-6 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +20*

| Rok | Blok č. 1 | | Blok č. 2 | | Blok č. 3 | | Blok č. 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PS | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) |
| **2018** | 72 | 72 | 78 | 78 | 78 | 78 | 66 | 66 |
| **2019** | 72 | 72 | 60 | 60 | 72 | 72 | 66 | 66 |
| **2020** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2021** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2022** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2023** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2024** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2025** | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2026** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2027** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] |
| **2028** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 0 | |
| **2029** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 0 | 0 | 90 | 60[1)] |
| **2030** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] |
| **2031** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2032** | 60 | 60 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2033** | 48[2)] | 48 | 60 | 60 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2034** | 0 | 90 | 48[2)] | 48 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| **2035** | | 349 | 0 | 90 | 48[2)] | 48 | 48[2)] | 48 |
| **2036** | | | | 349 | 0 | 90 | 0 | 90 |
| **2037** | | | | | | 349 | | 349 |
| **Celkem** | **1116** | **1465** | **1200** | **1549** | **1212** | **1561** | **1194** | **1543** |

[1)] Nižší počet vyvezených PS je uvažován v důsledku neúplného využití potenciálu paliva, které tak bude možno využít v rámci dalších kampaní.

[2)] Palivo 3.82% profilované s vyhořením 40 MWd/$kg_U$.

## 7.3 Varianta LTO +30

Varianta LTO +30 ve všech principech vychází z varianty LTO + 20. Např. přechod z paliva 4.38%Gd-2M+ na palivo 4.76%Gd-2X je plně převzat. Drobnou změnou prošly pouze poslední uvažované kampaně, kdy je u třech bloků (1, 3, 4) zavezeno ve čtvrté kampani od konce pouze 60 nových PS, u bloku č. 2 nedošlo k žádným změnám v návrhu posledních kampaní. Snížením počtu PS z 90 na 60 dojde ke zkrácení kampaně o přibližně 4 měsíce a uvedená změna byla provedena čistě za účelem přesunutí data ukončení provozu na jarní a letní měsíce roku. Při využití plné vsázky nového paliva by se provoz bloků mohl dostat až za uvažovanou hranici 60 let.

*Tab. 7-7 Odhad sortimentu VJP pro variantu LTO +30*

| Rok | Blok č. 1 | | Blok č. 2 | | Blok č. 3 | | Blok č. 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PS | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) | Nové (ks) | Vyřazené (ks) |
| **2018** | 72 | 72 | 78 | 78 | 78 | 78 | 66 | 66 |
| **2019** | 72 | 72 | 60 | 60 | 72 | 72 | 66 | 66 |
| **2020** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2021** | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| **2022** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2023** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2024** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2025** | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2026** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2027** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] |
| **2028** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 0 | |
| **2029** | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] | 0 | 0 | 90 | 60[1)] |
| **2030** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 60[1)] | 90 | 60[1)] |
| **2031** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2032** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2033** | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2034** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2035** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2036** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2037** | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2038** | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2039** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2040** | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 0 | 0 |
| **2041** | 60 | 60 | 90 | 90 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| **2042** | 60 | 60 | 0 | | 90 | 90 | 90 | 90 |
| **2043** | 48 | 48 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| **2044** | 0 | 90 | 48 | 48 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| **2045** | | 349 | 0 | 90 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| **2046** | | | | 349 | 0 | 90 | 0 | 90 |
| **2047** | | | | | | 349 | | 349 |
| **Celkem** | **1806** | **2155** | **1830** | **2179** | **1902** | **2281** | **1884** | **2233** |

[1)] Nižší počet vyvezených PS je uvažován v důsledku neúplného využití potenciálu paliva, které tak bude možno využít v rámci dalších kampaní.

[2)] Palivo 3.82% profilované s vyhořením 40 MWd/$kg_U$.

## 7.4 Neuvažované aspekty mající vliv na sortiment VJP

Pro návrhy všech variant zdaleka nebyly uvažovány všechny možné aspekty, které se mohou vyskytnout. Záměrně byly některé skutečnosti opomenuty a neuvažovány. Pro úplnost je ovšem nutné je zmínit a nastínit jejich případný vliv na sortiment VJP.

Základní nejistotou u všech návrhů je skutečný vývoj palivových vsázek. Už jenom tím, že referenční datum platnosti dat je 31. 12. 2017 a tato práce je psána o několik měsíců později vede k prvnímu rozporu, kdy neodpovídají počty nově zavážených PS v rámci odstávek v roce 2018. S uvážením celkového počtu PS se ovšem jedná zanedbatelné odchylky. Rozdílné počty nových PS zavážené při jednotlivých kampaních jsou dány především požadavky provozu a harmonogramem plánovaných odstávek s reflektování vlivu odstávek neplánovaných. Když bychom si počty PS zavážených/vyvážených z AZ v jednotlivých letech sečetli a hodnoty zprůměrovali, dostaneme čísla velmi podobná těm, která jsou zde uváděna. I to je jeden z důvodů, proč v tabulkách s odhady sortimentu VJP jsou počty PS v jednotlivých letech idealizovány a tedy takřka stejné.

Jak již bylo mnohokrát zmíněno, pro odhad byl zvolen konzervativní způsob určování budoucího sortimentu VJP, který vede k mírnému nadhodnocování skutečných počtů PS vznikajících v budoucnosti. Nejsou tedy ani uvažovány různé délky jednotlivých odstávek. I dnes jsou odstávky běžně různě dlouhé od několika týdnů až po několik měsíců. Vzhledem ke stáří zařízení EDU a důsledné snaze o dodržování bezpečnostních předpisů je pravděpodobné, že v budoucnu bude odstávek v řádu měsíců pro opravy a vylepšení technologie více. Tím dojde také k jisté redukci počtu PS VJP. Pro varianty LTO +20 a +30 je také uvažováno s odstávkou každého bloku v délce přibližně jednoho roku pro generální opravu. Tato generální oprava ovšem také může být provedena po dílčích částech v rámci několika samostatných odstávek. Všechny uvedené skutečnosti by sice vedly k omezení konečného počtu PS VJP, ale jednalo by se o pouhé desítky kusů PS a je velmi složité stanovit přesnější počty. A tak i přes vědomí si dalších aspektů majících vliv na budoucí produkci VJP budeme uvažovat z pohledu majitele EDU optimisticky, z pohledu SÚRAO mající na starosti konečné uložení VJP naopak pesimisticky, o vyšších počtech PS určených k uložení do hlubinného úložiště odpovídajících běžnému chodu všech bloků.

Kdybychom uvažovali s variantou LTO +30 tak se dnes nacházíme v období přibližné poloviny celkové životnosti. Pro LTO +30 je tak obzvlášť v porovnání s minulým vývojem velkým zjednodušením představa ustrnutí vývoje paliva na variantě 4.76%Gd-2X. Jistým omezením je předpokládané využití paliva s maximálním obohacením 5 % $^{235}$U, přičemž tohoto limitu je s uvažováním výrobních tolerancí dosaženo už u paliva 4.76%Gd-2X, kde jsou využívány palivové tablety s obohacením 4,95 %. Limit 5 % není dán předpisy, ale jedná se spíše o mezinárodně uznávaný limit pro tlakovodní jaderné reaktory. Za několik let ovšem může být tento limit navýšen, a tím by se naskytla možnost využití PS s vyšším vyhořením vedoucím k menšímu počtu PS VJP, ale zase s vyšší aktivitou a vývinem zbytkového tepla. Další neuvažovanou možností je využití paliva MOX, u kterého je odlišné radionuklidové složení VJP. S tímto palivem se dle [13] u stávajících reaktorů v lokalitě EDU neuvažuje z důvodů horších provozních parametrů paliva MOX u reaktorů typu VVER 440.

.

# 8 LIMITY A OMEZENÍ PRO NÁVRH PŘEDÁVÁNÍ VJP

Návrh harmonogramu předávání VJP do HÚ vychází z mnoha okolností a je omezen celou řadou značně rozličných požadavků. Nejvýznamnější vlivy jsou popsány a rozebrány podrobněji v následujících kapitolách.

## 8.1 Návrh hlubinného úložiště

Předpokládané parametry HÚ jsou jedním z nejvíce ovlivňujících faktorů pro návrh. V současné době bohužel nejsou zpracované podrobné dokumenty popisující předpokládané provedení HÚ, respektive žádné dokumenty projektového charakteru nejsou poskytovány veřejnosti. Pro účely této práce je tedy vycházeno ze studií Lokalita HRÁDEK - ROHOZNÁ a Lokalita BŘEZOVÝ POTOK - PAČEJOV. Obě studie byly zpracovány v roce 2012, pro veřejnost jsou volně k dispozici, viz [14]. Namístě je také vysvětlení, že přestože se jedná o webovou stránku odpůrců výstavby HÚ, kde jsou uvedeny texty převážně směřující k odmítání výstavby HÚ, jsou na této stránce zveřejněny kompletní studie vytvořené pro SÚRAO za účelem povolení průzkumných prací v jednotlivých lokalitách. Samotné SÚRAO bohužel neposkytuje tyto studie v kompletním znění.

Každý areál HÚ se bude sestávat ze dvou základních částí, hlubinné a nadzemní. Nadzemní část areálu o velikosti přibližně 8 hektarů bude obsahovat veškeré nutné zázemí jak pro činnosti důlní, výzkumné a vzdělávací, tak především pro aktivity spojené s manipulací s VJP. Celý areál bude oplocen a část, kde se bude nacházet VJP, bude zvlášť střežena alespoň na úrovni současných skladů VJP v jaderných elektrárnách. [15], [16]

U hlubinné části je předpokládáno rozdělení na část výzkumnou a na část určenou pro samotné ukládání UOS. Pro vybudování podzemní části bude využito standardních technologických postupů hornické činnosti. Doprava vyrubaného materiálu bude prováděna svislou těžní jámou. Doprava UOS pak bude prováděna samostatnou úklonnou chodbou o návrhové šířce 7,2 m a výšce 7,9 m s bezkolejným způsobem dopravy. Ukládání UOS se předpokládá do horizontálních vrtů. Pro návrh struktury podzemních staveb je počítáno se současným ukládání UOS a budováním prostor pro další ukládání.[15], [16], [17]

VJP bude do UOS překládáno přímo v areálu HÚ v k tomu vyčleněném samostatném podzemním prostoru. Prostor pro manipulaci s VJP a jeho překládku je ve studiích nazýván "horká komora" a jedná se o podzemní prostor o půdorysných rozměrech 70 x 23,5 m a výšce 27,7 m dle [18] Předpokládá se také využití stávajících OS i pro přepravu do HÚ, kde budou umístěny ve skladu OS s VJP situovaným v podzemním prostoru. Provedení skladu VJP pro lokalitu Hrádek je navrženo jako dva souběžné tunely, každý o délce 316 m, šířce 10,9 m výšce 12,4 m. OS tak mohou být sladovány ve dvou řadách [16] s kapacitou přibližně 240 OS. Tyto plány mohou zásadně ovlivnit navrhované varianty samotné přepravy OS do HÚ. Nesmí být také opomenuto doporučení mezinárodní agentury pro atomovou energii v oblasti skladování vyhořeného jaderného paliva [19]. V rámci pravidelně aktualizovaných standardů je kladen důraz převážně na dlouhodobě skladované palivo, což je VJP skladované po dobu delší než 50 let. Vychází se ze skutečnosti, že reálné zkušenosti s provozem jaderných zařízení a materiálů jsou právě přibližně 50 roků. S jistým dalším vývojem v oblasti bezpečnostních standardů a s reálnou možností nesplnění nových standardů se stávajícími OS, je zvolena jedna varianta návrhu harmonogramu podobě co nejrychlejšího uložení VJP do HÚ.

Samotné ukládání UOS je koncipováno do horizontálních vrtů o průměru 2,2 m a délce 250 m. Takovýchto tunelů má být vybudováno 350, přičemž přesný počet bude upraven podle skutečných potřeb. Jednotlivé UOS od sebe budou odděleny distančními bentonitovými bloky v délce podle uvažovaného typu ukládaného VJP. [15], [16]

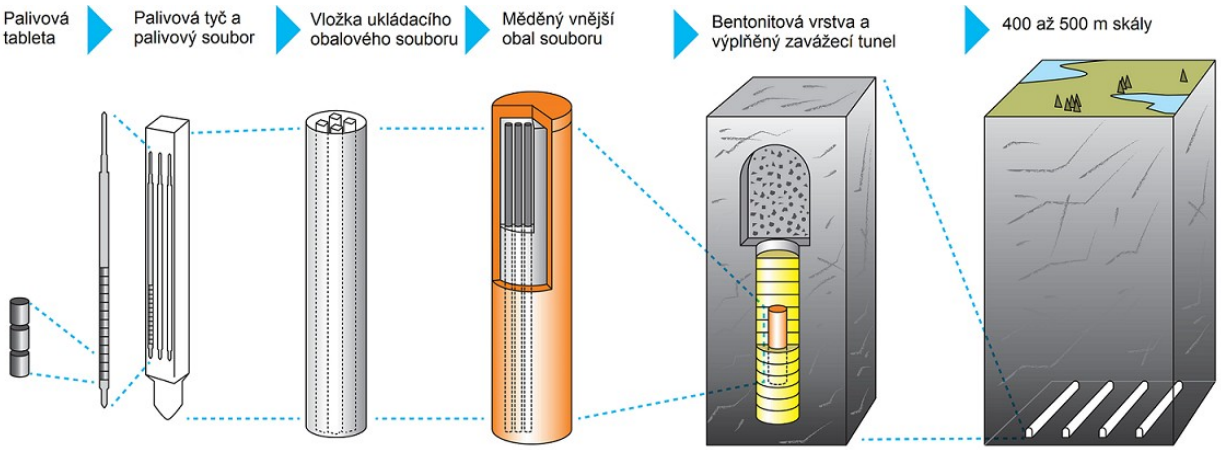
Pro účely návrhu odvozu OS s VJP do HÚ je důležitým milníkem rok 2065, kdy by mělo dojít ke zprovoznění HÚ. V samotném harmonogramu je ještě uvažováno z přechodným 5letým obdobím nazývaným jako zkušební provoz. Během této zkušební doby budou již odzkoušené technologie ověřovány v provozním stavu na vybraných PS VJS s nižší aktivitou i vývinem zbytkového tepla. [21]

Limitním parametrem pro ukládání VJP jsou geologické podmínky. VJP je i několik desítek let významných zdrojem tepla a s tím je také potřeba počítat. U všech lokalit jsou zpracovány výzkumy vlastností hornin jako je např. tepelná vodivost. Pro návrh uspořádání bylo jako základní požadavek zvolena maximální teplota na povrchu UOS na úrovni 90 °C. Samotný UOS pak ještě bude umístěn do bentonitového lože o mocnosti přibližně 700 mm. Parametry bentonitu jsou zásadní pro výpočet maximálního zbytkového výkonu VJP v UOS, jelikož tepelná vodivost bentonitů je standardně výrazně nižší, než okolních hornin. V HÚ se také počítá s ukládáním VJP nejen z EDU, ale také z Jaderné elektrárny Temelín a případných nových jaderných zdrojů. Pro jednotlivé typy VJP je uvažováno se stejnými UOS, ale s různými hodnotami zbytkového výkonu. Rozdílné hodnoty maximálního zbytkového výkonu připadající na jeden UOS jsou v samotném HÚ kompenzovány většími rozestupy tak, aby plošné tepelné zatížení okolních hornin bylo stejné. [14], [17], [18]

Uvažované hodnoty zbytkového výkonu pak jsou pro UOS s VJP z EDU 655 W/UOS, pro jadernou elektrárnu Temelín pak 1125 W/UOS [13]. Jen s mírně vyššími hodnotami uvažuje podle [22] finská společnost POSIVA.

Pro samotný návrh jsou mimo maximální hodnoty zbytkového výkonu limitující také předpokládané parametry a samotný postup manipulace s VJP přímo v areálu HÚ. Dle [18] je uvažováno se dvěma v zásadě stejnými překládacími linkami. V dokumentu je trochu rozpor v textové části, kde je uváděna informace o nastavení každé linky pro jiný typ PS (jedna linka pro palivo z EDU, druhá pak pro palivo z Jaderné elektrárny Temelín). Naopak v grafické podobě harmonogramu na str. 99 dokumentu [21] je uváděno, že ukládání VJP z obou elektráren na sebe bude plynule navazovat v roce 2091 nebo 2082 dle směnnosti provozu. Dále tedy budou brány v úvahu obě možnosti. Velmi cenné jsou informace týkající se plánovaného způsobu manipulace s VJP. Uvažováno je s příjmem OS s VJP do skladu VJP v maximálním počtu třech OS na jeden železniční transport. Po transportu do areálu HÚ budou jednotlivé OS převáženy do podzemního skladu OS VJP. Ze skladu OS VJP následně budou vybrány OS s VJP dle požadavků na ukládání a VJP z OS vyloženo do skladu VJP v rámci horké komory. Pro následné plnění UOS tak budou brány PS ze skladu VJP v rámci horké komory. Kapacita skladu VJP v rámci horké komory není nijak definována a proto bude předmětem samotného návrhu. Součástí linky je i box svařování, kde dochází ke konečnému zavaření vík UOS a k naplnění inertními plyny. Předpokládaná maximální roční kapacita zpracování je 20 OS na obou linkách pro třísměnný provoz. Velkou měrou se na stanovení této kapacity projevuje časová náročnost správného provedení svarů všech komponent včetně nezbytných kontrol a vyhotovení dokumentace pro každý UOS.

Parametry navrhovaného HÚ na území ČR jsou v mnohém srovnatelné s projektem HÚ budovaného ve Finsku. Finské HÚ s názvem Onkalo v lokalitě Olkiluoto je celosvětově prvotním projektem pro konečné uložení VJP z komerčních reaktorů. Nyní stále platný harmonogram počítá se zprovozněním HÚ v roce 2020 a finálním uzavřením v roce 2120. Zvolený koncept ukládání UOS byl zvolen odlišně od v ČR uvažované horizontální varianty do jednotlivých vertikálních vrtů. Ukázka plánovaného způsobu ukládání VJP v UOS pro HÚ Onkalo je znázorněna ona obr. 8-1. Podobný systém s drobnými odlišnostmi v konceptu UOS je plánován i v případě navrhovaného konceptu HÚ v ČR. [20], [23]




*Obr. 8-1 Bariéry VJP v HÚ, upraveno dle [23]*

## 8.2 Ukládací obalový soubor

Ukládací obalové soubory pro HÚ na území ČR jsou uvažovány kovové, složené z několika vrstev. Model je zobrazen na obr. 8-2, kde je i ukázka jednotlivých bariér a komponent, včetně uložení UOS do bentonitového obalu. UOS v kombinaci s bentonitovým obalem pak spolu vytváří tzv. superkontejner, který bude následně ukládán. V praxi bývá často využíváno značení ukládacího obalového souboru jako úložného obalového souboru, v obou případech se jedná o stejné zařízení pro uložení VJP do HÚ.

