

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

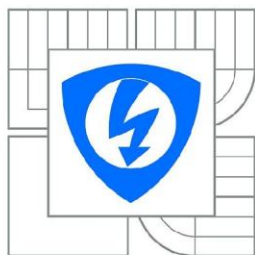
HODNOCENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI TECHNOLOGIÍ PRO NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY POUŽÍVANÝMI V ČR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PAVEL PENZINGER

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Pavel Penzinger

ID: 146926

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení energetické náročnosti technologií pro nakládání s radioaktivními odpady používanými v ČR

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Systém nakládání s radioaktivními odpady (RAO) v ČR - popište základní definice, producenty, způsoby zpracování a úprav, úložiště a metody konečného ukládání odpadů.
2. Technologie pro nakládání s RAO používané v ČR - shromážděte data a detailně popište jednotlivé technologie, které jsou v ČR používány pro jednotlivé druhy nízko a středně aktivních dopadů (pevné, kapalné, plynné).
3. Zhodnocení energetické náročnosti technologií pro zpracování RAO - srovnajte vybrané metody zpracování nízko a středně aktivních RAO používaných v ČR.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího a konzultanta práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

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

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Petr Kovařík, ENVINET, a.s.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

PENZINGER, P. *Hodnocení energetické náročnosti technologií pro nakládání s radioaktivními odpady používanými v ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

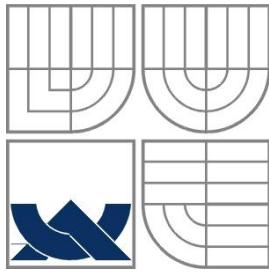
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících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

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce. Mé poděkování patří také mému konzultantovi panu Ing. Petru Kovaříkovi za pomoc a odborné rady při zpracování práce.

V Brně dne

Podpis autora



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Hodnocení energetické náročnosti technologií pro nakládání s radioaktivními odpady používanými v ČR

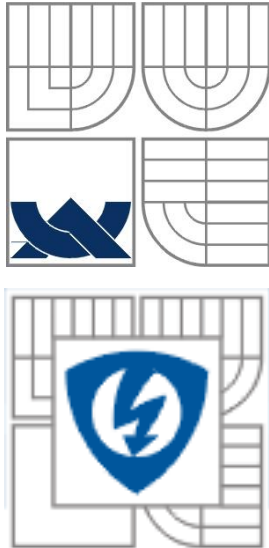
Pavel Penzinger

vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

konzultant: Ing. Petr Kovařík

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

**Evaluation of Power Efficiency
of Radioactive Waste Management
Technologies Used in the Czech Republic**

by

Pavel Penzinger

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Co-supervisor: Ing. Petr Kovařík

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá hodnocením energetické náročnosti technologií pro zpracování radioaktivních odpadů používanými v České republice. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, a to na část teoretickou a část praktickou.

Teoretická část práce se zabývá stručným popisem organizací spojených s radioaktivními odpady působících v České republice, úložišti nízko a středně aktivních odpadů na území České republiky. Dále se zabývá různými druhy dělení radioaktivních odpadů, a to dle legislativy ČR a předpisů Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Je zde také popis jednotlivých a nejvíce využívaných technologií a postupů zpracování radioaktivních odpadů a to nejen technologií využívaných v České republice, ale i ve světě.

Praktická část obsahuje konkrétní hodnocení energetické náročnosti jednotlivých technologií pro zpracování radioaktivních odpadů. Součástí každého hodnocení je také energetická náročnost výroby použitých materiálů a dopravy. Hodnoceny jsou technologie, které jsou využívány stabilně a pro dostatečné množství. Hodnocení energetické náročnosti je bráno od místa vzniku radioaktivního odpadu, což je Elektrárna Dukovany, Elektrárna Temelín a ÚJV Řež, a.s., po místo uložení zpracovaných odpadů úložišti Dukovany pro radioaktivní odpad z jaderných elektráren nebo úložišti Richard pro institucionální jaderný odpad.

KLÍČOVÁ SLOVA: Radioaktivní odpad; energetická náročnost; nakládání s odpadem; bitumenace; cementace; lisování; spalování

ABSTRACT

This thesis deals with the evaluation of power efficiency of technologies for the radioactive waste management used in the Czech Republic. Thesis is divided into two main parts – theoretical part and a practical part.

Theoretical part of the thesis deals with a brief description of the organization connected with radioactive waste operating in the Czech Republic and storage of low and intermediate level waste in the Czech Republic. This is followed by various kinds of radioactive waste division according to Czech legislation and regulations of the International Atomic Energy Agency. There is also a description of the most used technologies and methods of radioactive waste management technology used in the Czech Republic and world.

Practical part contains specific evaluation of energy efficiency of each technology for the radioactive waste management. Each evaluation contains the energy efficiency of production use materials and transport. Evaluates are technologies used consistently and for sufficient quantities. Energy efficiency is describe from the place of origin of radioactive waste, which is the Nuclear power plant Dukovany, Nuclear power plant Temelín and ÚJV Řež, a.s. The end of description is the repository site of radioactive waste Dukovany for radioactive waste from nuclear power plants or disposal site Richard for institutional radioactive waste.

KEY WORDS: Radioactive waste; power efficiency; waste management; bituminization; cementation; pressing; incineration

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	12
2 ORGANIZACE SPOJENÉ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY V ČR	13
2.1 SÚJB	13
2.1.1 SPOLUPRÁCE SÚJB	14
2.2 SÚRAO	15
2.2.1 SPOLUPRÁCE SÚRAO.....	15
2.2.2 FINANCOVÁNÍ	16
2.2.3 EVIDENCE PŮVODCŮ RAO.....	16
2.3 ÚJV ŘEŽ	17
2.3.1 CENTRUM NAKLÁDÁNÍ S RAO	17
3 RADIOAKTIVNÍ ODPADY	18
3.1 TŘÍDĚNÍ RAO PODLE SKUPENSTVÍ.....	18
3.1.1 PEVNÉ	18
3.1.2 KAPALNÉ	18
3.1.3 PLYNNÉ	18
3.2 TŘÍDĚNÍ RAO PODLE PŮVODCE.....	19
3.2.1 RAO Z JADERNÉ ENERGETIKY	19
3.2.2 INSTITUCIONÁLNÍ RAO	19
3.3 TŘÍDĚNÍ RAO PODLE LEGISLATIVY ČR.....	19
3.3.1 PŘECHODNÉ RADIOAKTIVNÍ ODPADY	19
3.3.2 NÍZKO A STŘEDNĚ AKTIVNÍ ODPADY	20
3.3.3 VYSOKO AKTIVNÍ ODPADY	20
3.4 TŘÍDĚNÍ RAO PODLE PŘEDPISŮ MAAE.....	21
4 NEJČASTĚJI SE VYSKYTUJÍCÍ RADIONUKLIDY A JEJICH CHARAKTERISTIKA	23
5 ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ.....	26
5.1 HOSTIM.....	27
5.2 BRATRSTVÍ	27
5.3 RICHARD.....	27
5.4 DUKOVANY	28
6 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ RAO.....	29
6.1 PEVNÉ ODPADY.....	29
6.1.1 NÍZKOTLAKÉ LISOVÁNÍ.....	29
6.1.2 VYSOKOTLAKÉ LISOVÁNÍ	29
6.1.3 SPALOVÁNÍ	29

6.1.4 DEKONTAMINAČNÍ METODY	30
6.1.5 FRAGMENTAČNÍ METODY	31
6.2 KAPALNÉ ODPADY	32
6.2.1 KONCENTRACE ODPAŘOVÁNÍM PŘEBYTEČNÉ VODY	32
6.2.2 FILTRACE	32
6.2.3 CHEMICKÉ METODY ÚPRAVY	32
6.2.4 IONTOVÁ VÝMĚNA	33
6.2.5 CEMENTACE	33
6.2.6 BITUMENACE	33
6.2.7 POLYMERACE	34
6.2.8 VITRIFIKACE	34
6.3 PLYNNÉ ODPADY	35
7 ENERGETICKÁ NÁROČNOST ZPRACOVÁNÍ RAO	36
7.1.1 DOPRAVA	36
7.1.2 SUD (115 L, 200 L, 216 L)	36
7.2 ELEKTRÁRNA DUKOVANY	37
7.2.1 BITUMENACE	37
7.2.2 LISOVÁNÍ	38
7.2.3 FIXACE IONEXOVÝCH FILTRŮ	39
7.2.4 SPALOVÁNÍ	40
7.2.5 DALŠÍ VYUŽÍVANÉ METODY	41
7.3 ELEKTRÁRNA TEMELÍN	42
7.3.1 BITUMENACE	42
7.3.2 LISOVÁNÍ	42
7.3.3 MATRICE SIAL	43
7.3.4 SPALOVÁNÍ	43
7.3.5 DALŠÍ VYUŽÍVANÉ METODY	43
7.4 ÚJV ŘEŽ	44
7.4.1 CEMENTACE	44
7.4.2 LISOVÁNÍ	45
7.4.3 FRAGMENTACE	45
7.4.4 DALŠÍ VYUŽÍVANÉ METODY	46
8 ZÁVĚR	48
POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Grafické znázornění dělení RAO dle poločasu rozpadu a aktivity [8]22

SEZNAM TABULEK

Tab. 7-1 Srovnání energetické náročnosti zpracování RAO v závislosti na zvolené metodě a místě zpracování47

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČR	Česká republika
EDU	Elektrárna Dukovany
ETE	Elektrárna Temelín
HEPA	High Efficiency Particulate Air (filter)
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
NEA	Agentura pro atomovou energii při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
RAO	Radioaktivní odpad
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
VVER	Vodo – vodní energetický reaktor

1 ÚVOD

Radioaktivita je nedílnou součástí přírody a tudíž i světa, ve kterém žijeme. Lidstvo se ve svém pokračujícím rozvoji naučilo využívat přírodu a to co nám dává ve všech oblastech své činnosti, radioaktivity nevyjímaje. Na rozdíl od mnoha dalších přírodních zdrojů, radioaktivní prvky využíváme velmi krátkou dobu, za kterou jsme byli schopni objevit mnoho, ale zdaleka ne vše. Objevili jsme pozitivní účinky ve zdravotnictví a získávání energie, ale i negativní účinky, ať už záměrné nebo náhodné. Člověk poháněn vůlí k životu nebo strachem ze smrti má ve své paměti mnohem více a výrazněji zaznamenány negativní zkušenosti, ať už vlastní nebo jiných lidí a od toho se odvíjí náš názor na radioaktivitu a vše s ní spojené.

Každá lidská činnost je zdrojem odpadu. Při využívání radioaktivních látek je generován odpad, který se od mnohých dalších odpadů výrazně liší svou specifickou vlastností – radioaktivitou. Radioaktivita se projevuje vznikem ionizující záření, což je záření s velkou energií, které je schopné při kontaktu s živými organismy poškodit jejich tkáně. Díky této schopnosti je ionizující záření v dnešní době již všeobecně považováno za karcinogenní. S radioaktivním odpadem je tedy nutné vzhledem k jeho nebezpečnosti pro nás i naše okolí zacházet s obzvlášť velkou opatrností. Z důvodu bezpečnosti je jakékoli nakládání s radioaktivními látkami v České republice velmi dobře střeženo.

Většina objemu radioaktivních látek je nízko a středně aktivních a pro ukládání takovýchto látek v trvalém úložišti bez jakýchkoli úprav by byla potřeba velkých prostor, které v České republice nemáme k dispozici. Z tohoto důvodu je nutné veškerý nízko a středně aktivní odpad před jeho trvalým uložením zpracovat. Zpracování probíhá mnoha metodami a cílem každé metody je znehynění radioaktivních látek a co největší zmenšení jejich objemu. V dnešní době, kdy je kladen největší důraz na ekonomičnost, rychlost a bezpečnost nakládání s radioaktivními odpady se postupně začínají brát v úvahu také ekologické aspekty nakládání s odpady. Z ekologického hlediska se jedná o vypouštění radioaktivních látek do životního prostředí, což je dnes regulováno bezpečnostními předpisy, ale spotřeba energie nebo množství vypuštěných exhalací spojených s procesy nakládání s radioaktivními odpady nejsou dnes běžně sledovány. Cílem této práce je zhodnotit energetickou náročnost technologií a předcházejících procesů pro zpracování radioaktivních odpadů v České republice.

2 ORGANIZACE SPOJENÉ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY V ČR

2.1 SÚJB

Státní úřad pro jadernou bezpečnost je ústředním orgánem státní správy a je přímo podřízen vládě ČR. Hlavním úkolem úřadu je vykonávání dozoru při využívání jaderné energie a zdrojů ionizujícího záření, v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, biologické a chemické obrany. Do působnosti úřadu patří následující (vybrány pouze oblasti významné pro tuto práci) [23]:

- výkon státního dozoru nad jadernou bezpečností, jadernými položkami, fyzickou ochranou jaderných zařízení, radiační ochranou a havarijní připraveností v prostorách jaderného zařízení nebo pracoviště se zdroji ionizujícího záření,
- povolování výkonu činností podle zákona č.18/1997 Sb., k umístování a provozu jaderného zařízení a pracoviště s velmi významnými zdroji ionizujícího záření, nakládání se zdroji ionizujícího záření a radioaktivními odpady, přepravě jaderných materiálů a radionuklidových zářičů,
- schvalování dokumentace, vztahující se k zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, stanovené atomovým zákonem, limitů a podmínek provozu jaderných zařízení, způsobu zajištění fyzické ochrany, havarijních řádů k přepravám jaderných materiálů a vybraných radionuklidových zářičů, vnitřních havarijních plánů jaderných zařízení a pracoviště; se zdroji ionizujícího záření,
- vedení státního systému evidence a kontroly jaderných materiálů, státních systémů evidence držitelů povolení, dovážených a vyvážených vybraných položek, zdrojů ionizujícího záření, evidence ozáření obyvatelstva a pracovníků se zdroji ionizujícího záření,
- odborná spolupráce s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii,
- poskytování údajů o hospodaření s radioaktivními odpady obcím a okresním úřadům na jimi spravovaném území a přiměřených informací o výsledcích činnosti úřadu veřejnosti a vládě ČR.

SÚJB má v kompetenci následující zákony [23]:

- Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon),
- Zákon č. 19/1997 Sb. o některých opatřeních souvisejících se zákazem chemických zbraní,
- Zákon č. 281/2002 Sb. o některých opatřeních souvisejících se zákazem bakteriologických (biologických) a toxických zbraní.

SÚJB ve spojitosti s RAO vydal následující vyhlášky, které jsou klíčovým zdrojem legislativy v oblasti nakládání s RAO [23]:

- Vyhláška č. 317/2002 Sb., o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě).
- Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně.
- Vyhláška č. 499/2005 Sb., kterou se mění vyhláška č. 307/2002 Sb.

