



ZPRÁVA O JADERNÉM ODPADU VE SVĚTĚ 2019

Zaměřeno na Evropu



PARTNEŘI A SPONZOŘI

ÖKOLOGIE & FRIEDEN

Altner-Combecher Stiftung



 **HEINRICH BÖLL STIFTUNG**



Bund für
Umwelt und
Naturschutz
Deutschland

Tato zpráva by nemohla vzniknout bez štědré podpory pestré skupiny přátel a partnerů, především následujících organizací – v abecedním pořadí – Altner-Combecher Stiftung, Bäuerliche Notgemeinschaft Trebel, Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., Climate Core a skupina poslanců za Zelené/EFA v Evropském parlamentu, nadace Heinrich-Böll-Stiftung (HBS) a její kanceláře v Berlíně, Bruselu, Paříži, Praze a Washingtonu DC, KLAR! Schweiz, Annette a Wolf Römmig a Swiss Energy Foundation.



PŘEDMLUVA

Les nedaleko vesnice Gorleben v mém rodném kraji byl před více než 40 lety vybrán jako lokalita pro německé celostátní středisko pro likvidaci jaderného odpadu. Lokalita, jež se dnes nachází uprostřed země, ale v té době ležela přímo na hranici mezi Východním a Západním Německem, měla původně obsahovat veškerá zařízení pro přepracování, zpracování, ukládání a hlubinné geologické úložiště. Zodpovědná firma (která je již dlouho zrušená) zamýšlela otevřít úložiště vyhořelého paliva v solném dómu zvaném Gorleben-Rambow v roce 1999.

Po havárii ve Fukušimě ukončila německá vláda jadernou energetiku podruhé. Zkušenosti s jadernou katastrofou v Japonsku v roce 2011 též uvedly do pohybu přezkoumání plánů úložiště v Gorleбену. Po zhruba 40 letech diskuzí a bojů o Gorleben německá vláda a parlament rozhodly ve prospěch nového procesu výběru lokality úložiště vysokoaktivního jaderného odpadu se zapojením veřejnosti. Při pohledu na posledních 40 let a na dalších mnoho desetiletí v budoucnu, za která bude možná k dispozici úložiště, se ukazují obtíže, s nimiž se lidstvo potýká při řešení věčného dědictví jaderné energetiky. Při zvážení čtyřicetileté historie pokusů o likvidaci paliva v Gorleбену a řady dnes známých problémů a výzev je nereálné předpokládat, že bude úložiště uvedeno do provozu dříve než ve druhé polovině tohoto století.

Německo přitom není jedinou zemí, jež hledá vhodné úložiště nebo stojí před obtížnými rozhodnutími o jaderném odpadu. Coby poslankyně Evropského parlamentu posledních 15 let sleduji snahy o ukončení jaderné energetiky v Evropské unii i mimo ni. Významná iniciativa vzešla od energetického konzultanta Myclea Schneidera z Paříže, jenž navrhuje odmítnout pohádky o celosvětové jaderné renesanci. Se svým týmem autorů vydává každoroční *Zprávy o stavu jaderné energetiky ve světě*, jež dokládají skutečnost, že obnovitelné zdroje energie jadernou energetiku poráží jak kvůli nesmírné rizikovosti jaderné technologie, tak i kvůli její vysoké nákladnosti. Při prezentaci zpráv o stavu jaderné energetiky v posledních letech jsme vznášeli stále více dotazů ohledně absence tématu jaderného odpadu, především proto, že se jedná o další faktor ovlivňující nákladnost jaderné energetiky. V posledních letech sleduji též snahu Evropské komise o nastolení lepšího přehledu a společného rámce pro ukončování provozu, nakládání s jaderným odpadem, jeho likvidaci a finanční opatření.

Opakující se dotazy a neuspokojivé výsledky iniciativy Evropské komise mě motivovaly k tomu, abych se této výzvy chopila prostřednictvím **ZPRÁVY O JADERNÉM ODPADU VE SVĚTĚ (WNWR)**. V tomto prvním vydání náš tým evropských expertů popisuje technologie, strategie, přípravné procesy a finanční opatření pro likvidaci odpadů. Jsme přesvědčeni o tom, že informace z národního prostředí by měly být jak dostupnější, tak porovnatelnější. Mezi jednotlivými zeměmi se totiž navzdory mezinárodním úmluvám o jaderném odpadu liší dokonce i kategorie pro klasifikaci odpadů.

Hlubinná geologická likvidace je jedním z nejambicióznějších a nejobtížnějších úkolů lidstva. Specifická rizika jaderného odpadu si totiž žádají bezpečné oddělení od prostředí po dobu jednoho milionu let. Strategie likvidace navíc slibuje alespoň na určitou omezenou dobu možnost opětovného vyzvednutí a regenerace. Lehkovážnost a arogance jaderné energetiky a vlád, které ji podporují, vůči rizikům jaderného odpadu mezi občany vyvolávají spíše nedůvěru. Je před námi obtížný úkol: nalézt nejlepší možné a nejzodpovědnější řešení. Abychom se dokázali vypořádat s tímto úkolem, je nutná větší otevřenost a trpělivost společnosti, politiků, občanů, vědy a průmyslu, jsou nutné peníze a ochota uznat své chyby a nezdary a přehodnotit přístupy a strategie. To se týká všech zemí, které jadernou energetiku využívají či využívaly nebo mají jaderné zbraně.

Toto první vydání **ZPRÁVY O JADERNÉM ODPADU VE SVĚTĚ (WNWR)** zahrnuje širokou škálu zásadních otázek na dané téma a vznikalo mnohem déle, než jsme zpočátku plánovali, i přesto však pochopitelně není dané téma zcela vyčerpáno. Rozsah zprávy zčásti určují finanční omezení. Dalším důvodem je také skutečnost, že jsme neměli přístup k úplným údajům a kvalifikovaným autorům ze všech států. Zprávu **WNWR** zamýšlíme jako pravidelnou publikaci, jež by v budoucnu měla procházet pravidelnými aktualizacemi, rozšiřovat se o nová témata a zahrnovat více zemí. K budoucím tématům by mohly patřit důležité a nedostatečně probádané oblasti, jako jsou omezená kapacita meziskladů nebo porovnání okamžité demontáže a zabezpečeného zachování jaderných elektráren po definitivním ukončení jejich provozu. Druhá z otázek je aktuální v případech, kdy se ukončuje provoz jaderných elektráren bez dostupné řádné kapacity pro ukládání a likvidaci, jako je tomu v Německu. Množství jaderného odpadu ve všech zemích roste, skladovací kapacity jsou omezené, konečné uložení dosud není k dispozici a náklady na zabezpečení odpadu se zvyšují. Některé vlády na tuto výzvu reagují slevováním ze standardů pro energetiku, například snižováním úrovně, při které je nutno odpad z vyřazovaných provozů klasifikovat jako radioaktivní. Tomuto uvolňování frakcí odpadu prostým měřením by se mělo rovněž věnovat příští vydání publikace.

Většina z naší stávající skupiny autorů dává přednost hlubokému geologickému ukládání vysokoaktivního odpadu, pokud se k němu vážou jednoznačné a přísné podmínky výběru lokality, průzkumu a schvalování. Panuje výrazná shoda na tom, že stávající výzkumná a vědecká diskuze a výměna názorů s politiky a zapojeními občany je hrubě nedostatečná. Navzdory podpoře hlubinného ukládání jsme přesvědčeni o tom, že by se vlády neměly vyhýbat debatě o alternativách a že i toto téma si zasluhuje větší pozornost, snad v příštím vydání této zprávy. Proveditelnost zamýšlených hlubinných úložišť v současné době není nijak zaručena. Celkově vzato, přestože práce na tomto prvním vydání **WNWR** je u konce, stále vidím řadu témat, kterým by se měla věnovat vydání příští.

A přestože se tématy jaderného odpadu a procesem výběru lokality v Německu zabývám od roku 1975, jsem nucena se domnívat, že bude trvat ještě několik generací, než bude v provozu úložiště vycházející z nejlepších dostupných řešení. Proto si myslím, že je naší povinností předat další generaci něco ze zkušeností a znalostí, kterých jsme my kritikové jaderné energetiky dosud nabyli. Zodpovědností příštích generací bude nalézt řešení problémů jaderného odpadu, věčného dědictví krátké doby jaderné. Spolupráci mezi stářím a mládím při vzniku této zprávy vidím jako cenný příspěvek ke generační výměně. Kritická diskuze a reflexe musí být nedílnou součástí hledání nejlepšího dostupného a proveditelného řešení, jak ukládat jaderný odpad. Proces se neustále musí zaměřovat na řešení. Můžeme totiž sice postupně ukončit jadernou energetiku, nemůžeme však ukončit existenci jaderného odpadu a jeho věčných rizik.

Mé díky a uznání patří našim autorům, přispěvatelům a všem, kdo nás podpořili prací, znalostmi a finančními prostředky.

Dickfeitzen, Wendland, nedaleko Gorleben, červenec 2019

REBECCA HARMS



PODĚKOVÁNÍ

Tato Zpráva o jaderném odpadu ve světě (**WNWR**) je společným projektem skupiny renomovaných expertů, kteří chtějí upozorňovat na radioaktivní odpad coby podstatnou a rostoucí výzvu, jež dosud nemá žádné dlouhodobé řešení. Projekt iniciovala Rebecca Harms a původní osnovu vytvořili Wolfgang Neumann, Mycle Schneider a Gordon MacKerron.

Ústřední tým projektu **WNWR** (Rebecca Harms, Mycle Schneider, Arne Jungjohann a Anna Turmann) od poloviny roku 2018 pracoval na získávání partnerů a shánění finančních prostředků na projekt, na hledání přispěvatelů a na vydání zprávy. Rebecca Harms se ujala celkového vedení projektu. Arne Jungjohann působil jako šéfredaktor a koordinátor projektu. Anna Turmann zajišťovala neocenitelnou koordinaci, organizaci, redakci a plánování rozpočtu. Mycle Schneider a Gordon MacKerron svými účinnými a promyšlenými radami spoluvytvářeli strukturu projektu.

Velmi vděční jsme za vynikající práci, kterou odvedli přispěvatelé z pestré skupiny mezinárodních expertů, z nichž každý vypracoval jednu či více kapitol: Manon Besnard, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison Macfarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn a Ben Wealer. Jejich stručné životopisy najdete [na konci zprávy](#).

Publikaci **WNWR** ohromně prospěly částečné či úplné korektury, redakční zásahy a připomínky, s nimiž přicházeli Andrew Blowers, Craig Morris, Mycle Schneider, Marcos Buser, Gordon MacKerron, Johan Swahn a Markku Lehtonen. Silvia Weko byla nesmírně nápomocná při detailní korektuře, redigování tabulek a poznámek pod čarou a při vypracování stylistické příručky pro autory.

Velké díky rovněž zasluhuje berlínská Agentura pro obnovitelné zdroje energie a především Andra Kradolfer, která vytvořila návrh a provedla úspěšnou realizaci grafů a tabulek.

Webovou stránku projektu **WNWR** na adrese www.worldnuclearwastereport.org navrhl Arne Jungjohann. Obsahuje více informací a případné budoucí aktualizace.

Zpráva **WNWR** obsahuje velké množství faktických a číselných údajů. Ačkoli se maximálně snažíme o jejich ověřování a kontrolu, nikdo není dokonalý. Přispěvatelé a redaktoři budou vděční za opravy a návrhy k zlepšení (info@worldnuclearwastereport.org).

*Zpráva o jaderném odpadu ve světě. Zaměřeno na Evropu. 2019. Berlín a Brusel. www.worldnuclearwastereport.org
České vydání: Praha, 2020*

OBSAH

Titulní strana.....	1
Partneři a sponzoři.....	2
Předmluva	3
Poděkování.....	6
Hlavní přehled.....	12
Manažerské shrnutí.....	14
1. Úvod	22
2. Původ a klasifikace odpadů.....	26
2.1 Druhy odpadu: jaderný palivový cyklus	27
Těžba, úprava a zpracování uranu a výroba paliva	29
Štěpná jaderná reakce (ozáření paliva).....	29
Nakládání s vyhořelým palivem	29
Vyřazování reaktorů (a zařízení palivového cyklu) z provozu.....	30
2.2 Množství odpadů a jejich aktivita.....	30
Systémy klasifikace a kategorie odpadu	31
2.3.1 Klasifikace podle MAAE	31
2.3.2 Klasifikace podle EU.....	33
2.3.3 Příklady národních klasifikací.....	34
2.4 Shrnutí.....	36
3. Množství odpadu	38
3.1 Ohlašovací povinnost.....	38
3.2 Množství odpadu v dodavatelském řetězci	39
Těžba uranu a výroba paliva	39
Odpad z provozu	39
Vyhořelé jaderné palivo	41
Odpad z vyřazování z provozu	41
Odhad množství odpadu v dodavatelském řetězci	42
3.3 Hlášené množství odpadu v rámci Společné úmluvy	44
Těžba uranu a výroba paliva	44
Nízko a středněaktivní odpad.....	45
Vyhořelé jaderné palivo a vysokoaktivní odpad.....	48
3.4 Shrnutí.....	52
4. Nebezpečnost pro životní prostředí a lidské zdraví.....	55
4.1 Radiační rizika jaderného odpadu	55
4.2 Rizika při těžbě uranu, z hlušiny, při obohacování uranu a výrobě paliva	57
Zdravotní rizika z expozice uranu.....	57
Těžba uranu	59
Hlušina z uranových dolů	59
4.3 Rizika při provozu	61
Rizika plynů, kapalin a tuhého odpadu	61
Rizika pro pracovníky	63
4.4 Rizika vyhořelého jaderného paliva.....	63
Rizika vyhořelého paliva v bazénech	64
4.5 Rizika při přepracování vyhořelého jaderného paliva	65
Štěpné materiály	66
Směsné oxidické palivo (MOX).....	67

4.6 Rizika při vyřazování z provozu	67
Pokračující emise radionuklidů z reaktorů vyřazených z provozu.....	68
Expozice při vyřazování z provozu a za provozu	68
4.7 Shrnutí	69
5. Koncepce nakládání s odpady.....	71
5.1 Historický přehled	71
5.2 Kontext nakládání s jaderným odpadem.....	77
5.3 Koncepce nakládání s jaderným odpadem	79
Koncepce likvidace.....	79
Úložné horniny	80
Úložiště NSAO.....	81
Úložiště VAO nebo odpadu s obsahem transuranů s dlouhou dobou rozpadu	83
Likvidace v hlubinných vrtech	87
5.4 Dočasné strategie: skladování	88
Dočasné skladování	88
Dlouhodobější skladování	90
5.5 Shrnutí.....	92
6. Náklady a financování	94
6.1. Podstata systémů financování vyřazování reaktorů z provozu, ukládání a likvidace odpadů.....	94
Základní odpovědnost za vyřazování z provozu a nakládání s odpady.....	94
Přehled fondů a jejich povahy	95
Shromažďování prostředků.....	96
6.2 Odhady nákladů a zkušenosti.....	98
Metodiky odhadu nákladů	98
Náklady na vyřazování z provozu.....	99
Náklady na likvidaci.....	101
6.3 Programy financování.....	102
Programy financování vyřazování z provozu	102
Programy financování dočasného skladování.....	105
Programy financování likvidace odpadu	106
Integrované programy financování.....	108
6.4 Shrnutí.....	110
7. Případové studie z jednotlivých zemí	113
7.1 Česká republika	113
Přehled.....	113
Systém klasifikace odpadu	113
Množství odpadu.....	114
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	115
Náklady a financování.....	116
Shrnutí	117
7.2 Francie	119
Přehled.....	119
Systém klasifikace odpadu	120
Množství odpadu.....	121
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	124
Náklady a financování.....	126
Shrnutí	129
7.3. Německo.....	130
Přehled.....	130
Systém klasifikace odpadu	131

Množství odpadu.....	131
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	134
Náklady a financování.....	135
Shrnutí	137
7.4 Maďarsko.....	138
Přehled.....	138
Systém klasifikace odpadu	138
Množství odpadu.....	139
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	140
Náklady a financování.....	142
Shrnutí	143
7.5 Švédsko	144
Přehled.....	144
Systém klasifikace odpadu	145
Množství odpadu.....	146
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	147
Náklady a financování.....	149
Shrnutí	150
7.6 Švýcarsko	152
Přehled.....	152
Systém klasifikace odpadu	153
Množství odpadu.....	154
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	155
Náklady a financování.....	156
Shrnutí	157
7.7 Spojené království	159
Přehled.....	159
Systém klasifikace odpadu	160
Množství odpadu.....	161
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	163
Náklady a financování.....	165
Shrnutí	166
7.8 Spojené státy americké	167
Přehled.....	167
Systém klasifikace odpadu	168
Množství odpadu.....	169
Strategie a zařízení k nakládání s odpady.....	170
Náklady a financování.....	173
Shrnutí	174
8. Tabulka zkratk.....	175
9. Příspěvatelé.....	178
Tiráž	181



HLAVNÍ PŘEHLED



KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

- **Žádná země světa nemá v provozu hlubinné geologické úložiště vyhořelého jaderného paliva.** Jedinou zemí, která v současné době trvalé úložiště buduje, je Finsko.
- **Navzdory mnoha neúspěšným procesům výběru lokalit a opuštěným úložištím trvá preference hlubinné likvidace.** Panuje silná shoda na tom, že stávající stav výzkumu ani debata s občanskou společností neodpovídají výzvám, před kterými stojíme.
- Vzhledem k tomu, že hlubinná úložiště nebudou ještě po několik desetiletí k dispozici, **se rizika stále více vztahují k meziskladům vyhořelého paliva, jejichž kapacita se pomalu vyčerpává:** například mezisklady vyhořelého paliva ve Finsku jsou již z 93 % plné.



MNOŽSTVÍ JADERNÉHO ODPADU

- **Po celé Evropě se skladuje přes 60 000 tun vyhořelého jaderného paliva** (číslo nezahrnuje Rusko a Slovensko), z toho nejvíce ve Francii. Vyhořelé jaderné palivo se považuje za vysokoaktivní odpad a představuje zdaleka největší podíl celkové radioaktivity. K roku 2016 bylo 81 % vyhořelého paliva v Evropě umístěno v mokřích meziskladech, jež představují vlastní specifická bezpečnostní rizika.
- **V Evropě dosud vzniklo zhruba 2,5 milionu m³ nízko a středněaktivního odpadu.** Okolo 20 % (0,5 milionu m³) z tohoto odpadu je uskladněno a 80 % (téměř 2 miliony m³) bylo zlikvidováno.
- Reaktory v Evropě **mohou při vyřazování z provozu vyprodukovat minimálně ještě 1,4 milionu m³ nízko a středněaktivního odpadu.**
- **Odhaduje se, že evropské jaderné reaktory za dobu své životnosti vyprodukují celkem zhruba 6,6 milionu m³ jaderného odpadu.** Pokud by se naskládal na jedno místo, zaplnil by fotbalové hřiště do výšky 919 metrů, což je o 90 metrů výše, než měří nejvyšší budova na světě, Burdž Chalífa v Dubaji. Za více než 75 % tohoto odpadu zodpovídají čtyři země: Francie (30 %), Británie (20 %), Ukrajina (18 %) a Německo (8 %).
- S výjimkou Ruska, které dosud produkuje uran, **mají Německo a Francie největší inventář jaderného odpadu z těžby uranu v Evropě.**



HLAVNÍ PŘEHLED



NÁKLADY A FINANCE

- **Vlády důsledně neuplatňují princip *znečišťovatel platí*.** Náklady na skladování a likvidaci jaderného odpadu a nakládání s ním nesou odpovědnost provozovatelé, může se ale stát, že je nakonec budou hradit daňoví poplatníci.
- **Vlády řádně neodhadují náklady na vyřazování z provozu, skladování a likvidaci jaderného odpadu** kvůli zásadním nejistotám. Mnohé vlády při odhadech nákladů vycházejí z přehnaně optimistických diskontních sazeb a zastaralých dat, což vede k závažným výpadkům financování nakládání s odpady.
- **Celkově dosud žádná země neodhadla náklady přesně a zároveň nepokryla mezeru mezi zajištěnými finančními prostředky a odhadovanými náklady.**



PŮVOD A KLASIFIKACE ODPADŮ

- **V jednotlivých zemích se výrazně liší definice a kategorizace jaderného odpadu i způsoby ohlašování množství vznikajícího jaderného odpadu.** Všechny země pravidelně zveřejňují údaje, ale ne všechny tak činí dostatečně detailně.
- **Tato nedůslednost trvá** navzdory mezinárodnímu úsilí o zavedení společných bezpečnostních zásad a postupů **a jakékoli porovnání je kvůli ní velmi složité.** V odlišnosti národních přístupů se odráží nejednotnost při nakládání s jaderným odpadem v jednotlivých zemích.



NEBEZPEČNOST PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A LIDSKÉ ZDRAVÍ

- **Jaderný odpad přináší zdravotní riziko** v důsledku běžně vznikajících plyných a kapalných emisí z jaderných zařízení a celkových globálních dávek ozáření při přepracování vyhořelého paliva.
- **Přepracování vyhořelého jaderného paliva představuje obrovské výzvy,** mimo jiné riziko šíření jaderných zbraní, velké expozice osob a kontaminace životního prostředí.
- **Celkově se nedostává komplexních kvantitativních i kvalitativních informací o rizicích spojených s jaderným odpadem.**



SHRNUTÍ

ZPRÁVA O JADERNÉM ODPADU VE SVĚTĚ (WNWR) je dokladem toho, jak vlády po celém světě dlouhá desetiletí usilují o vytvoření a realizaci komplexních strategií nakládání s jaderným odpadem. Velká část tohoto úkolu připadne budoucím generacím.



KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Po více než 70 letech využívání jaderné energie stále žádná země světa nemá v provozu hlubinné geologické úložiště vyhořelého jaderného paliva. Jedinou zemí, která v současné době buduje trvalé úložiště tohoto nejnebezpečnějšího druhu jaderného odpadu, je Finsko. Kromě Finska mají v rámci procesu včasné izolace odpadu fakticky určenou lokalitu úložiště vysokoaktivního odpadu pouze Švédsko a Francie. Ve Spojených státech probíhá tzv. Pilotní projekt izolace odpadu (Waste Isolation Pilot Project, WIPP). Toto úložiště však slouží pouze k ukládání transuranového odpadu s dlouhou dobou rozpadu z jaderných zbraní, a nikoli vyhořelého jaderného paliva z komerčních reaktorů.

Navzdory mnoha neúspěšným procesům výběru lokalit a opuštěným úložištím stávající národní vlády a mezinárodní organizace preferují hlubinnou likvidaci. K ní jsou zapotřebí jednoznačné a ambiciózní podmínky výběru a průzkumu lokalit a schvalovací procesy. Proveditelnost hlubinných úložišť však stále není zaručena. Proto je nutné proces vyhledávání úložišť realizovat s mimořádnou pozorností na základě praktické proveditelnosti a s náležitým monitoringem. Někteří vědci se domnívají, že zodpovědnější a mnohem rychleji dosažitelné je monitorované dlouhodobé skladování v chráněném prostředí, a mělo by se tudíž realizovat. Celkově panuje výrazná shoda na tom, že stávající stav výzkumu, vědecké diskuze a výměny názorů mezi politiky a zapojenými občany je nedostatečný vzhledem k naléhavosti této otázky.

Úprava, přeprava, skladování a likvidace jaderného odpadu ve všech jaderných zemích představují značné a stále rostoucí výzvy. Z tohoto vývoje plyne, že vlády a správní orgány stojí **před naléhavou nutností zkvalitňovat řízení programů dočasného skladování a likvidace odpadů**. V souladu s tím je nutno implementovat normy pro kvalitní řízení těchto programů, mimo jiné plánování v oblasti jakosti a bezpečnosti, zajištění jakosti, účasti občanů a bezpečnostní kultury.

Dočasné skladování vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu bude pokračovat sto i více let. Vzhledem k tomu, že hlubinná úložiště nebudou ještě po několik desetiletí k dispozici, **se rizika stále více vztahují k meziskladům vyhořelého paliva**. Stávající postupy skladování vyhořelého jaderného paliva a dalších snadno se šířících forem středně a vysokoaktivního odpadu nebyly plánovány pro dlouhodobé užití. Tyto postupy proto představují rostoucí a zvláště velké riziko, zejména když jsou k dispozici jiné možnosti (ztužení, suché skladování) v protiatomových zařízeních. Prodlužovaným skladováním jaderného odpadu se dnes zvyšuje riziko, náklady rostou o miliardy a tato zátěž se přesouvá na budoucí generace.



MNOŽSTVÍ JADERNÉHO ODPADU

Evropské země dosud vyprodukovaly několik milionů krychlových metrů jaderného odpadu (bez zahrnutí odpadů z těžby a zpracování uranu). **Francie, Spojené království a Německo byly ke konci roku 2016 největšími evropskými producenty jaderného odpadu v rámci celého jaderného palivového cyklu.**

Po celé Evropě se skladuje přes 60 000 tun vyhořelého jaderného paliva (číslo nezahrnuje Rusko a Slovensko), z toho nejvíce ve Francii. V rámci EU Francie představuje 25 % stávajícího inventáře vyhořelého jaderného paliva a po ní následují Německo (15 %) a Spojené království (14 %). Vyhořelé jaderné palivo se považuje za vysokoaktivní odpad. Přestože se vyskytuje v poměrně malých objemech, tvoří převážnou většinu celkové radioaktivity. Například ve Spojeném království dosahoval vysokoaktivní odpad méně než 3 % celkového objemu jaderného odpadu, ale téměř 97 % radioaktivity celého inventáře. Většina vyhořelého paliva je přesunuta do chladicích bazénů (tzv. mokrých skladů), jež odebírají teplo a radioaktivitu. V roce 2016 se 81 % vyhořelého jaderného paliva v Evropě nacházelo v mokrých mezi-skladech. Bezpečnější by bylo přesunout vyhořelé jaderné palivo do suchých skladů v samostatných zařízeních. U velké části uskladněného vyhořelého jaderného paliva ve Francii a v Nizozemsku se počítá s přepracováním. Většina ostatních evropských jaderných zemí (Belgie, Bulharsko, Německo, Maďarsko, Švédsko, Švýcarsko a jako zatím poslední i Británie) přepracování pozastavila na dobu neurčitou nebo ukončila. Ne všechny země ohlašují množství vyhořelého paliva, které je přepracováno. Ve většině případů se hlásí pouze vitrifikovaný vysokoaktivní odpad z přepracování. Totéž platí pro obrovské množství přepracovaného uranu, plutonia, středněaktivního odpadu a vyhořelého směsného oxidického paliva (MOX), jež vyžadují další rozsáhlé kapacity pro střednědobé skladování.

V Evropě dosud vzniklo zhruba 2,5 milionu m³ nízko a středněaktivního odpadu. Jedná se pouze o částečný odhad, neboť nezahrnuje údaje ze Slovenska a Ruska. Zhruba 20 % tohoto odpadu (0,5 milionu m³) je po Evropě uskladněno a čeká na konečnou likvidaci. Toto množství se stále zvětšuje a žádný způsob likvidace neexistuje. Okolo 80 % tohoto odpadu (téměř 2 miliony m³) bylo zlikvidováno. To však neznamená, že odpad je úspěšně odstraněn na dobu mnoha staletí. Například zařízení pro likvidaci odpadu v bývalém solném dole Asse II v Německu trpí neustálým přítokem podzemní vody. Zdejších 220 000 m³ směsného zlikvidovaného odpadu a soli je nutno vyzvednout, což představuje složitý a velmi nákladný úkol. Množství je nyní kvůli smísení soli a radioaktivního odpadu pětinasobné oproti původnímu objemu odpadu. Pojem „konečná likvidace“ by se proto měl používat obezřetně.

Velké množství jaderného odpadu vznikne při vyřazování jaderných zařízení z provozu. Samotné energetické reaktory v Evropě bez zahrnutí ostatních zařízení v palivovém cyklu **mohou při vyřazování z provozu vyprodukovat minimálně dalších 1,4 milionu m³ nízko a středněaktivního odpadu.** To je přitom konzervativní odhad, protože zkušeností s vyřazováním z provozu je málo. V roce 2018 bylo v Evropě v provozu 142 jaderných elektráren (údaj nezahrnuje Rusko a Slovensko).

Pokračující produkce jaderného odpadu a připravované vyřazování jaderných zařízení z provozu je stále důležitějším tématem, protože **kapacita skladovacích zařízení v Evropě se pomalu zaplňuje, především v případě vyhořelého jaderného paliva.** Například ve Finsku je již kapacita úložišť vyhořelého paliva z 93 % zaplněná. Švédské decentralizované úložiště CLAB je plné z 80 %. Ne všechny země však hlásí využití kapacit mezikladů, takže ucelený přehled není možný.

Odhaduje se, že evropské reaktory za dobu své životnosti vyprodukují celkem zhruba 6,6 milionu m³ jaderného odpadu (není zahrnuto Rusko a Slovensko). Pokud by se naskládal na jedno místo, zaplnil by fotbalové hřiště do výšky 919 metrů, což je o 90 metrů výše, než měří nejvyšší budova na světě, Burdž Chalífa v Dubaji. Ve výpočtu je zahrnut odpad z provozu, vyhořelé jaderné palivo a odpad z vyřazení reaktorů z provozu. Tento odhad i výše uvedené odhady vycházejí z konzervativních předpokladů. Skutečné množství jaderného odpadu v Evropě je pravděpodobně větší. **Největším producentem jaderného odpadu v Evropě by s podílem 30 % byla Francie, následována Spojeným královstvím (20 %), Ukrajinou (18 %) a Německem (8 %).** Tyto čtyři země uchovávají přes 75 % veškerého jaderného odpadu v Evropě.

S výjimkou Ruska, které dosud aktivně produkuje uran, **mají Německo a Francie největší inventář jaderného odpadu z těžby uranu v Evropě.** Bývalý průmysl těžby uranu ve Francii oficiálně vyprodukoval 50 milionů tun pozůstatků po těžbě, ale nezávislí experti odhadují mnohem vyšší čísla. V bývalé Německé demokratické republice (NDR) se těžilo mnohem více uranové rudy než ve Francii. V současnosti zbytky po těžbě představují cca 32 km² průmyslových ploch, 48 výsypek s nízkoaktivní horninou o objemu 311 milionů m³ a čtyři odkaliště, v nichž se nachází celkem 160 milionů m³ radioaktivních kalů. EU v současnosti většinu uranu dováží, čímž vzniká velké množství jaderného odpadu mimo Evropu.



NÁKLADY A FINANCE

Téměř všechny vlády tvrdí, že uplatňují princip *znečišťovatel platí*, jenž odpovědnost za náklady na skladování a likvidaci jaderného odpadu a nakládání s ním přenáší na provozovatele. Ve skutečnosti však **vlády princip znečišťovatel platí neuplatňují důsledně.** Většina zemí jej vymáhá pouze u vyřazování z provozu, ačkoli v některých případech vláda za vyřazování z provozu převzala odpovědnost (například u reaktorů v bývalém Východ-

ním Německu). Bulharsko, Litva a Slovensko dostávají podporu na vyřazování z provozu z EU výměnou za odstavení svých starších jaderných elektráren sovětského typu. Většina zemí princip *znečišťovatel platí* nevymáhá u nákladů na likvidaci jaderného odpadu. V tomto případě národní správní orgány víceméně přebírají odpovědnost i ručení za dlouhodobé nakládání s odpady a jejich likvidaci. Provozovatel má však povinnost na financování dlouhodobých nákladů přispívat. Dokonce i v zemích, kde je princip *znečišťovatel platí* povinný ze zákona, se uplatňuje neúplně. Například provozovatel jaderné elektrárny finančně neručí za případné problémy vzniklé po uzavření jaderného zařízení; to platí u zařízení k likvidaci odpadů Asse II v Německu, kde vyzvednutí velkého množství odpadu hradí daňoví poplatníci.

Vlády řádně neodhadují náklady na vyřazování z provozu, skladování a likvidaci jaderného odpadu.

U všech odhadů nákladů se vyskytují zásadní nejistoty vzhledem k dlouhým časovým úsekům, nárůstům nákladů a odhadům diskontních sazeb (tempa nárůstu prostředků). Významným důvodem těchto nejistot je nedostatek zkušeností s vyřazováním z provozu a zejména s projekty likvidace odpadů. Projekty vyřazování z provozu včetně úplné demontáže, a tedy výsledných údajů, dosud dokončily pouze tři země – Spojené státy, Německo a Japonsko. K polovině roku 2019 bylo z celkem 181 odstavených energetických reaktorů ve světě zcela vyřazeno z provozu pouze 19, z nichž pouze 10 do stadia „zelené louky“. I tyto omezené zkušenosti však doprovází široké spektrum nejistoty, a to až do výše pětinasobku. Náklady na vyřazování z provozu v USA se u jednotlivých reaktorů lišily v rozmezí od 280 do 1 500 USD/kW. V Německu byl jeden reaktor vyřazen z provozu za 1 800 USD/kW a druhý za 10 500 USD/kW.

Mnoho vlád ve svých odhadech vychází ze zastaralých údajů. Řada ze zemí, o kterých zde referujeme, například Francie, Německo a USA, ve svých odhadech vychází ze studií ze 70. a 80. let minulého století, nikoli z údajů těch několika málo skutečných případů. Použitím zastaralých údajů, ve většině případů poskytovaných provozovateli, průmyslem či státními orgány, pravděpodobně dochází k podhodnocení nákladů a přehnaně optimistickým závěrům.

Mnoho vlád používá přehnaně optimistické diskontní sazby. Jedním z klíčových faktorů, jež vedou k podhodnocování nákladů vyřazování z provozu a nakládání s jaderným odpadem, je systematické používání přehnaně optimistických diskontních sazeb. Zásadním aspektem financování vyřazování z provozu a nakládání s odpady je očekávání, že finanční prostředky v čase porostou. Například v Německu se předpokládá, že prostředky ve výši 24 miliard eur vyhrazené na veškeré činnosti související s nakládáním s odpady do roku 2099 vzrostou téměř čtyřnásobně na 86 miliard eur. Uplatňované diskontní sazby se velmi různí a ne všechny země počítají s nárůstem nákladů, přestože je pravděpodobné, že porostou rychleji než obecná inflace.

K zaručení dostupnosti dostatečných finančních prostředků na vyřazování z provozu, nakládání s odpady a jejich likvidaci je nutné, aby programy financování vytvářely bezpečné podmínky pro udržení prostředků (přísně účelové financování). Je zároveň nutno zajistit, aby ukládané prostředky byly dostatečné k pokrytí skutečných nákladů. Některé státy splňují jednu z podmínek, ale ne druhou.

Mezi zeměmi panují značné rozdíly ve způsobu plánování financování nakládání s jaderným odpadem, jeho skladování a likvidace. Ne ve všech jaderných státech je povinnost externí správy prostředků na vyřazování z provozu a jejich oddělení od osoby provozovatele či držitele licence. V některých případech je vyřazování z provozu stále financováno prostřednictvím interních oddělených či omezených fondů, přestože peníze na dlouhodobé nakládání s odpady se ve většině zemí spravují externě. Financování vyřazování z provozu a skladování je složité – ve většině případů existuje v jedné zemi několik systémů financování.

Vlády vzhledem k odlišným národním přístupům ne vždy jasně definují, co vše pojem „vyřazování z provozu“ zahrnuje. Významným aspektem vyřazování z provozu je nakládání s jaderným odpadem, stejně jako nakládání s vyhořelým palivem. Do „vyřazování z provozu“ však není vždy zahrnuto obojí, takže porovnání nákladů mezi jednotlivými zeměmi je obtížné. **Procesy vyřazování z provozu, skladování a likvidace spolu úzce souvisí. Proto se jako nejvhodnější přístup k financování budoucích nákladů na tyto procesy jeví integrovaný externí oddělený a omezený fond.** Pro toto řešení se rozhodlo jen několik zemí, především Švédsko, Spojené království a Švýcarsko, ačkoli Švýcarsko má dva fondy: jeden na vyřazování z provozu a jeden na nakládání s odpady. **Žádná země dosud nezajistila veškeré financování vyřazování z provozu, skladování a likvidace svého jaderného odpadu.** S tímto zajištěním se budou muset vypořádat všechny země využívající jadernou energii.

K dnešnímu dni dosud žádná země neodhadla náklady přesně a zároveň nepokryla mezeru mezi zajištěnými finančními prostředky a odhadovanými náklady. Ve většině případů je vyčleněn pouze zlomek potřebných finančních prostředků. Například Švédsko má zatím vyčleněno finanční prostředky na vyřazování z provozu a nakládání s odpady ve výši dvou třetin odhadovaných nákladů, Spojené království na své reaktory v provozu méně než polovinu a Švýcarsko ani ne třetinu. Totéž platí u financování likvidace odpadů. Francie a USA mají vyčleněné finanční prostředky na likvidaci, jež by pokryly pouze zhruba třetinu odhadovaných nákladů. Vzhledem k tomu, že stále větší počet reaktorů se uzavírá před plánovaným termínem kvůli nepříznivým ekonomickým podmínkám, riziko nedostatečnosti finančních prostředků roste. Tyto předčasné uzavírky, schodek prostředků a rostoucí náklady některé provozovatele jaderných elektráren nutí k odkládání dalších uzavírek a vyřazování z provozu do doby, než naspoří další finance. Některé země, například USA či Japonsko, zvažují možnosti, jak by si na sebe jednotlivá zařízení mohla vydělat prostřednictvím zvýšených poplatků, dotovaných cen a prodlužování životnosti.



PŮVOD A KLASIFIKACE ODPADŮ

Definice jaderného odpadu se v jednotlivých zemích výrazně liší. Liší se tím, zda považují vyhořelé jaderné palivo a některé z jeho separovaných složek (plutonium a přepracovaný uran) za odpad, nebo za zdroj. Ve většině zemí se vyhořelé palivo a v něm obsažené plutonium považují za odpad kvůli nebezpečnosti a nákladnosti oddělování a využívání plutonia. Francie však definuje plutonium jako potenciální zdroj a přepracování vyžaduje ze zákona. Přepracováním se však problém s odpadem pouze odsouvá, stává se složitějším a prodražuje se.

Kategorizace jaderného odpadu se v jednotlivých zemích výrazně liší. V žádných dvou zemích neplatí stejný systém. Německo rozlišuje pouze odpad uvolňující teplo a ostatní. Spojené království klasifikuje

odpady na základě úrovně radioaktivity. Francie a Česká republika zohledňují jak úroveň radioaktivity, tak i dobu radioaktivního rozpadu (poločas rozpadu). Americký systém se od evropských zemí zásadně odlišuje tím, že klasifikaci odpadů staví na původu odpadu, nikoli na jeho vlastnostech.

Ohlašování množství vznikajícího jaderného odpadu se v jednotlivých zemích výrazně liší. Všechny země pravidelně zveřejňují údaje o množství produkovaného odpadu a o programech nakládání s ním. Ne všechny země však své údaje ohlašují detailně. Z oznamovaných údajů v některých případech nelze odhadnout objem odpadu (například na Slovensku). Některá národní hlášení (například nizozemské a belgické) neobsahují aktuální inventář vyhořelého jaderného paliva. Rusko neuvádí dostatek informací o klasifikaci a stavu svého inventáře jaderného odpadu.

Nejednotnost definic, kategorizace a ohlašování jaderného odpadu ztěžují sběr dat a porovnání jednotlivých zemí. V odlišnosti národních přístupů se odráží nejednotnost při nakládání s jaderným odpadem v jednotlivých zemích. To vše se děje navzdory mezinárodnímu úsilí o zavedení společných bezpečnostních zásad a o vytvoření recenzního procesu k hodnocení národních postupů. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) poskytuje obecný rámec pro klasifikaci jaderného odpadu. Společná úmluva o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady z roku 2001 je pro mnoho zemí základním východiskem, ale s diametrálně odlišnými postupy při realizaci. Evropská unie se svou směrnicí Euratom z roku 2011 pokusila systémy klasifikace odpadů ve svých členských zemích harmonizovat, ale pouze s omezenou úspěšností.

NEBEZPEČNOST PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A LIDSKÉ ZDRAVÍ



Jaderný odpad nese zdravotní riziko z několika důvodů. Prvním důvodem jsou uváděné zdravotní vlivy běžně vznikajících plyných a kapalných emisí z jaderných zařízení. Druhým jsou velmi vysoké celkové globální dávky ozáření při přepracování vyhořelého paliva. Třetím je potom nevyhovující a nestabilní stav většiny již vzniklého jaderného odpadu. Více než 90 % radioaktivity v jaderném odpadu obsahuje vysokoaktivní odpad

(VAO) v podobě vyhořelého jaderného paliva a vitrifikovaného odpadu z přepracování. Přesto na světě neexistuje ani jedna plně funkční lokalita pro konečnou likvidaci VAO. Přetrvávající praxe dlouhodobého skladování vyhořelého jaderného paliva v bazénech u jaderných elektráren (mokrý mezisklad) představuje významné riziko pro veřejnost a pro životní prostředí.

Zejména přepracováním vyhořelého jaderného paliva vznikají přístupnější a snáze šířitelné formy vysoce nebezpečných radioaktivních odpadů, ale i větší problémy jako například riziko šíření jaderných zbraní, riziko vysoké expozice pracovníků a veřejnosti a radioaktivní kontaminace životního prostředí.

K řádnému posouzení rizik souvisejících s jaderným odpadem a k vypracování klasifikace nebezpečnosti jsou jen omezené informace. Pouze několik zemí zveřejňuje informace o obsahu jednotlivých nuklidů v odpadu. Za sběr a zveřejňování těchto údajů jsou odpovědné v první řadě národní vlády či státní orgány. Tyto údaje jsou nezbytné k řádnému posouzení potenciální příčinné souvislosti mezi expozicí a účinky na lidské zdraví. Dosud neexistuje žádný komplexní rámec hodnocení nebezpečnosti jednotlivých radionuklidů v jaderném odpadu.

K posouzení rizik souvisejících s jaderným odpadem je nedostatek komplexních, kvalitních studií. Rizika lze vyvozovat z epidemiologických studií, které se ale vyznačují omezenou kvalitou. Některé studie například naznačují vyšší výskyt rakoviny, vzorek obyvatel nebyl ale dostatečný na to, aby se daly vyvodit statisticky významné výsledky. Menší studie lze kombinovat pomocí metaanalýz, čímž vznikají větší soubory dat, které mohou poskytovat statisticky významná zjištění. Metaanalýzy zdravotních dopadů

jaderného odpadu se však vyznačují takřka úplnou neexistencí. K posuzování rizik je dále nutné přesné měření dávek. Tato analýza celkově odhaluje podivuhodný nedostatek kvantitativních i kvalitativních informací o rizicích spojených s jaderným odpadem.

POZNÁMKA KOORDINÁTORA K METODICE A PROGNOZE

Zpráva o jaderném odpadu ve světě (WNWR) přináší mezinárodní porovnání způsobů nakládání s jaderným odpadem v jednotlivých zemích a v hlavních rysech popisuje současný stav a historické trendy. Zaměřením na Evropu začíná zaplňovat značné mezery ve výzkumu. Mimo Evropu panuje u postupů provozovatelů a vlád k vypořádání se s problematikou jaderného odpadu ještě větší rozmanitost. Na cestě k nalezení rozumného dlouhodobého řešení těchto konkrétních problémových odpadů existují značné společenské, politické, technické a finanční výzvy.

Autoři této zprávy, první svého druhu, museli čelit řadě překážek, aby mohli představit smysluplný přehled na základě velkého objemu ucelených faktických a číselných údajů. Jednotlivé země se liší nejen svými definicemi jaderného odpadu, klasifikací jednotlivých jeho typů a způsoby vykazování množství vznikajících odpadů. Výzkum rovněž odhalil nedostatek údajů a potýkal se s jazykovými překážkami, odlišnou terminologií v různých zemích a nejednotností zdrojů dat. Kvůli všem těmto faktorům bylo posouzení velmi složité.

Aby projektový tým tyto překážky překonal a vyhnul se chybám, vypracoval speciální přístup řízení jakosti pro přispěvatele, redaktory a korektory. K jeho prvkům patřil workshop v Bruselu (únor 2019), vypracování stylistické příručky pro autory (včetně terminologie), vytvoření šablony pro národní případové studie a zavedení podrobného recenzního procesu s několika smyčkami zpětné vazby. Hrubou verzi každé kapitoly vypracoval jediný autor s konkrétní odborností v dané oblasti; někteří z autorů zpracovali více než jednu kapitolu. K zajištění vysoce kvalitního redakčního procesu však nejsou kapitoly přisouzeny jednotlivým autorům. Pracovní verze každé kapitoly prošla čtyřstupňovým recenzním procesem:

- počáteční redigování šéfredaktorem a dvěma dalšími členy projektového týmu
- křížová recenze kapitol šéfredaktorem
- celková recenze celého textu šéfredaktorem, třemi dalšími členy projektového týmu a dvěma externími korektory
- a závěrečná recenze k vytvoření manažerského shrnutí

Vypracování zprávy představovalo ohromný úkol pro více než tucet expertů v tomto oboru po dobu jednoho a půl roku. Díky tomuto procesu se kvalita textu časem výrazně zlepšila. Autoři, redaktori i korektori se maximálně zasadili o ověření a překontrolování všech fakt. Ani tento intenzivní proces však nezaručuje, že zpráva neobsahuje chyby. Pokud je obsahuje, budeme vděční za opravy a návrhy k [zlepšení](mailto:info@worldnuclearwastereport.org) (info@worldnuclearwastereport.org).

Cílem tohoto prvního vydání zprávy **WNWR** je položit základy pro další výzkum dané problematiky. Objevily se nové otázky, z nichž některým by se mělo věnovat příští vydání této zprávy, například rizika, jež představuje prodlužování nevhodného dočasného skladování, a rizika blížícího se nedostatku kapacity meziskladů, šíření jaderných zbraní, hrozby terorismu a další bezpečnostní otázky při hodnocení rizik jaderné energie, postupy při těžbě uranu, uvolňování frakcí odpadu volným měřením a role účasti veřejnosti v procesech výběru lokalit. Další vydání by též mohlo rozšířit svůj geografický záběr o další jaderné země. Patří k nim Kanada, Čína, Finsko, Japonsko, Rusko, Jižní Korea, Španělsko a Ukrajina.



1 ÚVOD

Žádná země na světě zatím nemá v provozu konečné úložiště vysokoaktivního jaderného odpadu; jedinou zemí, která v současné době buduje trvalé úložiště tohoto nejnebezpečnějšího druhu radioaktivního odpadu, je Finsko. Většina zemí dosud nemá vypracovanou a realizovanou funkční strategii nakládání se všemi typy jaderného odpadu. Například Německo po čtyřech desetiletích průzkumů v jediné lokalitě nedávno začalo od nuly s úplně novým procesem vyhledávání lokality k zakopání svého nejradioaktivnějšího odpadu. Francouzská vláda jednostranně rozhodla o výstavbě hlubinného úložiště na severovýchodě Francie, ale od té doby trvají neutichající protesty veřejnosti. Soudy ve Švédsku zamítly technický koncept provozovatele a zdánlivě připravenou lokalitu a plán ukládání tak odložily.

Po více než 70 letech využívání jaderné energie k výrobě elektřiny se po celém světě nahromadilo velké množství jaderného odpadu. Neví se, kolik ho přesně je a jakých typů.

Na první pohled je zřejmé, že vlády po celém světě nejenže řadu let bojují s tvorbou strategií nakládání s odpady, ale též se značně liší v přístupu: jak určit lokalitu pro konečné úložiště, jak klasifikovat jaderný odpad, jaké bezpečnostní standardy vyžadovat od provozovatelů a jak zajistit financování k pokrytí stále rostoucích nákladů.

Spolu s blížícím se koncem životnosti reaktorů po celém světě a s útlumem jaderné energetiky v mnoha zemích – ať již aktivní politikou či „samovolně“ jejich neobnovou – budou nabývat na významu postupy vyřazování z provozu a demontáže jaderných zařízení, jež představují celostátní výzvy z hlediska nakládání s jaderným odpadem. Bezpečné vyřazení jednoho reaktoru z provozu trvá v průměru téměř 20 let, ale v mnoha případech i déle. Je zřejmé, že tento proces povede ke vzniku velkého množství dalších radioaktivních odpadů. Bez existence konečných úložišť je nutno většinu vyhořelého jaderného paliva a dalšího vysokoaktivního odpadu skladovat několik desítek let, což je náročné na bezpečnostní podmínky v meziskladech a dražší, než se původně odhadovalo.

Stručně řečeno, není zcela jasno v tom, které země světa se skutečně snaží řešit obtížnou problematiku nakládání s jaderným odpadem a jeho ukládání. To se tato zpráva pokouší změnit.

Cílem zprávy **WNWR** je významně přispět k chápání výzev spojených s jaderným odpadem, před nimiž stojí země po celém světě. K tomu popisuje národní a mezinárodní systémy klasifikace odpadů, rizika představovaná jednotlivými formami radioaktivního odpadu, množství v současnosti vznikajícího odpadu a jeho odhad do budoucna, jednotlivé národní strategie nakládání s odpady a jejich likvidace a mechanismy jejich financování.

KAPITOLA 2. PŮVOD A KLASIFIKACE ODPADŮ popisuje původ jaderného odpadu napříč celým palivovým cyklem od těžby uranu přes provoz, nakládání s vyhořelým palivem a vyřazování jaderných zařízení z provozu. Vysvětluje, jak se jednotlivé kategorie odpadu liší svým objemem a aktivitou a představuje mezinárodní systémy a národní příklady klasifikace jaderného odpadu.

KAPITOLA 3. MNOŽSTVÍ ODPADU podává přehled o ohlašovací povinnosti států v rámci klíčové mezinárodní dohody v oblasti jaderného odpadu, a to Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady (dále jen Společná

úmluva). Předkládá odhad množství odpadů, jež za normálních okolností vznikají v rámci palivového cyklu. Kapitola dále hodnotí stávající inventáře radioaktivního odpadu jednotlivých evropských států a vyvozuje jejich množství v budoucnu.

KAPITOLA 4. NEBEZPEČNOST PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A LIDSKÉ ZDRAVÍ představuje rizika plynoucí z jednotlivých kroků palivového cyklu: z těžby uranové rudy, její úpravy, obohacování a výroby paliva, z provozu jaderných elektráren, z přepracování vyhořelého jaderného paliva a vyřazování elektráren z provozu. Kapitola se zaměřuje na více aktivní odpady, hodnotí stav výzkumu těchto rizik a poukazuje na potenciální nebezpečí a problémy.

KAPITOLA 5. KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S ODPADY shrnuje přístupy k nakládání s jaderným odpadem, jež vlády v posledních desetiletích vypracovaly. Zkoumá různorodost postupů likvidace odpadu, kterými se jednotlivé země ubírají a jež se liší typem horninového prostředí, požadavky na úložiště nízké, středně a vysokoaktivních odpadů a též možnosti ukládání do hlubinných vrtů. Tato kapitola popisuje problémy meziskladů, jež jsou vzhledem k neexistenci provozuschopných konečných úložišť stále relevantnější.

KAPITOLA 6. NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ seznamuje s podstatou národních systémů financování vyřazování reaktorů z provozu, ukládání a likvidace odpadů. Porovnává metodiky tvorby odhadů nákladů a zároveň je porovnává s praxí ve zkoumaných zemích.

KAPITOLA 7. SITUACE V JEDNOTLIVÝCH ZEMÍCH nabízí výběr případových studií z České republiky, Francie, Německa, Maďarska, Švédska, Švýcarska, Spojeného království a Spojených států. Každý oddíl popisuje národní systém klasifikace, množství dotčených odpadů, zásady nakládání s odpady, jednotlivá zařízení k tomu sloužící a přístup k nákladům a financování.

S přihlédnutím k omezenosti rozpočtu projektu a k složitosti problematiky si zpráva **WNWR** musela stanovit priority v tom, čemu se může věnovat a čemu nikoli:

- Zaprvé se zpráva **WNWR** zaměřuje prostorově na Evropu a v ní na ty země, které produkují jaderný odpad.¹ Rusko a Slovensko však z důvodu nedostatečnosti údajů nejsou systematicky pojednány. Zpráva po přehledových kapitolách obsahuje osm konkrétních národních případových studií. Země jsme vybrali tak, aby zastupovaly širokou škálu charakteristik, například malé země (Česká republika, Maďarsko, Švýcarsko) i velké jaderné státy (Francie, Spojené království a Německo), staré (Francie, Německo, Švédsko, Spojené království) i nové členské země EU (Česká republika, Maďarsko) a též jednu nečlenskou zemi (Švýcarsko), země, v nichž je jaderná energetika v útlumu (Německo, Švédsko), i země, které stále jaderné elektrárny budují (Francie, Spojené království). Ve zprávě je zahrnuta i případová studie ze Spojených států, jež jsou největším jaderným státem světa, což umožňuje porovnání evropských strategií s přístupem dalšího významného aktéra. V evropské skupině několik států chybí, především Finsko (ve kterém probíhá výstavba jediného hlubinného úložiště na světě), Španělsko (významný aktér) a Rusko (velký provozovatel s mnoha zařízeními zajišťujícími přepracování a s velkou historickou zátěží). Na celosvětové úrovni by bylo zajímavé zahrnout Kanadu (zejména kvůli rozsáhlé těžbě uranu) a stejně tak některé významné producenty v Asii (Čínu, Indii, Jižní Koreu a Japonsko).
- Zadruhé se zpráva **WNWR** soustředí na jaderný odpad z elektroenergetiky. Nezabývá se radioaktivními odpady z takových odvětví, jako jsou vojenství, zdravotnictví, výzkum a průmysl. Toto zaměření bylo stanoveno z několika důvodů: a) množství odpadů vznikajících v komerční

¹ V Evropě je 17 zemí, jež produkují jaderný odpad z výroby elektřiny: Belgie, Bulharsko, Česká republika, Finsko, Francie, Německo, Maďarsko, Litva, Nizozemsko, Rumunsko, Rusko, Slovinsko, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko, Ukrajina a Spojené království.

jaderné energetice včetně vyřazování reaktorů a dalších zařízení v palivovém cyklu z provozu představují lví podíl radioaktivního inventáře; b) toto zaměření zahrnuje odpad v podobě vyhořelého jaderného paliva, jež je vysoce relevantní, neboť úroveň radioaktivity je zde mnohem vyšší než u kterékoli jiné činnosti; c) všechny země se snaží vytvořit postupy dlouhodobého nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Problém nakládání s odpady z jaderné energetiky tudíž představuje významné politikum. Radioaktivní odpady ze zdravotnictví, průmyslu a výzkumu jsou v této zprávě zmíněny jen okrajově, přestože by si jistě i ony zasloužily více pozornosti. Obdobně se pouze okrajově věnujeme historickému odpadu a zvláště odpadu pocházejícímu z vojenských operací, jako je výroba jaderných zbraní. Porovnávání zemí s vojenským odpadem se zeměmi, jež mají pouze odpad civilní, je velice složité. Veškerý jaderný odpad je radioaktivní, ale v této zprávě používáme pojem jaderný odpad (nikoli „radioaktivní odpad“), neboť se zaměřujeme na odpad vznikající z civilních jaderných činností (energetiky).

- Čtenář si proto možná povšimne, že zpráva **WNWR** nepřináší podrobnou analýzu řady témat souvisejících s jaderným odpadem, jež zasluhují další pečlivé zkoumání. Patří sem složitá témata, jako je přepracování odpadu a hrozba šíření jaderných zbraní. Možná by též stálo za to podívat se na roli, kterou jaderný odpad hrál v historii nejvýznamnějších jaderných havárií, například Kyšty, Three Mile Island, Černobyl či Fukušima. Zpráva **WNWR** se nezabývá analýzou společenských a politických otázek souvisejících se správou radioaktivních odpadů. Ačkoli naprosto uznáváme, že nakládání s jaderným odpadem a jeho likvidace nejsou pouze technické problémy a že zároveň představují významné společenské a politické výzvy, tato témata bohužel přesahují rámec tohoto prvního vydání zprávy.