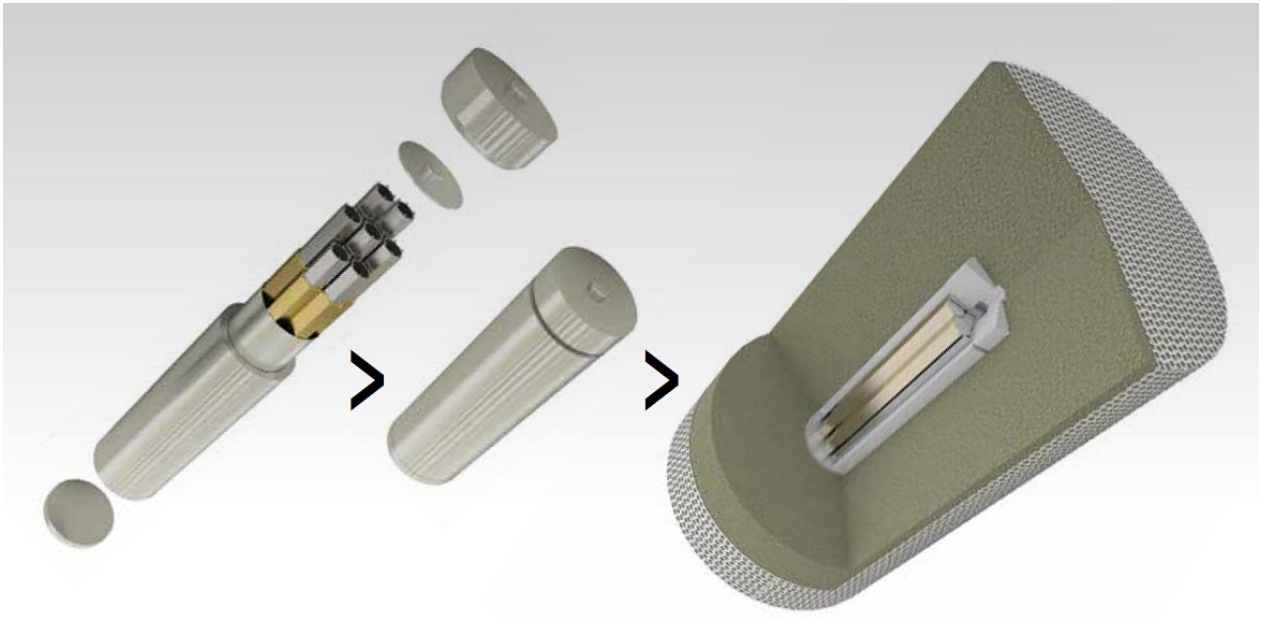
Finální návrh konstrukce samotného UOS pro HÚ ještě není stanoven, jsou ale k dispozici různé návrhy a studie, ze kterých lze vycházet. Můžeme také předpokládat, že případné změny vůči uvažovanému konceptu UOS ze studií budou především materiálové, nikoli rozměrové. Společné výzkumy několika evropských zemí včetně ČR zastoupené SÚRAO probíhají v podzemní laboratoři švýcarského Grimselu. V prvním návrhu podle [20] a [24] se počítá s kovovými UOS ve dvou základních variantách podle horninového složení. Základní variantou je pro korozně přijatelné prostředí vnitřní plášť z nerezové oceli a vnější z uhlíkové oceli. Alternativní varianta předpokládá vnitřní plášť z uhlíkové oceli a vnější plášť z mědi nebo titanové slitiny. Konkrétní materiály podrobované i zkouškám jsou uhlíková ocel 12020 a 422707.9, nerez ocel EN 1.4462 (2205) a EN 1.1104 (2205), měď Cu-OF a titanová slitina Grade 7 (Ti Gr. 7, Ti-02.Pd). První bariérou pro VJP je samotný PS navržený pro několikaletý bezproblémový provoz v extrémních podmínkách uvnitř reaktoru. Druhou bariérou v UOS je uvažovaná vestavba z profilovaných hliníkových tyčí. Vestavba s PS pak bude uložena v pouzdru z oceli o tloušťce 5 mm. Pouzdro je hermeticky uzavřeno víkem. Vnější stěna UOS je uvažována

s tloušťkou materiálu 54,5 mm a dále opatřena vnější povrchovou ochrannou vrstvou nanesenou žárovým nástřikem NiCr o tloušťce 0,5 mm. Takto připravený kontejner pak bude po všech předepsaných stupních kontroly předán do spodních ukládacích pater HÚ, kde bude společně s vnějším bentonitovým obalem a perforovaným ocelovým košem tvořit tzv. superkontejner o průměru 2100 mm a délce 5070 mm. Superkontejner již bude připraven k trvalému uložení.

V současnosti o uložení VJP z reaktorů VVER 440 do HÚ uvažuje pouze Finsko. Pro srovnání s finským modelem UOS pro PS z reaktorů typu VVER 44 označeného KBS-3V jsou dále v tab. 8-1 uvedeny význačné hodnoty jednotlivých návrhů. UOS KBS-3V předpokládá dle [20] minimální dobou skladování PS 30 roků před zavezením do UOS, v případě českého VJP není v současné době žádný limit stanoven.

*Tab. 8-1 Srovnání základních parametrů UOS pro HÚ v ČR a ve Finsku (KBS-3V) [20],[24]*

| **Parametr** | **UOS pro HÚ ČR** | **UOS typ KBS-3V Finsko** |
|---|---|---|
| Kapacita PS (pro VJP z VVER 440) | 7 | 12 |
| Délka | 3670 mm | 3365 mm |
| Vnější průměr | 650 mm | 1050 mm |
| Hmotnost VJP | 1 500 kg | 2 600 kg |
| Hmotnost prázdná | | 5 600 kg měď<br>10 600 kg ocel |
| Hmotnost ukládací | | 18 800 kg |
| Úložný objem | 1,22 $m^3$ | 2,92 $m^3$ |
| Max. tepelný výkon paliva | 655 W | 1370 W |



*Obr. 8-2 Model ukládání UOS v HÚ [25]*

*Obr. 8-3 Model UOS typu KBS-3 pro finské HÚ Onkalo [20]*

## 8.3 Přeprava obalových souborů

Nyní využívané OS (typ CASTOR®440/84 a CASTOR®440/84M) jsou primárně určené a licencované pro přepravu po železnici. Pro výstavbu budoucího HÚ toto není omezujícím faktorem, jelikož ve všech koncepcích je počítáno s železniční vlečkou. Omezujícím faktorem je ovšem kapacita vlečky ve střeženém prostoru areálu HÚ pro max. 3 ks vagónů s OS, založená na předpokladu transportů VJP právě o třech OS podle [21]. Další omezující faktor je existence pouze dvou vagónů pro přepravu OS typu CASTOR pro VJP z EDU. Vzhledem k celkovému množství OS ve všech variantách LTO lze předpokládat, že další vagóny nebudou ve větším počtu pořizovány z důvodů nedostatečné kapacity a neodůvodněného navyšování výdajů. Při uvážení časového horizontu 100 a více let lze ovšem předpokládat generační obměnu vagónů. Výměna může být také vynucena změnou typu OS pro VJP a nekompatibilitou stávajících vagónů s novými typy OS. Parametry nových OS pro VJP nejsou v současné době přesně známy. Nelze ovšem předpokládat zásadní odlišnosti nových OS od stávajících OS typu CASTOR. Z uvedených důvodů není změna typu OS faktorem, který by ovlivnil samotný návrh předávání VJP do HÚ.

Pro značně neobvyklé parametry vagónů s OS byla také ověřena možnost jejich přepravy s plnými OS na místo HÚ s respektováním technických parametrů tratí dle [26]. U všech lokalit je možná bezproblémová kolejová přeprava pomocí stávajících vagónů do zvažovaných lokalit, které se nacházejí v blízkosti hlavních tratí. Do samotného HÚ by transporty vedly po nově budovaných železničních vlečkách v délce několika kilometrů.

Při uvažování využití OS typu CASTOR je pro přehlednost dobré uvést základní parametry těchto OS. Pro návrh jsou zajímavé především limitní hodnoty aktivity a max. tepelného výkonu.

*Tab. 8-2 Základní parametry OS CASTOR [27]*

| **Parametr** | **CASTOR@440/84** | **CASTOR@440/84M** |
|---|---|---|
| Průměr | 2660 mm | 2660 mm |
| Výška | 4080 mm | 4170 mm |
| Tloušťka stěny | 370 mm | 410 mm |
| Materiál | tvárná litina s kuličkovým grafitem | tvárná litina s kuličkovým grafitem |
| Hmotnost prázdného | 94,7 t | 93,7 t |
| Hmotnost s palivem | 116,3 t | 112 t |
| Hmotnost přepravní | Není uvedeno | 138,16 t |
| Max. aktivita VJP | $2{,}7 \cdot 10^{17}$ Bq | $2{,}6 \cdot 10^{17}$ Bq |
| Max. dávkový příkon na povrchu | < 2 mSv/h | < 2 mSv/h |
| Max. dávkový příkon ve vzdálenosti 2 m | < 0,1 mSv/h | < 0,1 mSv/h |
| Max. tepelný výkon PS | 250 W | 340 W |
| Max. tepelný výkon VJP v OS | 21 kW | 24,66 kW |

*Tab. 8-3 Parametry železničního vagónu pro přepravu OS typu CASTOR [28]*

| **Parametr** | **Hodnota** |
|---|---|
| Max. rychlost | 100 km/h |
| Počet náprav | 12 |
| Hmotnost prázdného vozu | 97,5 t |
| Ložná hmotnost | 135,2 t |
| Hmotnost naloženého vozu | 232,7 t |
| Hmotnost na nápravu | 20 t |
| Hmotnost vozu na jednotku délky | 7,12 t |
| Délka vozu | 32,74 m |
| Max. šířka | 3,41 m |
| Max. výška | 4,41 m |

# 9 VÝPOČTY AKTIVIT A ZBYTKOVÉHO TEPLA

Veškeré výpočty aktivit jsou prováděny pomocí programu PAL440_R4. Program PAL440_R4 využívá vstupní textový soubor definovaných parametrů. Pro samotné provedení výpočtů je tedy nutné data poskytnutá ve formátu .xlsx společností ČEZ, a.s [13] upravit. Ukázka poskytnutých dat je uvedena na obr. 9-1. Vyjma výpočtů prováděných programem PAL440_R4 jsou všechna data zpracovávána tabulkovým procesorem Microsoft excel ze sady Office 365.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Dávka | Typ dávky | Výrobní obohacení | Datum ukončení posl.kampaně | Počet ukončených kampaní | Hodnota vyhoření [MWd/t] | Počet efektivních dnů | Zb. výkon 22.2.18 [W] |
| 23 | 14380478403 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 41376 | 987 | 410 |
| 24 | 14380478406 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 40650 | 987 | 401 |
| 25 | 14380478407 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 40650 | 987 | 401 |
| 26 | 14380478424 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 40650 | 987 | 401 |
| 27 | 14380478435 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 41376 | 987 | 410 |
| 28 | 14380478438 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 41376 | 987 | 410 |
| 29 | 14380478441 | 143804 | 4.38 | 29.11.2014 | 3 | 41376 | 987 | 410 |
| 30 | 14380479399 | 143804 | 4.38 | 27.03.2015 | 3 | 39383 | 970 | 431 |

*Obr. 9-1 Formát poskytnutých dat pro výpočty*

Výše uvedeným způsobem byla data zadána samostatně pro MSVP, SVP, BS a jednotlivé AZ příslušných bloků. Prvním korkem pro zjednodušení všech operací tak bylo sjednocení dat do jednoho souboru pro usnadnění dalšího zpracování. Logickým pokračováním pak byla úprava v podobě přidání jednoho sloupce pro indexování řádků (1,2,... počet PS). Dodatečný sloupec s indexací tak umožnil později seřadit data do výchozího pořadí – podstatné pro správné přiřazení vypočtených hodnot. Aby bylo možné s daty jednoduše pracovat, byly nakonfigurovány funkce pro třídění po řádcích. U třídících funkcí bylo ošetřeno uzamčení celých řádků tak, aby nedošlo k seřazení jen některých sloupců, což by později mohlo vést ke ztrátě vazby mezi zadanými a vypočtenými hodnotami. Po uvedených úpravách tak byl soubor připraven k další práci v podobě důkladného analyzování jednotlivých PS. Analyzovat data bylo potřeba pro ověření jejich správnosti pomocí např. kontrolních součtů počtu PS v jednotlivých OS v MSVP a SVP, za účelem zjištění případných anomálií a také pro získání přehledu o dosavadním sortimentu VJP. Po první analýze byla zjištěna potřeba dodání dalšího sloupce s daty o umístění PS, tedy rozdělení na MSVP, SVP, BS, AZ1, AZ2, AZ3 a AZ4.

Navazujícím krokem byla úprava dat do formátu vstupního souboru programu PAL440_R4. Vstupní textový soubor musí být v následujícím formátu:

- jeden řádek-rekord odpovídá jednomu PS,
- čísla nutno uvádět s desetinnou tečkou namísto desetinné čárky,
- jednotlivá čísla musí být oddělena tabulátory,
- první záznam rekordu je celé číslo od 0 do 9 představující typ paliva,
- druhý záznam rekordu udávající střední vyhoření kazety v $MWd/kg_U$,
- třetí záznam rekordu určuje dobu chlazení,
- poslední čtvrtý záznam pouze stanovuje požadavek na výpočet axiální distribuce počítaných hodnot v PS.

Aby bylo možné exportovat data v požadovaném formátu bylo nutné zadaná data modifikovat. K tomuto účelu byla zvolena funkce "KDYŽ", která v 22 cyklech podle sloupce B – typ dávky přiřadila daným PS číslo 0 až 9 dle typu paliva. Střední vyhoření je v zadání vztaženo na tunu uranu, hodnota tedy byla pouze vydělena 1000. Pro stanovení doby chlazení byl přidán samostatný sloupec, kde v každém řádku byl uveden pevný odkaz na buňku Q1. V buňce Q1 se vždy stanovovalo datum, ke kterému mají být hodnoty počítány. Samotná hodnota doby chlazení je pak na jedno desetinné místo zaokrouhlený rozdíl kalendářních dat ve sloupci Q a F v rocích. Hodnota axiální distribuce počítaných hodnot není vyžadována a je tedy znázorněna 0. Ukázka výsledného provedení souboru s předpřipravenými daty (sloupce se zeleným záhlavím) je uvedena na obr. 9-2.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ŘÁDEK | Dávka | Typ dávky | Výrobní obohacení | Název kontejneru / zásobníku | Datum ukončení posl.kampaně | Počet ukončených kampaní | Hodnota vyhoření [MWd/t] | Počet efektivních dnů | Zb.výkon 23.2.18 [W] | | Typ dávky | Hodnota vyhoření [MWd/kg] | Doba chlazení [rok] | Axiální distribuce | | 31.12.2019 |
| 561 | 561 | 22430593 | 224 | 2.4 | CAS012GP | 20.10.1991 | 3 | 27233 | 839 | 81 | MSVP | 2 | 27.2 | 28.2 | 0 | | 31.12.2019 |
| 562 | 562 | 22430584 | 224 | 2.4 | CAS012GP | 20.10.1991 | 3 | 27233 | 839 | 81 | MSVP | 2 | 27.2 | 28.2 | 0 | | 31.12.2019 |
| 563 | 563 | 13627337 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 20.10.1991 | 4 | 29643 | 1137 | 84 | MSVP | 3 | 29.6 | 28.2 | 0 | | 31.12.2019 |
| 564 | 564 | 13627972 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 10.03.1991 | 3 | 29771 | 895 | 83 | MSVP | 3 | 29.8 | 28.8 | 0 | | 31.12.2019 |
| 565 | 565 | 13627975 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 10.03.1991 | 3 | 29778 | 895 | 83 | MSVP | 3 | 29.8 | 28.8 | 0 | | 31.12.2019 |
| 566 | 566 | 13627960 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 10.03.1991 | 3 | 31913 | 895 | 90 | MSVP | 3 | 31.9 | 28.8 | 0 | | 31.12.2019 |
| 567 | 567 | 13627368 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 20.10.1991 | 4 | 29893 | 1137 | 85 | MSVP | 3 | 29.9 | 28.2 | 0 | | 31.12.2019 |
| 568 | 568 | 13628005 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 10.03.1991 | 3 | 29771 | 895 | 83 | MSVP | 3 | 29.8 | 28.8 | 0 | | 31.12.2019 |
| 569 | 569 | 13627329 | 136 | 3.6 | CAS012GP | 20.10.1991 | 4 | 29643 | 1137 | 84 | MSVP | 3 | 29.6 | 28.2 | 0 | | 31.12.2019 |

*Obr. 9-2 Data ve formátu vhodném pro výpočet*

Takto připravená data tak již zbývalo pouze upravit do formy vhodné pro exportování, což je pouhé vytvoření nového listu s příslušnými odkazy. Z toho nového listu jsou pak data exportována v podobě textového souboru odděleného mezerami. Ukázka formy dat připravených pro export z MS excel a samotný exportovaný soubor jsou uvedeny na obr. č 9-3.