Nařízení vlády, jejichž uvedení v praxi má pod dohledem SÚJB [23]:

- Nařízení vlády č. 416/2002 Sb., kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování.
- Nařízení vlády č. 73/2009 Sb., o předávání informací v souvislosti s mezinárodní přepravou radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva.
- Nařízení vlády č. 399/2011 Sb., o poplatcích na odbornou činnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

2.1.1 Spolupráce SÚJB

SÚJB má na starosti mezinárodní spolupráci České republiky s ostatními státy a agenturami. Mezi nejvýznamnější patří bilaterální spolupráce se sousedními zeměmi: Polsko, Rakousko, Slovensko, Spolková republika Německo. S těmito zeměmi probíhá pravidelná výměna informací a bilaterální jednání a schůzky [23].

Nejvýznamnější je spolupráce s MAAE, která je také prioritou SÚJB v oblasti multilaterálních mezinárodních vztahů. SÚJB zjišťuje účast českých zástupců na činnosti poradních orgánů, jednání technických výborů i poradních skupin. Spolupodílí se na vytváření standardů a doporučení v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření [23].

Nejvýznamnější službou MAAE členským států je poskytování služeb nezávislého posuzování různých aspektů souvisejících se zajištěním jaderné bezpečnosti a radiační ochrany. SÚJB na této činnosti spolupracuje účastí pracovníků v kontrolních týmech [23].

Významným pilířem spolupráce je program technické spolupráce v oblasti mírového využívání jaderné energie. SÚJB plní funkci koordinátora pro ČR. Program se dělí na národní část, zvláště pro každou zemi a schvalovanou obvykle v dvouletých cyklech a mezinárodní část, která platí pro určité uskupení zemí a plánováním na čtyři roky [23].

Další významné aktivity MAAE jsou v oblasti podpory výzkumu a vývoje přes tzv. Coordinate Research Projects [23].

2.2 SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů je organizační složka státu. SÚRAO byla zřízena na základě atomového zákona (§ 26 zák. Č. 18/1997 Sb. O mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření) [24].

Činnost SÚRAO je pevně vymezena atomovým zákonem. Mezi nejdůležitější činnosti patří následující [24]:

- zajišťovat přípravu, výstavbu, uvádění do provozu, provoz a uzavření úložišť radioaktivních odpadů a monitorování jejich vlivu na okolí;
- zajišťovat nakládání s radioaktivními odpady;
- zajišťovat úpravu vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva do formy vhodné pro uložení nebo následné využití;
- vést evidenci převzatých radioaktivních odpadů a jejich původců;
- spravovat odvody původců radioaktivních odpadů na jaderný účet;
- vypracovávat návrhy na stanovení odvodů plátců na jaderný účet;
- zajišťovat a koordinovat výzkum a vývoj v oblasti nakládání s radioaktivními odpady;
- kontrolovat rezervy držitelů povolení na vyřazování jejich zařízení z provozu;
- poskytovat služby v oblasti nakládání s radioaktivními odpady;
- nakládat s radioaktivními odpady, které byly dopraveny na území České republiky ze zahraničí a nelze je vrátit;
- zajišťovat prozatímní správu radioaktivních odpadů, které připadly do vlastnictví státu.

Mezi nejpodstatnější práce SÚRAO patří zajišťování provozu všech úložišť nízké a středně aktivních odpadů. Touto činností je SÚRAO pověřena od roku 2000. Dalším neméně důležitým úkolem je příprava hlubinného úložiště vysoko aktivních odpadů a jaderného paliva [24].

Výkonným orgánem SÚRAO je Rada SÚRAO, jejímž hlavním cílem je dohlížení na hospodárnost a účelnost vynakládaných prostředků. Členové Rady jsou jmenováni ministrem průmyslu a obchodu na období pěti let. Mezi členy jsou zástupci státní správy, původců RAO a veřejnosti, kde se jedná především od starosty obcí, v jejichž katastrech leží úložiště RAO [23].

2.2.1 Spolupráce SÚRAO

Nakládání s RAO musí řešit každá země, která využívá zdroje ionizujícího záření, i když tato země nemá na svém území jaderně energetická zařízení. Celý proces nakládání a konečného uložení RAO je velmi složitý a náročný a proto je SÚRAO zapojena do rozsáhlé mezinárodní spolupráce koordinované mezinárodními institucemi.

Nejvýznamnější spolupracující institucí je MAAE (mezinárodní agentura pro atomovou energii, oficiálně IAEA), jejíž mateřskou organizací je OSN. Jedná se o nejvýznamnější světovou instituci v oblasti jaderných technologií. MAAE zařizuje mnoho projektů v oblasti nakládání s RAO a vydává doporučení pro zacházení s RAO [23].

V Evropě je pro spolupráci významná organizace NEA (Agentura pro atomovou energii při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj), která především shromažďuje informace nejen o nakládání s RAO v každé členské zemi. Další funkce organizace jsou podobné jako u MAAE [24].

SÚRAO spolupracuje také se všemi producenty RAO. Správa SÚRAO vede kompletní evidenci všech původců RAO [24].

2.2.2 Financování

SÚRAO jakožto organizační složka státu nemá vlastní majetek, netvoří rezervy, není plátcem daně z příjmu právnických osob a daně z přidané hodnoty a netvoří zisk. Veškerá činnost je financována z tzv. jaderného účtu. Prostředky jsou SÚRAO uvolňovány měsíčně na základě žádosti [24].

Jaderný účet byl zřízen v roce 1997. Je veden u České národní banky a spravován Ministerstvem financí ČR. Jaderný účet je jediným zdrojem pro financování SÚRAO v otázkách nakládání s radioaktivními odpady. Jediným zdrojem pro jaderný účet jsou prostředky získané od původců RAO formou odvodů, výnosy z operací na finančním trhu, příjmy SÚRAO, úroky z účtu a dary. Zvláštní kategorií příjmů jsou dotace, které jsou většinou účelové a jsou tedy směřovány přímo na konkrétní projekt přímo k SÚRAO. Dofinancování akce spojené s dotací probíhá buď z jaderného účtu nebo ze státního rozpočtu formou dotace na spolufinancování [24].

Z jaderných elektráren je odváděno na jaderný účet 50 Kč za každou vyrobenou MWh. Od ostatních původců RAO je vybírán poplatek dle druhu odpadu a aktuálního sazebníku [24].

2.2.3 Evidence původců RAO

Na základě atomového zákona jsou všichni držitelé povolení od SÚJB povinni předávat SÚRAO informace o tvorbě radioaktivních odpadů, a to krátkodobé i dlouhodobé. Všichni držitelé povolení od SÚJB musí vést evidenci zdrojů ionizujícího záření, zajistit správné nakládání se zdroji při provozu a mít stanovený postup likvidace zdroje po jeho dosloužení. Likvidace zdroje probíhá ve spolupráci s SÚRAO. Každý původce RAO uzavírá se SÚRAO smlouvu o převzetí radioaktivních látek a platí na jaderný účet určenou částku [24].

2.3 ÚJV Řež

ÚJV Řež, a.s. je společnost zabývající se primárně vědecko-výzkumnou a inženýrskou činností v oblasti jaderných technologií. Součástí ÚJV Řež jsou různá centra a oddělení s konkrétním zaměřením. Akcionáři ÚJV Řež, a.s. jsou společnosti zabývající se provozem jaderně energetických zařízení (ČEZ, a.s.; Slovenské elektrárne, a.s.), společnost zabývající se výrobou pro jaderný průmysl (Škoda JS a.s.) a malý podíl má i obec Husinec, v jehož katastru ÚJV Řež leží. Hlavní náplní činnosti je poskytování služeb v oblasti jaderně energetických zařízení, což je např.: expertní studie, analýzy a posudky pro provozovatele jaderných elektráren, zajištění podpory při provozu, vývoj a testování nových technologií. Mezi další významné činnosti patří výroba radiofarmak [28].

2.3.1 Centrum nakládání s RAO

Centrum nakládání s RAO pracuje v rámci ÚJV Řež. Centrum zabezpečuje kompletní proces nakládání s RAO od převzetí odpadu po zpracování odpadu do formy vhodné k uložení v úložišti RAO. ÚJV Řež je producentem přibližně 60 % institucionálního RAO vzniklého v ČR. Centrum nakládání s RAO ročně zpracuje přibližně 90 % veškerého institucionálního RAO v ČR [28].

Centrální zpracování RAO má mnoho výhod. Mezi hlavní patří úspora nákladů díky efektivnímu využití technologií, optimalizace naplnění souborů s RAO k trvalému uložení a minimalizace odpadů uvolněných do životního prostředí během procesu zpracování RAO. Veškerý zpracovaný odpad z centra je ukládán do pozinkovaných ocelových 200 l nebo 216 l sudů. V případě pevných odpadů lisovatelných i nelisovatelných, je odpad zpracován do 115 l sudů a takto naplněné menší sudy poté vloženy do 200 l sudů [28].

Při nakládání s RAO je centrum schopno poskytovat služby v následujících oblastech [28]:

- Detekce a identifikace RAO, včetně případu nálezu neznámého nebo opuštěného zdroje ionizujícího záření,
- sběr, třídění a skladování RAO,
- charakterizace RAO a zdrojů ionizujícího záření,
- zpracování a úprava RAO,
- přeprava RAO ke zpracování a k uložení do úložiště.

Mezi významné činnosti centra patří také dekontaminace a vyřazování pracovišť se zdroji ionizujícího záření, mezi které patří především radiochemické laboratoře, zařízení na výrobu radionuklidů. Při provádění likvidace starých ekologických zátěží se uplatňují především procesy dekontaminace. Při vyřazování starých ekologických zátěží se jedná především o technologická zařízení v rámci ÚJV Řež [28].

Centrum je vybaveno mnoha technologiemi pro zpracování RAO. K dispozici jsou následující centra pro zpracování RAO [11], [28]:

- Fragmentační a dekontaminační středisko,
- lisovací centrum,
- odpařovací a zahušťovací centrum,
- cementační linka.

3 RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Radioaktivní odpad je látka, která je svým vlastníkem prohlášena za odpad, nemá žádné další využití a vykazuje vyšší radioaktivitu, než je zákonem stanovená mez. V některých zemích je zákonem stanovená hranice pro RAO nižší nebo vyšší, než v ČR, a zařazení jednotlivých odpadů se může lišit od našeho systému [7].

Jakékoli zacházení s radioaktivními látkami je finančně velmi náročné a je jedním z nejpodstatnějších důvodů pro omezení množství radioaktivních odpadů. Úplné zastavení produkce radioaktivních odpadů není vzhledem k využití ve zdravotnictví, výzkumu, atd. možné. Cenu zpracování a uložení RAO ovlivňuje i celková aktivita a druh odpadu a z tohoto důvodu je RAO tříděn do několika kategorií [7].

Veškerý jaderný odpad vyprodukovaný určitou zemí, musí být také v této zemi uložen. Není tak možné přesunout a uložit RAO v jiné zemi, než která je jeho původcem [2].

Pro klasifikaci látky jako RAO je nutné splnit následující podmínky [23]:

- Aktivita radionuklidů je vyšší, než jsou zprošťovací úrovně dle legislativy,
- jedná o látky dále nevyužitelné,
- vlastník látky ji prohlásí za odpad.

Radioaktivní odpad můžeme dělit dle velkého spektra různorodých kritérií, a tak jsou zde uvedeny pouze ty významné se vztahem k České republice.

3.1 Třídění RAO podle skupenství

Třídění RAO dle skupenství má význam pro výběr metody zpracování a nijak nesouvisí s aktivitou odpadu.

3.1.1 Pevné

Jedná se o různorodé látky, většinou pak o pracovní a ochranné oděvy, náhradní díly, nástroje, součásti technologických celků případně pak kapalné RAO fixované do pevných látek.

3.1.2 Kapalné

Nejčastěji se jedná o ve vodě rozpuštěné soli radioaktivních izotopů, popřípadě jejich ionty nebo nerozpuštěné sloučeniny ve formě drobných částic nebo kalu. Méně často se jedná o organické kapalné látky znečištěné radioaktivními izotopy.

3.1.3 Plynné

Vzhledem ke svým vlastnostem nejnebezpečnější skupenství RAO, a to především díky možnosti rychlého šíření a složitému odizolování od okolí. Nejčastěji se jedná tritium, vzácné plyny a aerosoly radioaktivních izotopů.

3.2 Třídění RAO podle původce

3.2.1 RAO z jaderné energetiky

Jediným producentem RAO z jaderné energetiky v ČR je společnost ČEZ, a.s. resp. Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany. V jaderných elektrárnách vznikají RAO nízko a středně i vysoko aktivní. Za vysoko aktivní odpad se považuje vyhořelé jaderné palivo, které ovšem v ČR nemá přidělen status odpadu. Rozhodnutí, zda-li bude vyhořelé jaderné palivo uloženo jako odpad nebo bude klasifikováno jako surovina k dalšímu přepracování, je možné uskutečnit v horizontu následujících let až desetiletí. Naprostou většinu nízko a středně aktivních RAO tvoří různé předměty z provozních, revizních, údržbových a opravárenských činností, prvky vzniklé aktivací v primárním okruhu a štěpné produkty uniklé z palivových prutů. Nejčastějším materiálem jsou oděvy, papír, suť, ocelové části, sondy, měřicí zařízení a filtry. Nízko a středně aktivní odpad je dle svého charakteru zpracován bitumenací nebo cementací a uložen v úložišti Dukovany. V roce 2013 byla produkce nízko a středně aktivních RAO z jaderných elektráren 317 m³, což představuje 71 % veškerého RAO v ČR [6], [15], [23], [24].

3.2.2 Institucionální RAO

Zdrojem těchto odpadů jsou různé oblasti lidské činnosti, především pak zdravotnictví, výzkum, průmysl a zemědělství. V ČR je hlavním producentem institucionálních RAO ÚJV Řež, a.s., kde se vyprodukuje přibližně 60 % institucionálních RAO. Institucionálního odpadu bylo v roce 2013 vyprodukováno 131 m³. Produkce institucionálního odpadu v roce 2013 byla abnormálně vysoká z důvodu vyřazování staré technologie v ÚJV Řež, a.s. a UJP Praha a.s. [11], [23].

Rozmanitost institucionálních RAO je velká, což negativně ovlivňuje ekonomiku procesu zpracování RAO. Důležitým úkolem při zpracování těchto RAO je shromažďování, třídění a volba správné metody zpracování [11], [28].

3.3 Třídění RAO podle legislativy ČR

Řazení je přesně dáno legislativou ČR, konkrétně vyhláška 307/2002 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Základním cílem je co nejvíce zefektivnit a zlevnit ukládání RAO a zároveň odpad co nejlépe odizolovat od okolí. Každá skupina vyžaduje jiné specifické zacházení a podmínky pro uložení. Třídění se provádí podle fyzikálních a chemických vlastností.