Přístup zprávy **WNWR** je popisný, empirický, technický a analytický. Záměrem je zhodnotit stávající situaci, poskytnout co nejpresnější dostupné údaje a popsat přístupy různých provozovatelů z řad energetických firem, průmyslu a vlád a pojmenovat výzvy související s jaderným odpadem.

Zpráva si však neklade za cíl vést čtenáře k tomu, aby zaujal určitý technický či politický postoj, ani vypracovávat doporučení pro nejlepší přístup v praxi. Smyslem této analýzy není ani zkoumání konfliktů a důsledků vlastních jaderné politiky a rozhodnutí v oblasti nakládání s odpady. Základem této zprávy je hypotéza, že nakládání s radioaktivními odpady a jejich likvidace představují značné a stále se zvětšující výzvy a že chybí udržitelná dlouhodobá řešení. Navzdory mnoha plánům a prohlašovaným politickým záměrům zůstává obrovská nejistota a velkou část nákladů a výzev zdědí budoucí generace.

Zpráva **WNWR** by měla umožnit porovnání mezi jednotlivými zeměmi a monitorování v čase, protože usilujeme o periodický formát. Odhaluje zdroje nejistoty, jako jsou nesrovnalosti, rozpory a chybějící údaje. Přestože jsme se maximálně snažili o zajištění jednotnosti a přesnosti dat, nelze se vyhnout problémům s kategorizací, definicemi a informacemi, kvůli nimž je porovnání nákladů, rizik, inventářů a přístupů k nakládání s odpady často obtížné, někdy i nemožné.

Tato zpráva je první svého druhu. Zaměřením na Evropu se snaží začít zaplňovat značné mezery ve výzkumu. Mimo Evropskou unii a Evropu existuje ještě větší nejednotnost v klasifikaci odpadů a v postupech provozovatelů a vládních orgánů v oblasti jaderného odpadu. Na cestě k nalezení rozumného dlouhodobého řešení těchto konkrétních problémových odpadů existují značné společenské, politické, technické a finanční překážky.



2 PŮVOD A KLASIFIKACE ODPADŮ

Jaderný odpad je radioaktivní, avšak používáme pojem „jaderný odpad“, nikoli „radioaktivní odpad“, protože tato zpráva se obsahově zaměřuje na odpad pocházející z civilní jaderné energetiky. Pojem „jaderný odpad“ se používá i ve vojenském jaderném sektoru k označování odpadu z výroby jaderných zbraní nebo z pohonů námořních plavidel. Stejně tak se tato zpráva pouze okrajově dotýká mnohem menších objemů radioaktivního odpadu pocházejícího z průmyslových, výzkumných a zdravotnických činností, jenž obecně představuje menší riziko.

Ukazuje se, že selským rozumem nelze rozlišit, co je ještě odpad a co je užitečná látka či materiál. Například britská vláda používá velmi složité zásady určující, zda je látka odpadem. Podle této kategorizace může být odpadem to, co výrobce či vlastník zamýšlí vyhodit, co má malou či zápornou ekonomickou hodnotu nebo co je nebezpečné. Ve všech těchto případech však může být možné odpad recyklovat či opětovně využít, čímž se příslušná látka mění na „neodpad“ (anglicky „non-waste“).¹

Vztáhneme-li tyto zásady na jaderný sektor, hlavní otázkou bude, zda se některé z látek produkovaných jadernými reakcemi mají považovat za odpad, či za potenciální zdroje. Jednou z otázek například je, zda je ochuzený uran z obohacování uranu odpadem, či nikoli; zde přitom hovoříme o velkých objemech – stovkách tisíc tun. Hlavní rozpor se ale týká produktů, které vznikají při „přepřacování“ vyhořelého paliva z jaderných reaktorů. Přepřacování znamená rozdělení paliva na jeho jednotlivé složky: plutonium, uran a různé štěpné produkty a aktinoidy a další technologické odpady. Většina přepřacování, třeba ve Francii a v Británii, má jako zřetelně deklarovaný cíl opětovné využití separovaného plutonia, případně i přepřacovaného uranu, jako paliva v jaderných reaktorech. Tímto způsobem bylo již v různých zemích využito značné množství plutonia.

Plutonium se však stále může řadit mezi odpad kvůli své nesporné nebezpečnosti anebo své nízké či záporné ekonomické hodnotě. Zařazení plutonia a přepřacovaného uranu do kategorie odpadů či zdrojů se liší v jednotlivých zemích i v čase. V Británii byla v padesátých letech součástí ekonomických hodnocení jaderných projektů položka „kladný zůstatek plutonia“. Jejím smyslem bylo zohlednit předpokládanou hodnotu separovaného plutonia jako jaderného paliva budoucnosti.² O čtyřicet let později však tento raný optimismus pohasl. V polovině 90. let se již plutonium v obou předních zemích, které jej produkovaly, tedy v Británii a ve Francii, klasifikovalo jako „aktivum nulové hodnoty“ nebo jako položka „nulové účetní hodnoty“, což byla kategorie z ekonomického hlediska zcela nejasná. V desátých letech 21. století je status plutonia nejistý. Britský Úřad pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (Nuclear Decommissioning Authority, NDA) prohlásil, že by dal přednost opětovnému využití plutonia jako složky jaderného paliva budoucnosti. Prohlásil též, že malý objem plutonia by se musel dále považovat za odpad, protože se nehodí k přidávání do směsného oxidického paliva. Pokud se opětovné využití ukáže jako neproveditelné, bude snad možné rozšířit imobilizaci plánovanou pro kontaminované plutonium na celou zásobu, čímž by se plutonium obecně stalo jednoznačně odpadem. Celkové čisté výdaje na nakládání s plutoniem ve Velké Británii se každopádně předpokládají ve výši minimálně 3 miliard liber

¹ Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) 2012, Guidance on the legal definition of waste and its application, cit. 11. června 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69590/pb13813-waste-legal-def-guide.pdf

² Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 2014, *Separated plutonium: progress on approaches to management*, position paper, cit. 11. června 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457874/Progress_on_approaches_to_the_management_of_separated_plutonium_position_paper_January_2014.pdf

(3,8 miliard dolarů).³ Ve Francii, jež je jedinou další zemí, kde se plutonium odděluje ve velkém množství ke komerčnímu využití, je přepracování nadále povinné ze zákona.

Přestože se plutonium v některých případech může krátkodobě jevit jako zdroj, v současné době se jako palivo využívá téměř výlučně pouze ve formě směsného oxidického paliva (MOX), takže opětovné využívání plutonia jednoduše vede ke vzniku dalšího vyhořelého jaderného paliva. Vyhořelé palivo typu MOX je kromě toho radioaktivnější a jeho likvidace je obtížnější než v případě čistě uranového vyhořelého paliva. Jinak řečeno, přepracováním se problém s odpadem pouze odsouvá a stává se složitějším.

Nakládání s různými produkty jaderných reakcí, ať jsou oficiálně klasifikovány jako odpad nebo ne, je politicky a společensky kontroverzní a obnáší potenciálně vysoká rizika.

Smyslem tohoto pojednání není rozhodnout o správném zařazení plutonia ani jiných materiálů. Jde spíše o pochopení skutečnosti, že otázka nakládání s různými produkty jaderných reakcí, ať jsou oficiálně klasifikovány jako odpad nebo ne, je politicky a společensky kontroverzní a obnáší potenciálně vysoká rizika. Přestože se tato kapitola zabývá celou škálou odpadních produktů vznikajících při jaderných reakcích, zvláštní důležitost vyhořelého paliva spočívá v tom, že je stamilionkrát radioaktivnější než nové palivo.⁴ Odpadu z vyhořelého paliva je proto nutné věnovat zvláštní pozornost.

2.1 DRUHY ODPADU: JADERNÝ PALIVOVÝ CYKLUS

Jaderný odpad vzniká ve všech fázích jaderného palivového cyklu, jenž se někdy označuje i pojmem *jaderný palivový řetězec*. Přestože jako primární jaderné palivo lze použít thorium, v praxi je dominantním zdrojem paliva v jaderné energetice uran. Všechny odpad, který zde popisujeme a klasifikujeme, v konečném důsledku pochází ze stávajícího způsobu využívání uranu při výrobě elektrické energie. Nebereme tudíž v úvahu žádný z druhů odpadu, který by vznikal, kdyby se někdy stala realistickým zdrojem energie jaderná fúze.

Posloupnost fází jaderného palivového cyklu je následující (viz obr. 1):

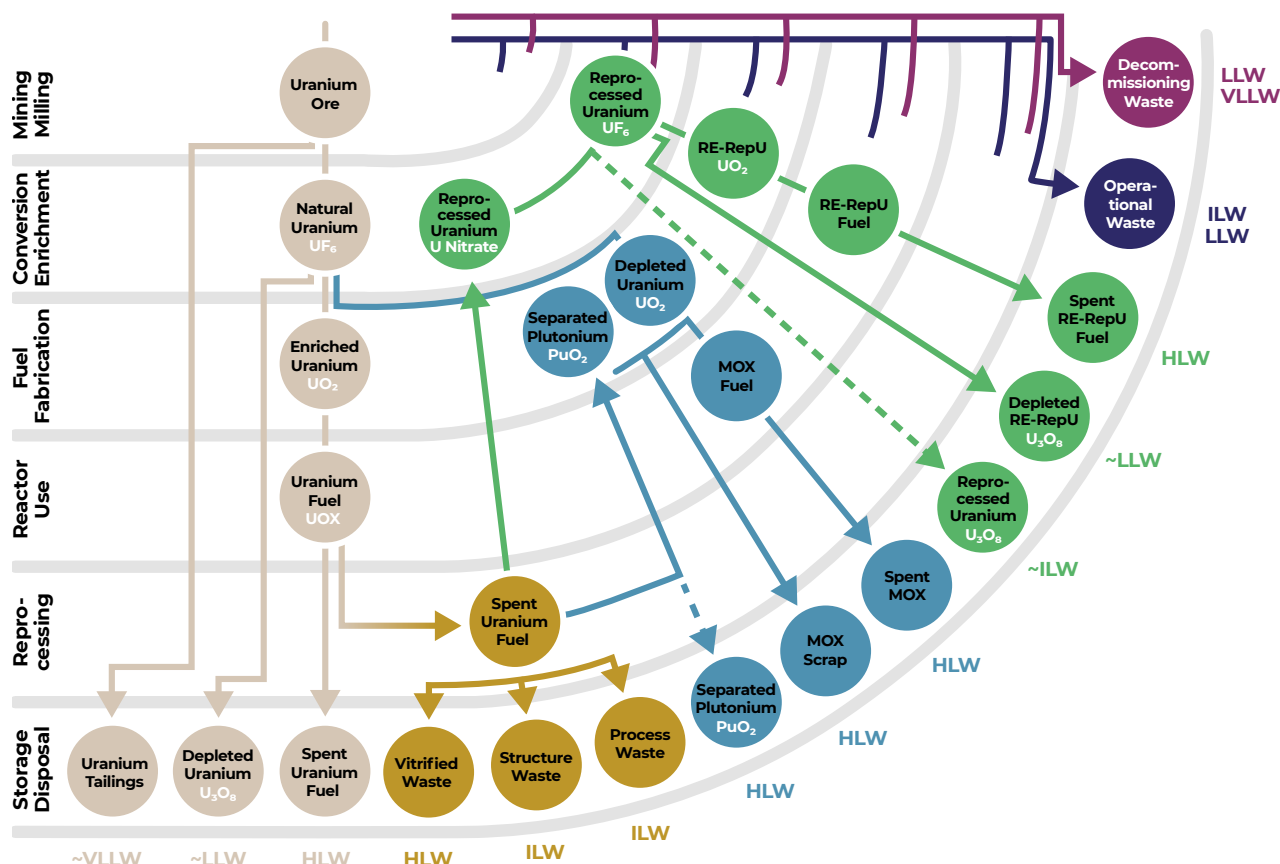
1. Těžba, úprava a obohacování uranu a výroba paliva.
2. Ozáření jaderného paliva v energetickém či výzkumném reaktoru (štěpná jaderná reakce).
3. Nakládání s vyhořelým palivem, přepracováním či nikoli.
4. Vyřazení reaktoru z provozu.

Činnosti v 1. fázi se často nazývají „počátkem“ palivového cyklu. 3. a 4. fáze se často označují jako „konec“ palivového cyklu.

³ Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 2010, Plutonium: credible options analysis (redacted), - cit. 11. června 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457827/Plutonium_-_credible_options_analysis_2010__redacted_.pdf

⁴ Open University 2011, „Inside Nuclear Energy Science“ . Short Module, ST174, Milton Keynes.

OBR. 1 | Jaderný palivový cyklus



Zdroj: WISE-Paris

Odpad, který v těchto jednotlivých fázích vzniká, může být plyný, kapalný či pevný. U některých forem plyného odpadu, například radonu v podzemních uranových dolech, se měření provádějí zřídka a řízení situace spočívá spíše ve snižování expozice než v měření nebo zachycování stávající úrovně radiace, přestože plyny jako radon jsou extrémně škodlivé. V některých případech se radioaktivita ze spalin filtruje a spolu s kapalným odpadem se vstřikuje do moře, což je další forma snižování bezprostřední expozice bez omezení toxicity na vstupu. Pevné formy odpadu jsou obecně nejstabilnější a nakládání s nimi je nejsnazší, takže podstatným cílem politik je často převádět méně stabilní formy odpadu na lépe zvladatelné pevné formy. Například jedním z odpadních toků při přepracování vyhořelého paliva je varíci a radioaktivní kyselina dusičná, která poté prochází odpařováním a mění se na skelný produkt.

Ve čtyřech fázích jaderného palivového cyklu vzniká celá škála druhů odpadu:

TĚŽBA, ÚPRAVA A ZPRACOVÁNÍ URANU A VÝROBA PALIVA

Významným druhem odpadu a vážným zdravotním rizikem je plyn radon v podzemních uranových dolech. Plyn radon je alfažáříčem a rozpadá se na pevné polonium, které má podobné vlastnosti. Dalším zdrojem radioaktivity při všech typech těžby uranu je trvalá přítomnost uranu, který se rozkládá na radon, v jalovině na výsypkách horniny vyřazené při důlním provozu. Tato jalovina se vyskytuje ve velkém množství a může způsobovat závažné zdravotní problémy, zvláště v rozvojových zemích, kde jsou postupy nakládání s odpady někdy žalostné. Protože radon se uvolňuje jako plyn, není možné jej přímo zachycovat. V dalších fázích zpracování uranu (úprava, obohacování a výroba paliva) vzniká velmi omezené množství odpadu.

ŠTĚPNÁ JADERNÁ REAKCE (OZÁŘENÍ PALIVA)

V procesu štěpné reakce vzniká značné množství tzv. technologického odpadu, obecně při údržbě, doplňování paliva a přepravě vyhořelého paliva. K technologickému odpadu patří: zbytky palivových článků včetně oceli a různých slitin; součásti jádra či tepelných výměníků z údržby, oprav či rekonstrukcí, jež jsou často vysokoaktivní; kontaminovaný kapalný odpad a kaly; pryskyřice a filtry; a oděvy a zařízení, obecně o nízké radiační úrovni.

NAKLÁDÁNÍ S VYHOŘELÝM PALIVEM

Při štěpné jaderné reakci v reaktorech vzniká ze všech oblastí jaderné technologie zdaleka nejvíce radioaktivity. Ozařováním vzniká celá škála štěpných produktů a aktinoidů, jež radioaktivitu původního uranového paliva zvyšují více než stamilionkrát. Nakládání s vyhořelým palivem, buď jeho přepracováním, nebo prohlášením za odpad pro přímé odstranění, je tudíž zdaleka nejvýznamnější činností v oblasti likvidace odpadů vznikajících v rámci celého jaderného palivového cyklu. Vyhořelé palivo je nutno zpočátku skladovat několik let ve vodě v chladicím bazénu uvnitř reaktorové budovy nebo v sousední budově, čímž se uvolní teplo z rozpadu. Voda též zajišťuje určité odstínění radiace.

Vyhořelé palivo poté lze přepravit do centrálního zařízení pro mokré či suché skladování. Hlavními centry mokrého skladování jsou přepracovací závody, jako je Sellafield (Spojené království), La Hague (Francie) a Ozjorsk (Rusko). V posledních dvaceti letech je běžnější dočasné skladování vyhořelého paliva v suchých kontejnerech především v jaderných elektrárnách.

Při přepracování paliva vzniká velmi značné množství dalších nízko až středněaktivních odpadů, takže celkový objem odpadu, s nímž je nutno naložit (ale nikoli celková aktivita), je mnohem větší, než když se s vyhořelým palivem nakládá přímo jako s odpadem. Zbytkové štěpné produkty a aktinoidy v kapalně formě (po separování uranu a plutonia) se poté před zamýšlenou další likvidací odpařují a přeměňují na pevné látky procesem vitrifikace. Vyřazování přepracovacích závodů z provozu bude navíc velmi nákladné. Tam, kde se vyhořelé palivo považuje přímo za odpad, se před likvidací uzavírá do pouzder.

VYŘAZOVÁNÍ REAKTORŮ (A ZAŘÍZENÍ PALIVOVÉHO CYKLU) Z PROVOZU

Kompletní vyřazení z provozu (například úplná demolice) zatím proběhlo jen u velmi malého počtu reaktorů či jiných jaderných zařízení, a to i v případě, že samotné reaktory jsou odstaveny desítky let. Jedním z důvodů tohoto prodlení, samozřejmě kromě odsouvání výdajů, je poměrně krátký poločas rozpadu některých radionuklidů v těchto stavbách obsažených, takže je praktičtější s demolicí počkat. Kvůli prodlení se však mohou zkomplikovat fyzické práce na demontáži a může dojít i ke ztrátě relevantních dovedností a schopnosti vykonávat dohled. Reaktorové budovy ve svých jádrech obsahují značná množství radioaktivity, neboť řada komponent je kontaminována radioaktivitou z paliva, jež v nich bylo ozařováno. Velké množství materiálů, jako je ocel či beton vznikající při vyřazení z provozu, tudíž představuje radioaktivní odpad, přestože jeho celková aktivita je nízká v porovnání s aktivitou samotného vyhořelého paliva.

2.2 MNOŽSTVÍ ODPADŮ A JEJICH AKTIVITA

Celkové množství a úroveň aktivity těchto jednotlivých kategorií odpadu jsou vzájemně nepřímo úměrné. Jinak řečeno, nízkoaktivního odpadu vzniká velký objem, který však k celkovému inventáři radioaktivity přispívá velmi málo. A naopak vysokoaktivní odpad (VAO) se vyskytuje ve velmi malém objemu, ale představuje převážnou část celkové radioaktivity. Tento výsledek není překvapivý vzhledem k tomu, že radioaktivita vyhořelého paliva, z něhož VAO pochází, je více než stamilionkrát větší než radioaktivita nového uranového paliva.⁵

Nízkoaktivního odpadu vzniká velký objem, který však k celkovému inventáři radioaktivity přispívá velmi málo. A naopak vysokoaktivní odpad se vyskytuje ve velmi malém objemu, ale představuje převážnou část celkové radioaktivity.

Přiblížit si to můžeme na inventáři odpadu, který zvažovala britská Komise pro nakládání s radioaktivním odpadem (CoRWM), když začátkem 21. století prováděla přezkoumání britské politiky nakládání s jaderným odpadem.⁶ Vysokoaktivní odpad (zde zahrnoval vyhořelé palivo plus VAO vzniklý oddělováním při přepracování) představoval 96,8 % celkové radioaktivity v inventáři, ale pouze 2,6 % jeho objemu. SAO, kterého byl mnohem větší objem, obsahoval pouze 3,2 % celkové radioaktivity, přičemž příspěvek NAO k celkové úrovni aktivity byl nižší než 0,001 %.

2.3 SYSTÉMY KLASIFIKACE A KATEGORIE ODPADU

Systémy klasifikace jaderného odpadu mohou odpad rozlišovat podle tří charakteristik:

- podle úrovně radioaktivity: nízko, středně a vysokoaktivní
- podle délky radioaktivního rozpadu: s krátkou a dlouhou dobou rozpadu
- podle druhu nakládání: typ zařízení pro skladování/likvidaci

První dvě charakteristiky se týkají nedílných vlastností samotného odpadu, zatímco třetí vychází z rozhodnutí o nakládání s odpady. V praxi se všechny systémy klasifikace vztahují na úroveň radioaktivity a způsob nakládání, přičemž některé ignorují doby rozpadu.

I přes léta snah o shodu na jednotném klasifikačním systému jaderného odpadu v EU⁷ stále zůstávají v jednotlivých státech rozdílné systémy klasifikace, z nichž některé shrnujeme v následujícím textu. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) pro klasifikaci poskytuje alespoň obecný rámec v podobě Všeobecných bezpečnostních zásad klasifikace radioaktivních odpadů.⁸ Ty představují základní východisko a státy bez programů jaderné energetiky je přímo přebírají téměř bez výjimky. Národní klasifikace států s významnými jadernými programy často odkazují na systém MAAE za účelem porovnatelnosti.

MAAE stanoví šest druhů odpadu, přičemž se zaměřuje na odpady pevné. O strategiích nakládání s prvními čtyřmi kategoriemi odpadu, jež jsou popsány níže (až po nízkoaktivní odpad včetně) se disku-

⁵ Open University, 2011.

⁶ Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM) 2006, Managing our Radioactive Waste Safely: CoRWM's Recommendations to Government doc 700, červenec, str. 20.

⁷ LLW Repository Ltd. 2016. „International Approaches to Radioactive Waste Classification.” NSWP-REP-134, říjen.

⁸ International Atomic Energy Agency (IAEA) 2009, Classification of Radioactive Waste: General Safety Guide GSG-1, cit. 11. června 2019, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf

tuje pouze v omezené míře. Zatímco některé země mají dlouhodobé strategie nakládání s odpady, které do těchto kategorií spadají (například Británie a Francie), jiné usilují přinejlepším o strategie skladování v meziskladech (například Německo a Japonsko).

Kategorie, u nichž se objevují politické rozpory a pro něž nikde na světě dosud neexistuje žádné odsouhlasené a provozuschopné zařízení k dlouhodobému nakládání, jsou kategorie středněaktivního a zejména vysokoaktivního odpadu. MAAE z hlediska možností nakládání s danými kategoriemi odpadů předpokládá, že tyto druhy budou vždy řešeny nějakou formou likvidace na pevnině. Patří sem likvidace na povrchu a široká škála podpovrchových možností, k nimž se řadí i „likvidace“ v hlubinných úložištích.

2.3.1 KLASIFIKACE PODLE MAAE

Systém MAAE zohledňuje všechny tři výše uvedené charakteristiky a definuje následujících šest kategorií:

NEPODLÉHAJÍCÍ ODPAD

Tato kategorie se týká velmi nízkých koncentrací radionuklidů, u nichž podle MAAE nejsou zapotřebí žádná konkrétní opatření radiační ochrany. Bezpečnostní zásady MAAE navrhuji, že tento odpad je vhodné vyjmout z regulace⁹, prohlásit za nepodléhající odpad nebo uvolnit. Tento materiál tedy v zásadě lze přesouvat z jedné země do druhé bez jakéhokoli regulačního dohledu.

ODPAD S VELMI KRÁTKOU DOBOU ROZPADU (VKDO)

Tato kategorie obsahuje radionuklidy s velmi krátkým poločasem rozpadu, které se často skladují do té doby, než je lze převést do kategorie nepodléhající odpad díky nízké úrovni aktivity. Jako VKDO se klasifikují některé plynné a kapalné odpady. Obecně doporučovanou strategií nakládání je skladování do rozpadu a má se uplatňovat u radionuklidů s poločasem rozpadu 100 dní nebo kratším.

VELMI NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD (VNAO)

Značné množství odpadu v této kategorii pochází z provozu a vyřazování jaderných zařízení a také jde o odpad jaderných zařízení a dále z těžby a zpracování uranových rud. Při nakládání s tímto odpadem je na rozdíl od obou výše uvedených kategorií nutno v plné míře zohlednit požadavky radiační ochrany a bezpečnosti. Typické úrovně aktivity radionuklidů spadajících do této kategorie jsou od desetinásobku do stonásobku úrovně nepodléhajícího odpadu. MAAE navrhuje, aby bezpečné nakládání s tímto odpadem zahrnovalo řízená povrchová skládkovací zařízení podléhající aktivní i pasivní institucionální kontrole po značně dlouhou, avšak přesně neurčenou dobu.

Systémy klasifikace v mnoha zemích nerozlišují kategorie nepodléhající odpad a VKDO a některé, jako například USA, odmítají představu, že nějaký radioaktivní materiál by měl být osvobozen od trvalého regulačního dohledu.

NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD (NAO)

Nízkoaktivní odpad (NAO) je definován jako odpad s úrovní radioaktivity dostatečně nízkou k likvidaci v blízkosti zemského povrchu nebo pod ním, pokud lokalita určená k likvidaci odpadu zajišťuje spolehlivé oddělení od prostředí, podle slov MAAE po „omezenou dobu“. Tato omezená doba však v praxi většinou znamená až několik set let. V řadě zemí platí v podstatě náhodný předpoklad, že institucionální kontrola musí být spolehlivá po dobu do 300 let. U odpadů z těžby a zpracování uranu však úroveň aktivity klesá pomalu, takže kontrolu je nutno stanovit po dobu delší než 300 let (a likvidace v přípovrchových zařízeních je v rozvojových zemích vzácností).

⁹ In the US, the term Below Regulatory Control (BRC) is used for this categorization.

Do této kategorie spadá velmi široké spektrum odpadu, jenž může obsahovat nízkou úroveň radionuklidů s dlouhou dobou rozpadu. Mezi materiály, které do kategorie NAO běžně spadají, patří oděvy, obalový materiál, půda a významné produkty vyřazování reaktorů z provozu, například ocel a potrubí. MAAE doporučuje podle konkrétního složení odpadu postupy likvidace v rozmezí od povrchového uskladnění po zakopávání do hloubky až 30 metrů. Přesné hranice mezi kategorií NAO a následující kategorií (středněaktivní odpad, SAO) nejsou všeobecně stanoveny, protože velmi záleží na charakteristice jednotlivých druhů zařízení k likvidaci odpadů. Některé země provozují společnou likvidaci NAO a SAO s krátkou dobou rozpadu a zároveň plánují oddělenou likvidaci SAO s dlouhou dobou rozpadu. Většina zemí má k dispozici provozuschopná zařízení k nakládání s odpady ve výše uvedených kategoriích.

STŘEDNĚAKTIVNÍ ODPAD (SAO)

Jedná se o odpad na vyšší úrovni aktivity než NAO obsahující relativně velké množství radionuklidů s dlouhou dobou rozpadu. Je tudíž nutno navrhovat a budovat zařízení, jež budou v dlouhodobém horizontu nezávislé na institucionální kontrole. Ze SAO se však neuvolňuje teplo z radioaktivního rozpadu, takže při nakládání s ním není třeba teplo zohledňovat. Běžnými zdroji SAO jsou pouzdra palivových článků, některé součásti reaktorů během vyřazování z provozu a různé druhy kalů z čištění radioaktivních odpadních vod. Velké objemy SAO vznikají též při přepracování vyhořelého paliva.

Dnes se tento odpad ve většině případů balí do cementových materiálů a ukládá ve velkých sudech či kontejnerech, nejčastěji ocelových. Ve Francii vznikly z prvotních pokusů o komerční přepracování paliva pocházející desítky tisíc sudů odpadu zalitých do bitumenu, jež nejsou vhodné pro konečnou likvidaci a vyžadují proto složitou a drahou repasi. MAAE doporučuje likvidaci v hloubce od několika desítek do několika stovek metrů pod terénem v lokalitách, kde mají přírodní geologické překážky a vybudované překážky potenciál zajistit dlouhou dobu izolace od povrchového prostředí.

VYSOKOAKTIVNÍ ODPAD (VAO)

Vysokoaktivní odpad (VAO) je kategorie zahrnující nejradioaktivnější odpady. Obsahuje velké koncentrace radionuklidů s krátkou i dlouhou dobou rozpadu. Je rovněž definován jako odpad, z něhož se uvolňuje velké množství tepla z radioaktivního rozpadu a to bude pokračovat po dlouhou dobu do budoucnosti. Při návrhu způsobů nakládání s ním je tudíž nutno brát v potaz odvádění tepla. Řada oficiálních i nezávislých expertů se domnívá, že je nutná hlubinná likvidace ve stabilních geologických útvarcích a s použitím několikanásobných doplňujících vybudovaných překážek, jež pomohou při úsilí zajistit minimalizaci možnosti návratu radioaktivity do biosféry.

VAO v podstatě vzniká při štěpné jaderné reakci (ozařování jaderného paliva) a nakládá se s ním buď jako s vyhořelým palivem prohlášeným přímo za odpad, nebo jako s toky aktinoidů a štěpných produktů separovaných při přepracování.

2.3.2 KLASIFIKACE PODLE EU

Evropská unie má nad členskými zeměmi v této oblasti určité regulační pravomoci. Směrnice o nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem z roku 2011 stanoví všeobecné cíle pro nakládání s odpady.¹⁰ EU sice nemá pravomoc požadovat po členských zemích jednotný proces klasifikace odpadů, ale přesto údaje o odpadech z členských zemí použila k vytvoření vlastního systému vycházejícího z výše popsaných kategorií podle MAAE. Evropská komise navíc již v roce 1999 vydala doporučení pro systémy klasifikace odpadů pro všechny členské země na základě systému MAAE (jež poté novelizovala v roce

¹⁰ Evropská unie (EU) 2011, směrnice Rady 2011/70, kterou se stanoví rámec Společenství pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem, 19. července.

2008).¹¹ Systém obsahoval pět následujících kategorií:

- přechodný odpad (ekvivalent nízkoaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu)
- velmi nízkoaktivní odpad
- nízko a středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu (poločas kratší než 31 let)
- nízko a středněaktivní odpad s dlouhou dobou rozpadu (poločas delší než 31 let)
- vysokoaktivní odpad (uvolňující teplo)

Nejdůležitější rozdíl oproti systému MAAE je rozdělení NAO a SAO na kategorii s krátkou a dlouhou dobou rozpadu, což má důsledky pro strategie nakládání s odpadem. Žádná z členských zemí se však tohoto doporučeného systému nedrží přesně, ačkoli Francie, Švédsko a Česká republika se mu blíží, zvláště ve vztahu k rozlišení odpadu s krátkou a s dlouhou dobou rozpadu.

Pro ilustraci rozmanitosti národních systémů klasifikace používaných v EU níže uvádíme čtyři příklady. Vybrali jsme je podle dvou kritérií: existuje značné množství odpadu všech úrovní aktivity a dokládá rozmanitost přístupů jednotlivých národních vlád k otázkám klasifikace. V EU samozřejmě existuje i řada jiných systémů. Mimo EU je rozmanitost klasifikace odpadů ještě větší. Následuje proto stručný popis dalšího národního systému země se značným objemem odpadů, tedy Spojených států. Ten dokládá ještě větší rozmanitost systémů klasifikace mimo EU.

2.3.3 PŘÍKLADY NÁRODNÍCH KLASIFIKACÍ

NĚMECKO: Německý systém klasifikace je relativně jednoduchý.¹² Rozlišuje dvě hlavní kategorie na základě požadavků na likvidaci: odpad uvolňující teplo a všechny ostatní odpad, definovaný jako odpad se zanedbatelným uvolňováním tepla. První kategorie odpovídá kategorii VAO podle MAAE (zahrnuje odpad z přepracování vyhořelého paliva i vlastní vyhořelé palivo), zatímco druhá kategorie je v podstatě kombinací kategorií SAO a NAO podle MAAE. Politika v Německu hlásá likvidaci obou kategorií odpadu v hlubinných úložištích, ale v oddělených lokalitách a s jinými konstrukčními charakteristikami.

FRANCIE: Francouzský systém je složitější než německý. Používá pět hlavních kategorií, přičemž kategorii VKDO ignoruje.¹³ Francouzský systém doplňuje systém podle MAAE o poločas rozpadu každé kategorie. Kategorie jsou:

- velmi nízkoaktivní odpad
- nízko a středněaktivní odpad (s krátkou dobou rozpadu)
- nízkoaktivní odpad (s dlouhou dobou rozpadu)
- středněaktivní odpad (s dlouhou dobou rozpadu)
- vysokoaktivní odpad (uvolňující teplo)

V tomto systému pouze první a poslední kategorie (VNAO a VAO) všeobecně odpovídají klasifikaci podle MAAE. Ve vztahu k NAO a SAO francouzský systém zohledňuje dlouhodobost potenciálních škod, které představují jednotlivé druhy odpadu a jejich počáteční úroveň aktivity, takže oproti MAAE vytváří další dělení u SAO i NAO. Francouzský systém v souladu se zásadami EU kategorizuje odpad jako s krátkou

¹¹ European Commission (EC), 1999, Commission Recommendation of 15 September 1999 on a classification system for solid radioactive waste (SEC [1999] 1302 final) 99/669/EC, EURATOM, o. Official Journal L 265, 13/10/1999, pp. 37-45, viewed 11 June 2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:51999SC1302>

¹² LLW Repository Ltd. 2016, International Approaches to Radioactive Waste Classification. NSWP-REP-134, viewed 11 June 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/697667/NWP-REP-134-International-Approaches-to-RW-Classification-Oct-2016.pdf

¹³ French Authority for Nuclear Safety (ASN), with Ministère de la Transition Écologique et solidaire, undated. French National Plan for the Management of Radioactive Materials and Waste 2016-2018.

dobou rozpadu, pokud je jeho poločas rozpadu do 31 let, jako s dlouhou dobou rozpadu, pokud poločas rozpadu překročí 31 let. Tato druhá dimenze, tedy poločas rozpadu, souvisí s francouzskou politikou likvidace odpadu. U VAO a SAO (s dlouhou dobou rozpadu) se tudíž předpokládá likvidace v hlubinných úložištích, zatímco se SAO (s krátkou dobou rozpadu) a NAO (s dlouhou dobou rozpadu) se má nakládat v povrchových úložištích.

SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ: Britský systém je oproti Francii a Německu těsněji spjatý se systémem MAAE.¹⁴ Čtveřice kategorií odpovídá posledním čtyřem shora popsáním kategoriím podle MAAE:

- velmi nízkoaktivní odpad
- nízkoaktivní odpad
- středněaktivní odpad
- vysokoaktivní odpad (uvolňující teplo, většinou produkty přepracování)

Přestože jde o hlavní funkční kategorie odpadu v Británii, existuje i druhé dělení, úzce spjaté s aktuálními způsoby likvidace:

- odpad o vyšší aktivitě, definovaný jako VAO, SAO a ta část NAO, kterou v současné době nelze likvidovat. V současné době u tohoto odpadu není stanoven způsob dlouhodobého nakládání;
- odpad o nižší aktivitě zahrnující veškerý NAO a VNAO, jenž se dnes kompletně likviduje v povrchových zařízeních.

ČESKÁ REPUBLIKA: Česká republika má největší objem jaderného odpadu ze všech novějších členských zemí EU. Tamní systém klasifikace je obdobný jako ve Francii a podobá se doporučením EU.¹⁵ Rozlišuje následující kategorie

- přechodný odpad (ekvivalent nízkoaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu)
- velmi nízkoaktivní odpad
- nízkoaktivní odpad (s krátkou dobou rozpadu)
- středněaktivní odpad (s dlouhou dobou rozpadu)
- vysokoaktivní odpad (uvolňující teplo)

SPOJENÉ STÁTY: Spojení státy mají dva zcela oddělené soubory kategorií: jeden pro odpad vojenského původu a druhý pro odpad civilního původu. Americký systém pro odpad civilního původu rozlišuje pět kategorií:¹⁶

- jalovina z mletí
- nízkoaktivní odpad, který se dále dělí na čtyři další kategorie (z nichž jedna by podle systému MAAE odpovídala SAO)
- transuranový odpad
- vyhořelé jaderné palivo
- vysokoaktivní odpad: produkty přepracování vyhořelého paliva

¹⁴ LLW Repository Ltd. 2016. International Approaches to Radioactive Waste Classification. NSWP-REP-134, říjen, cit. 11. června 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/697667/NWP-REP-134-International-Approaches-to-RW-Classification-Oct-2016.pdf

¹⁵ LLW Repository Ltd. 2016.

¹⁶ Blue Ribbon Commission 2012, Report to the Secretary of Energy, leden 2012, cit. 2. srpna 2019, str. 96, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf

Přestože americký systém rozlišuje některé kategorie podobné kategoriím MAAE (například VAO), od všech ostatních se zásadně liší tím, že klasifikaci staví na původu odpadu, nikoli na jeho vlastnostech či představovaných rizicích. Kategorie NOA rovněž zahrnuje materiál, který by podle MAAE spadl do VNAO a VKDO, protože USA neuznávají žádný radioaktivní odpad, který by nepodléhal regulační kontrole. Čtyři kategorie NAO souvisejí s mírou, do jaké je konkrétní odpad nutno chránit před veřejností a nechtěným vstupem na skladovací lokalitu. A konečně kategorie vedlejší produkty zahrnuje všechny možné materiály z reaktorů či z výroby paliva (kromě uranu a plutonia) a jalovinu z těžby uranu.

2.4 SHRnutí

Ukazuje se, že nelze přesně rozlišit, co je odpad. Některé země definují určité produkty činnosti jaderných reaktorů jako odpad, jiné jako potenciální zdroje. Například plutonium se v mnoha zemích považuje za odpad kvůli své nebezpečnosti a nízké či záporné ekonomické hodnotě. Ve Francii je však ze zákona povinné přepracování, takže se zde odděluje velké množství plutonia pro komerční využití. Přepracováním se však problém s odpadem pouze odsouvá a stává složitějším. Nakládání s různými produkty jaderných reakcí, ať jsou oficiálně klasifikovány jako odpad nebo ne, je politicky a společensky kontroverzní a obnáší potenciálně vysoká rizika.

Systémy klasifikace jaderného odpadu mohou odpad rozlišovat podle tří charakteristik: podle úrovně radioaktivity (nízko, středně a vysokoaktivní), podle délky radioaktivního rozpadu (s krátkou a dlouhou dobou rozpadu) a podle způsobu nakládání (druh skladovacích zařízení a zařízení k likvidaci). Ačkoli nízkoaktivního odpadu vzniká velký objem, vyznačuje se nízkou úrovní radioaktivity. To platí například u oceli a betonu z vyřazování reaktorů z provozu. Vysokoaktivní odpad naopak vzniká v malém objemu, ale představuje převážnou většinu radioaktivity a uvolňuje se z něho značné množství tepla; jde například o vyhořelé jaderné palivo.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii poskytuje obecný rámec pro klasifikaci jaderného odpadu. Společná úmluva o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady z roku 2001 představuje pro mnoho zemí základní východisko. Evropská unie se svou směrnicí 2011/70/EURATOM z roku 2011 pokusila systémy klasifikace odpadů ve svých členských zemích harmonizovat, ale pouze s omezenou úspěšností. Doporučeními EU se přesně neřídí žádná z členských zemí, přičemž Francie, Švédsko a Česká republika se jim nejvíce blíží.

Systémy klasifikace jaderného odpadu v jednotlivých zemích Evropy se celkově značně liší. Zprv se rozcházejí v tom, zda považují vyhořelé jaderné palivo a některé z jeho případně separovaných složek (plutonium a uran) za odpad nebo za zdroj. Zadruhé existují značné rozdíly v kategorizaci odpadu: žádné dvě země nemají stejný systém. Přestože se všechny shodnou na kategorii odpadu uvolňujícího teplo (vysokoaktivního), ostatní toky jaderného odpadu se definují několika různými způsoby. Některé země rozlišují odpady s krátkou a dlouhou dobou rozpadu na nízké a střední úrovni aktivity, zatímco jiné uplatňují kategorie nízkoaktivního a středněaktivního odpadu bez rozlišení podle doby rozpadu. Některé systémy vycházejí z větší části z původu odpadu, některé z potenciálních či skutečných lokalit pro likvidaci nebo z možností nakládání s odpady a některé zase vycházejí z kombinace úrovně aktivity a poločasu rozpadu. Kvůli těmto rozdílům je porovnání systémů klasifikace odpadu v jednotlivých zemích nesmírně obtížné.

Po celém světě se za více než 70 let využívání jaderné energie k výrobě elektřiny nahromadilo velké množství jaderného odpadu. I přes neexistenci přiměřených zařízení k likvidaci vzniká stále další odpad, což vede k neustálému nárůstu množství skladovaného jaderného odpadu.



3 MNOŽSTVÍ ODPADU

3.1 OHLAŠOVACÍ POVINNOST

Nakládání s jaderným odpadem a jeho ohlašování po celém světě podléhá národní legislativě a mezinárodním úmluvám. V Evropské unii představuje hlavní rámec směrnice 2011/70/EURATOM pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem. Její požadavky vycházejí ze Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady, kterou iniciovala MAAE (viz níže). Členské státy EU byly v roce 2015 povinny poprvé předložit Evropské komisi inventář odpadu a strategii svých programů nakládání s radioaktivním odpadem. Dále musí členské země EU každé tři roky hlásit pokrok v implementaci směrnice 2011/70. O dva roky později, v roce 2017, převedla zpráva pro Evropskou komisi nahlášené inventáře členských zemí na společný systém klasifikace MAAE GSG-1, který rozlišuje velmi nízkoaktivní odpad (VNAO), nízkoaktivní odpad (NAO), středněaktivní odpad (SAO) a vysokoaktivní odpad (VAO).¹⁷ Z této zprávy vyplynulo, že množství odpadu v EU setrvale roste a že přiměřená zařízení k jeho likvidaci existují v omezené míře.¹⁸

Společná úmluva o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady z roku 2001 (dále jen Společná úmluva) je první právní nástroj ošetřující otázky bezpečnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem, a to zavedením bezpečnostních zásad a vytvořením „procesu vzájemného hodnocení“ k Úmluvě o jaderné bezpečnosti.¹⁹ Dohoda s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) obsahuje požadavek na uvedení jednotlivých zařízení pro nakládání s vyhořelým jaderným palivem (VJP) a radioaktivním odpadem a uvedení inventářů VJP a radioaktivního odpadu (článek 32). Tyto národní zprávy se mají předkládat na každém hodnoticím setkání, jež se musí konat nejpozději tři roky po setkání předchozím (článek 30). Národní zprávy pro šesté hodnotící setkání (v r. 2018) jsou primárním zdrojem dat o množství odpadu v oddílu 3.3.²⁰

3.2 MNOŽSTVÍ ODPADU V DODAVATELSKÉM ŘETĚZCI

TĚŽBA URANU A VÝROBA PALIVA

Aby bylo možné používat uran jako palivo k výrobě elektrické energie v jaderných reaktorech, musí uranová ruda (přírodní zdroj) projít několika fázemi zpracování. Rudu je nejprve potřeba vytěžit, oddělit od hlusiny a rozemlít, čímž vzniká takzvaný „žlutý koláč“, který se poté přeměňuje na fluorid uranový, obhacuje a tvaruje do palivových článků.

Při všech těchto procesech vzniká jaderný odpad. Prvním takovým odpadem je hlusina (hornina vyrubaná k získání přístupu k uranové rudě) v dolech. V některých případech se hlusina hromadí na výsypkách a poté se s ní zasypávají povrchové doly nebo rekultivují plochy. Okolo 85 % světové produkce uranu pochází ze šesti zemí: Kanady, Kazachstánu, Austrálie, Nigeru, Namibie a Ruska.²¹ Při těžbě

¹⁷ MAAE 2009, Classification of Radioactive Waste.

¹⁸ European Commission 2017, *Inventory of radioactive waste and spent fuel present in the Community's territory and the future prospects*, cit. 12. června 2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017SC0161&from=EN>

¹⁹ MAAE 2001, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, cit. 11. června 2019, <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste>

²⁰ Národní zprávy jsou k dispozici na této webové stránce MAAE: https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste/documents?keywords=&type=4797&language=All&field_extres_date_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&country=All

²¹ Mendelevitch, R., Dang, T. 2016, „Nuclear Power and the Uranium Market: Are Reserves and Resources Sufficient?“, DIW Berlin – Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung.

(a následných procesech) vzniká v exportních zemích velké množství jaderného odpadu, přičemž pouze Kanada a Rusko provozují jaderné elektrárny. Ve Francii, Rusku, Kanadě, Číně a USA probíhá komerční zpracování žlutého koláče na fluorid uranový (UF_6). Anglie, Francie, Německo, Nizozemsko, Rusko, Japonsko a USA nabízejí komerční obohacování uranu. Odpady obsahující uran vznikají v obou fázích.

ODPAD Z PROVOZU

Při provozu jaderných elektráren za účelem výroby elektrické energie vznikají různé druhy jaderného odpadu v různých fyzikálních skupenstvích, z nichž největší část představuje nízko a středněaktivní odpad (NSAO). MAAE odpad z provozu klasifikuje do dvou hlavních kategorií: neupravený (surový) a upravený odpad z provozu. U neupraveného odpadu z provozu je důležité uvedení fyzikálního skupenství (například kapalný či pevný):²²

- *Surový odpad* (odpad v původní podobě) je neupravený a často se uvádí v tunách pevného odpadu nebo metrech krychlových (m^3) kapalného odpadu.²³
- Tato kategorie však zároveň obsahuje *předupravený odpad*. Tento odpad prošel určitou formou předúpravy a často se měří v tunách pevného nebo m^3 kapalného odpadu.

K uvedení odpadu do stabilní a zafixované podoby, která je vhodná k přepravě, skladování a konečné likvidaci, je nutno jej upravovat. Využívá se též zhutňování odpadu za účelem minimalizace množství odpadů; zhutňování může, ale nemusí být součástí úpravy.²⁴

- Další kategorií je upravený odpad, jenž je nutno znovu upravit z bezpečnostních důvodů či kvůli převzetí do zařízení.²⁵
- Po úpravě se odpad skladuje v sudech, skladovacích, přepravních či likvidačních kontejnerech. Množství skladovaného odpadu se měří v m^3 , tunách nebo počtem kontejnerů či sudů.
- Poslední kategorií odpadu je zlikvidovaný odpad. V Evropě má pouze méně než polovina jaderných států v provozu zařízení pro likvidaci NSAO (Británie, Francie, Španělsko, Maďarsko, Finsko, Česká republika a Švédsko). Zlikvidovaný odpad se obvykle měří v m^3 nebo počtem balení či kontejnerů.

Vznik odpadu závisí na mnoha faktorech, například na používané reaktorové technologii a na stáří reaktoru. MAAE podává přehled tvorby neupraveného NSAO na 1 gigawatt (GW)²⁶ jaderné energie podle reaktorové technologie:²⁷

- těžkovodní reaktor (PHWR): 200 m^3
- lehkovodní reaktor²⁸
- tlakovodní reaktor (PWR): 250 m^3

²² Pevný odpad jsou například ochranné oděvy, vyměňované součásti zařízení či izolační materiály. Kapalný odpad jsou například kontaminovaná chladicí voda, oleje, koncentrát z výparníků, filtrační látky nebo kaly, které vznikají usazováním pevných látek na dně čerpadel. Viz MAAE, „Categorizing Operational Radioactive Wastes“, International Atomic Energy Agency, 2007.

²³ Případně se uvádí megagramy (Mg) těžkých kovů (HM).

²⁴ Podrobnější údaje o způsobech vzniku odpadu viz Homberg, Pavageau a Schneider, 1997 „Cogema - La Hague The Waste Production Techniques“, Greenpeace International.

²⁵ Například kaly z přepracování zalité do bitumenu, které klienti firmy AREVA odmítají přebírat zpět a které jsou nevhodné pro konečnou likvidaci ve Francii.

²⁶ Jednotky gigawatt nebo megawatt (MW) popisují instalovaný výkon elektrárny k výrobě elektrické energie. Někdy se uvádí též jako gigawatty elektrického výkonu (GW_e). Není-li uvedeno jinak, v této zprávě používáme zkratky GW a MW.

²⁷ MAAE 2007, „Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials“

²⁸ Okolo 80 % z více než 400 jaderných reaktorů ve světě jsou buď PWR, nebo BWR.

- varný reaktor (BWR): 500 m³
- rychlý množivý reaktor (FBR): 500 m³
- pokročilý varný reaktor (ABWR): 500 m³
- PWR VVER: 600 m³
- pokročilý plynem chlazený reaktor (AGR): 650 m³
- lehkovodní grafitový reaktor (RBMK): 1 500 m³
- plynem chlazený reaktor (GCR): 5 000 m³

Tyto odhady jsou pro neupravený odpad; odhady ročně vznikajícího množství upraveného NSAO podle druhu reaktoru se v jednotlivých zemích liší a opět závisí na řadě faktorů, jako je třeba technologie reaktoru a způsob úpravy. Například Německo u svých lehkovodních reaktorů (LWR včetně PWR anebo BWR)²⁹ odhaduje 45 m³ upraveného NSAO ročně, zatímco Francie u svých PWR odhaduje 78 m³ na jeden reaktor.³⁰

VYHOŘELÉ JADERNÉ PALIVO

MAAE odhaduje, že provozem lehkovodního reaktoru o výkonu 1 GW vzniká okolo 30 až 50 tun vyhořelého jaderného paliva ročně.³¹ Při použití tohoto odhadu na celosvětově instalovaný provozovaný výkon ve výši 363 GW vidíme, že roční produkce VJP je mezi 11 000 a 18 000 tunami. K roku 2013 bylo na celém světě od připojení prvního reaktoru do sítě vyprodukováno přibližně 370 000 tun, z nichž zhruba třetina (124 000 tun) byla přepracována.³² K přibližnému vyjádření nejen hmotnosti, ale i objemu uloženého vyhořelého paliva lze použít převodní poměr z hmotnosti (t HM) na objem (m³) doporučený Ministerstvem energetiky USA, který pro reaktory typu LWR činí 2,5.³³

Podle odhadu MAAE přepracováním těchto 30 až 50 tun VJP vznikne 15 m³ vitrifikovaného VAO.³⁴ Tento konzervativní odhad samozřejmě nezahrnuje obrovské množství přepracovaného uranu, plutonia, středněaktivního odpadu a vyhořelého směsného oxidického paliva (MOX), jež vyžadují další rozsáhlé kapacity pro střednědobé skladování.³⁵ V některých zemích Evropy přepracování stále představuje část koncepce nakládání s odpady (Francie, Nizozemsko, Rusko), zatímco většina zemí je pozastavila či ukončila zejména z ekonomických důvodů (Belgie, Bulharsko, Německo, Maďarsko, Švédsko, Švýcarsko a naposledy i Spojené království). Poslední evropskou zemí, která jeví zájem o přepracování, je Ukrajina, která podepsala smlouvu o vypracování studie proveditelnosti s francouzskou firmou Orano (dříve Areva). Tato iniciativa je součástí snahy Ukrajiny o diverzifikaci svého jaderného palivového cyklu. Staví se tu další mezisklad vyhořelého paliva a země na dodávkách paliva spolupracuje s firmou Westinghouse.³⁶

²⁹ Vláda Německa 2018, *The Sixth Report National Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*.

³⁰ Neumann, W. 2010, „Nuclear Waste Management in the European Union: Growing volumes and no solution“, intac, the Greens/EFA in the European Parliament, cit. 12. června 2019, https://www.sortirdunucleaire.org/IMG/pdf/thegreens-efa-2010-nuclear_waste_management_in_the_european_union-growing_volumes_and_no_solution.pdf

³¹ MAAE 2007, *Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials*.

³² MAAE 2018, *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*.

³³ US Department of Energy 1997, *Integrated Data Base Report – 1996: U.S. Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics*.

³⁴ MAAE 2019.

³⁵ Více než 100 let oproti uranovému palivu nebo mnohem větší objem zařízení pro likvidaci (zhruba trojnásobné). Podrobně se tématu porovnání objemů věnuje studie Mycle Schneider a Yves Marignac, „Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France“, IPFM, duben 2008.

³⁶ International Panel on Fissile Materials 2018, „Ukraine to explore reprocessing its spent fuel in France“, 3. května, cit. 12. června 2019, http://fissilematerials.org/blog/2018/05/ukraine_to_explore_reproc.html

ODPAD Z VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU

Po uzavření jaderné elektrárny je nutno demontovat vyhořelé palivo a vypustit chladicí soustavu a moderátory. Tento proces demontáže paliva, rozebrání a demontáže jaderné elektrárny se nazývá vyřazování z provozu.³⁷ MAAE u odpadu z vyřazování z provozu odhaduje spíše hmotnost než objem: předpokládá se, že lehkovodní reaktor o výkonu 1 GW vyprodukuje 5 000 až 6 000 tun NSAO a 1 000 tun NSAO a VAO s dlouhou dobou rozpadu.³⁸ Tento odhad je třeba brát opatrně, protože na celém světě se dosud vyřazoval z provozu pouze jeden reaktor o výkonu celého 1 GW (Trojan v USA), který ale byl v provozu pouhých 17 let. K roku 2018 bylo na celém světě vyřazeno z provozu pouze 19 (menších) jaderných elektráren o celkovém výkonu zhruba 6 GW (*viz Tabulku 1*).³⁹ Podobně jako u odpadu z provozu se množství odpadu z vyřazování odvíjí od celé řady různých faktorů, jako je například hranice pro uvolňování odpadu, strategie vyřazování z provozu (okamžitá demontáž nebo dlouhodobé ohrazení), doba provozu a konkrétní technologie reaktoru. Odpad vznikající v počátečních fázích vyřazování z provozu má stejné charakteristiky jako odpad z provozu a lze jej charakterizovat stejným postupem s jedinou výjimkou: vzniká ho mnohem větší množství za kratší dobu.⁴⁰

TABULKA 1: Reaktory vyřazené z provozu na celém světě ke dni 31. 5. 2018

Země	Reaktor	Výkon v MW	Vyřazení ukončeno	Let v provozu
NĚMECKO	5	1 017 (celkem)		
	Niederaichbach	100	1995	1
	HDR Großwelzheim	25	1998	2
	VAK Kahl	15	2010	24
	Würgassen	640	2014	23
	Gundremmingen-A	237	2016	11
JAPONSKO	1	12 (celkem)		
	JPDR	12	2002	13
SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ	13	4 922 (celkem)		
	Elk River	22	1974	5
	Shippingport	60	1989	25
	Pathfinder	59	1993	1
	Shoreham	809	1995	0
	Fort St. Vrain	330	1997	13
	Maine Yankee	860	2005	24
	Saxton	3	2005	5
	Trojan	1 095	2005	17
	Yankee NPS	167	2006	31
	Big Rock Point	67	2006	35
	Haddam Neck	560	2007	29
	Rancho Seco-1	873	2009	15
	CVTR	17	2009	4
CELKEM		5 951		

Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě Schneider a kol. (2018)

³⁷ Schneider et al. 2018, World Nuclear Industry Status Report 2018.

³⁸ MAAE, *Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials*, str.16.

³⁹ Schneider a kol. 2018, World Nuclear Industry Status Report 2018.

⁴⁰ MAAE, 2007.

ODHAD MNOŽSTVÍ ODPADU V DODAVATELSKÉM ŘETĚZCI

Obr. 2 znázorňuje přehled odhadovaného množství neupraveného odpadu v jednotlivých zemích kromě odpadu vznikajícího při těžbě a mletí a přeměně na uranové palivo. Obrázek zohledňuje aktuálně (k roku 2019) provozované reaktory v Evropě (kromě Ruska a Slovenska) v počtu 142 jaderných elektráren o výkonu cca 149 GW, průměrný věk reaktorů (rozdělený podle technologie) a odstavené reaktory v 90 jaderných elektrárnách o celkovém výkonu 36 GW a jejich dobu provozu (podle technologie reaktorů). Tento odhad je nepřesný z důvodu zjednodušení, protože předpokládá konstantní produkci odpadu na jednu GW po celou dobu. V odhadu navíc není zahrnutý uranový odpad, jehož se většina dováží, čímž vzniká velké množství odpadu mimo Evropu.