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 23.9 | 31.1 | 0 | |
| 2 | 2 | 26.3 | 29.9 | 0 | |
| 3 | 2 | 26.3 | 29.9 | 0 | |
| 4 | 2 | 23.9 | 31.1 | 0 | |
| 5 | 3 | 26.8 | 29.9 | 0 | |
| 6 | 3 | 27.8 | 30.2 | 0 | |
| 7 | 3 | 28.3 | 29.9 | 0 | |
| 8 | 3 | 29.2 | 30.2 | 0 | |
| 9 | 3 | 28.3 | 29.9 | 0 | |
| 10 | 3 | 27.7 | 29.9 | 0 | |
| 11 | 3 | 26.8 | 29.9 | 0 | |
| 12 | 3 | 26.8 | 29.9 | 0 | |
| 13 | 2 | 28.3 | 30.2 | 0 | |
| 14 | 3 | 29.2 | 30.2 | 0 | |
| 15 | 3 | 30 | 30.2 | 0 | |
| 16 | 3 | 30 | 30.2 | 0 | |

Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda

```
 2  23.9  31.1  0
 2  26.3  29.9  0
 2  26.3  29.9  0
 2  23.9  31.1  0
 3  26.8  29.9  0
 3  27.8  30.2  0
 3  28.3  29.9  0
 3  29.2  30.2  0
 3  28.3  29.9  0
 3  27.7  29.9  0
 3  26.8  29.9  0
 3  26.8  29.9  0
 2  28.3  30.2  0
 3  29.2  30.2  0
 3    30  30.2  0
 3    30  30.2  0
```

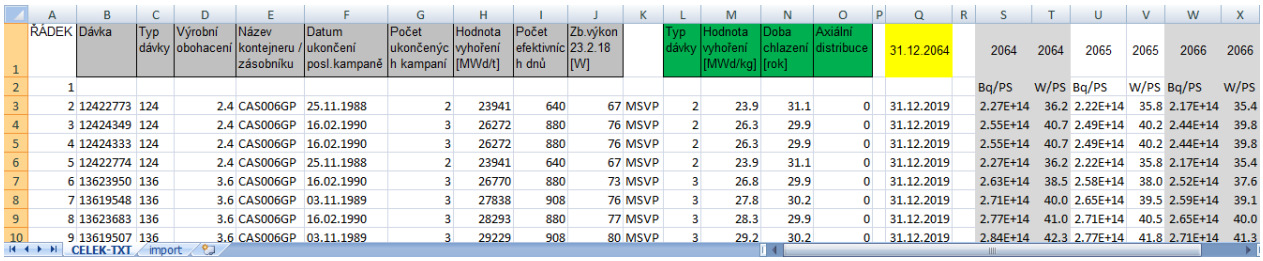
*Obr. 9-3 Data připravená pro export a exportovaný textový soubor*

Data exportovaná to textového souboru jsou již seřazena v požadovaném formátu, ale pro samotné zpracování je nutné je nakopírovat do vstupního textového souboru programu PAL440_R4 označeného nZADANIR4. Toto nakopírování musí být uděláno manuálně, stejně jako samostatné spuštění výpočtu dvojklikem na nPAL.exe. Pro zpracování se výše uvedené kroky (úprava data, export to textového souboru, překopírování dat do vstupního textového souboru a samotné spuštění programu) jevily jako časově velmi náročné a proto byla snaha o optimalizaci.

Prvním optimalizačním korkem bylo rozšíření výpočtu na jednotlivé uvažované varianty LTO včetně již stávajícího sortimentu VJP v MSVP, SVP, BS a AZ. Jako podklad byly zvoleny odhady počtů PS v jednotlivých variantách uvedené v kapitole 7 Odhad sortimentu VJP. Počty PS z MSVP, SVP, a AZ tak byly rozšířeny o odhadované počty PS a vytvořena tak vždy jedna varianta pro daný rok v závislosti na zvoleném datu. Mimo uvedené byly v rámci tohoto kroku optimalizace PS přiřazeny odpovídající OS a také u 131 PS v BS s předpokládaným dalším využitím upravena hodnota vyhoření na 52 $MWd/kg_U$ a datum ukončení poslední kampaně posunuto na 1. 1. 2020. Vstupní data tak pro jeden rok byla ve třech samostatných souborech v souladu s variantami LTO a obsahovala 14 106; 16 560; 19 260 rekordů v závislosti na variantě. Při zkušebním výpočtu byla velká softwarová náročnost. Výpočty pro jeden rok a variantu LTO +30 trvaly 19 minut což odpovídá rychlosti cca 1000 rekordů za minutu (pro výpočet využit procesor i5-7200U). Provádět výpočet tímto tempem by tak trvalo více než 50 minut pro jeden rok a všechny varianty. Při uvažovaném minimálním horizontu let 2064 – 2130 je to pak 55 hodin počítání s neustálou asistencí. Bylo tedy přistoupeno k další optimalizaci v podobě sloučení všech variant LTO do jednoho jediného roku čímž bylo možné odstraněním trojího výpočtu pro PS z MSVP, SVP, BS a AZ snížit počet rekordů pro jeden rok na 26 250 z původních 49 926. Pro zrychlení výpočtu také bylo přistoupeno k využití lepšího softwaru v podobě počítačové sestavy využívající procesor i7-5960X v kombinaci s SSD diskem Intel DC P3520. S výhodou také byla využita možnost současného spuštění více paralelních výpočtů a přiřazení jednotlivých výpočtů konkrétním logickým jádrům na procesoru. Uvedené kroky pak vedly ke značnému urychlení výpočtů kdy 26 250 rekordů bylo počítáno s plným využitím možností jednoho logického procesoru 13 minut. Pro výpočty bylo využito 7 z 8 logických jader, poslední jádro bylo ponecháno pro provoz systému. Všechny výpočty tak nově byly zvládnuty za necelé 2,5 hodiny. Provedení všech výpočtů vygenerovalo textové soubory o celkové diskové velikosti 5,68 GB. Pro zajímavost bylo využito i jednoho výpočtu včetně axiálního rozložení, kde výstupní textové soubory pro axiální rozložení představovaly nárůst dat o 140 % a podobné prodloužení doby výpočtu.

Další zvažovanou a částečně vyzkoušenou variantou optimalizace bylo využití současného exportování všech dat z jednoho listu excelu, kde by byly jednotlivé roky seřazeny po řádcích pod sebou, tj. 66·26250 řádků. V této podobě byla velikost souboru excel 317 MB a z neznámého důvodu neumožňovala export dat do textového souboru. Vyzkoušena byla náhradní varianta se záznamem po 11 letech (11·26250 řádků), která již byla funkční. Nakonec ovšem tato varianta nebyla využita, neboť se ukázalo, že práce s takto exportovanými daty je pro další zpracování časově náročnější.

Následujícím krokem bylo importování dat z textových soborů do excelu, kde bylo objeveno další omezení. Excel s importovanými daty byl od jisté velikosti nefunkční (překročení maximální doby chodu procesu). Pro velikost RAM paměti 16 GB bylo toto omezení disková velikost necelé 3 GB, která nezahrnovala všechna importovaná dat. Pro zamezení kumulace dat tak byl vytvořen samostatný excel, u kterého byla záložka určená pro import dat z textového souboru a záložka s finálními daty s vypočtenými aktivitami a zbytkovými výkony pro příslušný PS v daném roce. Ukázka výsledného souboru excel je uvedena na obr. 9-4.



| ŘÁDEK | Dávka | Typ dávky | Výrobní obohacení | Název kontejneru / zásobníku | Datum ukončení posl.kampaně | Počet ukončených kampaní | Hodnota vyhoření [MWd/t] | Počet efektivních dnů | Zb.výkon 23.2.18 [W] | | Typ dávky | Hodnota vyhoření [MWd/kg] | Doba chlazení [rok] | Axiální distribuce | 31.12.2064 | 2064 | 2064 | 2065 | 2065 | 2066 | 2066 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | Bq/PS | W/PS | Bq/PS | W/PS | Bq/PS | W/PS |
| 3 | 2 | 12422773 | 124 | 2.4 | CAS006GP | 25.11.1988 | 2 | 23941 | 640 | 67 | MSVP | 2 | 23.9 | 31.1 | 0 | 31.12.2019 | 2.27E+14 | 36.2 | 2.22E+14 | 35.8 | 2.17E+14 | 35.4 |
| 4 | 3 | 12424349 | 124 | 2.4 | CAS006GP | 16.02.1990 | 3 | 26272 | 880 | 76 | MSVP | 2 | 26.3 | 29.9 | 0 | 31.12.2019 | 2.55E+14 | 40.7 | 2.49E+14 | 40.2 | 2.44E+14 | 39.8 |
| 5 | 4 | 12424333 | 124 | 2.4 | CAS006GP | 16.02.1990 | 3 | 26272 | 880 | 76 | MSVP | 2 | 26.3 | 29.9 | 0 | 31.12.2019 | 2.55E+14 | 40.7 | 2.49E+14 | 40.2 | 2.44E+14 | 39.8 |
| 6 | 5 | 12422774 | 124 | 2.4 | CAS006GP | 25.11.1988 | 2 | 23941 | 640 | 67 | MSVP | 2 | 23.9 | 31.1 | 0 | 31.12.2019 | 2.27E+14 | 36.2 | 2.22E+14 | 35.8 | 2.17E+14 | 35.4 |
| 7 | 6 | 13623950 | 136 | 3.6 | CAS006GP | 16.02.1990 | 3 | 26770 | 880 | 73 | MSVP | 3 | 26.8 | 29.9 | 0 | 31.12.2019 | 2.63E+14 | 38.5 | 2.58E+14 | 38.0 | 2.52E+14 | 37.6 |
| 8 | 7 | 13619548 | 136 | 3.6 | CAS006GP | 03.11.1989 | 3 | 27838 | 908 | 76 | MSVP | 3 | 27.8 | 30.2 | 0 | 31.12.2019 | 2.71E+14 | 40.0 | 2.65E+14 | 39.5 | 2.59E+14 | 39.1 |
| 9 | 8 | 13623683 | 136 | 3.6 | CAS006GP | 16.02.1990 | 3 | 28293 | 880 | 77 | MSVP | 3 | 28.3 | 29.9 | 0 | 31.12.2019 | 2.77E+14 | 41.0 | 2.71E+14 | 40.5 | 2.65E+14 | 40.0 |
| 10 | 9 | 13619507 | 136 | 3.6 | CAS006GP | 03.11.1989 | 3 | 29229 | 908 | 80 | MSVP | 3 | 29.2 | 30.2 | 0 | 31.12.2019 | 2.84E+14 | 42.3 | 2.77E+14 | 41.8 | 2.71E+14 | 41.3 |

CELEK-TXT | import

*Obr. 9-4 Vypočtené aktivity a zbytkové výkony v jednotlivých letech přiřazené k PS*

Výsledkem postupů popsaných na předcházejících stranách je soubor typu excel s vypočtenými aktivitami a zbytkovými výkony pro každý PS v letech 2064 až 2130, což je časový horizont ve kterém předpokládá zvládnutí celého procesu ukládání VJP z EDU do HÚ. Nevýhodou vypočtených dat je provedení některých výpočtů extrapolací pro značnou část PS z důvodu překročení doby chlazení 80 let. Tato skutečnost musí být stále brána v potaz a reflektována rezervami v rámci návrhu harmonogramu. Všechna vypočtená data jsou pro každý rok počítána k 31. 12. daného roku.

Přeprava VJP do HÚ se předpokládá v železničních transportech o maximální velikosti 3 OS. Měrnou jednotkou pro přepravu pak budou právě OS o kapacitě 84 PS. Aby bylo možné dále pracovat pouze s jednotlivými OS a nikoli celou sadou dat vypočtených pro PS, byla zdrojová data dále zpracována až do podoby na obr. 9-5. PS byly do příslušných OS řazeny čistě v závislosti na datu ukončení poslední kampaně. Aby byly zachovány nejpodstatnější parametry PS v rámci OS, tak každý OS je charakterizován:

- specifickým číslem OS,
- datem ukončení poslední kampaně u nejpozději vyvezeného PS z AZ v rámci OS,
- minimální hodnotou vyhoření převzatou z nejméně vyhořeného PS v OS,
- průměrnou hodnotou vyhoření ze všech 84 PS v OS,
- maximální hodnotou vyhoření převzatou z nejvíce vyhořeného PS v OS,
- minimální hodnotou aktivity PS v rámci OS v každém roce,
- průměrnou hodnotou aktivity všech 84 PS v OS v každém roce,
- maximální hodnotou aktivity PS v rámci OS v každém roce,
- minimální hodnotou zbytkového výkonu PS v rámci OS v každém roce,
- průměrnou hodnotou zbytkového výkonu všech 84 PS v OS v každém roce,
- maximální hodnotou zbytkového výkonu PS v rámci OS v každém roce.

| ŘÁDEK | Dávka | Název kontejneru / zásobníku | Datum ukončení posl.kampaně | Hodnota vyhoření [MWd/t] | Zb.výkon 23.2.18 [W] | | | | 2064 | 2064 | 2065 | 2065 | 2066 | 2066 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | MIN | CAS001GP | 04.11.1990 | 26.7 | 74 | MSVP | MSVP1 | 38.6 | 2.66E+14 | 38.2 | 2.60E+14 | 37.7 | 2.55E+14 |
| 3 | 2 | PRŮMĚR | CAS001GP | 04.11.1990 | 29.2 | 82 | MSVP | MSVP2 | 43.2 | 2.89E+14 | 42.7 | 2.82E+14 | 42.2 | 2.76E+14 |
| 4 | 3 | MAX | CAS001GP | 04.11.1990 | 31.4 | 88 | MSVP | MSVP3 | 46.5 | 3.11E+14 | 46.0 | 3.04E+14 | 45.5 | 2.97E+14 |
| 5 | 4 | MIN | CAS002GP | 13.05.1988 | 20.3 | 56 | MSVP | MSVP4 | 29.9 | 1.91E+14 | 29.6 | 1.87E+14 | 29.3 | 1.83E+14 |
| 6 | 5 | PRŮMĚR | CAS002GP | 13.05.1988 | 25.1 | 69 | MSVP | MSVP5 | 36.8 | 2.36E+14 | 36.4 | 2.31E+14 | 36.0 | 2.26E+14 |
| 7 | 6 | MAX | CAS002GP | 13.05.1988 | 32.8 | 89 | MSVP | MSVP6 | 47.5 | 3.06E+14 | 46.9 | 3.00E+14 | 46.4 | 2.93E+14 |
| 8 | 7 | MIN | CAS003GP | 16.02.1990 | 7.6 | 21 | MSVP | MSVP7 | 10.7 | 7.52E+13 | 10.5 | 7.36E+13 | 10.4 | 7.20E+13 |
| 9 | 8 | PRŮMĚR | CAS003GP | 16.02.1990 | 21.8 | 60 | MSVP | MSVP8 | 32.1 | 2.09E+14 | 31.7 | 2.04E+14 | 31.4 | 2.00E+14 |
| 10 | 9 | MAX | CAS003GP | 16.02.1990 | 31.9 | 87 | MSVP | MSVP9 | 46.4 | 3.04E+14 | 45.9 | 2.97E+14 | 45.4 | 2.91E+14 |
| 11 | 10 | MIN | CAS005GP | 19.04.1986 | 10.0 | 26 | MSVP | MSVP10 | 14.3 | 9.17E+13 | 14.2 | 8.98E+13 | 14.0 | 8.79E+13 |
| 12 | 11 | PRŮMĚR | CAS005GP | 19.04.1986 | 10.6 | 28 | MSVP | MSVP11 | 15.4 | 9.74E+13 | 15.2 | 9.53E+13 | 15.1 | 9.33E+13 |
| 13 | 12 | MAX | CAS005GP | 19.04.1986 | 11.4 | 30 | MSVP | MSVP12 | 16.7 | 1.05E+14 | 16.5 | 1.02E+14 | 16.4 | 1.00E+14 |
| 14 | 13 | MIN | CAS006GP | 16.02.1990 | 23.9 | 67 | MSVP | MSVP13 | 36.2 | 2.27E+14 | 35.8 | 2.22E+14 | 35.4 | 2.17E+14 |
| 15 | 14 | PRŮMĚR | CAS006GP | 16.02.1990 | 28.7 | 79 | MSVP | MSVP14 | 42.0 | 2.79E+14 | 41.5 | 2.73E+14 | 41.0 | 2.67E+14 |
| 16 | 15 | MAX | CAS006GP | 16.02.1990 | 30.9 | 85 | MSVP | MSVP15 | 45.1 | 2.99E+14 | 44.6 | 2.92E+14 | 44.1 | 2.86E+14 |

*Obr. 9-5 Ukázka výsledného souboru členěného po jednotlivých OS*

Na obr. 9-5 je ukázka dat v podobě, v jaké byla využívána pro samotný návrh harmonogramu předávání VJP do HÚ. Samotné návrhy různých harmonogramů jsou zpracovány v kapitole Návrh předávání VJP do hlubinného úložiště. Pro samotný návrh je ovšem z vypočtených dat nutné stanovit ještě některá další omezení vycházející z vlastností VJP. Tato omezení jsou rozebrána v dalších podkapitolách.

## 9.1 Minimální doba chlazení PS pro uložení do OS

Ověření minimální doby chlazení PS pro uložení do OS je nezbytné pro stanovení minimální doby skladování PS z poslední kampaně v BS. Kdyby tato doba byla příliš dlouhá a rok skladování by překročil rok 2065, bylo by nutné tuto skutečnost reflektovat jako omezení pro návrh harmonogramu předávání VJP do HÚ. Pro výpočet je zaveden předpoklad využití OS se stejnými parametry jako jsou nyní využívané OS CASTOR$^{@}$440/84M. Výpočty jsou provedeny pro palivo z poslední kampaně a pro úplnost jsou provedeny pro všechny varianty LTO. V případě LTO +10 je uvažován typ 4.38%Gd-2M+ s vyhořením 52 MWd, pro LTO +20/+30 typ 4.76%Gd-2X s vyhořením 55 MWd. Všechny ostatní typy PS budou buď dříve vyvezeny z AZ nebo se předpokládá jejich menší vyhoření a nepřekročí tak limitní hodnoty vypočítané pro uvedené typy PS. Omezující hodnoty vycházejících z parametrů OS jsou uvedeny v tab. 9-1. Výsledné hodnoty minimální doby chlazení PS s respektování limitů na aktivitu a zbytkový výkon jsou uvedeny v tab. 9-2. Vypočtené hodnoty pro interval od 100 hod po 10 roků od ukončení poslední kampaně jsou uvedeny v tab. 9-3. Pro časový interval 10 až 150 roků jsou hodnoty znázorněny graficky. Rozdělení na tabulkové a grafické vyjádření jednotlivých intervalů vychází z průběhu veličiny v čase. V době ihned po ukončení kampaně dochází ke značnému vývinu tepla a s tím související aktivitou z důvodu velkého množství krátkodobých radioaktivních izotopů a grafické vyjádření postrádá smysl. Naopak u delšího časového horizontu lze z graficky vyjádřeného průběhu pozorovat průběh hodnot vypočtených extrapolací a alespoň opticky si tak ověřit relevantnost vypočtených hodnot.