3.3.1 Přechodné radioaktivní odpady

V době vzniku tento radioaktivní odpad vykazuje malou míru radioaktivity, ale dostatečně velkou na to, že znemožňuje nakládat s ním jako s běžným odpadem. Většina radionuklidů v odpadu je krátkým poločasem rozpadu. Základní podmínkou pro klasifikování odpadu jako přechodného je, že po uplynutí doby pěti let poklesne aktivita natolik, že je možné s tímto odpadem nakládat jako s běžným odpadem. Nejčastěji se skladuje ve vymíracích komorách a skladech. Tento druh odpadu se nepočítá do celkového ročního množství vyprodukovaného RAO, jelikož nedochází k jeho ukládání, ale pouze ke skladování. Významnými producenty tohoto typu odpadu jsou zdravotnická zařízení [7], [32], [33].

3.3.2 Nízko a středně aktivní odpady

Objemově se jedná o největší část vyprodukovaných RAO (asi 90 % produkce RAO). Ionizující záření produkované těmito prvky nebývá příliš pronikavé a není tedy nutné tento RAO nijak zvlášť odstiňovat případně chladit. RAO vznikají ve všech skupenstvích a tomu odpovídají i velmi různorodé procesy jejich zpracování. Nejčastější skladba těchto odpadů je následující: ochranné oděvy, nástroje, různorodé obaly a součásti technologických zařízení (konstrukce a stavební suť), povlaky paliva, moderátory. Obecně se tento typ odpadů ukládá do povrchových nebo přípovrchových úložišť [9], [29], [32], [33].

3.3.2.1 Krátkodobý nízko a středně aktivní odpad

Jedná o látky s radionuklidy s poločasem rozpadu do třiceti let a u nichž je omezena hmotnostní aktivita dlouhodobých alfa zářičů v jednotlivém obalovém souboru na 4000 kBq/kg a celkovém odpadu vyprodukovaném za celý rok na 400 kBq/kg [32], [33].

3.3.2.2 Dlouhodobý nízko a středně aktivní odpad

Dlouhodobý odpad je takový odpad, který nespĺňuje podmínku pro krátkodobý nízko a středně aktivní odpad [32], [33].

3.3.3 Vysoko aktivní odpady

Hlavním kritériem pro přiřazení RAO do kategorie vysoko aktivních odpadů je nutnost stínění a odvodu tepla. Z celkové produkce tyto odpady představují pouze asi 1 % odpadu s 99 % radioaktivity. Přibližně z 90 % je pak vysoko aktivní odpad složen z vyhořelého jaderného paliva, pokud není považováno za surovinu. Dalším významným rysem tohoto druhu RAO je obsah velkého množství radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu nad sto tisíc let. Všeobecně se přijímá, že nejnebezpečnější doba je prvních 300 let po vzniku vysoko aktivního RAO. Během této doby zanikne většina krátkodobých radionuklidů, které jsou největším zdrojem tepla a radioaktivita odpadu významně poklesne [2], [29].

Do budoucna se předpokládá, že vyhořelé jaderné palivo nebude považováno za odpad, ale jako surovina pro přepracování. Štěpné produkty odstraněné z jaderného paliva pak budou nejpravděpodobněji vitrifikací znehybněny a poté teprve uloženy do hlubinného úložiště [30].

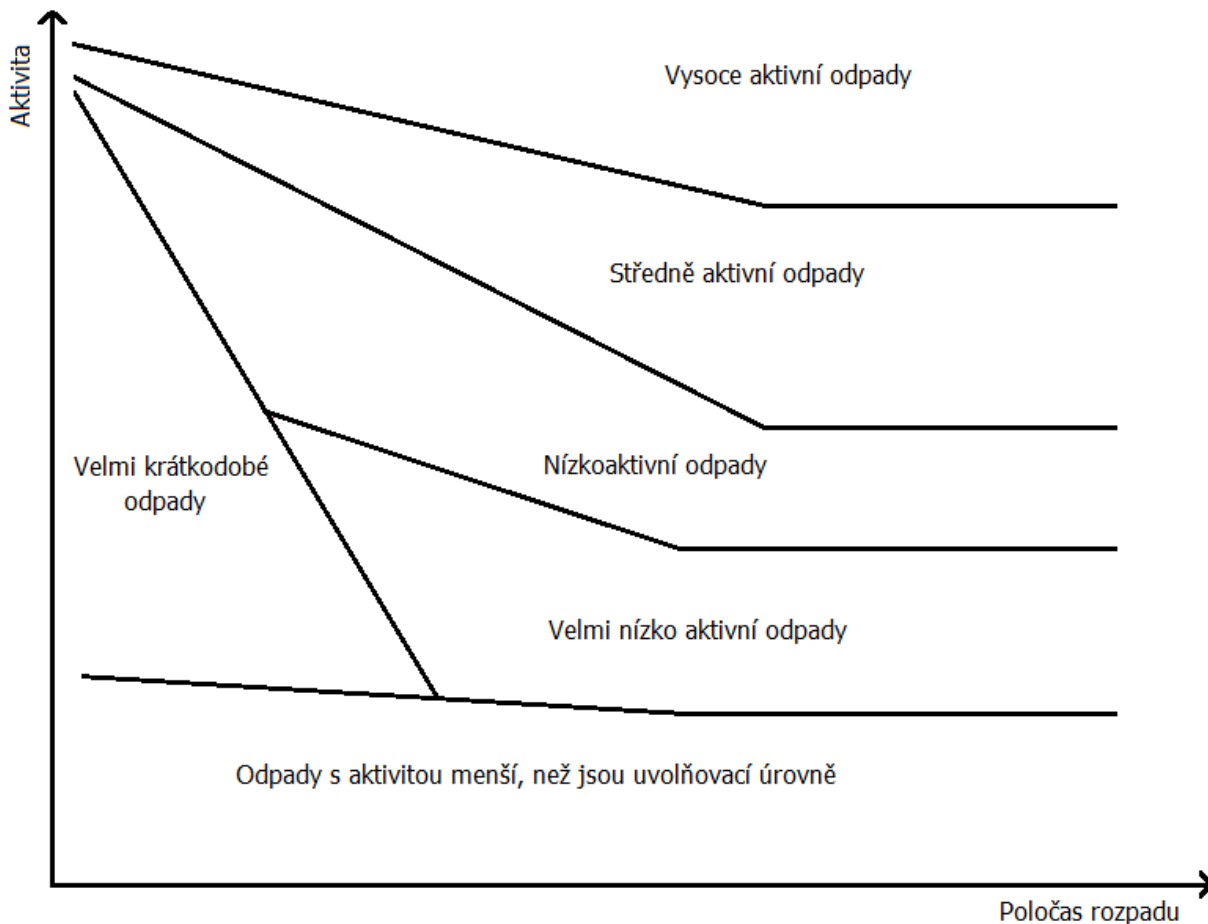
Aktivita více jak 10^{14} Bq/m³ [7].

3.4 Třídění RAO podle předpisů MAAE

Dle dokumentu [7] od MAAE z roku 2009 je radioaktivní odpad dělen do následujících šesti skupin:

- 1. RAO s aktivitou menší, než jsou uvolňovací úrovně**
S těmito odpady je možné zacházet bez omezení jako s jakýmkoli jiným odpadem.
- 2. Velmi krátkodobé odpady**
Obsahují radionuklidy s malým poločasem rozpadu. Doba rozpadu do 100 dní. Tyto odpady se umísťují do vymíracích komor a dále je s nimi zacházeno jako s odpady dle bodu 1. tohoto seznamu. Nejčastěji se jedná o radionuklidy ze zdravotnictví a výzkumu.
- 3. Velmi nízko aktivní odpady**
Nejčastěji se jedná o hlušinu z těžby radioaktivních látek a odpady z jejich zpracování. Nejčastěji se s nimi zachází jako se skládkami, kde je nutné zamezit kontaminaci spodní a povrchové vody.
- 4. Nízko aktivní odpady**
Největší část produkce RAO spadá do této kategorie. Nízkoaktivní RAO obsahuje dlouhodobé radionuklidy, ale v omezené míře. RAO vyžaduje stínění. Maximální hodnota efektivní povrchové dávky je 2 mSv/h.
- 5. Středně aktivní odpady**
Obsahuje větší množství dlouhodobých radionuklidů. Je nutné brát ohled na malý vývin tepla a větší radioaktivitu, především pak alfa zářičů.
- 6. Vysoko aktivní odpady**
Obsah velkého množství radionuklidů s krátkým i dlouhým poločasem rozpadu. Nutné je počítat s velkým vývinem tepla.

Velmi názorné je grafické znázornění rozdělení RAO dle MAAE. Jedná se o grafické znázornění dělení do šesti skupin, jež jsou uvedeny výše.



Obr. 3-1 Grafické znázornění dělení RAO dle poločasu rozpadu a aktivity [7]

Radioaktivní odpad je možné třídit ještě podle dalších kritérií jako je např. obsah radionuklidů. Odlišná třídění jsou ovšem pouze výjimkou a jsou aplikována pouze interně na některých pracovištích [7].

Výše uvedené třídění dle MAAE je celosvětově všeobecně přijímáno a je základem většiny národních předpisů o třídění RAO [30].

4 NEJČASTĚJI SE VYSKYTUJÍCÍ RADIONUKLIDY A JEJICH CHARAKTERISTIKA

Následující seznam nejčastěji se vyskytujících radionuklidů popisuje charakteristické vlastnosti jednotlivých radionuklidů, na které je nutné brát zřetel při zpracování konkrétního typu RAO s obsahem těchto látek. Vlastnosti radionuklidů je nutné brát v potaz nejen při výběru postupu zpracování, ale i při návrhu zařízení sloužících ke zpracování RAO.

^3H – Tritium – Vzniká v plynné formě vlivem ionizujícího záření z běžného vodíku. Poločas rozpadu je 12,32 let, β^- rozpad. Nejčastěji se vyskytuje ve sloučenině s kyslíkem (tritiová voda). Vlastnosti tritiové vody jsou stejné, jako vody normální, nelze ji tedy nijak oddělit. Tritium běžně vzniká vlivem vesmírného záření v atmosféře a vyskytuje se i ve vodním chladivu reaktorů, kde vzniká aktivační reakcí na atomech bóru. Při velké koncentraci se ukládá s dalšími prvky cementací, ale nejčastěji se po dostatečném naředění vypouští tritiová voda do vodních toků. Malé množství zbylého plynného tritia se vypouští do atmosféry. Vzhledem ke vzniku velkého množství tritia v reaktoru, představuje vážné nebezpečí pro životní prostředí [10], [25].

^{14}C – Uhlík – Vzniká v atmosféře vlivem ionizujícího záření z uhlíku a v jaderném reaktoru aktivačními reakcemi z kyslíku a dusíku. Poločas rozpadu je 5715 let. Z chladiwa reaktoru se odstraňuje ve stavu plynném nebo jako aerosol. Vzhledem k velmi malému množství je vypouštěn do atmosféry. Ve větších koncentracích je obvykle přítomen v organických látkách v kapalném nebo pevném stavu, kdy se po zpracování jako RAO ukládá do úložiště [16], [25].

^{18}F – Fluor – Využití nalézá v lékařství – pozitronová tomografie. Poločas rozpadu 109 minut. Vzhledem k velmi krátkému poločasu rozpadu bývá odpad s obsahem fluoru umístěn do vymíracích komor a nádrží, kde je uschován a poté zlikvidován jako běžný odpad. Vyskytuje se jakou součástí různých radiofarmak podávaných pacientům, která jsou nejčastěji rozpustná ve vodě [25].

^{51}Cr – Chrom – Aktivační produkt, který se nachází v primárním okruhu jaderných reaktorů. Jeho soli jsou špatně rozpustné ve vodě. Poločas rozpadu 27,7 dne. Z chladiwa primárního okruhu se odstraňuje filtrací na iontoměničích [2], [25].

^{54}Mn – Mangan – Aktivační produkt vzniklý nejčastěji záchytem rychlého neutronu. Nachází se v primárním okruhu jaderných reaktorů, kde tvoří významnou část jeho aktivity. Nejčastěji tvoří kaly nebo drobné shluky. Poločas rozpadu 312 dnů. Z chladiwa primárního okruhu se odstraňuje filtrací a na iontoměničích [2][25].

^{55}Fe – Železo – Aktivační produkt vzniklý nejčastěji záchytem neutronu. Nachází se v menším množství v primárním okruhu jaderných reaktorů. Jeho soli jsou relativně málo rozpustné ve vodě. Poločas rozpadu 2,73 roku. Z chladiwa primárního okruhu se odstraňuje filtrací a na iontoměničích [2], [25].

⁵⁶Mn – **Mangan** – Aktivační produkt vzniklý nejčastěji záchytem rychlého neutronu. Nachází se v primárním okruhu jaderných reaktorů. Nejčastěji tvoří kaly nebo drobné shluky. Poločas rozpadu 2,6 h. Z chladiva primárního okruhu se odstraňuje filtrací [25].

⁵⁸Co – **Kobalt** – Vzhledem ke svému poločasu rozpadu 70,86 dne. Tvoří největší část aktivity chladiva primárního okruhu. Jedná se velmi častý aktivační produkt. Málo rozpustné ionty jsou zachycovány na iontoměničích [2].

⁵⁹Fe – **Železo** – Aktivační produkt. Nachází se v primárním okruhu jaderných reaktorů. Jeho sloučeniny jsou relativně málo rozpustné ve vodě. Poločas rozpadu 44,5 dne. Z chladiva primárního okruhu se odstraňuje filtrací a na iontoměničích [2], [25].

⁵⁹Ni – **Nikl** – Aktivační produkt, který se nachází v primárním okruhu jaderných reaktorů. Jeho soli jsou dobře rozpustné ve vodě. Poločas rozpadu 76 000 let. Rozpadá se beta plus rozpadem. Z chladiva primárního okruhu se odstraňuje filtrací na iontoměničích [2], [25].

⁶⁰Co – **Kobalt** – Vzhledem ke svému poločasu rozpadu 5,27 roku a intenzivnímu gama záření se jedná o hojně využívaný zdroj záření. Ve zdravotnictví nalézá využití při ozařování nádorů, v průmyslu v defektoskopii a jako prostředek k likvidaci živých organismů např. ve zdravotnictví nebo uměleckých děl [10].

⁶⁵Zn – **Zinek** – Aktivační produkt vznikající záchytem neutronu. Nachází se v primárním okruhu jaderných reaktorů. Poločas rozpadu 244 dnů. Rozpadá se beta plus rozpadem. Z chladiva primárního okruhu se odstraňuje filtrací na iontoměničích. [2], [25].

⁸⁵Kr – **Krypton** – Inertní plyn, vzniká vlivem ionizujícího záření v atmosféře a jako produkt štěpení v jaderných reaktorech. Poločas rozpadu 10,76 let, β^- rozpad. Je málo rozpustný ve vodě. V reaktorech se uvolňuje ve velmi malém množství a je vypouštěn do atmosféry [10].

⁹⁰Sr – **Stroncium** – Produkt štěpení jader uranu a plutonia. Poločas rozpadu 28,8 let, β^- rozpad. Nejčastější využití je při radioterapii v lékařství. V reaktoru je malé množství ve formě solí, které se u nás ukládají bitumenací [10], [25].