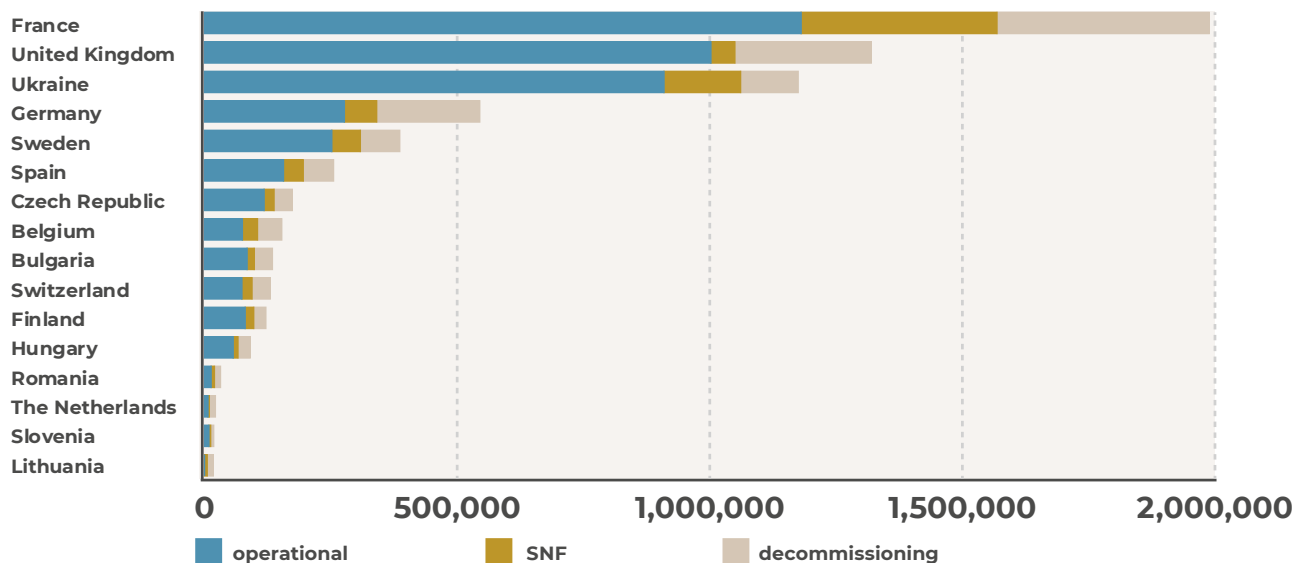
- Provoz: Tempo produkce odpadu z provozu vychází na výše uvedených tempech produkce neupraveného NSAO na 1 gigawatt jaderné energie podle technologie reaktoru. Výsledkem tohoto odhadu je 2 916 000 m³ NSAO (1 560 000 m³ z reaktorů v provozu a 1 356 000 m³ z odstavených reaktorů). Do odstavení reaktorů se předpokládá vznik dalších 1 378 000 m³ odpadu z provozu. Celkem se tedy jedná o 4 294 000 m³ NSAO z provozu.
- Vyhořelé jaderné palivo: U produkce vyhořelého paliva předpokládáme odhadem 40 tun VJP na 1 GW výkonu reaktoru ročně. Výsledkem je odhadovaný aktuální inventář ve výši 226 000 tun VJP v kategorii VAO (197 000 z reaktorů v provozu a 30 000 tun z odstavených). Do odstavení reaktorů se předpokládá vznik dalších 123 000 tun VJP, celkově se tedy jedná o 350 000 tun. Při použití převodního poměru z hmotnosti na objem Ministerstva energetiky USA pro reaktory LWR je aktuální objem 566 000 m³. Do odstavení reaktorů se celkové množství vyhořelého jaderného paliva zvýší na 874 000 m³.
- Vyřazování z provozu: Při použití konzervativního předpokladu⁴¹ MAAE, tedy 6 000 m³ odpadu na vyřazení jednoho reaktoru z provozu, vznikne při vyřazování z provozu dalších 1 400 000 m³ NSAO.

Odhaduje se, že evropské reaktory za dobu své životnosti vyprodukují celkem zhruba 6,6 milionu m³ jaderného odpadu. Pokud by se naskládal na jedno místo, zaplnil by fotbalové hřiště do výšky 919 metrů, což je o 90 metrů výše než nejvyšší budova na světě, Burdž Chalífa v Dubaji.

Na základě těchto předpokladů činí odhadované celkové množství jaderného odpadu z provozu a vyhořelého jaderného paliva vzniklého v evropských reaktorech (mimo Ruska a Slovenska) za dobu jejich životnosti celkem 5,2 milionu m³. Po vyřazení všech evropských reaktorů z provozu se odhaduje, že evropské reaktory za dobu své životnosti vyprodukují celkem zhruba 6,6 milionu m³ jaderného odpadu. Největším producentem jaderného odpadu v Evropě by s podílem 30 % byla Francie, následována Spojeným královstvím (20 %), Ukrajinou (18 %) a Německem (8 %). Tyto čtyři země představují přes 75 % veškerého jaderného odpadu v Evropě. Pokud by se všechen jaderný odpad z Evropy naskládal na jedno místo, zaplnil by fotbalové hřiště do výšky 919 metrů, což je o 90 metrů výše než měří nejvyšší budova na světě, Burdž Chalífa v Dubaji. Všechn tento odpad je nutno upravit a zlikvidovat.

⁴¹ Tento poměr závisí na předpokládané průměrné hustotě odpadu a na postupech úpravy a balení. Viz MAAE, 2007.

OBR. 2: Odhad množství jaderného odpadu z provozu, z vyhořelého jaderného paliva a vyřazení z provozu evropských jaderných elektráren (v provozu a odstavených) v m³ ke dni 31. 12. 2018



Zdroj: Vlastní sestavení a odhad na základě předpokladů tempa produkce v MAAE 2007, US DOE 1997

3.3 HLÁŠENÉ MNOŽSTVÍ ODPADU V RÁMCI SPOLEČNÉ ÚMLUVY

Údaje z jednotlivých evropských národních inventářů v tomto oddíle jsou čerpány z oficiálních dokumentů vydávaných příslušnými vládami, regulačními agenturami a dalšími zodpovědnými státními orgány v rámci Společné úmluvy.

TĚŽBA URANU A VÝROBA PALIVA

EU většinu uranu dováží. V minulosti se uranová ruda těžila ve Francii. Bývalý průmysl těžby uranu ve Francii oficiálně vyprodukoval 50 milionů tun pozůstatků po těžbě, jež jsou uloženy na 17 lokalitách u bývalých dolů.⁴² Nezávislí experti odhadují, že jejich množství je mnohem větší, protože oficiální národní inventář opomíjí určitý objem „zapomenutého odpadu“, což je titulek z deníku *Le Monde*.⁴³

V bývalé Německé demokratické republice (NDR) se těžilo mnohem více uranové rudy než ve Francii, těžba však byla ukončena v roce 1990 po sjednocení Německa. V NDR bylo vytěženo cca 231 000 tun uranu, díky čemuž byla tato země ve své době čtvrtým největším producentem uranu na celém světě. V současnosti zbytky po těžbě představují cca 32 km² průmyslových ploch, 48 výsypek s nízkoaktivní horninou o objemu 311 milionů m³ a čtyři odkaliště, v nichž se nachází celkem 160 milionů m³ radioaktivních kalů.^{44, 45} Sanace bývalých uranových dolů jako ve většině případů spočívala pouze v montáži pevného zakrytí zbytků.

⁴² Vláda Francie 2017, *National Report Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*.

⁴³ „Le lent poison des déchets radioactifs ‘oubliés’“, *Le Monde*, 12. června 2019.

⁴⁴ Vláda Německa 2018, *The Sixth Report National Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*.

⁴⁵ Německé předpisy nepovažují materiály výsypek, hlušinu ani jiné odpadní materiály v kontaminovaných lokalitách po těžbě uranové rudy obecně za radioaktivní odpad, a proto ke zprávě vydávané v rámci dohod Společné úmluvy Německo vydává doplňkovou zprávu.

Jedním z největších producentů uranu na světě je v současnosti Ruská federace, kde těžební operace představují hlavní zdroj vzniku nízkoaktivního pevného odpadu. Jen v roce 2016 ruská těžební společnost PIMCU vyprodukovala cca 700 000 m³ zbytků po těžbě spadajících do kategorie NSAO. Ruská zpráva v rámci Společné úmluvy však neobsahuje žádná souhrnná data o odpadu z těžby.⁴⁶

Nejvíce nebezpečných odpadů ze závodů na komerční obohacování uranu a závody s největším objemem odpadu se nachází v lokalitách Capenhurst (Británie), Almelo (Nizozemsko), Gronau (Německo) a Tricastin (Francie). Francouzské, německé a nizozemské společnosti provozující tyto závody v minulosti každoročně vyvezly přes 10 000 tun vedlejšího produktu obohacování uranu – ochuzeného fluoridu uranového (UF₆) – do Ruska, kde ho zůstává velké množství.⁴⁷ Společnosti provozující závody na obohacování uranu v EU si v současné době musí ochuzené UF₆ nechávat. Předpokládaný objem odpadu z obohacování uranu v Německu je až 100 000 m³ ochuzeného uranu.⁴⁸

NÍZKO A STŘEDNĚAKTIVNÍ ODPAD

Kvůli odlišným přístupům k národním inventářům se obtížně porovnává objem historického odpadu v jednotlivých zemích, protože odpad z provozu se skladuje v různých fyzikálních skupenstvích (například kapalný, pevný a předstlačený) nebo je odpad již upraven, zhutněn nebo zlikvidován. Někdy se odpad třídí do různých kategorií, například NAO a SAO nebo NSAO, nebo v ještě jiných různých podobách. Rusko udává odhad cca 556 milionů m³ radioaktivního odpadu, přičemž informací o jeho původu (velké množství pochází z těžby), klasifikaci a skupenství odpadu je málo. Nejzvláštnějším případem je Slovensko, kde kvůli údajům o podobě jaderného odpadu jako „kusový“, „sudy“ nebo „palety“ nelze provést žádnou klasifikaci podle objemu (ani jedna z těchto zemí není zahrnuta v tabulce 2).

Tabulka 2 podává přehled o hlášeném množství NSAO v meziskladech. Protože v jednotlivých národních zprávách v rámci Společné úmluvy často chybí podrobné údaje o původu odpadu, není vždy jasné, zda uváděné objemy NSAO pocházejí pouze z provozu a přepracování, nebo zda zahrnují odpad z vyřazování z provozu.

Sečtením údajů z národních zpráv v rámci Společné úmluvy dostaneme více než 550 000 m³ NSAO, který je v současné době v meziskladech po celé Evropě (nezahrnuje Slovensko a Rusko), kde čeká na vyřešení likvidace. Při zahrnutí zlikvidovaného odpadu činí celkové množství NSAO vyprodukovaného v Evropě více než 2,5 milionu m³ uskladněného a zlikvidovaného odpadu.⁴⁹ Údaje se blíží odhadovaným 3 milionům m³ neupraveného odpadu z provozu na základě odhadů MAAE (stále bez zahrnutí Slovenska a Ruska), přestože se tato čísla obtížně porovnávají vzhledem k nedostatku podrobných údajů o skladovaném odpadu, například zda je odpad upravený či nikoli.

⁴⁶ Vláda Ruska 2017, *The fifth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management*.

⁴⁷ Neumann 2010.

⁴⁸ Agentura pro jadernou energetiku (NEA) Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) 2016, „Germany Profile“, cit. 12. června 2019, https://www.oecd-neo.org/rwm/profiles/germany_profile.pdf

⁴⁹ Toto množství zároveň nezahrnuje velký objem velmi nízkoaktivního odpadu (VNAO), který po dobu provozu vzniká. Například pouze ve Francii se v meziskladech nachází dalších 185 000 m³ VNAO a 352 000 m³ bylo zlikvidováno. U většiny sledovaných zemí se žádné údaje o množství VNAO nezveřejňují.

TABULKA 2: Nízko a středněaktivní odpad v Evropě v meziskladech (zaokrouhleno) ke dni 31. 12. 2016

Země	NSAO v meziskladech (m ³)	NSAO zlikvidováno (m ³)	Celková produkce NSAO (m ³)
BELGIE	23 200	Zařízení k likvidaci není v provozu.	23 200
BULHARSKO	11 900	Zařízení k likvidaci není v provozu.	11 900
ČESKÁ REPUBLIKA	1 750	11 500	13 250
FINSKO	1 970	7 600	9 600
FRANCIE	180 000	853 000	1 033 000
NĚMECKO	45 200	84 100	129 300
MAĎARSKO	10 600	876	11 500
LITVA	44 000	Zařízení k likvidaci není v provozu.	44 000
NIZOZEMSKO	11 100	Zařízení k likvidaci není v provozu.	11 100
RUMUNSKO	1 000	Zařízení k likvidaci není v provozu.	1 000
SLOVINSKO	3 400	Zařízení k likvidaci není v provozu.	3 400
ŠPANĚLSKO	6 700	32 200	38 900
ŠVÉDSKO	13 800	39 000	52 800
ŠVÝCARSKO	8 400	Zařízení k likvidaci není v provozu.	8 400
UKRAJINA*	59 400	Zařízení k likvidaci není v provozu.	59 400
VELKÁ BRITÁNIE	130 000	942 000	1 072 000
CELKEM	552 400	1 970 000	2 522 000

Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě zpráv v rámci Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady a ONDRAF/NIRAS 2017

Poznámka: *Nezahrnuje (uložený a zlikvidovaný) odpad v černobylské zóně

Méně než polovina sledovaných zemí má v současné době v provozu zařízení pro likvidaci, většinou NAO, ale nikoli SAO (Británie, Francie, Španělsko, Maďarsko, Finsko, Česká republika, Švédsko a Německo). Tyto země však dohromady zlikvidovaly téměř 2 miliony m³ odpadu z provozu. Jen ve Spojeném království se dosud zlikvidovalo okolo 1 milionu m³ NAO, z něhož většina v přípovrchovém úložišti Drigg.⁵⁰ Každá z dvojice nejvýznamnějších jaderných zemí EU, tedy Francie a Spojené království, dosud zlikvidovala téměř dvojnásobné množství NSAO, než jaké se v současné době nachází v EU v meziskladech. Nicméně stále představují více než dvě třetiny NSAO, který je v současné době v meziskladech, kde čeká na likvidaci.

V Německu se odpad likviduje ve dvou geologických zařízeních pro likvidaci. Odpad nahromaděný v dolu Asse II v Dolním Sasku v letech 1967 až 1978 (okolo 47 000 m³ NSAO v téměř 126 000 sudech) je však nutno vyzvednout, neboť do dolu vniká nepřetržitý proud podzemní vody z nadloží. Pro až 220 000 m³ směsného radioaktivního odpadu a soli dosud neexistuje žádný způsob likvidace.⁵¹ Z geologického zařízení pro likvidaci se odpad dosud nikdy nevyzvedával, takže se jedná o první podnik svého druhu.

⁵⁰ Neumann 2010.

⁵¹ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (German Commission on Storage for Highly Radioactive Waste) 2016, Abschlussbericht der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle K-Drs. 268 (Final Report of the Commission on the Storage of High-Level Radioactive Waste K-Drs. 268).

Představuje technologické, logistické a finanční výzvy. Vyzvednutím navíc vzniká nový druh odpadu: zlikvidovaný odpad, který si po vyzvednutí žádá novou úpravu, uložení a konečnou likvidaci (v případě dolu Asse II je nyní množství pětinasobné oproti uloženému odpadu, protože se jedná o směs solí a radioaktivního odpadu).

Velké množství NSAO vznikne po odstavení reaktorů a jejich následném vyřazení z provozu. K roku 2018 bylo po celém světě vyřazeno z provozu pouze 19 jaderných elektráren, z nichž pouze pět bylo v Evropě, konkrétně v Německu.⁵² Přestože práce na vyřazování z provozu v Evropě probíhají, jsou výkazy množství odpadu z vyřazování obtížně dohledatelné. Německá zpráva v rámci Společné úmluvy neuvádí přesné množství odpadů vznikajících při vyřazování z provozu, ale pouze odhad míry produkce odpadu: 5 000 m³ upraveného NSAO na jeden reaktor.⁵³ Při vyřazování z provozu však vzniká též odpad, který vyžaduje stejné zacházení jako VAO. Například při pracích na vyřazování z provozu jaderných elektráren José Cabrera a Vandellos ve Španělsku, především z rozřezání vnitřních částí reaktorových nádob, vzniklo 185 m³ „zvláštního odpadu“, který je nutno likvidovat společně s VOA. Nyní se tento odpad skládá ve čtyřech suchých kontejnerech na lokalitě.⁵⁴ V Maďarsku se odhaduje, že vyřazením z provozu čtveřice bloků JE Paks vznikne celkem 26 700 m³ NSAO (6 700 m³ z každého reaktoru) a 300 m³ VAO.⁵⁵

Kromě nutnosti vyřadit z provozu největší počty reaktorů v Evropě stojí trojice zemí (Británie, Francie a Rusko) před dalšími výzvami, protože součástí jejich historických provozů jsou některé unikátní typy reaktorů: chlazení plynem (GCR) ve Francii a Spojeném království a stále provozované sovětské reaktory RBMK v Rusku a na Ukrajině. Jádra těchto reaktorů jsou zhotovena s použitím tisíců tun grafitových bloků. Typický britský reaktor Magnox obsahuje okolo 3 000 tun vysoce ozářeného grafitu zařazeného mezi SAO, který bude nutno odstínit a pravděpodobně uložit v hlubinném úložišti kvůli izotopům s dlouhou dobou rozpadu.⁵⁶ Ve Francii bude i většina nízkoaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu (NAO-DD) představovat grafitový odpad z plynem chlazených reaktorů, jenž vznikne při vyřazování GCR z provozu. U grafitového odpadu neexistuje žádný způsob likvidace, ani teoretický.⁵⁷

VYHOŘELÉ JADERNÉ PALIVO A VYSOKOAKTIVNÍ ODPAD

Národní inventáře vyhořelého jaderného paliva (VJP) se ve většině případů uvádějí v tunách těžkých kovů (t HM nebo Mg HM) nebo jako počet palivových souborů (PS). Zprávy za Belii, Maďarsko, Litvu a Slovensko uvádějí pouze počty palivových souborů; zde jsme hmotnost vypočítali pomocí předpokládané hmotnosti jednoho souboru (viz tabulku 3). Nejnovější zprávy za Ukrajinu, Nizozemsko a Belii neobsahovaly žádné hodnoty VJP; tam jsme použili hodnoty z předchozích zpráv. Po celé Evropě se v současné době nachází v různých formách asi 60 500 tun vyhořelého jaderného paliva (nezahrnuje Rusko a Slovensko), z čehož téměř 50 % představují Francie, Německo a Spojené království. V rámci EU se skladuje okolo 57 000 tun, přičemž Francie představuje 25 % stávajícího inventáře VJP a po ní následují Německo (15 %) a Spojené království (14 %). Tyto tři země jsou původci více než poloviny VJP evidovaného v EU. Inventář je mnohem větší, zahrneme-li i vyhořelé jaderné palivo určené k přepracování.

⁵² Schneider a kol. 2018.

⁵³ Vláda Německa 2018, *The Sixth Report National Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, str. 86.

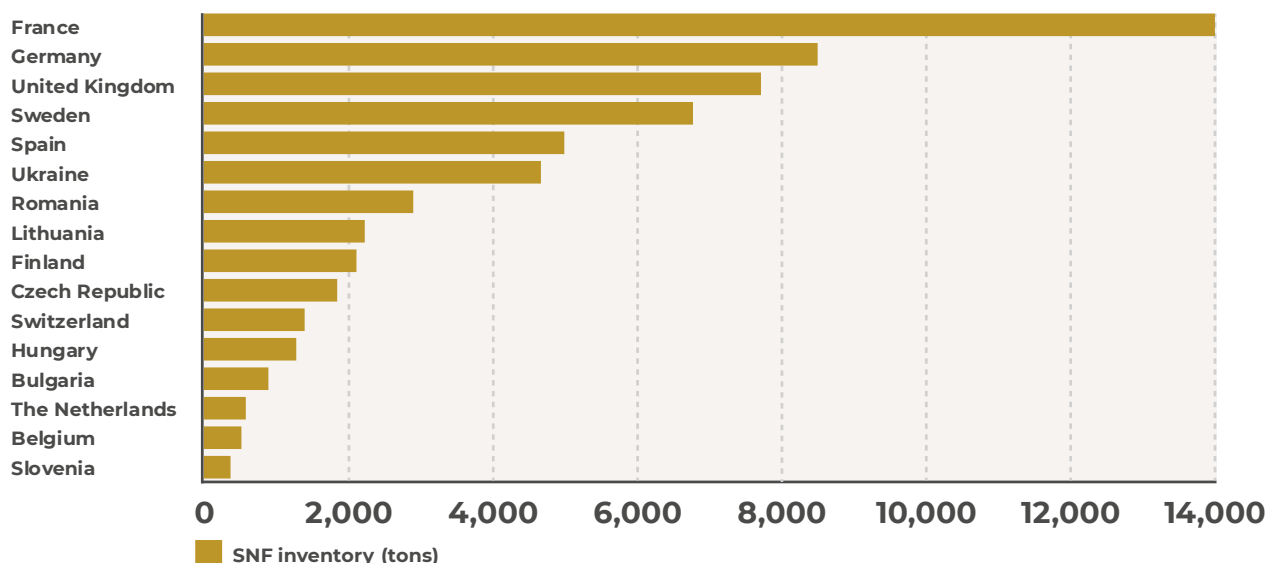
⁵⁴ Vláda Španělska 2017, *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – 6th Spanish National Report*.

⁵⁵ Vláda Maďarska 2017, *National Report Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*.

⁵⁶ Laraia, M. 2012, *Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience*.

⁵⁷ Schneider a kol. 2018, str. 144.

OBRÁZEK 3: Vyhořelé jaderné palivo v meziskladech v Evropě (mimo Ruska a Slovenska) v tunách ke dni 31. 12. 2016



Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě zpráv v rámci Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady

Rusko ani Slovensko nejsou v obrázku 3 a tabulce 3 zahrnuty, protože jimi zveřejněné kategorie SNAO nelze použít k porovnání (viz výše). Tyto dvě země nicméně nahlásily množství uloženého VJP: V Rusku se skladuje okolo 22 388 tun VJP (z čehož 92 % za mokra) a na Slovensku je to 13 102 palivových souborů čili 1 559 tun VJP (vše za mokra).

Vyhořelé palivo se obvykle skladuje v chladicích bazénech reaktorů nebo v meziskladech. Ty mohou být buď suché (v kontejnerech), nebo mokré (v bazénech). Jak dokládá následující kapitola 4. Nebezpečnost, skladování za mokra je nebezpečnější. Tabulka 3 podává přehled o množství VJP dosud skladovaného v bazénech. Nachází se buď uvnitř reaktorových budov, nebo v samostatném meziskladu. V roce 2016 se za mokra skladovalo 81 % neboli cca 49 000 tun evropského VJP (nezahrnuje Rusko a Slovensko). Francie ani Spojené království, jež představují 40 % stávajícího inventáře EU, dosud žádné VJP nepřevedly do suchých meziskladů.

Přestože v Británii je vybudovaný suchý mezisklad u jaderné elektrárny Sizewell, britská zpráva neuvádí žádné údaje o suchém skladování. Odhadovaný celkový objem vyhořelého paliva vzniklého za 40 let provozu elektrárny Sizewell B je něco přes 1 000 tun. Firma EDF Energy má v úmyslu veškeré vyhořelé palivo z této elektrárny převést z bazénů do suchého skladu do roku 2040. Jen několik evropských zemí převedlo většinu vyhořelého paliva do suchých skladů. Nejvyšší míru suchého skladování mají Maďarsko (83 %) a Česká republika (64 %). Konečné úložiště VJP dosud nevybudovala žádná evropská země. Zbývající skladovací kapacita se s pokračující produkcí jaderného odpadu snižuje. Například mezisklad VJP ve Finsku je již z 93 % zaplněn a decentralizovaný mezisklad CLAB ve Švédsku je zaplněn z 80 %.

TABULKA 3: Hlášené inventáře vyhořelého jaderného paliva v Evropě a jeho množství v mokrých meziskladech ke dni 31. 12. 2016

Země	Inventář VJP [tun]	Palivové soubory*	Skladování za mokra [tun]	VJP v mokrých meziskladech [%]
BELGIE	501**	4 173	237	47 %
BULHARSKO	876	4 383	788	90 %
ČESKÁ REPUBLIKA	1 828	11 619	654	36 %
FINSKO	2 095	13 887	2 095	100 %
FRANCIE	13 990	n.a.	13 990	100 %
NĚMECKO	8 485	n.a.	3 609	43 %
MAĎARSKO	1 261	10 507	216	17 %
LITVA	2 210	19 731	1 417	64 %
NIZOZEMSKO	80***	266	80	100 %
RUMUNSKO	2 867	151 686	1 297	45 %
SLOVINSKO	350	884	350	100 %
ŠPANĚLSKO	4 975	15 082	4 400	91 %
ŠVÉDSKO	6 758	34 204	6 758	100 %
ŠVÝCARSKO	1 377	6 474	831	60 %
UKRAJINA	4 651****	27 325	4 081	94 %
VELKÁ BRITÁNIE	7 700	n.a.	7 700	100 %
CELKEM	cca 60 500		cca 49 000	81 %

Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě zpráv v rámci Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady

Poznámky: * Výpočty inventářů VJP se liší podle předpokladu hmotnosti jednoho souboru: Belgie a Maďarsko předpokládají 120 kg na jeden soubor, Litva 112 kg, Slovensko 119 kg a Rumunsko 18,1 kg (Rumunsko palivové soubory udává v jednotkách článků CANDU).

** Údaje za rok 2011 (Belgie nezveřejnila novější údaje)

*** Údaje za rok 2010 (Nizozemsko nezveřejnilo novější údaje)

**** Údaje za rok 2008 (Ukrajina nezveřejnila novější údaje)

Většina zemí své VJP musela posílat k přepracování do zahraničí, do Francie, do Spojeného království nebo do Ruska (tak nadále činí jen několik střeoevropských zemí). Vitřifikovaný odpad (většinou VAO) se posílá zpět do země původu. Po uzavření závodu THORP v Británii⁵⁸ v roce 2018 je La Hague ve Francii poslední komerční přepracovací závod v západní Evropě. V závodě THORP se po ukončení přepracování bude nadále skladovat 5 500 až 6 000 tun paliva.⁵⁹

Země střední a východní Evropy posílaly své VJP k přepracování do Ruské federace. Například Bulharsko mělo s Ruskem dlouhodobé komerční smlouvy o přepracování VJP, ale v roce 2014 zastavilo veškerou přepravu VJP. Možnost vývozu VJP v budoucnu však zůstává nadále otevřena.⁶⁰ Bulharská zpráva v rámci Společné úmluvy neobsahovala žádný údaj o množství odpadu vráceného do Bulharska.⁶¹

⁵⁸ Vláda Spojeného království 2018, „End of reprocessing at Thorp signals new era for Sellafield“, news, cit. 12. června 2019, <https://www.gov.uk/government/news/end-of-reprocessing-at-thorp-signals-new-era-for-sellafield>

⁵⁹ Vláda Spojeného království 2017, The United Kingdom's sixth national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

⁶⁰ V letech 2009 až 2014 bylo do Ruska přepraveno 2 400 PS z reaktorů VVER-440.

⁶¹ Vláda Bulharska 2017, Sixth National Report on fulfilment of the obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

VJP z maďarské elektrárny Paks (celkem 273 tun) se též na přepracování vozilo zpět do SSSR/Ruska. V 90. letech však Rusko po Maďarsku požadovalo převzetí zbytkového radioaktivního odpadu a dalších vedlejších produktů vznikajících při přepracování.⁶² Maďarsko za účelem nakládání s tímto odpadem začalo v roce 1993 budovat centralizovaný mezisklad. S ukončením přepracování musí Maďarsko ukládat 1 261 tun VJP a 102 m³ VAO (k 31. 12. 2016).

Dalším příkladem země, která ustoupila od přepracování, je Německo. Německé energetické společnosti do poloviny roku 2005 posílaly své VJP k přepracování do Británie nebo do Francie. Separované plutonium se používalo na palivo typu MOX, které využívaly německé lehkododní reaktory. V německém inventáři se podíl přepracovaného VJP pohybuje okolo 42 % neboli 6 343 tun.⁶³ *Tabulka 4* uvádí přehled množství SAO a VAO z přepracování v meziskladech. Více než polovina uváděného VJP pochází z Francie. Jediné dvě země uvádějící množství SAO spojeného s přepracováním jsou Francie a Belgie.

TABULKA 4: Vysokoaktivní a středněaktivní odpad z přepracování v meziskladech ke dni 31. 12. 2016

Země	Aktivní přepracování	VAO [m ³]	SAO [m ³]
BELGIE	ne	285	3 132
BULHARSKO	ne	n.a.	n.a.
FRANCIE	ano	3 740	42 800
NĚMECKO	ne	577	n.a.
MAĎARSKO	ne	102	n.a.
NIZOZEMSKO	ano*	91	n.a.
RUSKO	ano	n.a.	n.a.
ŠPANĚLSKO	ne	n.a.**	n.a.
ŠVÝCARSKO	ne	114**	n.a.
VELKÁ BRITÁNIE	ne	1 960	n.a.

Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě zpráv v rámci Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady.

Poznámky: *Ve Francii

**Dodatečný odpad skladovaný ve Francii

⁶² Agentura pro jadernou energetiku (NEA) Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) 2017, „Hungary Report”, cit. 12. června 2019, https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/hungary_report.pdf

⁶³ Zpráva uvádí 6 670 tun VJP vyjmutého z jádra buď na přepracování (v závodech La Hague, Sellafield, WAK a v Belgii), nebo trvale ponechaného v zahraničí (viz Vláda Německa 2018, str. 66).

3.4 SHRnutí

Evropské země dosud vyprodukovaly několik milionů krychlových metrů jaderného odpadu (bez zahrnutí odpadů z těžby a zpracování uranu). Francie, Spojené království a Německo byly ke konci roku 2016 největšími evropskými producenty jaderného odpadu v rámci celého jaderného palivového cyklu.

Po Evropě se skladuje přes 60 000 tun vyhořelého jaderného paliva (číslo nezahrnuje Rusko a Slovensko), z toho nejvíce ve Francii. V rámci EU Francie představuje 25 % stávajícího inventáře vyhořelého jaderného paliva a po ní následují Německo (15 %) a Spojené království (14 %). Vyhořelé jaderné palivo se považuje za vysokoaktivní odpad. Přestože se vyskytuje v poměrně malých objemech, představuje převážnou většinu celkové radioaktivity. Například ve Spojeném království dosahoval vysokoaktivní odpad méně než 3 % celkového objemu jaderného odpadu, ale téměř 97 % radioaktivity celého inventáře. Většina vyhořelého paliva je přesunuta do chladicích bazénů (tzv. mokrých skladů), jež odebírají teplo a radioaktivitu. V roce 2016 se 81 % vyhořelého jaderného paliva v Evropě nacházelo v mokrých meziskladech. Bezpečnější by bylo přesunout vyhořelé jaderné palivo do suchých skladů v samostatných zařízeních.

U velké části uskladněného vyhořelého jaderného paliva ve Francii a v Nizozemsku se počítá s přepracováním. Většina ostatních evropských jaderných zemí (Belgie, Bulharsko, Německo, Maďarsko, Švédsko, Švýcarsko a jako zatím poslední i Británie) přepracování pozastavila na dobu neurčitou nebo ukončila. Ne všechny země ohlašují množství vyhořelého paliva, které je přepracováno. Ve většině případů se hlásí pouze vitrifikovaný vysokoaktivní odpad z přepracování. Totéž platí pro obrovské množství přepracovaného uranu, plutonia, středněaktivního odpadu a vyhořelého směsného oxidického paliva (MOX), jež vyžadují další rozsáhlé kapacity pro střednědobé skladování.

V Evropě dosud vzniklo zhruba 2,5 milionu m³ nízko a středněaktivního odpadu. Jedná se pouze o částečný odhad, neboť nezahrnuje odpad ze Slovenska a Ruska. Zhruba 20 % z tohoto odpadu (0,5 milionu m³) je po Evropě uskladněno a čeká na konečnou likvidaci. Toto množství se stále zvětšuje a žádný způsob likvidace neexistuje. Okolo 80 % z tohoto odpadu (téměř 2 miliony m³) bylo zlikvidováno. To však neznamená, že odpad je úspěšně odstraněn na dobu mnoha staletí. Například zařízení pro likvidaci odpadu v bývalém solném dole Asse II v Německu trpí neustálým přítokem podzemní vody. Zdejších 220 000 m³ směsného zlikvidovaného odpadu a soli je nutno vyzvednout, což představuje složitý a velmi nákladný úkol. Množství je nyní kvůli smísení soli a radioaktivního odpadu pětinasobné oproti původnímu objemu odpadu. Pojem „konečná likvidace“ by se proto měl používat obezřetně.

Značné množství jaderného odpadu vznikne při vyřazování jaderných zařízení z provozu. Samotné energetické reaktory v Evropě bez zahrnutí ostatních zařízení v palivovém cyklu mohou při vyřazování z provozu vyprodukovat minimálně dalších 1,4 milionu m³ jaderného odpadu. To je přitom konzervativní odhad, protože zkušeností s vyřazováním z provozu je málo. V roce 2018 bylo v Evropě v provozu 142 jaderných elektráren (číslo nezahrnuje Rusko a Slovensko).

Pokračující produkce jaderného odpadu a připravované vyřazování jaderných zařízení z provozu je stále znepokojivější, protože kapacita skladovacích zařízení v Evropě se pomalu zaplňuje, především v případě vyhořelého jaderného paliva. Například ve Finsku je již kapacita úložišť vyhořelého paliva z 93 % zaplněná. Švédské decentralizované úložiště CLAB je plné z 80 %. Ne všechny země však hlásí využití kapacity meziskladů, takže ucelený přehled není možný.

Odhaduje se, že evropské reaktory za dobu své životnosti vyprodukují celkem zhruba 6,6 milionu m³ jaderného odpadu (nezahrnuje Rusko a Slovensko). Pokud by se naskládal na jedno místo, zaplnil by fotbalové hřiště do výšky 919 metrů, což je o 90 metrů výše než nejvyšší budova na světě, Burdž Chalífa

v Dubaji. Ve výpočtu je zahrnut odpad z provozu, vyhořelé jaderné palivo a odpad z vyřazení reaktorů z provozu. Tento odhad i výše uvedené odhady vycházejí z konzervativních předpokladů. Skutečné množství jaderného odpadu v Evropě je pravděpodobně větší. Největším producentem jaderného odpadu v Evropě by s podílem 30 % byla Francie, následována Spojeným královstvím (20 %), Ukrajinou (18 %) a Německem (8 %). Tyto čtyři země představují přes 75 % veškerého jaderného odpadu v Evropě.

S výjimkou Ruska, které dosud aktivně uran produkuje, mají Německo a Francie největší inventář jaderného odpadu z těžby uranu v Evropě. Bývalý průmysl těžby uranu ve Francii oficiálně vyprodukoval 50 milionů tun pozůstatků po těžbě, ale nezávislí experti odhadují mnohem vyšší čísla. V bývalé Německé demokratické republice (NDR) se těžilo mnohem více uranové rudy než ve Francii. V současnosti zbytky po těžbě představují cca 32 km² průmyslových ploch, 48 výsypek s nízkoaktivní horninou o objemu 311 milionů m³ a čtyři odkaliště, v nichž se nachází celkem 160 milionů m³ radioaktivních kalů. EU v současnosti většinu uranu dováží, čímž vzniká velké množství jaderného odpadu mimo Evropu.



4 NEBEZPEČNOST PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A LIDSKÉ ZDRAVÍ

Radioaktivní odpad představuje riziko pro životní prostředí a pro lidské zdraví. „Riziko“ se zde definuje jako funkce nebezpečnosti a expozice: nejpravděpodobnější důsledek nebezpečí v kombinaci s pravděpodobností expozice tomuto nebezpečí. Tato kapitola se zaměří na jaderný odpad o vyšší aktivitě (viz [kapitulu 2](#)) a upozorní na potenciální nevyřešená nebezpečí a problémy. Přestože jaderný odpad představuje radiologická i chemická rizika, soustředíme se zde na první uvedená, protože jsou obecně závažnější.

Ačkoli rizika plynou z každého kroku dlouhého jaderného palivového cyklu, zaměří se tato kapitola na nebezpečí a rizika jaderného odpadu plynoucí z následujících aspektů:

- těžba, úprava a obohacování uranu a výroba paliva
- provoz jaderných elektráren
- vyhořelé jaderné palivo
- přepracování vyhořelého jaderného paliva
- vyřazování reaktorů z provozu

4.1 RADIAČNÍ RIZIKA JADERNÉHO ODPADU

Jaderný odpad může vydávat několik typů záření: částice alfa, záření beta a záření gama. Zatímco částice alfa lze velmi snadno zastavit, dokonce i tenkými překážkami, jako je například papír, jsou jejich účinky zvláště škodlivé. Jsou velmi rizikové při vdechování či požití a mají radiační dávkový ekvivalent na jednotku expozice 20, tedy větší než záření gama. Záření beta je pronikavější než částice alfa, ale stále je lze zeslabit hustšími materiály, například plasty nebo hliníkem. Záření gama je vysoce pronikavé a k jeho zeslabení je nutný hustý materiál, například olovo či silná vrstva betonu.

Záření z radioaktivního odpadu je karcinogenní, mutagenní a teratogenní (teratogenní látka je taková, která dokáže poškodit plod či zrodek). Riziko radiogenní⁶⁴ rakoviny závisí na typu rakoviny, exponované tkáni, dávce, intenzitě dávky a typu záření. Konečné riziko pro každého jedince též závisí na jeho pohlaví, věku a době, která od expozice uplynula. Záření se stále více podílí na vzniku širokého spektra dalších onemocnění, mimo jiné kardiovaskulárních chorob, mrtvic, šedého zákalu a duševních poruch.

Podle Mezinárodní komise radiologické ochrany (ICRP) vede externí celotělní radiační dávka ve výši jednoho sievertu (Sv) u dospělých k přibližně 10% riziku smrtelné rakoviny. ICRP však později tento odhad snížila na polovinu, tedy na 5 %, pomocí faktoru dávky a intenzity dávky (DDREF) 2 pro pevné nádory.⁶⁵ DDREF se dříve používaly ke snížení rizika určeného z expozic těch, kteří přežili bombardování v Japonsku, nízké dávky a nízké radiační intenzitě dávky. Starší studie na buňkách a živočiších ukazují, že tyto expozice byly méně škodlivé než expozice vyšším dávkám při vyšší intenzitě

⁶⁴ Radiogenní znamená vzniklý nebo určený z radioaktivity.

⁶⁵ International Commission on Radiological Protection 2007, „The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection“, ICRP publication 103.37.

dávky. Novější studie na lidech však nyní ukazují, že použití DDREF je nesprávné.^{66,67} Většina mezinárodních agentur od roku 2013 DDREF nepoužívá, takže skutečné riziko smrtelné rakoviny vzrostlo na minimálně 10 % za každý Sv. Samotná ICRP však bohužel s používáním DDREF nepřestala.⁶⁸ Vlády a ICRP tudíž neuznávají vnímané zvýšení rizik radiace ani nezprísnily radiační limity. Na rizicích radiace dosud neexistuje mezinárodní konsenzus. Jedno je však jasné: doporučení ICRP jsou konzervativní.

Radioaktivní odpad může obsahovat široké spektrum radionuklidů, jejichž atomy jsou nestabilní. Když se jejich jádra rozpadají, uvolňují různé formy radiace. Řada z těchto atomů má vysokou míru radiotoxicity, což je míra, do které může radionuklid poškodit organismus. Jejich poločas rozpadu, tedy doba, za kterou se rozloží polovina původní hmoty, je často nesmírně dlouhý, může jít o tisíce či dokonce miliony let.

Při odhadování nebezpečnosti konkrétního radionuklidu pro organismus záleží na následujících faktorech:

- způsob radioaktivního rozpadu: vyzařování částic alfa, záření beta a záření gama
- chemické sloučeniny, které obsahují daný radioizotop
- rozpustnost ve vodě
- způsob přenosu prostředím
- relativní biologická účinnost: poměr poškození jedním typem záření oproti jinému typu při stejném množství pohlcené energie
- radiotoxicita: obvykle vychází ze specifické aktivity, udává se jako radioaktivita v becquerelech (Bq) na 1 gram
- konverzní faktor, kterým se převádí becquerelely na sieverty

Expozice je ve většině případů spíše interní než externí, takže dávky a rizika budou zároveň záviset na rychlosti vstřebávání, rychlosti metabolismu a vylučování u jednotlivých lidí.

Výše uvedené faktory však u radionuklidů dosud nebere v úvahu žádný řádný systém klasifikace rizik. Takové systémy již existují pro chemické a biocidní látky a zazněly požadavky na vytvoření takového systému i pro radioaktivní odpad.⁶⁹

4.2 RIZIKA PŘI TĚŽBĚ URANU, Z HLUŠINY, PŘI OBOHACOVÁNÍ URANU A VÝROBĚ PALIVA

Těžba uranu, hlušina, obohacování uranu a výroba paliva se dohromady označuje pojmem „počátek“ jaderného palivového cyklu. Zdravotní rizika vznikají v každé z těchto fází. Uran je radioaktivní látka přirozeně se vyskytující v zemské kůře. Jeho ložiska jsou koncentrovanější v těch oblastech světa, kde se ruda těží a zpracovává. Výsledný odpad z těžby a kaly jsou prvním jaderným odpadem v rámci jaderného palivového cyklu. Je obecně uznávaný

⁶⁶ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2014, „Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami.” New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

⁶⁷ World Health Organization 2013. *Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation.*

⁶⁸ Valentin, J. 2005, Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. *Annals of the ICRP*, 35(4), str. 1-140.

⁶⁹ Kirchner, G. 1990, A New Hazard Index for the Determination of Risk Potentials of Radioactive Waste *Journal of Environmental Radioactivity*, 11, str. 71-95.

fakt, že vystavení (expozice) uranu a produktům jeho rozpadu je zodpovědné za nejvýznamnější část celkových dopadů jaderného palivového cyklu na zdraví a na životní prostředí.⁷⁰ Jaderný průmysl uvádí, že celosvětová těžba uranu v letech 2013–16 snížila o 4 %, ale od té doby se pokles celosvětové těžby uranu zrychlil.⁷¹

V Evropské unii v současné době neprobíhá prakticky žádná těžba uranu, ale v bývalých dolech ve Francii, Německu, Portugalsku, České republice a Rumunsku pokračuje likvidace škod a sanace po těžbě. Při sanačních činnostech v České republice, Německu a Maďarsku se získává malé množství uranu, a není jasné, zda se v Rumunsku v současné době dokonce malé množství netěží (několik desítek tun ročně).

ZDRAVOTNÍ RIZIKA Z EXPOZICE URANU

Mezi zdravotní rizika spojená s expozicí uranu (včetně ochuzeného uranu⁷²) patří onemocnění ledvin, dýchací poruchy, poškození DNA, narušení endokrinního systému, rakoviny a neurologické vady.^{73,74} Obyvatelstvo vystavené uranu v životním prostředí by se mělo monitorovat kvůli zvýšenému riziku problémů s plodností a rakovin rozmnožovacích orgánů.⁷⁵

Studie na zvířatech a na buňkách ukazují, že poškození zdraví uranem pramení z jeho afinity s DNA⁷⁶ a z potenciální kombinace jeho chemických a radioaktivních vlastností, protože uran má coby těžký kov jako chemické, tak i radiologické účinky. Existují teorie, podle nichž první hrají roli při spouštění rakovinného bujení a druhé při jeho podpoře.⁷⁷ Zpráva se zaměřuje na U-238, jenž představuje 99,27 % přírodního uranu.

Zbytek tvoří U-235 (0,72 %) a U-234, což je produkt rozpadu U-238 (0,0055 %). Uran v rudách vždy doprovázejí produkty rozpadu U-238.⁷⁸ Každý z výše uvedených nuklidů je podle odhadů sám o sobě nebezpečnější než samotný U-238. Tyto produkty rozpadu v uranové rudě společně obsahují zhruba **14×** více radioaktivity než samotný U-238.

Nejproblematictější produktem rozpadu je radium-226, a to ze tří důvodů: jeho soli jsou většinou rozpustné, má dlouhý poločas rozpadu (1 760 let) a vydává záření gama. Dalším nebezpečným nuklidem je

⁷⁰ IAEA 2004, „Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and Their Remediation”. Proceedings Of An International Workshop On Environmental Contamination From Uranium Production Facilities And Their Remediation Organized By The International Atomic Energy Agency And Held In Lisbon, 11–13 February 2004.

⁷¹ NEA and IAEA 2016, Uranium 2016: Resources, Production and Demand. NEA Report No. 7301.A, viewed 24 May 2019, <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

⁷² Depleted uranium (DU) is a by-product of uranium enrichment. It is controversial: in some countries it is used for radiation shielding and ammunition by military forces, while in others it is banned. Information about DU and its risks from a 2008 UN Institute for Disarmament Research report is available here: <http://www.unidir.org/files/publications/pdfs/uranium-weapons-en-328.pdf>

⁷³ Keith, S., Faroon, O., Roney, N., Scinicariello, F., Wilbur, S., Ingerman, L., Lladós, F., Plewak, D., Wohlers, D. and Diamond, G. 2013, „Toxicological profile for uranium”, public statement by the US Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

⁷⁴ Wilson, J. and Thorne, M. 2015, „An assessment and comparison of the chemotoxic and radiotoxic properties of uranium compounds”, ASSIST report to RWM.

⁷⁵ Raymond-Whish, S., Mayer, L.P., O'Neal, T., Martinez, A., Sellers, M.A., Christian, P.J., Marion, S.L., Begay, C., Proper, C.R., Hoyer, P.B. and Dyer, C.A., 2007. Drinking water with uranium below the US EPA water standard causes estrogen receptor-dependent responses in female mice, *Environmental health perspectives*, 115(12), pp. 1711–1716.

⁷⁶ Miller, A.C., Stewart, M., Brooks, K., Shi, L. and Page, N. 2002, Depleted uranium-catalyzed oxidative DNA damage: absence of significant alpha particle decay, *Journal of inorganic biochemistry*, 91(1), pp. 246–252.

⁷⁷ Miller, A.C., Brooks, K., Smith, J. and Page, N. 2004, Effect of the militarily-relevant heavy metals, depleted uranium and heavy metal tungsten-alloy on gene expression in human liver carcinoma cells (HepG2), *Molecular and cellular biochemistry*, 255(1–2), pp. 247–256.

⁷⁸ Zahrnuje thorium-234, protaktinium-234m, protaktinium-234, thorium-230, radium-226, radon-222, polonium-218, aktinium-218, radon-218, olovo-214, bismut-214, polonium-214, thallium-210, olovo-210, bismut-210, polonium-210, thallium-206 a nakonec olovo-206, jež je stabilní.

radon-222 (poločas rozpadu 3,8 dne). Protože jde o plyn bez barvy a zápachu, spolu se svými neviditelnými produkty rozpadu se snadno rozptýluje do prostředí. Expozice plynnému radonu se celosvětově považují za druhou nejčastější příčinu rakoviny plic po kouření tabáku.⁷⁹ Americká Agentura ochrany životního prostředí (US EPA) odhaduje, že expozice radonu v interiéru každoročně způsobuje okolo 21 000 úmrtí zapříčiněných rakovinou plic či přispívá k jejímu vzniku.⁸⁰

Zčásti z těchto důvodů ICRP odhaduje celoživotní absolutní zvýšení rizika 5×10^{-4} za každý měsíc v pracovní hladině (WLM)⁸¹ coby koeficient rizika u rakoviny plic způsobené radonem, přičemž toto číslo je dvojnásobné oproti předchozímu odhadu.⁸² Tato rizika rakoviny se vyjadřují buď jako relativní pravděpodobné riziko (ERR), nebo jako absolutní pravděpodobné riziko (EAR). ERR je poměrný nárůst rizika oproti běžné míře v populaci (tj. mezi lidmi bez expozice). EAR je dodatečné riziko nad úroveň běžné míry v populaci. Několik autorů ICRP však později dodalo, že riziko by se ve skutečnosti zvýšilo na 7×10^{-4} za každý WLM, kdyby se použily údaje o rakovině plic u euroamerických mužů namísto nevhodných referenčních údajů ICRP (tedy muži a ženy z euroamerických a asijských populací).⁸³ Jinak řečeno, odhad míry rizika se u většiny pracovníků uranových dolů od roku 1993 přibližně ztrojnásobil, nikoli zdvojnásobil. Toto vyšší povědomí o rizicích těžby uranu se nijak neodráží v podobě přísnějších bezpečnostních standardů pro pracovníky uranových dolů.

TĚŽBA URANU

Přestože je mnoho uranových dolů již zavřeno, historie těžby uranu po celém světě zůstává neradostná – plná havárií a zpráv o špatném zdravotním stavu horníků. Starší epidemiologické studie ukázaly vysoce nadměrný výskyt rakoviny plic mezi pracovníky uranových dolů.⁸⁴

Asi nejlépe zdokumentovaný příklad v Evropě je důlní komplex Wismut v bývalém Východním Německu. Tento komplex uranových dolů provozovaný Sovětským svazem fungoval do roku 1996. Vyšetření se podrobilo 59 000 horníků zde zaměstnaných mezi roky 1946 a 1989. Výzkum dokázal významný nárůst rizika rakoviny plic s rostoucí expozicí radonu (ERR/WLM = 0,0019).⁸⁵ Aktualizace této studie zjistila, že riziko rakoviny plic se ve skutečnosti zvýší třikrát (na ERR/WLM = 0,006), pokud se období pozorování prodlouží až do roku 2013.⁸⁶ Autoři též zjistili, že 3 942 horníků z kohorty během prodlouženého období pozorování (1946–2013) zemřelo na rakovinu plic. Nová studie bohužel neuvádí počty úmrtí na neplícní rakovinu, onemocnění srdce a cerebrovaskulární onemocnění, jež v dřívější studii uvedeny byly.

⁷⁹ Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M. and Heid, I. 2005, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *Bmj*, 330(7485), str. 223.

⁸⁰ Pawel, D.J. and Puskin, J.S. 2004, The US Environmental Protection Agency's assessment of risks from indoor radon, *Health physics*, 87(1), str. 68–74.

⁸¹ Pojem „pracovní hladina“ představuje koncentraci produktů radonu s krátkou dobou rozpadu při rovnovážném stavu $3,700 \text{ Bq/m}^3$ (100 pCi/L) v ovzduší. Jeden „měsíc v pracovní hladině“ je expozice jedné pracovní hladině po dobu 170 hodin měsíčně. Tradičně se předpokládá, že $1 \text{ WLM} = \sim 10 \text{ mSv}$.

⁸² Tirmarche, M., Harrison, J.D., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E. and Marsh, J. 2010, Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon, *Annals of the ICRP*, 40(1), str.1–64.

⁸³ Tirmarche, M., Harrison, J., Laurier, D., Blanchardon, E., Paquet, F. and Marsh, J. 2012, Risk of lung cancer from radon exposure: contribution of recently published studies of uranium miners, *Annals of the ICRP*, 41(3–4), str.368–377.

⁸⁴ Grosche, B., Kreuzer, M., Kreischer, M., Schnelzer, M. and Tschense, A. 2006, Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998, *British journal of cancer*, 95(9), str. 1280.

⁸⁵ Kreuzer, M., Grosche, B., Schnelzer, M., Tschense, A., Dufey, F. and Walsh, L. 2010, Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946–2003, *Radiation and environmental biophysics*, 49(2), str. 177–185.

⁸⁶ Kreuzer, M., Sobotzki, C., Schnelzer, M. and Fenske, N. 2017, Factors modifying the radon-related lung cancer risk at low exposures and exposure rates among German uranium miners, *Radiation research*, 189(2), str. 165–176.

HLUŠINA Z URANOVÝCH DOLŮ

Po vytěžení, rozemletí a vyzískání uranu z rudy se zbytky přesouvají na výsypky nebo do odkališť. Vzhledem k tomu, že průměrný obsah uranu v rudě je zpravidla okolo 0,1–0,15 %, téměř všechna ruda skončí jako hlušina. Výsledkem je velké množství hlušiny u uranových dolů. Například kanadské těžební společnosti do roku 2016 nahromadily okolo 200 milionů tun hlušiny u uzavřených uranových dolů a dalších 17 milionů tun u dolů v provozu (nezahrnuje odpadní horninu a kontaminovanou vodu).⁸⁷

Kvůli velkému objemu používané kyseliny sírové se uvádí do oběhu mnoho těžkých kovů, například mědi, zinku, niklu a olova, jež jsou toxické pro přírodu. Trvalé riziko představuje silná kontaminace podzemních vod. Kanadská vládní agentura Health Canada upozorňuje, že „může být kontaminovaný potravní řetězec, pokud nezavedeme přiměřená zmírňující opatření. V případě úniků či rozlití jsou ohrožené ryby, divoká zvířata, přírodní potraviny a pitná voda. Důležitá je nutnost regulace vody z prostor odpadového hospodářství, zejména pokud jsou v blízkosti zdroje pitné vody“.⁸⁸

Nenarušená ruda obsahuje všechny dceřiné radioaktivní izotopy uranu uvedené výše v tomto oddíle v dlouhodobé rovnováze, tj. množství becquerelů v ní zůstává stejné. Jalovina z mletí uranové rudy obsahuje všechny produkty rozpadové řady U-238.

Celková radioaktivita těchto nuklidů je přibližně 80 % radioaktivity v původní rudě, ačkoli přesné procento závisí na době vystavení rudy vzduchu. Hlušina může obsahovat i značné množství nebezpečných chemických látek, například mědi, zinku, niklu, olova, arsenu, molybdenu a selenu, podle zdroje rudy a činidel použitých v procesu její úpravy.

Dále je uranová hlušina problematická, protože radionuklidy v ní obsažené se k živým bytostem dostávají různými cestami. Radonový plyn a radioaktivní produkty rozpadu radonu lze vdechovat. Radioaktivní a toxické chemické látky lze požívat s potravinami a vodou a hlušina vyzařuje externí záření gama. Navzdory všeobecnému přesvědčení je vdechování velmi nebezpečné, neboť celková dávka touto cestou je podstatně vyšší než dávky z ostatních způsobů expozice.

Existence výsypek a odkališť je riziková, protože jeden z produktů rozpadu (thorium-230, jehož poločas rozpadu je 80 000 let) ve své rozpadové řadě dále produkuje uvedené nuklidy po tisíce let. Ty se buď hromadí pod kontejnery s odpadem, nebo jimi mohou prostupovat podle hloubky v půdě a propustnosti aktuálně používaných typů kontejnerů. Kvůli tomuto prostupu můžou radioaktivní olovo-210 nebo polonium-210 ve vysokých koncentracích dosáhnout povrchu půdy nad hlušinou tak, že jsou vstřebány rostlinami (první má poločas rozpadu 22,3 let a druhý 138 dní).⁸⁹

Jen málo studií vyčísluje rizika spojená s hlušinou po zpracování uranu. Americká Agentura ochrany životního prostředí v roce 1983 odhadla celoživotní zvýšení rizika rakoviny plic obyvatel žijících v blízkosti nezakryté výsypky o ploše 80 hektarů (0,8 km²) na dva případy na sto obyvatel.⁹⁰ Radonový

⁸⁷ Vláda Kanady 2016, Inventory of Radioactive Waste in Canada 2016, cit. 24. května 2019, https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/uranium-nuclear/17-0467%20Canada%20Radioactive%20Waste%20Report_access_e.pdf

⁸⁸ Vláda Kanady 2008, Canadian Handbook on Health Impact Assessment – Volume 4: Health Impacts By Industry Sector, cit. 24. května 2019, <http://publications.gc.ca/collections/Collection/H46-2-04-363E.pdf>

⁸⁹ Pérez-Sánchez, D. and Thorne, M.C. 2014, An investigation into the upward transport of uranium-series radionuclides in soils and uptake by plants, Journal of Radiological Protection, 34(3), str. 545.