*Tab. 9-1 Výchozí hodnoty pro stanovení minimální doby chlazení PS pro uložení do OS*

| **Parametr** | **Hodnota** |
|---|---|
| Max. tepelný výkon jednoho PS v OS | 340 W |
| Max. tepelný výkon VJP v OS | 24,66 kW |
| Max. aktivita VJP v OS | $2{,}6 \cdot 10^{17}$ Bq |
| Průměrný tepelný výkon jednoho PS | 293,5 W/PS |
| Průměrná aktivita jednoho PS | $2{,}452 \cdot 10^{15}$ Bq/PS |

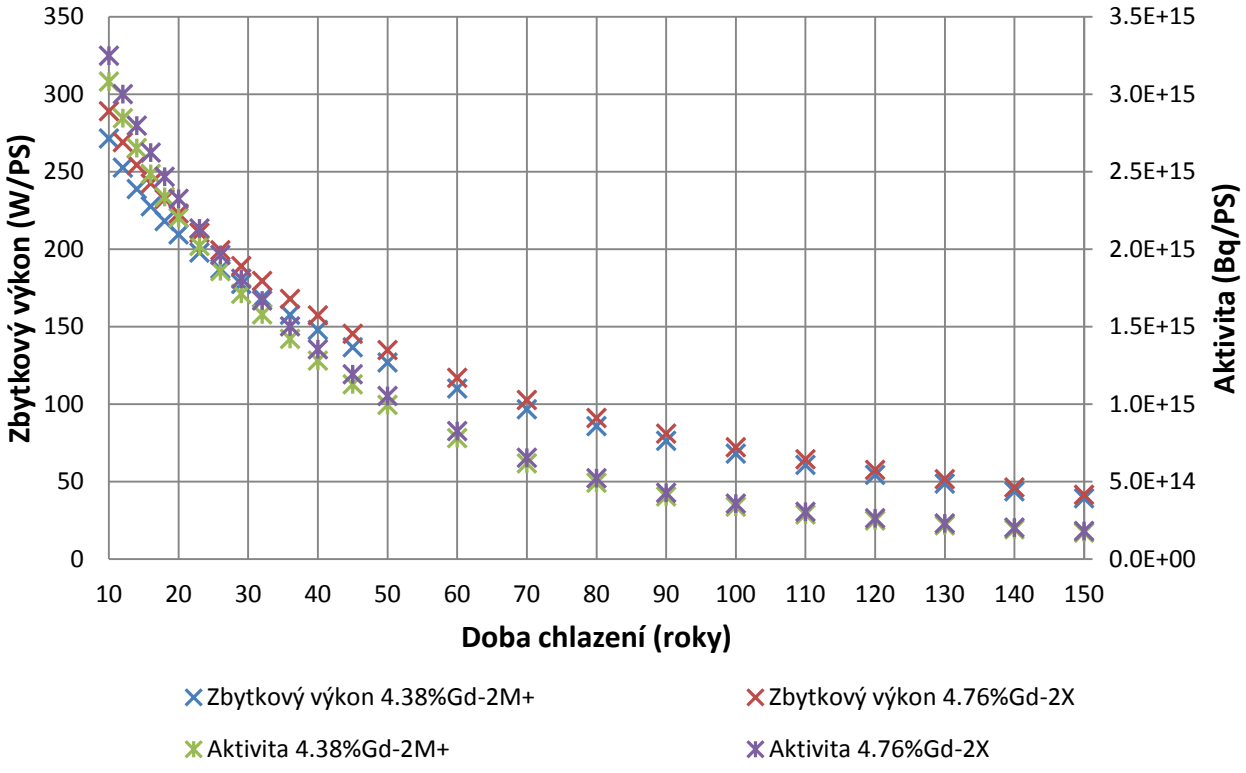
*Tab. 9-2 Minimální doba chlazení PS pro uložení do OS*

| **Uvažované omezení** | **4.38%Gd-2M+** | **4.76%Gd-2X** |
|---|---|---|
| Vývin tepla max. 93,5 W/PS | 8,5 roku | 16,5 roku |
| Aktivita max. $2{,}452 \cdot 10^{15}$ Bq/PS | 9,7 roku | 18,3 roku |

*Tab. 9-3 Závislost aktivity a vývinu zbytkového tepla na době chlazení*

| Doba chlazení[1)] | 4.38%Gd-2M+ | | 4.76%Gd-2X | |
|---|---|---|---|---|
| | Zbytkový výkon (W/PS) | Aktivita (Bq/PS) | Zbytkový výkon (W/PS) | Aktivita (Bq/PS) |
| 100 hod. | 15 790 | $1{,}46\cdot10^{17}$ | 15 880 | $1{,}46\cdot10^{17}$ |
| 6 dnů | 13 620 | $1{,}22\cdot10^{17}$ | 13 720 | $1{,}22\cdot10^{17}$ |
| 9 dnů | 11 470 | $9{,}92\cdot10^{16}$ | 11 570 | $9{,}97\cdot10^{16}$ |
| 15 dnů | 9 269 | $7{,}87\cdot10^{16}$ | 9 375 | $7{,}93\cdot10^{16}$ |
| 27 dnů | 7 268 | $6{,}23\cdot10^{16}$ | 7 366 | $6{,}28\cdot10^{16}$ |
| 51 dnů | 5 481 | $4{,}74\cdot10^{16}$ | 5 567 | $4{,}79\cdot10^{16}$ |
| 99 dnů | 4 002 | $3{,}36\cdot10^{16}$ | 4 077 | $3{,}41\cdot10^{16}$ |
| 0,5 roku | 2 817 | $2{,}30\cdot10^{16}$ | 2 879 | $2{,}34\cdot10^{16}$ |
| 1 rok | 1 747 | $1{,}46\cdot10^{16}$ | 1 796 | $1{,}49\cdot10^{16}$ |
| 2 roky | 987 | $8{,}91\cdot10^{15}$ | 1 023 | $9{,}19\cdot10^{15}$ |
| 3 roky | 663 | $6{,}39\cdot10^{15}$ | 693 | $6{,}64\cdot10^{15}$ |
| 4 roky | 500 | $5{,}10\cdot10^{15}$ | 526 | $5{,}33\cdot10^{15}$ |
| 5 roků | 411 | $4{,}37\cdot10^{15}$ | 434 | $4{,}58\cdot10^{15}$ |
| 6 roků | 358 | $3{,}93\cdot10^{15}$ | 380 | $4{,}13\cdot10^{15}$ |
| 7 roků | 324 | $3{,}62\cdot10^{15}$ | 344 | $3{,}81\cdot10^{15}$ |
| 8,5 roku | 292 | $3{,}31\cdot10^{15}$ | 311 | $3{,}49\cdot10^{15}$ |
| 10 roků | 271 | $3{,}08\cdot10^{15}$ | 289 | $3{,}25\cdot10^{15}$ |

[1)] Doba chlazení vychází z výpočtových bodů programu PAL440_R4.




*Obr. 9-6 Grafické znázornění zbytkových výkonů a aktivit v závislosti na době chlazení*

Při předpokládaném ukončení provozu v roce 2047 pro variantu LTO +30 je tak nejbližší možný termín přeložení VJP do OS v roce 2065. V úvahu také připadá varianta kombinující různé druhy VJP tak, aby nebyly překročeny maximální hodnoty stanovené pro celý PS. Tím by mohlo být dosaženo zkrácení doby chlazení a uložení do OS ještě před rokem 2065. Pro návrh harmonogramu se tedy nebude uvažovat s žádným omezením vyplývajícím z minimální doby chlazení PS pro uložení do OS. Nebylo uvažováno s případným vyšším vyhořením, které by ovšem bylo možné bez obtíží kompenzovat PS s nižším vyhořením v rámci daného OS. Z grafu pro časový horizont 10 až 150 roků je jasně patrný rychlejší pokles aktivit než zbytkového výkonu. Toto lze vysvětlit tím, že izotopy s delším poločasem přeměny uvolní při přeměně mnohem více energie než izotopy s kratším poločasem přeměny.

## 9.2 Mezní doba chlazení PS pro uložení do HU

Za mezní dobu chlazení se považuje taková doba chlazení, kdy parametry PS dosáhnou ve všech aspektech nejvyšších dovolených hodnot pro uložení. Omezující aspekt je nyní stanoven pouze v podobě limitu 655 W/PS pro UOS s kapacitou 7 PS. To odpovídá průměrné hodnotě 93,5 W/PS. K této hodnotě jsou také vztahovány všechny výpočty. Pro aktivitu žádné limity pro ukládání v HÚ stanoveny nejsou. Nestanovení limitů aktivity ovšem neznamená možnost jejího zanedbání. Pro účely uložení v HÚ není aktivita zásadním parametrem UOS. Naopak pro veškeré manipulace s UOS se jedná o limitující faktor. Lze tedy předpokládat, že v době budování HÚ se buď zvolí maximální dovolená hodnota aktivity UOS nebo se všechny plánované procesy uzpůsobí pro maximální aktivitu vyskytující se u z AZ nejpozději vyvezeného PS.

Výpočet minimální doby chlazení byl proveden programem PAL440_R4 tak, že byl pro výpočet zadán rekord s měnícím se vyhořením a časem chlazení v kroku po 0,1 roku. Z vypočtených hodnot pak byla vybrána hodnota co nejvíce se blížící 93,5 W. Odchylka doby chlazení je tak max. 0,1 roku. Minimální doby chlazení pro dosažení zbytkového výkonu 93,5 W pro různé hodnoty vyhoření jsou pak uvedeny v tab. 9-4. Předpokládaná průmětná hodnota vyhoření u jednotlivých typů paliv je zvýrazněna.

*Tab. 9-4 Minimální doby chlazení VJP pro uložení do HÚ*

| Typ paliva 4.38% Gd-2M+ | | | Typ paliva 4.76% Gd-2X | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Vyhoření ($MWd/kg_U$) | Doba chlazení (roky) | Aktivita (Bq/PS) | Vyhoření ($MWd/kg_U$) | Doba chlazení (roky) | Aktivita (Bq/PS) |
| 40,0 | 50,6 | $7{,}77 \cdot 10^{14}$ | 42,5 | 55,3 | $7{,}32 \cdot 10^{14}$ |
| 42,5 | 55,7 | $7{,}21 \cdot 10^{14}$ | 45,0 | 59,9 | $6{,}93 \cdot 10^{14}$ |
| 45,0 | 60,4 | $6{,}82 \cdot 10^{14}$ | 47,5 | 64,9 | $6{,}44 \cdot 10^{14}$ |
| 47,5 | 65,3 | $6{,}35 \cdot 10^{14}$ | 50,0 | 69,4 | $6{,}10 \cdot 10^{14}$ |
| 50,0 | 69,7 | $6{,}02 \cdot 10^{14}$ | 52,5 | 74,1 | $5{,}71 \cdot 10^{14}$ |
| 52,0 | 73,4 | $5{,}71 \cdot 10^{14}$ | 55,0 | 78,4 | $5{,}41 \cdot 10^{14}$ |
| 52,5 | 74,3 | $5{,}64 \cdot 10^{14}$ | 57,5 | 82,5 | $5{,}16 \cdot 10^{14}$ |
| 55,0 | 78,5 | $5{,}35 \cdot 10^{14}$ | 60,0 | 86,4 | $4{,}95 \cdot 10^{14}$ |
| 57,5 | 82,6 | $5{,}11 \cdot 10^{14}$ | 62,5 | 89,9 | $4{,}80 \cdot 10^{14}$ |
| 60,0 | 86,3 | $4{,}92 \cdot 10^{14}$ | 65,0 | 93,5 | $4{,}65 \cdot 10^{14}$ |
| 62,5 | 89,7 | $4{,}77 \cdot 10^{14}$ | 67,5 | 96,7 | $4{,}53 \cdot 10^{14}$ |

Vezmeme-li v úvahu pouze v tab. 9-4 zvýrazněné hodnoty pro referenční vyhoření, tak pro všechny varianty LTO vychází minimální doba chlazení VJP z poslední kampaně až za hranici roku 2065, kdy má dojít ke zprovoznění HÚ. Pro variantu LTO +30 je teprve rok 2126 hranicí, kdy poklesne zbytkový výkon PS na úroveň 93,5 W. Z vypočtených hodnot je tak zřejmé, že dosáhnout hodnoty zbytkového výkonu 655 W/PS je velmi limitujícím faktorem a musí být uvažován ve všech variantách návrhu předávání VJP do HÚ.

## 9.3 Statistické přehledy

V této kapitole lze nalézt přehledy vztahující se k VJP z EDU zařazené v různých tabulkách dle sledovaných parametrů. První přehled obsahuje počty PS, které jsou již považované za VJP nebo se jím bezesporu stanou. Jsou to PS z MSVP, SVP, BS a z jednotlivých AZ reaktorů, kterých bylo ke dni 31. 12. 2017 celkem 11 838. Přestože by tabulka 9-5 mohla být uvedena i v kapitole 6 Sortiment jaderného paliva, byla pro spojitost s tab. 9-6 a větší komfort čtenáře uvedena zde. V tab. 9-6 jsou pak uvedeny hodnoty aktivit a zbytkového výkonu pro jednotlivé skupiny VJP k datům vztahujícím se k době provozu úložiště. Podle harmonogramu předávání VJP do HÚ a tab. 9-6 lze orientačně zjistit sledované parametry v rámci celého HÚ.

*Tab. 9-5 Počty stávajících a nových PS dle varianty LTO*

| **Typ paliva** | **Počet použitých PS dle varianty LTO** | | | **Celkový počet PS dle varianty LTO[1)]** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **+10** | **+20** | **+30** | **+10** | **+20** | **+30** |
| 1.6% klasické | - | - | - | 469 | 469 | 469 |
| 2.4% klasické | 192 | - | - | 1535 | 1343 | 1343 |
| 3.6% klasické | - | - | - | 4386 | 4386 | 4386 |
| 3.82% profilované | - | 192 | 192 | 1902 | 2094 | 2094 |
| 4.38% Gd-1 | - | - | - | 870 | 870 | 870 |
| 4.25% Gd-2 | - | - | - | 144 | 144 | 144 |
| 4.38% Gd-2M | - | - | - | 1818 | 1818 | 1818 |
| 4.25% Gd-2+ | - | - | - | 528 | 528 | 528 |
| 4.38% Gd-2M+ | 2 076 | 1 140 | 1 140 | 2454 | 1518 | 1518 |
| 4.73% Gd-2X | - | 3390 | 6 090 | 0 | 3390 | 6090 |
| **Počet PS do HÚ** | **2 268** | **4 722** | **7 422** | **14 106** | **16 560** | **19 260** |

[1)] Včetně již vyprodukovaného VJP h reaktorů je 11 838 PS

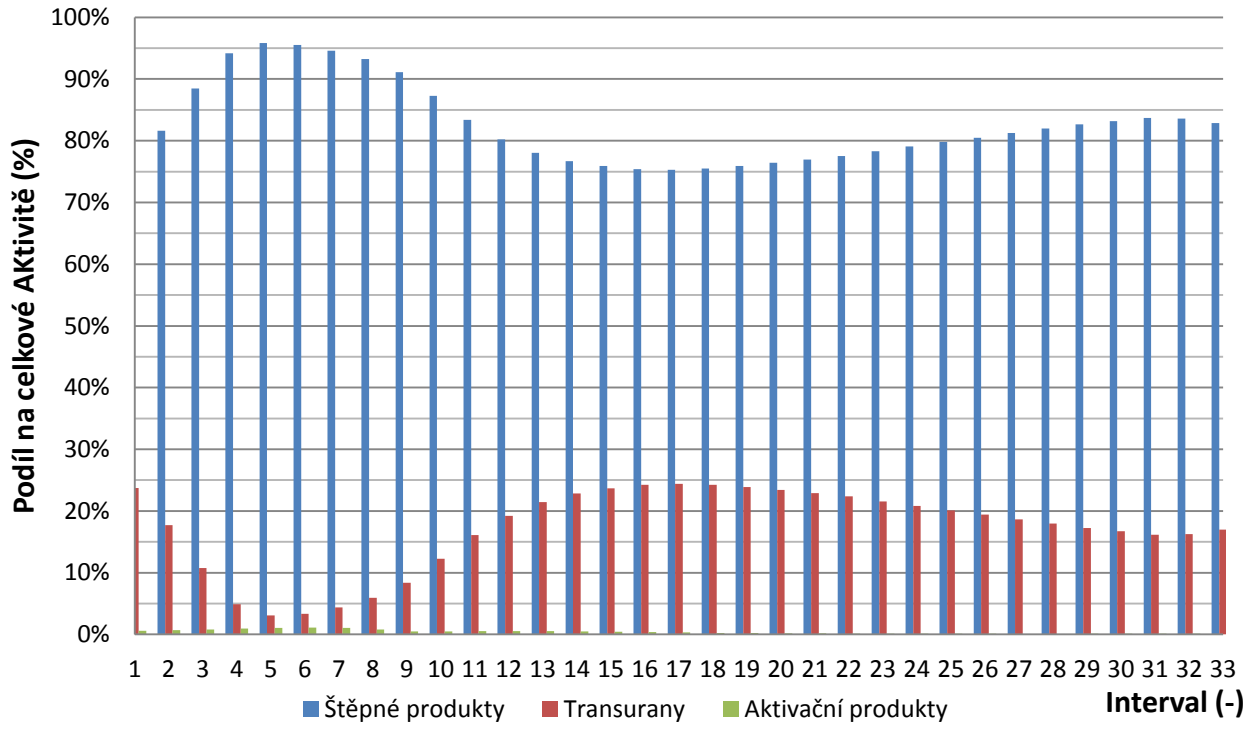
*Tab. 9-6 Sumární hodnoty aktivit VJP (počty PS ke dni 31.12.2017 + odhady)*

| **Rok** | **MSVP, SVP, BS, AZ** | | **LTO +10** | | **LTO +20** | | **LTO +30** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Aktivita (Bq) | Zbytkový výkon (kW) | Aktivita (Bq) | Zbytkový výkon (kW) | Aktivita (Bq) | Zbytkový výkon (kW) | Aktivita (Bq) | Zbytkový výkon (kW) |
| **2065** | $9{,}34\cdot10^{18}$ | 1217 | $2{,}75\cdot10^{18}$ | 317 | $7{,}25\cdot10^{18}$ | 793 | $2{,}08\cdot10^{19}$ | 2193 |
| **2070** | $8{,}27\cdot10^{18}$ | 1136 | $2{,}42\cdot10^{18}$ | 293 | $6{,}36\cdot10^{18}$ | 730 | $1{,}82\cdot10^{19}$ | 2014 |
| **2080** | $6{,}55\cdot10^{18}$ | 998 | $1{,}89\cdot10^{18}$ | 253 | $4{,}94\cdot10^{18}$ | 625 | $1{,}41\cdot10^{19}$ | 1717 |
| **2090** | $5{,}26\cdot10^{18}$ | 884 | $1{,}49\cdot10^{18}$ | 221 | $3{,}86\cdot10^{18}$ | 542 | $1{,}10\cdot10^{19}$ | 1482 |
| **2100** | $4{,}30\cdot10^{18}$ | 788 | $1{,}18\cdot10^{18}$ | 195 | $3{,}06\cdot10^{18}$ | 476 | $8{,}65\cdot10^{18}$ | 1294 |
| **2110** | $3{,}59\cdot10^{18}$ | 704 | $9{,}58\cdot10^{17}$ | 174 | $2{,}45\cdot10^{18}$ | 421 | $6{,}90\cdot10^{18}$ | 1141 |
| **2120** | $3{,}05\cdot10^{18}$ | 630 | $7{,}94\cdot10^{17}$ | 155 | $2{,}00\cdot10^{18}$ | 375 | $5{,}59\cdot10^{18}$ | 1013 |
| **2130** | $2{,}63\cdot10^{18}$ | 565 | $6{,}71\cdot10^{17}$ | 138 | $1{,}67\cdot10^{18}$ | 334 | $4{,}63\cdot10^{18}$ | 902 |

Program PAL440_R4 také umožňuje výpočet aktivit dle jednotlivých skupin izotopů ve VJP, který je uveden v tab 9-7 a graficky znázorněn na obr. 9-7. Výpočet je uveden pouze pro dobu chlazení do 80 let z důvodu omezení vypočtených hodnot a aby výsledné hodnoty nebyly zkresleny extrapolací. Přehled je uveden především pro představu o vlastnostech VJP.