¹²⁹I – **Jód** – Poločas rozpadu 15,7 milionu let. Vzniká v jaderných reaktorech při štěpné reakci v množství asi 0,7 % z celkového množství štěpných produktů. Vzhledem ke svým vlastnostem se při uvolnění z palivových souborů zachycuje až na vzduchových filtrech. Představuje velké riziko pro živé organismy, jelikož se jedná o důležitý biogenní prvek [25].

¹³¹I – **Jód** – Poločas rozpadu 8 dní. Představuje asi 3 % ze štěpných produktů. Nachází se v chladivu primárního okruhu a je zachycován uhlíkovými filtry a dále umístován do vymíracích komor. Při zpracování kapalného RAO dochází k odpaření zbytku jódu, který je opět zachycen na uhlíkových filtrech. Využití nalézá ve zdravotnictví při ozařování nádorů, které absorbují jód [25].

¹³³I – **Jód** – Poločas rozpadu 24 hodin. Nachází se v chladivu primárního okruhu a je zachycován na iontoměničích a uhlíkovými filtry. Je umístován do vymíracích komor a následně vypouštěn do ovzduší. Představuje velké riziko v případě havárií jaderných zařízení nebo při výbuchu uranové bomby [25].

¹³⁴Cs – **Cesium** – Poločas rozpadu 2,06 let. Jedná se o štěpný a aktivační produkt nacházející se v primárním okruhu jaderných reaktorů, kde se odstraňuje filtrací na iontoměničích. Riziko představuje při zpracování kapalného RAO na odpadkách, kde dochází k jeho malému odpařování společně s brýdovými párami, které je nutné filtrovat. Vzhledem ke svému krátkému poločasu rozpadu se jedná o velmi nebezpečný radionuklid pro životní prostředí záhy po jaderných haváriích a jaderných testech. V tělech rostlin má podobné vlastnosti jako draslík [30]

¹³⁷Cs – **Cesium** – Poločas rozpadu 30,17 let. Využití nalézá v malé míře ve zdravotnictví, více pak v průmyslové defektoskopii a kalibraci. Představuje jeden z největších zdrojů ozáření z jaderných testů a havárií [30].

²²²Rn – **Radon** – V přírodě se nejčastěji vyskytuje v oblastech s výskytem uranu, thoria a radia. Vzniká i rozpadem radia. Poločas rozpadu 3,8 dne. Radon se používá v lékařství a lázeňství. Jeho stálá přítomnost v okolí člověka, nejčastěji v uzavřených prostorách, kde dochází ke koncentraci radonu, může zvýšit riziko výskytu rakoviny plic [25].

²³⁵U – **Uran** – Poločas rozpadu 703 milionů let. Je nejčastěji využívaným zdrojem energie v jaderných elektrárnách. Vzhledem k malým koncentracím a dlouhému poločasu rozpadu představují větší nebezpečí jeho chemické vlastnosti. Při poškození obalu paliva se nachází malé množství v chladivu primárního okruhu [30].

²³⁸U – **Uran** – Poločas rozpadu 4,48 miliardy let. Tvoří největší část paliva v jaderném reaktoru VVER. V primárním okruhu se vyskytuje pouze minimálně při netěsnosti obalu paliva. Největší nebezpečí představuje jeho toxicita [25].

²³⁹Pu – **Plutonium** – poločas rozpadu 24 110 let. Nachází využití jako palivo pro jaderné reaktory. Vzniká v jaderných reaktorech, u kterých se nachází také v chladivu primárního okruhu. Veškeré sloučeniny i čistý kov jsou velmi toxické [25].

²⁴¹Am – **Americium** – poločas rozpadu 432,6 let. Vyrábí se v jaderných reaktorech. Nachází uplatnění v měřicích přístrojích a detektorech kouře. V lékařství se využívá k léčbě nádorů štítné žlázy [30].

5 ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Úložiště radioaktivních odpadů je v dnešní době jediná možnost, jak zabezpečit námi vyprodukované radioaktivní látky tak, aby nemohli způsobit škodu na životním prostředí. V ČR je správcem všech úložišť stát, respektive pověřená organizace SÚRAO. Veškeré nakládání s RAO v ČR se řídí zákonem č. 18/1997 Sb., tzv. atomovým zákonem. V tomto zákoně a navazujících předpisech jsou přesně specifikovány a upraveny veškeré náležitosti provozu úložiště RAO.

V ČR jsou v provozu tři úložiště nízko a středně aktivních odpadů, jedno úložiště je již uzavřeno a plánuje se výstavba úložiště vysoko aktivních odpadů, což je v našich podmínkách především palivo z jaderných elektráren. V současné době se plánované úložiště nachází ve stádiu výběru lokality [24].

Každé úložiště radioaktivních odpadů musí být dostatečně izolováno od okolního prostředí a to nejen při normálním stavu, ale i pro případ jakékoli nestandardní situace. Jako nestandardní situace lze považovat především různé přírodní katastrofy, mezi kterými je nejpodstatnější zemětřesení. Ostatním přírodním katastrofám se lze z velké části vyhnout výběrem vhodné lokality, ovšem míst, kde se vyskytují jen velmi slabá zemětřesení a mají vhodnou geologickou strukturu, není mnoho. Nutnou podmínkou pro výstavbu úložiště je tedy geologicky stabilní prostředí. Tuto podmínku většinou splňují velké masivy hornin bez puklin v dostatečné vzdálenosti od tektonických zlomů a s malým množstvím půdní vody. Pro úložiště nízko a středně aktivních odpadů nejsou požadavky tak přísné, jako pro úložiště dlouhodobých vysoko aktivních odpadů [2].

Bariéry pro úložiště dělíme do dvou základních skupin a to na bariéry přírodní a bariéry inženýrské. Přírodní bariéry musí splňovat předchozí podmínku a jsou značně závislé na výběru lokality. Mezi nejvhodnější lokality pro povrchová a přípovrchová úložiště pro nízko a středně aktivní odpady patří bývalé opuštěné doly a lomy s nízkým výskytem spodních vod, dále pak oblasti s jílovým podložím a také lokality vhodné pro úložiště vysoko aktivních odpadů. Pro vysoko aktivní odpady je nutné stabilní geologické podloží s historicky doloženou stabilitou, což jsou především žulové a jiné konzistentní masivy a bývalé solné doly [2].

Inženýrská bariéra je obvykle budována vícesložková. Pro nízko a středně aktivní odpady se jedná o izolaci vůči vodě a důležité je především znehybnění odpadu, které se provádí některou z metod popsanou dále a umístěním odpadu do sudů a následným zalitím do betonu. Pro vysoko aktivní odpady je nutné inženýrské bariéry pokud možno vícenásobně zajistit. Inženýrské bariéry jsou v současné době především ve stádiu výzkumu [2].

5.1 Hostim

Úložiště radioaktivních odpadů Hostim – Beroun je nestarší z úložišť RAO v ČR. Nachází se v opuštěném vápencovém lomu Hostim I, zvaném Alkazar, v chráněné krajinné oblasti Český kras. Lom leží u Berounky asi 3 km východně od Berouna. Úložiště bylo v provozu v letech 1959 až 1965. V letech 1991 až 1994 byla provedena inventarizace a kontrola uložených odpadů. Z bezpečnostního hlediska byla vyhodnocena jako nejlepší varianta uzavření úložiště. Úložiště bylo vyplněno betonovou směsí a definitivně uzavřeno v roce 1997. Celkový objem úložiště byl 1690 m³. Uloženy jsou zde nízko a středně aktivní odpady z ÚJV Řež. Dominantními nuklidy po inventarizaci jsou radionuklidy tritium ³H a uhlík ¹⁴C. SÚRAO toto úložiště pravidelně kontroluje [24].

5.2 Bratrství

Úložiště radioaktivních odpadů Bratrství se nachází v bývalém uranovém dole Bratrství v blízkosti Jáchymova. Samotné úložiště se svojí kapacitou 1200 m³ je nejmenší úložiště v ČR a zabírá pouze malou část celého důlního komplexu Bratrství. V provozu je od roku 1974 a naplňování probíhá jen velmi pomalu, což je dáno především možností ukládání pouze radionuklidů, které jsou přírodního původu. Hlavním úkolem SÚRAO při správě úložiště je monitorování jeho vlivu na okolí. Monitorování probíhá pravidelným měřením koncentrace izotopů v důlních vodách a v okolních tocích. Hlavním cílem je měření koncentrace radia ²²²Ra, thoria ²³²Th a koncentrace uranu. Z měření vyplývá, že koncentrace žádného z měřených nuklidů nejsou překračovány [18].

5.3 Richard

Úložiště radioaktivních odpadů Richard se nachází v prostorách bývalého vápencového dolu pod vrcholem Bídnice nedaleko Litoměřic. Historicky se tyto prostory využívaly nejen k těžbě vápence, ale i jako podzemní tovární komplex za druhé světové války. Pro neekonomičnost těžby a vhodným geologickým podmínkám byla část dolu upravena pro úložiště RAO. Nad i pod úložištěm leží vrstva slínovce o mocnosti přibližně 50 m, které úložiště izoluje od okolí. Úložiště je v provozu od roku 1964 a je klasifikováno jako podpovrchové. Celková kapacita k ukládání je 8500 m³. V případě nepřekročení maximálních hodnot uložených radionuklidů se uvažuje o dalším rozšíření ukládací kapacity tohoto úložiště [24].

V úložišti Richard jsou ukládány všechny institucionální radioaktivní odpady ze zdravotnictví, průmyslu, výzkumu a zemědělství z ČR. Jsou zde také skladovány odpady, které mají příliš vysokou aktivitu a nemohou být uloženy. V dnešní době se veškeré odpady ukládají upravené a uložené v 200 l sudech. Ročně do úložiště přibude 100 až 200 sudů s radioaktivním odpadem [20]. V roce 2013 bylo výjimečně uloženo 342 ks sudů, což bylo především z důvodu likvidací starých ekologických zátěží v ÚJV Řež, a.s. [23].

Součástí areálu úložiště Richard je i povrchová část, ve které se nachází mimo jiné i akreditovaná zkušebna obalových souborů a radioaktivních látek zvláštní formy. Tato zkušebna je velmi důležitá, jelikož umožňuje certifikovat obaly pro skladování a transport pro různé druhy materiálů a tím je zaručena velmi vysoká bezpečnost při práci a transportu radioaktivních látek [20].

V letech 2005 až 2007 byl v úložišti zrealizován projekt Phare, jehož cílem bylo ověření způsobu konečného uzavření ukládacích komor a radioaktivními odpady. V rámci tohoto projektu bylo zkontrolováno, znovu zabaleno a trvale uloženo (zabetonováno) 15 000 jednotek nejstaršího odpadu z tohoto úložiště. Uzavřené komory jsou sledovány a celý projekt slouží jako demonstrační projekt k využitým technologiím a způsobu uzavření [20].

5.4 Dukovany

Úložiště radioaktivních odpadů Dukovany se nachází v areálu jaderné Elektrárny Dukovany a je určeno pouze pro nízko a středně aktivní odpady vznikající v jaderné energetice. Úložiště je v majetku státu a jeho správou je pověřena organizace SÚRAO. Svým objemem 55 000 m³ se jedná o kapacitně největší úložiště v ČR. Kapacita úložiště je plánovaná pro odpad z provozu i následné vyřazení obou českých jaderných elektráren. Ročně je v úložišti Dukovany uloženo kolem 1500 ks sudů z obou českých jaderných elektráren. Následná kontrola a hlídání úložiště bude probíhat po dobu 300 až 500 set let po uzavření [24].

Výstavba úložiště probíhala v letech 1987 až 1995, kdy bylo úložiště zprovozněno. Úložiště je koncipováno jako povrchové sestávající se ze 112 železobetonových jímek o rozměrech 5,3 x 5,4 x 17,3 m, s kapacitou 1600 sudů o objemu 200 l. K ukládání odpadů se využívají pouze ocelové, žárově zinkované sudy o objemu 200 l. Jednotlivé jímky jsou od sebe odděleny izolovanými přepážkami. Celé úložiště leží na čtvrtohorních jílových sedimentech, které nepropouštějí vodu a pode dnem je drenážní systém, který zachycuje případnou vodu proniklou přes jednotlivé jímky. Jímky nejsou zapuštěny do země, tudíž nehrozí průnik zemních vod do prostoru úložiště. Drenážní systém je izolován od okolí a má vlastní systém kontroly. S případně kontaminovanou vodou je naloženo jako s odpadní vodou z elektrárny. Jímky jsou dále izolovány bitumenem. Po zaplnění jímky se volný prostor mezi sudy vyplní betonovou směsí a jímka je překryta silnostěnným polyetylenem, který zabrání pronikání srážkových vod do prostor jímky. Po uzavření úložiště se celé úložiště shora zakryje několika izolačními a drenážními vrstvami a překryje zeminou [19].

Ukládání sudů probíhá portálovým jeřábem. U každého uloženého sudu je přesně zaznamenán jeho obsah, dávkový ekvivalent na povrchu sudu, poloha v úložišti a hmotnost. Rozložení sudů v jímce je nutné pro přesné určení rozložení radioaktivity v jímce, aby nedošlo k překročení maximální hodnoty povolené radioaktivity v jednotlivých částech jímky a úložiště. Nad každou jímkou, která se právě zaplňuje, je pojízdná střeška, která zabraňuje vnikání srážkových vod do prostoru jímky [19].

6 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ RAO

6.1 Pevné odpady

Pevné odpady jsou velmi rozličnou skupinou odpadů, co se týče složení, objemu i druhu zářičů. Vzhledem k této rozmanitosti je při zpracování pevných RAO kladen velký důraz na třídění. Samotné třídění není pevně stanovené a vždy závisí na konkrétním zpracovatelském závodě a dostupných technologiích pro úpravu RAO. Níže je uveden výčet celosvětově nejpoužívanějších technologií zpracování pevných RAO.

6.1.1 Nízkotlaké lisování

V ČR je nízkotlaké lisování velmi používanou metodou na obou jaderných elektrárnách a v ÚJV Řež, a.s. Touto metodou lze dosáhnout až pětinasobného zmenšení objemu RAO. Nejběžnější dlahový redukční faktor však bývá v rozmezí od 2 do 4. Jedinou podmínkou pro možnost lisování je, že odpad je lisovatelný a po slisování neuvolní v sobě vázanou kapalinu. Nejvyšší využívaný tlak je 5 MPa. Používají se různé metody lisování: lisování v sudech, lisování v plastických pytlích, paketovací lisování. Výsledný slisovaný odpad je ukládán do 200 l sudů. Alternativa pro více radioaktivní materiály je ukládání do menších 115 l sudů, které jsou poté vloženy do 216 l sudů a zalaty barytovým betonem. Tato druhá metoda se využívá i v ÚJV Řež, kde se barytový beton nahrazuje cementační směsí kapalného RAO [2], [28].