⁹⁰ US Environmental Protection Agency (EPA) 1983, „40 CFR Part 192 Environmental Standards for Uranium and Thorium Mill Tailings at Licensed Commercial Processing Sites,” in: Federal Register Vol.48, No.196, Washington D.C. 7. října 1983, str. 45940. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-1983-10-07/content-detail.html>

plyn z hlušiny se může šířit větrem a deštěm, takže hrozí, že mu budou vystaveny i osoby žijící dále od výsypek. Přestože se u těchto jedinců předpokládá malé riziko, nelze je opomíjet, neboť rizika spojená s radiací existují až do nulové dávky. Vzhledem k tomu, že potenciálně může být ohroženo velké množství osob, je nutno odhadnout jejich celkovou dávku a rizika.⁹¹

Zdravotní rizika spojená se zpracováním a obohacováním uranu většinou souvisejí s vdechováním anebo požitím uranu v jeho různých chemických podobách. V procesu obohacování uranu U-235 se uranový koncentrát po mletí (U_3O_8), zvaný též žlutý koláč, přeměňuje na fluorid uranový (UF_6), vysoce těkavý plyn, který je extrémně chemicky reaktivní a radiologicky toxický. Plyn UF_6 kromě toho okamžitě reaguje s vodní párou, čímž vzniká kyselina fluorovodíková (HF), která je ještě reaktivnější a vysoce toxická, v malých koncentracích způsobuje podráždění plic a otoky a leptá výstelku plic. U osob vystavených vysokým koncentracím též způsobuje záchvaty a smrt.⁹²

4.3 RIZIKA PŘI PROVOZU

RIZIKA PLYNŮ, KAPALIN A TUHÉHO ODPADU

Jaderné elektrárny za běžného provozu běžně produkují značné množství tuhého odpadu a vypouštějí odpadní kapaliny i plyny.

Rizika běžného skladování tuhého odpadu pramení z omezených skladovacích prostor a nedostatečné bezpečnosti na místě skladování. Zásadní měrou se zvyšují, pokud je jaderný odpad součástí závad nebo havárií v jaderných zařízeních. Vzhledem k plánovanému prodlužování životnosti jaderných elektráren v mnoha zemích po celém světě⁹³ by hromadění nebezpečných odpadů z provozu ve starších jaderných elektrárnách mohlo vést k dalšímu vystavení radiaci.

Vzhledem k plánovanému prodlužování životnosti jaderných elektráren v mnoha zemích po celém světě by hromadění nebezpečných odpadů z provozu ve starších jaderných elektrárnách mohlo vést k dalšímu vystavení radiaci.

Jaderné elektrárny kromě tuhého odpadu produkují i emise radioaktivních plynů a kapalin do okolí. Hlavní radioaktivní vypouštěné látky jsou tritium (vodík-3, poločas rozpadu 12,3 roku), uhlík-14 (5 730 let), krypton-84 (10,8 roku), argon-41 (1,8 hodiny) a řada izotopů jódu, mimo jiné jód-129 (16 milionů let). Většina ročních emisí do ovzduší (cca 70–80 %) se uvolňuje během každoroční výměny paliva. Tyto emise zvyšují odhadovanou dávku obyvatelům v okolí téměř dvacetinásobně oproti průměrným emisím za celý rok.⁹⁴ Hlavním rizikovým faktorem jsou emise tritia a uhlíku-14. Přestože emise radioaktivních vzácných plynů jsou mírně vyšší než emise tritia, tyto inertní plyny pravděpodobně výrazně nepřispívají k celkové dávce ozáření emisemi z reaktorů.

⁹¹ Fairlie, I. and Sumner, D. 2000, In Defence of Collective Dose, Journal of Radiological Protection, 20(1), str. 9.

⁹² US National Library of Medicine (NLM), undated, Uranium Hexafluoride. CASRN: 7783-81-5, cit. 29. května 2019, <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+4501>

⁹³ Schneider a kol. 2018.

⁹⁴ UK Health Protection Agency 2011, „Short-Term Releases to the Atmosphere” National Dose Assessment Working Group, cit. 29. května 2019, <https://srp-uk.org/resources/national-dose-assessment>

Plynné emise vedou k větší individuální a celkové dávce ozáření než kapalně emise. V blízkosti jaderných elektráren mohou zvyšovat riziko vzniku leukémie. První hromadný výskyt leukémie v blízkosti jaderných zařízení v Evropě byl zaznamenán v roce 1984 poblíž jaderného zařízení Sellafield ve Velké Británii. V následujících letech byl zvýšený výskyt dětské leukémie zjištěn v blízkosti dalších jaderných zařízení v Británii,^{95,96} ve Francii,⁹⁷ a v Německu.⁹⁸

Německá vláda v roce 2008 vydala významnou epidemiologickou studii. Ta zjistila 120% nárůst počtu případů leukémie a 60% nárůst všech druhů rakoviny u dětí do pěti let věku žijících do pěti kilometrů od všech reaktorů v Německu.^{99, 100} Zvýšení rizika s klesající vzdáleností od reaktorů bylo statisticky významné u všech druhů rakoviny. Studie znovu roznítla mezinárodní debatu o dětské leukémii v blízkosti jaderných elektráren. Vědci provedli podobné studie i v Británii,¹⁰¹ ve Francii¹⁰² a Švýcarsku.¹⁰³ Celkově tyto výzkumné studie statisticky prokázaly zvýšený výskyt případů leukémie v blízkosti jaderných reaktorů.

Různé studie našly několik možných příčin tohoto jevu, mimo jiné vystavení mužů ozáření v práci před jejich otčovstvím,¹⁰⁴ předpokládaný virus z mísení populací,¹⁰⁵ neobvyklou reakci na infekční onemocnění u dětí,¹⁰⁶ genetickou dispozici k rakovině, vysokou úroveň značení proteinů u zárodků/plo-
dů v tělech těhotných žen v blízkosti jaderných elektráren¹⁰⁷ nebo kombinaci těchto faktorů. Ať už je konečné vysvětlení jakékoli, z důkazů z celého světa plyne, že život v blízkosti jaderných reaktorů s sebou nese závažná zdravotní rizika pro novorozence a malé děti.¹⁰⁸ Přestože důkazy o souvislostech zřetelně svědčí o tom, že život v blízkosti jaderných energetických zařízení představuje závažná zdravotní rizika, jejich příčiny nelze definitivně určit, takže celá otázka zůstává diskutabilní.

⁹⁵ Forman, D., Cook-Mozaffari, P., Darby, S., Davey, G., Stratton, I., Doll, R., and Pike, M. 1987, Cancer near nuclear installations, *Nature*, 329(6139), str. 499-505.

⁹⁶ Gardner, M.J. 1991, Father's occupational exposure to radiation and the raised level of childhood leukemia near the Sellafield nuclear plant, *Environmental health perspectives*, 94, str. 5-7.

⁹⁷ Pobel, D. and Viel, J.F. 1997, Case-control study of leukemia among young people near La Hague nuclear reprocessing plant: the environmental hypothesis revisited, *Bmj*, 314(7074), str. 101.

⁹⁸ Baker, P.J. and Hoel, D.G. 2007, Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities, *European Journal of cancer care*, 16(4), str. 355-363.

⁹⁹ Kaatsch, P., Spix, C., Schulze-Rath, R., Schmiedel, S. and Blettner, M. 2008, Leukemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. *International Journal of Cancer*, 122(4), str. 721-726.

¹⁰⁰ Spix, C., Schmiedel, S., Kaatsch, P., Schulze-Rath, R. and Blettner, M. 2008, Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003, *European Journal of Cancer*, 44(2), str. 275-284.

¹⁰¹ UK Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment 2011, „Further Consideration of the Incidence of Childhood Leukemia Around Nuclear Power Plants in Great Britain, 14th Report,” COMARE.

¹⁰² Sermage-Faure, C., Laurier, D., Goujon-Bellec, S., Chartier, M., Guyot-Goubin, A., Rudant, J., Hémon, D. and Clavel, J. 2012, Childhood leukemia around French nuclear power plants—the Geocap study, 2002-2007, *International journal of cancer*, 131(5), str. E769-E780.

¹⁰³ Spycher, B.D., Feller, M., Zwahlen, M., Rösli, M., von der Weid, N.X., Hengartner, H., Egger, M., Kuehni, C.E., Swiss Paediatric Oncology Group and Swiss National Cohort Study Group 2011, Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study, *International journal of epidemiology*, 40(5), str. 1247-1260.

¹⁰⁴ Gardner, M.J., Snee, M.P., Hall, A.J., Powell, C.A., Downes, S. and Terrell, J.D. 1990, Results of case-control study of leukemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. *Bmj*, 300(6722), str. 423-429.

¹⁰⁵ Kinlen, L.J. 2004, Childhood leukemia and population mixing, *Pediatrics*, 114(1), str. 330-331.

¹⁰⁶ Greaves, M. 2006, Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukemia, *Nature Reviews Cancer*, 6(3), str. 193.

¹⁰⁷ Fairlie, I. 2014, A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants, *Journal of environmental radioactivity*, 133, str. 10-17.

¹⁰⁸ Laurier, D., Jacob, S., Bernier, M.O., Leuraud, K., Metz, C., Samson, E. and Laloi, P. 2008, Epidemiological studies of leukemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review, *Radiation Protection Dosimetry*, 132(2), str. 182-190.

RIZIKA PRO PRACOVNÍKY

Průměrná expozice pracovníků jaderných zařízení v evropských zemích v posledních dvou desetiletích obecně klesá. Většinu celkové dávky nadále dostávají dočasně zaměstnaní pracovníci, pracovníci subdodavatelů a obsluha zařízení v rámci palivového cyklu. Expozice sice klesá, ale vnímaná rizika z ní rostou. Rozsáhlá epidemiologická studie¹⁰⁹ provedená v roce 2015 vědci ze státních zdravotních ústavů v USA, Británii a Francii na více než 300 000 pracovnících v jaderné energetice zjistila, že riziko leukémie je u nich více než dvojnásobné oproti riziku vyplývajícímu z dřívější studie.¹¹⁰ O pár měsíců později druhá studie, tentokrát věnovaná všem formám nádorové rakoviny¹¹¹, provedená z větší části stejným týmem vědců, zjistila velké absolutní riziko nádorové rakoviny ve výši 47 % na jeden Gray (Gy)¹¹², což je mnohem více, než vědci předpokládali. Toto riziko je značně vyšší než 5 % na jeden Gy v odhadu ICRP.

4.4 RIZIKA VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

Jaderné palivo se po třech až čtyřech letech štěpení označuje jako „vyhořelé“ a umísťuje se do chladicích bazénů. Přídavné jméno „vyhořelé“ je však zavádějící, protože palivo nadále vydává velké množství radiace, a to po desítky tisíce let. Například dávky radiace z nestíněných použitých palivových souborů se i po deseti letech chlazení pohybují od 1 do 100 Gy za hodinu podle typu paliva, stupně vyhoření a době uskladnění mimo reaktor. Dávka ve výši 4–5 Gy se obvykle považuje za smrtelnou.¹¹³ Nestíněný, čerstvě vyložený vyhořelý palivový článek vyzáří smrtelnou dávku na vzdálenost jednoho metru za méně než minutu.

Vyhořelé palivo se z tohoto důvodu přesunuje pod vodou, přepravuje v silně stíněných kontejnerech do palivových bazénů u reaktorů nebo přesunuje do stejně stíněných kontejnerů pro suché skladování. Výše expozice v blízkosti těchto kontejnerů se značně liší podle typu paliva (oxidy uranu nebo smíšené oxidy uranu a plutonia), míry využití či „vyhoření“ paliva a délky skladování vyhořelého paliva. Ve vzdálenosti jednoho metru je odhadovaná dávka z německých kontejnerů pro suché skladování typu Castor zhruba 0,1 mSv za hodinu, z francouzských kontejnerů TN28 je to 0,04 mSv/h.¹¹⁴

V jednotlivých zemích platí odlišné předpisy pro velikost dávky, již mohou být pracovníci vystaveni. V Kanadě činí maximální přípustná expozice pracovníků v blízkosti kontejnerů pro suché skladování 2 mSv/h při dotyku s povrchem kontejneru a 0,1 mSv/h ve vzdálenosti jednoho metru. Předpisy NRC v USA omezují expozici na 10 mSv/h při dotyku a 0,1 mSv/h ve vzdálenosti dvou metrů. Vyhořelé jaderné palivo obsahuje většinu radioaktivity z jaderného odpadu na světě a sestává z produktů jaderného štěpení a aktivace.¹¹⁵

¹⁰⁹ Leuraud, K., Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., Gillies, M., O'hagan, J.A., Hamra, G.B., Haylock, R., Laurier, D., Moissonnier, M. and Schubauer-Berigan, M.K. 2015, Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study, *The Lancet Haematology*, 2(7), str. e276–e281.

¹¹⁰ Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C.R., Schubauer-Berigan, M. and Yoshimura, T. 2005, Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries, *Bmj*, 331(7508), str. 77.

¹¹¹ Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D., Gillies, M., O'Hagan, J.A., Hamra, G.B., Haylock, R., Laurier, D., Leuraud, K., Moissonnier, M. and Schubauer-Berigan, M.K. 2015, Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS), *Bmj*, 351, str. h5359.

¹¹² Gray je odvozená jednotka dávky ionizujícího záření. Definuje se jako pohlčení jednoho joulu energie záření na kilogram hmoty.

¹¹³ US Nuclear Regulatory Commission 2019, „Legal Dose“, Online glossary entry, viewed 29 May 2019, <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/lethal-dose-ld.html>

¹¹⁴ Wilkinson, W. 2006, Radiation Dose Assessment for the Transport of Nuclear Fuel Cycle Materials, World Nuclear Transport Institute, cit. 29. května 2019, https://www.wnti.co.uk/media/31656/IP8_EN_MAR13_V2.pdf

¹¹⁵ The major activation products are plutonium-239, plutonium-240, plutonium-241, plutonium-242 and tritium. A series of 'minor' actinides are also formed: neptunium-237, curium-242, curium-244, americium-241, and americium-243. In addition, approximately 700 fission products are formed in spent fuel, most of them short-lived. The main risk drivers include caesium-134, caesium-137, strontium-90, technetium-99 and cobalt-60 as these have longer half-lives and emit powerful gamma rays. Tritium (H-3), the radioactive isotope of hydrogen, is also formed as a tertiary fission product.

RIZIKA VYHOŘELÉHO PALIVA V BAZÉNECH

Přetrvávající praxe dlouhodobého skladování vyhořelého jaderného paliva v bazénech u většiny jaderných elektráren po celém světě představuje významné riziko pro veřejnost a pro životní prostředí.¹¹⁶ Bazény s vyhořelým palivem je nutno nepřetržitě monitorovat, trvale chladit, aby se odvádělo teplo vznikající rozpadem, a chemicky upravovat k zajištění správné zásaditosti. V případě výpadku chlazení z nějakého důvodu by se bazény během několika dnů zcela vypařily a palivové soubory by se mohly vznítit, neboť jejich zirkoniový obal by silně reagoval s kyslíkem ve vzduchu.¹¹⁷ Totéž by nastalo v případě, že by se chladicí bazény z nějakého důvodu vyprázdnily, například protržením stěny bazénu způsobené teroristickým útokem. Tyto problémy se časem zhoršují tím, že se prodlužuje doba, po kterou vyhořelé palivo v bazénech zůstává – dnes běžně dosahuje desítek let.

Přetrvávající praxe dlouhodobého skladování vyhořelého jaderného paliva v bazénech u většiny jaderných elektráren po celém světě představuje významné riziko pro veřejnost a pro životní prostředí. Vyhořelé jaderné palivo obsahuje většinu radioaktivity z jaderného odpadu na světě a sestává z produktů jaderného štěpení a aktivace.

Jaderná regulační komise USA (NRC) se v roce 2014 zabývala šetřením, zda má požadovat přesun většiny vyhořelého paliva v současné době uloženého v bazénech u jaderných elektráren do suchých kontejnerů a podzemních skladů. Tímto krokem by se snížila pravděpodobnost a následky požáru v bazénu s vyhořelým palivem. Závěrem šetření bylo, že předpokládané přínosy nevyvažují náklady na celý přesun odhadované ve výši 4 miliard USD.¹¹⁸

Na zprávu NRC se však snesla kritika za závažné podcenění rizika a následků požáru vyhořelého paliva, protože modely potenciální havárie v meziskladu vyhořelého paliva v USA odhadují velmi vážné následky hypotetického úniku radionuklidů.¹¹⁹ Součástí modelů jsou mapy dokládající radioaktivní oblaka nad velkými plochami severovýchodních Spojených států. Hlavní autor modelů, profesor Frank von Hippel z Princeton-ské univerzity, varoval před drastickými ekonomickými následky: „Bavíme se o následcích ve výši bilionů dolarů.“¹²⁰ Toto riziko se netýká pouze USA, ale většiny zemí, jež provozují jaderné elektrárny, ve kterých stále větší množství vyhořelého paliva zůstává v chladicích bazénech po stále delší dobu.

Tato obtížná situace se stává ještě problematičtější kvůli neexistenci spolehlivých a osvědčených technických řešení a existenci politického odporu vůči plánům na zařízení pro ukládání jaderného odpadu. Současná situace představuje značné výzvy pro stávající vlády i budoucí generace.

Mezitím panuje všeobecná shoda na tom, že k likvidaci vyhořelého jaderného paliva jsou nutná kvalitně vyprojektovaná dlouhodobá úložiště, v nichž se minimalizuje riziko vypuštění radioaktivity v něm obsažené do životního prostředí. Nezbytná jsou rovněž opatření, jež zajistí, aby se plutonium ani vysoce obohacený uran nepřeváděly na zbrojní využití.

¹¹⁶ Alvarez, R. 2011, Spent Nuclear Fuel Pools in the US, Institute for Policy Studies.

¹¹⁷ von Hippel, F.N. and Schoeppner, M. 2016, Reducing the danger from fires in spent fuel pools, Science & Global Security, 24(3), pp. 141-173.

¹¹⁸ Barto, A. 2014, Consequence study of a beyond-design-basis earthquake affecting the spent fuel pool for a US Mark I boiling water reactor, United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.

¹¹⁹ von Hippel, F.N. and Schoeppner, M. 2017, Economic Losses from a Fire in a Dense-Packed US Spent Fuel Pool, Science & Global Security, 25(2), pp.80-92.

¹²⁰ Stone, R. 2016, „Spent fuel fire on US soil could dwarf impact of Fukushima“, Science, May 24, viewed 25 May 2019, <https://www.sciencemag.org/news/2016/05/spent-fuel-fire-us-soil-could-dwarf-impact-fukushima>

4.5 RIZIKA PŘI PŘEPRACOVÁNÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

Existují dvě hlavní možnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem: dlouhodobé skladování, jehož konečným cílem je buď přímá likvidace, nebo přepracování. V tomto oddíle se zaměříme na druhou z možností. Státy během studené války v 50. a 60. letech minulého století budovaly přepracovací závody za účelem výroby zbraní s pomocí plutonia získaného z vyhořelého paliva.

Přepracování obnáší rozpuštění vyhořelého paliva ve vařící koncentrované kyselině dusičné a následné fyzikálně-chemické separování plutonia a uranu od rozpuštěného paliva. Tento obtížný, složitý, nákladný a nebezpečný proces vede ke vzniku řady druhů jaderného odpadu, vypouštění velkého objemu odpadních nuklidů do ovzduší a do moře a velké expozici pracovníků a veřejnosti radioaktivnímu záření.

Na celém světě se přepracovává pouze okolo 15 % vyhořelého jaderného paliva. Většina zemí možnost přepracování vzdala a v současné době provádí oddělování plutonia na komerční úrovni pouze Francie a Rusko. Obě země, které dříve tuto činnost provozovaly pro řadu dalších zemí, dnes zpracovávají převážně vlastní palivo. Při přepracování vzniká velké množství vysokoaktivního kapalného odpadu (VAKO), které je extrémně radioaktivní a z něhož se uvolňuje teplo. Nižší popisujeme velmi vážné problémy, které kapalným odpadem působí ve stávajících systémech nakládání s odpady. Kapalným odpadem se měl původně zatavovat do skla a ukládat ve snáze zvladatelné tuhé formě zvané vitrifikovaný odpad. Tento proces, ačkoli byl ve Francii realizován poměrně úspěšně, se v Británii a v USA ukázal obtížným, takže značná část tohoto odpadu v nejbližší budoucnosti možná zůstane v kapalném formě. Při přepracování kromě VAKO vznikají i následující druhy odpadů:

- emise radionuklidů do ovzduší
- vypouštění radionuklidů do moří
- velké skladované množství separovaného plutonia
- desítky tisíc sudů se separovaným přepracovaným uranem
- tisíce ocelových nádob obsahujících vitrifikovaný odpad
- radioaktivní grafit z palivových obalů AGR a z reaktorů vyřazených z provozu
- betonové zásobníky plné palivových obalů demontovaných z vyhořelého paliva
- velké množství dalšího radioaktivního odpadu, mj. kaly, pryskyřice a filtry

Celkové dávky světové populaci z plyných nuklidů C-14 a I-129 s dlouhou dobou rozpadu a Kr-85 a H-3 (tritia) se střední dobou rozpadu, které pocházejí ze závodů Sellafield a La Hague, jsou obrovské, mnohem vyšší než z jaderných elektráren. Přestože z reaktorů je zakázán jakýkoli únik částic alfa, ze závodu La Hague je povolen, a to v limitu do 0,01 GBq v plyné formě a 140 GBq v kapalném odpadu.¹²¹

Globální společná dávka, uvažovaná po dobu 100 000 let, vypočtená z odpadů vypouštěných pouze z přepracovacího závodu La Hague, činí 3 600 osobosievertů za rok.¹²² Pokračování ve vypouštění odpadů na obdobné úrovni po dobu provozní životnosti závodu La Hague do roku 2025 by celosvětově způsobilo přes 3 000 dalších úmrtí na rakovinu, pokud použijeme linární bezprahovou teorii radiace.

¹²¹ Schneider, M., and Marignac, Y. 2008, „Reprocessing of Spent Nuclear Fuel in France”, *International Panel on Fissile Materials, Research Report #4*, cit. 24. května 2018, http://fissilematerials.org/publications/2008/05/spent_nuclear_fuel_reprocessin.html

¹²² Smith, R., Bexon, A., Sihra, K., Simmonds, J. 2007, „The calculation, presentation and use of collective doses for routine discharges,” *In Proceedings of IRPA12: 12. Congress of the International Radiation Protection Association: Strengthening Radiation Protection Worldwide-Highlights, Global Perspective and Future Trends*.

ŠTĚPNÉ MATERIÁLY

Původním účelem přepracování bylo získávání štěpného plutonia na výrobu jaderných zbraní. Toto odůvodnění se během let změnilo, přinejmenším od poloviny 90. let, kdy nejvýznamnější státy s jadernými zbraněmi přestaly s oddělováním plutonia pro vojenské účely. Valné shromáždění OSN navíc v roce 2017 schválilo Smlouvu o zákazu jaderných zbraní, což je právně závazná mezinárodní dohoda o komplexním zákazu jaderných zbraní. Země, které v přepracování pokračují, čelí obzvláště velkým výzvám v podobě rizika šíření jaderných zbraní a bezpečnostních rizik, například zranitelnosti vůči teroristickým útokům.

Britská prestižní Královská společnost v roce 2017 upozornila na to, že potenciální následky významného narušení bezpečnosti či havárie týkající se britských zásob separovaného plutonia „jsou tak vážné, že by vláda měla urychleně vypracovat a realizovat strategii jeho dlouhodobého využívání či likvidace“.¹²³ Tyto zásoby v roce 2007 činily 100 tun. Do roku 2017 vzrostly na 140 tun.¹²⁴ Britské vlády v posledních 10 letech jedna po druhé nedokázaly strategii nakládání s tímto štěpným odpadem vypracovat. Před podobným dilematem stojí Japonsko, jež má velké zásoby separovaného plutonia, buduje komerční přepracovací závod a pro využití plutonia má pouze malou kapacitu. Jedinou zemí zákonem zavázanou k přepracování ve velkém však zůstává Francie.

SMĚSNÉ OXIDICKÉ PALIVO (MOX)

Později se přepracování zdůvodnilo úmyslem využívat separovaný oxid plutoničitý ve směsném oxidickém jaderném palivu (MOX), nejprve do rychlých množivých reaktorů (FBR) a později jako náhrada uranového paliva v lehkovodních reaktorech (LWR). Programy vývoje FBR jsou ve většině zemí ukončené a palivo MOX se ukazuje být několikrát dražší než palivo uranové kvůli nezbytným dodatečným bezpečnostním opatřením. Vyhořelé palivo MOX se nikde nepřepracovává, protože kvalita plutonia se zhorší a je výrazně radioaktivnější a teplejší, než když je vyjmuto z reaktorů. MOX oproti uranovému palivu vyžaduje o více než sto let delší chlazení v meziskladu nebo minimálně třikrát více místa v konečném úložišti. To má závažné ekonomické důsledky, protože kapacita úložiště odpadu je obecně omezena tepelnou zátěží.

4.6 RIZIKA PŘI VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU

Po uzavření jaderné elektrárny je nutno demontovat vyhořelé palivo a vypustit chladicí soustavu a moderátory. Tento proces demontáže paliva, rozebrání a demontáže jaderné elektrárny se nazývá vyřazování z provozu. V roce 2018 po celém světě čekalo na vyřazení z provozu nebo se nachází v jeho různých fázích celkem 154 jaderných reaktorů. Dalších 19 již bylo zcela vyřazeno z provozu, z toho nejvíce v USA (13) a v Německu (5). Průměrná délka vyřazování jednoho reaktoru z provozu je okolo 19 let, což je ve většině případů déle než trvala výstavba i provoz reaktoru dohromady.¹²⁵

Reaktor se považuje za „zcela vyřazen z provozu“, když je reaktorová budova zcela vyprázdněna a může se využít k jiným účelům nebo když jsou všechny budovy odstraněny, ale vyhořelé palivo je stále na místě. Stav vyřazování z provozu se označuje jako „zelená louka“, když jsou odstraněny všechny budovy i odpad a lokalitu lze volně využít k jiným účelům. Pouze 10 z 19 dosud vyřazených reaktorů dosáhlo stavu zelené louky. V některých případech zůstávají na místě grafitová jádra reaktorů ve stíněných budovách, kde čekají na pozdější demontáž.

¹²³ The Royal Society 2007, *Strategy options for the UK's separated Plutonium*, Policy document 24/07, cit. 29. května 2019, https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2007/8018.pdf

¹²⁴ Department for Business, Energy and Industrial Strategy (DBEIS) 2017, *The United Kingdom's Sixth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, cit. 25. května 2019, <https://www.gov.uk/government/publications/the-uks-sixth-national-report-on-compliance-with-the-obligations-of-the-joint-convention-on-the-safety-of-spent-fuel-and-radioactive-waste-management>

¹²⁵ Schneider s kol. 2018.

Tyto dvě základní strategie vyřazování z provozu se označují jako „okamžitá demontáž“ (ID) a dlouhodobé ohrazení (LTE, v USA se používá zkratka „SAFSTOR“). Obecně je vhodnější metoda ID, protože tu lze využít dovednosti a zkušenosti pracovníků obsluhy, stále existuje jednoznačné rozdělení zodpovědnosti, trvá veřejný zájem a je pravděpodobnější, že vyhrazené finance budou na nezbytné práce stačit. Některý velké jaderné státy, jako je Francie a Německo, mají ID jako primární strategii. U strategie LTE obvykle hrozí ztráta dovednostní základny, jednoznačného vymezení zodpovědnosti, firemní kontinuity a veřejného zájmu, takže vyřazování z provozu se táhne desítky let.

POKRAČUJÍCÍ EMISE RADIONUKLIDŮ Z REAKTORŮ VYŘAZENÝCH Z PROVOZU

Celou řadu radionuklidů vyzařují nejen reaktory v provozu, ale i uzavřené, zvláště plynné emise tritia a uhlíku-14. Z údajů o emisích nuklidů v každoroční britské publikaci zvané Radioaktivita v potravinách a životním prostředí (Radioactivity in Food and the Environment, RIFE) vyplývá, že reaktory elektrárny Winfrith, odstavené v roce 1995, i o více než 20 let později, tedy v roce 2016, stále emitovaly dva biliony (2×10^{12}) becquerelů tritia.¹²⁶ Podobný scénář platí i u dávno odstavených reaktorů v elektrárnách Trawsfynydd, Dounreay, Chapelcross a ve všech uzavřených elektrárnách typu Magnox. Malé experimentální reaktory v elektrárnách Whiteshell a Rolphton v Kanadě, které byly uzavřeny před více než 30 lety, stále údajně každoročně vyzařují velké množství tritia. V současnosti dostupná data se týkají pouze reaktorů typu Magnox a těžkovodních reaktorů. Betonové a ocelové konstrukce reaktorů Magnox a HWR a konstrukce kontejnmentu během jejich provozu vstřebávají velké koncentrace tritia a C-14. Po ukončení jaderné štěpné reakce tyto nuklidy z konstrukcí nadále unikají, a to po desítky let.

EXPOZICE PŘI VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU A ZA PROVOZU

Tvrdí se, že expozice pracovníků při vyřazování reaktorů z provozu budou značné a že by se vyřazování z provozu mělo co nejdéle odkládat. Evropská komise (EK) však vypočítala, že snížení dávek radiace díky uzavření jaderné elektrárny je výrazně větší než dopad jejího vyřazování z provozu. EK odhaduje, že celková dávka z emisí do ovzduší během vyřazování jaderného zařízení v EU z provozu v roce 2004 byla zhruba 2 osobosieverty ročně oproti cca 150 osobosievertů ročně z provozu každého jednotlivého jaderného zařízení v EU.¹²⁷

¹²⁶ Scottish Environment Protection Agency (SEPA) 2017, Radioactivity in Food and the Environment. RIFE Report 22, cit 24. května 2019, <https://www.sepa.org.uk/media/328601/rife-22.pdf>

¹²⁷ European Commission 2007, *Guidance on the calculation, presentation and use of collective doses for routine discharges*, Radiation Protection Report 144. Directorate-General for Energy Directorate D— Nuclear Energy Unit D.4 — Radiation Protection.

4.7 SHRnutí

Jaderný odpad představuje zdravotní riziko z několika důvodů. Prvním důvodem jsou uváděné zdravotní vlivy běžně vznikajících plyných a kapalných emisí z jaderných zařízení. Druhým jsou velmi vysoké celkové globální dávky ozáření při přepracování vyhořelého jaderného paliva. Třetím je potom nevyhovující a nestabilní stav většiny již vzniklého jaderného odpadu. Více než 90 % radioaktivity v jaderném odpadu obsahuje vysokoaktivní odpad (VAO) v podobě vyhořelého jaderného paliva a vitrifikovaného odpadu z přepracování. Přesto na světě neexistuje ani jedna plně funkční lokalita pro konečnou likvidaci VAO. Přetrvávající praxe dlouhodobého skladování vyhořelého jaderného paliva v bazénech u většiny jaderných elektráren po celém světě je významným rizikem pro veřejnost a pro životní prostředí. Vyhořelé jaderné palivo obsahuje většinu radioaktivity z jaderného odpadu na světě a sestává z produktů jaderného štěpení a aktivace.

Odhady dopadů likvidace VAO z provozu jsou nadále spekulativní, ale k VAO se stále vážou zásadní problémy mezigenerační odpovědnosti a spravedlnosti. Naprosto nejdůležitějším faktorem, který jaderný odpad odlišuje od všech ostatních typů odpadu, jsou stále velmi dlouhá časová údobí, s nimiž je nutno počítat – poločas rozpadu Pu-239 je přes 24 000 let.

Přepracováním vyhořelého jaderného paliva vznikají přístupnější formy vysoce nebezpečných radioaktivních odpadů, rizika šíření jaderných zbraní, vysoká expozice pracovníků a veřejnosti a radioaktivní kontaminace ovzduší a moří.

Pouze několik zemí zveřejňuje informace o obsahu jednotlivých nuklidů v odpadu. Sběr a zveřejňování těchto dat je v první řadě povinností národních vlád. Údaje jsou nezbytné k řádnému posuzování rizik jaderného odpadu a vypracování stupnic nebezpečnosti, jež spojují pozorované zdravotní účinky s délkou a intenzitou expozice. Dosud neexistuje žádný komplexní rámec hodnocení nebezpečnosti jednotlivých radionuklidů v jaderném odpadu.

Rizika lze vyvozovat z několika málo epidemiologických studií, které se ale vyznačují omezenou kvalitou. Některé studie například naznačují vyšší výskyt rakoviny, vzorek obyvatel nebyl ale dostatečný na to, aby se daly vyvodit statisticky významné výsledky. Menší studie lze kombinovat pomocí metaanalýz, čímž vznikají větší soubory dat, které poskytují statisticky významná zjištění. Metaanalýzy dopadů jaderného odpadu se však vyznačují takřka úplnou neexistencí. Výsledkem je skutečnost, že řada malých studií je stále kritizována za nedostatečnou statistickou významnost.

A konečně je k posuzování rizik nezbytné mít přesně naměřené dávky, ty se však v epidemiologických studiích často neměří. A pokud existují, mohou být často nespolehlivé kvůli značné nejistotě, která je s nimi spojená.



5 KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

5.1 HISTORICKÝ PŘEHLED

K popisu nakládání s jaderným odpadem v posledních sedmi a půl desetiletích je nutný stručný historický úvod. Jaderná technologie je dítětem války¹²⁸ a po ní následujícího konfliktu mezi mocenskými bloky Západu a Východu.¹²⁹ Teprve program „Atomy pro mír“, který u příležitosti Valného shromáždění OSN dne 8. prosince 1953 vyhlásil prezident Spojených států Dwight Eisenhower, otevřel cestu k využití jaderné energie jako zdroje k výrobě elektřiny.¹³⁰ Oba programy však od počátku zůstávaly jako „siamská dvojčata“, jak v roce 1950 prohlásil tehdejší předseda americké Komise pro atomovou energii (AEC) Gordon Dean.¹³¹ V tehdy převažujících poválečných podmínkách se jaderný odpad vznikající především ve velkých vojenských výrobních závodech přesouval do životního prostředí s téměř nulovými náklady.¹³² Mezi standardní postupy likvidace patřilo přímé vypouštění chladicí vody z vojenských reaktorů do řeky Columbia¹³³, zakopávání tuhého a vsakování kapalného nízko, středně a v nařazené formě dokonce i vysokoaktivního odpadu v areálu vojenských laboratoří¹³⁴ a shazování tuhého odpadu do moře¹³⁵, jako v případě ostrova Farallon západně od San Franciska¹³⁶, nebo vypouštění kapalného odpadu z přepracovacího závodu Sellafield do Irského moře.¹³⁷

Od 50. let byly tyto praktiky upravovány a definovaly se prvotní základní myšlenky programu likvidace jaderného odpadu. Otevřeněji se hovořilo o rizicích ředění jaderného odpadu ve vodách. Na přelomu století se již považovalo za povinné zamezování šíření radioaktivních látek vzhledem k předpokládanému výraznému nárůstu objemu jaderného odpadu po celém světě: „I kdybychom zcela pominuli problémy nevhodného mísení a opětovné koncentrace v mořských organismech, je zřejmé, že dlouhodobou odpovědí na problém skladování odpadů nemůže být pouze jejich rozptýlení. Ani oceány nejsou dost velké na to, aby udržely aktivitu, kterou pravděpodobně dokážeme vytvořit. Budeme tedy nuceni k nějaké formě zamezování jejího šíření.“¹³⁸ Hledání technologií k zamezení šíření a možností likvidace se zin-

¹²⁸ Rhodes, R. 1986, *The Making of the atomic bomb*, Simon & Schuster New York.

¹²⁹ Stöver, B. 2017, *Der kalte Krieg, Geschichte eines radikalen Zeitalters, 1947-1991 (The Cold War: History of a Radical Age)*, C.-H. Beck.

¹³⁰ Krige, J. 2010, *Techno-Utopian Dreams, Techno-Political Realities: The Education of Desire for the Peaceful Atom*, in Gordin, Michael D., Tilley, Helen, Prakash, Gyan (Eds.), *Utopia/Dystopia, Conditions of Historical Possibility*, Princeton University Press, pp. 151-175. <http://www.geosociety.org/documents/gsa/memorials/v16/Goodman-C.pdf>

¹³¹ Dean, G. 1950, Problems of Atomic Energy Commission, *Nucleonics*, 6(5), květen 1950, str. 5-10.

¹³² Western, F. 1948, Problems of Radioactive Waste Disposal, *Nucleonics*, srpen 1948, str. 43-49.

¹³³ Honstead, J. F., Foster, R. F., Bierschenk, W. H. 1959, *Movement of Radioactive Effluents in Natural Waters at Hanford* in International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Wastes*, Vol. 2, Conference Proceedings, Monaco, 16.-21. listopad 1959.

¹³⁴ Pearce, D. W., Linderoth, C. E., Nelson, J.L., Ames, L.L. 1959, *A Review of Radioactive Waste Disposal to the Ground at Hanford*, str. 347-363, in International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Wastes*, Vol. 2, Conference Proceedings, Monaco, 16.-21. listopad 1959.

¹³⁵ Scott, K.G. 1950, Radioactive Waste Disposal – How Will It Affect Man's Economy? *Nucleonics*, 6:1, leden 1950, str. 18-25.

¹³⁶ Jones, D.G. et al. 2001, *Measurement of Seafloor Radioactivity at the Farallon Islands Radioactive Waste Dump Site, California*, Open-File Report 01-62, USGS, BGS, EPA, NOAA, cit. 31. července 2019, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-062/>

¹³⁷ Fair, D. R. R., McLean, A. S. 1956 *Décharge de déchets radioactifs dans la mer d'Irlande, Troisième partie: Evacuation expérimentale d'effluents radioactifs (Discharge of radioactive waste in the Irish Sea, Part III: Experimental disposal of radioactive waste)*, Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Geneva 8-10 August 1955, Volume IX.

¹³⁸ Rodger, W. A. 1954, Radioactive Wastes – Treatment, Use, Disposal, *Chemical Engineering Progress*, 50(5), str. 263-266.

tenzivnilo. Prvotní návrhy počítaly se zavedením zatavování jaderného odpadu do betonu¹³⁹, skla nebo keramických matric¹⁴⁰ a s jejich konečnou likvidací v geologickém podloží¹⁴¹, v pouštních oblastech¹⁴² nebo v nepoužívaných dolech či hlubokých šachtách.¹⁴³ Tyto návrhy se časem konkretizovaly, ačkoli na jejich realizaci stále ještě čekáme.

Koncem 40. let minulého století začaly AEC a různé laboratoře zapojené do programu debatovat o otázkách likvidace v odborném prostředí.¹⁴⁴ Spolupráce s experty, univerzitami a průmyslem se od 50. let stále více institucionalizovala. V září 1955 se na Princetonské univerzitě konalo setkání nad tématy skladování a likvidace jaderného odpadu¹⁴⁵, po němž následovaly další výměny názorů,¹⁴⁶ částečně v souvislosti s mezinárodními konferencemi, jež se od srpna 1955 konaly pod záštitou OSN.¹⁴⁷ FAEC též od roku 1955 povolala americkou Národní akademii věd (NAS), která v roce 1957 zveřejnila nadšeně přijatou zprávu o likvidaci jaderného odpadu, v níž nastínila stávající stav znalostí a současné strategie likvidace.¹⁴⁸ Jako zvlášť zajímavé prostory k likvidaci popisuje doły a jako zvlášť vhodné horniny pro ukládání definuje solná souvrství. Souběžně s touto zprávou NAS vydala i druhou zprávu své komise „k účinkům atomového záření na oceánografii a oblasti rybolovu“, jež předznamenala určitou opatrnost při realizaci strategie likvidace radioaktivního odpadu v mořích.¹⁴⁹

První konkrétní výzkumné projekty v opuštěných solných dolech byly zahájeny v USA.¹⁵⁰ Tento výzkum proběhl v solném dole Carey v městě Hutchinson ve státě Kansas, kde již koncem 50. let probíhaly terénní experimenty s malými objemy vysokoaktivního odpadu z přepracování.¹⁵¹ Smyslem těchto experimentů bylo porozumět vývoji teplot v solných dómech a v ukládaném odpadu a též reakcím mezi odpadem a solí. Národní laboratoř v Oak Ridge (ORNL), organizace zodpovědná za tyto experimenty, na konci 60. let navrhla důl jako vhodné úložiště.¹⁵² V následujících letech vzplál těžký spor mezi ORNL a federálními vládními orgány na jedné straně a dotčeným státem Kansas na straně druhé. Projekt byl nakonec zrušen poté, co geolog v oblasti dolů objevil 29 bývalých vrtů na zemní plyn a ropu a vyšla najevo nebezpečí změn vodního režimu.¹⁵³ Kromě toho panovala značná nejistota ohledně těžby rozpouštěním v nedalekém dole a možnosti propadání dolů v blízkosti prostor plánovaného úložiště.¹⁵⁴

¹³⁹ Hatch, L.P. 1953, Ultimate disposal of Radioactive Waste, *American Scientist*, 41(3), str. 410–421.

¹⁴⁰ Herrington, A.C., Shaver, R.G., Sorenson, C.W., 1953, Permanent Disposal of Radioactive Wastes, *Economic Evaluation, Nucleonics*, 11(9), září 1953, str. 34–37.

¹⁴¹ Morton, Roy J., Struxness, Edward G. 1956, Ground Disposal of Radioactive Wastes, *American Journal of Public Health*, únor 1956, str. 156–163.

¹⁴² Glueckauf, E. 1955, The Long-Term Aspects of Fission Product Disposal, *Atomics*, str. 274.

¹⁴³ Theis, Charles V. 1956, *Problèmes relatifs à l'enfouissement des déchets nucléaires (Problems related to the disposal of nuclear waste)*, Actes de la Conférence Internationale sur l'Utilisation de l'Energie Atomique à des Fins Pacifiques, Geneva 8–20 August 1955, Vol. IX, str. 774–779.

¹⁴⁴ Waste Disposal Symposium, *Nucleonics*, březen 1949, str. 9–23.

¹⁴⁵ US National Academy of Sciences (NAS) 1957a, *The Disposal of Radioactive Wastes on Land*, Report of the Committee on Waste Disposal of the Division of the Earth Sciences, National Research Council, str.2, a Appendix B. str. 12–81.

¹⁴⁶ Carter, L.J. 1987, Nuclear imperatives and public trust: Dealing with radioactive waste. *Issues in Science and Technology*, 3(2), str. 46–61.

¹⁴⁷ United Nations 1956, *Proceedings of the First International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva 8–20 August 1955.

¹⁴⁸ NAS, 1957a, str. 8.

¹⁴⁹ NAS, 1957b, *Report of the Committee on the effects of atomic radiation on oceanography and fisheries*.

¹⁵⁰ Parker, F.L. a kol. 1959, *Disposal of Radioactive Wastes in Natural Salt*, str. 368–384, in International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Wastes*, Vol. 2, Conference Proceedings, Monaco 16–21 November 1959.

¹⁵¹ Dvakrát 25 galonů neutralizovaného resp. syntetického odpadu PUREX (PUREX = Plutonium Uranium Redox Extraction), viz Parker, F.L. a kol., 1959, str. 377–381.

¹⁵² Walker, J.S. 2009, *The Road to Yucca Mountain*, University of California Press, str. 51–75.

¹⁵³ Alley, W. and Alley, R. 2013, *Too Hot To Touch. The Problem of High-Level Nuclear Waste*, Cambridge University Press, str. 15.

¹⁵⁴ Boffey, P. 1975, *The Brain Bank of America*, McGraw Hill, str. 104–105.

Projekt Lyons v Kansasu byl prvním významným neúspěchem likvidace v hlubinných geologických vrstvách a poprvé odhalil problémy spojené s plánováním a řízením těchto projektů. Všechny dosud plánované a realizované projekty stojí před těmito dvěma zásadními problémy: podcenění složitosti plánování a obtíže při řízení megaprojektů.¹⁵⁵ Projekt Lyons je rovněž zajímavý proto, že počítal s možností velmi brzkého vyzvedávání uloženého odpadu.¹⁵⁶

Všechny dosud plánované a realizované projekty stojí před dvěma zásadními problémy: podcenění složitosti plánování a obtíže při řízení megaprojektů.

Západní Německo v 60. letech začalo zvažovat bývalé solné doly jako potenciální lokality, tedy se drželo doporučení NAS.¹⁵⁷ V Německu se nachází rozsáhlá ložiska soli a v té době měla již země okolo 150 let zkušeností s provozem solných a draselných dolů. Západoněmečtí geologové a důlní inženýři navíc považovali sůl za de facto suchou (navzdory předešlým opačným zkušenostem).¹⁵⁸ Dění v experimentálním úložišti v solném dole Asse II u města Wolfenbüttel v Dolním Sasku vypadalo tak slibně, že je v té době publikace MAAE¹⁵⁹ a národních organizací pro nakládání s odpady¹⁶⁰ prezentovaly jako modelové úložiště budoucnosti. Kvůli přítokům vody, jež byly zaznamenány od roku 1988 a v roce 2008 oznámeny veřejně, skončil neslavně i projekt Asse II, jenž se vyznačoval utajením a špatným vedením (viz oddíl 7.3).¹⁶¹

Mezitím se nadále realizovaly způsoby likvidace, jejichž cílem bylo především ředění tuhého a kapalného jaderného odpadu v mořských či podzemních vodách s minimálními náklady. K nim patřilo skládkování v různých oceánech světa, jehož se zúčastnily všechny nejvýznamnější státy s jadernými zbraněmi a jež se rovněž stalo vzorem pro likvidaci civilního jaderného odpadu v různých zemích Evropy.¹⁶² Jaderný odpad se navíc likvidoval vstřikováním kapalného jaderného odpadu o různém stupni aktivity do starých průzkumných šachet, k čemuž docházelo ve Spojených státech i v Sovětském svazu (a později Rusku) po dobu let až desítek let.¹⁶³

¹⁵⁵ Hodge, G., and Greve, C. 2013, *Public-private partnership in developing and governing megaprojects*, in: Priemus, H. and van Wee, B. Edts., *International Hand-book on Mega-Projects*, Edward Elgar.

¹⁵⁶ Parker, F.L. a kol. 1959, str. 371.

¹⁵⁷ Radkau, J. 1983, *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1970* (The rise and crisis of the German nuclear industry 1945–1970), Rowohlt Taschenbuch; Möller, Detlev, 2007, *Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik* (Final disposal of radioactive waste in the Federal Republic of Germany), Peter Lang.

¹⁵⁸ Buser, M., and Wildi, W. 2018, *Du stockage de déchets toxiques dans des dépôts géologiques profonds* (Storage of toxic waste in deep geological repositories), *Sciences & Pseudosciences*, , červen, cit. 31. července 2019, <https://www.pseudo-sciences.org/Du-stockage-des-dechets-toxiques-dans-des-depots-geologiques-profonds>;

¹⁵⁹ MAAE 1977, *Radioaktive Abfälle: Woher – Wohin?* (Radioactive waste: Where from – Where to?) Internationale Atomenergieagentur Wien.

¹⁶⁰ Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und -projektanten (Federation of Swiss Electricity Utilities, nuclear power plant operators and developers) 1978, *Die nukleare Entsorgung in der Schweiz* (Nuclear waste disposal in Switzerland), Konferenz der Überlandwerke (UeW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Conference of regional utilities, National Cooperative for Nuclear Waste Storage), 9. února.

¹⁶¹ Möller, D. 2015, *Zur Geschichte des Endlagers Asse II [1964–2009] und ihrer heutigen Relevanz* (The history of the Asse II repository [1964–2009] and its relevance today), Rückholung der Nuklearabfälle aus dem früheren Forschungsbergwerk Asse II bei Wolfenbüttel, Vortragsreihe am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), 1. prosince, str. 9–24, cit. 31. června 2019, <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2016/houa16a.pdf>

¹⁶² Calmet, D. 1989, *Ocean Disposal of Radioactive Waste: A Status Report*, IAEA-Bulletin 4/1989, str. 47–50, cit. 2. srpna 2019, <https://www.iaea.org/sites/default/files/31404684750.pdf>; IAEA, 1999, *Inventory of radioactive waste disposals at sea*, August 1999, cit. 2. srpna 2019, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1105_prn.pdf

¹⁶³ NDC 1977, *Radioactive Waste Disposal, Low- and High-Level*, Pollution Technology Review 38; Spitsyn, V. I., Balukoda, V.D. 1978, *The Scientific Basis For, and Experience With, Underground Storage of Liquid Radioactive Wastes in the USSR*, in *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, Springer, str. 237–248.

Od 70. let výzkum a vývoj v oblasti nakládání s jaderným odpadem výrazně nabyl na intenzitě. Od základu se reorganizovaly řídicí struktury (jako v případě amerického Ministerstva energetiky) a dále se rozvíjely koncepce konečné likvidace. Jeden po druhém se opouštěly neobvyklé koncepce konečné likvidace od rozmísťování nádob do antarktického ledovce¹⁶⁴ přes likvidaci v kosmu¹⁶⁵ až po samovolné roztavení jaderného odpadu v termionukleárně vytvořených jeskyních (projekt DUMP).¹⁶⁶ V té době probíhaly jak mezinárodní projekty, například projekt likvidace pod mořským dnem, jenž zkoumal možnost ukládání nádob s vysokoaktivním odpadem do hlubokomořských usazenin¹⁶⁷, tak i projekty úložišť v kontinentálním podloží. Možnost likvidace vysokoaktivního odpadu do hlubinných vrtů, který zpráva NAS předjímala již v roce 1957¹⁶⁸, byla postupně odsunuta do pozadí. V současnosti se o ní však stále uvažuje jako o jedné z možností.¹⁶⁹

Pozornost se zaměřila na likvidaci ve speciálně budovaných dolech v hloubce několika set (až jednoho tisíce) metrů, jež v podstatě určovaly stavební technologie té doby. Novým standardem jakosti se na konci 70. let stal švédský projekt KBS týkající se konečné likvidace vitrifikovaného vysokoaktivního odpadu a vyhořelých palivových článků.¹⁷⁰ Švédský přístup je založen na tzv. multibariérovém konceptu, který v té době představoval projekční standard. K zajištění zamezení šíření radioaktivního materiálu po dlouhou dobu stovek tisíc let uvažuje různé bariéry vložené jedna do druhé na principu ruské panenky matryšky. K bariérám patří ztužení odpadu v matrici odolné proti vyplavování (borosilikátové sklo, keramické materiály atd.), jeho balení do speciálních skladovacích nádob vyrobených z oceli a/nebo mědi, jeho zapouzdření do bobtnavého sopečného popela (bentonitu) a do tlumicích materiálů ve skladovacích chodbách a jeho zavedení do pevné horniny v příhodném geologickém prostředí.¹⁷¹

Úložiště budoucnosti se mají budovat s ukládacími chodbami, z nichž některé budou kilometry dlouhé, do kterých by odpad v obalech zaváděl ve svislém či vodorovném směru, napojenými na povrch šachtami a někdy přepravními rampami. Z tohoto konceptu v posledních čtyřech desetiletích vycházejí všechny koncepce úložišť. Strategie konečné likvidace v usazeninách nebo podloží mořských hlubin byly naproti tomu opuštěny. Výzkum v oblasti konečné likvidace v kilometry hlubokých vrtech pokračuje pouze ojediněle.

Řada případů dokládá, že ani tyto inovace nemohou zaručit bezpečnou likvidaci jaderného odpadu v kontinentálních úložištích. Například americký Pilotní projekt izolace odpadu (Waste Isolation Pilot Project, WIPP) v Novém Mexiku, realizovaný na základě výše uvedených projekčních principů, v letech 2014-2017 prodělal několik více či méně závažných incidentů a havárií.¹⁷² Z toho vyplývá další rozměr

¹⁶⁴ Philbert, B. 1961, *Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde* (Disposal of radioactive waste substances in the ice caps of the earth), *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, Vol. XXIII, Birkhäuser

¹⁶⁵ Burns, R.E. a kol. 1978, *Nuclear Waste Disposal in Space*, NASA Technical Paper 1225, květen 1978, cit. 31. července 2019, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780015628.pdf>

¹⁶⁶ Milnes, A.G. 1985, *Geology and Radwaste*, London: Academic press, str. 46-48.

¹⁶⁷ Likvidace pod mořským dnem je zakázána podle Protokolu z roku 1996 k Londýnské konvenci z roku 1972, viz Holt, M. 2009, *Nuclear Waste Disposal, Alternatives to Yucca Mountain*, CRS Report for Congress, 6 February 2009

¹⁶⁸ NAS 1957a.

¹⁶⁹ Schwartz, F., Kim, Y., Chae, B.-G. 2017, Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes: Opportunities and Challenges, *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technologies* 15(4), str. 301-312.

¹⁷⁰ KBS 1978a, *Handling of spent nuclear fuel and final storage of vitrified high-level reprocessing waste*, *Kärnbränslesäkerhet*, Stockholm; KBS, 1978b, *Handling and final storage of unprocessed spent nuclear fuel*, *Kärnbränslesäkerhet*, Stockholm.

¹⁷¹ Milnes, A.G., Buser, M., and Wildi, W. 1980, *Endlagerungskonzepte im Überblick* (Overview of final disposal concepts), *Zeitschrift Deutschen Geologischen Gesellschaft* 131(2), str. 359-385.

¹⁷² Klaus, D. 2019, What really went wrong at WIPP: An insider's view on two accidents at the only underground nuclear waste repository, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 75(4), str. 197-204.

rizik v konkrétní realizaci úložišť: kromě problémů technické a geologické bezpečnosti vyvstávají zásadní otázky ohledně konstrukčních a organizačních nedostatků, zejména zajištění jakosti, bezpečnostní kultury a řízení programů úložišť.¹⁷³

Těmito otázkami se na přelomu tisíciletí zabývala švýcarská koncepce úložiště, navržená Komisí pro koncepci likvidace jaderného odpadu (EKRA).¹⁷⁴ Na rozdíl od všech ostatních dosavadních komisí se EKRA zabývala všemi možnými variantami ukládání a likvidace jaderného odpadu. Koncepce EKRA zavádí zásadní inovace v oblasti plánování a realizace projektů likvidace v hlubinných úložištích. K nim patřilo rozlišení mezi aktivními programy opatření a pasivními bezpečnostními systémy a potřeba systematické realizace programů. Patřily sem koncepce dlouhodobého monitorování úložišť, po němž již volalo několik předchozích autorů.¹⁷⁵ Proveditelnost se měla prokázat vybudováním pilotního úložiště a realizací odpovídajících programů monitoringu. Další zásadní prvky se týkaly principu vratnosti rozhodnutí a možnosti vyzdvižení uloženého odpadu, ale též organizace programu, strukturálních rámcových podmínek a v nich zakotveného řízení procesů, programy zajištění jakosti a dlouhodobě orientovanou strategii výzkumu. Koncepce EKRA tvořila základ zákona o jaderné energii z roku 2003. Švýcarský program a zákony tak šly mnohem dále, než co předpokládala Francie ve svém zákoně o odpadech („Loi Bataille“) z roku 1991,¹⁷⁶ a nad rámec formulované povinnosti věnovat se možnostem vratnosti rozhodnutí.¹⁷⁷

V současnosti se stále více vyjasňují a kodifikují požadavky na řízení programů nakládání s jaderným odpadem, jak je zřejmé například z francouzské praxe¹⁷⁸ nebo z německého zákona o výběru lokalit pro úložiště (StandAG). Německý zákon pojímá postup výběru lokality jako proces učení, jenž „je schopen vzít do úvahy nová zjištění a vlivy, jež vyvstanou v průběhu výběru, a integrovat a implementovat je v případě nutnosti do procesu výběru.“¹⁷⁹ Výzkum i praxe se stále více věnují otázkám řízení.¹⁸⁰

Stručné přezkoumání více než 70 let historie nakládání s jaderným odpadem umožňuje čtyři závěry ohledně řízení programů a úspěchů a neúspěchů předchozích projektů nakládání s jaderným odpadem:

- Dosud nebyl nikde na světě realizován ani jeden program hlubinné podzemní likvidace odpadu.
- Složitost a rizika nakládání s jaderným odpadem byla zatím hrubě podceňována.