*Tab. 9-7 Podíl aktivit jednotlivých skupin izotopů na celkové aktivitě (palivo 4.38Gd-2M+)*

| Interval | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Doba chlazení | 100h | 6d | 9d | 15d | 27d | 51d | 99d | 0,5r | 1r | 2r | 3r |
| Aktivita štěpných produktů | 75,7 | 81,6 | 88,4 | 94,2 | 95,8 | 95,5 | 94,6 | 93,2 | 91,1 | 87,3 | 83,4 |
| Aktivita transuranů | 23,7 | 17,7 | 10,7 | 4,9 | 3,1 | 3,3 | 4,4 | 6,0 | 8,4 | 12,3 | 16,1 |
| Aktivita aktivačních produktů | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Interval | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| Doba chlazení | 4r | 5r | 6r | 7r | 8,5r | 10r | 12r | 14r | 16r | 18r | 20r |
| Aktivita štěpných produktů | 80,2 | 78,1 | 76,7 | 75,9 | 75,4 | 75,3 | 75,5 | 75,9 | 76,4 | 77,0 | 77,5 |
| Aktivita transuranů | 19,2 | 21,4 | 22,8 | 23,7 | 24,3 | 24,4 | 24,3 | 23,9 | 23,4 | 22,9 | 22,4 |
| Aktivita aktivačních produktů | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Interval | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 |
| Doba chlazení | 23r | 26r | 29r | 32r | 36r | 40r | 45r | 50r | 60r | 70r | 80r |
| Aktivita štěpných produktů | 78,3 | 79,1 | 79,8 | 80,5 | 81,3 | 82,0 | 82,7 | 83,2 | 83,7 | 83,6 | 82,9 |
| Aktivita transuranů | 21,6 | 20,8 | 20,1 | 19,4 | 18,6 | 17,9 | 17,2 | 16,7 | 16,2 | 16,3 | 17,0 |
| Aktivita aktivačních produktů | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |




*Obr. 9-7 Grafické znázornění zbytkových výkonů a aktivit v závislosti na době chlazení*

# 10 NÁVRH PŘEDÁVÁNÍ VJP DO HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

Vstupními daty pro návrh jsou význačné parametry jednotlivých PS, ale pro samotný návrh bude využito třídění výhradně podle hodnot zbytkového výkonu. Zbytkový výkon je pro každý OS evidován v minimální, průměrné a maximální hodnotě v rámci daného OS. Vybrané statistické hodnoty souboru dat s OS dle zbytkového výkonu jsou uvedeny v tab. 10-1 a uvedeny zvlášť pro odchylky záporné a kladné vůči průměru. S ohledem na velkou variabilitu hodnot v rámci jednoho OS nebylo přistoupeno k využití průměrných hodnot a byl zvolen konzervativní postup využívající hodnot maximálních. Ve výpočtech také došlo ke zjednodušení, kdy poslední OS u každé varianty LTO je považován za naplněný. Tato odchylka několika PS v rámci celkových počtů je zanedbatelná.

Velké odchylky od průměru jsou dány především různorodostí vyhoření u PS již uložených v OS, a také ukládáním PS s různým datem ukončení poslední kampaně. Není výjimkou, že se v jednom OS nachází PS s datem ukončení poslední kampaně v rozmezí třech roků. V odhadu sortimentu VJP jsou hodnoty vyhoření jednotlivých PS idealizované a rozhodně nebudou v rámci konkrétních PS přesně odpovídat realitě. Neméně důležitým aspektem je také plánovaný způsob manipulace s VJP, kdy nejsou plánovány příliš velké skladovací prostory pro jednotlivé PS – obdoba BS. Nelze tedy předpokládat současné vyjmutí PS z několika OS a jejich individuální skladování. Stejně tak není pravděpodobná varianta vyjmutí jen několika PS z OS a poté tento částečně zaplněný OS dále skladovat. Jednalo by se o ekonomicky i technologicky zbytečně náročný postup. Konkrétní maximální hodnoty sledované u OS pak jsou uvedeny v příloze č. 1.

*Tab. 10-1 Statistické zhodnocení souboru dat OS*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Směrodatná odchylka pro zápornou odchylku od průměru: | | 12,75 % | |
| Směrodatná odchylka pro kladnou odchylku od průměru: | | 14,76 % | |
| **Číselné vyjádření:** | | | |
| Odchylka od průměru | Podíl OS splňujících max. velikost odchylky | Odchylka od průměru | Podíl OS splňujících max. velikost odchylky |
| Do -5 % | 60,58 % | Do +5 % | 67,25 % |
| Do -10 % | 69,57 % | Do +10 % | 80,01 % |
| Do -20 % | 85,22 % | Do +20 % | 91,89 % |

V následujícím textu bude využíván pojem "uvolnění", který představuje možnost zpracování VJP v OS v rámci všech prací v HÚ s ohledem na limit 655 W/UOS.

U každé varianty jsou sledovány charakteristické parametry, které budou pro každou navrhovanou variantu stanoveny.

Jsou to parametry:

- kapacita HÚ (OS/rok),
- průměrná doba zpracování OS (kalendářní dny),
- průměrná doba zpracování OS (pracovní dny)[1)],
- roční produkce UOS (ks),
- průměrná doba zpracování UOS (pracovní dny)[1)],
- využití prostor skladu VJP v rámci areálu HÚ.

[1)] Předpoklad průměrného počtu 250 pracovních dnů ročně

## 10.1 Referenční harmonogram

V rámci vypočtených hodnot je každá navržená varianta srovnána s referenčním zadáním dle dokumentu [21], ve kterém jsou stanoveny dva scénáře pro ukládání VJP z EDU.

První scénář s dvousměnným provozem počítá s ukládáním v letech 2065 až 2092. Druhý scénář se třísměnným provozem pak počítá s horizontem 2065 až 2081. Pro oba tyto scénáře bude ověřena jejich realizovatelnost na základě vypočtených dat.

Jako další limity stále zůstávají kapacita zpracování na úrovni 20 OS/rok a maximální zbytkový výkon VJP v UOS na úrovni 655 W/PS.

Dokument [21] Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě je v době vypracování této diplomové práce již 5 roků starý. I přes všechnu snahu, nebyla získána žádná aktualizovaná nebo nová verze, a proto je brán jako výchozí.

## 10.2 Rychlost ukládání UOS

Cílem této kapitoly je vytvořit základní přehledovou tabulku s kapacitními možnostmi HÚ. Jediným omezujícím předpokladem je maximální uvažovaná kapacita technologií HÚ na úrovni zpracování 20 OS ročně. Z pohledu předpokládané maximální produkce VJP pro variantu provozu EDU LTO +30 v počtu 231 OS se jedná o dostatečnou kapacitu. V reálném provozu na kapacitu provozu bude spíše nahlíženo opačným způsobem směrem od omezení daných provozem a tedy předpokládané produkce UOS. Tento stav je reflektován v tab. 10-3. V tab. 10-4 jsou referenční hodnoty z [21] přepočteny na parametry zjišťované v rámci jednotlivých návrhů.

*Tab. 10-2 Provozní parametry HÚ pro různé kapacity zpracování OS*

| Navržená kapacita HÚ (OS/rok) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Průměrná doba zpracování OS (kalendářní dny) | 182,5 | 91,2 | 60,8 | 45,6 | 36,5 | 24,3 | 18,3 |
| Průměrná doba zpracování OS (pracovní dny) | 125 | 62,5 | 41,7 | 31,3 | 25,0 | 16,7 | 12,5 |
| Roční produkce UOS (ks) | 24 | 48 | 72 | 96 | 120 | 180 | 240 |
| Uložených PS (ks) | 168 | 336 | 504 | 672 | 840 | 1 260 | 1 680 |
| Průměrná doba zpracování OS (hodiny, 2 směnný provoz)[1)] | 156 | 78 | 52 | 39 | 31,2 | 20,8 | 15,6 |
| Průměrná doba zpracování OS (hodiny, 3 směnný provoz)[1)] | 234 | 117 | 78 | 58,6 | 46,9 | 31,3 | 23,4 |

[1)] Uvažovaná délka pracovního dne 7,5 hodiny

*Tab. 10-3 Provozní parametry HÚ pro různé kapacity zpracování UOS*

| Navržená kapacita HÚ | 1 ÚOS/den[1)] | 0,5 ÚOS/den | 1 ÚOS/týden |
|---|---|---|---|
| Roční produkce UOS (ks) | 250 | 125 | 50 |
| Kapacita HÚ (OS/rok) | 20,8 | 10,4 | 4,1 |

[1)] 2 nebo 3 směnný provoz

Na základě hodnot z tab. 10-3 lze soudit, že se počítá s přibližnou kapacitou HÚ ve výši jednoho UOS denně. Při uvážení 2 paralelních linek je kapacita jeden UOS za dva dny.

*Tab. 10-4 Přepočtené parametry referenčního harmonogramu*

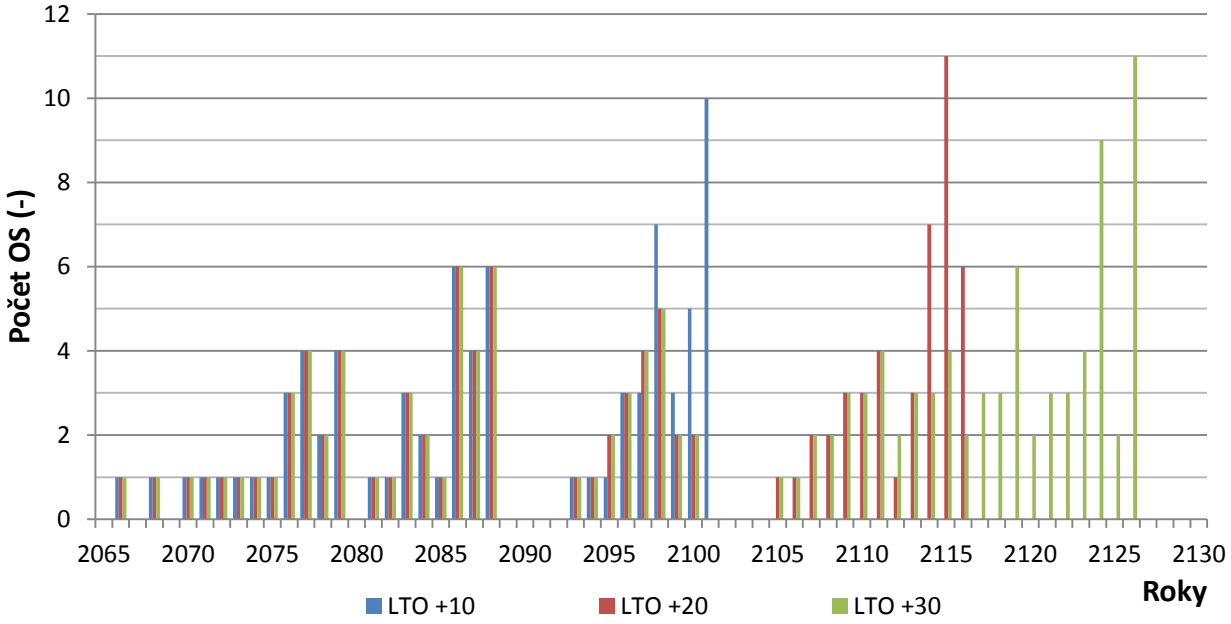
| Varianta LTO | LTO +10 | LTO +20 | LTO +30 |
|---|---|---|---|
| Předpokládaný počet OS (ks) | 169 | 199 | 231 |
| Roční kapacita pro 2 směny (OS/rok), 28r | 6,04 | 7,11 | 8,25 |
| Roční kapacita pro 3 směny (OS/rok), 17r | 9,94 | 11,71 | 13,59 |

## 10.3 Varianta 1 – postupné ukládání

Varianta postupného ukládání VJP předpokládá ukládání VJP tak, jak postupně bylo v EDU ukládáno do OS. Výhoda této varianty je v ukládání VJP s nejdelší dobou chlazení a díky tomu také s nižší aktivitou a nižším zbytkovým výkonem. Nevýhodou je naopak dlouhá doba chlazení potřebná pro VJP z posledních kampaní.

Pro všechny varianty LTO je společný počet 90 OS, v nichž veškeré PS budou splňovat limit již v roce 2065. Těchto 90 OS jsou OS se starším VJP, dnes uložené v MSVP a SVP. Z PS uložených v BS a dnes využívaného jaderného paliva by limit 93,5 W v roce 2065 splnilo jen minimum, ale kvůli společnému uložení v OS s dalšími PS je i toto minimum PS naplánováno k pozdějšímu uložení. Na obr. 10-1 je graficky znázorněn vývoj počtu OS po rocích, ve kterých splní všechny PS daného OS limit 93,5 W.

Z obr. 10-1 je také jasně patrný termín uvolnění posledních OS pro variantu LTO +10 až v roce 2101 a nemůže tak být splněna podmínka referenčního harmonogramu ani pro jednu z variant LTO.




*Obr. 10-1 Vývoj počtu OS s PS splňujícími limit 93,5 W pro uložení v HÚ*

Až do roku 2097 je počet uvolněných OS pro všechny varianty stejný. Jedná se o PS z BS a také z dnes využívaného paliva. Z časového vývoje je také patrný totožný návrh kampaní pro varianty LTO +20 a +30. V letech 2101, 2115 a 2126 je zřejmé uvolnění velkého počtu OS dané odstavením všech bloků v krátkém intervalu necelých 3 roků. Návrh harmonogramu je rozdělen na dva možné scénáře s rozdílným přístupem ke kapacitě technologií HÚ.

Transport VJP byl u všech variant LTO navržen totožný s využitím skladu VJP v rámci HÚ. Navržený harmonogram předpokládá čtyři transporty ročně vždy po třech OS. Každý rok se jedná o odvoz 12 OS z EDU, z nichž většina by byla uložena ve skladu VJP v rámci HŮ. Nejzazší termín pro odvezení poslední OS z lokality EDU by tak byl rok 2085. V případě provozu EDU by rozdělení transportů do 20 let nebyl problém. V případě, že by v dané lokalitě již byl provozován pouze sklad VJP a provozní budovy EDU byly ve fázi odstraňování, bylo by možné transporty uspíšit. Pro případný rychlý odvoz VJP z EDU je v plánovaném HÚ dostatečná kapacita skladu VJP pro všechny OS ve všech zvažovaných variantách LTO.

Pro samotný návrh harmonogramu tak budou počty ročně zpracovávaných OS upraveny tak, aby byl celý proces ukládání co nejvyrovnanější. Jsou navrženy dvě samostatné varianty. Jedna varianta předpokládá nerovnoměrné počty ročně zpracovaných OS, u druhé varianty je kapacita stanovena na stálou hodnotu ročního zpracování OS.

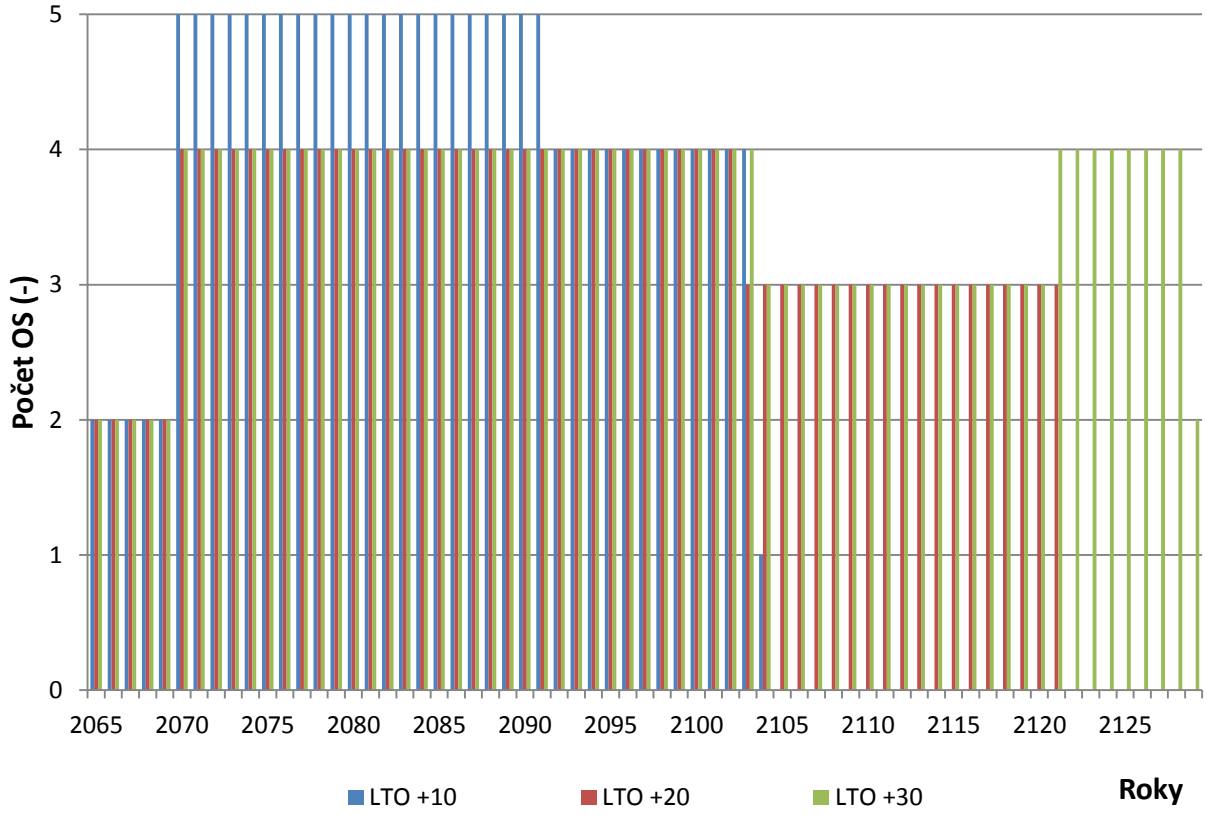
### 10.3.1 Metoda nerovnoměrného ukládání

Metoda nerovnoměrného ukládání předpokládá buď různé vytížení kapacity technologie HÚ, nebo postupné zpracovávání střídavě na jedné nebo obou linkách. Pro samotný návrh harmonogramu jsou počty ročně zpracovávaných OS upraveny tak, aby byl celý proces ukládání proveden v kampaních o stálém počtu zpracovávaných OS a nedocházelo k velkým meziročním změnám. U variant LTO +10 a LTO +30 je po zkušebním pětiletém provozu nastavena hodnota ročního zpracování s ohledem na počty dále uvolňovaných OS vyšší, než u varianty LTO +30. Pro variantu LTO +30 byla ke konci navýšena kapacita zpracování opět na 4 OS/rok z důvodu velkého množství uvolněných OS v rocích 2024 až 2026 a také z důvodu, aby nedošlo ke zbytečnému oddalování uložení VJP. Vývoj počtu OS ve skladu VJP v HÚ je znázorněn na obr. 10-3, kde je také zřetelné maximální využití skladu VJP na úrovni 162 OS v roce 2083 pro variantu LTO +30. Sklad VJP je v této variantě využit nejvíce z 67,5 % a zbývá tedy dostatek volné skladovací kapacity pro VJP z Jaderné elektrárny Temelín nebo pro radioaktivní odpad určený k uložení v rámci plánovaného HÚ. V přehledové tab. 10-5 jsou uvedeny charakteristické parametry pro navrhovanou metodu nerovnoměrného ukládání u postupného ukládání OS.