6.1.2 Vysokotlaké lisování

Jedná se podobnou metodu jako nízkotlaké lisování. Výhodou je větší snížení objemu, nevýhodou je větší technologická i finanční náročnost tohoto procesu. Jako vysokotlaké označujeme lisování při tlacích nad 5 MPa. V ČR se vysokotlaké lisování nepoužívá. Pouze v roce 1996 se využíval zapůjčený vysokotlaký lis od společnosti AEA Technology z Velké Británie na lisování RAO v EDU. Takto bylo zpracováno 300 t RAO, který byl zpracován do 800 ks 400 l sudů a 100 ks 200 l sudů. Dále se využívá externího vysokotlakého lisování ve společnosti JAVYS na Slovensku v Jaslovských Bohunicích, kde je využíván vysokotlaký lis také pro lisování popelu ze spalovny RAO společně s parafinem [2], [3].

6.1.3 Spalování

Jedná se o velmi účinnou metodu koncentrace radioaktivních látek z provozů, kde je velké množství málo znečištěných spalitelných odpadů. Spalované RAO jsou především pracovní oděvy a materiál z údržby, kde se vyskytují různé organické kapaliny – oleje, rozpouštědla. Ke spalování dochází za vysokých teplot a přebytků vzduchu. Tyto podmínky spalování umožní likvidaci značného množství nebezpečných neradioaktivních látek, které vznikají při spalování různých plastů. Jedná se především o různé sloučeniny halových prvků. Jako s radioaktivním odpadem je pak naloženo pouze s popílkem a se spalinovými filtry. V ČR se tato spalovna vzhledem k velkým investičním nákladům a malé produkci odpadů nenachází, ovšem odpad z jaderných elektráren je odeslán do zahraničí, kde se spaluje [9], [22].

6.1.4 Dekontaminační metody

Dekontaminační metody jsou využívány nejčastěji společně s metodami fragmentačními. Při dekontaminaci dochází k oddělení látek s radionuklidy od látek bez radionuklidů. Dekontaminace se využívá pouze u povrchově znečištěných látek, které lze některou z metod očistit natolik, že poté mohou být uvolněny jako běžný nekontaminovaný odpad. Lze dosáhnout velkých hodnot redukčního faktoru. Nejčastěji se využívá dekontaminace u kovových materiálů [2].

Mezi nejčastější dekontaminační metody patří následující [2], [4]:

6.1.4.1 Vysokotlaké otryskávání

Při vysokotlakém otryskávání je mechanicky odstraňována povrchová vrstva otryskávaného materiálu. Tloušťka odstraněné vrstvy je závislá na použitém tryskacím médiu. Nejčastěji se využívá obyčejné vody. Méně často pak suchý led, který má ovšem výhodu v tom, že se po otryskání odpaří a tudíž nevzniká velké množství odpadu. Dále se využívá různých abrazivních médií jako je písek nebo ocelové broky, které odstraňují větší vrstvu otryskávaného materiálu [5].

6.1.4.2 Metody broušení a frézování

Broušení se obvykle provádí běžnou úhlovou bruskou nebo jí podobnému zařízení. Lze také využít různých kartáčů, smirkových papírů, atd. Frézování se provádí u povrchů velmi znečištěných nebo nerovných, které nelze dekontaminovat jinou metodou. Frézování je zdoluhavá, finančně i energeticky náročná metoda a je velmi málo využívána [2].

6.1.4.3 Vysávání

Vysávání se používá pouze na málo vázané materiály. Využívají se vysavače s HEPA filtry. Většinou je tato metoda používána pouze jako dodatková metoda k ostatním metodám, kde slouží pro sběr materiálu [4].

6.1.4.4 Ultrazvuková vana

Velmi účinná metoda dekontaminace. Nevýhodou je nutnost upravit dekontaminovaný materiál dle velikosti ultrazvukové vany. Velmi často je lázeň v ultrazvukové vaně chemicky upravená, což ještě zlepšuje účinnost dekontaminace. Metoda patří k energeticky více náročným [4].

6.1.4.5 Chemické a pěnové metody

Mezi chemické metody řadíme velké množství odlišných metod, které jsou založeny na rozpuštění povrchu v kyselém nebo zásaditém prostředí, leptání, chemické fixaci iontů radionuklidů, atd. Pěnové metody využívají fixace látek ulpělých na povrchu kovu detergentem. Pěna se většinou nechá působit delší dobu, po které z ní vznikne gel, který je poté odstraněn a likvidován jako pevný odpad [2], [4].

6.1.4.6 Přetavování

Jedná se velmi energeticky náročnou metodu, která se využívá jen pro velké množství kovového RAO. Metoda spočívá v přetavování kovových ingotů, při čemž dochází ke koncentraci radioaktivních látek na jednom konci ingotu a ve strusce. Samotný kov obsahuje zanedbatelné množství radionuklidů. Nejbližší zařízení se nachází ve Švédsku ve městě Studsvik [22].

6.1.5 Fragmentační metody

6.1.5.1 Řezání

Řezání lze provádět velmi rozličnými metodami. Mezi základní patří řezání ruční úhlovou bruskou, které má nevýhodu ve velkém rozptylu ubroušeného materiálu. Často využívané je řezání pásovou pilou. U složitějších tvarů fragmentovaných zařízení je využíváno řezání kyslík-acetylenovým plamenem, které ovšem způsobuje velké zahřívání řezaného materiálu a tím pádem možnost unikání látek a radionuklidy do ovzduší. Mezi modernější a náročnější metody patří řezání laserem nebo plasmou, které jsou finančně velmi náročné, ale technologická vyspělost těchto zařízení umožňuje obvykle úplné dálkové ovládání řezání [2], [4].

6.1.5.2 Stříhání

Stříhání je nejjednodušší a nejméně náročná fragmentační metoda, která umožňuje fragmentaci především kovových profilů o střížné ploše až několik set cm². Je velmi nenáročná na obsluhu a produkuje minimum odpadu z fragmentovaného materiálu, zde jedná především o různé odpadlé povrchové vrstvy.

6.1.5.3 Drcení

Drcení se uplatňuje u stavební suti velkých rozměrů. Samotné drcení není náročná metoda, využívá se běžně dostupných komerčních produktů. Náročné je ovšem zabezpečit dostatečně výkonnou vzduchotechniku, jelikož při drcení vzniká velké množství prachu v porovnání s ostatními metodami [3].

6.2 Kapaln  odpady

Mezi kapaln  odpady řadíme p edevřím r zn  ve vodě a v kapalných organických látkách rozpustn  soli, chemick  sloučeniny radioaktivních látek. Dalřimi mořnými rozpouřt dly jsou r zn  kyseliny a chemick  sloučeniny, kter  se využívají p edevřím při zpracování jaderneho paliva. Při zpracování kapalných RAO je nutné brát ohled na mořn  unikání radioaktivních látek do ovzduř  a tomu přizpůsobit procesy zpracování. Kapalných odpadů vzniká nejv tř mnořtv , ze vřech odpadů, ale obvykle v nízkých koncentracích (to je dáno využit m kapalin při dekontaminaci a čiřt n ). Cílem kařd  metody zpracování kapalných RAO je znehybnění radionuklidů, tzv. solidifikace [30].

6.2.1 Koncentrace odpařováním přebytečné vody

Jedná se nejrozř ven ř m metodu pro zpracování kapalného RAO do formy vhodn  ke konečnému zpracování. Je velmi jednoduch  a bezpeční. Dosahuje dekontaminačního faktoru ař 10^6 . Vzhledem ke skutečnosti, ře v třina radioaktivních látek rozpuřt n ch ve vodě je ve formě soli nebo sloučenin je mořn  odpařenou a poté zkondenzovanou vodu vypustit po dalřím nařed n  do povrchových vod nebo se zkondenzovan  voda jeřt e čiřt  na ionexových filtrech. V jaderných elektrárnách je zkondenzovan  voda z odparek opět pouřita na proplachování ionexových filtrů nebo pro dopln n  do primárního okruhu. Nejv tř m problémem bývá unik plynneho tritia a sloučenin jodu ve formě plynů. Proto je nutné odparky napojit na vřduchotechniku s filtrací vřduchu. Vzhledem k nutnosti odpařit značnou část vody se jedná o energeticky velmi nároční proces. Vstupní kapaln  RAO do odparek má obvykle solnost jen několik g/l, vřsledn  produkt m v  solnost v rozsahu od 150 g/l ař po 800 g/l u moderních zařizení. Hodnota solnosti je obvykle dána pořadavky následných procesů [3], [16].

6.2.2 Filtrace

Tato metoda se využívá pouze jako pomocn  metoda pro metody chemick  a odpařování. M  velmi mal  dekontaminační faktor a při využití filtrů vzniká mokř  pevn  RAO, kter  je n ročníř  na zpracování. Filtry jsou obvykle regenerovány a využívány vícekrát [16].

6.2.3 Chemick  metody úpravy

Základní chemickou metodou je metoda srážení radioaktivních látek a jejich n sledn  sedimentace. Tyto metody jsou zn m  z úpraven pitné vody a úpraven vody pro chladicí okruhy elektráren. Tato metoda se nejčast ř  pouřiv  u velkých objemů RAO ale její činnost je velmi mal  (mal  dekontaminační faktor). Slouř  obvykle pouze pro odstran n  látek, kter  by mohly pořkodit zařizení odparek [6].

Jako sr řec  činidla se nejčast ř  pouřiv jí hlinit  a řezelit  soli a dále pak i flokulační chemikálie. Při využití obou metod je nutné vyčkat několik hodin ař dn , neř dojde k usazen  vzniklých látek a při vypouřt n  je vhodn  opatřit výpusti filtry [2].

6.2.4 Iontová výměna

Vzhledem k finanční a technologické náročnosti této metody se využívá jen v místech s velkou produkcí RAO jako jsou např. jaderné elektrárny, výrobní a přepracovatelské závody jaderných paliv [2].

Princip této metody vychází z výměny neradioaktivních iontů v ionexu a jejich nahrazením radioaktivními ionty z kapaliny. Použité ionexy jsou přírodní, umělé, organické, anorganické, atd. Ionexy se po nasycení regenerují nebo zpracovávají jako pevný RAO [3].

V praxi se většinou využívají současně různé druhy ionexových filtrů, které zachytávají různé látky. V jaderných elektrárnách v ČR se využívají latexové filtry pro záchyt BO_3^{3+} a anexové filtry pro záchyt korozivních a štěpných produktů. Regulací průtoku přes latexový filtr dochází k regulaci obsahu kyseliny borité v primárním okruhu [2], [3].

6.2.5 Cementace

Cementace je první z metod systematického zpracování RAO. Nenachází uplatnění jen u kapalných RAO, ale i u pevných. Hlavní výhodou je velmi dobrá tvarovatelnost výsledného produktu, jednoduchost a malá finanční náročnost celého procesu zpracování. Metoda vychází ze zpracování RAO do cementové matrice neboli betonu. Celý proces probíhá za normálních teplot a s běžně dostupnými technologiemi [9].

Mezi výhody patří již zmíněná jednoduchost, nehořlavost a fyzická stabilita. Nevýhod je u této metody oproti jiným metodám více a to značné zvětšení objemu odpadu, hydrolytická nestálost a snadná vyluhovatelnost RAO. Z těchto důvodů se cementace využívá jen u nízko aktivních RAO. Cementaci také nelze využít pro všechny RAO. Problémy jsou především s kyselými odpady, jako je např. koncentrát s obsahem kyseliny borité. U kyselých roztoků je nutné tyto roztoky nejprve zneutralizovat vhodnými činidly např. hydroxidem vápenatým [2].

Postup při cementaci již příliš vylepšovat nelze, pouze v oblasti zamezení úniku radioaktivních látek do okolí při zpracování. Vývojem ale prochází cementové směsi a jejich aditiva. Čistý cement se díky svým špatným mechanickým vlastnostem příliš nepoužívá, proto se do něj přidává vysokopecní struska nebo pucolán, což je sopečný popel. Při nahrazení vysokopecní strusky úletovými popílky dochází ke zlepšení odolnosti vůči deformacím způsobených cyklickým namáháním. Za cyklické namáhání se považují změny teplot, navlhčení a opětovné vysoušení. V některých případech lze aditivem nahradit část cementového pojiva a zlepšením vlastností zmenšit výsledný objem odpadu [2], [30].

6.2.6 Bitumenace

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších a nejvyužívanějších metod pro zpracování kapalných RAO. Základem této metody je smíchání koncentrovaných kapalných RAO s bitumenem. Kapalným RAO musí být zbaven co největšího množství vody, která je ve výsledném produktu nežádoucí. Při samotném procesu vlivem teploty bitumenu dochází k odpařování zůstatkové vody a tak se ponechává pouze určitá zbytková voda z důvodu udržení RAO v kapalném stavu. Vzhledem k vysokým teplotám dochází k odpařování nejen vody, ale i různých radioaktivních látek, tudíž je nutné mít celý proces bitumenace napojen na vzduchotechniku s filtrací. Bitumen je směs asfaltů a živic. Výsledná směs RAO a bitumenu se v ČR nalévá do 200 l sudů [2], [9].

Vzhledem k technologické jednoduchosti celého procesu se technologie jako taková příliš nemění, ale vývojem prochází samotný bitumen. Vzhledem k rozličnému složení bitumenu je možné ovlivnit jeho výsledné vlastnosti přidáváním nebo odebráním různých jeho složek. Jako nejproblémovější se jeví složky s nízkou teplotou tavení, což jsou především asfalteny s krátkým uhlíkovým řetězcem. Tyto složky jsou při degradaci bitumenové matrice vylučovány, což není přípustné. Se zdokonalováním bitumenu dochází také k možnosti zvětšení podílu RAO na výsledném produktu, a tak dochází ještě k větší objemové redukci [9], [30].

Mezi hlavní nevýhody bitumenačního zpracování RAO patří samotné vlastnosti výsledného produktu, což je nízká teplota tání v kombinaci se špatnou tepelnou vodivostí a dále pak hořlavost bitumenu. Z těchto důvodů je nutné sledovat bitumenované radionuklidy, aby nedošlo při procesu bitumenace vlivem tepla uvolněného rozpadem radionuklidů k překročení zápalné teploty a k požáru. Toto nebezpečí lze ovlivnit co nejrychlejším zchlazováním produktu nalévaného do sudů, kdy nalévaný produkt je již ve velmi ztuhlém stavu oproti stavu původnímu a dále pak kontrolou teploty čerstvě naplněného sudu [30].

Bitumenace se využívá i v ČR a to v obou jaderných elektrárnách a v ÚJV Řež, a.s.

6.2.7 Polymerace

Polymerace je jedna z nejnovějších metod zpracování kapalných RAO. Velmi rychlý vývoj této metody naznačuje, že v budoucnu bude díky svým výhodám velmi využívána. Mezi hlavní výhody patří velká chemická stabilita, která značně snižuje vyluhovatelnost a velká pevnost. Metoda spočívá v zatavení RAO do polymerů, tzv. umělých hmot. Využívá se především polyester, vinylester a epoxidové pryskyřice. Celý proces polymerace je technologicky i finančně značně náročný, proto tato metoda prozatím není tolik rozšířena. Do budoucna se dá předpokládat, že s růstem využití metody budou klesat náklady [2], [6].