¹⁷³ Buser, M. 2019, *Wohin mit dem Atommüll?* (Where to put the nuclear waste?), Rotpunkt, str. 204–206.

¹⁷⁴ Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste (EKRA) 2000, *Disposal Concepts for Radioactive Waste, Final Report*, Federal Office of Energy, Bern.

¹⁷⁵ Hammond, R. P. 1979, Views: Nuclear Wastes and Public Acceptance: Monitored containers in a controlled tunnel environment may prove more widely acceptable than the uncertainties of an uncontrolled geologic structure. *American Scientist*, 67(2), pp.146–150; Roseboom Jr, E.H., 1983. Disposal of high-level nuclear waste above the water table in arid regions (No. USGS-CIRC--903). Geological Survey, Alexandria, VA (United States).

¹⁷⁶ Government of France 1991, Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (Law on research of radioactive waste management).

¹⁷⁷ Lehtonen, M. 2010, Opening Up or Closing Down Radioactive Waste Management Policy? Debates on Reversibility and Retrievability in Finland, France, and the United Kingdom, *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy* 1(4).

¹⁷⁸ Levers, P. 2018, La réversibilité dans le projet de stockage profond (Reversibility in the deep storage project), *Science & Pseudoscience*, n° 324, April-June 2018, viewed July 31 2019, <https://www.afis.org/La-reversibilite-dans-le-projet-de-stockage-profond>

¹⁷⁹ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (German commission for highly radioactive waste storage) 2014, *Aspekte eines Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle* (Aspects of a site selection procedure for a repository for heat-generating waste), Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung; Brochure, pp. 13, viewed July 31 2019, https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/352790/fbe1c31a22e4ca2c30345c46bc36bed0/drs_081-data.pdf

¹⁸⁰ Brunnengraber, A. et al 2015, *Nuclear Waste Governance*, Springer VS; Kuppler, S. and Hocke, P. 2018, The role of long-term planning in nuclear waste governance. *Journal of Risk Research* pp. 1–14.

- Z historie nakládání s jaderným odpadem vyplývá trvalý posun koncepcí a programů z hlediska cílů, realizace, bezpečnosti a plánování opatření směrem k lépe říditelným dlouhodobým projektům (řízení a dlouhodobá správa).
- Historie nakládání s jaderným odpadem odhaluje skutečnost, že čistě vědeckým a technickým přístupem k těmto programům nelze naplnit výzvy, které s sebou takto vysoce rizikový program nese. Vlády v minulosti často zanedbávaly například otázky řízení projektů, společné tvorby strategií nakládání s odpady a jejich likvidace a role dotčených komunit.

5.2 KONTEXT NAKLÁDÁNÍ S JADERNÝM ODPADEM

Z dosavadních zkušeností plyne, že při realizaci a plánování programů nakládání s odpadem by se mělo zohlednit pět základních dimenzí:

HISTORICKÝ RÁMEC: společnost bude muset žít s radioaktivním dědictvím, které již existuje, i s tím, které pravděpodobně přetrvá. Tento úkol představuje zvlášť velkou společenskou, technickou, politickou a finanční výzvu pro budoucí generace. Rozsah tohoto problému naznačují předpokládané náklady ve výši 490 miliard USD, jež k sanaci kontaminovaných jaderných lokalit odhadují Spojené státy.¹⁸¹ Moderní společnost se nebude moci vyhnout převzetí radioaktivního dědictví a zajistit mu prozíravější a bezpečnější řešení, než máme dnes. Z historie bychom se však měli poučit, abychom neopakovali chyby při nakládání s jaderným odpadem. To se týká procesů zahajovaných při hledání a realizaci řešení a společenské kontroly nad nimi. Znamená to též, že při plánování a realizaci programů bude nutná bezpečnostní kultura s opravdovým hledáním nejlepší možné praxe.

SPOLEČENSKÉ RÁMCOVÉ PODMÍNKY A ČASOVÉ NÁROKY: Z historických příkladů plyne, že časové nároky na realizaci programů likvidace odpadů se po celém světě hrubě podceňují. Likvidace jaderného odpadu a plánování a realizace strategií hlubinné likvidace jaderného odpadu, které zvažujeme dnes, se potáhnou ještě minimálně další tři generace. Pokud vezmeme v potaz nároky na monitorování a dlouhodobou správu cílových „úložišť“, můžeme snadno uvažovat o období pěti až deseti generací (150 až 300 let). Tato dlouhá období kladou zvláštní nároky na stabilitu společnosti a nevyhnutelně vedou k úvahám o možnostech bezpečného skladování, správě a údržbě radioaktivních zásob již uložených v meziskladech s prodlouženou životností po celou tuto dobu. Znamená to též zvlášť velké výzvy ohledně jakosti plánování, specifické dlouhodobé správy a technického řešení těchto dlouhodobějších skladovacích zařízení. Může být rovněž nutné zřizovat dlouhodobější podzemní skladovací zařízení.

SLOŽITOST: V současnosti se stále hrubě podceňuje složitost likvidace jaderného dědictví. Fyzikálně-chemické stárnutí odpadových materiálů a z toho plynoucí rizika jsou stále z větší části neprozkoumané. Obdobně různorodost existujících odpadů i používaných nosných a zpevňujících materiálů vede ke zcela novým problémům při zavádění těchto směsí odpadů do podzemních úložišť. Například k čištění, údržbě či ztužování nízko a středněaktivního odpadu se používá velké množství různých organických látek. Některé z těchto směsí se přitom považují za možné zdroje vznícení (například bitumenizované iontoměničové pryskyřice), a proto představují zvlášť významný zdroj nebezpečí v případě otevřeného provozu úložiště.¹⁸² Organický odpad navíc bude hrát rozhodující úlohu při vzniku plynů v uzavřených podzemních skladovacích zařízeních. Rizika se týkají nejen plánovaných úložišť pro vysokeaktivní jaderný odpad, ale i těch pro nízko a středněaktivní odpad. Nebezpečí požáru i požáry se v podzemních úložištích chemotoxického odpadu již vyskytly.¹⁸³

¹⁸¹ Klaus 2019, str. 201.

¹⁸² Buser, M., Wildi, W. 2018, „Abfallkonditionierung in Bitumen: ASN sagt nein!“ (Waste conditioning in Bitument: ASN says no). cit. 2 srpna 2019, <https://www.nuclearwaste.info/abfallkonditionierung-in-bitumen-asn-sagt-nein/>

¹⁸³ Comité de pilotage Stocamine 2011, Rapport d'expertise, cit. 1. srpna 2019, <http://www.stocamine.com/media/1061/Conclusions%20COPL.pdf>

Dalším příkladem nových problémů se směsným odpadem je skutečnost, že velké množství skladované hmoty od radioaktivních materiálů, kovů a těžkých kovů přes organické látky a rozkladné produkty po materiály nádob a další výrobky podléhající korozi (alkalické reakce kameniva v betonu) představuje zvlášť reaktivní prostředí ve styku s podzemní vodou, průlinovou vodou¹⁸⁴ nebo solnými roztoky odpovídajících hornin. Výsledné chemické prostředí takového podzemního skladu odpadu je zatím předmětem jen velmi omezeného zkoumání a výzkum by se mu tedy měl věnovat podrobněji. Totéž platí o vzniku plynů při bakteriálních nebo chemických rozkladných pochodech.

Složitost plánování lze ukázat na velkém množství otázek, na které dnes nemáme žádné nebo jen velmi omezené odpovědi na základě zkušeností. Budeme též muset najít odpovědi na otázky, jak se podzemní zařízení pokrývající mnoho čtverečních kilometrů budou chovat dlouhodobě v podzemí citlivém na různá pnutí a do jaké míry vůbec lze tato zařízení hermeticky uzavřít. Další otázka se týká změn palivových článků během skladování v podzemí, jejich dlouhodobé proměny a jejich potenciálních účinků na jejich případnou opětovnou využitelnost. A konečně vědecká zjištění nebo technický vývoj či skokové změny technologií mohou zpochybnit plánovaný systém úložišť, který v současné době realizujeme. I v takovém případě by se měly brát v potaz shora uvedené úvahy o složitosti systémů úložišť. Řada z těchto zásadních otázek si žádá komplexní a neodkladné vyjasnění.

POLITICKÉ RÁMCOVÉ PODMÍNKY: Tato dimenze se týká šíření štěpného materiálu a uznání skutečnosti, že úložiště může být při dlouhodobém pohledu považováno i za „důl na plutonium a recyklovatelné materiály“. To přirozeně vyvolává dalekosáhlé otázky ohledně vnikání do těchto úložišť, respektive jejich ochrany. V tomto smyslu likvidace ozářených vysoce aktivních palivových článků přináší zvlášť velkou výzvu s ohledem na sociopolitické rozhodování v budoucnosti.

ŘÍZENÍ A SPOLEČNOST: V rámci projektů nakládání s odpady je konečně nutno vyřešit dva ústřední faktory. Za prvé jsou tu otázky řízení programů, jehož zásadní důležitost si politici teprve pomalu začínají uvědomovat (příkladem jsou projekty WIPP v USA a Asse II v Německu) a jež je nezbytné pro další budování důvěry. Za druhé občanskou společnost (zejména dotčené regiony) nelze zapojovat pouze ve smyslu doprovodné účasti, ale též v rámci širší účasti a spolurozhodování, aby bylo zajištěno dlouhodobé přijetí těchto projektů.

Tyto úvahy o kontextu nakládání s jaderným odpadem předcházejí dalšímu vysvětlování hlubinného ukládání jaderného odpadu, respektive s ním spojené nutnosti dlouhodobějšího dočasného skladování do doby realizace podzemního řešení.

5.3 KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S JADERNÝM ODPADEM

Každé řešení nakládání s odpady musí co nejlépe chránit obyvatelstvo a životní prostředí, být proveditelné a tolerované a nesmí působit nepřiměřenou zátěž budoucím generacím. Toto základní chápání požadavků na skladování odpadů je formulováno ve Společné úmluvě o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady z roku 2001. Článek 11 Společné úmluvy praví, že „každá smluvní strana je povinna přijmout taková opatření, jež zajistí dostatečnou ochranu jednotlivců, celé společnosti a životního prostředí před radiologickým a ostatním nebezpečím ve všech fázích nakládání s jaderným odpadem“.¹⁸⁵ Dále je nutno zaručit dlouhodobou ochranu úložišť

¹⁸⁴ Průlinová voda je podzemní voda, která je uložena ve volných prostorách v usazeninách mezi zrnny hornin či minerálů.

¹⁸⁵ MAAE 2001, *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, cit 11. června 2019, <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste>

před neoprávněným vniknutím. Splnění tohoto cíle bude obzvláště náročné kvůli ohromným současným i budoucím pokrokům ve vrtné technologii. Tato změna a zároveň zpřísnění požadavků na ochranu úložišť musí vést k zásadnímu přehodnocení rolí a odpovědnosti při plánování a strukturování programů nakládání s odpady. V konečném důsledku je rovněž nutné přehodnotit stávající vizi hlubinného ukládání odpadů bez kontroly občanské společnosti.¹⁸⁶

KONCEPCE LIKVIDACE

MAAE popisuje likvidaci jako umístění bez úmyslu opětovného vyzdvižení (což neznamená, že vyzdvižení není možné). MAAE své požadavky na bezpečnost radioaktivního odpadu rozlišuje následovně.¹⁸⁷

- Likvidace na speciálních skládkách odpadu: podobné konvenčnímu skládkování, pro velmi nízkoaktivní odpad (VNAO), například z demontáže reaktorů.
- Přípovrchová likvidace: v uměle vytvořených výkopech či kobkách na povrchu nebo desítky metrů pod terénem, pro nízkoaktivní odpad (NAO).
- Podzemní zařízení: sestávají z vybudovaných místností a kobek nebo jsou vestavěná do dolů desítky až stovky metrů pod terénem, pro středněaktivní odpad (SAO).
- Geologická likvidace: jako uvedeno shora, zejména pro vyhořelé palivo a ostatní vysokoaktivní odpad (VAO).
- Likvidace ve vrtech: v hloubce několika set metrů až několika kilometrů, pro likvidaci nádob s VAO, respektive plutoniem.¹⁸⁸

V této kategorizaci MAAE odstupňovaným způsobem přiřazuje k jednotlivým kategoriím odpadu určité koncepce zařízení pro likvidaci. Rozhodnutí o konkrétním systému zařízení je na příslušné zemi. Většina zemí má alespoň koncepce likvidace a mnoho z nich v současnosti buduje nebo již provozuje zařízení k likvidaci nízko a středněaktivního odpadu (viz oddíl 2.3.1).

ÚLOŽNÉ HORNINY

Jak vyplývá z historické analýzy, dnešní koncepce úložišť se vyvinuly poměrně specificky směrem k likvidaci jaderného odpadu do kontinentální zemské kůry (viz kapitolu 5.1). Za zvláště zajímavé úložné horniny se od samotného počátku považovaly solné masivy a též montmorillonity, například jílové minerály a jíly vzhledem k jejich velmi nízké propustnosti a vysoké sorpční kapacitě. Hledání možných lokalit pro vysokoaktivní odpad se zaměřovalo zejména na tyto dva typy hornin. Možnosti se však poměrně rychle musely rozšířit na další úložné horniny, protože některé země ve svém podloží žádná taková souvrství nemají. Tato okolnost vedla především dvojici severoevropských zemí využívajících jadernou energii (Švédsko a Finsko) k volbě krystalinických hornin Baltského štítu. Zejména severoevropské programy však byly nuceny výrazně zpevnit umělé bariéry (měděné nádoby) na úkor geologické izolace za účelem ochrany před přítoky podzemních vod puklinami a průlinami v krystalinických horninách. Též Japonsko se muselo uchýlit k využití hornin, jež se nacházejí v podloží Tichomořského lemu: krystalinických hornin a pelagických či hemipelagických usazenin.¹⁸⁹

¹⁸⁶ Buser, M. 2017a, „Nuclear Waste – How to Handle our Legacy to Future Generations: The dual approach,” Lecture held in the international Congress „Human rights, future generations & crimes in the nuclear age”, University of Basel, 14-17 September 2017.

¹⁸⁷ MAAE 2011, *Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements No. SSR-5*, International Atomic Energy Agency, cit. 1. srpna 2019, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449_web.pdf

¹⁸⁸ NAS 1994, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium*, Committee on International Security and Arms Control, Washington D.C., Appendix C str. 247.

¹⁸⁹ NEA 2016, *Japan's Siting Process for the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste*, Nuclear Energy Agency / OECD, cit. 1. srpna 2019, str. 15, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/pdf/018_s01_00.pdf

Mezi úložnými horninami se vyskytují i jiné neobvyklé typy: sopečné tufy, s nimiž se počítalo například především v úložišti Yucca Mountain v Nevadě¹⁹⁰ – v lokalitě amerického programu úložišť, která byla mezitím zrušena (viz oddíl 7.8) – a jež vyvolávají zásadní pochybnosti o vhodnosti kvůli vysoké propustnosti. Stejně problematické jsou všeobecně poměrně tenké vrstvy anhydritu, jež se objevují jako doprovoďné horniny u ložisek kamenné soli. Ty byly zpočátku specialitou programů likvidace ve Švýcarsku.¹⁹¹ Mezi ostatní horniny volené v průběhu hledání lokalit byly například čediče v programu Hanford v USA nacházející se pod kvartérním příkrovem¹⁹² nebo alpské slíny ve švýcarském Wellenbergu.¹⁹³

V minulosti se neobvyklé úložné horniny často vyskytovaly v bezprostřední blízkosti jaderných zařízení nebo dolů, například dolu na železnou rudu Schacht Konrad nedaleko německého Salzgitteru¹⁹⁴ nebo uranového dolu Beta v pegmatitech závodu El Cbril ve Španělsku.¹⁹⁵ Bez ohledu na to, že jsou k dispozici pouze omezené zkušenosti z realizace geologických úložišť, se sůl, jílové horniny a krystalinické horniny obvykle považují za zvláště vhodné úložné horniny.

ÚLOŽIŠTĚ NSAO

První tři typy zařízení uváděných MAAE (likvidace na speciálních skládkách odpadu, přípovrchová likvidace a podzemní zařízení) se v mnoha zemích realizují po desítky let. Míra úspěšnosti jednotlivých realizací se však značně liší a odpovídá dobovým koncepčním hlediskům a technickým prostředkům. Na nejstarších skládkách komerčního nízkoaktivního odpadu ve Spojených státech, například Maxey Flats nebo West Valley ve státě New York, se poměrně brzy ukázalo, že se ze skládek uvolňuje radioaktivita. Skládky nebyly utěsněné, jak později potvrdily programy monitoringu na mnoha dalších lokalitách. U skládky Maxey Flats se již v 70. letech prokázaly vyplavování NSAO ukládaného zde ve velkém množství a přítomnost komplexních sloučenin plutonia vně skládky.¹⁹⁶ Na skládce Beatty v Nevadě, kde se jaderný i chemotoxický odpad ukládaly do výkopů, k incidentům docházelo od počátku provozu až do velmi nedávné doby, kdy došlo k reakci a částečnému vymrštění likvidovaného kovového sodíku.¹⁹⁷ V podobném duchu si vedlo mnoho dalších skládek, jak dokládá seznam lokalit se starou ekologickou zátěží Agentury ochrany životního prostředí USA. Stručně řečeno, konvenční skládky odpadu a výkopy, tedy první kategorie zařízení uváděných ve shora zmíněné zprávě MAAE, nelze spolehlivě hydraulicky uzavřít. Tato zařízení je tudíž nutno chápat jako více či méně řízené lokality pro trvalé ředění odpadů.

¹⁹⁰ Walker, S. 2009, *The Road to Yucca Mountain*, University of California Press.

¹⁹¹ Buser, M. 2017b, *Short-term und Long-term Governance als Spannungsfeld bei der Entsorgung chemo-toxischer Abfälle*, Vergleichende Fallstudie zu Entsorgungsprojekten in der Schweiz und Frankreich: DMS St-Ursanne und das Bergwerk Felsenau (beide Schweiz) und Stocamine (Frankreich), ITAS-ENTRIA-Arbeitsbericht 2017-02, cit. 1. srpna 2019, <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2017/buse17a.pdf>

¹⁹² Milnes 1985, str. 154-155.

¹⁹³ Mosar, J. 2010, *Beurteilung der Tektonik im Standortgebiet Wellenberg (Kt. NW/OW) hinsichtlich eines Tiefenlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle*, Sachplan geologische Tiefenlager, z. Hd. Baudirektion Nidwalden, str. 4-6, cit. 1. srpna 2019, https://www.nw.ch/_docn/30814/gutachten_tektonik_prof._mosar.pdf

¹⁹⁴ Physikalisch-Technische-Bundesanstalt Braunschweig 2012, *Schachanlage Konrad*, cit. 1. srpna 2019, <https://epic.awi.de/id/eprint/37594/1/schacht-konrad.pdf>

¹⁹⁵ Hernando-Fernández, J. L., Hernando Luna, R. 2002, *Descubrimiento, explotación y tratamiento de los minerales radioactivos de Sierra Albarrana, El Cbril, Córdoba*, cit. 1. srpna 2019, https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/6947/braco143_2002_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

¹⁹⁶ Shrader-Frechette, K. 1993, *Burying Uncertainty, Risk and the Case Against Geological Disposal of Nuclear Waste*, University of California Press, str. 103-104; Cleveland, J. M., and Rees, T. F. 1981, *Characterization of Plutonium in Maxey Flats Radioactive Trench Leachates*, Science, 212(4502), str. 1506.

¹⁹⁷ Alley and Alley 2013, str. 139-148.

Druhý typ zařízení k likvidaci spočívá v posílení ochranných funkcí dosažených již prvním typem skládky odpadu doplněným o pomocné betonové komponenty a konstrukce. Tento typ stavby přispívá především k vytvoření základního prostředí, jež vytváří geochemickou bariéru, zejména pro výluhy obsahující těžké kovy. Tato konstrukce se používá u lokalit pro NAO i NSAO. Jedním z tohoto typu zařízení je úložiště NAO, které bylo otevřeno v roce 1971 v Barnley v Jižní Karolíně v podobě výkopů s jílovým uzávěrem, kde se odpad ukládá v prefabrikovaných válcích z upraveného betonu.¹⁹⁸ K dalším závodům tohoto typu patří dvě lokality ve Francii „Centre de Stockage de la Manche“ (CSM) v Digulleville v Normandii, v provozu v letech 1969–1994,¹⁹⁹ a její nástupkyně „Centre de Stockage de l'Aube“ (CSA) v Soullaines-Dyus v departementu Aube.²⁰⁰ Zde se předupravený a zabalený NSAO zpočátku ukládal do výkopů a později do speciálně vybudovaných betonových kobek. Mělké skládky odpadu se překrývají pomocí konvenčních technologií utěšňování. Lokality jsou vybaveny drenážními systémy a odpovídajícím monitoringem. Skládka NAO v Desselu v belgické části oblasti Kempen je též konstruována jako monolitické bloky odlité z betonu.²⁰¹

Přestože tato zařízení jsou lépe chráněna před průsaky než původní výkopy, i do betonových bloků časem pronikne dešťová voda, která může vyplavovat malé množství rozpustných radioaktivních látek (především tritia).²⁰² Ani tato zařízení se tedy neobejdou bez ředění. Zařízení k ukládání NSAO v El Cabril u španělské Córdoby²⁰³ nebo NAO u severoanglické obce Drigg²⁰⁴ byly budovány podle obdobných zásad.²⁰⁵

Oproti mnoha programům výstavby úložišť VAO se v případě úložišť NSAO často berou jako samozřejmost aktivní opatření, jako například jakost plánování, dlouhodobý monitoring (stovky let) a údržba zařízení.

Podzemní zařízení se realizovala poměrně brzy ve Švédsku²⁰⁶ a Finsku²⁰⁷. Obě úložiště obsahují NSAO. Jedná se o podzemní skladovací prostory, v nichž se zhruba v hloubce 60 metrů ukládají různé druhy NSAO. Co je důležité, v těchto zařízeních se skladují též bitumenizované iontoměničové pryskyřice. Ani jedno z úložišť nemá monitorovací systém (s vrty a vzorkováním vod a plynů vně skládky), na rozdíl od běžných moderních skládek tuhých komunálních či jiných odpadů. V jiných podzemních zařízeních

¹⁹⁸ South Carolina Department of Health and Environment Control 2007, *Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal in South Carolina*, Bureau of Land and Waste Management, Division of Waste Management, Columbia, South Carolina, cit. 5. srpna 2019,

https://www.scdhec.gov/sites/default/files/docs/HomeAndEnvironment/Docs/commercial_low_level.pdf

¹⁹⁹ MAAE 2005, *Upgrading of Near-Surface Repositories for Radioactive*, Technical Report Series N° 433, str. 63–70, cit. 5. srpna 2019, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS433_web.pdf

²⁰⁰ Andra 2008, *Rapport annuel*, Centre de stockage de déchets radioactifs de faible et moyenne activité, cit. 5. srpna 2019, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/034/49034330.pdf

²⁰¹ Wacquier, W. 2013, *The safety case in support of the license application of the surface repository of low-level waste in Dessel, Belgium*, NEA/OECD, NEA/NWR/R(2013)9.

²⁰² MAAE 2005, str. 65.

²⁰³ Zuloaga, A., Guerra-Librero, A. Morales, A. 1997, *L/IL W disposal experience in Spain after the startup of El Cabril disposal facility, Planning and Operation of Low Level Waste Disposal Facilities*, Proceedings Symposium Vienna, 1996, MAAE, str. 261–274.

²⁰⁴ MAAE 2005, str. 11–18.

²⁰⁵ Finster, M., Sunita, K. 2011, *International Low-Level Waste Disposal Practices and Facilities*, Fuel Cycle Research & Development, Argonne National Laboratory, prepared for US Department of Energy, cit. 5. srpna 2011, <https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/12/71232.pdf>

²⁰⁶ Finster a kol. 2011, str. 60–66.

²⁰⁷ Bergström, U., Per, K., and Almén, Y. 2011, *International Perspectives on repositories for low-level-waste*, SKB, str. 34–36, cit. 5. srpna 2019, <http://www.skb.com/publication/2343713/R-11-16.pdf>

se k ukládání NSAO využívá důlních děl, jako například v již zmíněném dole Mina Beta ve španělském El Cabril, v němž již byla provedena sanace. Platí to i pro Českou republiku. Bývalý vápencový důl Richard v hloubce 70–90 m pod povrchem byl modernizován pro likvidaci institucionálního odpadu. Zařízení k likvidaci odpadů Bratrství v bývalém uranovém dole se používalo k ukládání odpadu s přirozeně se vyskytujícími radionuklidy a od roku 2025 se bude uzavírat. Úložiště Hostim o objemu cca 1 700 m³ v bývalém vápencovém dole bylo trvale uzavřeno v roce 1997.

ÚLOŽIŠTĚ VAO NEBO ODPADU S OBSAHEM TRANSURANŮ S DLOUHOU DOBOU ROZPADU

Úložiště VAO vznikají na základě zásob vysokoaktivního odpadu nebo odpadu s obsahem transuranů s dlouhou dobou rozpadu. WIPP v Novém Mexiku (USA) je úložiště odpadu s obsahem transuranů s dlouhou dobou rozpadu a jako takové nepřijímá vyhořelé palivo ani vitrifikovaný odpad. Jde o jediné dosud vybudované a provozované úložiště tohoto typu na celém světě. Vláda Spojených států začala s hledáním lokality začátkem 70. let po neúspěchu projektu Lyons. Původně vybraná lokalita musela být zavržena kvůli inkluzím stlačeného plynu a solných roztoků²⁰⁸, ale úložiště bylo v 90. letech vybudováno a provozováno v náhradní lokalitě. Původně bylo projektováno úložiště s možností vyzdvižení.²⁰⁹ Vydaná provozní licence obsahovala podmínku, že odpad musí být po dobu několika stovek let v zásadě možno znovu vyzdvihnout.²¹⁰ V návaznosti na výbuch/požár, k němuž došlo 14. února 2014, však rostou pochybnosti o tom, zda je to stále možné. Je velice nepravděpodobné, že takto široké spektrum uložených odpadů s nerecyklovatelnými směsmi toho nejrozmanitějšího původu bude někdy vyzdviženo.²¹¹ Po více než tříleté přestávce se ukládání odpadů ve WIPP začátkem roku 2017 obnovilo.

Výběr lokality vhodné pro úložiště vyhořelého paliva a vysokoaktivního odpadu je pro každou zemi nadále velmi náročný. Nikde dosud není v provozu úložiště vysokoaktivního odpadu. WIPP není klasické úložiště VAO, ale úložiště transuranového odpadu s dlouhou dobou rozpadu. Všechny projekty konečné likvidace nebo hlubinné likvidace jaderného odpadu na celém světě jsou většinou v rané fázi plánování. Jak ukazuje tabulka 5, tyto národní projekty jsou v značně různém stadiu příprav. Lokalitu v procesu včasné izolace odpadu mají dosud fakticky určenou pouze tři země (Finsko, Švédsko a Francie). Tato skupina zemí je tak pokročilá, že již mají vydané stavební povolení na úložiště VAO, nebo je v následujícím desetiletí předpokládají. Stále však zůstávají otázky ohledně koroze měděných skladovacích nádob, které se tu mají používat,²¹² což by mohlo celý proces v severských zemích zdržet.²¹³ I ve Francii regulátor postupuje pomaleji, než se původně předpokládalo.

²⁰⁸ Mora, C. 1999, *Sandia and the Waste Isolation Pilot Plant 1974 – 1999*, Sandia National Laboratories Albuquerque SAND99-1482.

²⁰⁹ Irby, H.H., and Segura, M. 1980, *Retrievability of waste at WIPP*, Transactions of the American Nuclear Society 34.

²¹⁰ NEA 2011, *Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel*, Final Report of the NEA R&R Project (2007–2011), NEA/RWM/R(2011)4, 08.-Dec-2011; CFR 2014, *Code of Federal Regulations*, 40CFR194 – *Criteria for the certification and recertification of the waste isolation pilot plants compliance with the 40CFR191 disposal regulations*.

²¹¹ Buser, M. 2016a, *Endlagerung radio- und chemo-toxischer Abfälle im Tiefuntergrund: Wissenschaftlich-technische, planerisch-organisatorische und strukturelle Schwachstellen*, Ohodnocení čtyř vybraných případů, Greenpeace Německo.

²¹² Ottosson, M. et al. 2017, *Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate*, *Corrosion Science*, 122, str. 53–60; King, F. 2010, *Critical review of the literature on the corrosion of copper by water*, in: Technical Report SKB TR-10-69, Svensk kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co), prosinec 2010, cit. 6. srpna 2019, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/093/42093282.pdf;

²¹³ Swahn, J. 2019, *Comments on the ongoing licensing review of the repository for used nuclear fuel in Forsmark*, mkg, cit. 6. srpna 2019, http://mkg.se/uploads/Swahn_MKG_presentation_Stockholm_May_24_2019.pdf

TABULKA 5 | Národní programy výstavby úložišť vysokoaktivního odpadu k srpnu 2019

Země	Druh odpadu	Úložná hornina	Stav výběru lokality	Podzemní výzkumná laboratoř	Stavební povolení	Doba do získání licence na provoz
BELGIE	VJP, VAO, TRU	jíl, nepevněný	určeno	Hades		není stanoveno
KANADA	VJP, VAO, TRU	krystalinikum	odloženo*	není		není stanoveno
ČÍNA	VAO, TRU	krystalinikum, jíl	probíhá?	Beishan		není stanoveno
ČESKÁ REPUBLIKA	VAO	krystalinikum	1990-2015 (odhad)	není		2065 (odhad)
FINSKO	VJP	krystalinikum	určeno (1985-2000)	Onkalo RF	2018	2024 (odhad)
FRANCIE	VAO, TRU	jíl, zpevněný	určeno	Bure, Tournemire	2020 (odhad)	není stanoveno
NĚMECKO	VJP, VAO, TRU	sůl, jíl, krystalinikum	2017-2031 (odhad)	není		2050 (odhad)
MAĎARSKO	VJP, TRU	jíl	1995-2030 (odhad)	Pécs		není stanoveno
JAPONSKO	VAO, TRU	krystalinikum, usazeniny	2010-2030 (odhad)	Honorobe Mizunami, jiné		není stanoveno
NIZOZEMSKO	VJP, VAO	otevřené	odloženo	není		skladování >100 let
ŠPANĚLSKO	VJP, VAO	sůl, jíl, krystalinikum	odloženo	není		není stanoveno
ŠVÉDSKO	VJP (VAO)	krystalinikum	určeno (80. léta-2009)	Äspö	probíhá (podáno 2011)	není stanoveno
ŠVÝCARSKO	VJP, VAO, TRU	jíl, zpevněný	2008-2030 (odhad)	Mont-Terri		2060 (odhad)
VELKÁ BRITÁNIE	VAO, TRU	není určeno, strategie v jednotlivých zemích různé	2008	není		není stanoveno
USA	TRU	sůl	určeno (1972-1988)	není	úložiště v provozu (1998/2000)	
	VJP, VAO	tuf (jiné)	odloženo	není		není stanoveno

Zdroj: Vlastní sestavení na základě oficiálních národních zpráv

Poznámky: *Dobrovolně; VAO = vysokoaktivní odpad; VJP = vyhořelé jaderné palivo; TRU = transuranový odpad

Druhá skupina zemí, jako jsou Švýcarsko²¹⁴ a Německo²¹⁵, již zahájily programy hledání lokalit, jejichž dokončení se předpokládá v příštím desetiletí. Ostatní země mají programy na různém stupni. Viditelná je jistá neostrost těchto projektů. Zejména pro malé země je obtížné se s takovým programem potýkat. Současný stav a pokroky v Číně se obtížně hodnotí.²¹⁶ Málo informací máme též o průběhu programu v Rusku, jež má svéráznou koncepci likvidace v podzemních úložištích v krystalinických horninách na Sibiři, kde by se jednotlivé formy a balení odpadů měly ukládat do 75 metrů dlouhých vrtů bez úmyslu opětovného

²¹⁴ Swiss Federal Office of Energy, *Deep Geological Repository sectoral plan (SDGR)*, cit. 6 srpna 2019, https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EA_SachplanGeologischeTiefenlager/?lang=en

²¹⁵ Öko-Institut e. V. 2017, *Standortsuche Atommüll-Endlager*, str. 13, cit. 6 srpna 2019, https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/nukleartechnik-anlagensicherheit/Lehrerhandreichung.pdf

²¹⁶ Shu, J., Liu, Z., Lin, X., Wang, R. 2016, A Review of the Development of Nuclear Waste Treatment for China's Nuclear Power Industry, *International Conference on Sustainable Development (ICSD 2016)*. Atlantis Press.

vyzdvížení.²¹⁷ Nakonec bychom měli zmínit i to, že mezinárodní programy, jež do doby před přibližně deseti lety byly předmětem opakovaných diskuzí (například Pangea, Arius), se patrně již nepovažují za proveditelné.²¹⁸ Uvádíme též, že Rusko již nabízí převzetí vysokoaktivního odpadu od třetích zemí a přijímá zpět vyhořelé jaderné palivo.²¹⁹

Bylo již řečeno, že plánování projektů probíhá. Projekty úložišť, jež vycházejí z původní švédské koncepce KBS, se v průběhu let mírně proměňují, jak dokládá například vývoj belgického superkontejneru.²²⁰ Zda však tyto strategie nakonec půjde realizovat, lze určit teprve v kontextu průmyslového vývoje a vyspělosti. Totéž platí o celém pojetí možnosti opětovného vyzdvížení odpadu a souvisejících technologií, jež je pro vysoce radioaktivní odpad teprve nutno vyvinout a ozkoušet v průmyslovém měřítku. Tomu je nutno uzpůsobit relevantní výzkumné, vývojové a demonstrační (VVaD) programy. A konečně bude nutno upravovat ústřední roli řízení procesů, například struktury, organizace a dohled, tak, aby odpovídaly potřebám dlouhodobých a transparentních projektů.

LIKVIDACE V HLUBINNÝCH VRTECH

V posledních letech se tedy diskutuje o řadě nových projektů týkajících se likvidace v hlubinných vrtech. Stejně jako v případě koncepce ukládání v dolech je však nutno provádět rozsáhlé zkoušky proveditelnosti na místě a budovat demonstrační zařízení, aby koncepce dosáhla průmyslové zralosti. To vše si pravděpodobně vyžádá časový rámec několika desetiletí.

Celkově vzato je řízení programů likvidace NSAO v mnoha zemích využívajících jadernou energii v současnosti rutinní úkol, který probíhá za regulovaných podmínek. Přesto je však stále nutno vyřešit řadu zásadních otázek, například bitumenizovaný odpad, organický odpad, rozmanitost zdravotnického, průmyslového a výzkumného odpadu a s nimi související problémy s nakládáním a skladováním. U vysokoaktivního odpadu v současnosti existují dvě hlavní strategie: úložiště budovaná v hloubkách 500-1000 m a hlubinné vrty. Je potřeba je upřesnit v mnoha základních aspektech a jejich funkčnost je nutno vyzkoušet v průmyslovém měřítku za regulovaných technologických podmínek. Předpokládá se, že potvrzení proveditelnosti potrvá minimálně několik desetiletí.

A konečně jeden zásadní postřeh se týká posunu koncepcí, zejména u vysokoaktivního odpadu, směrem k méně definitivním řešením na základě předpovědí bezpečnostních tříd. Jak zjistila švýcarská koncepce EKRA před 20 lety, dnešní koncepce se stále více rozvíjejí směrem k monitorovaným programům. Pro budoucí vývoj těchto programů jsou nesmírně důležité organizační nastavení procesů a záruka nezávislosti dozorujících institucí.

²¹⁷ Laverov, N. et al. 2016, *The Russian Strategy of Using Crystalline Rocks as a Repository for Nuclear Waste*, Elements 12(4) str. 253-256; NEA 2014, *Radioactive Waste Management and Decommissioning in the Russian Federation*, cit. 6 srpna 2019, https://www.oecd-neo.org/rwm/profiles/Russian_Federation_report_web.pdf

²¹⁸ World Information Service on Energy (WISE) 2012, „Multinational approaches“, cit. 6 srpna 2019, <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/746-747-748/multinational-approaches>

²¹⁹ Encyclopedia, 2001, *Russia Agrees To Take The World's Nuclear Waste*, Encyclopedia.com, cit. 6 srpna 2019, <https://www.encyclopedia.com/history/energy-government-and-defense-magazines/russia-agrees-take-worlds-nuclear-waste-where-put-it>

²²⁰ Laverseur, S., van Geet, M., Sillen, X. 2018, *The Belgian Supercontainer Concept*, ONDRAF/NIRAS, cit. 6 srpna 2019, <https://igdt.eu/wp-content/uploads/2018/12/2.T2.1155-Levasseur-ONDRAF-Supercontainer-IGDTP.pdf>

5.4 DOČASNÉ STRATEGIE: SKLADOVÁNÍ

Po desítky let ve všech programech likvidace jaderného odpadu na celém světě sledujeme obrovské zpoždování konkrétní realizace projektů. Týká se to především programů likvidace vysokoaktivního odpadu, pro který stále není k dispozici ani jedno hlubinné úložiště.

DOČASNÉ SKLADOVÁNÍ

Národní orgány zodpovědné za realizaci projektů se souhlasem národních dozorujících úřadů neustále upravují plány na realizaci a podle toho budují dodatečné kapacity pro dočasné skladování. Dočasné skladování se dnes odehrává buď přímo v jaderných elektrárnách nebo ve speciálních centrálních skladovacích zařízeních, a to v bazénech (mokrý skladování), nebo ve speciálních kontejnerech (suché skladování). Kromě toho je nutné, jako v případě Fukušimy, uvažovat o vyřazování z provozu a improvizovaných systémech dočasného skladování palivových článků a též kontaminované vody nebo dalšího odpadu.²²¹

Z hlediska historického vývoje a z bezpečnostních důvodů obecně rychle sílí snahy o suché skladování.

MOKRÉ SKLADOVÁNÍ: Bazény na vyhořelé palivo jsou v jaderných elektrárnách běžné za účelem zajištění chlazení po vyjmutí z reaktoru. S mokrým skladováním existují bohaté zkušenosti. Mokrý mezisklad mimo elektrárny se nachází v přepracovacích závodech ve Francii, Británii a Rusku. Švédsko od roku 1985 provozuje podzemní centralizovaný mokrý mezisklad (CLAB). Takové zařízení se skládá z jednoho nebo více bazénů pro podvodní skladování vyhořelého paliva v ukládacích stojanech. Kapalina v bazénu zajišťuje odběr tepla a stínění. Roztečí mezi jednotlivými soubory a/nebo použitím materiálů pohlcujících neutrony je nutno udržovat podkritický stav.²²² Zařízení pro mokré skladování navíc musí mít systémy s nepřetržitým napájením pro příjem kontejnerů, dekontaminaci, vykládku, údržbu a systémy nuceného oběhu pro chlazení a čištění vody. Mokrý skladování kromě toho obnáší manipulaci s jaderným odpadem (z čištění vody), monitorování radiace a chemismu vody, monitoring úniků a další pomocné systémy.²²³

SUCHÉ SKLADOVÁNÍ: Systémy suchého skladování mohou být jednoúčelové (například kobky či kontejnery) nebo dvouúčelové (speciální kontejnery používané pro přepravu i skladování). V současnosti se používá řada různých dvouúčelových kontejnerů, například německý CASTOR, belgický TN 24 a americký NAC-STC. Kobky jsou modulární železobetonové budovy se skladovacími oddíly na vyhořelé palivo.²²⁴ Vyhořelé palivo je ke skladování nutno vyjmout z přepravního kontejneru a umístit do kovové roury nebo válce, které se poté hermeticky uzavřou. Další systémy skladovacích kobek obsahují již uzavřené nádoby naplněné vyhořelým palivem. Nutné jsou zde systémy pro manipulaci s kontejnery či s palivem. Zapotřebí jsou též komponenty a systémy aktivního větrání. Kobkové systémy se používají v Kanadě (ANSTOR/MACSTOR), v Maďarsku (zařízení MVDS v Paksi), v Británii (zařízení Wylfa) a v Nizozemsku (HABOG). Některé suché mezisklady používají jedno- nebo dvouúčelové kontejnery, což jsou všeobecně jednotlivé a hermeticky uzavřené soustavy. Jsou vyrobeny z kovového těla s koší nebo z betonového těla s kovovou vložkou nebo nádobou uvnitř, jež se následně uzavře navařeným či utěsněným víkem. Tyto dvouúčelové kontejnery se nakládají a vykládají v jaderné elektrárně. K přepravě do meziskladu

²²¹ Yamaguchi, A. et al. 2017, Risk assessment strategy for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Nuclear Engineering Technology 49(2), pp. 442–449.

²²² Subcriticality is a state where a chain reaction cannot be set in motion by technical measures.

²²³ IAEA 1999, Survey of wet and dry spent fuel storage, IAEA Tecdoc 1100.

²²⁴ IAEA 2012, Storage of Spent Nuclear Fuel, No. SSG-15.

se mohou též používat přepravní kontejnery. Dvouúčelové kovové kontejnery se používají ve Švýcarsku (ZWILAG)²²⁵ v Německu (Gorleben, Ahaus a jinde),²²⁶ zatímco betonové kontejnery se používají hlavně v USA.

Výzkumní pracovníci MAAE v roce 2010 odhadovali množství vzniklého vyhořelého jaderného paliva na celém světě na 340 000 t HM, přičemž jen o sedm let dříve to bylo 255 000 t HM. Celková světová skladovací kapacita na začátku roku 2002 však byla pouze cca 243 000 t HM, „z čehož větší část – 163 000 t HM – v bazénech u reaktorů“.²²⁷ Na rok 2020 výzkumníci odhadli cca 445 000 t HM. Nárůst množství vyhořelého paliva vede k neustálému rozšiřování meziskladů. Jinak řečeno, zásoby se neustále zvětšují, zatímco harmonogramy realizace úložišť se pravidelně odsouvají do budoucnosti.

Učebnicovým příkladem problémů s dočasným skladováním jaderného odpadu jinde je historický vývoj ve Spojených státech. Spojené státy zpočátku měly velkou potřebu suchých meziskladů k překonání nedostatku kapacity do zprovoznění úložiště Yucca Mountain. Když začala být jasná neúspěšnost projektu úložiště kvůli problémům s doložením dlouhodobé bezpečnosti, prodlužovala se požadovaná doba skladování. Dozorující orgán v roce 2010 vypracoval nové zásady k zajištění bezpečného skladování vyhořelých palivových článků po dobu až 60 let po skončení provozní životnosti reaktoru. Vzhledem k tomu, že provozní životnost reaktorů se může prodlužovat až na 60 let, narůstá doba dočasného skladování na 120 let.²²⁸ Skutečná časová náročnost je však po neúspěchu jediného možného konečného úložiště zcela otevřená. V současné době neexistují ani alternativní možnosti, ani strategie vyhledání lokality. Trumpova administrativa místo toho podporuje znovuzahájení schvalovacího řízení na úložiště Yucca Mountain, a to navzdory trvalému silnému odporu vlády státu Nevada.²²⁹ Komise k jaderné budoucnosti USA „Blue Ribbon“ ve své zprávě vydané v roce 2012 došla k závěru, že zpoždění programu lze měřit „v desítkách let“ a mohou způsobit dodatečné náklady ve výši mnoha miliard.²³⁰

Tento vývoj platí ve všech zemích využívajících jadernou energii. Ve Švýcarsku zhruba ve stejné době (2011) tamní Federální komise k jaderné bezpečnosti vyzvala k sestavení časového harmonogramu švýcarských programů. Výsledky zcela potvrzují závěry ohledně mnoha desetiletí zpoždění švýcarského programu.²³¹ Dopad na vývoj nákladů ve Švýcarsku je rovněž v rozpětí desítek miliard.²³² Většina zemí dnes předpokládá dobu realizace svých programů úložišť minimálně 40 až 60 let. Ve Finsku, Švédsku a Francii se předpokládá kratší harmonogram realizace, neboť již mají vybrané lokality pro programy likvidace. Ani v těchto zemích

²²⁵ Webová stránka Zwilag, „Casks for highly active waste and spent fuel elements,” cit. 2. srpna 2019, https://www.zwilag.ch/en/casks-for-highly-active-waste-and-spent-fuel-elements-_content---1--1049.html

²²⁶ Oldiges, O., Boniface, J.M. 2008, TGC36 A Dual Purpose Cask for the Transport and Interim Storage of Compacted Waste (CSD-C) -8349, Waste Management Conference 2008, únor 2008, Phoenix, Arizona, cit. 2. srpna 2019, <https://pdfs.semanticscholar.org/21f1/76354b78eb9a241eb16072e7652b565ddcb9.pdf>

²²⁷ Fukuda, K. a kol. 2010, MAAE Overview of Global Spent Fuel Storage, MAAE-CN-102/60, str. 4-6, cit. 2. srpna 2019, http://www.efn-uk.org/l-street/politics-lib/nuclear-reports/index_files/IAEASpentfuel.pdf

²²⁸ Podle zákona o dalším skladování vyhořelého jaderného paliva z roku 2014, CFR 51.23.

²²⁹ World Nuclear News 2019, „US budget request supports Yucca Mountain”, 12. března, cit. 29. května 2019, <http://world-nuclear-news.org/Articles/US-budget-request-supports-Yucca-Mountain>

²³⁰ Blue Ribbon Commission 2012, Report to the Secretary of Energy, leden 2012, cit. 2. srpna 2019, str. 48, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf

²³¹ Institute for Sustainable Waste Management 2011, Erfahrungswerte bei der Planung und Umsetzung des Sachplans und des Realisierungsplans geologische Tiefenlager und Planungsgrundlagen für das weitere Vorgehen cit. 29. května 2019, https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/kernenergie/Schweizer_Endlager/Entsorgungsprogramm/File_F.pdf

²³² Buser, M. 2016b „Kosten nukleare Entsorgung Schweiz: eine erste Evaluation des Systems der Kostenberechnung,” (Costs of Nuclear Waste for Switzerland: A primary evaluation of the system of calculating costs) Report for Greenpeace Switzerland, leden 2016, cit. 2. srpna 2019, http://m.greenpeace.org/switzerland/Global/switzerland/publications/ce_various/2016/Buser_Sammelmappe.pdf.

však nejsou ani harmonogramy, ani skutečné náklady pevně dané. Dočasné skladování vyhořelého paliva a VAO tedy bude pokračovat po mnoho desítek let, i přes 100 let a déle.

DLOUHODOBĚJŠÍ SKLADOVÁNÍ

Přijetí tohoto přístupu jednotlivými zeměmi povede k další výstavbě dlouhodobějších meziskladů a jejich provozu po velmi dlouhou dobu (mnoho desítek let až 100 let i více). Tato diskuze proběhla již v 80. a 90. letech, především v USA v souvislosti s koncepcí NMRS (Negotiated Monitoring Retrievable Storage, tedy skladování s možností vyzdvižení s dojednaným monitoringem) nebo AFR (Away from Reactor, tedy mimo reaktor)²³³ a ve Velké Británii u dlouhodobějšího skladování po dobu 1000 let.²³⁴ Strategie skladování mimo reaktory též znovu otevřela komise Blue Ribbon v USA (2012).²³⁵ Neporušenost a možnost vyzdvižení vyhořelého paliva (a VAO) po tak dlouhou dobu skladování je tudíž obrovská výzva, stejně jako monitoring a údržba. Cílem je udržení otevřených možností k dalším způsobům nakládání s odpady a jejich požadavkům, například na přepravu, úpravu a balení. V důsledku je velmi nutný výzkum, například dlouhodobého chování paliva, mechanismů jeho rozkladu a dalších mezer ve znalostech.

Neporušenost a možnost vyzdvižení vyhořelého jaderného paliva a dalšího vysokoaktivního odpadu po dlouhou dobu skladování je obrovská výzva, stejně jako monitoring a údržba. Cílem je udržení otevřených možností k dalším způsobům nakládání s odpady a jejich požadavkům, například na přepravu, úpravu a balení.

Mezinárodní podvýbor Výzkumného ústavu elektrické energie (EPRI) zvaný Program spolupráce na dlouhodobějším skladování (ESCP) v jedné své zprávě uvádí nedostatek konkrétních technických údajů pro suché mezisklady, zejména těch o degradaci materiálů opláštění a zavařených nádob.²³⁶ Ze zprávy EPRI zároveň plyne, že země stojí před specifickými problémy podle příslušného systému suchého skladování a celkové situace. K dalším tématům týkajícím se dlouhodobého nakládání s vyhořelým palivem patří zajištění dat, dokumentace, nakládání s poškozeným vyhořelým palivem a vliv stupně vyhoření a typu paliva (uranové nebo MOX). Je zapotřebí řešit otázky typu: Jaké budou bezpečnostní požadavky na dlouhodobé skladování? Jak dlouho lze s vysokoaktivním odpadem bezpečně nakládat? Jaké druhy infrastruktury (mj. horké komory) budou dlouhodobě zapotřebí? Jak můžeme či máme uchovat odbornost a jak dlouho?

HLAVNÍ PROBLÉMY DLOUHODOBĚJŠÍHO SKLADOVÁNÍ

Rostoucí zásoby odpadu a zvyšující se rizika tláčí vlády zemí, jež využívají jadernou energii, k lepšímu pokrytí mezery mezi dočasným skladováním a realizací podzemních úložišť či k ekvivalentním řešením.²³⁷ Diskuze v budoucnosti se musí zabývat řadou klíčových otázek řízení meziskladů. Týkají se například obecné bezpečnostní analýzy celosvětových strategií skladování s ohledem na mokré skladování v bazénech a suché skladování v kobkách nebo jiných lokalitách i všeobecného posouzení rizik souvisejících s celosvětovým rozšířením meziskladů a skladováním po dobu přes 100 let. U mokrého skladování

²³³ Shrader-Frechette, K. 1993, *Burying Uncertainty, Risk and the Case Against Geological Disposal of Nuclear Waste*, University of California Press, str. 218. ff.

²³⁴ Nirex Ltd. 2004, *Literature Review of Approaches to Long-Term Storage of Radioactive Waste and Materials*, Nirex Report N/107, červenec 2004

²³⁵ Blue Ribbon Commission 2012, *Report to the Secretary of Energy*, leden 2012

²³⁶ Electric Power Research Institute 2012, "International Perspectives on Technical Data Gaps Associated With Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel" International Subcommittee Report, *Extended Storage Collaboration Program*

²³⁷ Buser, M. 2019, *Wohin mit dem Atommüll?*, Rotpunkt, str. 204-206.

je nutno vyřešit podmínku podkritického stavu po takto dlouhou dobu a též celé řadě mechanismů stárnutí a degradace uskladněného vyhořelého paliva (i v suchých kontejnerech). Vzhledem k takto dlouhým dobám skladování je potřeba věnovat zvláštní pozornost sociopolitickým a ekonomickým faktorům, jež by mohly zvýšit „riziko, že náležitá údržba a zabezpečení skladovacích zařízení“ skončí před vyjmutím odpadu.²³⁸

A konečně je nezbytné vyřešit dlouhodobější skladování nízko- a středněaktivního odpadu (NSAO). Ačkoli při dočasném skladování NSAO vzniká méně bezpečnostních problémů, jednotlivé kategorie odpadu představují specifické problémy i zde, a to z hlediska manipulace s nimi i přidružených rizik v uzavřených zařízeních. MAAE požaduje, aby si „obalová jednotka za podmínek dlouhodobého skladování před konečnou likvidací úspěšně uchovala své vlastnosti ve dvou velmi odlišných prostředích“; pokud to nelze zaručit, mohou nastat další problémy, například pokud provozovatel úložiště odmítne přijmout odpad, který nesplňuje požadavky Kritérií pro přijetí odpadu (WAC), „uvedených v podmínkách provozovatelovy licence“.²³⁹ Bezpečnostní úřady, jako například francouzský ASN, proto v poslední době vyzývají provozovatele, aby se těmito otázkami zabývali a navrhli řešení.²⁴⁰

5.5 SHRNUÍ

Koncepce nakládání s jaderným odpadem se v posledních desetiletích pomalu vyvíjejí. Vlády se v počátcích jaderné energetiky držely strategie ředění a vyhazování radioaktivních materiálů do životního prostředí. Postupně následovalo určité přehodnocení směrem k zamezení šíření odpadu a hledání vhodných lokalit v geologicky vhodných vrstvách kontinentální zemské kůry nebo nad nimi. Projekty uskutečněné od 60. let 20. století však dokázaly přísné bezpečnostní předpoklady naplnit jen ve velmi omezené míře, pokud vůbec.

Po více než 70 letech využívání jaderné energie stále žádná země světa nemá v provozu hlubinné geologické úložiště vyhořelého jaderného paliva. Jedinou zemí, která v současné době buduje trvalé úložiště tohoto nejnebezpečnějšího druhu jaderného odpadu, je Finsko. Kromě Finska mají v rámci procesu včasné izolace odpadu fakticky určenou lokalitu úložiště vysokoaktivního odpadu pouze Švédsko a Francie. Ve Spojených státech probíhá tzv. Pilotní projekt izolace odpadu (Waste Isolation Pilot Project, WIPP). Toto úložiště však slouží pouze k ukládání transuranového odpadu s dlouhou dobou rozpadu z jaderných zbraní, a nikoli vyhořelého jaderného paliva z komerčních reaktorů.

Navzdory mnoha neúspěšným procesům výběru lokalit a opuštěným úložištím stávající národní vlády a mezinárodní organizace preferují hlubinnou likvidaci. K ní jsou zapotřebí jednoznačné a ambiciózní podmínky výběru a průzkumu lokalit a schvalovací procesy. Proveditelnost hlubinných úložišť však stále není zaručena. Proto je nutné proces vyhledávání úložišť realizovat s mimořádnou pozorností na základě praktické proveditelnosti a s náležitým monitoringem. Někteří vědci se domnívají, že zodpovědnější a mnohem rychleji dosažitelné je monitorované dlouhodobé skladování v chráněném prostředí, a mělo by se tudíž realizovat. Celkově panuje výrazná shoda na tom, že stávající stav výzkumu a vědecké diskuze a výměny názorů s politiky a zapojenými občany je nedostatečná vzhledem k velikosti této výzvy.

²³⁸ Holt, M. 2009, str. 23.

²³⁹ MAAE 1998, *Interim Storage of Radioactive Waste Packages*, Technical Report Series N° 390, International Atomic Energy Agency, str. 11-13, cit. 24. srpna 2019, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS390_scr.pdf

²⁴⁰ Autorité de sûreté nucléaire 2017, French National Plan for the Management of Radioactive Materials and Wastes 2016-2018, 30. prosince, cit. 2. srpna 2019, <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications/Others-ASN-reports/French-National-Plan-for-the-Management-of-Radioactive-Materials-and-Waste-for-2016-2018>

Úprava, přeprava, skladování a likvidace jaderného odpadu ve všech jaderných zemích představují značné a stále rostoucí výzvy. Z tohoto vývoje plyne, že vlády a správní orgány stojí před naléhavou nutností zkvalitňovat řízení programů dočasného skladování a likvidace odpadů. V souladu s tím je nutno implementovat normy pro kvalitní řízení těchto programů, mimo jiné plánování v oblasti jakosti a bezpečnosti, zajištění jakosti, účasti občanů a bezpečnostní kultury.