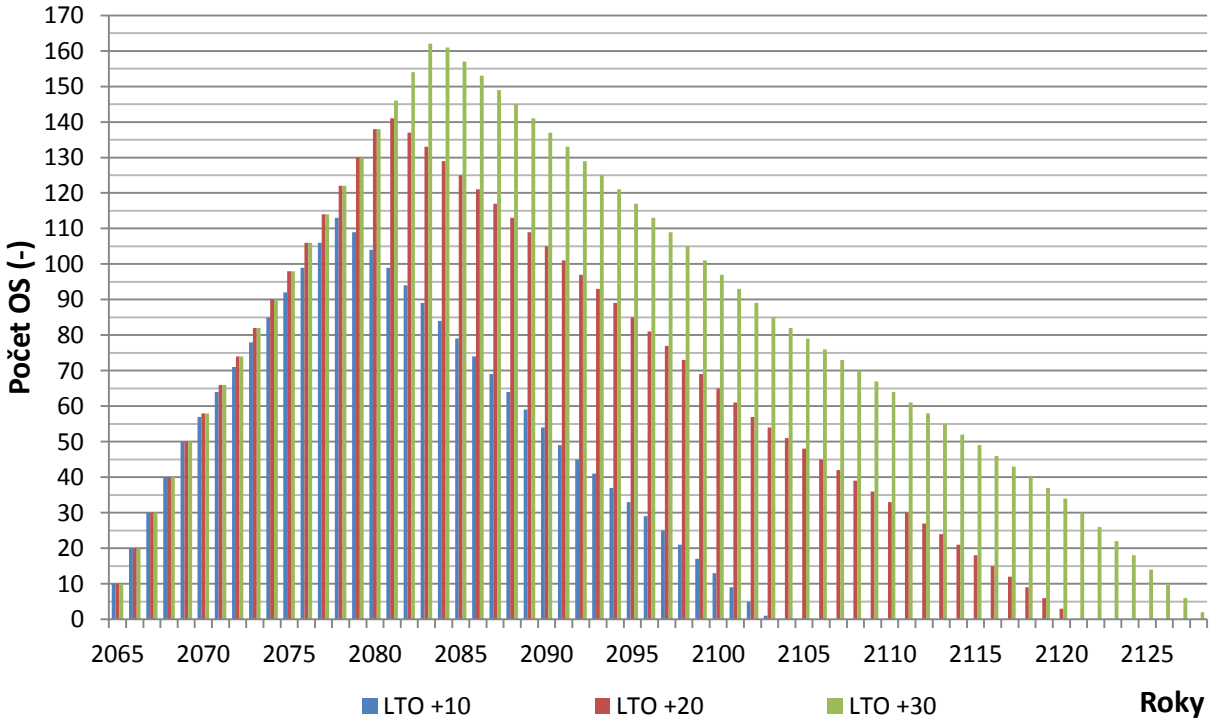
*Tab. 10-5 Přehledová tabulka pro metodu nerovnoměrného ukládání*

| Navržená kapacita HÚ (OS/rok) | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Průměrná doba zpracování OS (kalendářní dny) | 182,5 | 121,7 | 91,3 | 73,0 |
| Průměrná doba zpracování OS (pracovní dny) | 125,0 | 83,3 | 62,5 | 50,0 |
| Roční produkce UOS (ks) | 24 | 36 | 48 | 60 |
| Průměrná doba zpracování UOS (pracovní dny) | 10,42 | 6,95 | 5,21 | 4,17 |

Nejvyšší roční kapacita je stanovena u varianty LTO + 10 na 5 OS/rok. Možnost zvolení této kapacity je dána především využitím paliva typu 4.38Gd-2M+ s průměrným vyhořením 52 MWd/$Kg_U$, a je tak možné VJP ukládat dříve než u typu 4,76Gd-2X využívaného u zbylých variant LTO. Uložení posledního UOS s VJP z EDU je pak pro LTO +10 v roce 2104, pro LTO +20 v roce 2121 a pro LTO +30 v roce 2129.




*Obr. 10-2 Vývoj počtu ročně zpracovaných OS v HÚ*




*Obr. 10-3 Využití skladu VJP v HÚ – nerovnoměrné ukládání*

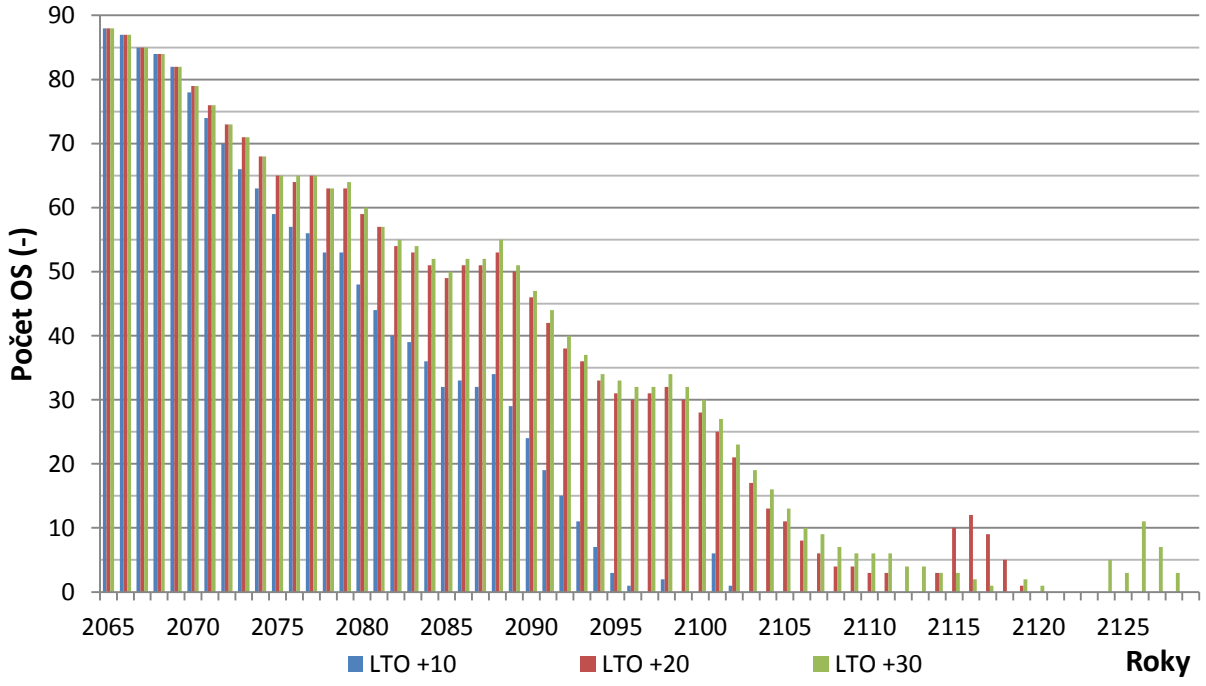
### 10.3.2 Metoda lineárního ukládání

Základním předpokladem lineární metody je snaha o stanovení kapacity zařízení HÚ tak, aby bylo možné jeho plné využití po celou dobu ukládání. Pro jednotlivé varianty je stanovena potřebná roční kapacita zařízení s ohledem na variantu postupného ukládání OS dle stáří.

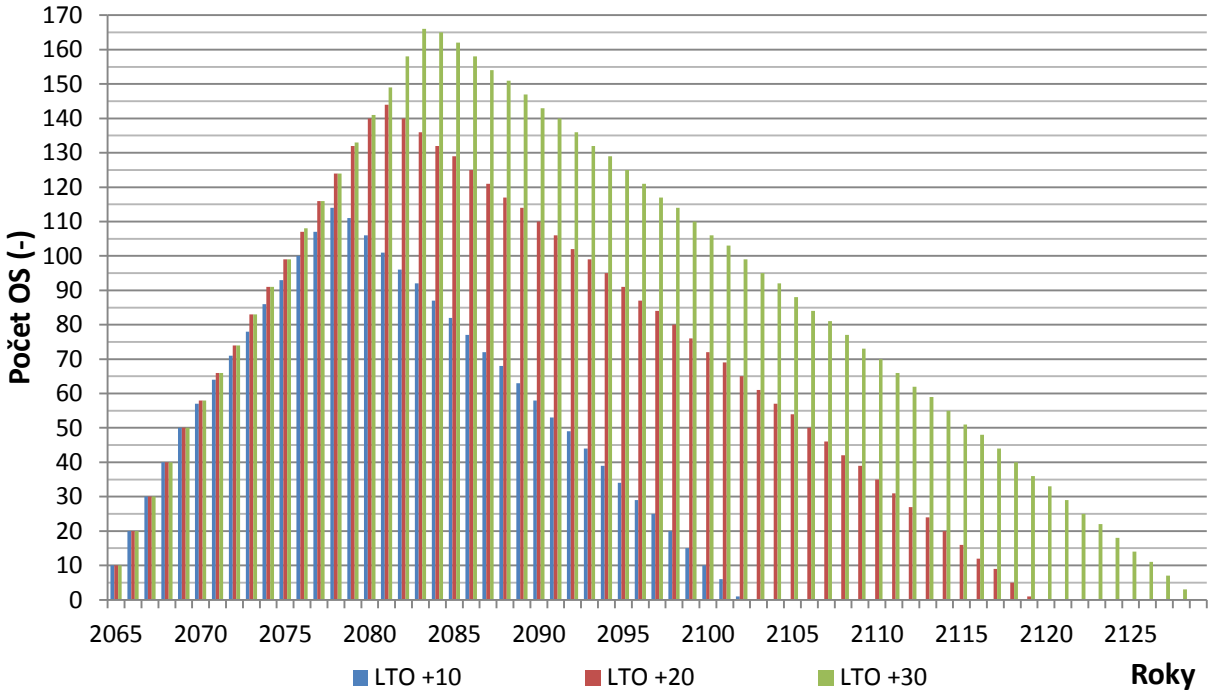
Pro prvních 5 roků provozu byla ponechána roční kapacita na úrovni 2 OS ročně. Pro další roky byla roční zpracovatelská kapacita upravena tak, aby bylo možné rovnoměrně po celou dobu provozu zpracovávat neměnný roční počet OS. Přehled pro lineární variantu včetně navržené kapacity HÚ je uveden v tab. 10-6. Časový vývoj počtu OS s možností uložení do HÚ je uveden na obr. 10-4 a využití kapacity skladu VJP v rámci HÚ na obr. 10-5.

*Tab. 10-6 Přehledová tabulka pro lineární metodu*

| Varianta provozu EDU | LTO +10 | LTO +20 | LTO +30 |
|---|---|---|---|
| Navržená kapacita HÚ pro roky 2065-2069 (OS/rok) | 2 | 2 | 2 |
| Navržená kapacita HÚ pro roky 2070 a dál (OS/rok) | 4,78 | 3,75 | 3,68 |
| Průměrná doba zpracování OS (kalendářní dny) | 182,5 / 76,3 | 182,5 / 97,3 | 182,5 / 99,2 |
| Průměrná doba zpracování OS (pracovní dny) | 125 / 52,3 | 125 / 66,7 | 125 / 67,9 |
| Roční produkce UOS (ks) | 57,4 | 45,0 | 44,2 |
| Průměrná doba zpracování UOS (pracovní dny) | 4,35 | 5,56 | 5,66 |
| Rok uložení posledního UOS | 2102 | 2119 | 2129 |




*Obr. 10-4 Vývoj počtu OS s možností předání k uložení v daném roce – lineární ukládání*




*Obr. 10-5 Využití skladu VJP v HÚ – lineární ukládání*

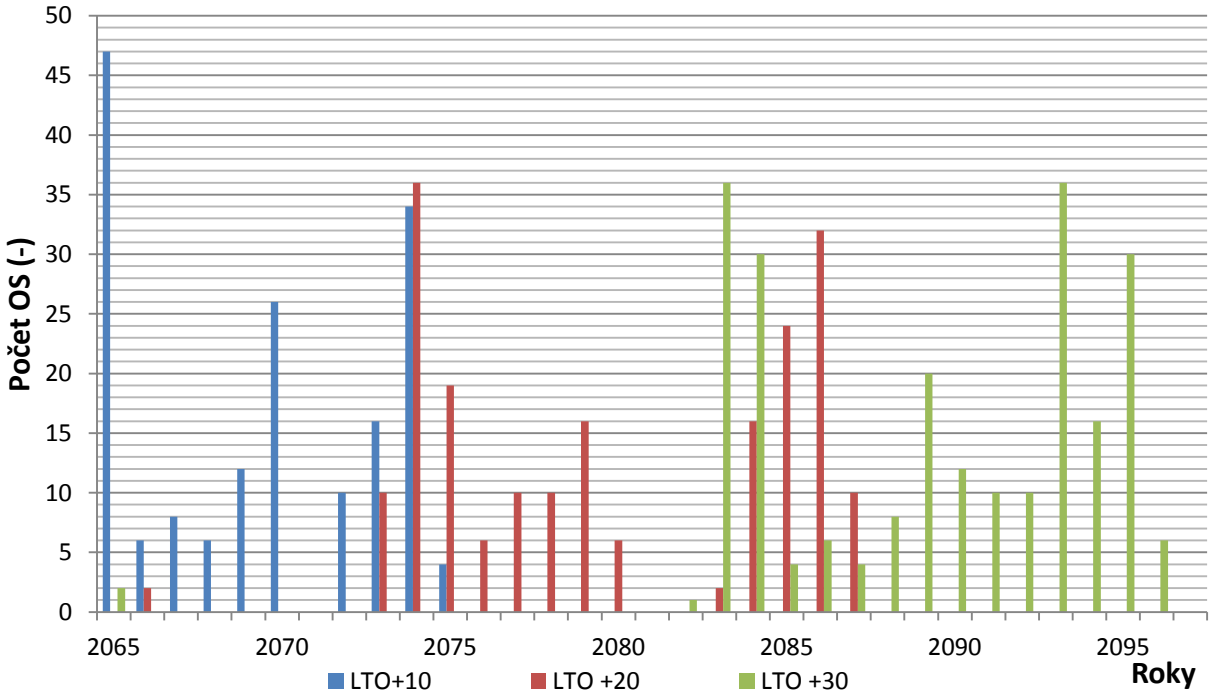
Limitujícím faktorem pro stanovení roční kapacity byl vývoj počtu OS uvolněných ke zpracování z nových typů paliva s dlouhou dobou chlazení. Pro transport VJP z EDU zvolený základní harmonogram v podobě 4 transportů ročně je naprosto vyhovující. Vyšší frekvence transportů je možná za předpokladu dostatku místa ve skladu VJP v rámci HÚ. Zmíněná situace by mohla nastat např. v případě zvýšených nákladů na správu OS s VJP na lokalitě EDU. Zároveň by vyšší využití skladu VJP v rámci HÚ vedlo k omezeným možnostem skladování VJP z Jaderné elektrárny Temelín.

## 10.4 Varianta 2 – Kombinace druhů ukládaného VJP

Pro výpočet je nejnáročnější varianta návrhu využívající kombinaci jednotlivých PS VJP v rámci UOS tak, aby nebyla překročena limitní hodnota 655 W/UOS. UOS obsahuje celkem 7 PS, není tak možná pouhá kombinace 1+1 PS (starší PS + novější PS). I s ohledem na různé konečné počty OS a různé možnosti kombinací, je tento návrh rozdělen po jednotlivých variantách LTO. Základní postup společný pro všechny varianty je kombinace VJP s nejmenším zbytkovým výkonem, obvykle odpovídá nejstaršímu VJP, s VJP s nadlimitním zbytkovým výkonem představovaným novějšími typy paliv s vyšším vyhořením. V návrhu byly uvažovány dvě různé kombinace nejstaršího VJP s nejnovějším VJP. Zpracování samotné je pak provedeno pomocí funkcí v MS excel.