6.2.8 Vitřifikace

Vitřifikace je technologicky velmi složitá a finančně náročná metoda zpracování RAO. Z těchto důvodů se využívá výhradně pro vysoko aktivní a vysoce koncentrovaný RAO. Princip této metody spočívá v zatavení RAO do speciálních skel, která jsou odolná vůči radioaktivitě a vyšším teplotám. Nejčastěji používanými druhy skel jsou křemíková, bóro-křemičitanová a fosfátosilikátová. Skla se musí zahřát na teplotu tavení, což je 900 °C až 1200 °C následně jsou smíchána s RAO a stáčena do připravené matrice, kde je výsledný produkt zchlazen. Hlavními výhodami tohoto zpracování je dobrý odvod tepla, malá vyluhovatelnost a dobré mechanické vlastnosti. Velmi často je ještě výsledný produkt obalen další vrstvou skla nebo vrstvou kovu, který tvoří další vrstvu proti vyluhování a zlepšuje odvod tepla [31].

Nejbližší vitřifikační linka je k dispozici u společnosti JAVYS na Slovensku v Jaslovských Bohunicích, kde slouží k vitřifikaci RAO z vyřazovaných bloků jaderné elektrárny [3].

6.3 Plynné odpady

Jako radioaktivní plynné odpady se označuje tritium, uhlík, halogenidy, vzácné plyny a aerosoly těžkých prvků [16].

Technologie pro nakládání s plynnými odpady nejsou příliš vyvinuté a to především z důvodů malého množství odpadu, velmi malé aktivity plynných radionuklidů a dostupnými velmi účinnými filtračními technologiemi pro odstranění radioaktivních látek ze vzduchu [30].

Vzhledem ke krátkým poločasům rozpadu některých plynných radionuklidů je vhodné využívání vymíracích komor, ve kterých jsou radioaktivní plyny zadrženy na dobu několika dnů a poté naředěny a řízeně vypuštěny do ovzduší [6].

Základní technologií pro nevypouštěné radioaktivní plyny je užití podtlakové vzduchotechniky se speciálními filtry v následujícím pořadí: hrubé předfiltry, HEPA filtry se schopností záchytu až 99,9 % pevných látek a jako poslední dřevouhelné filtry. V závislosti na typu provozu lze některé složky filtrace vypustit, nebo pozměnit pořadí [16].

S filtry je dále nakládáno jako s pevným odpadem. HEPA filtry jsou lisovatelné. Aktivní uhlí lisovat nelze, jelikož by při lisování došlo k úniku vázaných plynů [30].

7 ENERGETICKÁ NÁROČNOST ZPRACOVÁNÍ RAO

Energetická náročnost zpracování RAO je velmi odlišná a značně závislá na formě odpadu, který do procesu zpracování vstupuje. Pro přehlednost hodnocení je vždy uvažováno zpracování 1 m³ již vyříděného radioaktivního odpadu, u kterého je popsán složení a další významné parametry.

Většina dále popisovaných procesů mají některé společné procesy, jako je např. doprava. Pro jednoduchost a přehlednost jsou tyto společné procesy uvedeny níže.

7.1.1 Doprava

Pro dopravu RAO z obou českých jaderných elektráren se využívá služeb společnosti DMS s.r.o. Tato společnost využívá pro dopravu tahač MAN 18.440 TGA (TGX) s návěsem uzpůsobeným pro přepravu kontejneru s 10 t RAO do spalovny ve Studsviku nebo návěsu pro 60 ks 200 l sudů s RAO [8].

ÚJV Řež využívá pro dopravu RAO do úložiště Richard služeb společnosti SAND s.r.o., která používá vozidlo Renault Midlum 270 s kapacitou 25 až 30 sudů [4], [21].

Dle [12] je předepsaná spotřeba naloženého tahače 18.440 TGA (TGX) 30 l motorové nafty na 100 km. Při uvažování energie 44,8 MJ obsažené v 1 l motorové nafty [27], vychází měrná spotřeba energie na ujetý kilometr naloženého tahače na 13,44 MJ.

Dle [17] je předepsaná spotřeba nákladního automobilu Renault Midlum 270 v rozmezí od 18 l/100 km pro prázdný automobil do 24 l/100 km pro plně naložený. Z daných hodnot vychází měrná spotřeba nákladního automobilu 8,06 MJ/km respektive 10,75 MJ/km.

Pro manipulaci v rámci areálu zpracovatele RAO nebo v úložišti používají vysokozdvizné vozíky. Vzhledem k velkému množství rozličných zařízení, byl zvolen vysokozdvizný vozík s nosností 1,5 t, hodinovou spotřebou 3 l motorové nafty a průměrnou dopravní rychlostí 15 km/h. Z těchto hodnot byla vypočtena spotřeba energie na 2,24 MJ/min, alternativně 0,90 MJ/100 m. Spotřebu energie manipulačního jeřábu na úložišti bude uvažována 0,5 MJ/sud [3].

7.1.2 Sud (115 l, 200 l, 216 l)

Všechny tři typy sudů jsou vyráběny stejnými postupy z pozinkovaného plechu 100g/m². Výrobce je společnost MEVA a.s.

Jako vstupní hodnoty pro výrobu sudů jsou brány následující data [14]:

- Energetická náročnost výroby pozinkovaného plechu je 35 MJ/kg
- Tváření, svařování a další úpravy ve společnosti MEVA a.s. je přibližně 30 MJ/sud až 100 MJ/sud

Pro 115 l sud o hmotnosti 9 kg je energetická náročnost přibližně 345 MJ. Pro 200 l sud 760 MJ a pro 216 l sud 840 MJ.

Nutné je započítat dopravu vyrobených sudů do jednotlivých míst zpracování RAO. Dopravu uvažujeme kamionem po 128 ks sudů pro EDU a ETE a nákladním autem do ÚJV Řež po 20 ks 216 l sudů a 20 ks 115 l sudů. Pro EDU se jedná o vzdálenost 250 km, což odpovídá energii 26,25 MJ/sud, pro ETE vzdálenost 180 km a energie 18,9 MJ/sud a pro ÚJV Řež vzdálenost 45 km, což odpovídá energii 21,16 MJ/sud (není rozlišováno mezi malým a velkým sudem, doprava uvažována tam i zpět – bez vytěžení nákladního automobilu).

7.2 Elektrárna Dukovany

Radioaktivní odpady vznikající při provozu jaderné elektrárny jsou charakteristické a specifické pro každý typ použité technologie. Jaderný reaktor typu VVER-440 (213) je charakteristický vznikem velkého množství radioaktivní vody (v porovnání s reaktorem typu VVER-1000). Větší produkce radioaktivní vody je způsobena větším počtem ucpávek na primárním okruhu, vznikem většího množství korozivních produktů v primárním okruhu a větším množstvím využívané kyseliny borité [2].

7.2.1 Bitumenace

Bitumenace patří k nejvíce využívaným metodám zpracování RAO v EDU. Ročně je takto zpracováno přibližně 90 % původních neupravených RAO [3].

Na bitumenační lince se zpracovává koncentrovaný RAO z odparek o solnosti 100 g/l až 200 g/l, kde se smíchá s bitumenem a po odpaření zbylé vody je výsledná směs s přibližně 40% obsahem RAO nalévána do sudů o objemu 200 l [3].

Jako výchozí je brán 1 m³ RAO (vodného koncentrátu) z odparek o solnosti 200 g/l, což představuje 200 kg odparku vázaného v bitumenové matici. Tento RAO byl vybrán z důvodu velkého rozptylu vstupních parametrů vody pro odparky, kde se pohybuje solnost od 1 g/l až do 30 g/l v závislosti na původu vody. Energetická náročnost zpracování 1 l vody na odparkách se pohybuje od 4 MJ pro solnost 1 g/l po 6 MJ pro solnost 30 g/l [4].

Na bitumenační lince se využívá bitumen od společnosti UNIPETROL, a.s., který se vyrábí v Pardubickém Paramu. Na výrobu bitumenu se využívá asfaltová živice vyráběná v ČR z ropy ruského původu. Jako energetický ekvivalent je brána hodnota 41,38 MJ/l, což představuje spalné teplo ropy z ruských nalezišť. Pro ruskou ropu je energetická náročnost těžby v rozsahu od 5 % do 20 % vytěženého energetického ekvivalentu, jako průměr uvažujeme 10 %. Pro přepravu z nalezišť v oblasti centrálního Ruska je využíván systém ropovodů, kde nejdelší trasu představuje ropovod Družba. Energetická náročnost dopravy ropovodem z nalezišť do rafinerie je dle [13] uvažována 2 % přepravovaného energetického ekvivalentu. Energetická náročnost rafinace ropy představuje přibližně 13 % energetického ekvivalentu vstupní suroviny. Tato hodnota je brána pro celé spektrum produktů rafinace. Bohužel není možné stanovit přesnou hodnotu energetické náročnosti výroby jednoho produktu, jelikož je při rafinaci získáváno více produktů současně. Energetická náročnost zpracování asfaltové živice na bitumen s požadovanými vlastnostmi představuje spotřebu energie rovnu přibližně 2 % energetického ekvivalentu vstupní suroviny. Z daných hodnot vyplývá energetická náročnost výroby bitumenu 27 % energetického ekvivalentu, neboli 11,17 MJ/l [27].

Pro přepravu bitumenu do EDU je uvažován stejný tahač, jako pro ostatní typy přepravy s kapacitou 15 m³ bitumenu. Délka trasy z Parama do EDU je přibližně 130 km a je uvažována cesta tam i zpět. Energetická náročnost přepravy poté bude 0,23 MJ/l bitumenu.

Bitumenační linka spotřebuje na zaplnění 200 l sudu bitumenovou matricí 260 kWh elektrické energie a 9,3 GJ topné páry. Nutné je započítat energii nutnou pro skladování bitumenu ve vyhřívaných zásobnících, což je 93 GJ/rok pro uvažovanou produkci 1000 ks sudů ročně. Výsledná energetická náročnost skladování bitumenu je 93 MJ/sud [3].

Jeden sud průměrně představuje 84 kg vázaných RAO a 114 l bitumenu (uvažuje se plnění 190 l/sud až 197 l/sud) [3].

Pro transport na úložiště je v rámci areálu EDU využíván vysokozdvizný vozík, případně malý nákladní automobil. Vzdálenost prostor pro zpracování RAO od úložiště je přibližně 1 km, což při uvažované přepravě 2 ks sudů představuje spotřebu energie 10 MJ/sud.

Z výše uvedených dat vyplývá, že na zpracování 1 m³ výchozího RAO připadá vytvoření 2,38 ks 200 l sudů a tomu odpovídající následující spotřeba energie:

- Výroba a transport bitumenu 3 093,1 MJ
- Skladování bitumenu 221,3 MJ
- Výroba a doprava sudů 1 871,3 MJ
- Bitumenace 24 361,7 MJ
- Doprava na úložiště 23,8 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ kapalného vodného RAO o solnosti 200 g/l je 29 571 MJ. Případně také 12 425 MJ na jeden 200 l sud zpracovaného RAO.

7.2.2 Lisování

V EDU se využívají tři druhy lisů, a to lis paketovací, lis pro lisování polyetylenových pytlů a lisování v sudu. Lisování v sudu patří mezi nejčastěji využívané. Lisování se provádí pouze u látek, které není možné nebo ekonomicky výhodné zaslat do spalovny [3].

Jako výchozí 1 m³ je zvolen směsný odpad skládající se z mokrých i suchých hader, součástí ohraného oděvu, stavebního materiálu a izolace, elektroodpadu a drobného montážního materiálu. Redukční faktor 2 až 4, střední hodnota redukčního faktoru je brána 3. Z daných hodnot je dán vznik 1,67 ks sudu na 1 m³ výchozího odpadu [3], [4].

Parametry lisu PL 12-A01 pro lisování v sudu [3]:

- Lisovací síla 120 kN
- Měrný lisovací tlak 0,5 MPa
- Výkon el. motoru 4 kW

Lisování v sudu se provádí přímo ve 200 l sudu, a to tak, že se sud naplní odpadem a vloží se do lisu. Po slisování je na sud nasazen nástavec a opět se sud doplní, ale tentokrát i s nástavcem a vloží do lisu. Tento postup se obvykle opakuje třikrát až čtyřikrát. Doba zpracování jednoho sudu je obvykle 2 hodiny, přičemž doba provozu samotného lisu je 1 hodina [3].

Energetická náročnost zpracování:

- Lisování 24,0 MJ
- Výroba a doprava sudů 1 309,1 MJ
- Doprava na úložiště 16,7 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ pevného lisovatelného RAO je 1 349,8 MJ, což odpovídá energetické náročnosti 808,3 MJ/sud.

Energetická náročnost technologie lisování je velmi malá. Zde ovšem nebyla započítána především energetická náročnost vzduchotechnického systému, který je bohužel společný pro více technologií a není možné stanovit jeho podíl pouze pro oblast lisování. Dále také není v kontinuálním provozu a počet hodin provozu jednotlivých součástí není sledován [3].

7.2.3 Fixace ionexových filtrů

Pro fixaci ionexových filtrů se využívá matrice SIAL. Fixace do matrice SIAL je prováděna externí společností AMEC Nuclear Czech Republic, a.s. [3].

Pro fixaci do matrice SIAL jsou uvažovány následující parametry na 1 m³ [5]:

- Bezvodé ionexové filtry o sypné hmotnosti 845 kg/m³
- Jeden 200 l sud průměrně obsahuje 113 l ionexových filtrů a 175 kg SIAL (40% objem RAO)

Matrice SIAL se skládá z anorganických látek na bázi oxidu křemičitého a oxidu hlinitého aktivovaných v zásaditém prostředí. Z důvodu velké energetické náročnosti těžby a zpracování výše uvedených oxidů a náročnosti výroby používaného hydroxidu sodného je energetická náročnost výroby 1 kg SIAL matrice v rozmezí 4 000 až 5 000 MJ/t. Zvolena průměrná hodnota 4,5 MJ/kg. Energetická náročnost dopravy matrice SIAL do místa zpracování RAO nebude součástí hodnocení, jelikož výrobce nepřepравuje tuto matici z jednoho skladu, ale dle možností dodavatelů [5].

K zapracování RAO do matrice se využívá míchací zařízení s příkonem 2,2 kW a dobou míchání jednoho sudu 2 hodiny, což odpovídá energetické spotřebě 15,9 MJ/sud. Dále se využívá různých metod transportu ionexových filtrů, kde se uvažuje spotřeba energie 2 MJ/sud [5].

Z daných hodnot je dán vznik 8,85 ks sudu na 1 m³ ionexových filtrů.

Energetická náročnost zpracování ionexových filtrů:

- | | |
|-------------------------|------------|
| • SIAL matrice | 6 969,4 MJ |
| • Výroba a doprava sudů | 6 958,3 MJ |
| • Zpracování do matrice | 158,4 MJ |
| • Doprava na úložiště | 163,7 MJ |

Energetická náročnost pro zpracování 1 m³ ionexových filtrů je 14 250 MJ, alternativně 1 610 MJ/sud.