Dočasné skladování vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu bude pokračovat sto i více let. Vzhledem k tomu, že hlubinná úložiště nebudou ještě po několik desetiletí k dispozici, se rizika stále více vztahují k meziskladům vyhořelého paliva. Stávající postupy skladování vyhořelého jaderného paliva a dalších snadno se šířících forem středně a vysokoaktivního odpadu nebyly plánovány pro dlouhodobé užití. Tyto postupy proto představují rostoucí a zvláště velké riziko, zejména když jsou k dispozici jiné možnosti (ztužení, suché skladování) v protiatomových zařízeních. Prodlužováním skladováním jaderného odpadu se dnes zvyšuje riziko, náklady rostou o miliardy a tato zátěž se přesouvá na budoucí generace.



6 NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Všechny evropské země podepsaly Společnou úmluvu MAAE o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady, jež představuje první právní nástroj řešení otázek bezpečnosti nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivními odpady v celosvětovém měřítku.²⁴¹ Zavázaly se tím zajišťovat přiměřené finanční prostředky na vyřazování reaktorů z provozu (článek 26), nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivními odpady (článek 22) a „vystříhat se uvalení nepřiměřené zátěže na budoucí generace“ (článek 4). Země ale jednak ne vždy tyto úkoly jednoznačně rozlišují ve svých strategiích nakládání s odpady, jednak přesně nedefinují, co všechno zahrnuje pojem vyřazování z provozu. Mezi vyřazováním z provozu, skladováním a likvidací existují silné technologické a organizační provázanosti.

Je tudíž obtížné porovnávat náklady spojené s nakládáním s jaderným odpadem v jednotlivých zemích. Například ve Spojených státech se nakládání s nízkoaktivním odpadem součástí vyřazování z provozu, a tím pádem je hrazeno z peněz na vyřazování z provozu.²⁴² Naproti tomu v Německu energetické společnosti svými fondy na vyřazování z provozu ručí pouze za úpravu odpadu, přičemž skladování a likvidace se hradí z jiného veřejného fondu.

6.1 PODSTATA SYSTÉMŮ FINANCOVÁNÍ VYŘAZOVÁNÍ REAKTORŮ Z PROVOZU, UKLÁDÁNÍ A LIKVIDACE ODPADŮ

ZÁKLADNÍ ODPOVĚDNOST ZA VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU A NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Obecně platí, že majitelé či držitelé licencí jaderných elektráren ručí za zpracování, úpravy, skladování a konečnou likvidaci odpadů vznikajících během provozu reaktorů a jejich vyřazování z provozu a za dlouhodobé nakládání s vyhořelým palivem. Tyto povinnosti a ručení vznikají při zahájení provozu. Aby „nedocházelo k vzniku nepřiměřené zátěže na budoucí generace“ (článek 3 Společné úmluvy), dodržují téměř všechny země jeden jednotící koncept, tedy princip *znečišťovatel platí*, v jehož rámci náklady na tyto činnosti nese provozovatel.

V některých zemích jsou k dispozici určité doplňkové granty nebo dotace ke snížení finanční odpovědnosti znečišťovatele, případně se odpovědnost přebírá do veřejného vlastnictví a k řešení nákladů slouží peníze daňových poplatníků.²⁴³ Vyřazování reaktorů z provozu a především nakládání s radioaktivními odpady je vzhledem k vysoké kapitálové intenzitě, dlouhodobosti a zdravotním a bezpečnostním rizikům pečlivě regulováno. Regulační úřad je v některých případech specializovaná instituce a někdy přímo státní instituce (například ministerstvo). Stát se často dříve či později určitým způsobem zapojí přímo, i finančně. Tato zásada platí především v oblasti nakládání s odpady; princip *znečišťovatel platí* se ve většině případů vztahuje pouze na vyřazování reaktorů z provozu a jejich demontáž. U dlouhodobého skladování radioaktivního odpadu se vyvinula celá řada různých organizačních modelů, v nichž národní úřady – nikoli provozovatel jaderného zařízení – více či méně přejímají technické a finanční ručení za velmi dlouhodobé otázky nakládání s odpady (například v USA, v Německu a ve Francii).

Řada zemí má princip *znečišťovatel platí* zakotvený v národní legislativě, ale neuplatňuje jej nekompromisně. Dlouhodobé náklady a rizika se namísto toho zespolečenšťují a přenášejí na budoucí

²⁴¹ MAAE 2001.

²⁴² Album, K., Braend T., and Randen Johnson A. 2017, „How to pay? Financing decommissioning of nuclear power plants“, Naturvernforbundet (Friends of the Earth Norway).

²⁴³ MAAE 2015, *Policy and Strategies for Environmental Remediation*.

generace; provozovatelé mohou být jen povinni přispívat na financování dlouhodobých nákladů.²⁴⁴ Dokonce i v zemích, kde je princip *znečišťovatel platí* povinností ze zákona, provozovatelé jaderných elektráren zpravidla finančně neručí za žádné problémy, k nimž může během dlouhodobého skladování odpadů docházet. I přesto mohou vznikat vysoké náklady i po uzavření zařízení k likvidaci. Například v lokalitě Asse II v Německu je nutno z uzavřeného solného dolu vyzvednout nízko a středněaktivní odpad, přičemž náklady na tuto akci se odhadují na 4–6 miliard eur (4,5–6,6 miliard dolarů), jež ponesou daňoví poplatníci, poplatky vybrané na likvidaci radioaktivního odpadu po dobu provozu dolu ale činí pouhých 8,25 milionu eur (9,3 milionu dolarů).²⁴⁵

PŘEHLED FONDŮ A JEJICH POVAHY

Zásadní pro každý systém financování je řízení a správa finančních prostředků, jež lze provádět interně nebo externě. Financování vyřazování z provozu a nakládání s odpady může probíhat těmito formami:²⁴⁶

- Externí oddělený fond: Provozovatelé platí své finanční závazky do externího fondu. V něm finanční prostředky spravují soukromé nebo státem vlastněné nezávislé orgány. Celý obor může pokrývat jeden fond, nebo může existovat jeden pro každého provozovatele. Externí fond může též existovat s převodem ručení či bez něj a se zárukou provozovatele pro případ deficitu či bez ní.
- Interní neoddělený fond: Provozovatel platí do fondu, který spravuje sám, a spravuje finanční prostředky, které jsou drženy v rámci jeho vlastních aktiv.
- Interní oddělený fond: Provozovatel je povinen vytvářet a spravovat finanční prostředky samostatně. Aktiva musí být oddělena od ostatního podnikání a vyhrazena na účely vyřazování z provozu a nakládání s odpady.
- Veřejný rozpočet: Finanční zodpovědnost přebírají státní orgány včetně shromažďování finančních prostředků (například prostřednictvím daní a poplatků). Této možnosti se využívá zejména v případě historických jaderných elektráren a opuštěných lokalit (tj. lokalit, v nichž předchozí provozovatel vyhlásil úpadek nebo které jednoduše již neexistují, například bývalé reaktory ve Východním Německu).

Oddělení finančních prostředků však nezaručuje jejich správné používání. Fondy mohou být omezené, takže zodpovědná organizace nemá naprostou volnost v nakládání s nashromážděnými prostředky. Lze uplatňovat zákonné požadavky nad rámec standardních účetních zásad a všeobecných daňových zákonů a zavádět omezení v oblasti shromažďování, správy a investování prostředků.²⁴⁷ Lze například omezit využívání prostředků tak, aby vyhrazená aktiva šlo použít výhradně k vyřazování z provozu nebo nakládání s odpady. Externí oddělení fondů neznámá automaticky, že jsou prostředky omezené a vyhrazené. Například v Itálii se z externího odděleného fondu CCSE (La Cassa congruaglio per il settore elettrico) hradí veškeré náklady na vyřazování z provozu pro veřejný orgán Sogin, který zodpovídá za vyřazování z provozu a nakládání s odpady. Finanční prostředky se však částečně používají i na jiné účely ve veřejném zájmu, než je vyřazování z provozu, protože stát může s penězi nakládat k jakýmkoli účelům.²⁴⁸

²⁴⁴ Von Hirschhausen, C. 2017, „Nuclear Power in the 21st Century – An Assessment (Part I)“, DIW Berlin.

²⁴⁵ Kirbach, R. 2009, „Das Lügengrab,“ (The grave of lies) *Die Zeit*, 10. září, cit. 14. července 2019, <http://www.zeit.de/2009/38/DOS-Asse/komplettansicht>

²⁴⁶ Wealer, B., von Hirschhausen, C., and Seidel, J.P. 2019, „Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the UK“, in R Haas et al *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*, Springer VS, Wiesbaden, str. 261–286.

²⁴⁷ Irrek a kol. 2007, „Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations,“ Final Report on behalf of the European Commission Directorate-General Energy and Transport, cit. 1. července 2019, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/2609/file/2609_EUDecommFunds_FinalReport.pdf

²⁴⁸ Irrek a kol. 2007, „Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations – Final Country Report (WP 1/ WP 3) Italy“, Wuppertal Institute.

Lze se domnívat, že externí správa fondů má své výhody: vyšší stupeň transparentnosti, ochranu proti deficitu finančních prostředků z důvodu úpadku provozovatele a vyšší důvěru veřejnosti. Vedle vysokých nákladů pro daňové poplatníky mohou vznikat též problémy se zásadami EU v oblasti hospodářské soutěže, neboť finanční podporu provozovatelů jednotlivými vládami lze vnímat jako státní intervenci.²⁴⁹

SHROMAŽĐOVÁNÍ PROSTŘEDKŮ

Po odhadnutí nákladů (*viz oddíl 6.2*), je nutno nezbytné prostředky shromáždit. Jedním ze zásadních faktorů je zde načasování, protože finanční prostředky musí být k dispozici v době, kdy je jich zapotřebí. Hlavní scénář počítá s budováním fondu po celou dobu předpokládané životnosti jaderné elektrárny či zařízení. Představitelné je však i kratší období (například v Německu 25 let). Stále více reaktorů se zavírá před skončením platnosti licence, například v USA, kde řada reaktorů byla či bude uzavřena předčasně vzhledem k nepříznivým ekonomickým podmínkám. V některých vzácných případech je nutno finanční prostředky na dekontaminaci jaderné elektrárny a její vyřazení z provozu v plné výši shromáždit před zahájením provozu, například ve Francii od roku 2006 (tato podmínka se tedy nevztahuje na všechny dříve i v současnosti provozované reaktory).²⁵⁰ Žádný reaktor však ve Francii od té doby nezačal provoz.

Shromažďování prostředků lze docílit buď formou poplatku, stanovených odvodů z prodeje elektřiny, „interně“ provozovatelem, který odkládá prostředky z výnosů z prodeje elektřiny, nebo investováním finančních prostředků. Vzhledem k tomu, že většina nákladů vyvstane teprve v budoucnosti, je klíčovou otázkou, zda se fondy nebo jejich zajištění do budoucna zakládají na diskontovaných či nediskontovaných nákladech.²⁵¹ Pokud náklady nejsou diskontovány, musí provozovatel odkládat celou částku odhadovaných nákladů. Pouze několik systémů tvorby jaderných fondů pracuje s nediskontovanými náklady. Pokud jsou náklady diskontovány, předpokládá se růst objemu finančních prostředků v čase. Potom se zajištění prostředků stanoví pomocí míry inflace do data splatnosti a poté diskontují úrokovou sazbou, jež má představovat předpokládanou dobu návratnosti. Uplatňované diskontní sazby se výrazně liší (například v Německu jde o 5,5 %, ale ve Španělsku pouze 1,5 %). Ne vždy se počítá se zvyšováním nákladů; ve Francii se předpokládá růst výdajů na vyřazování z provozu a nakládání s odpady zároveň s všeobecnou mírou inflace, zatímco v Německu se navíc nad běžnou inflaci počítá se „speciální jadernou mírou inflace“ ve výši 1,97 %. Uplatňováním pouze všeobecné míry inflace by nakonec mohlo dojít k podcenění nákladů, a tedy objemu finančních prostředků.

Významným zdrojem nárůstu prostředků je v závislosti na povaze fondu investice prostředků fondu. Zde vzniká střet zájmů mezi provozovatelem a regulátorem při volbě investiční strategie. Provozovatel zpravidla upřednostňuje rizikovější investiční strategie s vyšší návratností, zatímco regulátor ideálně dává přednost bezpečnější investiční strategii a spokojí se s nižší návratností. Například ve Švédsku byla po finanční krizi roku 2008 návratnost dlouhodobých obligací nižší, než se předpokládalo, a narůstaly obavy z nedostatečné výše fondů, což vedlo ke změně investiční strategie. Prostředky z fondu lze od roku 2017 vkládat do méně bezpečných investic, než jsou vládní dluhopisy. I drobné změny v předpokladech míry růstu mají hmatatelný vliv na současnou hodnotu finančních prostředků a tím na objem prostředků, které je nutno odkládat, zejména pokud je návratnost (diskontní sazba) náchylná k přecenění a míra růstu nákladů k podcenění.

Shromažďování prostředků též závisí na záběru fondu. Jednou možností je integrované krytí závazků na vyřazování z provozu a nakládání s odpady v rámci jediného fondu. Ve Švédsku energetické firmy platí

²⁴⁹ Neri, E., French, A., Urso, M.E., Deffrennes, M., Rothwell, G., Rehak, I., Weber, I., Carroll, S. and Daniska, V. 2016, *Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants* (No. NEA-7201). Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD).

²⁵⁰ Tamtéž.

²⁵¹ Zajištění je jeden z účtů v rozvaze provozovatele, ale představuje pouze závazek; neznamená to, že tyto prostředky se investují do financování vyřazování z provozu nebo nakládání s odpady.

poplatek z ceny elektřiny, jenž se shromažďuje v integrovaném fondu na vyřazování z provozu a nakládání s odpady. V některých zemích pro oba procesy existují souběžně různé metody shromažďování prostředků, například v USA, kde jsou provozovatelé povinni odkládat prostředky na vyřazování z provozu a zároveň platí poplatek z prodeje elektřiny na nakládání s vysokoaktivním odpadem (přestože toto shromažďování prostředků je v současné době pozastaveno). Provozovatelé v Itálii přispívali do fondu, ale vyřazování z provozu i nakládání s odpady pokrývá všeobecný odvod z prodeje elektřiny poté, co byly všechny jaderné elektrárny uzavřeny na základě referenda.

6.2 ODHADY NÁKLADŮ A ZKUŠENOSTI

METODIKY ODHADU NÁKLADŮ

K umožnění shromažďování prostředků je nutno odhadnout náklady. Jedná se o kritický aspekt financování, zvláště u neznámých projektů, jako jsou hlubinná úložiště vysokoaktivního odpadu. Představitelé jsou různé metody odhadu.²⁵²

- „Řádový odhad“ je hrubý výpočet bez podrobných technických údajů (například převzetím údajů o nákladech ze zahraniční literatury s jen mírnou úpravou vzhledem k situaci v dané zemi zpřísněním či zmírněním dílčích faktorů a přibližných poměrů).
- „Rozpočtový odhad“ vychází z použití vývojových diagramů, dispozičních plánů a podrobných údajů o zařízení, u nichž je stanoven rozsah, ale nejsou k dispozici technologické podrobnosti (například modelování na základě referenčních případů nebo diferenciované modelování pro každý jednotlivý závod).
- U „definitivního odhadu“ jsou podrobnosti projektu připraveny a jeho rozsah a hloubka jsou přesně určeny.

Většina skutečných odhadů nákladů jsou rozpočtové odhady na základě studií a odhady ze 70. a 80. let minulého století, které se extrapolují. Například ve Francii do roku 2013 odhady nákladů na budoucí vyřazování z provozu vycházely ze studie francouzského Ministerstva průmyslu a obchodu z roku 1991, jež potvrdila předpoklady definované v roce 1979 komisí PEON (Commission pour la Production d'Électricité d'Origine Nucléaire). Firma EDF poté tyto odhady potvrdila v reprezentativní studii vyřazení lokality Dampierre z provozu (čtyři bloky po 900 MW). V letech 2014–2015 na žádost francouzského Ministerstva energetiky a klimatu proběhl audit odhadovaných nákladů na demontáž jaderných reaktorů firmy EDF v provozu, z něhož ministerstvo na základě auditu EDF dalo řadu doporučení. Tato doporučení však vedla pouze k omezeným změnám odhadů nákladů a s nimi souvisejících opatření k zajištění prostředků, přestože by přezkoumání těchto odhadů nyní mělo probíhat každoročně.²⁵³ Francouzské Národní shromáždění ve své nedávné zprávě o technické a finanční proveditelnosti procesu vyřazování z provozu prohlásilo, že firma EDF vyjadřuje „přehnaný optimismus“.²⁵⁴ Závěrem zprávy bylo, že vyřazování z provozu potrvá déle a že proces bude celkem stát mnohem více, než EDF předpokládá.

V USA došel audit amerického Úřadu generálního inspektora v roce 2016 k závěru, že odhady nákladů by měly vycházet z nejlepších dostupných znalostí z výzkumu a z provozních zkušeností. Vzorec Národní regulační komise (NRC) používaný k odhadování nákladů na vyřazování z provozu se však přesto zakládá na studiích provedených v letech 1978–1980. Audit doporučil, aby se vzorec výpočtu financování přehodnotil a aby se určilo, zda by nebylo efektivnější odhadovat náklady jednotlivě pro konkrétní lokality.

²⁵² Irrek a kol. 2007.

²⁵³ Electricité de France (EDF) 2019, „Consolidated financial statements at 31 December 2018“.

²⁵⁴ Commission for Sustainable Development and Regional Planning of the French National Assembly 2017, *Rapport d'Information déposé en application de l'article 145 du règlement par la mission d'Information relative à la faisabilité technique et financière du démantèlement des installations nucléaires de base 1*. února, N°4428.

Jeden z provozovatelů během auditu uvedl, že minimálním vzorcem NRC se došlo k odhadu nákladů na vyřazování z provozu ve výši 600 milionů dolarů, zatímco odhad pro konkrétní lokalitu provedený provozovatelem byl okolo 2,2 miliardy dolarů.²⁵⁵

V Německu odhad nákladů na vyřazování z provozu i dlouhodobé nakládání s odpady vychází z odborných posudků. Soukromá společnost NIS (Siempelkamp) jménem provozovatelů používá nákladové modely pro oba typy lehkovodních reaktorů, v jejichž rámci zohledňuje strategii a konkrétní reaktory. Soukromá firma GNS vlastněná energetickými společnostmi jejich jménem provedla odhad nákladů na nakládání s odpady na základě harmonogramů a odhadů nákladů vytvořených německým Spolkovým úřadem pro radiační ochranu (BfS, nyní BfE) pro zařízení k likvidaci. Odhady nákladů vytvořené soukromými firmami pro energetické společnosti jsou neverejné.²⁵⁶

NÁKLADY NA VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU

Vyřazeno z provozu bylo dosud jen několik málo reaktorů, zatímco stovky zařízení po celém světě se na vyřazení z provozu připravují v nadcházejících desetiletích. Začátkem roku 2018 čekalo na vyřazení z provozu v různých fázích 154 bloků, zatímco zcela vyřazeno z provozu bylo pouhých 19 reaktorů (o výkonu jen okolo 6 GW) (viz tabulku 1).²⁵⁷ Tento chabý výsledek a nedostatek zkušeností s vyřazováním z provozu v konkrétních zemích též vede k všeobecnému podhodnocení nákladů na vyřazování z provozu. Jaderné elektrárny se stavěly se zaměřením na provoz a většina elektráren, jež jsou v současné době v procesu vyřazování z provozu nebo do něho vstupují, vznikla v době, kdy koncept vyřazování z provozu ještě nebyl zcela pochopen. Jednotlivé země kvůli tomu musí k vyřazování z provozu přistupovat metodou pokus-omyl.

Nedostatek zkušeností v konkrétních zemích vede k všeobecnému podhodnocení nákladů na vyřazování z provozu. Jaderné elektrárny se stavěly se zaměřením na provoz a v době, kdy myšlenka vyřazování z provozu ještě nebyla zcela koncepčně dořešena. Jednotlivé země kvůli tomu k vyřazování z provozu přistupují metodou pokus-omyl.

Aby bylo možno srovnávat různé odhady z jednotlivých zemí, vypracovala Agentura pro jadernou energii (NEA) tzv. Mezinárodní strukturu oceňování vyřazování z provozu (ISDC), jež doporučuje dělit náklady na vyřazování z provozu do jedenácti odlišných kategorií. Většina metodik odhadu nákladů však s touto klasifikací nepracuje. Odhadování nákladů na vyřazování z provozu též ve velké míře závisí na technologii reaktorů a na strategii vyřazování z provozu. Například u některých elektráren v USA se velké součásti, jako tlaková nádoba reaktoru a parogenerátory, demontovaly a likvidovaly vcelku, což je strategie, která výrazně snižuje náklady. V Německu se však tyto velké součásti musí podle zákona na místě rozebírat. Za vypracování odhadů nákladů na vyřazení z provozu obecně odpovídají vlastníci či držitelé licencí, kteří je pravidelně předkládají příslušnému orgánu k přezkoumání a odsouhlasení (například ve Finsku každé tři roky, ve Švýcarsku každých pět let).

Údaje o skutečných nákladech na vyřazování z provozu jsou nedostatkové, protože projekty vyřazení z provozu do úplného rozebrání dosud dovedly do konce pouze tři země. Ve Spojených státech, kde bylo

²⁵⁵ US Office of the Inspector General 2016, Audit of NRC's Decommissioning Funds Program, US Nuclear Regulatory Commission, Defense Nuclear Facilities Safety Board.

²⁵⁶ Irrek, W., and Vorfeld, M. 2015, „Liquidity and valuation of assets in unrestricted funds from provisions set up for nuclear decommissioning, dismantling and disposal – Brief study”, Alliance 90/The Greens parliamentary group in the German Bundestag.

²⁵⁷ Schneider et al. 2018.

dosud zcela vyřazeno z provozu nejvíce reaktorů (13 ze 34 uzavřených jaderných elektráren k polovině roku 2018), jsou náklady na vyřazování z provozu velmi rozdílné, a to od 280 USD/kW do 1 500 USD/kW.²⁵⁸ V Německu bylo dosud dokončeno vyřazování z provozu pouze dvou komerčních reaktorů: reaktor Gundremmingen-A byl definitivně vyřazen po 23 letech demontážních prací, přičemž nejnovější odhad nákladů z roku 2013 činí cca 2,2 miliardy eur (2,5 miliardy dolarů), tedy 9 300 EUR/kW (10 500 USD/kW). Náklady na vyřazení reaktoru Würgassen z provozu činily cca 1,1 miliardy eur (1,2 miliardy dolarů), tedy 1 700 EUR/kW (1 900 USD/kW).²⁵⁹ Všechny projekty vyřazování z provozu v Německu se vyznačovaly nárůstem nákladů tempem až 6 % ročně, což bylo mnohem více, než činila všeobecná míra inflace i předpokládaná speciální jaderná míra inflace. Odhadované náklady na vyřazování z provozu v budoucnosti (bez zahrnutí kontejnerů, přepravy atd.) ve výši cca 19,7 miliardy eur²⁶⁰ (22,2 miliardy dolarů), neboli 830 EUR/kW (940 USD/kW) však navzdory růstu skutečných nákladů stále vycházejí ze shora zmíněných a veřejně nedostupných nákladových modelů.

V České republice se odhady nákladů na vyřazení tamní šestice reaktorů typu VVER z provozu pohybují v rozmezí 412–532 USD/kW (tedy okolo 1,8 miliardy USD). Reaktory typu VVER, tedy tlakovodní reaktory původně zkonstruované a vyvinuté v Sovětském svazu, se dosud nikde na světě z provozu nevyřazovaly. Nejmodernější projekt vyřazení z provozu se týká reaktoru Greifswald v Německu, kde nejnovější odhad nákladů na pětici bloků a na menší blok Rheinsberg činí též okolo 6,5 miliardy eur (7,3 miliardy dolarů), tedy 3090 EUR/kW (3490 USD/kW), což je zhruba osmkrát více za 1 kW než u stejného typu reaktorů v České republice.

Ve Francii ani v Británii dosud nebyla kompletně vyřazena z provozu ani jedna jaderná elektrárna. Firma EDF v roce 2018 odhadovala náklady na vyřazení celé své jaderné flotily z provozu okolo 31,7 miliardy EUR (35,8 miliardy USD). U 58 reaktorů v provozu tento údaj činí 25 miliard EUR (28 miliard USD), tedy okolo 400 EUR/kW (450 USD/kW).²⁶¹ Podle mezinárodních měřítek je to velmi málo. Celkové náklady na likvidaci vyřazených reaktorů, tedy šest reaktorů typu UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz), jednoho PWR, jednoho těžkovodního plynem chlazeného (EL-4) a rychlého množivého reaktoru Super-Phenix, se neustále zvyšují a od roku 2001 se zdvojnásobily; tehdy činily odhadem okolo 3,3 miliardy eur (v té době cca 3,1 miliardy USD).²⁶² Francouzské Národní shromáždění ve svém nedávném auditu došlo k závěru, že nemůže sdílet přehnaně optimistický výhled firmy EDF na vyřazování z provozu a předpokládá mnohem dražší a technologicky náročnější proces. Britský Úřad pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (NDA) předpokládá náklady na vyřazení pouze 26 reaktorů typu Magnox z provozu ve výši cca 15,3 miliardy liber (19,4 miliardy USD), neboli 3 500 GBP/kW (3 950 USD/kW).²⁶³ Společnost EDF Energy v roce 2018 odhadla náklady na vyřazení z provozu svých 14 reaktorů GCR a jednoho PWR okolo 15,7 miliard eur (17,7 miliard dolarů) neboli cca 1 800 EUR/kW, což je za GCR velmi málo, zvláště uvažíme-li technologické problémy, s nimiž se EDF doma u reaktorů GCR potýká, a neustálý růst nákladů a návrh na odložení úplného vyřazení z provozu do začátku 22. století.²⁶⁴ Evropská komise sečetla jednotlivé odhady nákladů na vyřazování z provozu ve svých členských zemích (kromě Nizozemska a Itálie) na cca 123 miliard eur (139 miliard dolarů).²⁶⁵

²⁵⁸ Tamtéž.

²⁵⁹ Wealer, B., et al. 2015, *Stand und Perspektiven des Rückbaus von Kernkraftwerken in Deutschland*, DIW Berlin and TU Berlin.

²⁶⁰ Warth & Klein Grant Thornton AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft 2015, *Gutachtliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich*.

²⁶¹ EDF 2019.

²⁶² Vláda Francie, Účetní soudní dvůr Cour des Comptes 2014, „Le coût de production de l'électricité nucléaire – Actualisation 2014”.

²⁶³ Nuclear Decommissioning Authority 2015, *Annual Report and Accounts – Financial Year April 2014 to March 2015*.

²⁶⁴ Schneider a kol. 2018.

²⁶⁵ Evropská komise 2016, *Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee*.

NÁKLADY NA LIKVIDACI

Náklady na nakládání s odpady velmi závisí na technologii likvidace, hranici pro uvolňování odpadu, množství odpadu nebo v některých případech na programech kompenzací pro obce, jež se uvolily umístit úložiště ve svém katastru. Náklady na likvidaci radioaktivního odpadu přirozeně závisí na úrovni radioaktivity (NSAO nebo VAO). U první kategorie existuje řada možností likvidace, jež ovlivňují náklady na likvidaci. Například likvidace odpadu v přípovrchových výkopech, která funguje ve Francii, je levnější než likvidace všech těchto kategorií odpadů v hlubinných zařízeních v Německu. Další významné faktory, jež ovlivňují náklady na likvidaci, jsou typ a velikost inventáře, předpoklady úprav a balení, konstrukční koncepce, charakteristika lokality a proces jejího výběru, obrovský vliv na náklady může mít též proces udělování licence.

Za vypracování odhadů nákladů na dlouhodobé nakládání s radioaktivním odpadem je ve většině případů zodpovědná organizace pro nakládání s odpady.²⁶⁶ Tato organizace může být vlastněna státem (například v Německu, Španělsku či Velké Británii) nebo v některých případech energetickými firmami, jako je tomu ve Švédsku a Švýcarsku. Státem vlastněná společnost ANDRA ve Francii předpokládá náklady na likvidaci 12 000 m³ VAO a 72 000 m³ středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu (SAO-DD) v zařízení CIGEO ve výši 31 miliard eur (34,6 miliardy dolarů). V USA spadá likvidace VAO do působnosti Ministerstva energetiky (DOE). DOE v roce 2018 odhadovalo náklady na zařízení k likvidaci VAO v Yucca Mountain na 96 miliard dolarů. V Německu se diskontované náklady odhadují na 8,3 miliardy eur (9,3 miliardy dolarů), a to na zařízení k likvidaci 27 000 m³ většinou vyhořelého jaderného paliva; nediskontované náklady činí 51 miliard eur (56,4 miliardy dolarů).

U likvidace VAO je důležité pamatovat, že veškeré zveřejněné údaje jsou odhady, protože hlubinné zařízení k likvidaci VAO dosud nezprovoznila ani nevybudovala žádná země světa. Kromě toho je nemožné odhady nákladů porovnávat, protože se různí výchozí předpoklady. Například Francie skladuje především vitrifikovaný odpad z přepracování, zatímco objem vyhořelého jaderného paliva, které je nutné zlikvidovat v USA, je mnohem větší než v Německu. Jednotlivé země se navíc liší i v tom, které náklady započítávají do skladování a které do likvidace. Stejně jako odhady nákladů na vyřazování z provozu se často zakládají na zastaralých studiích. Například německý odhad pro VAO stále částečně vychází z extrémně hrubého výpočtu, který v roce 1997 provedl německý regulační úřad, tedy Spolkový úřad pro radiační ochranu (BfS), pro v té době uvažovanou lokalitu Gorleben.

6.3 PROGRAMY FINANCOVÁNÍ

PROGRAMY FINANCOVÁNÍ VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU

Princip *znečišťovatel platí* se u vyřazování z provozu uplatňuje ve většině jaderných zemí. Jsou však některé případy, kde ručení za vyřazování z provozu přebírá stát (například u bývalých východoněmeckých reaktorů). Organizace, která nese hlavní ručení, však není vždy ta, která za činnosti vyřazování z provozu v plné výši platí. Bulharsko, Litva a Slovensko dostávají podporu na vyřazování z provozu z EU výměnou za uzavření svých starších jaderných elektráren sovětského typu.²⁶⁷ Ve Španělsku se po vyjmutí paliva ze zařízení a po úpravě odpadu z provozu ručení za vyřazení z provozu i samotné zařízení převádějí na státem řízenou agenturu pro nakládání s radioaktivním odpadem ENRESA.²⁶⁸ Dřívější provozovatelé po tomto převodu odpovědnosti již nemusejí dále přispívat do fondu vyřazování z provozu, a to ani když náklady na vyřazování z provozu převýší existující zajištěné prostředky.

²⁶⁶ MAAE 2007, *Cost Considerations and Financing Mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste*

²⁶⁷ European Court of Auditors 2016, *EU nuclear decommissioning assistance programmes in Lithuania, Bulgaria, and Slovakia: some progress made since 2011, but critical challenges ahead*. Lucembursko.

²⁶⁸ Vláda Španělska 2017, *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – 6th Spanish National Report*.

Ne ve všech jaderných státech je povinnost externí správy prostředků na vyřazování z provozu a jejich oddělení od osoby provozovatele či držitele licence. Vyřazování z provozu se v některých případech stále financuje prostřednictvím interních oddělených a omezených fondů, například ve Francii a v České republice. Od interních neoddělených fondů se již téměř ve všech zemích upustilo s výjimkou Německa (a Jižní Korey, ačkoli tam je provozovatel ve veřejném vlastnictví). Energetické firmy v Německu jsou stále zodpovědné za odkládání prostředků na zajištění vyřazování z provozu do neomezených, neoddělených interních fondů. Jednotlivé společnosti toto zajištění zřizují v souladu s mezinárodními účetními standardy a mohou si samy zvolit, kam zajištěné prostředky investují. Tento systém financování je zcela ojedinelý a snáší se na něj přísná kritika kvůli katastrofální finanční situaci energetických firem, protože v případě úpadku dané energetické firmy by fond zanikl.²⁶⁹ Fondy na vyřazování z provozu ve stále více zemích přebírají externí orgány. Například ve Švýcarsku a ve Švédsku budou výdaje na vyřazování z provozu hrazeny z externích, omezených fondů na vyřazování z provozu. Též Velká Británie zřídila Fond jaderného ručení (Nuclear Liabilities Fund, NLF), což je nezávislý trust, jenž v současné době spravuje 9,26 miliardy liber (12 miliard dolarů), jež budou použity na vyřazování z provozu (a nakládání s odpady) stávajících reaktorů typu AGR (Advanced Gas-cooled Reactor), které provozuje EDF Energy.

Fondy na vyřazování z provozu lze naplňovat poplatky nebo příspěvky, jež jsou zahrnuty v ceně elektřiny, nebo povinným státním poplatkem. V některých zemích existují oba mechanismy, například pro různé generace jaderných elektráren. EDF ve Francii shromažďuje prostředky na vyřazování z provozu pomocí tarifu z ceny elektřiny, ale výši tohoto tarifu si stanovuje firma sama.²⁷⁰ Na druhou stranu ve Švýcarsku a ve Švédsku jsou základem pro náležité plnění fondu podrobné studie nákladů. V jiných zemích, například v Německu, kde existují dva či více programů financování, se liší program financování vyřazování z provozu pro čistě státní zařízení, zařízení ve smíšeném vlastnictví a zařízení v soukromém vlastnictví. Náklady na vyřazování z provozu jaderných zařízení v bývalé NDR se financují ze stávajícího veřejného rozpočtu.

Země vyřazující jaderná zařízení z provozu se vedle nedostatku připravenosti a technické odbornosti potýkají s možnými dalšími finančními deficity při financování vyřazování z provozu, nebo je předpokládají. Není jasné, zda je nashromážděn dostatek financí na úhradu celého vyřazení z provozu, nebo zda se budou muset zapojit daňoví poplatníci. Kvůli předčasnému uzavírání schodků ve financích na vyřazování a rostoucím nákladům na vyřazování z provozu se u některých elektráren vyřazení z provozu oddaluje tak, aby se stihly nashromáždit dodatečné finanční prostředky. Některé země též zvažují možnosti, jak by si na sebe jednotlivá zařízení mohla vydělat prostřednictvím zvýšených poplatků, dotovaných cen a prodloužení životnosti, například v USA či v Japonsku.²⁷¹ Ve většině zemí již vyhrazené finanční prostředky nepokrývají odhadované náklady.

Ve většině zemí již vyhrazené finanční prostředky nepokrývají odhadované náklady. Zdá se, že riziko podfinancování je problémem v téměř všech zemích, jež stojí před vyřazováním z provozu.

Zdá se, že riziko podfinancování je problémem v téměř všech zemích, jež stojí před vyřazováním z provozu. Společnost EDF má odloženo pouze okolo 18,5 miliardy eur (20,9 miliardy dolarů), neboli 58 % odhadovaných nákladů na vyřazování z provozu. V České republice je nashromážděno pouze 15 % finančních prostředků na Temelín a 28 % prostředků na Dukovany. Zůstatek Fondu na vyřazování jaderných zařízení z provozu (Nuclear Decommissioning Trust Fund, NDT) v USA činil v roce 2016 zhruba 64 miliard dolarů při měrných nákladech na jeden reaktor okolo 700 USD/kW u státních ener-

²⁶⁹ von Hirschhausen, C. and Reitz, F. 2014. Nuclear power: phase-out model yet to address final disposal issue. DIW Economic Bulletin, 4(8), str.27-35.

²⁷⁰ Neri a kol. 2016.

²⁷¹ Album, Braend, and Johnson 2017.

getických firem a 850 USD/kW u firem vlastněných investory.²⁷² Na dvou nedávných případech v USA se ukazují rizika neoddělitelně spjatá s nedostatečným financováním. Firma Exelon hlásila schodek finančních prostředků ve Fondu na vyřazování z provozu pro tři reaktory ve výši od 6 milionů do 83 milionů dolarů. NRC přitom firmě Exelon udělil prodloužení licence o 20 let s představou, že v čase získaném navíc bude moci Fond na vyřazování z provozu navýšit.²⁷³ Německé energetické firmy měly v roce 2017 na likvidaci všech 23 komerčních reaktorů zajištěné prostředky ve výši cca 24,2 miliardy eur (26,7 miliardy dolarů). Tato částka převyšuje odhad nákladů ve výši 19,7 miliardy eur (22,2 miliardy dolarů). Rozsah zajištěných prostředků a odhadů nákladů se však liší. Zajištěnými prostředky se mají pokrýt i náklady na kontejnery, úpravu odpadu z provozu a jeho přeprava, které však odhad nezahrnuje. Zůstává tak otevřenou otázkou, zda zajištěné prostředky budou k pokrytí nákladů dostatečné. Navíc vzhledem k nedostatku transparentnosti německých systémů financování vyřazování z provozu je možné, že finanční prostředky nebudou investovány do vyřazování z provozu a že hmotný majetek bude v nadcházejících letech dále ztrácet na hodnotě.²⁷⁴

Tabulka 6 porovnává systémy financování vyřazování z provozu v České republice, Francii a Německu. Tabulka obsahuje systém financování, metodu shromažďování prostředků, odhad celkových nákladů na vyřazování z provozu a hodnotu vyhrazených prostředků.

TABULKA 6: Systémy financování vyřazování z provozu v České republice, Francii a Německu k prosinci 2018

	ČESKÁ REPUBLIKA	FRANCIE*	NĚMECKO
SYSTÉM FINANCOVÁNÍ	interní oddělený a omezený fond	interní oddělený a omezený fond	interní neoddělený a neomezený
SPRAVUJÍ	provozovatelé	provozovatel	provozovatelé
PŮVOD PROSTŘEDKŮ	zajištění provozovatelem	odvod z ceny elektřiny	zajištění provozovatelem
ODHAD NÁKLADŮ	Temelín: 847 mil. USD Dukovany: 1 mld. USD 410-530 USD/kW	35,7 mld. USD za celou flotilu 450 USD/kW za provozované; 1350 USD/kW za odstavené	22,2 mld. USD za 23 komerční reaktory** 940 USD/kW
VYHRAZENÉ PROSTŘEDKY (% ODHADOVANÝCH NÁKLADŮ)	Temelín: 129 mil. USD (15 %) Dukovany: 276 mil. USD (28 %)	20,8 mld. USD (58%)	26,7 mld. USD*** (n.a.)

Zdroj: Vlastní vyobrazení

Poznámky: * Platí pouze pro EDF

** nezahrnuje náklady na kontejnery, přepravu a úpravu

*** zahrnuje zajištěné prostředky na kontejnery, přepravu a úpravu (i odpadu z provozu); rok 2017

PROGRAMY FINANCOVÁNÍ DOČASNÉHO SKLADOVÁNÍ

Náklady a programy financování dočasného skladování jaderného odpadu z provozu i z vyřazování z provozu do velké míry závisí na dostupné infrastruktuře pro nakládání s odpady a na existenci možností likvidace odpadu. Vzhledem k tomu, že žádné řešení likvidace vysokoaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva neexistuje, stojí všechny jaderné země v souvislosti s dočasným skladováním před problémy technologické, organizační i finanční povahy. Země, které nemají k dispozici řešení nakládání s NSAO, s narůstajícím počtem uzavíraných reaktorů čelí stále větším potížím s financováním skladování NSAO.

²⁷² Moriarty, J. 2017, „2017 Nuclear Decommissioning Funding Study“, Callan Institute.

²⁷³ Schneider a kol. 2018.

²⁷⁴ Irrek and Vorfeld 2015.

Náklady na dočasné skladování odpadu lze hradit z provozních výnosů (jako u firmy ČEZ v České republice). Ve Švýcarsku musí provozovatel přímo hradit výdaje na manipulaci s jaderným odpadem, jež vznikají při provozu jaderné elektrárny a během poprovozní fáze. V Německu energetické firmy odkládají zajištěné prostředky na dočasné skladování svého odpadu; odhadované diskontované náklady v roce 2014 činily cca 5,8 miliardy eur.²⁷⁵ Tato částka byla po reformě financování převedena do externího odděleného fondu a veškeré náklady na dočasné skladování, včetně vyhořelého jaderného paliva, jež vzniknou při dalším provozu, budou hrazeny z veřejného fondu. Ve Švédsku hradí náklady na centralizované zařízení k dočasnému skladování CLAB Fond jaderného odpadu.

Nejsložitější situace ve financování dočasného skladování vyhořelého jaderného paliva je v USA. Podle zákona o jaderném odpadu bylo v roce 1998 povinno převzít vyhořelé jaderné palivo Ministerstvo energetiky (DOE). Tím pro DOE vznikla významná odpovědnost. Neexistence úložiště vysokoaktivního odpadu nutí místní energetické firmy skladovat vyhořelé palivo ve vlastních lokalitách, včetně lokalit již vyřazených z provozu. Energetické společnosti za toto dočasné skladování od DOE žádají značnou finanční kompenzaci, takže ministerstvo již na zákonných penále vydalo přes 10 miliard dolarů. Podle odhadu DOE by celkové odškodné mohlo činit 20,8 miliardy dolarů, pokud začne přijímat vyhořelé palivo v roce 2020. Při dalších zpožděních by se finanční závazky mohly každoročně zvyšovat o stovky milionů dolarů.²⁷⁶ Americké Ministerstvo spravedlnosti spravuje soudní fond z peněz daňových poplatníků ve výši cca 2 milionů dolarů denně pro všechny jaderné elektrárny, ať již v provozu či uzavřené. Z tohoto zdroje pomáhá elektrárnám financovat nakládání s jejich vyhořelým jaderným palivem.

Ve Francii společnost EDF odhaduje nutnost dalších 18,7 miliard eur (21,1 miliard USD) za nakládání s vyhořelým palivem (například skladování a přepracování) a dalších 1,2 miliardy eur (1,4 miliardy USD) za odvoz a úpravu odpadu.²⁷⁷ To dělá 51 miliard eur (57,5 miliardy USD) pouze za manipulaci a skladování odpadu vznikajícího za provozu.

PROGRAMY FINANCOVÁNÍ LIKVIDACE ODPADU

Finanční odpovědnost za likvidaci (a částečně ani za nakládání s odpady) nenesou vždy znečišťovatelé; v některých případech se tato odpovědnost přenáší na státní organizaci, která je zodpovědná i za radioaktivní odpad.²⁷⁸ Ve většině zemí je nutnost externí správy fondů na dlouhodobé nakládání s radioaktivním odpadem oddělené od osoby provozovatele či držitele licence. Například ve Francii musí provozovatelé jaderných elektráren nést veškeré náklady spojené s nakládáním s odpady, ale vznikl zde externí fond na výstavbu a provoz, konečné uzavírání, údržbu a monitoring zařízení k likvidaci středně a vysokoaktivních odpadů. Tento fond drží a spravuje státem vlastněná agentura pro nakládání s odpady ANDRA (článek 16 zákona o odpadech z roku 2006).²⁷⁹ Kromě toho existuje ještě interní, omezený fond agentury ANDRA na výzkum skladovacích zařízení budoucnosti. Oba fondy se plní platbami z interních fondů provozovatelů v době, kdy je to nutné. Jediným fondem, do kterého nyní tečou peníze, je však výzkumný fond, protože stavební povolení dosud nebylo vydáno. Provozovatelé namísto toho provádějí platby ze svého interního fondu (na nakládání s odpady) do obecného rozpočtu ANDRA, z něž se financují operace spojené se zařízeními ke skladování středněaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu.²⁸⁰ Zákon o odpadech z roku 2006 ukládá povinnost vykazovat aktiva ve fondech firem EDF a Areva odděleně,

²⁷⁵ Warth & Klein Grant Thornton AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2015.

²⁷⁶ US Department of Energy 2012, „Blue Ribbon Commission on America's nuclear future”.

²⁷⁷ EDF 2019, „Consolidated Financial Statements at 31 December 2018”.

²⁷⁸ Wuppertal Institut 2007.

²⁷⁹ Vláda Francie 2006, *The 2006 programme act on the sustainable management of radioactive materials and wastes*, Office parlementaire — Assemblée nationale.

²⁸⁰ Wealer, Hirschhausen a Seidel 2019.

příčemž jejich tržní hodnota musí být alespoň tak vysoká jako závazky, které mají fondy zajišťovat. Stát si v případě úpadku EDF může nárokovat právo na tato aktiva. Na interní fondy dohlíží správní úřad, jenž může prikazovat nápravná opatření, včetně plateb do rozpočtu ANDRA.

V rámci starého systému financování v Německu soukromé firmy spravovaly finanční prostředky na likvidaci odpadů z interních neoddělených fondů bez kontroly orgánů veřejné správy. Zákonem z roku 2016 se německý systém financování zásadně proměnil zavedením externího odděleného fondu, z něhož se budou hradit veškeré činnosti související s konečnou likvidací.²⁸¹ Fond převzal prostředky ve výši dřívějších zajištění na nakládání s odpady, tj. 24,1 miliard eur (27,2 mld. USD), včetně rizikové premie, do externího odděleného veřejného fondu. Fond pro financování nakládání s jaderným odpadem byl založen v polovině roku 2017, aby bylo zajištěno „bezpečné a výnosné“ investování finančních prostředků. Odpovědnost i budoucí rizika však bude muset nést veřejnost, čímž se narušuje princip *znečišťovatel platí*.²⁸² V prvním finančním roce fond investoval pouze zlomek svých aktiv, z nichž většina stále leží ve Spolkové bance (Bundesbank) s úrokovou sazbou 0,4 %. Výsledkem za prvních šest měsíců existence fondu byly úrokové výdaje ve výši cca 39 milionů eur (44,1 mil. USD).²⁸³ Likvidace VAO v USA se financuje prostřednictvím Fondu jaderného odpadu (Nuclear Waste Fund, NWF), a to formou výnosů z odvodů z ceny elektřiny ve výši 0,001 USD/kWh. Fond za dobu své existence nashromáždil přes 34,3 miliardy USD. Peníze se však již ve fondu neshromažďují v důsledku federální žaloby na Ministerstvo energetiky z roku 2013, protože DOE nepřijímalo vyhořelé jaderné palivo k likvidaci (*viz oddíl 7.8*).

Spojené království má k financování vyřazování z provozu jiný přístup. Stát je prostřednictvím Úřadu pro vyřazování z provozu odpovědný za financování nakládání s historickým odpadem a nákladů na vyřazování z provozu první generace jaderných reaktorů (většinou typu Magnox). U pozdějších reaktorů a nakládání s odpady a vyřazování z provozu novostaveb se náklady hradí prostřednictvím Programu vyřazování z provozu na základě pevné jednotkové ceny, kterou v zásadě platí provozovatelé. Jeho cílem je zaplatit hlubinné úložiště, které vyvine a bude spravovat stát.

Tabulka 7 podává přehled systémů financování, odhad celkových nákladů a vyhrazené finanční prostředky ve vybraných zemích. Z údajů vyplývá, že země nedokážou odkládat dostatek finančních prostředků k pokrytí předpokládaných nákladů na likvidaci. Například Francie a USA mají vyčleněné finanční prostředky na likvidaci, jež by pokryly pouze zhruba třetinu odhadovaných nákladů.

²⁸¹ Vláda Německa, *Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung* (BGBl., I, S. 1843 768/16).

²⁸² Jänsch, E., Brunnengräber, A., von Hirschhausen, C. and Möckel, C. 2017, *Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung*, GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society, 26(2), str. 118-120.

²⁸³ Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (German Fund for the Financing of Nuclear Waste Management) 2018, *Geschäftsbericht* 2017.

TABULKA 7: Systémy financování likvidace odpadu ve Francii, Německu a USA k prosinci 2018

	FRANCIE*	NĚMECKO	USA
PROGRAM FINANCOVÁNÍ	interní oddělený a omezený fond, posléze při zahájení výstavby přesunutý pod agenturu pro nakládání s odpady (ANDRA)	externí oddělený fond	externí oddělený fond
PŮVOD PROSTŘEDKŮ	odvod z ceny elektřiny	investování prostředků	dříve odvod z ceny elektřiny, který se již nevybírám
ODHAD CELKOVÝCH NÁKLADŮ	34,9 mld. USD	19,8 mld. USD**	96 mld. USD
VYHRAZENÉ PROSTŘEDKY (% ODHADU NÁKLADŮ)	11 mld. USD (32 %)	27,2 mld. USD**	34,3 mld. USD (36 %)

Zdroj: Vlastní vyobrazení

Poznámky: * Platí pouze pro EDF ** zahrnuje dočasné skladování a likvidaci NSAO a VAO

INTEGROVANÉ PROGRAMY FINANCOVÁNÍ

Vzhledem k velké vzájemné provázanosti mezi vyřazováním z provozu, skladováním a likvidací se jako nejvhodnější přístup k financování budoucích nákladů na tyto procesy jeví integrovaný externí oddělený a omezený (přísně účelově vázaný) fond.²⁸⁴ Integrované financování znamená, že fond svým rozsahem pokrývá vyřazování z provozu i nakládání s odpady. K zemím s integrovaným systémem financování patří Švédsko, Švýcarsko a Velká Británie (ta však pouze u reaktorů EDF Energy v provozu).

Ve Švédsku příspěvky (z poplatku z ceny elektřiny) do Fondu jaderného odpadu vycházejí z odhadů nákladů prováděných SKB, což je švédská společnost pro nakládání s jaderným palivem a odpadem vlastněná energetickými firmami, a SSM, tedy švédským Úřadem pro radiační bezpečnost. Odhady nákladů vycházejí z podrobných průzkumů a plánů na vyřazování z provozu provázaných se spuštěním zařízení k likvidaci. Tyto průzkumy rovněž zahrnují plánované činnosti v rámci vyřazování z provozu včetně plánovaného načasování a posloupnosti činností a podrobně vyjádřených souvisejících nákladů. Tyto průzkumy provádí pracovní skupina složená z členů SKB, zástupců provozovatelů a odborníků ze strany poskytovatelů technologických systémů dotýkajících zařízení. Tyto veřejně dostupné plány vyřazování z provozu navíc zvyšují transparentnost.

Britská vláda pro reaktory EDF Energy v provozu v roce 1996 zřídila Fond jaderných závazků, jehož jediným smyslem je financování nákladů souvisejících s nakládáním s odpady a vyřazováním z provozu. Fond je plněn ze dvou zdrojů: malých čtvrtletních plateb od firmy EDF Energy a výnosů z investic z fondu. Pokud chce EDF Energy z fondu obdržet úhradu na splnění svých závazků, může to udělat pouze formou žádosti u NDA, který vystupuje jako zástupce vlády. NDA coby správce Smluv o správě závazků schvaluje úhrady na vyřazování z provozu a nakládání s odpady. Britská vláda však může rozhodnout o převodu odpovědnosti za vyřazování z provozu na NDA, a to kdykoli po ukončení výroby elektřiny v daných elektrárnách.²⁸⁵

Švýcarský systém financování je srovnatelný se švédským (například příspěvky do fondu se určují podle odhadů nákladů na konkrétní jaderné reaktory), ale Švýcarsko zřídilo fondy dva: jeden k financování vyřazování z provozu a jeden k financování likvidace odpadu. Provozovatelé jaderných elektráren musí platit poplatky do obou fondů, na něž dohlíží švýcarská Spolková rada.²⁸⁶ Stejně jako ve většině zemí však

²⁸⁴ Wealer, Hirschhausen a Seidel 2019.²⁸⁵ Neri a kol. 2016.²⁸⁶ Swissnuclear 2011, Cost Study 2011 (CS11) Overview Report.

nákladové studie nejsou veřejné a provádí je soukromá společnost, v tomto případě stejná společnost, která dělá odhady nákladů na vyřazování z provozu v Německu (NIS).

Tabulka 8 obsahuje přehled integrovaných programů financování vyřazování z provozu a nakládání s odpady. Udává informace o tom, kdo fond ovládá (tj. externí, interní, oddělený), a o odhadech nákladů na vyřazování z provozu. Z údajů vyplývá, že země nedokážou odkládat dostatek finančních prostředků k pokrytí odhadovaných budoucích nákladů. Švédsko má zatím vyčleněno finanční prostředky na vyřazování z provozu a nakládání s odpady ve výši dvou třetin odhadovaných nákladů, Spojené království méně než polovinu (na reaktory v provozu) a Švýcarsko ani ne třetinu.

TABULKA 8: Integrované systémy financování vyřazování z provozu a nakládání s odpady ve Švédsku, Švýcarsku a Velké Británii k prosinci 2018

	ŠVÉDSKO	ŠVÝCARSKO	SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ*
PROGRAM FINANCOVÁNÍ	jeden externí oddělený a omezený fond	dva externí oddělené fondy (pro nakládání s odpady a pro vyřazování z provozu)	jeden externí oddělený a omezený fond
SHROMAŽDOVÁNÍ PROSTŘEDKŮ	poplatek z ceny elektřiny (stanovený individuálně pro každou elektrárnu)	platba provozovatelem	platba provozovatelem
ODHAD CELKOVÝCH NÁKLADŮ	10,7-11,8 mld. USD	24,6 mld. USD***	26,5 mld. USD**
VYHRAZENÉ PROSTŘEDKY (% ODHADU NÁKLADŮ)	7,2 mld. USD**** (61-67 %)	7,39 mld. USD (30%)	12,1 mld. USD (46%)

Zdroj: Vlastní vyobrazení

Poznámky: *Reaktory EDF Energy

**K roku 2018

***Odhad celkových nákladů a provozní období 50 let k roku 2019

****K roku 2017

6.4 SHRNUTÍ

Téměř všechny vlády tvrdí, že uplatňují princip *znečišťovatel platí*, jenž odpovědnost za náklady na skladování a likvidaci jaderného odpadu a nakládání s ním přenáší na provozovatele. Ve skutečnosti však vlády princip *znečišťovatel platí* neuplatňují důsledně. Většina zemí jej vymáhá pouze u vyřazování z provozu, ačkoli v některých případech vláda za vyřazování z provozu převzala odpovědnost (například u reaktorů v bývalém Východním Německu). Bulharsko, Litva a Slovensko dostávají podporu na vyřazování z provozu z EU výměnou za uzavření svých starších jaderných elektráren sovětského typu. Většina zemí princip *znečišťovatel platí* nevymáhá u nákladů na likvidaci jaderného odpadu. V tomto případě národní správní orgány víceméně přebírají odpovědnost i ručení za dlouhodobé nakládání s odpady a jejich likvidaci. Provozovatel má však povinnost na financování dlouhodobých nákladů přispívat. Dokonce i v zemích, kde je princip *znečišťovatel platí* povinný ze zákona, se uplatňuje neúplně. Například provozovatel jaderné elektrárny finančně neručí za případné problémy vzniklé po uzavření jaderného zařízení; to platí u zařízení k likvidaci odpadů Asse II v Německu, kde vyzvednutí velkého množství odpadu hradí daňoví poplatníci.

Vlády řádně neodhadují náklady na vyřazování z provozu, skladování a likvidaci jaderného odpadu. U všech odhadů nákladů se vyskytují zásadní nejistoty vzhledem k dlouhým časovým úsekům, nárůstům

nákladů a odhadům diskontních sazeb (tempa nárůstu prostředků). Významným důvodem těchto nejistot je nedostatek zkušeností s vyřazováním z provozu a zejména s projekty likvidace odpadů. Projekty vyřazování z provozu včetně úplné demontáže, a tedy výsledných údajů, dosud dokončily pouze tři země – Spojené státy, Německo a Japonsko. K polovině roku 2019 bylo z celkem 181 uzavřených energetických reaktorů ve světě zcela vyřazeno z provozu pouze 19, z nichž pouze 10 do stadia „zelené louky“. I tyto omezené zkušenosti však doprovází široké spektrum nejistoty, a to až do výše pětinasobku. Náklady na vyřazování z provozu v USA se u jednotlivých reaktorů lišily v rozmezí od 280 do 1 500 USD/kW. V Německu byl jeden reaktor vyřazen z provozu za 1 800 USD/kW a druhý za 10 500 USD/kW.