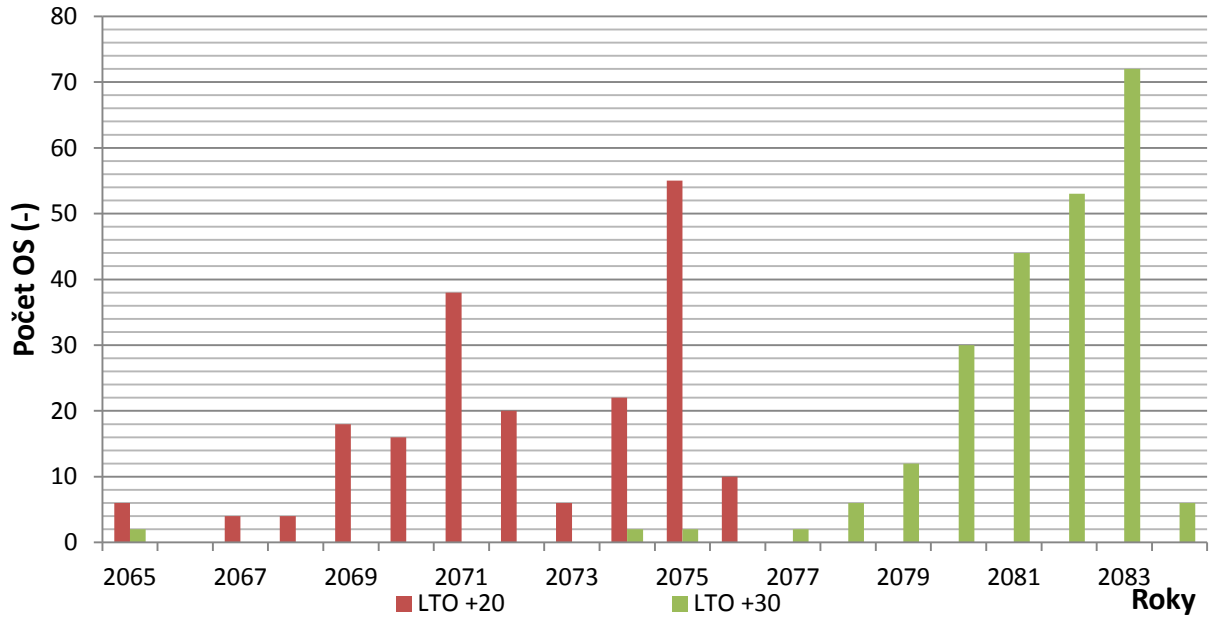
Pro základní představu je nutné uvést, že zvažovanými možnostmi jsou kombinace 3+4 (3 starší PS + 4 novější PS v jednom UOS) a 4+3 (4 starší PS + 3 novější PS v jednom UOS). Kombinace byla prováděna vždy tak, že OS s nejnižším zbytkovým výkonem byl přiřazován OS s nejvyšším zbytkovým výkonem. Kombinace jiné než 3+4 a 4+3 nebyly uvažovány z důvodu malého počtu VJP s nízkým zbytkovým výkonem. Pro kombinaci 3+4 jsou znázorněny počty OS uvolněných v jednotlivých letech i pro všechny varianty LTO na obr. 10-6. Pro varianty LTO +20 a LTO +30 je naprosto zřejmé, že tato kombinace není vhodná z důvodu nemožnosti ukládat VJP

již od roku 2065, a proto je pro tyto varianty metodika výpočtu trochu jiná a je popsána v příslušných kapitolách. S ohledem na zvolení varianty kombinace počtu PS bude nezbytné dimenzovat sklad VJP v horké komoře alespoň na počet 2 OS, což odpovídá 168 PS. Bez této kapacity by nebylo možné současně kombinovat různé počty PS dle jejich stáří.




*Obr. 10-6 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 3+4*

Kombinace 4+3 vychází pro variantu LTO +10 s možností uložení všeho VJP již v roce 2065. Na obr. 10-7 jsou proto zobrazeny počty uvolněných OS v jednotlivých letech pouze pro varianty LTO +20 a LTO +30. Z grafického vyjádření je opět zřejmá nemožnost využití zvolené kombinace nejstaršího a nejnovějšího VJP tak, aby bylo možno VJP ukládat již v roce 2065.




*Obr. 10-7 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 4+3*

### 10.4.1 LTO +10 – nejrychlejší uložení

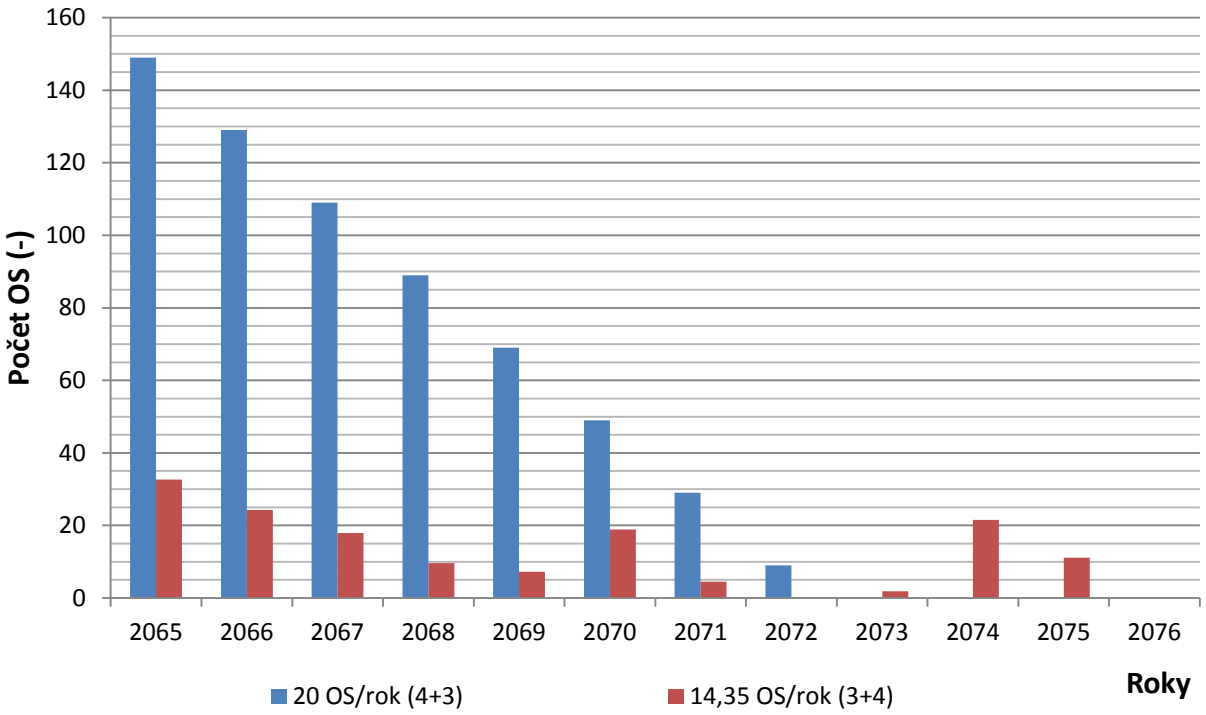
Ve variantě LTO +10 je potřeba zpracovat celkem 169 OS. Více než polovina (90 OS) z tohoto počtu pak splňuje podmínky pro uložení již v roce 2065 a mnohé OS obsahují VJP se zbytkovým výkonem výrazně pod hranicí 93,5 W. Pro návrh harmonogramu byly zvoleny obě kombinace (3+4 i 4+3).

U nejrychlejší varianty ukládání se neuvažuje s žádným počátečním přechodným obdobím a předpokládá se schopnost provozu technologií HÚ na nominálních hodnotách. U všech UOS se jedná o kombinaci staršího a novějšího VJP.

*Tab. 10-7 Přehledová tabulka pro nejrychlejší možnou variantu uložení, LTO +10*

| Varianta ukládání | Postup 4+3 | Postup 3+4 |
|---|---|---|
| Navržená kapacita HÚ (OS/rok) | 20 | 14,35 |
| Průměrná doba zpracování OS (kal. dny) | 18,3 | 25,4 |
| Průměrná doba zpracování OS (prac. dny) | 12,5 | 17,4 |
| Roční produkce UOS (ks) | 240 | 172 |
| Průměrná doba zpracování UOS (prac. dny) | 1,04 | 1,45 |
| Rok uložení posledního UOS | 2072 | 2075 |

S parametry pro nejrychlejší možné varianty uložení uvedenými v tab. 10-7 by bylo nezbytně nutné navýšit počet transportů v každém roce na minimální počet 7 transportů po 3 OS.




*Obr. 10-8 Průběh počtu uvolněných OS pro nejrychlejší možnou variantu uložení, LTO +10*

Z průběhů hodnot je viditelné, že v případě kombinace (4+3) je možné OS předat ke zpracování již v roce 2065. U kombinace (3+4) je zřetelný nárůst počtu uvolněných OS v letech 2074 a 2075 způsobený velkým počtem OS s VJP z posledních kampaní.

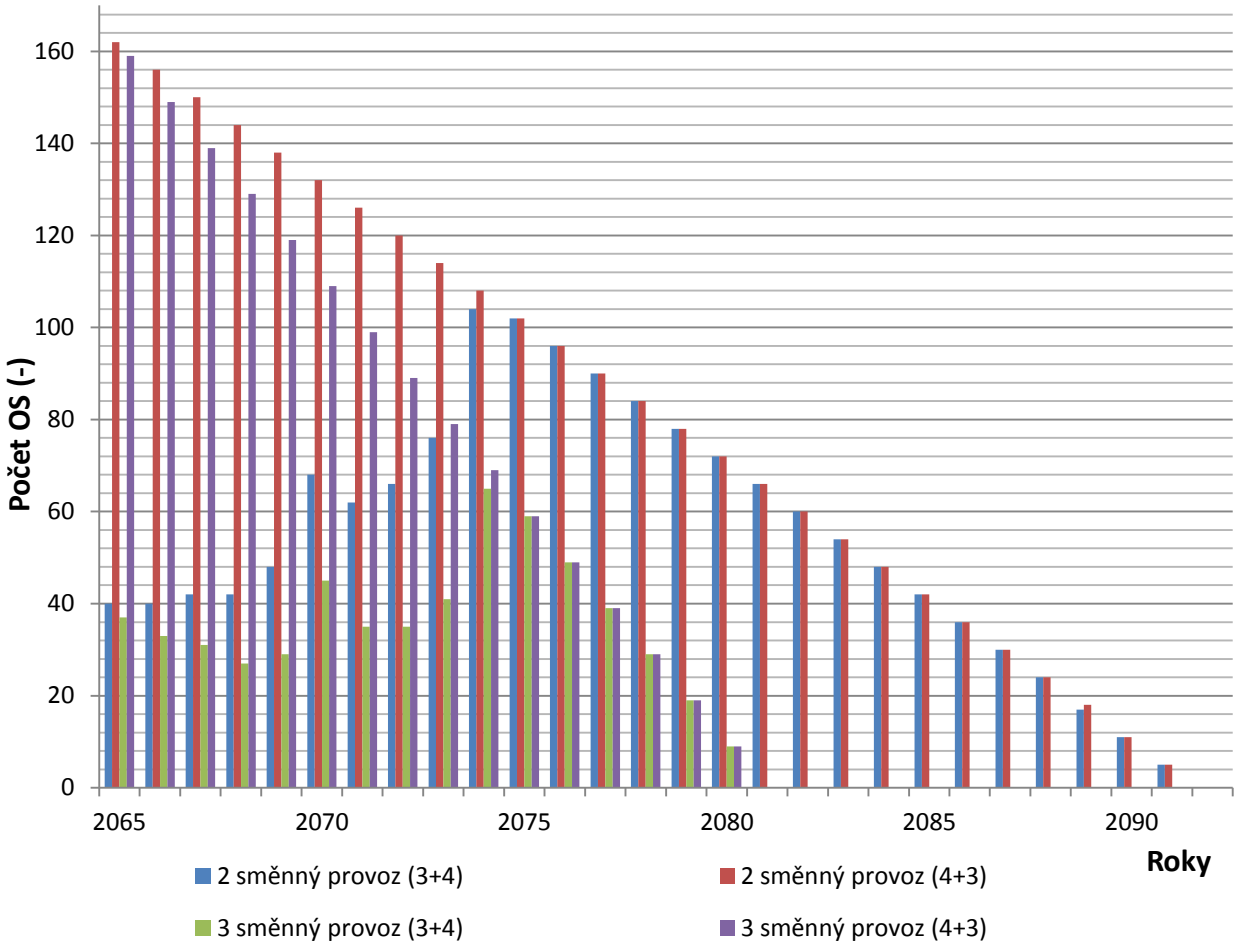
### 10.4.2 LTO +10 – podle referenčního harmonogramu

Při srovnání hodnot uvedených v tab. 10-4 a v tab. 10-7 je referenční harmonogram možné uskutečnit. Opět není uvažováno s žádným počátečných přechodným obdobím, což je plně v souladu se zdrojovým textem [21]. Návrh harmonogramu předávání VJP do HÚ má následující podobu:

*Tab. 10-8 Přehledová tabulka pro referenční harmonogram, LTO +10*

| Varianta ukládání | 2 směnný provoz | 3 směnný provoz |
|---|---|---|
| Navržená kapacita HÚ (OS/rok) | 6,04 | 9,94 |
| Průměrná doba zpracování OS (kal. dny) | 60,4 | 36,7 |
| Průměrná doba zpracování OS (prac. dny) | 41,4 | 21,2 |
| Roční produkce UOS (ks) | 72 | 119 |
| Průměrná doba zpracování UOS (prac. dny) | 3,47 | 2,10 |
| Rok uložení posledního UOS | 2092 | 2081 |

Průběh zásob OS s možností uvolnění k uložení v HÚ pro jednotlivé způsoby kombinace je uveden na obr. 10-9. Obdobně jako na obr. 10-8 i zde jsou viditelné vlivy uvolnění OS S VJP z posledních kampaní.




*Obr. 10-9 Počty uvolněných OS pro uložení v HÚ – kombinace 4+3 a 3+4, LTO +10*

### 10.4.3 LTO +20 – nejrychlejší uložení

U varianty LTO +20 je jako první způsob návrhu harmonogramu vybráno stanovení nejrychlejšího možného způsobu uložení veškerého VJP. Jako základní předpoklad je uvažován rovnoměrný roční počet zpracovaných OS. Pro kombinaci jednotlivých druhů OS nebylo stanoveno žádné omezení. Kombinace ukládaných PS jsou tedy různé a jsou stanoveny pouze za účelem co největšího zkrácení doby potřebné pro uložení všech PS VJP do HÚ.

Při výpočtu byly nejprve nastaveny výchozí hodnoty v podobě předpokládaného počtu ročně zpracovaných OS. Z původních variant navrhované kapacity ročního zpracování v podobě 3 až 10 OS vyšla jako nejrychlejší varianta s mírně proměnnou kapacitou uvedená v tab. 10-9.

*Tab. 10-9 Přehledová tabulka – návrh nejrychlejšího harmonogramu, LTO +20*

| Časový úsek | 2065 – 2084 | 2085 – 2090 |
|---|---|---|
| Vypočtená max. kapacita HÚ (OS/rok) | 8 OS/rok | 7 OS/rok[1)] |
| Průměrná doba zpracování OS (kal. dny) | 45,6 | 52,1 |
| Průměrná doba zpracování OS (prac. dny) | 31,3 | 35,7 |
| Roční produkce UOS (ks) | 96 | 84 |
| Průměrná doba zpracování UOS (prac. dny) | 2,60 | 2,98 |
| Rok uložení posledního UOS | 2090 | |

[1)] V roce 2090 budou v této variantě zpracovány jen 4 OS.

Pokles počtu ročně zpracovaných OS z 8 na 7 OS/rok v roce 2085 je zapříčiněn nutností uložit velké množství VJP vzniklého v krátké době na konci provozu EDU, které v danou dobu stále nesplňuje limit 93,5 W/PS. Pro snížení celkové hodnoty vývinu zbytkového tepla v rámci UOS již není k dispozici dostatek PS s nižším vývinem zbytkového tepla, a tak musela být snížena roční kapacita zpracování na úroveň 7 OS/rok. Z vypočtených hodnot nebylo při předpokladu dodržení limitu 655 W/UOS možné uložit VJP z varianty provozu EDU LTO +20 dříve, než dle navrženého harmonogramu.

V případě požadavku na rovnoměrné roční ukládání by bylo nutné zvolit variantu s roční kapacitou 7 OS, čímž by došlo k prodloužení doby ukládání o 4 roky.

Harmonogram transportů VJP z EDU může být ponechán na úrovni 4 transportů ročně. Navržená varianta však pro své provedení potřebuje vždy přesně danou kombinaci OS v daném roce, což povede k vyšším nárokům na logistiku spojenou s nutností transportů konkrétních OS. Lze předpokládat, že stávající rozmístění OS v SVP a MSVP neodpovídá požadavkům zvolené varianty, a tak by v případě jejího využití bylo nutné zpracovat přesný harmonogram transportů OS z EDU v závislosti na aktuálním rozmístění OS v SVP a MSVP. Samotná kombinace navržených OS je uvedená v příloze 3.

V rámci každého roku byl sledován nejen max. zbytkový výkon, ale také aktivita jednotlivých OS. Pro UOS ukládané v jednotlivých letech se aktivita příliš neměnila. Průměrná hodnota aktivity PS v rámci jednoho ukládaného UOS byla na úrovni $4{,}58 \cdot 10^{15}$ Bq. Minimální hodnota $4{,}29 \cdot 10^{15}$ Bq, maximální hodnota $4{,}96 \cdot 10^{15}$ Bq. Odchylky lze zdůvodnit kombinováním různě starých PS s různým vyhořením. Jistá mír odchylek může být zapříčiněna extrapolací při výpočtech aktivit jednotlivých PS.

Využití navržené varianty také předpokládá minimální skladovací kapacitu horké komory HÚ na úrovni alespoň 3 OS (252 PS) tak, aby bylo možné kombinovat PS až z třech různých OS.

### 10.4.4 LTO +30 – nejrychlejší uložení

Pro variantu LTO +30 je zvolena totožná metoda stanovení harmonogramu jako u varianty LTO +20. Výchozími hodnotami jsou zvoleny roční kapacity od 3 do 10 OS. Jako nejrychlejší způsob uložení veškerého VJP z EDU je navržena potřebná roční kapacita zpracování 6 OS. Sledované parametry pro navržený harmonogram jsou uvedeny v tab. 10-10. Konkrétní kombinace OS pro ukládání v jednotlivých letech je pak uvedena v příloze 4.

*Tab. 10-10 Přehledová tabulka – návrh nejrychlejšího harmonogramu, LTO +30*

| Časový úsek | 2065 – 2103 |
|---|---|
| Vypočtená max. kapacita HÚ (OS/rok) | 6 OS/rok[1)] |
| Průměrná doba zpracování OS (kal. dny) | 60,8 |
| Průměrná doba zpracování OS (prac. dny) | 41,7 |
| Roční produkce UOS (ks) | 72 |
| Průměrná doba zpracování UOS (prac. dny) | 3,47 |
| Rok uložení posledního UOS | 2103 |

[1)] V roce 2103 budou v této variantě zpracovány jen 3 OS.