7.2.4 Spalování

Vytříděný spalitelný odpad je převážně v kontejnerech ke spalování do spalovny RAO společnosti Studsvik Nuclear AB ve Švédsku. Hmotnost RAO během jedné přepravy je přibližně 10 t.

Spalitelný RAO má následující parametry požadované spalovnou [22]:

- Balení v polyethylenových pytlích o max. objemu 125 l a max. váze 15 kg
- Průměrná objemová hustota 200 kg/m^3
- Obsah PVC do 5 % hmotnosti
- Obsah gumy do 5 % hmotnosti
- Bez radioaktivního uhlíku, volných kapalin, toxických látek

Při spalování v této spalovně dochází k průměrné redukci objemu o 97 % (redukční faktor 33) a k průměrné redukci hmotnosti o 92 %. Po spálení je možné popel upravit různými metodami, dle přání zákazníků. Vzhledem k malému množství odpadu po spálení, nedochází k návratu popela po každém spálení, ale pouze jednou za čas dle smlouvy se zákazníkem. Nejvýše však do 2 roků od přijetí odpadu [22].

Parametry spalovny ve Studsviku:

- Kapacita spalovny 250 kg/h
- Přídavné palivo zemní plyn, průměrně $350 \text{ m}^3/\text{h}$
- Využití odpadního tepla (1,2 MW)
- Teplota v 1. spalovací komoře $800\text{--}900^\circ\text{C}$
- Teplota ve 2. spalovací komoře $800\text{--}975^\circ\text{C}$
- Filtrace HEPA filtry a aktivní uhlí
- Spotřeba el. energie 600 kW

Jako výchozí 1 m^3 RAO je brán odpad dle požadavků spalovny a redukční faktor 33. Za daných parametrů vznikne 30 l popela o hmotnosti 16 kg, což odpovídá 0,15 sudu o objemu 200 l. Dle parametrů spalovny je měrná spotřeba energie na 1 kg vstupního RAO přibližně 15,45 MJ.

Při spalování RAO z ČR je významná spotřeba energie pro dopravu RAO do spalovny. Trasa dopravy není stálá, ale závisí na aktuálních podmínkách dopravy trajektem. Standardní trasy jsou následující: EDU–Rostock–Trelleborg–Studsvik (1554 km silnice, 46 km trajekt) nebo EDU–Rostock–Gedser–Studsvik (1400 km silnice, 150 km trajekt) [8]. Ve výpočtech budeme dále uvažovat pouze první variantu trasy, čím ovšem nevznikne příliš velká odchylka od případné druhé trasy.

Na cestě se využívá trajektů společnosti TT-Line, konkrétně byl vybrán trajekt Huckleberry Finn. Kapacita trajektu je 6254 tdw, kapacita pro kamiony 142 míst, rychlost 28 km/h , spotřeba motorové nafty 1150 l/h při plném zatížení a rychlosti [26]. Z daných hodnot je spotřeba na dopravu kamionu téměř shodná s vlastní spotřebou kamionu a to bude také při výpočtech uvažováno. Takto vysoká spotřeba je dána krátkou trasou a velkou spotřebou při manévrování a také využíváním energie pro potřeby pasažérů.

Cesta kamionu je brána jako jednosměrná s využitím vytěžení na zpáteční cestě. Pro přepravu 10 t RAO je pak měrná spotřeba energie pro dopravu 1 kg RAO 2,15 MJ.

Při úvaze, že na 7 přeprav RAO ke spálení připadá jedna doprava popelu do úložiště Dukovany, lze uvažovat spotřebu energie 0,31 MJ/kg výchozího RAO.

Dále neuvažujeme dopravu sudů, jelikož sudy jsou dodávány společností Studsvik Nuclear AB, ale předpokládáme stejnou energetickou náročnost výroby sudů.

Energetická náročnost procesu spalování:

- Spalování 3 090 MJ
- Výroba sudů 114 MJ
- Doprava RAO 430 MJ
- Doprava popelu 62 MJ
- Manipulace v EDU 3 MJ

Energetická náročnost pro zpracování 1 m³ pevného spalitelného odpadu je 3 699 MJ, alternativně 24 660 MJ/sud.

7.2.5 Další využívané metody

Mezi další využívané metody pro zpracování RAO v EDU řadíme různé metody dekontaminace. Většina těchto metod je využívána jako služba externí společnosti a to ve velmi malém rozsahu. Ročně se jedná řádově o jednotky 200 l sudů se zpracovaným odpadem. Z důvodu velmi malého množství a různorodosti metod zpracování nebyly tyto metody hodnoceny [3].

Dále se využívá také metod fragmentace. Z těchto metod je využíváno především řezání úhlovou bruskou a kyslík – acetylenovým plamenem. Takto zpracovávané odpady jsou různorodé a s rozličnou časovou náročností. Energetická náročnost samotných metod je téměř zanedbatelná v porovnání s energetickou náročností vzduchotechniky v místě zpracování. Fragmentovaný RAO je nejčastěji vhodně poskládán a vložen do sudů, alternativou pro malé množství je vložení do sudů, do kterých se následně nalévá bitumenovaný RAO [3].

Pro úpravu RAO jsou také využívány zařízení, jako je páračka kabelů a drtič. Tato zařízení ovšem nejsou využívána stabilně a jejich spotřeba závisí na druhu zpracovávaného odpadu. Dále zde platí stejné pravidlo jako u fragmentace, že energetická náročnost vzduchotechniky je násobně větší, než samotné technologie zpracování RAO [3].

Plynné radioaktivní odpady jsou řízeně vypouštěny do atmosféry přes soustavu vzduchotechnických filtrů, které se skládají z HEPA filtrů a filtrů a aktivním uhlím. S HEPA filtry je nakládáno jako s pevným lisovatelným odpadem a s aktivním uhlím jako pevným nelisovatelným odpadem (je využívána matrice SIAL) [3], [6].

7.3 Elektrárna Temelín

V ETE jsou využívány stejné postupy zpracování RAO jako na EDU a z toho důvodu budou využívána výpočty energetické náročnosti z EDU. Některé využívané technologie jsou ovšem jiné nebo s jinými parametry a tyto rozdíly je nutné reflektovat. Dále pak navyšuje energetickou spotřebu nutnost převážet zpracovaný RAO do úložiště v Dukovanech, což zvyšuje energetickou náročnost procesů nakládání s RAO na ETE. Výchozí odpady budou uvažovány ve stejném složení a objemu jako na EDU a uvedeny jsou pouze odlišnosti od zpracování na EDU, v ostatním se předpokládají stejné hodnoty jako na EDU.

7.3.1 Bitumenace

Energetická náročnost zpracování 1 l vody na odparkách se pohybuje od 3,5 MJ pro solnost 1g/l po 5 MJ pro solnost 30 g/l. Odparky na ETE mají tedy větší efektivitu, než na EDU, což je dáno modernější technologií [4].

Pro přepravu bitumenu do ETE je uvažován stejný tahač, jako pro ostatní typy přepravy s kapacitou 15 m³ bitumenu. Délka trasy z Parama do ETE je přibližně 240 km a je uvažována cesta tam i zpět. Energetická náročnost přepravy poté bude 0,43 MJ/l bitumenu.

Bitumenační linka spotřebuje na zaplnění 200 l sudu bitumenovou maticí 295 kWh elektrické energie a 8,2 GJ topné páry [4].

Pro nakládku pro transport sudů na úložiště je v rámci areálu ETE využíván vysokozdvizný vozík. Vzdálenost prostor pro zpracování RAO od nakládky je 100 m, doba naložení bez cesty 1 min, což při uvažované přepravě 2 ks sudů představuje spotřebu energie 0,7 MJ/sud.

Doprava do úložiště Dukovany je bráno 165 km, což odpovídá energetické náročnosti 35,9 MJ/sud

Z výše uvedených dat vyplývá, že na zpracování 1 m³ výchozího RAO připadá vytvoření 2,38 ks 200 l sudů a tomu odpovídající následující spotřeba energie:

- Výroba a transport bitumenu 3 147,3 MJ
- Skladování bitumenu 221,3 MJ
- Výroba a doprava sudů 1 853,9 MJ
- Bitumenace 22 043,6 MJ
- Naložení pro transport 1,7 MJ
- Transport na EDU 85,4 MJ
- Doprava na úložiště v EDU 23,8 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ kapalného vodného RAO o solnosti 200 g/l je 27 377 MJ. Případně také 11 503 MJ na jeden 200 l sud zpracovaného RAO.

7.3.2 Lisování

Postupy lisování na ETE jsou shodné s postupy na EDU, jen s využitím jiných zařízení.

Parametry lisu PS 130 pro lisování v sudu [4], [3]:

- Lisovací síla až 130 kN
- Měrný lisovací tlak 0,5 MPa
- Výkon el. motoru 5 kW

Energetická náročnost zpracování:

- Lisování 29,9 MJ
- Výroba a doprava sudů 1 297,7 MJ
- Naložení pro transport 1,2 MJ
- Doprava na EDU 59,6 MJ
- Doprava na úložiště v EDU 16,7 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ pevného lisovatelného RAO je 1 405,1 MJ, což odpovídá energetické náročnosti 846,4 MJ/sud.

7.3.3 Matrice SIAL

Pro fixaci ionexových filtrů se využívá matrice SIAL. Fixace do matrice SIAL je prováděna externí společností AMEC Nuclear Czech Republic, a.s. Dříve byla fixace do matrice SIAL prováděna společností ALLDeco, s.r.o. [5].

Energetická náročnost zpracování ionexových filtrů:

- SIAL matrice 6 969,4 MJ
- Výroba a doprava sudů 6 893,3 MJ
- Zpracování do matrice 158,4 MJ
- Naložení pro transport 6,2 MJ
- Doprava na EDU 317,7 MJ
- Doprava na úložiště v EDU 163,7 MJ

Energetická náročnost pro zpracování 1 m³ ionexových filtrů je 14 509 MJ, alternativně 1 639 MJ/sud.

7.3.4 Spalování

Proces spalování je naprosto totožný jako u EDU, pouze trasa dopravy je kratší o 70 km.

Energetická náročnost procesu spalování:

- Spalování 3 090 MJ
- Výroba sudů 114 MJ
- Doprava RAO 410 MJ
- Doprava popelu 62 MJ
- Manipulace v EDU 3 MJ

Energetická náročnost pro zpracování 1 m³ pevného spalitelného odpadu je 3 679 MJ, alternativně 24 527 MJ/sud.

7.3.5 Další využívané metody

Pro další využívané metody platí stejné podmínky jako v případě EDU. Proto zde nebudou uváděny duplicitně.

7.4 ÚJV Řež

V ÚJV Řež je využíváno velké množství různých metod pro zpracování RAO. Vzhledem k takto velkému rozptylu budou hodnoceny pouze tři druhy odpadu, u kterých lze relevantním způsobem stanovit výchozí odpad, a to kapalný odpad o průměrné solnosti 10 g/l, pevný lisovatelný odpad a kovový odpad upravovaný metodou fragmentace.

7.4.1 Cementace

Samotnému procesu cementace předchází zahuštění kapalného RAO ze solnosti 10 g/l na solnost 300 g/l. K tomuto zahuštění dochází na rotorové filmové odparce, která má průměrnou spotřebu energie 4 MJ/l výchozího kapalného RAO [4].

Pro cementaci je využíván pucolánový cement, který se skládá ze slínku a z pucolánu (sopečný popel). Průměrná energetická náročnost výroby 1 kg pucolánového cementu i s aditivy je 3,5 MJ [4].

Pro míchání kapalného RAO s pucolánovým cementem se využívá míchací zařízení se spotřebou 2,2 kW a dobou míchání 10 min na jeden sud, což odpovídá spotřebě 1,3 MJ/sud [4].

Jeden 216 l sud průměrně obsahuje 30 kg vyvázaných radioaktivních látek, což odpovídá 100 l koncentrátu a 200 kg pucolánového cementu [4].

Doprava na úložiště je uvažována společností SAND s.r.o. po 25 ks 216 l sudů.

Manipulace v úložišti je uvažována s energetickou náročností 3,2 MJ/sud (zahrnuje složení sudu z automobilu, dopravu na místo uložení a uložení sudu).

Jako výchozí 1 m³ RAO odpadu je považován koncentrát o solnosti 300 g/l, což odpovídá produkci 10 ks 216 l sudů.

Energetická náročnost procesu cementace:

- Odparka 120 000 MJ
- Výroba sudů 8 612 MJ
- Pucolánový cement 7 000 MJ
- Cementace 13 MJ
- Doprava do úložiště 504 MJ
- Manipulace v úložišti 32 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ koncentrátu z odparky o solnosti 300 g/l je 16 161 MJ, alternativně 1 616 MJ/sud.

Pro úplnost je uvedena energetická náročnost pro zpracování 1 m³ kapalného RAO o solnosti 10 g/l, což je 4 538 MJ, alternativně 13 753 MJ/sud.

7.4.2 Lisování

Pro lisování institucionálního pevného lisovatelné RAO se využívá šnekový lis F 26 S s následujícími parametry:

- Výkon motoru 5,5 kW
- Tlak oleje 230 bar
- Lisovací tlak 2,5 MPa

Doba potřebná pro slisování RAO do 1 ks 115 l sudu je 1 hodina, doba chodu samotného lisu je 0,5 hodiny. Tomu odpovídá spotřeba energie 9,9 MJ [4].

Obvyklý redukční faktor se pohybuje od 2 do 4. Je uvažována průměrná hodnota 3 [4].

Jako výchozí 1 m³ RAO je uvažován lisovatelný institucionální odpad, který je složen především z ochranných pomůcek oděvů a hader používaných k čištění. Na zpracování 1 m³ tohoto odpadu je potřeba 2,9 ks 115 l sudů.

Energetická náročnost zpracování lisování:

- Lisování 28,7 MJ
- Výroba a doprava sudů 1 061,9 MJ

Vzhledem ke skutečnosti, že 115 l sudy nejsou samostatně dopravovány do úložiště, ale zalévány cementem do 216 l sudu, bude celková energetická náročnost uvažována pro toto společné uložení. Na tento způsob uložení je využit 216 l sud a 95 l cementační směsi. Jako vstupní surovina cementace je brán koncentrát o solnosti 300 g/l. Energetická náročnost je počítána pro výchozí 1 m³ pevného lisovatelného RAO, což odpovídá cementování 0,130 m³ kapalného koncentrátu, neboli 13,44 kg vyvážaných radioaktivních látek cementací.

Energetická náročnost zpracování lisováním a cementací:

- Lisování 28,7 MJ
- Výroba a doprava sudů 3 559,2 MJ
- Pucolánový cement 910 MJ
- Cementace 1,7 MJ
- Doprava do úložiště 146,2 MJ
- Manipulace v úložišti 9,3 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 m³ pevného lisovatelného odpadu a 0,13 m³ kapalného odpadu z odparky o solnosti 300 g/l je 4 655 MJ, alternativně 1 605 MJ/sud.

Pro variantu vstupního 1 m³ smíšeného odpadu (0,885 m³ pevného lisovatelného RAO a 0,115 m³ kapalného RAO o solnosti 300 g/l) je energetická náročnost 4 120 MJ, alternativně 1 605 MJ/sud.