Mnoho vlád zakládá své odhady na zastaralých údajích. Řada zemí, o kterých zde referujeme, například Francie, Německo a USA, vychází ze studií ze 70. a 80. let minulého století, nikoli z údajů těch několika málo skutečných případů. Použitím zastaralých údajů, ve většině případů poskytovaných provozovateli, průmyslem či státními orgány, pravděpodobně dochází k podhodnocení nákladů a přehnaně optimistickým závěrům.

Mnoho vlád používá přehnaně optimistické diskontní sazby. Jedním z klíčových faktorů, jež vedou k podhodnocování nákladů vyřazování z provozu a nakládání s jaderným odpadem, je systematické používání přehnaně optimistických diskontních sazeb. Zásadním aspektem financování vyřazování z provozu a nakládání s odpady je očekávání, že finanční prostředky v čase porostou. Například v Německu se očekává, že prostředky ve výši 24 miliard eur vyhrazené na veškeré činnosti související s nakládáním s odpady do roku 2099 vzrostou téměř čtyřnásobně na 86 miliard eur. Uplatňované diskontní sazby se velmi různí a ne všechny země počítají s nárůstem nákladů, přestože je pravděpodobné, že náklady porostou rychleji než obecná inflace.

K zaručení dostupnosti dostatečných finančních prostředků na vyřazování z provozu, nakládání s odpady a jejich likvidaci je nutné, aby programy financování vytvářely bezpečné podmínky pro udržení prostředků (přísně účelové financování). Je zároveň nutno zajistit, aby ukládané prostředky byly dostatečné k pokrytí skutečných nákladů. Některé státy splňují jednu z podmínek, ale ne druhou.

Mezi zeměmi panují značné rozdíly ve způsobu plánování financování nakládání s jaderným odpadem, jeho skladování a likvidaci. Ne ve všech jaderných státech je povinnost externí správy prostředků na vyřazování z provozu a jejich oddělení od osoby provozovatele či držitele licence. V některých případech je vyřazování z provozu stále financováno prostřednictvím interních oddělených či omezených fondů, přestože peníze na dlouhodobé nakládání s odpady se ve většině zemí spravují externě. Financování vyřazování z provozu a skladování je složité – ve většině případů existuje v jedné zemi několik systémů financování.

Vlády vzhledem k odlišným národním přístupům ne vždy jasně definují, co vše pojem „vyřazování z provozu“ zahrnuje. Významným aspektem vyřazování z provozu je nakládání s jaderným odpadem, stejně jako nakládání s vyhořelým palivem. Do „vyřazování z provozu“ však není vždy zahrnuto obojí, takže porovnání nákladů mezi jednotlivými zeměmi je obtížné. Procesy vyřazování z provozu, skladování a likvidace spolu úzce souvisí. Proto se jako nejvhodnější přístup k financování budoucích nákladů na tyto procesy jeví integrovaný externí oddělený a omezený fond. Pro toto řešení se rozhodlo jen několik zemí, především Švédsko, Spojené království a Švýcarsko, ačkoli Švýcarsko má dva fondy: jeden na vyřazování z provozu a jeden na nakládání s odpady. Žádná země dosud nezajistila veškeré financování vyřazování z provozu, skladování a likvidace svého jaderného odpadu. Toto zajištění bude pro všechny země využívající jadernou energii představovat výzvu.

K dnešnímu dni dosud žádná země neodhadla náklady přesně a zároveň nepokryla mezeru mezi zajištěnými finančními prostředky a odhadovanými náklady. Ve většině případů je vyčleněn pouze zlomek potřebných finančních prostředků. Například Švédsko má zatím vyčleněno finanční prostředky na vyřazování z provozu a nakládání s odpady ve výši dvou třetin odhadovaných nákladů, Spojené království na své reaktory v provozu méně než polovinu a Švýcarsko ani ne třetinu. Totéž platí u financování likvidace odpadů. Francie a USA mají vyčleněné finanční prostředky na likvidaci, jež by pokryly pouze zhruba třetinu odhadovaných nákladů. Vzhledem k tomu, že stále větší počet reaktorů se uzavírá před plánovaným termínem kvůli nepříznivým ekonomickým podmínkám, riziko nedostatečnosti finančních prostředků roste. Tyto předčasné uzavírky, schodek prostředků a rostoucí náklady některé provozovatele jaderných elektráren nutí k odkládání dalších uzavírek a vyřazování z provozu do doby, než naspoří další finanční prostředky. Některé země též zvažují možnosti, jak by si na sebe jednotlivá zařízení mohla vydělat prostřednictvím zvýšených poplatků, dotovaných cen a prodlužování životnosti, například v USA či v Japonsku..



7 PŘÍPADOVÉ STUDIE Z JEDNOTLIVÝCH ZEMÍ

7.1 ČESKÁ REPUBLIKA

PŘEHLED

Historie českého jaderného sektoru sahá do 40. let 20. století. Československo bylo v dobách komunismu kvůli ložiskům uranové rudy významným producentem uranu pro Východní blok. Od roku 1946 do roku 2016, kdy byl uzavřen poslední důl, bylo vytěženo přes 112 000 tun uranové rudy.²⁸⁷ V zemi se stále nachází minimálně 119 000 tun těžitelných zásob uranu. Existují plány na obnovení těžby, pokud by se v budoucnu stala nákladově efektivní.

Československo zpracovávalo uran do podoby žlutého koláče, přičemž další zpracování probíhalo v Sovětském svazu. Chemická úprava uranových rud v Dolní Rožínce je dodnes v provozu, ačkoli zpracovává pouze zbytkový uran získaný při sanacích.

Provoz první jaderné elektrárny v Dukovanech byl zahájen v letech 1985–87. Sestává ze čtyř těžkovodních reaktorů (PWR) sovětského typu VVER 440 o celkovém výkonu 2 040 megawattů (MW). Předpokládá se provoz elektrárny do roku 2035–37, ale uvažuje se o jeho prodloužení. Součástí jaderné elektrárny Temelín jsou dva reaktory VVER 1000, které byly spuštěny v letech 2000–02, každý o výkonu 1 055 MW. Dále existují dva výzkumné reaktory, LVR-15 a LR-0 v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži a jeden školní reaktor, VR-1, na Českém vysokém učení technickém v Praze.

České jaderné elektrárny v roce 2018 vyrobily 28,2 TWh elektřiny, což byla třetina celkově vyrobené elektrické energie.²⁸⁸ Státní energetická politika České republiky si klade za cíl postavit do roku 2040 minimálně dva další jaderné reaktory.²⁸⁹

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Český systém klasifikace odpadu odpovídá doporučením MAAE. Nejnovější legislativa se zabývá kategorizací odpadu pouze velmi obecně.²⁹⁰ Tuhý odpad se klasifikuje na základě způsobu jeho uložení:²⁹¹

- Přechodně aktivní odpad, který po skladování po dobu nejvýše 5 let vykazuje aktivitu nižší, než jsou uvolňovací úrovně.
- Velmi nízkoaktivní odpad (VNAO), jehož aktivita je vyšší než aktivita přechodného radioaktivního odpadu, ale nevyžaduje speciální opatření při uložení.
- Nízkoaktivní odpad (NAO), jehož aktivita je vyšší, než jsou uvolňovací úrovně, ale který současně obsahuje omezené množství dlouhodobých radionuklidů.

²⁸⁷ NEA a MAAE 2018, *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*, cit. 29. května 2019, <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>

²⁸⁸ Energetický regulační úřad ČR 2019, *Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR, 2018*, cit. 29. května 2019, http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni_zprava_2018_IV_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4

²⁸⁹ Vláda České republiky 2015, *State Energy Policy*, cit. 29. května 2019, https://www.mpo.cz/assets/en/energy/state-energy-policy/2017/11/State-Energy-Policy-_2015__EN.pdf

²⁹⁰ Vláda České republiky 2016, *Decree No. 377/2016 Coll., on the requirements for the safe management of radioactive waste and on the decommissioning of nuclear installations or category III or IV workplaces*, cit. 29. května 2019, https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/377_Radioactive_Waste.pdf

²⁹¹ Vláda České republiky 2016, *Decree No. 422/2016 Coll., on radiation protection and security of a radioactive source*, cit. 29. května 2019, https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/422_Radiation_safety_fin.pdf

- Středněaktivní odpad (SAO), který obsahuje významné množství dlouhodobých radionuklidů, a proto vyžaduje vyšší stupeň izolace od okolního prostředí než nízkoaktivní odpad.
- Vysokoaktivní odpad (VAO), u něhož musí být při skladování a ukládání zohledněno uvolňování tepla z přeměny v něm obsažených radionuklidů; po zpracování a úpravě musí tento odpad splňovat podmínky přijatelnosti a musí být uložen do hlubinného úložiště radioaktivního odpadu umístěného v hloubkách řádově několik set metrů pod zemským povrchem.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Česká republika má největší objem jaderného odpadu ze všech novějších členských zemí EU. V dobách komunismu se vyhořelé jaderné palivo vracelo dodavateli, jímž byl Sovětský svaz. Rusko však již od začátku 90. let vrácený jaderný odpad nepřijímá. Provozovatel českých jaderných elektráren, firma ČEZ, ve svých elektrárnách zbudovala suché mezisklady, v nichž skladuje vyhořelé palivo po vyjmutí z chladicích bazénů. Dva suché mezisklady jsou v Dukovanech a jeden v Temelíně, jejich celková kapacita je 3 310 tun vyhořelého paliva.

Česká vláda pravidelně zveřejňuje evidenci radioaktivního odpadu. Níže uvedené údaje pocházejí z nejnovější evidence, která zahrnuje objem odpadů a jejich aktivitu ke dni 31. prosince 2016.

TABULKA 9: Jaderný odpad v České republice ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (suchý)	Dukovany a Temelín	1 174 tHM
	Bazény (mokré)	Dukovany a Temelín	654 tHM
NSAO KAPALNÝ	Skladovací nádrže u reaktorů	Dukovany a Temelín	1 439 m ³
NSAO TUHÝ	Skladovací nádrže u reaktorů	Dukovany a Temelín	351,3 t
	Přípovrchové úložiště (zlikvidováno)	Dukovany	11 520 m ³
VNAO			n.a.

Zdroj: Zpráva Státního úřadu pro jadernou bezpečnost pro EURATOM 2018

Nízko a středněaktivní odpad vznikající v jaderných elektrárnách a výzkumných reaktorech se většinou řeší na místě; kapalný odpad se zalévá buď do bitumenů, nebo do polymerů, zatímco tuhý odpad se buď zhutňuje, nebo nejprve spaluje a poté zhutňuje do 200litrových nádob. Středněaktivní odpad nehodící se k okamžitému uložení se skladuje a ukládá v hlubinném úložišti.

Vláda odhaduje, že po 40 letech provozu elektráren Dukovany a Temelín vznikne téměř 3 500 tun vyhořelého paliva.²⁹² Každým dalším rokem provozu by vzniklo dalších 35 tun odpadu z Dukovan a 36 z Temelína. Pokud by došlo k výstavbě tří dalších reaktorů, bylo by v polovině 22. století nutno uložit téměř 10 000 tun vyhořelého paliva. Kromě vyhořelého paliva by úložiště muselo přijmout i 4 200 tun odpadu z jaderných elektráren vyřazených z provozu, 140 tun odpadu z provozu a 84 tun ostatních odpadů.

²⁹² Vláda České republiky 2017, „Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice“, 29. listopadu, cit. 29. května 2019, <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2017/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR.pdf>

Přípovrchové trvalé úložiště odpadů v Dukovanech má sloužit především pro NAO a SAO z jaderné energetiky. Celková kapacita je okolo 55 000 m³ a koncem roku 2016 tu bylo uloženo cca 11 500 m³ odpadu.²⁹³

Odhadované celkové množství nízko a středněaktivního odpadu vzniklého z obou českých jaderných elektráren (za dobu životnosti 60 let) je 18 300 m³. Další 10 800 m³ vznikne během vyřazování obou elektráren z provozu.

Vedle jaderného odpadu z provozu elektráren má Česká republika též významné množství odpadu z těžby uranu. Státem vlastněný podnik DIAMO spravuje 18 odkališť naplněných radioaktivním kalem, jejichž rozloha je téměř 600 hektarů a celkový objem 54 milionů m³. Firma je též zodpovědná za 371 výsypek o celkovém objemu 49 milionů m³ materiálů obsahujících zbytkové uranové rudy.²⁹⁴

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Právní rámec pro nakládání s jaderným odpadem v České republice je tvořen Zákonem o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření z roku 1997 (tzv. atomový zákon). Zákonem byla zřízena Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), což je státní agentura spadající pod Ministerstvo průmyslu a obchodu. SÚRAO zodpovídá za správu jaderného odpadu včetně bezpečného uložení vyhořelého jaderného paliva.

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) podle atomového zákona z roku 2016 zodpovídá za dozor nad jadernou bezpečností včetně úložišť.²⁹⁵ Novela atomového zákona zachovává hlavní principy předchozí verze, ale navíc vyžaduje další zákon o výběru lokality pro hlubinné úložiště. Takový zákon dosud nebyl přijat.

Česká vláda v roce 2002 schválila Politiku nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem, a to navzdory námitkám Ministerstva životního prostředí na základě posuzování vlivů strategií na životní prostředí. Politika stanovila zásady nakládání s jaderným odpadem a zavedla časové rámce. Vláda politiku aktualizovala v roce 2017.²⁹⁶ Veřejné projednávání bylo omezené.

Vyhořelé jaderné palivo se skladuje v suchých kontejnerech v jaderných elektrárnách, za což odpovídá firma ČEZ, která je jeho původcem. Jakmile je prohlášeno za odpad, přechází do působnosti SÚRAO. SÚRAO provozuje úložiště v Dukovanech, Litoměřicích a Jáchymově (poslední dvě pro neenergetický odpad). Existují plány na centrální podzemní sklad vyhořelého jaderného paliva v lokalitě Skalka, ale v současnosti se považují za neaktuální. Přepřepování vyhořelého paliva se nepředpokládá z ekonomických i technologických důvodů.

SÚRAO v roce 2002 vybrala šest žulových lokalit potenciálně vhodných pro hlubinné úložiště podle návrhu České geologické služby. Tento projekt čerpá inspiraci ze švédské technologie KBS-3 pro likvidaci vyhořelého jaderného paliva v hloubce 500 metrů v zapouzdřených nádobách zasypaných bentonitovým jílem. SÚRAO fakticky ignorovala obavy vybraných obcí a jejich obyvatel, čímž vytvořila vleklé spory

²⁹³ Správa úložišť radioaktivního odpadu ČR (SÚRAO) webová stránka bez data, „About repositories”, cit. 29. května 2019, <https://www.surao.cz/pro-verejnost/stavajici-uloziste/o-ulozistich/>

²⁹⁴ DIAMO 2018, „Souhrnná informace o výsledcích monitoringu a stavu složek životního prostředí DIAMO, s.p., za rok 2017“, 20. dubna, cit. 18. května 2019, https://www.diamo.cz/storage/app/media/_ke-stazeni/zivotni-prostredi/1-souhrnna-informace-o-vysledcich-monitoringu-a-slozek-zivotniho-prostredi-diamo-s-p/souhrnna-informace-o-vysledcich-monitoringu-a-stavu-slozek-zivotniho-prostredi-diamo-s-p-za-rok-2017.pdf

²⁹⁵ Více informací o atomovém zákoně <https://www.sujb.cz/legislativa/nove-atomove-pravo/>

²⁹⁶ Vláda České republiky 2017, Koncepte nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice, schválená 29. listopadu.

mezi místními samosprávami a ústředními správními orgány. Platforma proti hlubinnému úložišti, mezi jejímiž členy je 32 měst a obcí a 14 sdružení, tyto plány odmítá.²⁹⁷ Geologické plánování má v důsledku toho mnohaleté zpoždění. Uvažuje se o nových lokalitách, v nichž je menší pravděpodobnost odporu veřejnosti, ale možná horší geologické poměry. SÚRAO k roku 2019 uvažuje o devíti potenciálních lokalitách.²⁹⁸

Vhodnost zvolené lokality má být potvrzena do roku 2025, což vypadá optimisticky. V roce 2030 by měla začít výstavba podzemní laboratoře a poté by po roce 2050 měly začít práce na úložišti. Cílovým rokem zahájení provozu je 2065.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Prvním atomovým zákonem byl zřízen státní „jaderný účet“ spravovaný Ministerstvem financí. Finanční prostředky na účtu jsou vyhrazeny na nakládání s jaderným odpadem, včetně vývoje, provozu a uzavření hlubinného úložiště v budoucnosti. Hlavním zdrojem příjmů jsou poplatky placené původci jaderného odpadu. Uplatňuje se tudíž princip *znečišťovatel platí*. V roce 2018 bylo na účtu 26,9 miliardy korun (1,24 miliardy USD).²⁹⁹ Zákon stanoví poplatek ve výši 55 Kč (cca 2,53 dolaru) za každou vyrobenou MWh elektřiny v jaderné elektrárně a 30 Kč (cca 1,38 dolaru) za každou vyrobenou MWh tepla ve výzkumném reaktoru. Ostatní původci jaderného odpadu musí platit jednorázový poplatek pokrývající náklady.³⁰⁰

Česká vláda vypočítala náklady na uložení nízko a středněaktivního odpadu na 4,57 miliardy Kč (210 milionů USD) a náklady na uložení vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu na 111,4 miliardy Kč (5,13 mld. USD); skladování platí ČEZ ze svých provozních výdajů. Podle analýzy Českého vysokého učení technického tyto poplatky nebudou dostatečné k pokrytí skutečných budoucích nákladů.³⁰¹

Další finanční mechanismus se týká vyřazování jaderných zařízení z provozu v budoucnosti. Držitelé licencí na provoz jaderných zařízení jsou povinni budovat finanční rezervy na vyřazování z provozu a vypracovat časový harmonogram, přičemž obojí podléhá minimálně každých pět let schválení Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. SÚRAO musí potvrzovat, že provozovatelé tyto rezervy drží na zvláštním odděleném účtu.

ČEZ každoročně odkládá 209 milionů Kč (9,6 milionu USD) na vyřazování z provozu elektrárny Dukovany. Ke dni 31. prosince 2016 bylo takto vyhrazeno 6 miliard Kč (276 milionů USD); v době uzavření elektrárny by to mělo být 22,4 miliard Kč (1 miliarda USD). Celkový rezervní fond na vyřazení z provozu elektrárny Temelín by měl činit 18,4 miliardy Kč (847 milionů USD). ČEZ měl ke dni 31. prosince 2016 vyhrazeno 2,8 miliardy Kč (129 milionů USD) a ročně odkládá stranou 198,5 milionů Kč (9,1 mil. USD).³⁰²

²⁹⁷ Seznam členů Platformy proti hlubinnému úložišti: <http://www.platformaprotiulozisti.cz/cs/clenove-platformy/>

²⁹⁸ SÚRAO webová stránka, „Probíhající výzkum“, <https://www.surao.cz/pro-verejnost/pripravovane-uloziste/probihajici-vyzkum/>

²⁹⁹ SÚRAO 2018, Zpráva o činnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů v roce 2017, <https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/03/zprava-o-cinnosti-2017.pdf>

³⁰⁰ Vláda České republiky 2017, Nařízení vlády č. 35/2017 Sb., <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-35>

³⁰¹ Knápek, J., a kol. 2017, „Updated Economic Model and Fee Calculation for the Nuclear Account for LLW/ILW and HLW/SNF“, Technical University study.

³⁰² SÚJB 2018, Národní zpráva ČR pro účely článku č. 14.1 Směrnice Rady 2011/70/Euratom - 2018.

SHRNUTÍ

V oblasti nakládání s jaderným odpadem je v České republice stále nutno vyřešit několik problémů. Zodpovědnost za konečnou likvidaci odpadu převzala vláda, přičemž původci tohoto odpadu odpovídají za náklady na likvidaci, a tudíž platí poplatky na státní jaderný účet, jehož smyslem je v budoucnu zajistit v plné výši financování. Poplatky hrazené původci odpadů jsou však nedostatečné k pokrytí všech předpokládaných nákladů po vyřazení z provozu.

Podle plánů vlády by mělo být hlubinné úložiště vysokoaktivního odpadu v provozu do roku 2065. Proces výběru lokality je však zpožděný a odpor potenciálně dotčených obcí roste. Dlouho slibovaný zákon o úložišti, který by proces výběru lokality lépe definoval, zatím není k dispozici. Kritéria výběru lokality jsou neurčitá, takže reálně hrozí, že lokalita nakonec bude vybrána nikoli na základě dlouhodobé bezpečnosti, ale podle ochoty některé obce tolerovat úložiště ve svém katastru. Dlouhodobé skladování vyhořelého paliva je možnost, o které se dosud nediskutuje.

Nakládání s nízko a středněaktivním odpadem je naproti tomu poměrně kvalitní. Brzy dojde k uzavření úložiště v Jáchymově, které je prakticky naplněno. SÚRAO bude provozovat dvě úložiště, tedy úložiště Richard pro institucionální radioaktivní odpad a především úložiště Dukovany pro nízko a středněaktivní odpad z jaderných elektráren.

7.2 FRANCIE

PŘEHLED

Francouzská jaderná historie začala vývojem jaderných zbraní v období po druhé světové válce. Po několika malých reaktorech vyhrazených pro výboru vojenského jaderného materiálu Francie v 60. a začátkem 70. let vystavěla šest plynem chlazených reaktorů (GCR), zaměřených na výrobu jak plutonia, tak i elektrické energie. Francie poté stavěla ještě tři další typy reaktorů. Všechny tyto prvotní reaktory jsou již uzavřeny a nacházejí se v různých fázích vyřazování z provozu.

Následně Francie vyvinula flotilu 58 tlakovodních reaktorů (PWR) v 19 lokalitách o výkonu od 900 do 1 450 MW, z nichž všechny provozuje firma Électricité de France (EDF). Do provozu byly uváděny v letech 1977-1999, jsou dosud v provozu a zajišťují 72 % elektřiny pro Francii.³⁰³

IEDF v roce 2007 zahájila výstavbu tzv. evropského tlakovodního reaktoru (EPR) ve Flamanville. Původně měl stát 3,3 miliardy eur (3,7 mld. USD) a zahájit provoz v roce 2012, ale současný předpoklad je minimálně 10,9 miliardy eur (12,2 mld. USD) a zahájení nejdříve na konci roku 2022.³⁰⁴

Uran se ve Francii těžil až do roku 2001, i když Francie i předtím dovážela více uranu, než kolik sama produkovala. Země má rozvinuté velké provozní kapacity ve všech fázích jaderného palivového cyklu. Provozuje i jaderná zařízení pro vojenské účely.

Hlavními původci radioaktivního odpadu jsou EDF, provozovatel zařízení jaderného palivového cyklu Orano a Komise pro alternativní energetiku a jadernou energii (CEA). Každý z nich za odpad zodpovídá až do jeho převodu k dalšímu nakládání a/nebo likvidaci státní agenturou pro nakládání s radioaktivním odpadem ANDRA. ANDRA je veřejná agentura založená v roce 1979 jako oddělení CEA a v roce 1991 přetvořená do nezávislé instituce.

Přepřerování vyhořelého paliva je národní strategií Francie. Většina uranového oxidického paliva (UOX) se přepřerává v závodě La Hague. Přestože v současnosti prakticky všechno toto palivo pochází z Francie, dříve se v La Hague přepřerávalo značné množství zahraničního paliva. Většina separovaného plutonia se znovu využívá spolu s ochuzeným uranem jako směsné oxidické palivo (MOX) ve 22 reaktorech, jež patří k nejstarším ve flotile (vláda zahájila plány na používání MOX i v novějších reaktorech o výkonu 1 300 MW). Určité množství přepřerovaného obohaceného uranu (palivo typu REU) se ve francouzských reaktorech používalo do roku 2016 a EDF připravuje další používání od roku 2023.

Časem se ve Francii nahromadila velká a rozmanitá zásoba radioaktivního odpadu. Zatímco jsou v provozu zařízení k likvidaci většiny odpadů s krátkou dobou rozpadu, plány na výstavbu hlubinného úložiště (DGD) vysoko a středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu se zpožďují kvůli technickým problémům a odporu veřejnosti.

³⁰³ Réseau de Transport d'Électricité (RTE), 2018, *Bilan électrique* 2018, únor.

³⁰⁴ World Nuclear News 2019, „Weld repairs to delay Flamanville EPR start-up,” 20. července, cit. 22. srpna 2019, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Weld-repairs-to-delay-Flamanville-EPR-start-up>

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Francouzská klasifikace jaderného odpadu je v souladu s doporučeními MAAE, i když obsahuje specifické prvky. Zakládá se na dvou charakteristikách: aktivitě a době rozpadu. Orientační mezní hodnoty jsou stanoveny na základě hmotnostní aktivity a doby radioaktivity nejdůležitějších radionuklidů s dlouhou dobou rozpadu v daném odpadu. Existují tři kategorie podle doby rozpadu a čtyři podle aktivity, jak uvádí *tabulka 10*. Oproti doporučením MAAE se v kategorii středněaktivního odpadu (SAO) rozlišuje mezi odpadem s dlouhou a krátkou dobou rozpadu. Zatímco většina ostatních zemí umožňuje likvidaci části velmi nízkooaktivního odpadu (VNAO) na konvenčních skládkách odpadu, ve Francii žádný práh pro udělení výjimky pro VNAO neexistuje. Jednotlivé kategorie se mají vázat k jasně rozlišeným a specializovaným řešením nakládání s odpady, z nichž některé jsou již v provozu, zatímco jiné jsou dosud předmětem výzkumu.

TABULKA 10: Kategorie jaderného odpadu ve Francii a stav nakládání s ním v roce 2018

		S dlouhou dobou rozpadu	S krátkou dobou rozpadu	S velmi krátkou dobou rozpadu
	POLOČAS ROZPADU	> 30 let	≤ 30 let > 100 dní	≤ 100 dní
VYSOKOAKTIVNÍ ODPAD (VAO)	> 10 ⁹ Bq/g	Studuje se (čl. 3 zákona z r. 2006) <i>1 laboratoř pro geologickou likvidaci (Bure)</i>		Nakládání podle radioaktivního rozpadu
STŘEDNĚAKTIVNÍ ODPAD (SAO)	≤ 10 ⁹ Bq/g > 10 ⁶ Bq/g	Studuje se (čl. 3 zákona z r. 2006)	Povrchová likvidace 1 uzavřené zařízení (CSM) 1 zařízení v provozu (CSA)	
NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD (NAO)	≤ 10 ⁶ Bq/g > 10 ² Bq/g	Studuje se speciální povrchová likvidace (čl. 4 zákona z r. 2006)		
VELMI NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD (VNAO)	≤ 10 ² Bq/g	Speciální povrchová likvidace <i>1 zařízení v provozu (Morvilliers)</i>		

Zdroj: ANDRA, Národní inventura radioaktivního materiálu a odpadu 2019

Poznámky: Povrchová likvidace SAO/NAO nezahrnuje speciální odpad, např. kontaminovaný tritiem, u něhož se speciální metoda nakládání dosud studuje; CSA = Centre de stockage de l'Aube, CSM = Centre de stockage de la Manche

DALŠÍ RADIOAKTIVNÍ MATERIÁL NEKLASIFIKOVANÝ JAKO ODPAD

Podle zákona o nakládání s radioaktivním odpadem z roku 2006 se jaderné látky, „u nichž se plánuje či předpokládá další využití“, považují za tzv. jaderný materiál, a nikoli za odpad.³⁰⁵ Ke klasifikování takového materiálu stačí prohlášení provozovatele o záměru, i když nemá žádný přesný ani realistický plán na jeho využití. Veškeré druhy vyhořelého paliva, separovaného plutonia, přepracovaného uranu a ochuzeného uranu se nepovažují za odpad a nejsou zahrnuty ve shora naznačených kategoriích. Možnost opětovného využití některých z těchto materiálů v budoucnosti vedla k schválení zákona v roce 2016.³⁰⁶ Ten francouzské vládě umožňuje měnit na základě pokynů bezpečnostního úřadu ASN označení „jaderný materiál“ na jaderný odpad. Této možnosti však dosud nebylo využito.

Ani radioaktivní plyný a kapalný odpad není zahrnut v systému klasifikace odpadu. Ten vzniká v různých fázích jaderných zařízení (z větší části v přepracovacím závodě La Hague) a nakládá se s ním formou nařazení do životního prostředí (u některých druhů po určité době skladování kvůli rozpadu).

³⁰⁵ Vláda Francie 2006, Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

³⁰⁶ Vláda Francie 2016, Article 14 of Ordonnance n° 2016-128 du 10 février 2016 portant diverses dispositions en matière nucléaire.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Agentura ANDRA každé tři roky zveřejňuje inventuru jaderného materiálu a odpadu. Poslední komplexní inventura byla zveřejněna v roce 2018 s údaji ke konci roku 2016. Aktualizace shrnutí vydaná v roce 2019 u některých kategorií obsahuje údaje ke konci roku 2017.

K prosinci 2017 ANDRA odhaduje 3 740 m³ vysokoaktivního odpadu (VAO), 42 800 m³ středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu (SAO-DD), 93 600 m³ nízkoaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu (NAO-DD), 938 000 m³ nízko a středněaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu (NSAO-KD) a 537 000 m³ velmi nízkoaktivního odpadu (VNAO). Dalších 1 770 m³ odpadu není zahrnuto v žádné kategorii. Podrobné údaje přináší tabulka 11.

Údaje agentury ANDRA zahrnují zahraniční odpad, pokud se skladuje na území Francie. To se většinou týká kontraktů na přepracování vyhořelého paliva se zahraničními zákazníky. Tuhé odpady vznikající z tohoto zpracování se musí vracet do zemí původu, neboť francouzské zákony zakazují likvidaci jaderného odpadu zahraničního původu na státním území. Dochází však k výměně mezi jednotlivými typy odpadů za účelem minimalizace přepracovaných objemů. Touto výměnou lze zároveň obcházet problematické formy odpadu (např. bitumenizovaný středněaktivní odpad), jež zahraniční zákazníci přepracování nepřijímají. Dřívější i stávající činnosti spojenou s jaderným materiálem zahraničního původu navíc vznikají odpady (například neozářené množivé palivo) a „znovu využitelné materiály“ (například přepracovaný uran) bez skutečného využití, které se v současnosti vykazují jako francouzské.

VAO pochází téměř výhradně z přepracování vyhořelého paliva. Ke konci roku 2018 bylo v závodě La Hague přepracováno více než 34 000 tHM francouzského a zahraničního vyhořelého paliva. Většina výsledného VAO, minimálně 95 %, se upravuje do podoby vitrifikovaného baleného odpadu. Nepatrná část se ukládá v chladicích nádržích, kde čeká na vitrifikaci.

Situace u SAO-DD je poměrně různorodá: část odpadu se upravuje ke konečné likvidaci, zatímco část je předupravená či dokonce neupravená. Tento odpad lze cementovat do kovových sudů jako kal nebo v jiné nezpracované podobě, bitumenizovat, vitrifikovat nebo betonovat. Některé staré obalové soubory či kaly však před opětovnou úpravou vyžadují charakterizaci. Zvláště problematická je opětovná úprava velkého množství bitumenizovaných, hořlavých balených odpadů.

TABULKA 11: Jaderný odpad ve Francii k prosinci 2017

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (mokrý)	Lokality jaderných elektráren (jeden bazén na reaktor)	4 040 tHM
	Mezisklad (mokrý)	La Hague	9 788 tHM*
	Mezisklad (mokrý)	Creys-Malville**	106 tHM
	Mezisklad (část mokrá, část suchá)	Lokality CEA	55 tHM
VAO	Mezisklad	La Hague, Marcoule, lokality CEA	3 740 m ³
SAO-DD (Z ÚPRAVY VJP)	Mezisklad	Lokality JE, La Hague, Marcoule, lokality CEA, výzkumná centra, Bouches-du-Rhône	42 800 m ³
NAO-DD	Mezisklad	Lokality JE, La Hague, Marcoule, lokality CEA, výzkumná centra, Le Bouchet	93 600 m ³
ODPAD S OBSAHEM TRITIA	Mezisklad	Côte D'Or	5 640 m ³
NSAO-KD	Mezisklad	Lokality JE, úpravny, Marcoule, výzkumná centra, uranové závody	85 400 m ³
	Likvidovaný odpad	Uzavřené nadzemní úložiště (CSM)	527 000 m ³
	Likvidovaný odpad	Nadzemní úložiště v provozu (CSA)	326 000 m ³
ODPAD BEZ KLASIFIKACE		Lokalita neuvedena	1 770 m ³
VNAO	Mezisklad	Úpravny	185 000 m ³
	Likvidovaný odpad	Nadzemní úložiště v provozu (CIRES)	352 000 m ³
ODPAD S OBSAHEM U	Skládky a odkaliště		50 milionů tun
RADIOAKTIVNÍ ZDROJE MIMO PROVOZ***			1 700 000 m ³
ODHADOVANÝ BUDOUCÍ ODPAD	VAO: 12 000 m³; SAO-DD: 72 000 m³; NAO-DD: 190 000 m³; NSAO-KD: 2 000 000 m³; VNAO: 2 300 000 m³		

Zdroj: Vlastní sestavení na základě ANDRA 2018 a Francouzská republika 2017

Poznámky: *Zahrnuje 30 tHM zahraničního VJP

**v Creys-Malville se zároveň skladuje 70 tHM neozářeného paliva původně pro Superphénix

*** ke konci roku 2015; CEA = Komise pro atomovou energii a alternativní energie

Odhadovaný budoucí odpad v tabulce 11 je množství, které podle ANDRA vznikne v 58 reaktorech v provozu a v souvisejících závodech za následujících předpokladů:

- Stávající reaktory budou v provozu 50–60 let.
- Přepracuje se veškeré vyhořelé palivo (včetně MOX).
- Veškerý „znovu využitelný“ jaderný materiál se využije ve stávajících nebo budoucích reaktorech, takže nebude probíhat reklasifikace (ale odpad vznikající při tomto hypotetickém využití není zahrnut).
- Množství odpadu do budoucna je oproti dosavadnímu množství mnohem větší. U VAO se předpokládá trojnásobné množství, u SAO-DD 1,7 násobek, u SAO-DD a NSAO-KD dvojnásobek a u VNAO více než čtyřnásobek.

DALŠÍ RADIOAKTIVNÍ MATERIÁL NEKLASIFIKOVANÝ JAKO ODPAD

Při provozu zařízení palivového cyklu a strategie přepracování mezitím vznikají zásoby materiálu, který se vykazuje jako znovu využitelný. Podle inventury ANDRA³⁰⁷ Francie ke konci roku 2017 skladovala:

- 14 189 tHM vyhořelého paliva většinou z reaktorů PWR i z dalších typů reaktorů dnes již zavřených (nezahrnuje vyhořelé palivo z činností národní obrany, kterého je 194 tHM). Tato zásoba se každý rok zvětšuje, protože množství vypouštěné z reaktorů převyšuje množství přepracovávané v La Hague zhruba o 20 % (podle průměrů z nedávné doby jde zpravidla o 1 200 tHM, resp. 1 000 tHM)
- 315 000 tHM ochuzeného uranu skladovaného většinou v lokalitách Tricastin a Bessines
- 30 500 tHM přepracovaného uranu skladovaného v lokalitách Tricastin a La Hague, z nichž 2 700 tHM patřilo ke konci roku 2016 cizím zemím. Francie v minulosti převzala zodpovědnost za velkou část zahraničního přepracovaného uranu, z něhož část posílala do Ruska k uskladnění nebo opětovnému obohacování
- 54 tHM separovaného plutonia

Přestože množství vyhořelého paliva UOX v posledních letech stoupá, nárůst celkového objemu vyhořelého paliva byl většinou dílem MOX a přepracovaného obohaceného uranu (REU), z nichž ani jedno se nepřepřacovává. Zásoby vyhořelého MOX ke konci roku 2017 činily 1 910 tHM a zásoby REU 578 tHM. Celkové zásoby neozářeného plutonia, sestávající ze separovaného plutonia a neozářeného plutonia ve formě paliva i odpadu, podle francouzské vlády ke konci roku 2016 činily 65,4 tuny.³⁰⁸ Tyto zásoby plutonia se zvětšují v průměru o více než tunu ročně, a to navzdory závazku vlády dodržovat zásadu „vyrovnanosti toků“, podle níž by se neozářené plutonium nemělo hromadit. Hlavním důvodem nárůstu v posledních letech je skladování odpadu z výroby paliva MOX s vysokým obsahem plutonia. Francie zároveň ke konci roku 2016 držela 16,3 tun plutonia patřícího zahraničním institucím.

A konečně provoz uranových dolů ve Francii do roku 2001 vedl k nashromáždění zhruba 50 milionů tun jaloviny z mletí uranové rudy. Ta byla likvidována na 16 lokalitách a navíc se v řadě těžebních lokalit nachází okolo 200 milionů tun hlusiny z těžby.

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Státní politiku nakládání s jaderným odpadem a materiálem po desetiletí formovalo přepracování vyhořelého paliva, což vedlo ke vzniku velmi složitého systému zařízení a regulace.

Francouzský právní a regulační rámec nakládání s jaderným odpadem vznikl po desítky let od doby, kdy začal vznikat první odpad. První zákon o výzkumu nakládání s radioaktivním odpadem nabyl platnosti v roce 1991.³⁰⁹ První komplexní přístup vznikl v roce 2006 zákonem o udržitelném nakládání s radioaktivním materiálem a odpadem.³¹⁰ Tím byl ustanoven Národní plán nakládání s jaderným materiálem a radioaktivním odpadem (PNGMDR), jehož součástí je pravidelné projednávání této strategie v mnohostranné pracovní skupině, pravidelné zveřejňování společné zprávy ASN a vlády (jednou za tři roky) a pravidelná aktualizace nařízení vlády, které převádí doporučení zprávy na zákonné požadavky na provozovatele.³¹¹

³⁰⁷ ANDRA 2019, *Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2019 – Les essentiels*, leden.

³⁰⁸ MAAE 2017, *Communication Received from France Concerning Its Policies Regarding the Management of Plutonium*, INFCIRC/549/Add.5/21, 29. září.

³⁰⁹ Vláda Francie 1991, *Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs*.

³¹⁰ Vláda Francie 2006, *Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs*.

³¹¹ Nejnovější francouzský Národní plán nakládání s jaderným materiálem a radioaktivním odpadem z let 2016–2018: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR%202016-2018.pdf>

Strategie přepracování vedla k hromadění vyhořelého jaderného paliva a řady různých jaderných materiálů (například separovaného plutonia a přepracovaného uranu). Tyto zásoby sice díky svému statusu „opětovně použitelnosti“ ulevují tlaku na programy likvidace odpadů, ale zároveň zvyšují tlak na specializované skladové kapacity. Zhruba třetina vyhořelého paliva z reaktorů PWR se skladuje v bazénech u reaktorů, zatímco dvě třetiny se skladují v bazénech v La Hague. U těch se předpokládá naplnění nejpozději do roku 2030, což by mohlo způsobit problémy s provozem reaktorů. EDF proto plánuje výstavbu nového centralizovaného bazénu na vyhořelé palivo o kapacitě 10 000 tHM v jednom ze svých jaderných závodů. Bazén by byl navržen tak, aby mohl být v provozu déle než sto let. Možnost skladování vyhořelého paliva v suchých kontejnerech není využívána.

Odpad s dlouhou dobou rozpadu se též hromadí ve skladovacích zařízeních, převážně v La Hague, kde vzniká nejvíce VAO a SAO-DD, a v Marcoule, kde se nachází druhá největší zásoba. Odpad s krátkou dobou rozpadu je jediným typem jaderného odpadu, pro který již existuje technologie konečné likvidace. NSAO-KD se do roku 1994 posílal do povrchového zařízení k likvidaci zvaného Centre de stockage de la Manche (CSM). To je dnes uzavřeno a obsahuje přes 527 000 m³ odpadu, z čehož téměř dvě třetiny pocházejí z jaderné energetiky. NSAO-KD se nyní odesílá do povrchového zařízení k likvidaci zvaného Centre de stockage de l'Aube (CSA). Ke konci roku 2017 byla jeho kapacita 1 milionu m³ zaplněna z 33 %. VNAO-KD se od roku 2003 posílá do průmyslového závodu na sdružování, třídění a likvidaci odpadu zvaného Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) v Morvilliers, kde ke konci roku 2017 bylo zaplněno 54 % celkové kapacity 650 000 m³.

U NAO-DD zákon o nakládání s radioaktivním odpadem z roku 2006 zavedl zásadu specializované mělké likvidace, jež měla být v provozu od roku 2013. Projekt je však kvůli technickým problémům a potížím s přijetím místní veřejností odložen na neurčito. Mělká likvidace je ve fázi studií, ale strategie nakládání dosud není rozhodnuta (počet lokalit, jejich umístění, technologická koncepce). Dokud není úložiště k dispozici, skladuje se NAO-DD převážně v místech vzniku.

Pro NAO a SAO-DD se plánuje hlubinné úložiště zvané CIGEO, jež představuje řešení v souladu se zákonem o likvidaci z roku 2006. Většina VAO se skladuje v La Hague (85 %), zbytek v Marcoule. SAO-DD se skladuje převážně v La Hague (44 %), v Marcoule (34 %) a v Cadarache (16 %). Výstavba úložiště CIGEO má začít v roce 2022.

Lokalita byla určena v 90. letech, kdy byla vybrána vesnička Bure v severovýchodní Francii k umístění laboratoře pro výzkum struktury místního jílu, a licenci obdržela v roce 1999.³¹² Zákon o výzkumu nakládání s radioaktivním odpadem z roku 1991 navrhl licencování další laboratoře k průzkumu geologie žulových masivů, tato možnost však byla zavržena vzhledem k odporu místních obyvatel v potenciálních lokalitách. ANDRA v roce 2010 stanovila „zájmovou zónu“ k dalšímu hlubinnému průzkumu (ZIRA) okolo Bure a o přesném umístění úložiště CIGEO bylo rozhodnuto několik let nato.³¹³ Plnohodnotnému provozu měla předcházet první pilotní průmyslová fáze, čímž by se měla zaručit stanovená míra vyzdvihnutelnosti a vratnosti odpadu po dobu minimálně sta let.³¹⁴ Likvidace by probíhala zhruba do roku 2150, kdy by bylo úložiště uzavřeno a po další stovky let monitorováno.³¹⁵

³¹² Vláda Francie 1999, *Décret du 3 août 1999 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs à installer et exploiter sur le territoire de la commune de Bure (Meuse) un laboratoire souterrain destiné à étudier les formations géologiques profondes où pourraient être stockés des déchets radioactifs.*

³¹³ ANDRA 2009, *Projet de stockage géologique profond réversible – Proposition d'une Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface*, zpráva Strategického výboru, <https://www.andra.fr/stockage-profond-hama-vl-le-projet-se-precise>

³¹⁴ Vláda Francie 2016, *Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue.*

³¹⁵ ANDRA website, „Les différentes phases du projet“ (Project Phases), viewed 22 February 2019, <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/les-differentes-phases-du-projet>

Odpad vydávající největší teplo se musí desítky let chladit, než jej bude možno likvidovat v CIGEO. Další technické zpoždění by mohlo nastat při řešení otázek, jako je například nebezpečí požáru spojené s desítkami tisíc tun bitumenizovaného odpadu z první fáze přepracování. Toto zpoždění by mohlo přesáhnout plánovanou provozní životnost stávajících zařízení ke skladování VAO a SAO-DD. Zatím neexistují žádné plány na jejich případné zesílení nebo nahrazení.

Některé ze „znovuvyužitelných materiálů“ by mohlo být nutno překlasifikovat na odpad vzhledem k jejich reálné nevyužitelnosti, nakládání s nimi však není zohledněno při stávající konstrukci CIGEO ani se neřeší výzkumem jiných možností. Zahrnutí části těchto materiálů do inventáře k likvidaci by znamenalo úpravy konstrukce CIGEO a zvětšení jeho plochy, možná až na hranice geologické zóny, s níž se v současnosti počítá.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Jediné existující komplexní odhady podrobných nákladů na nakládání s odpady ve Francii jsou ty, které v roce 2012³¹⁶ vydal a v roce 2014³¹⁷ aktualizoval francouzský Účetní soud (Cour des Comptes) a shrnuje je tabulka 12. Podle soudu celkové hrubé náklady na nakládání s radioaktivním odpadem ke konci roku 2013 činily 32 miliard eur (44 miliard USD₂₀₁₃), z čehož 80 % by nesla EDF, 11 % Areva (nyní Orano) a 9 % CEA.

TABULKA 12: Hrubé náklady na nakládání s jaderným odpadem ve Francii k roku 2013

HRUBÉ NÁKLADY, MILIONY EUR ₂₀₁₃	EDF	CEA	AREVA	ANDRA	CELKEM
DLOUHODOBÉ NAKLÁDÁNÍ S ODPADY	24 370	1 995	1 885	42	28 292
z čehož VAO a SAO-DD	21 981	1 626	1 154	1	24 762
NAO-DD	832	74	27	17	950
VNAO, NAO-KD	1 557	295	704	24	2 580
NÁKLADY PO UZAVŘENÍ	1 208	411	42	42	1 703
OPĚTOVNÉ VYZDVIŽENÍ A ÚPRAVY (STARÝ ODPAD)	0	512	1,541	—	2 053
CELKEM	25 578	2 918	3 468	84	32 048

Zdroj: Cour des Comptes 2014

Přestože stávající úložiště pro likvidaci VNAO a NSAO-KD počítají s likvidací zhruba 90 % objemu odpadu, spojené náklady na úložiště CIREs, CSM a CSA tvoří pouze 2,6 miliardy eur (3,6 mld. USD), tedy méně než 10 % celkových nákladů. Lví podíl předpokládaných nákladů se přitom pojí s likvidací odpadu s dlouhou dobou rozpadu (více než 25 miliard eur, tedy 34,5 mld. USD) a vyzdvižení a úpravy starého odpadu (cca 2 miliardy eur, tedy 2,8 mld. USD). Oba odhady jsou vysoce nejisté. Přestože vláda předpovídá náklady na likvidaci VAO a SAO-DD v úložišti CIGEO na zajištění prostředků ve výši 25 miliard eur (32 mld. USD), tímto namátkou zvoleným údajem vyřešila spor o široce rozkolísaných odhadech provozovatelů a agentury ANDRA.³¹⁸

Tento odhad nákladů navíc vychází z budoucího inventáře za předpokladu, že všechno vyhořelé palivo se bude přepracovávat. Z dřívějších odhadů nákladů prováděných agenturou ANDRA vyplynulo, že zahrnutím nepřepřacovaného vyhořelého uranového a MOX paliva do zohledňovaného inventáře by se předpovídané náklady na výstavbu a provoz CIGEO mohly více než zdvojnásobit. Aktuální odhad hrubých nákladů na nakládání s vyhořelým palivem vychází z předpokladu, že se všechno bude přepracovávat.

³¹⁶ Vláda Francie, Účetní soudní dvůr (Cour des Comptes) 2012, *Les coûts de la filière électronucléaire*.

³¹⁷ Vláda Francie, Účetní soudní dvůr (Cour des Comptes) 2012, *Le coût de production de l'électricité nucléaire – Actualisation 2014*.

³¹⁸ Vláda Francie 2016, *Arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue*.

Zákon o nakládání s radioaktivním odpadem z roku 2006 stanoví, že provozovatelé musí vládě předkládat nezbytné informace formou zprávy, kterou je nutno každé tři roky aktualizovat. Předpisy stanoví, že vyhrazené prostředky musí pokrýt zajištění, a to na dostatečné úrovni bezpečnosti, rozmanitosti, likvidity a výnosnosti.

V aktualizaci zprávy Účetního soudu se upozorňuje, že zajištění k pokrytí těchto budoucích výdajů týkajících se vyřazování z provozu a zároveň nakládání s radioaktivním odpadem v budoucnosti bylo na konci roku 2013 vypočteno na výši 43,7 mld. eur (60,3 mld. USD), z čehož 11 mld. eur (15,2 mld. USD) bylo na nakládání s jaderným odpadem a 10,1 mld. eur (13,9 mld. USD) na nakládání s vyhořelým palivem. Ohledně nakládání s vyhořelým palivem MOX a REU původce EDF vychází z „opatrného“ předpokladu, že se nebude přepracovávat, ale likvidovat v hlubinném úložišti – tento předpoklad je v rozporu s předpoklady odhadu nákladů na CIGEO.

Díky použitým diskontním sazbám tato zajištění – z nichž 75 % nese EDF, 14 % Areva (nyní Orano) a 11 % CEA – činí zhruba polovinu odhadované hodnoty budoucích nákladů.

TABULKA 13: Zajištění pro vyřazování z provozu a nakládání s jaderným odpadem ve Francii k roku 2013

ZAJIŠTĚNÍ, MILIONY EUR ₂₀₁₃	EDF	CEA	AREVA	ANDRA	CELKEM
Vyřazování z provozu	13 024	2 931	3 661		19 616
Nakládání s vyhořelým palivem	9 779	342			10 121
Nakládání s odpady, z čehož	7 542	1 311	2 113	47	11 103
vyzdvihnutí a přebalení		432	1 240		1 672
dlouhodobé nakládání s odpady	7 397	830	831	36	9 094
náklady po uzavření zařízení k likvidaci odpadů	145	49	42	10	246
Poslední aktivní zóny	2 313				2 313
Ostatní		152	483		635
CELKEM	32 658	4 736	6 258	47	43 699
Podíl	75 %	11 %	14 %		100 %
Poměr zajištění/hrubé náklady	48 %	66 %	52 %	56 %	50 %

Zdroj: Cour des Comptes 2014

Kritici tvrdí, že zajištění k pokrytí budoucích nákladů jsou nedostatečná a vedou k vysoké nejistotě. V roce 2011 vznikla nezávislá Národní komise pro posouzení financování poplatků na vyřazování z provozu jaderných zařízení a nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem (CNEF) k posouzení kontroly provozovatelů ze strany vlády. Je složená z poslanců a expertů a měla by každé tři roky zveřejnit zprávu. Dosud však vydala zprávu pouze jednou, a to v roce 2012.³¹⁹ V této zprávě uvedla, že vládě chybí prostředky k uplatnění své kontroly, posouzení vypracovaná provozovateli nezohledňují žádné nejistoty, informace poskytované správním orgánem jsou nedostatečné ke kontrole regulace vyhrazených prostředků a CNEF shledávala obtížným udržet si své dovednosti kvůli nízké četnosti své práce.

³¹⁹ Vláda Francie 2012, *Commission nationale d'évaluation du financement des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs.*

SHRNUTÍ

Francouzský jaderný program vznikl nejprve k vojenským účelům, ale rychle se proměnil na základní pilíř francouzské energetické politiky. Vedl k výstavbě mnoha reaktorů a jaderných zařízení, jež jsou původci největšího množství jaderného odpadu a materiálu v Evropě. Strategická volba programu nakládání s odpadem založeného na přepracování vyhořelého paliva vedla k vytvoření různých kategorií odpadu a jaderných materiálů, což zase vedlo k neustále rostoucímu množství středně a vysokoaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu ve skladovacích zařízeních.

Většina historických rozhodnutí ve Francii vznikla před zavedením speciálního právního a regulačního rámce. Tento proces v roce 1991 začal zákonem o výzkumu nakládání s radioaktivním odpadem, po němž v roce 2006 přišel zákon o nakládání s jaderným materiálem a radioaktivním odpadem. Od té doby se pravidelnými aktualizacemi tříletého plánu sleduje vypracování a realizace strategie odpovídající této složitě rozdané situaci.

Řešení pro likvidaci jsou v provozu pouze pro některé kategorie odpadu (například velmi nízkoaktivní, nízkoaktivní s krátkou dobou rozpadu a středněaktivní s krátkou dobou rozpadu). Pro všechny ostatní kategorie řešení chybí. Plány na mělkou likvidaci nízkoaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu jsou odloženy na neurčito. Projekt hlubinné likvidace středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu a vysokoaktivního odpadu se stále potýká s významnými technickými a politickými překážkami. Francie navíc nemá vypracované plány na likvidaci rostoucího objemu jaderných materiálů (mimo jiné plutonia, přepracovaného a ochuzeného uranu), u nichž hrozí, že nebudou nebo budou jen částečně znovu využity.

V důsledku této situace se stupňuje tlak na kapacitu a provozní životnost stávajících skladovacích zařízení, což vede k prodlužování jejich provozu, jako v případě nového projektu centralizovaného bazénu ke skladování vyhořelého paliva. Aktuálně předpokládané náklady a vyhrazené prostředky tyto položky nezohledňují, a tudíž se pravděpodobně ukáží být nedostatečnými. Firma EDF, která má pokrýt největší část dodatečných nákladů, zároveň nese břemeno rostoucích provozních nákladů svých stárnoucích reaktorů a investiční „stopky“ v důsledku debaklu při stavbě EPR ve Flamanville-3 a zákonné povinnosti zvýšit svůj podíl obnovitelných zdrojů.

7.3. NĚMECKO

PŘEHLED

Spolková republika Německo (SRN) i Německá demokratická republika (NDR) zahájily program jaderného výzkumu v roce 1955. Západní Německo rozvíjelo svůj jaderný program ve dvou paralelních proudech: jeden na reaktorech německé konstrukce a jeden na základě převzetí technologie z USA. První lehkovodní reaktor byl objednaný pro první jadernou elektrárnu VAK Kahl v roce 1956. Koncem 80. let již mělo Západní Německo v provozu 19 jaderných elektráren, jež každoročně dodávaly zhruba 30 % čisté elektrické energie ve státě.

Východní Německo mezitím zásoboval Sovětský svaz. V roce 1966 připojila země do sítě svůj první pilotní reaktor v Rheinsbergu. Počáteční plány NDR počítaly s výstavbou 20 jaderných elektráren do roku 1970, postaveno však bylo jen pět bloků elektrárny Greifswald.³²⁰ Při sjednocení v roce 1990 vláda rozhodla o uzavření všech sovětských reaktorů. Toto rozhodnutí bylo především ekonomické: k dalšímu provozu pod nově platným západoněmeckým zákonem o jaderné energii by musely splnit velké množství bezpečnostních podmínek.³²¹

Koalice SPD a Strany zelených dosáhla začátkem nového tisíciletí s energetickými společnostmi konsensu o ukončení jaderné energetiky. Z dohody se v roce 2002 stal zákon (zákon o útlumu jaderné energetiky), který omezil životnost reaktorů na cca 32 let výroby elektřiny (alokací počtu kilowatthodin). Zákon zcela zakázal výstavbu nových jaderných elektráren.³²² Na podzim roku 2010 koalice konzervativců a liberálních demokratů útlum zvrátila a provozní dobu reaktorů prodloužila podle jejich typu o 8-14 let. Toto prodloužení však netrvalo ani rok. V roce 2011, tři měsíce po havárii ve Fukušimě, parlament se širokou podporou celého politického spektra přijal zákon o atomové energii (AtG), jímž okamžitě odebral provozní licence osmi reaktorům. Zbývajících devět elektráren má být uzavřeno do roku 2022.

Do roku 2019 byly z provozu vyřazeny do stavu „zelené louky“ pouze tři poměrně malé prototypy reaktorů. Dvě větší elektrárny jsou již zcela demontovány, ale ani jednu z lokalit dosud nelze zbavit regulace a kontroly, protože v částech budovy je stále uložen jaderný odpad.³²³

Oproti Východnímu Německu se v Západním nikdy uran netěžil. V Gronau však existuje závod na obohacování uranu a v Lingenu jeden závod na výrobu paliva. Závod Gronau provozuje dceřiná společnost firmy URENCO Ltd. Třetinu akcií drží německé energetické firmy Preussen Elektra a RWE, třetinu britská vláda a třetinu vláda Nizozemska. V Lingenu vyrábí firma Framatome palivové soubory (prostřednictvím své dceřiné společnosti Advanced Nuclear Fuels GmbH) i prášek a pelety, jimiž zásobuje všechny závody firmy Framatome na výrobu paliva. V 70. letech existovaly plány na komplexní centrum likvidace jaderného odpadu v Gorlebenu včetně závodu na přepracování vyhořelého paliva, výroben paliva a zařízení pro všechny typy odpadu včetně solného dolu upraveného na hlubinné úložiště. Většina z těchto plánů byla odložena na neurčito a později zrušena. Díky dlouhodobému povrchovému i podzemnímu průzkumu (zahájenému v roce 1979, resp. 1986) solného dómu a jeho přeměně na pilotní důl, spolu s hromaděním vysoce radioaktivního inventáře ve zdejší meziskladu, se z Gorlebenu i přesto stala ústřední lokalita nakládání s radioaktivním odpadem.