Navržená roční kapacita 6 OS vychází z omezení daného vysokým zbytkovým výkonem paliva 4.76GD-2X z posledních kampaní. I tak bylo v posledních 5 letech navrženého harmonogramu dosaženo mírné překročení max. dovoleného zbytkového výkonu o 2,4 W/PS. V následujících 2 letech ale hodnota poklesne potřebných 93,5 W/PS. U tohoto VJP je dlouhá doba chlazení a v rámci jednoho UOS je tak nutné mnohdy kombinovat PS i z více druhů OS. Platí tedy stejná podmínka pro velikost skladovací kapacity horké komory HÚ jako pro variantu nejrychlejšího ukládání LTO +20 v minimálním počtu 252 kusů PS.

Ve všeobecnosti lze konstatovat, že návrhy harmonogramů s co nejrychlejším uložením VJP do HÚ jsou pro LTO +20 i LTO +30 velmi podobné, s téměř totožnými požadavky na zpracování a metodu transportu VJP z EDU do HÚ.

Pro variantu provozu EDU LTO +30 by bylo možné uvažovat i o alternativním scénáři ukládání VJP v podobě jednotlivých ukládacích cyklů namísto kontinuálního provozu. V době časového okna by bylo možné využít zpracovatelskou kapacitu např. pro ukládání VJP z Jaderné elektrárny Temelín. Hlavním vodítkem pro alternativní metodu ukládání je velký počet OS s možností uložení již v roce 2065 a velký počet OS uvolněných k ukládání v letech 2115 až 2120. U ostatních variant LTO není tento časový rozestup tak velký, a jako provozně výhodnější se jeví spíše kontinuální provoz. Návrh alternativní varianty by ovšem předpokládal znalost alespoň přibližné kapacity technologií pro ukládání v HÚ. Maximální uvažovaná kapacita v podobě 20 OS ročně je příliš naddimenzovaná z pohledu jakékoli varianty provozu EDU a nelze tedy brát tuto hodnotu jako referenční. Společně s neznalostí dat o VJP z Jaderné elektrárny Temelín se tak jedná o velké množství proměnných, které vedly k nezpracování uvedené možnosti návrhu harmonogramu předávání VJP do HÚ.

U varianty LTO+30 se hodnoty aktivity VJP v UOS ukládaných v jednotlivých letech pohybovaly od $4{,}49 \cdot 10^{15}$ Bq do $4{,}86 \cdot 10^{15}$ Bq, s průměrnou hodnotou $4{,}70 \cdot 10^{15}$ Bq. Odchylky od průměrné hodnoty budou způsobeny převážně kombinací různě starého VJP a vlivem způsobu výpočtu extrapolací pro dlouhé doby chlazení.

### 10.4.5 Ověření referenčního harmonogramu pro LTO +20 a LTO +30

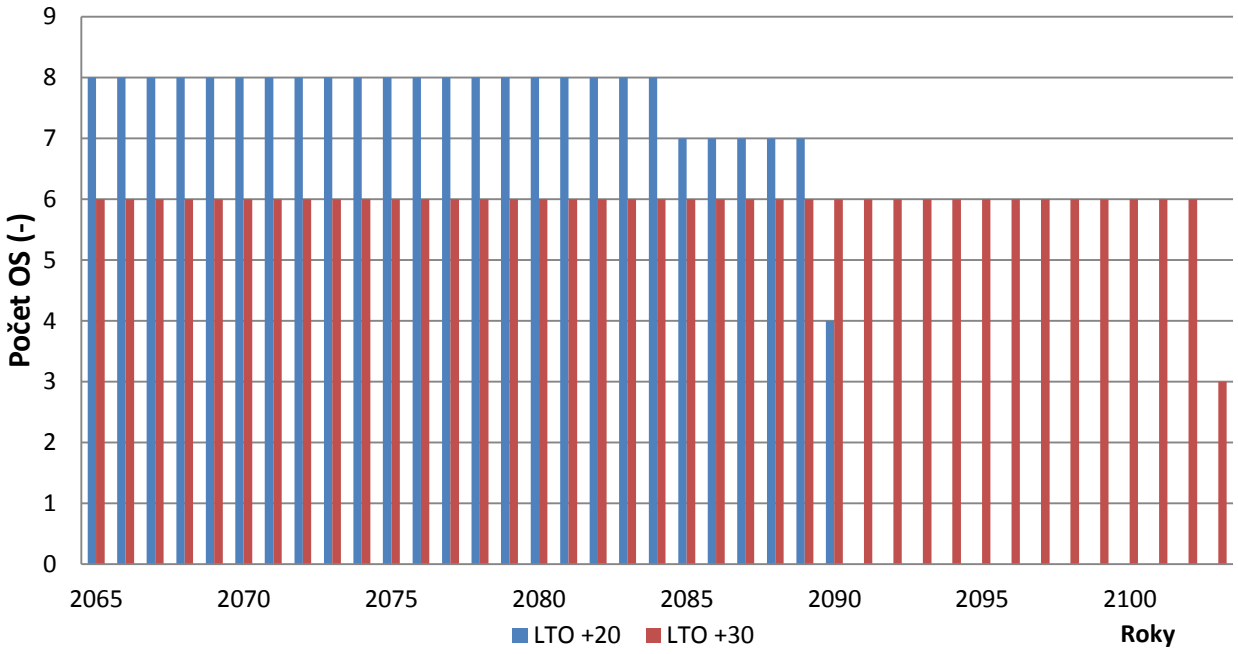
Referenční harmonogram předpokládá roční kapacitu zpracování dle tab. 10-11.

*Tab. 10-11 Kapacita zpracování dle referenčního harmonogramu*

| Varianta LTO | LTO +20 | LTO +30 |
|---|---|---|
| Předpokládaný počet OS (ks) | 199 | 231 |
| Roční kapacita pro 2 směny (OS/rok), 28r | 7,11 | 8,25 |
| Roční kapacita pro 3 směny (OS/rok), 17r | 11,71 | 13,59 |

S ohledem na stanovenou maximální kapacitu ukládání 8 OS/rok pro variantu LTO +20 a 6 OS/rok pro variantu LTO +30 je zřejmé, že jediná přípustná varianta dle referenčního harmonogramu je 2 směnný provoz pro variantu LTO +20 s průměrnou kapacitou 7,11 OS/rok. Tento jediný referenční harmonogram je pod navrženou limitní hodnotou 8 OS/rok. Pro ostatní varianty není možné zvolit takovou kombinaci PS VJP, aby bylo veškeré VJP z EDU uloženo v rozmezí referenčního harmonogramu.

Pro názornost je na obr. 10-10 graficky znázorněna roční kapacita zpracování pro nejrychlejší možnou variantu uložení VJP do HÚ.




*Obr. 10-10 Počty ročně ukládaných OS pro nejrychlejší varianty, LTO +20 a LTO +30*

# 11 ZÁVĚR

Diplomová práce vychází z potřeb Jaderné elektrárny Dukovany, potažmo společnosti ČEZ, a.s., která má povinnost zpracovat základní návrh předávání vyhořelého jaderného paliva (VJP) do hlubinného úložiště. Mojí snahou bylo vypracování návrhů nejpravděpodobnějších harmonogramů předávání vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště na základě poskytnutých dat a zdůvodnění jejich volby.

Především pro čtenáře, který není zasvěcen do problematiky, jsou úvodní kapitoly věnovány popisu současného stavu v oblasti budování hlubinného úložiště, historie a vývoje jaderného paliva a programu prodlužování životnosti Jaderné elektrárny Dukovany. Všechny uvedené aspekty výraznou měrou ovlivňují samotný návrh harmonogramu. Pro dokreslení tématu je součástí diplomové práce samostatná kapitola věnovaná základnímu izotopickému složení jaderného paliva čerstvého i vyhořelého.

Dílčím úkolem je zpracování výhledu v oblasti budoucího sortimentu VJP. Při provozu ovšem nejsou vlastnosti a parametry VJP zásadním tématem, a proto je pro odhad využito předpokladů v oblasti vývoje sortimentu jaderného paliva nového. Pro současný stav VJP jsou zpracovány přehledové tabulky s jednotlivými počty již využitých palivových souborů. K poslednímu dni roku 2017 tak již bylo vyprodukováno 10 311 palivových souborů považovaných za VJP a dalších 1 527 palivových souborů již bylo využito, a s jistotou budou v horizontu několika let taktéž považovány za VJP. Odhad počtu souborů VJP je zpracován ve třech samostatných verzích v závislosti na variantě prodlužování životnosti elektrárny. Pro variantu prodloužení třicetileté projektové životnosti o 10 let označovanou LTO +10 se předpokládá využití stávajícího typu jaderného paliva a vznik dalších 2 268 palivových souborů VJP. Pro varianty prodlužování životnosti o 20 a 30 let označované LTO +20 a LTO +30 jsou odhadnuty počty palivových souborů VJP 4 722 (LTO +20) a 7 422 (LTO +30). U všech variant je také přibližně navržen způsob kampaní tak, aby bylo jaderné palivo optimálně využito a pro další odhady navrženo odpovídající množství vyhořelého jaderného paliva. Zajímavá je bezpochyby informace, že i pro variantu provozu elektrárny LTO +30 již bylo vyprodukováno co do počtu palivových souborů přes 61 % celkového množství. Celkový počet obalových souborů s VJP je 169 pro LTO +10, 199 pro LTO +20 a 231 pro LTO +30.

Odhady budoucího sortimentu vyhořelého jaderného paliva a jeho stávající počty byly využity jako výchozí data pro další výpočty pomocí poskytnutého softwaru PAL440_R4. Výpočty aktivit a vývinu zbytkového tepla, obojí v závislosti na době od posledního pobytu paliva v aktivní zóně reaktoru, jsou pak zdrojem dat pro samotné zpracování návrhů předávání VJP. S uvážením skladování VJP v obalových souborech (OS) je pro návrhy přistoupeno k využití OS namísto jednotlivých palivových souborů. OS obsahují 84 palivových souborů a je běžné, že se parametry jednotlivých souborů liší. Z tohoto důvodu jsou pro všechny návrhy využívány parametry nejméně příznivé, vztahující se k nejvíce vyhořelému palivovému souboru v rámci každého OS. Zvolená konzervativní metoda počítající s nejméně příznivými hodnotami je zvolena s ohledem na možnost nakládání s OS, kdy je snaha s nimi co nejméně manipulovat. Nejmenší množství manipulací může být dosaženo pouze jednorázovými činnostmi, které jsou představovány vyjmutím celého obsahu OS během jedné překládky v rámci hlubinného úložiště.

Pro všechny varianty návrhu harmonogramu předávání je nejvýraznějším omezením limit zbytkového výkonu 655 W na jeden ukládací obalový soubor o kapacitě 7 palivových souborů.

Všechny navržené varianty jsou také srovnány s dostupným referenčním harmonogramem vypracovaným pro SÚRAO, mající na starosti veškeré činnosti spojené s budováním a provozem hlubinného úložiště. Výstupem práce jsou především tabulky a grafy vypovídající o hlavních sledovaných hodnotách u každé varianty a metody ukládání.

Základní variantou předávání VJP je postupné ukládání jednotlivých obalových souborů tak, jak v čase vznikaly. Nespornou výhodou této varianty je uložení nejstaršího VJP, které je charakterizováno nízkým vývinem zbytkového tepla i nízkou aktivitou. Nevýhodou je nemožnost kompenzace minimální potřebné doby pro pokles vývinu zbytkového tepla pod limitní hodnotu ukládacího obalového souboru. Z uvedeného důvodu tak není možné provést uložení veškerého VJP dříve, než v roce 2101 pro LTO +10, v roce 2116 pro LTO +20 a v roce 2126 pro LTO +30. Pro variantu postupného ukládání byly navrženy dvě různé metody provedení. První metodou je lineární ukládání představované stálým ročním počtem zpracovaných OS. Pro jednotlivé varianty LTO byla navržena roční kapacita a odpovídající rok uložení posledního palivového souboru následovně: 4,78 OS/rok (2102); 3,75 OS/rok (2119) a 3,68 OS/rok (2129). Lineární metoda může být využita jako podklad pro stanovení nominální provozní kapacity technologie. Druhá metoda, spočívající v nerovnoměrných počtech ročně zpracovávaných OS, je založena na stanovení kapacity technologie v OS/rok tak, aby bylo možné rychlejší ukládání v prvních letech provozu úložiště, a tím došlo k uvolnění kapacity ve skladu VJP. Vzhledem k omezením plynoucích z počtu OS s možností uložení jsou si obě varianty velmi blízké.

Další uvažovanou variantou ukládání VJP je kombinace starších a novějších palivových souborů s rozdílnými parametry tak, aby výsledná hodnota vývinu zbytkového tepla v ukládacím souboru nepřesáhla limitní hodnotu a zároveň bylo možné dosáhnout rychlejšího uložení veškerého VJP. Výchozími metodami pro tuto variantu jsou kombinace 3+4 a 4+3 představující počty nejstaršího a nejnovějšího paliva využitého pro variantu provozu LTO +10. Pro kombinaci 4+3 by bylo možné ukládat uvažovanou maximální rychlostí 20 OS/rok a datem ukončení ukládání v roce 2072. Případně pro kombinaci 3+4 rychlostí 14,35 OS/rok s ukončením ukládání v roce 2075. Pro varianty LTO +20 a LTO +30 by při zvolení stejných kombinací nebylo možné v prvních letech provozu úložiště ukládat téměř žádné VJP z důvodu krátké doby chlazení VJP od ukončení provozu elektrárny. Pro tyto varianty je proto zvolena metoda vybírání kombinace OS tak, aby bylo dosaženo co nejrychlejšího plynulého ukládání v úložišti. Pro LTO +20 je navržena roční kapacita 8 OS, pro roky 2065 až 2084 a 7 OS/rok pro období 2085 až 2090. Pro LTO +30 kapacita 6 OS/rok pro období ukládání 2065 až 2103.

Při srovnání s referenčním harmonogramem bylo zjištěno, že je možné jej splnit pouze u metody kombinace starého a nového VJP ve variantě provozu LTO +10 pro dvousměnný i třísměnný provoz úložiště. Z dalších variant je referenční harmonogram splněn pouze u varianty LTO +20 a dvousměnný provoz, který je velmi blízký navržené nejrychlejší variantě. Samotné transporty VJP z Jaderné elektrárny Dukovany do hlubinného úložiště byly s uvážením vybudování skladu VJP v rámci hlubinného úložiště navrženy v počtu 4 transportů ročně, každý s kapacitou 3 OS.

Navržené harmonogramy mohou nalézt uplatnění především jako podklad pro úpravu koncepce hlubinného úložiště, jak v oblasti plánované doby provozu, tak i v oblasti plánované kapacity technologie. Za nejvýznamnější přínos lze považovat zjištění a dokázání, že navrhovaná maximální hodnota zbytkového výkonu ukládacího obalového souboru 655 W je značně omezující a bylo by vhodné provést její ověření a případnou aktualizaci.

# POUŽITÁ LITERATURA


[1] *Jaderná elektrárna Dukovany* [online]. ČEZ, 2018 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html

[2] *Sborník konference Umíme postavit 5. blok v Dukovanech včas?*. Třebíč, 2015. Dostupné také z: http://patyblokdukovany.cz/

[3] Popis a návod k použití programu PAL440_R4. Plzeň, 2014.

[4] Zajištění LTO EDU. Praha, 2012.

[5] *SÚJB* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/jaderna-elektrarna-dukovany/dulezita-rozhodnuti-k-provozu-edu/

[6] MATĚJKA, Karel. *Vyhořelé jaderné palivo*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. Phare. ISBN 80-707-8352-4.

[7] *Uranium-235 thermal fission products yields* [online]. In: . 2010 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ru/b/bc/Uranium-235_thermal_fission_products_yields.png

[8] *Live Chart of Nuclides* [online]. IAEA, 2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html

[9] *Použité jaderné palivo a jeho vlastnosti*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

[10] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Praha, 2003. Dizertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.

[11] HERALTOVÁ, Lenka. *6letý palivový cyklus na JE Dukovany*. Praha, 2015. Dizertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Daneš Burket, Ph.D.

[12] SMETANA, Jan. *Jaderné palivo pro tlakovodní jaderné reaktory*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

[13] GERŽA, Jiří. Konzultace, ústní sdělení. EDU, 2018.

[14] Odborné studie. *Nechceme úložiště* [online]. Praha [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://www.nechcemeuloziste.cz/cs/dokumenty/odborne-studie/

[15] Studie hlubinného úložiště v lokalitě Březový potok - Pačejov. DIAMO, s.p.; EGP Invest, spol. s r.o., 2012.

[16] Studie hlubinného úložiště v lokalitě Hrádek - Rohozná. DIAMO, s.p.; EGP Invest, spol. s r.o., 2012.

[17] BLAHETA, R., MALÍK, J. Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, 2012.

[18] Oubram J., Prachař I., Blažek J., Činka J., Ferjenčík M., Kotnour P., *Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě, II. etapa – Varianty řešení a jejich návrh*, D. Stavební část – podzemí, ÚVJ Rež a.s. 2010

[19] Storage of spent nuclear fuel : specific safety guide. 1. Vienna: IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-115110-0.

[20] HEIKKI RAIKO (ED.), Barbara PASTINA, Tiina JALONEN, Leena NOLVI, Jorma PITKÄNEN a Timo SALONEN. *Canister production line 2012: design production and initial state of the canister*. 2012. ISBN 978-951-6521-971.

[21] Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. Praha: ÚJV ŘEŽ, 2012.

[22] *Nuclear Power in Finland* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx

[23] *Final Disposal* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.posiva.fi/en/final_disposal#.Wv11L38uDIU

[24] *Výzkum a vývoj úložného obalového souboru* [online]. In: . SURAO, 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/domaci-projekty/clanek-373-vyzkum-a-vyvoj-ulozneho-obaloveho-souboru

[25] Hlubinné úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Praha: SÚRAO, 2016.

[26] *Portál provozování dráhy* [online]. SŽDC, 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: http://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=594598

[27] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9.

[28] Technický list 12 nápravového speciálního vozu řady Uaais (Hx) typ 9-714.1 pro přepravu kontejnerů CASTOR 440/84. Vagónka Poprad, 1994.

# PŘÍLOHY

**Elektronické přílohy:**

Příloha 1 – Kompletní navržený harmonogram kampaní, jak byl využit pro výpočet

Příloha 2 – Seznam OS s přiřazenými význačnými parametry
(min. vyhoření, průměrné vyhoření a max. vyhoření PS obsažených v konkrétním OS; rok uvolnění OS k uložení; datum ukončení poslední kampaně u nejnovějšího PS obsaženého v konkrétním OS)

Příloha 3 – Návrh kombinace OS pro nejrychlejší způsob uložení VJP pro variantu LTO +20

Příloha 4 – Návrh kombinace OS pro nejrychlejší způsob uložení VJP pro variantu LTO +30