7.4.3 Fragmentace

Mezi nejvyužívanější metody fragmentace v ÚJV Řež patří stříhání hydraulickými nůžkami. Příkon používaných hydraulických nůžek je 4 kW, doba samotného stříhu 2 – 5 s, při započítání doby pro nutnou manipulaci 15 s. Jako vstupní materiál je uvažována konstrukční ocel běžných parametrů a rozměrů (kulatina, trubky, tvarovky) [4].

Stříhaný materiál je upravován na délku 15 až 50 cm a jsou vloženy do 155 l sudu. Na jeden sud se uvažuje potřebná doba zpracování ocelových profilů v délce 0,5 h, což odpovídá energii 7,2 MJ [4].

Sud se zpracovaným ocelovým odpadem je opět vložen do většího sudu a oblit cementační směsí. Jako výchozí odpad je brána 1 t ocelového odpadu, což odpovídá přibližně vzniku šesti 115 l sudů. Výsledný odpad bude složen z šesti 216 l sudů s již zmíněným odpadem a dále obsahem 269 l cementovaného koncentrovaného kapalného RAO o solnosti 300 g/l.

Energetická náročnost zpracování stříháním a cementací:

- Stříhání 43,2 MJ
- Výroba a doprava sudů 7 363,9 MJ
- Pucolánový cement 1 883,7 MJ
- Cementace 3,5 MJ
- Doprava do úložiště 302,4 MJ
- Manipulace v úložišti 19,2 MJ

Energetická náročnost zpracování 1 t kovového odpadu a 0,269 m³ kapalného odpadu z odpadky o solnosti 300 g/l je 9 615,9 MJ, alternativně 1 603 MJ/sud.

7.4.4 Další využívané metody

Mezi další využívané metody nakládání s RAO patří vysávání, chemická a pěnová dekontaminace, vysokotlaké otryskávání, ultrazvuková vana, broušení úhlovou bruskou, řezání pilou, řezání kyslík – acetylénovým plamenem a řezání plasmou [4].

Z výše uvedených zařízení stojí za zmínku pouze energetická náročnost ultrazvukové vany. Spotřeba elektrické energie se dělí na spotřebu generátorů ultrazvuku (až 20 kW) a na spotřebu topného systému (až 15 kW). Objem ultrazvukové vany je 1,3 m³. V ultrazvukové vaně je RAO odpad dekontaminován několik minut, výjimečně až hodin. Rozptyl hodnot je bohužel příliš velký na to, aby mohlo být uvedeno relevantní hodnocení energetické náročnosti [4].

Ostatní metody dekontaminace a fragmentace mají v porovnání s dalšími články celého procesu nakládání s odpady téměř zanedbatelnou spotřebu nebo se jedná o energetickou náročnost výroby pomocných látek, která není výrobcí těchto látek sledována a vzhledem ke složitosti výrobních procesů je téměř nezjistitelná. Typický je tento problém u chemických látek, které se skládají až z několika desítek různých chemikálií.

Tab. 7-1 Srovnání energetické náročnosti zpracování RAO v závislosti na zvolené metodě a místě zpracování

Místo zpracování	Druh odpadu	Složení odpadu	Energetická náročnost zpracování 1 m ³ RAO [MJ]	Energetická náročnost zpracování RAO pro vytvoření 1 sudu [MJ]
EDU	Kapalný RAO	Vodný RAO solnosti 200 g/l	29 571	12 425
	Pevný RAO spalitelný	Hustota 200 kg/m ³ , PVC a guma max. 5 %	3 699	24 660
	Pevný RAO lisovatelný	Hadry, součásti ochranných oděvů, izolace, atd.	1 350	808
	Ionexové filtry (SIAL matrice)	Bezvodý ionex, sypná hmotnost 845 kg/m ³	14 250	1 610
ETE	Kapalný RAO	Vodný RAO solnosti 200 g/l	27 377	11 503
	Pevný RAO spalitelný	Hustota 200 kg/m ³ , PVC a guma max. 5 %	3 679	24 527
	Pevný RAO lisovatelný	Hadry, součásti ochranných oděvů, izolace, atd.	1 405	846
	Ionexové filtry (SIAL matrice)	Bezvodý ionex, sypná hmotnost 845 kg/m ³	14 509	1 639
ÚJV Řež, a.s.	Cementace	Vodný RAO solnosti 300 g/l	16 161	1 616
	Lisování	Ochranné oděvy a jejich součásti, pomůcky a drobné nářadí, hadry	3 163	1 091 (pro 115 l sud)
	Lisování + cementace	Viz. lisování a cementace	4 120	1 605
	Fragmentace + cementace	Konstrukční ocel 1000 kg, 269 l vodného RAO solnosti 300 g/l	9 616	1 603

8 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá hodnocením energetické náročnosti technologií pro nakládání s radioaktivními odpady v ČR. Práce je rozdělena na dvě části a to část teoretickou, která obsahuje stručný popis organizací spojených s nakládáním s radioaktivními odpady v ČR, systémů třídění radioaktivních odpadů, úložišť radioaktivních odpadů na území ČR a popis technologií pro nakládání s radioaktivními odpady. Na teoretickou část navazuje zpracování energetické náročnosti jednotlivých druhů radioaktivních odpadů.

Pro popis technologií nakládání s radioaktivními odpady byly zvoleny nejen významné technologie využívané v ČR, ale i technologie využívané v zahraničí a perspektivní technologie. Mezi nejvíce celosvětově využívané technologie patří metoda cementace, která spočívá v zalévání radioaktivního dopadu do cementové matrice. Další významnou metodou je bitumenace, která je využívána pro fixaci kapalných vodných radioaktivních odpadů. Pro fixaci vysoko aktivních odpadů je nejvhodnější metoda zatavování do skelných materiálů, která se nazývá vitrifikace. V ČR je velmi využívána moderní metoda fixace do geopolymerních struktur matrice SIAL, která je podobná cementaci, ale má lepší parametry v oblasti bezpečnosti a stability výsledného produktu. Z perspektivních metod nakládání s radioaktivními odpady je nejvýznamnější metoda polymerace, při které jsou radioaktivní látky fixovány do polymerů, nejčastěji pak polyester, vinylester a epoxidová pryskyřice.

Praktická část práce, hodnocení energetické náročnosti technologií pro zpracování radioaktivních odpadů používaných v ČR je rozdělena podle místa zpracování na Elektrárnu Dukovany, Elektrárnu Temelín a ÚJV Řež, a.s. U odpadu z jaderných elektráren byly hodnoceny metody bitumenace, nízkotlakého lisování v sudu a spalování, zalévání do matrice SIAL. U odpadu v ÚJV Řež, a.s. byly hodnoceny metody cementace, lisování v sudu, lisování v sudu a následné cementace, fragmentace ocelového odpadu a následné cementace.

U metody bitumenace bylo součástí hodnocení energetická náročnost těžby, dopravy a zpracování ropy na bitumen, doprava a skladování bitumenu v jaderné elektrárně, samotného procesu bitumenace vodného RAO o solnosti 200 g/l, výroby a dopravy sudů a konečného uložení v úložišti.

U metody lisování bylo součástí hodnocení energetická náročnost lisování, výroba a doprava sudů, přeprava zpracovaného RAO na úložiště a jeho uložení.

U metody spalování bylo součástí hodnocení energetická náročnost dopravy RAO do spalovny a popelu zpět, výroba sudů, samotný proces spalování a konečné uložení v úložišti.

U metody zapracování do matrice SIAL byla hodnocena energetická náročnost zapracování ionexových filtrů do této matrice a obsahovala energetickou náročnost výroby matrice SIAL, výrobu a dopravu sudů, přepravu zpracovaného RAO k uložení v úložišti.

U metody cementace byla součástí hodnocení energetická náročnost výroby pucolánového cementu, výroby a dopravy sudů, samotné metody cementace vodného RAO o solnosti 300 g/l, přepravu zpracovaného RAO k uložení v úložišti.

U metody fragmentace byla součástí hodnocení energetické náročnosti metoda samotné fragmentace kovových konstrukčních profilů, výroba a doprava sudů a přeprava zpracovaného RAO k uložení v úložišti.

Z výsledků hodnocení lze říci, že největší energetickou náročnost zpracování 1 m³ výchozího odpadu představuje proces bitumenace se spotřebou 29 571 MJ/m³ pro EDU a 27 377 MJ/m³ pro ETE. Rozdílné hodnoty spotřeby jsou dány rozdílnými parametry bitumenačních linek. Energeticky náročný je také proces fixace do matrice SIAL s 14 250 MJ/m³ pro EDU a 14 509 MJ/m³ pro ETE, rozdíl je dán pouze energetickou náročností přepravy z ETE do úložiště. Podobně náročným procesem je cementace s energetickou náročností 16 161 MJ. Nejméně energeticky náročnou metodou je lisování se spotřebou 1350 MJ/m³ pro EDU a 1405 MJ/m³ pro ETE, kde je většina energie spotřebována na výrobu sudů a dopravu. Všeobecně lze říci, že samotná metoda je energeticky velmi náročná u bitumenace a spalování. U ostatních metod tvoří energetická náročnost samotného procesu pouze malou část celkové spotřebované energie a většinu tvoří energetická náročnost využívaných materiálů.

Jiný pohled na hodnocení nabízí spotřeba energie na vyprodukování 1 sudu výsledného RAO. Zde je nejvíce energeticky náročným procesem spalování se spotřebou 24 660 MJ/sud pro EDU a 24 527 MJ/sud pro ETE. Následuje proces bitumenace se spotřebou energie 12 425 MJ/sud pro EDU a 11 503 MJ/sud pro ETE. Metoda cementace a matrice SIAL představují spotřebu přibližně 1600 MJ/sud a pouhé lisování přibližně 800 MJ/sud.

V ÚJV Řež, a.s. je větší energetická náročnost procesů dána využitím 2 ks sudů a to o objemech 115 l a 216 l, do kterých jsou vkládány různými metodami zpracované materiály. Všeobecně lze říci, že obal 115 l sudu ve 200 sudu tvoří cementační směs.

Zhodnotit energetickou náročnost všech procesů využívaných v ČR není možné, jelikož k mnohým procesům zpracování RAO neexistují relevantní data o energetické náročnosti dílčích procesů a výroby použitých materiálů.

Tato práce umožňuje nahlédnout na procesy nakládání s radioaktivními odpady v České republice z netradičního pohledu energetické náročnosti a její výsledky jsou použitelné například pro případné hodnocení vyprodukovaných emisí při jednotlivých procesech. Práci by bylo možné v budoucnu rozšířit o hodnocení energetické náročnosti procesů zpracování radioaktivního odpadu konkrétního složení nebo z pohledu již zmíněných a v dnešní době stále více sledovaných emisí.

POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

- [1] ERIKSSON, Hans a Anniki HIRNE. *Příručka žárového zinkování*. Stockholm, 2005, 60 s.
- [2] SALING, James H, Audeen W FENTIMAN a Y TANG. *Radioactive waste management*. 2nd ed. New York: Taylor, 2001, xi, 414 p. ISBN 15-603-2842-8.
- [3] Kopecký, P., ČEZ, a.s., konzultace, ústní sdělení [2014-04-27].
- [4] Kovařík, P., ENVINET, a.s., konzultace, ústní sdělení, Třebíč, [2014-04-27].
- [5] *AMEC Nuclear Czech Republic, a.s.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.amec.cz/>
- [6] CEZ a radioaktivní odpady - náhled. In: *CEZ* [online]. 2007 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf
- [7] *Classification of radioactive waste: general safety guide* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009 [cit. 2014-05-22]. ISBN 978-920-1092-090. Dostupné z: www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf
- [8] *DMS s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.dms-edu.cz/>
- [9] IAEA. *Management of small quantities of Radioactive Waste* [online]. 1998 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1041_prn.pdf
- [10] KEPÁK, František. UJEP. *Energetika a životní prostředí* [online]. 2010, 136 s. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/enzp/ENZPsripta.pdf
- [11] KOVAŘÍK, Petr a Josef PODLAHA. *Institucionální radioaktivní odpady. IHNED.CZ* [online]. 2007 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://odpady.ihned.cz/1-10078640-20893840-E00000_d-29
- [12] *MAN Truck & Bus Czech Republic s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.truck.man.eu/cz/cz/index.html>
- [13] *MERO ČR, a.s.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.mero.cz/>
- [14] *MEVA a.s.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://bezdekov.meva.eu/>
- [15] *Radioactive waste management programmes in OECD/NEA member countries* [online]. [New ed.]. Issy-les-Moulineaux, France: OECD Nuclear Energy Agency, 2005, 1 portfolio (1 sheet, 20 booklets) [cit. 2013-12-30]. ISBN 92-640-1210-9. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/tools/publication?id=5248>
- [16] Radioaktivní odpady z JE. *ČEZ* [online]. 2002 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/jaderel_3.html
- [17] *Renault* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.renault-trucks.cz/>
- [18] Roční zpráva o ukládání RAO na ÚRAO Bratrství. In: *SURAO* [online]. 2012 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: www.surao.cz/cze/content/download/532/2894/file/Zpr%C3%A1va_LaP2011_Br.pdf
- [19] Roční zpráva o ukládání RAO na ÚRAO Dukovany. In: *SURAO* [online]. 2012 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: www.surao.cz/cze/content/download/533/2898/file/Zpr%C3%A1va_LaP2011_Du.pdf

- [20] Roční zpráva o ukládání RAO na ÚRAO Richard. In: *SURAO* [online]. 2012 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: www.surao.cz/cze/content/download/531/2890/file/Zpr%C3%A1va_LaP2011_Ri.pdf
- [21] *SAND s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.sandstastny.cz/index.htm>
- [22] *Studsvik* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.studsvik.com/en/>
- [23] *SÚJB* [online]. 2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/o-sujb/uvod/>
- [24] *SÚRAO* [online]. 2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze>
- [25] Table of Radioactive Isotopes. *LUNDS Universitet* [online]. 2004 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://ie.lbl.gov/toi/listnuc.asp?sql=&HlifeMin=10000&tMinStr=10000+s>
- [26] TT-Line. *TT-Line CARGO* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.ttline.com/en-GB/Cargo/Ships/Tom-Sawyer--Huckleberry-Finn/>
- [27] *UNIPETROL, a.s.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.unipetrol.cz/cs/Stranky/default.aspx>
- [28] *ÚJV Řež* [online]. 2013 [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.ujv.cz/web/ujv>
- [29] Ukládání odpadů v ČR. ČVUT. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. 2003 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/radioaktivni-odpady/problematikaodpaducr/>
- [30] *U.S.NRC* [online]. 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/>
- [31] Vitrification. *AREVA* [online]. 2008 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.areva.com/EN/operations-3408/vitrification.html>
- [32] Vyhláška, kterou se mění vyhláška 307/2002 Sb., o radiační ochraně. In: *499/2005 Sb.* 2005, 174.
- [33] Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně. In: *307/2002 Sb.* 2002.