³²⁰ Jonas, A. 1959, „Atomic Energy in Soviet Bloc Nations“, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 1. listopadu.

³²¹ Thierfeldt, S. and Schartmann, F. 2012, „Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen“, Brenk Systemplanung.

³²² Appunn, K. 2018, „The history behind Germany's nuclear phase-out“, *Clean Energy Wire*, cit. 9. ledna 2019, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>

³²³ Schneider a kol 2018.

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Základní struktura německého systému klasifikace je poměrně prostá. Jaderný odpad se klasifikuje podle uvolňování tepla pouze do dvou kategorií:

- odpad uvolňující teplo
- odpad se zanedbatelným uvolňováním tepla

První kategorie zhruba odpovídá kategorii vysokoaktivního odpadu (VAO) podle MAAE a zahrnuje odpad z přepracování vyhořelého paliva i vyhořelé palivo samotné. Druhá kategorie je v podstatě kombinací kategorií MAAE pro středněaktivní (SAO) a nízkoaktivní odpad (NAO). Část odpadu uvolňujícího teplo se však v rámci kategorií MAAE považuje za SAO. Některé druhy velmi nízkoaktivního odpadu (VNAO) již překračují aktuální německý limit pro uvolnění ke konvenčnímu skládání. Je tedy nutno je likvidovat v zařízení k hlubinné likvidaci (DGD) pro radioaktivní odpad se zanedbatelným uvolňováním tepla.³²⁴

Politika v Německu hlásá likvidaci obou kategorií odpadu v hlubinných úložištích, ale v oddělených lokalitách a s jinými konstrukčními charakteristikami.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Německo má velkou historickou zátěž v podobě velkého množství odpadu momentálně v meziskladech, a to jak v centralizovaných, tak i u reaktorů. Německo má po Francii a Británii třetí největší objem odpadu v západní Evropě. Všechny níže uvedené údaje pocházejí z nejnovější evidence, která zahrnuje objem odpadů a jejich aktivitu ke dni 1. dubna 2016. Tabulka 14 zachycuje celkové objemy a hmotnosti jaderného odpadu.

ODPAD UVOLŇUJÍCÍ TEPLA: Dosud vzniklo 15 155 tHM vyhořelého jaderného paliva (VJP). Polovina z něho byla odeslána k přepracování, 327 tun bylo „vyvezeno bez návratu“ a polovina je v meziskladech (3 609 tun stále v mokrému skladování v bazénech u reaktorů). Dále se většinou u reaktorů aktuálně skladuje 577 m³ odpadu z přepracování. Ve Francii a v Británii je stále uloženo 26 kontejnerů obsahujících německý odpad z přepracování. K převzetí těchto kontejnerů svolily německé spolkové země Šlesvicko-Holštýnsko, Bádensko-Württembersko, Hesensko a Bavorsko. Německo předpokládá, že v jednom zařízení typu DGD bude zlikvidováno cca 27 000 m³ odpadu uvolňujícího teplo.

ODPAD SE ZANEDBATELNÝM UVOLŇOVÁNÍM TEPLA: Po celé zemi se ho v různých formách skladuje cca 120 000 m³ bez zahrnutí cca 21 000 tun neupraveného a předupraveného odpadu, který dosud neprošel některou formou úpravy (tj. odpad v původní podobě) a skladuje se v lokalitě svého původu. Všechny odpad se zanedbatelným uvolňováním tepla se má likvidovat v závodě Konrad, jehož kapacita je 303 000 m³. Skladovaný odpad se dělí podle stavu zpracování. Zhruba 100 000 m³ odpadu je upraveno do kontejnerů typu Konrad, jež jsou schváleny k uložení v zařízení k likvidaci Konrad. Dalších 3 000 m³ prošlo výrobní kontrolou. Okolo 24 000 m³ se skladuje v centralizovaných meziskladech (Gorleben, Mitterteich, Greifswald a Ahaus).

Vedle velkého množství odpadu v meziskladech už Německo také zlikvidovalo NSAO ve dvou zařízeních typu DGD. V zařízení Morsleben (Sasko-Anhaltsko, 1971-1991 a 1994-1998) bylo zlikvidováno 37 131 m³ odpadu. Zhruba 47 000 m³ bylo zlikvidováno v zařízení Asse II (Dolní Sasko, 1967-1978). Sůl však pod tlakem ztrácí stabilitu a přítok podzemní vody znemožňuje další suchý provoz. Lokality hrozí zhroucení, což je nejhorší možný scénář pro hlubinnou likvidaci odpadu. V roce 2010 bylo ohlášeno úplné vyzdvižení odhadovaného

³²⁴ Vláda Německa 2018, *National Report Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*

objemu 220 000 m³ směsi radioaktivního odpadu a soli, přestože v praxi možná nebude vyzdvižení celého objemu technicky proveditelné. Strategie likvidace není dodnes rozhodnutá a vyzvedávání dosud nezačalo. Jednou z možností je zlikvidovat odpad v budoucím zařízení typu DGD pro VAO, pokud to bude technicky možné. Nejnákladnějším scénářem by bylo hledání lokality a výstavba třetího DGD.

TABULKA 14: Jaderný odpad v Německu ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (suchý)	Skladovací zařízení u elektráren	4 201 tun
	Mezisklad (suchý)	ZLN, Ahaus, Gorleben	675 tun
	Mezisklad (mokrý)	Skladovací bazény u reaktorů elektráren	3 609 tun
	VJP poslané k přepracování	851 tun odesláno do Británie, 5 393 tun do Francie, 14 tun do Belgie, 85 tun přepracováno v Karlsruhe v Německu	6 343 tun
	VJP vyvezeno bez návratu	283 tun paliva z VVER odesláno do Ruska, 17 tun do Švédska, 27 tun paliva z VVER k opětovnému využití do Maďarska	327 tun
VAO	Mezisklad	Elektrárny, ZLN, zemská sběrná zařízení, centralizované sklady	577 m ³
NSAO*	Mezisklad	Elektrárny	14 631 m ³
	Mezisklad	Unterweser	1 422 m ³
	Mezisklad	Gorleben	6 979 m ³
	Mezisklad	Mitterteich	8 200 m ³
	Mezisklad	ZLN Greifswald	6 830 m ³
	Mezisklad	Stade	4 403 m ³
	Mezisklad	Výzkumná zařízení	61 965 m ³
	Mezisklad	Zemská sběrná zařízení	1 108 m ³
	Mezisklad	Ahaus	1 633 m ³
	Mezisklad	GNS a další skladovací zařízení, Daher Nuclear Technologies, Nuclear Industry	13 160 m ³
	Uzavřené hlubinné úložiště	Asse II	47 000 m ³
	Uzavřené hlubinné úložiště	Morsleben	37 131 m ³
VNAO	n.a.		
ODPAD S OBSAHEM U	Skládky a odkaliště	Wismut (probíhá rekultivace)	48 výsypek nízkoaktivních hornin o objemu cca 311 milionů m ³ , čtyři odkaliště obsahující cca 160 milionů m ³ radioaktivního kalu

Zdroj: Vlastní sestavení podle Německého spolkového ministerstva životního prostředí, ochrany přírody a jaderné bezpečnosti 2018

Poznámka: *Nezahrnuje cca 21 000 tun neupraveného a předupraveného odpadu

Německo má díky pevně daným termínům odpojení všech svých jaderných elektráren od sítě větší jistotu v předpokládaném množství odpadu uvolňujícího teplo. Celkově je nutno zlikvidovat 27 000 m³ odpadu uvolňujícího teplo.³²⁵ Kromě toho šestá německá národní zpráva ke Společné úmluvě udává hrubý odhad vzniku odpadu z provozu ve výši 45 m³ odpadu se zanedbatelným uvolňováním tepla z jednoho reaktoru ročně a též odhad množství odpadu z vyřazování z provozu: okolo 5 000 m³ odpadu se zanedbatelným uvolňováním tepla z jednoho reaktoru.

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Zákon o útlumu jaderné energetiky z roku 2002 ukončil k červnu 2005 přepracování vyhořelého jaderného paliva v zahraničí. Vláda ustavila vědeckou pracovní skupinu (Arbeitskreis Endlagerung) za účelem podávání doporučení na transparentní postup založený na kritériích pro hledání a výběr lokalit pro úložiště.³²⁶ Od té doby je strategií likvidace vyhořelého jaderného paliva přímé hlubinné ukládání bez přepracování. Vyhořelé palivo a vysokoaktivní odpad z přepracování se v důsledku toho skladují v centralizovaných meziskladech, zejména v Gorlebenu, ale i v Ahausu. Většina jaderných elektráren mezitím provozuje suché mezisklady na své vyhořelé palivo.

Havárie ve Fukušimě v březnu 2011 měla na německou jadernou politiku katalytický účinek. Vláda s podporou stran celého politického spektra rozhodla o uzavření všech jaderných elektráren do roku 2022.³²⁷ Skupina vlád spolkových zemí přiznala dlouhotrvající pochybnosti o výběru lokality a o kvalitě geologických poměrů v Gorlebenu. Zásadním politickým průlomem bylo jejich společné prohlášení o podpoře nového zahájení celostátního procesu vyhledání lokality pro úložiště radioaktivního odpadu uvolňujícího teplo. Ustanovena byla pracovní skupina k nalezení kompromisu mezi politickými stranami a spolkovými a zemskými zájmy ohledně budoucí strategie úložiště typu DGD.³²⁸ Dva roky nato parlament schválil zákon o výběru lokality pro úložiště (StandAG) z roku 2013. Po čtyřiceti letech průzkumů, po výstavbě 800 metrů hlubokého dolu a nadzemní infrastruktury a po ostré politické konfrontaci a debatě byly průzkumné práce v solném ložisku Gorleben odloženy na neurčito. V podzemí neprobíhá žádná činnost. Gorleben je ale součástí nového procesu hledání lokality pro konečnou likvidaci a v tamním meziskladu je uloženo 113 kontejnerů obsahujících VAO (5 jich obsahuje VJP a 108 VAO z přepracování) a zhruba 7 000 tun, neboli cca 6 % německého inventáře NSAO.

V roce 2014 vznikla Komise pro skladování vysokoaktivního jaderného odpadu s cílem provést přezkoumání zákona StandAG a vypracování doporučení k procesu výběru lokality. Komise stanovuje bezpečnostní standardy, kritéria hodnocení a postup, jenž umožní posuzování rozhodnutí a vyzdvihnutečnost zlikvidovaného odpadu. Proces výběru lokality má být navíc otevřený všem potenciálním vhodným horninám v Německu: jílovcům, kamenné soli a krystaliniku. Závěrečná zpráva komise doporučuje třífázový proces doplněný o účast veřejnosti.³²⁹ Vláda tato doporučení realizovala ve svém přezkoumání zákona StandAG z roku 2017 a stanovila ambiciózní termín na vyhledání lokality do roku 2031.

³²⁵ Tato čísla zahrnují 20 400 m³ VJP, 3 400 m³ konstrukčních dílů a pouzder z likvidace VJP, 1 440 m³ vitrifikovaného odpadu z přepracování, 1 340 m³ z reaktoru THTR a 3 400 m³ balení odpadu s konstrukčními díly VJP.

³²⁶ Arens, G. 2002, *Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)*

³²⁷ von Hirschhausen, C. 2018, German Energy and Climate Policies: A Historical Overview. In *Energiewende „Made in Germany“* Springer, Cham. str. 17–44.

³²⁸ Hocke, P. and Kallenbach-Herbert, B. 2015, Always the Same Old Story? in A Brunnengräber a kol. *Challenges of Nuclear Waste Governance*, Springer VS, Wiesbaden, str. 177–201.

³²⁹ German Commission on Storage of Highly Radioactive Materials 2016, *Abschlussbericht der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle K-Drs.* 268

Německá vláda souběžně s tím upravila zodpovědnosti různých svých agentur za účelem zvýšení důvěryhodnosti a umožnění uplatnění pravidla vzdálenosti. V roce 2016 převedl nový zákon úkoly, které dosud prováděl Spolkový úřad radiační ochrany (BfS), na Spolkový úřad bezpečnosti likvidace jaderného odpadu (BfE) a na novou spolkovou firmu zodpovědnou za likvidaci radioaktivního odpadu (BGE).³³⁰ Veškeré spolkové předpisy, povolovací procesy a dozorové úkoly v sobě nyní spojuje BfE; provozní úkoly výběru lokality, výstavby a provozu úložišť byly převedeny na BGE, jež rovněž zodpovídá za výstavbu dolu Konrad (nyní se plánuje otevření v roce 2027, tedy více než půl století od výběru lokality).

Vlastnictví meziskladů VAO bylo převedeno na spolkově vlastněnou firmu pro dočasné skladování (BGZ). Mezisklady NSAO u jednotlivých reaktorů budou v příštích letech také převedeny na tuto státní firmu.

K monitorování postupu výběru lokality a k realizaci účasti veřejnosti byla založena Národní komise pro občanskou společnost (NBG) s mnohostranným složením. Svou činnost zahájila v prosinci 2016.³³¹ Institucionalizovaná účast občanské společnosti je v Německu nový přístup. Pozornost veřejnosti k novému procesu výběru lokality a její účast je zatím slabá.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

V rámci zákona o atomové energii (AtG) jsou provozovatelé jaderných elektráren povinni platit za vyřazování z provozu a za nakládání s jaderným odpadem včetně nákladů na likvidaci. Z historických důvodů existují dva odlišné systémy financování: jeden pro reaktory v bývalé NDR, které dnes vlastní i financuje stát. Například financování vyřazení z provozu elektráren Greifswald a Rheinsberg v bývalé NDR plně zajišťuje Spolkové ministerstvo financí. Nejnovější odhad celkových nákladů (z roku 2016) na obě lokality přitom byl okolo 6,5 miliardy eur (7,3 mld. USD). Druhý systém financování se týká zařízení v soukromém vlastnictví. Existuje i několik prototypů reaktorů ve smíšeném vlastnictví. Tam speciální ujednání upravují poměrné rozdělení nákladů mezi státní a soukromé energetické společnosti.³³²

Jedna auditorská firma odhadla v roce 2015 jménem německé vlády náklady na vyřazení z provozu a nakládání s odpady u 23 komerčních jaderných elektráren bez diskontování na 47,5 miliardy eur (53,4 mld. USD), z čehož:

- 19,7 mld. eur (22,1 mld. USD) na vyřazení z provozu a demontáž
- 9,9 mld. eur (11,2 mld. USD) na kontejnery, přepravu a odpad z provozu
- 5,8 mld. eur (6,5 mld. USD) za dočasné skladování
- 3,7 mld. eur (4,2 mld. USD) za zařízení k likvidaci odpadu se zanedbatelným uvolňováním tepla
- 8,3 mld. eur (9,3 mld. USD) za zařízení k likvidaci odpadu uvolňujícího teplo³³³

³³⁰ Government of Germany, Act on the reorganization of responsibility in nuclear waste management (Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung (BGBl., I, S. 1843 768/16).

³³¹ For more information, see: http://www.nationales-begleitleitgremium.de/DE/Home/home_node.html

³³² European Commission 2013, „EU Decommissioning Funding Data – Commission Staff Working Document,” viewed 28 June 2019, <http://aei.pitt.edu/42990/>

³³³ Warth & Klein Grant Thornton AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft 2015, Gutachtliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich (Expert Opinion on the Evaluation of Provisions in the Nuclear Energy Sector), viewed 5 June 2019, <http://bmwi.pro.contentstream.de/18004initag/ondemand/3706initag/bmwi/pdf/stresstestkernenergie.pdf>

Jaderné energetické firmy zatím nashromáždily zajištění ve výši 38,2 mld. eur (42,9 mld. USD). Tyto finanční prostředky se vybírají od spotřebitelů formou cen elektřiny.³³⁴ Odhadnuté náklady na všechny tyto procesy zřetelně převyšují existující zajištění. Při důsledném uplatnění principu *znečišťovatel platí* (jež je podle zákona o atomové energii povinné) by provozovatelé museli požádat o vyhlášení konkurzu.³³⁵ Rostly však obavy, že by provozovatelé mohli v případě konkurzu utéci bez placení a přenechat celý účet veřejnosti a že by z ekonomických důvodů mohli zanedbat bezpečnost při vyřazování z provozu, skladování a nakládání s odpady.³³⁶ Vláda v reakci na to ustavila komisi (KFK) k přezkoumání systému financování.

Komise doporučila zásadní změnu systému financování tak, aby se finanční a organizační povinnosti za nakládání s odpady převedly z provozovatelů na spolkovou vládu.³³⁷ Tato doporučení byla promítnuta do novely zákona.³³⁸ Za vyřazování z provozu a úpravu odpadu nadále zodpovídají energetické firmy, jsou ale zproštěny všech dalších úkolů týkajících se odpadu. Energetické firmy proto musely zaplatit částku svých dřívějších zajištění na nakládání s odpady, tj. 24,1 miliard eur, včetně rizikové premie, do externího odděleného veřejného fondu. V polovině roku 2017 byl zřízen Fond pro financování nakládání s jaderným odpadem k zajištění „bezpečného a výnosného“ investování těchto prostředků. Odpovědnost i budoucí rizika však stále bude muset nést veřejnost, čímž se omezuje princip *znečišťovatel platí*.³³⁹ V prvním finančním roce fond investoval pouze zlomek svých aktiv, z nichž většina stále leží ve Spolkové bance (Bundesbank) s úrokovou sazbou 0,4 %. Výsledkem za prvních šest měsíců existence fondu byly úrokové výdaje ve výši cca 39 milionů eur.³⁴⁰

SHRNUTÍ

Německo se v posledních letech výrazně politicky zasazuje o řešení jaderného odpadu, částečně v důsledku havárie ve Fukušimě v roce 2011, která měla na německou jadernou politiku katalytický účinek. Poté, co se vláda shodla na postupném odpojování všech jaderných elektráren do roku 2022, přesunula se politická pozornost k vyřazování z provozu a skladování/likvidaci odpadu. Čtyřicet let po provedení prvního výběru lokality, v němž byl překvapivě zvolen solný dóm v Gorleben, byl institucionalizován nový výběr lokality, konkrétně přesunem odpovědností jednotlivých agentur, vytvořením nových spolkových firem a regulátorů a zřízením externího odděleného fondu pro nakládání s odpadem. Institucionalizovaná účast občanské společnosti je v Německu nový přístup. Není zatím jasné, zda skutečně vznikly vyrovnané podmínky pro všechny instituce. Pozornost veřejnosti ve vztahu k novému procesu výběru lokality a její účast je zatím slabá.

³³⁴ Irrek and Vorfeld 2015.

³³⁵ Kunz, F., Reitz, F., von Hirschhausen, C. and Wealer, B. 2018. Nuclear Power: Effects of Plant Closures on Electricity Markets and Remaining Challenges. In *Energiewende „Made in Germany“* Springer, Cham str. 117-140.

³³⁶ von Hirschhausen, C. and Reitz, F. 2014. Nuclear power: phase-out model yet to address final disposal issue. *DIW Economic Bulletin*, 4(8), str. 27-35.

³³⁷ Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs (Commission to Review the Financing of the Nuclear Phase-Out) 2016, „Verantwortung und Sicherheit – Ein neuer Entsorgungskonsens“ (Responsibility and Safety – A New Disposal Consensus)

³³⁸ Vláda Německa 2016, *Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung – Drucksache 18/10469* Německý spolkový sněm, 18. zákonodárné období, 29. listopadu 2016.

³³⁹ Jänsch, E., Brunnengräber, A., von Hirschhausen, C. and Möckel, C. 2017. Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 26(2), str. 118-120.

³⁴⁰ Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung 2018, *Business Report* 2017

Německo má citlnou historickou zátěž v podobě velkého množství odpadu, který je momentálně v centralizovaných meziskladech i u reaktorů. Odpad se v Německu klasifikuje do dvou typů: radioaktivní odpad se zanedbatelným uvolňováním tepla a radioaktivní odpad uvolňující teplo.

Budoucí cesta likvidace vysokoaktivního odpadu je stále velice nejistá, protože Německo teprve nyní zahajuje proces výběru lokality. Výstavba hlubinného úložiště Konrad pro nízko a středněaktivní odpad stále probíhá a otevření zařízení se v současné době plánuje na rok 2027. Do té doby bude všechen nízko a středněaktivní odpad v meziskladech. Dočasné skladování vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu bude pokračovat přinejmenším do roku 2050. Debata o nutnosti přezkoumání bezpečnosti a kapacity meziskladů se zostrňuje, neboť výběr lokality ke konečné likvidaci by se neměl řídit nedostatkem kapacity nebo obav z bezpečnosti meziskladů.

Německo již získalo určité zkušenosti s vyřazováním jaderných reaktorů z provozu, ale všechny reaktory, které se zde aktuálně nacházejí v poprovozní fázi, se stále musí vypořádat s několika překážkami, aby mohl být proces dokončen včas a bez nárůstu nákladů. Všechny odhadované budoucí náklady – především budoucí náklady spojené s nakládáním s odpady – jsou nejisté v důsledku růstu nákladů a úrokových sazeb. Je sporné, zda finanční prostředky odložené ve fondu budou pro tyto náklady dostatečné.

7.4 MAĎARSKO

PŘEHLED

Historie jaderné energetiky v Maďarsku sahá do 60. let 20. století. Maďarská vláda rozhodla v roce 1966 o výstavbě jaderné elektrárny o celkem čtyřech blocích. Výstavba v lokalitě Paks začala v roce 1974. Výroba elektřiny tu byla zahájena v roce 1982. Všechny čtyři bloky jsou tlakovodní reaktory (VVER – 440/213). Paks je v současné době jediná jaderná elektrárna na světě, kde tyto reaktory pracují v režimu prodlouženého palivového cyklu: namísto každých 12 měsíců se palivo mění každých 15 měsíců.³⁴¹ U čtveřice bloků se v souladu s programem prodlužování životnosti z roku 2012 předpokládá provoz dalších dvacet let, až do poloviny 30. let.

Čtveřice reaktorů JE Paks fungovala v roce 2018 v režimu vysoké dostupnosti (89 %) a vyrobila cca 15 TWh elektrické energie, což představuje zhruba polovinu výroby elektřiny v Maďarsku.³⁴²

V lednu 2014 podepsala maďarská vláda mezivládní dohodu s Ruskou federací o výstavbě dvou dalších bloků, z nichž každý má mít výkon 1 200 MW. Bloky se budou stavět u města Paks, 100 km na jih od Budapešti. Výstavba elektrárny Paks II však dosud nezačala, čímž by se plánované zahájení provozu mohlo zpozdit za hranici konce 20. let.

Jediný uranový důl v Maďarsku byl uzavřen v roce 1997 v důsledku neefektivního provozu.³⁴³ Kvůli plánovanému rozšíření JE Paks plánuje společnost Maďarské uranové zdroje důl znovu otevřít, přestože úřady v první instanci odmítly investici udělit ekologické povolení. Maďarsko nemá žádné zařízení pro přepracování vyhořelého paliva.

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Systém klasifikace odpadu v Maďarsku stanoví národní program nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem. První zásadou je, že odpad vznikající v řízeném prostoru by se měl považovat za radioaktivní, dokud se neprokáže opak.³⁴⁴ Program vychází z doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) a ze směrnice Rady EU 2011/70/EURATOM. Podle druhého zákona o atomové energii z roku 1996 je maďarská vláda povinná organizovat konečnou likvidaci radioaktivního odpadu.³⁴⁵

Maďarsko radioaktivní odpad klasifikuje podle čtyř kritérií: skupenství, uvolňování tepla, koncentrace radioaktivity a poločasu rozpadu.

- Radioaktivní odpad klasifikovaný podle skupenství může být tuhý, biologického původu, kapalný nehořlavý, kapalný hořlavý a vzdušný.
- Podle uvolňování tepla se rozlišuje nízko a středněaktivní odpad (NSAO) a vysokoaktivní odpad (VAO).

³⁴¹ Více informací o aktivní zóně reaktorů (VVER-440/213) viz webová stránka elektrárny Paks:

http://www.atomeromu.hu/en/Documents/2_Structure_of_Paks_npp.pdf

³⁴² Webová stránka JE Paks, cit. 26. února 2019,

<http://www.atomeromu.hu/hu/Rolunk/Hirek/Lapok/HirReszletek.aspx?hirId=650>

³⁴³ Webová stránka JE Paks, „Mining of uranium ore”, cit. 26. února 2019,

http://www.atomeromu.hu/en/Documents/7_Life_of_uranium_1.pdf

³⁴⁴ Vláda Maďarska 2017, „Hungary's national program for spent fuel and radioactive waste management”, cit. 26. února

2019, http://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2017-05-09-Program_national_HU.pdf

³⁴⁵ Vláda Maďarska, Act CXVI of 1996 on Atomic Energy, cit. 26. února 2019, [http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/AF56E3A1E23F3932C1257CA700432BBC/\\$File/1996_116_tv_EN_2017_06_24_2017_12_31.pdf](http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/AF56E3A1E23F3932C1257CA700432BBC/$File/1996_116_tv_EN_2017_06_24_2017_12_31.pdf)

- Kategorie nízko, středně a vysokoaktivního odpadu se též uplatňují při rozlišování podle radioaktivity.
- Odpad klasifikovaný podle poločasu rozpadu radionuklidů může být s krátkou, střední a dlouhou dobou rozpadu (delší než 30 let).³⁴⁶

Prováděcí vyhláška č. 23/1997 stanoví úroveň radioaktivity v nízkoaktivním odpadu, pod kterou platí výjimka (uvolnění ze systému). Maďarské předpisy však obsahují jiný systém, který klasifikuje radioaktivní odpad podle dávky záření gama naměřené ve vzdálenosti 10 cm od povrchu balení odpadu. V tomto případě je nízkoaktivní odpad takový, který má méně než 0,3 milisievertů za hodinu (mSv/h) a vysokoaktivní odpad takový, který má více než 10 mSv/h.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Maďarská vláda pravidelně ohlašuje množství vyhořelého paliva a radioaktivního odpadu. Zprávy se připravují pro zasedání Společné úmluvy Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE). Poslední zpráva byla připravena pro zasedání v roce 2018. Maďarsko posílalo do roku 1998 vyhořelé jaderné palivo k přepracování do Ruska (2 331 palivových souborů čili 273 tun těžkých kovů). Od té doby se vyhořelé jaderné palivo dočasně skladuje v meziskladu vyhořelého paliva v blízkosti jaderné elektrárny Paks.

TABULKA 15: Jaderný odpad v Maďarsku ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (mokrý)	Skladovací bazén u reaktorů JE Paks	1 800 FA
	Mezisklad (suchý)	MVP v JE Paks	8 707 FA
VAO	Mezisklad	Paks	102 m ³
NSAO KAPALNÝ	Mezisklad	Skladovací nádrže u reaktorů JE Paks	8 131 m ³
NSAO TUHÝ	Mezisklad	Mezisklad u reaktorů JE Paks	1 835 m ³
	Mezisklad	Přípovrchové úložiště RWTDF	225 m ³
	Likvidovaný odpad	Přípovrchové úložiště RWTDF	4 900 m ³
	Mezisklad	Přípovrchové úložiště NRWR	430 m ³
	Likvidovaný odpad	Přípovrchové úložiště NRWR	876 m ³
VNAO	n.a.		
ODPAD S OBSAHEM U	Skládky a odkaliště	probíhá rekultivace	10 milionů m ³ hlušiny na výsypkách a 3,4 milionu m ³ filtračních výsypek

Zdroj: Vláda Maďarska 2017, National Report Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

Poznámky: PS = palivové soubory; MVP = mezisklad vyhořelého paliva

Podle Národní zprávy se bude radioaktivní odpad z vyřazování z provozu umisťovat v jiném zařízení (v oblasti Boda na jihu země). Odhadované množství nízko a středněaktivního odpadu z vyřazování JE Paks z provozu je 9 147 kontejnerů po 1,8 m³ a 2 846 kontejnerů po 3,6 m³. Odhadovaný hrubý objem vysokoaktivního odpadu z provozu a z vyřazování z provozu uloženého v plánovaném hlubinném úložišti je 300 m³.

³⁴⁶ Vláda Maďarska 2017, National Report Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Maďarský přístup k nakládání s radioaktivním odpadem stanoví zákon o atomové energii z roku 1996.³⁴⁷ Za celkem čtyři lokality k likvidaci radioaktivního odpadu v Maďarsku zodpovídá Akciová společnost pro nakládání s radioaktivním odpadem. Pro odpad z energetiky jsou dvě zařízení:

- Národní úložiště radioaktivního odpadu (NRWR) v Bátaapáti skladuje nízko a středněaktivní odpad z jaderné elektrárny Paks. Přivážený tuhý odpad se zde ukládá v kompaktní podobě, obvykle 200litrových sudech. Kapalný odpad se sbírá do nádrží. Kapacita tohoto skladovacího zařízení je 3 000 sudů.³⁴⁸
- Druhé zařízení je mezisklad vyhořelého paliva (MVP) v blízkosti JE Paks. Toto zařízení zahájilo provoz v roce 1998. Předtím se vyhořelé palivo vracelo do Ruska. Od doby, kde Maďarsko začalo své vyhořelé palivo řešit, se celková skladová kapacita zařízení zvětšila, takže dnes pojme 9 308 souborů s vyhořelým palivem.³⁴⁹

Kromě tohoto je část nízkoaktivního odpadu z JE Paks dočasně uložena v Zařízení pro nakládání a likvidaci radioaktivního odpadu (RWDTF), jež se využívá především pro neenergetický odpad.³⁵⁰

Zákon o atomové energii reguluje nakládání s radioaktivním odpadem a opravňuje vládu k vydávání prováděcích nařízení upravujících požadavky v této oblasti. Zákon slouží jako rámec pro výstavbu a údržbu zařízení k likvidaci odpadů a meziskladů vyhořelého paliva. Po vstupu Maďarska do Evropské unie (EU) byl zákon upraven tak, aby splňoval předpisy EU a směrnici EURATOM. Zákon stanoví, že nakládání s radioaktivním odpadem by nemělo vytvářet zátěž pro budoucí generace. Zřídil též Státní agenturu pro nakládání s radioaktivním odpadem, která byla činná v letech 1998–2008. Poté byl tento orgán přeměněn na Akciovou společnost pro nakládání s radioaktivním odpadem (PURAM). Od roku 2008 společnost PURAM odpovídá za provoz skladů a likvidaci radioaktivního odpadu a za aktualizaci plánů činností financovaných Ústředním jaderným finančním fondem.

Maďarská vláda v roce 1971 rozhodla o výstavbě Zařízení pro nakládání s radioaktivním odpadem a jeho likvidaci pro nízko a středněaktivní odpad z neenergetických zdrojů.

V roce 1995 byl vyhlášen národní program k řešení problému vysokoaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu. Následkem toho společnost PURAM zřídila mezisklad vyhořelého paliva v blízkosti JE Paks. Zařízení je schopno (v plánovaných 36 modulech) skladovat vyhořelé palivo po dobu minimálně 50 let. Zařízení bylo v roce 2012 z poloviny hotové.

Nízko a středněaktivní odpad z jaderné elektrárny Paks se přepravuje do úložiště v Bátaapáti.³⁵¹ Provozní licence umožňuje skladování 3 000 barelů (každý o objemu 200 litrů) obsahujících nízko a středněaktivní tuhý odpad. Podle společnosti PURAM je kapacita úložiště v Bátaapáti dostačující pro potřeby elektrárny Paks a podzemní prostor bude rozšířen tak, aby postačilo po celou životnost jaderné elektrárny Paks I.³⁵²

³⁴⁷ Vláda Maďarska, Act CXVI of 1996 on Atomic Energy

³⁴⁸ Hungarian National Radioactive Waste Repository (NRWR), nedatováno, „16 drums loaded into 4 transport frames can be put on the vehicle,” cit. 26. února 2019, <http://www.rhk.hu/en/our-premises/nrwr/>

³⁴⁹ Hungarian National Radioactive Waste Repository (NRWR), nedatováno, „History of spent fuel storage,” cit. 26. února 2019, <http://www.rhk.hu/en/our-premises/isfs/history/>

³⁵⁰ Oroszi, B. 2019, „Tritium Leak and Waste Packaged in Plastic Bags: Questions about the Nuclear Cemetery,” 27. února, cit. 26. února 2019, <https://english.atlatszo.hu/2019/02/27/tritium-leak-and-waste-packaged-in-plastic-bags-questions-about-the-nuclear-cemetery/>

³⁵¹ Úložiště zahájilo provoz v roce 2008. Podrobnosti z jeho historie viz <http://www.rhk.hu/en/our-premises/nrwr/history/>

³⁵² Vláda Maďarska 2005, *Second Report prepared in the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, cit. 26. února 2019, [http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/\\$FILE/nationrep2.pdf](http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/$FILE/nationrep2.pdf)

Vláda v roce 2015 zahájila výzkum pro umístění hlubinného úložiště v regionu Boda. Ze současných vědeckých poznatků vyplývá, že nejvhodnějším geologickým médiem v Maďarsku je jíl. Výzkumný proces se nyní nachází ve fázi výběru nejlepší lokality. Podle nejnovějších plánů bude úložiště zbudováno v letech 2030–2064 tak, aby mohlo začít fungovat po začátku vyřazování JE Paks z provozu.

Starostové potenciálně dotčených obcí založili v roce 1996 sdružení za účelem hájení jejich zájmů. K úkolům sdružení patří poskytování informací o výzkumném procesu, kontrola nad monitorovací sítí a víceúčelový rozvoj členských obcí. Sdružení společně s PURAM pořádá každoroční akci, na které odborníci prezentují informace a poskytují mezinárodní pohled na konečnou likvidaci vysokoaktivního odpadu. PURAM od roku 2003 provádí v dotčeném regionu každý druhý rok průzkum veřejného mínění ohledně uznání výzkumu likvidace odpadů a míry jejího přijetí mezi místním obyvatelstvem.³⁵³ Obyvatelé mohou získávat informace pouze od sdružení obcí a PURAM (dostupných oficiálních zdrojů informací).

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Financování vyřazování JE Paks z provozu reguluje zákon o atomové energii. Zákonem se zřizuje Ústřední jaderný finanční fond, jenž zahájil činnost v roce 1998. Jedná se o fond Ministerstva financí a tvoří součást státního rozpočtu. K zajištění finanční stability dostává fond podporu z ústředního státního rozpočtu. Do roku 2014 fond spravoval Národní úřad pro atomovou energii a od té doby jej spravuje Ministerstvo národního rozvoje. Podle návrhu rozpočtu Ústředního jaderného finančního fondu budou plánované rozpočtové výdaje na dlouhodobé nakládání s odpady a další projekty odpadového hospodářství (například výzkum konečné likvidace vysokoaktivního odpadu a přípravy na vyřazování jaderných zařízení z provozu) v roce 2019 činit 14,8 miliardy HUF (53 milionů USD), zatímco výnosy placené do fondu budou 27 miliard HUF (97 milionů USD).³⁵⁴ Objem fondu v roce 2016 činil 255 miliard HUF (910 milionů USD).³⁵⁵

Zákon předepisuje princip *znečišťovatel platí* v tom smyslu, že instituce, která radioaktivní odpad produkuje, musí platit za nakládání s ním. Fond tudíž financují všechna zařízení produkující jaderný odpad, přičemž největším přispěvatelem je JE Paks (z elektrárny pochází cca 90 % ročního příjmu fondu). Značná část prostředků fondu jde na údržbu lokalit k likvidaci odpadů a na rozpočet PURAM. Předpokládá se, že půjde téměř polovina rozpočtu fondu na řešení vyhořelého paliva a čtvrtina na vyřazování JE Paks z provozu. Celkové předpokládané výdaje na činnosti financované z fondu u čtveřice reaktorů v provozu do roku 2084 budou 5,4 miliardy eur (6,24 mld. USD). Podle stávajících plánů pokryjí platby jaderné elektrárny Paks pouze necelou polovinu této částky.

Jak se bude financovat zbytek, zůstává otázkou. Ačkoli hromadící se rezervní prostředky se také objevují v ročním rozpočtu Ústředního jaderného finančního fondu, nemusí být skutečně dostupné. Podle maďarského Státního kontrolního úřadu nestojí za částkou na bankovním účtu žádné skutečné úspory, což bude v budoucnosti, až vyvstanou náklady, působit problémy. Budoucí náklady na nové plánované bloky v Paksu dosud fond nepokrývá.³⁵⁶

³⁵³ Public Limited Company for Radioactive Waste Management (PURAM) nedatováno, „Lakossági kapcsolatok és kommunikáció”, cit. 9. března 2019, <http://www.rhk.hu/projektjeink/nagy-aktivitasu-hulladekok/lakossagi-kapcsolatok/>

³⁵⁴ Parlament Maďarska 2019, A Központi Nukleáris Pénzügyi Alap 2019. évi költségvetési javaslat, cit. 9. března 2019, <https://www.parlament.hu/irom41/00503/adatok/fejezetek/66.pdf>

³⁵⁵ Public Limited Company for Radioactive Waste Management (PURAM) nedatováno, „A feladatok finanszírozása”, cit. 9. března 2019, <http://www.rhk.hu/rolunk/mandatumunk/finanszirozasa/>

³⁵⁶ Koritár, Z. 2018, „Postponed Policy,” in A Brunnengräber a kol. *Challenges of Nuclear Waste Governance*, Springer VS, Wiesbaden, str. 123–137.

SHRNUTÍ

Přestože maďarská jaderná historie sahá do 60. let minulého století, je nakládání s radioaktivním odpadem stále v plenkách. Regulace nakládání s odpady prošla v minulých desetiletích několika proměnami, aby se přizpůsobila zákonům EU. Maďarsko navíc implementovalo většinu zákonných a regulačních doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Maďarsko má dlouhodobé plány v oblasti nakládání s jaderným odpadem, ale do výstavby elektrárny Paks II je možná nebude schopné uskutečnit. K hrazení nákladů na vyhořelé palivo a vyřazování z provozu všech čtyř stávajících reaktorů v JE Paks byl zřízen Ústřední jaderný finanční fond, ten však dlouhodobě nedokáže pokrýt předpokládaných 5,4 miliard eur (6,24 mld. USD). Navíc přestože výzkum konečné likvidace radioaktivního odpadu postupuje vpřed, není vůbec jisté, zda lze zajistit nejvyšší možnou bezpečnost. V současné době jsou v Maďarsku v provozu dvě hlavní zařízení pro jaderný odpad. Potřeba konečného úložiště je však naléhavá. Množství odpadu bude podstatně narůstat, a to nejen z vyřazování z provozu čtyř reaktorů jaderné elektrárny Paks, ale též z plánovaných dvou nových reaktorů JE Paks II.

7.5 ŠVÉDSKO

PŘEHLED

První využití jádra ve Švédsku začalo koncem 40. let v podobě kombinovaného vojensko-civilního jaderného programu na bázi těžkovodních reaktorů. V letech 1954 a 1960 zahájily provoz dva výzkumné reaktory. Třetí podzemní reaktor byl spuštěn v roce 1964 a sloužil k dálkovému vytápění nedaleké obce a dodávce určitého množství elektrické energie do sítě. Jeho hlavním účelem však byly dodávky plutonia pro švédský program vývoje jaderných zbraní. Všechny tyto tři první reaktory již byly vyřazeny z provozu nebo jejich vyřazování probíhá.

Po dlouhé veřejné debatě v polovině 60. let rozhodla vláda zastavit vojenský program a spolu s ním i program těžkovodních reaktorů. Místo nich bylo v letech 1972–1985 uvedeno do provozu ve čtyřech lokalitách devět varných reaktorů a tři tlakovodní reaktory.

Švédsko svou jadernou kapacitu postupně a v posledních letech rychleji snižuje. Dva reaktory v elektrárně Barsebäck nedaleko hranice s Dánskem byly odstaveny v letech 1999 a 2005. Dva ze tří reaktorů elektrárny Oskarshamn byly odstaveny v letech 2015 a 2017. Dva ze čtyř reaktorů elektrárny Ringhals budou odstaveny v letech 2019 a 2020 a dva zůstanou v provozu. Dále jsou v provozu tři reaktory v elektrárně Forsmark. Osm fungujících reaktorů dodávalo v roce 2018 asi třetinu elektrické energie pro Švédsko.³⁵⁷

Od roku 2016 existuje politická shoda na tom, že výroba elektrické energie ve Švédsku by do roku 2040 měla být 100% obnovitelná. Zároveň však neexistuje žádný plán útlumu šestice reaktorů, které budou po roce 2020 v provozu. Dohoda praví pouze tolik, že pro jadernou energetiku nebudou žádné dotace a že zbývající reaktory se mají odstavit tehdy, až přestanou být výdělečné. V současnosti se ve Švédsku neplánuje výstavba nových reaktorů, přestože zákonný zákaz výstavby nových jaderných energetických reaktorů byl v roce 2010 zrušen.

V 60. letech se plánovala výstavba podzemního závodu na přepracování jaderného odpadu, ale nikdy nebyla zahájena. V té době nicméně probíhal výzkum a vývoj v oblasti přepracování, z něhož vznikly odpady, které pro Švédsko představují hlavní část současné staré zátěže. Vysokoaktivní odpad z těchto činností přepracování se již ve Švédsku nenachází. Koncem 70. let podepsalo Švédsko smlouvy o přepracování s Francií a s Británií, ale v Británii se nakonec přepracovávalo pouze 140 tun vyhořelého paliva. Z komerčních důvodů a kvůli obavě z šíření jaderného materiálu se Švédsko kolem roku 1980 rozhodlo pro přímou likvidaci vyhořelého jaderného paliva.

Ve Švédsku je v provozu úložiště nízko a středněaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu a na úložiště vyhořelého paliva probíhá povolovací řízení. Plánuje se též úložiště středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu.

V 60. letech krátkodobě fungovalo zařízení pro těžbu uranu v Ranstadu. V 90. letech bylo vyřazeno z provozu a jeho ekologická sanace se považuje za dokončenou. Ve Švédsku se též nachází závod na výrobu jaderného paliva ve Västerås, v současnosti patří firmě Westinghouse.

³⁵⁷ World Nuclear Association, webová stránka 2018, „Nuclear Energy in Sweden,” cit. 22. dubna 2019, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden.aspx>

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Švédsko rozlišuje jaderný odpad na základě jeho aktivity a životnosti. Systém klasifikace odpadu vypracovala Švédská společnost pro nakládání s jaderným palivem a odpadem (SKB) a rozeznává následujících pět kategorií:³⁵⁸

TABULKA 16: Kategorie jaderného odpadu ve Švédsku v roce 2018

Typ odpadu	Místo určení	Definice	Další faktory
UVOLNĚNÝ MATERIÁL	Úložiště není nutné	Materiál o tak nízkém stupni radioaktivity, že jej lze uvolnit z regulační kontroly	není
VELMI NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD S KRÁTKOU DOBOU ROZPADU (VNAO-KD)	Mělká skládka	Malé množství nuklidů s krátkou dobou rozpadu o poločasu rozpadu méně než 31 let (dávka z jednoho balení je menší než 0,5 mSv/h). Nuklidy s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let mohou být přítomny v omezeném množství	není
NÍZKOAKTIVNÍ ODPAD S KRÁTKOU DOBOU ROZPADU (NAO-KD)	Konečné úložiště odpadu s krátkou dobou rozpadu (SFR)	Malé množství nuklidů s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let. Dávka z jednoho balení (a nestíněného odpadu) je menší než 2 mSv/h. Nuklidy s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let mohou být přítomny v omezeném množství	není
STŘEDNĚAKTIVNÍ ODPAD S KRÁTKOU DOBOU ROZPADU (SAO-KD)	Konečné úložiště odpadu s krátkou dobou rozpadu (SFR)	Značné množství nuklidů s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let. Dávka z jednoho balení je menší než 500 mSv/h. Nuklidy s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let mohou být přítomny v omezeném množství	Vyžaduje radiační odstínění během přepravy.
NÍZKO A STŘEDNĚ-AKTIVNÍ ODPAD S DLOUHOU DOBOU ROZPADU (NSAO-DD)	Konečné úložiště odpadu s dlouhou dobou rozpadu (SFL)	Značné množství nuklidů s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let, přesahující omezené množství u odpadu s krátkou dobou rozpadu	Vyžaduje během přepravy speciální kontejnment.
VYHOŘELÉ PALIVO/ VYSOKOAKTIVNÍ ODPAD (VAO)	Konečné úložiště vyhořelého paliva	Specifický tepelný rozpad >2kW/ M ³ a obsahuje značné množství nuklidů s dlouhou dobou rozpadu o poločasu rozpadu více než 31 let, přesahující omezené množství u odpadu s krátkou dobou rozpadu	Během skladování v meziskladech a přepravy vyžaduje chlazení a radiační odstínění

Zdroj: SSM 2018

Klasifikace se mírně liší od definice MAAE tím, že Švédsko se namísto kategorie nízkoaktivního odpadu (NAO) zaměřuje na odpad s krátkou dobou rozpadu. Švédský nízko a středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu (NAO-KD a SAO-KD) jsou tudíž podle klasifikace MAAE v zásadě NAO.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Ministerstvo životního prostředí a energetiky a regulátor, tedy Švédský úřad pro radiační bezpečnost (SSM), každé tři roky zveřejňuje inventář ve zprávě pro zasedání Společné úmluvy MAAE³⁵⁹ a též jej vykazují v souladu se směrnicí EU o radioaktivním odpadu.³⁶⁰ Nejnovější výkazy ve zprávách se vztahují ke dni 31. prosince 2016 a jsou uvedeny v tabulce 17.

³⁵⁸ Swedish Radiation Safety Authority 2018, Sweden's second National Report on Implementation of Council Directive 2011/70/Euratom, cit. 22. dubna 2019, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>

³⁵⁹ Swedish Ministry of the Environment and Energy 2017, Sweden's sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, Ds 2017:51, cit. 22. dubna 2019, <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2017/10/ds-201751/>

³⁶⁰ Swedish Radiation Safety Authority 2018, Sweden's second National Report on Implementation of Council Directive 2011/70/Euratom, cit. 22. dubna 2019, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>

TABULKA 17: Jaderný odpad ve Švédsku ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (mokrý)	U reaktorů	2 387 PS neboli 492 tHM*
	Mezisklad (mokrý)	Centrální přípovrchové dočasné úložiště (CLAB) v bazénech 75 m pod povrchem u JE Oskarshamm	31 817 PS neboli 6 267 tHM**
	VJP poslané k přepracování	140 tHM do Velké Británie z JE Oskarshamm; 56 tHM do Francie z JE Barsebäck	206 tHM***
NAO-KD A SAO-KD	Mezisklad	V lokalitě Studsvik a v jaderných elektrárnách	8 500 m ³
SAO-DD	Mezisklad	V lokalitě Studsvik, u reaktorů a v meziskladu (CLAB)	5 300 m ³
VNAO	Mezisklad	U reaktorů	2 900 m ³
NAO-KD A SAO-KD	Likvidovaný odpad	Přípovrchové úložiště (SFR) 50 metrů pod mořským dnem nedaleko JE Forsmark	38 922 m ³
VNAO	Mělká skládka	Mělké skládkování u reaktorů (kromě JE Barsebäck) a ve Studsviku	27 841 m ³

Zdroj: SKB 2017

Poznámky: PS = palivové soubory. JE = jaderná elektrárna

* Zahrnuje 0,04 tHM vyhořelého paliva z výzkumného reaktoru R1 v lokalitě Studsvik

** Zahrnuje 2,7 tHM kusů vyhořelého paliva z radioaktivní laboratoře ve výzkumném zařízení Studsvik a 22,5 tHM vyhořelého paliva MOX z Německa

*** Navíc bylo 4,7 tHM vyhořelého paliva z výzkumného reaktoru R1 odesláno k přepracování do Británie a minimálně 13 tHM vyhořelého paliva z výzkumného reaktoru R2/R2-0 k přepracování do USA a Belgie

Ve Švédsku se v současné době nachází téměř 7 000 tun vyhořelého jaderného paliva, většina v centralizovaném mokrém meziskladu (CLAB). Vyhořelé palivo zůstává v bazénech u reaktorů pouze několik let. V meziskladech se nyní nachází okolo 8 500 m³ nízko a středněaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu a 5 300 m³ nízko a středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu. Historický odpad je hlavně v lokalitě Studsvik, ale stále větší množství se nachází u reaktorů, kde probíhá vyřazování z provozu. Nízko a středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu z provozu reaktorů se ukládá do stávajícího úložiště (SFR), kde je nyní zlikvidováno téměř 40 000 m³ odpadu. Velmi nízkoaktivní odpad se likviduje v mělkých skládkách a ve čtyřech zařízeních ho je nyní téměř 30 000 m³. Kromě toho se 2 900 m³ velmi nízkoaktivního odpadu stále skladuje.

Na základě oborových scénářů provozní životnosti se předpokládá konečný objem vyhořelého paliva ve Švédsku 11 400 tun. Odhadované množství odpadu po vyřazení z provozu všech jaderných zařízení činí celkem 153 000 m³ nízko a středněaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu a 16 400 m³ středněaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu.³⁶¹

³⁶¹ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) 2017, *Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018–2020*, SKB TR-17-02, str. 35–36, cit. 22. dubna 2019, <http://www.skb.com/publication/2487964/>

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Podle zákona o jaderných činnostech z roku 1984 zodpovídá za financování i řízení konečné likvidace radioaktivního odpadu jaderný průmysl a jeho energetické firmy.³⁶² Zákon v současné době prochází přezkoumáním. Provozovatelé musí každé tři roky předkládat zprávu o výzkumu a vývoji regulátorovi, tedy Švédskému úřadu pro radiační bezpečnost (SSM). Vláda musí zprávu přezkoumat a schválit a může přitom ukládat provozovatelům podmínky. Jde o jediný způsob, jak může vláda žádat změny plánů provozovatelů s radioaktivním odpadem, a využívá jej pouze zřídka.

Regulátor SSM přezkouvává provozní licence jaderných zařízení, například úložišť, na základě zákona o jaderných činnostech. Od konce 90. let musí mít zároveň všechna jaderná zařízení povolení podle švédského zákoníku životního prostředí. Tímto dvojcestným procesem udělování licencí vznikají doporučení SSM a Pozemkového a environmentálního soudu pro švédskou vládu, která činí konečné rozhodnutí o udělení či prodloužení licence.

Jaderný průmysl založil k realizaci svých povinností soukromou společnost. Švédská společnost pro nakládání s jaderným palivem a odpadem (SKB) provozuje stávající zařízení a buduje nová. Další společnost, Svafo AB, vznikla za účelem převzetí odpovědnosti za historický odpad, představující převážně jaderný odpad z historických vojenských a civilních výzkumných programů. Společnost Svafo AB je vlastněna od roku 2009 jaderným průmyslem.

Vyhořelé jaderné palivo z jaderných elektráren se nejprve několik let chladí. Poté se přesouvá do centralizovaného meziskladu CLAB, který se nachází u jaderné elektrárny Oskarshamn. Tento mokrý mezisklad obsahuje dva vodní bazény v jeskyních 50 metrů pod zemí v žulovém podloží. Vyhořelé palivo se od ostatních reaktorů přepravuje speciální lodí Sigrid, která slouží i k přepravě ostatního radioaktivního odpadu mezi jadernými lokalitami.

Stejně jako ostatní země i Švédsko dlouhodobě připravuje hlubinné úložiště vysokoaktivního odpadu. Jaderný průmysl buduje od poloviny 70. let systém úložišť zvaný KBS-3 pro konečnou likvidaci vyhořelého jaderného paliva. Úložiště se plánuje v žulovém podloží v hloubce přibližně 500 metrů. Vyhořelé palivo se má uzavřít do 5 cm silného měděného obalu a uložit do otvorů v podlaze podzemních tunelů. Okolo nádob má vzniknout ochranné pouzdro z bentonitu a jílem budou zaplněny i samotné tunely. Žulovou horninou sice protéká voda, ale měď a jíl mají vytvořit umělou bariéru, která izoluje odpad od prostředí po stovky tisíc let.

Proces výběru lokality k likvidaci byl dlouhý a komplikovaný. Společnost SKB konečně v roce 2009 vybrala podloží u jaderné elektrárny Forsmark. Žádost o vydání licence byla podána v roce 2011 a regulátor SSM a Environmentální soud předaly po dlouhém procesu svá stanoviska vládě v lednu 2018. Soud doporučil odmítnutí povolení podle zákona o životním prostředí, pokud nebude předvedeno, že lze prokázat neporušenost měděné nádoby k zajištění dostatečné dlouhodobé bezpečnosti. Regulátor SSM doporučil vládě povolení schválit, neboť případné problémy s měděnými nádobami bude možno řešit později v rámci postupného rozhodování v souladu se zákonem o jaderných činnostech. Žádost o udělení licence nyní prochází přezkoumáním vlády a není jasné, zda otázka koroze měděných nádob bude zásadním problémem v dalším vývoji. Rozhodnutí vlády může padnout v roce 2020.

³⁶² Swedish National Council for Nuclear Waste 2011, *Licensing under the Environmental Code and the Nuclear Activities Act of a final repository for spent nuclear fuel* Report 2011:2e, cit. 22. dubna 2019, https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/report_2011_2.pdf

Pokud se vláda rozhodne souhlasit, nejprve udělí tzv. „přípustnost“ podle zákoníku životního prostředí a může připojit podmínky. Environmentální soud bude muset poté udělit povolení s podmínkami. Vláda následně vydá licenci v souladu se zákonem o jaderných činnostech a regulátor SSM zahájí postupný proces rozhodování, v jehož rámci padnou jednotlivá rozhodnutí o zahájení výstavby, jednotlivých provozů a plného provozu. Tento proces potrvá dalších několik let a je nepravděpodobné, že by výstavba začala dříve než v roce 2025. Pokud bude licence udělena, odhaduje se, že výstavba úložiště potrvá 10 let a že bude v provozu cca 60 let.

Kromě plánovaného hlubinného úložiště VAO je v provozu nebo se připravuje několik dalších úložišť pro ostatní typy odpadu:

- Existují plány na speciální úložiště zvané SFL pro nízko a středněaktivní odpad s dlouhou dobou rozpadu (NSAO-DD). SKB však dosud nepředložila způsob ukládání ani nezahájila proces vyhledávání potenciálních lokalit.
- Uvnitř skalní jeskyně poblíž lokality Studsvik se nachází mezisklad převážně NSAO-DD. Tento odpad pochází z různých zdrojů, přičemž většinově jde o odpad historický.
- V roce 1983 bylo uvedeno do provozu úložiště zvané SFR pro nízko a středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu (NAO-KD a SAO-KD) z jaderných elektráren. Toto úložiště se nachází 75 metrů pod mořským dnem nedaleko jaderné elektrárny Forsmark. Probíhá proces udělování licence na rozšíření plánované 120 metrů pod mořským dnem pro odpad z vyřazování z provozu. V úložišti SFR se vyskytly problémy s neporušeností betonových bariér a s korozí skladovacích nádob. Nachází se tu též řada kontejnerů s historickým odpadem, z nichž velké množství se musí vyzvedávat kvůli nejistotě, co je jejich obsahem, nebo protože se dnes již ví, že obsahují odpad s dlouhou dobou rozpadu.
- Radioaktivní laboratoř v lokalitě jaderného výzkumu Studsvik provádí komerční testování vzorků vyhořelého paliva. Součástí zařízení je i spalovna, v níž se zhutňuje radioaktivní odpad, a tavicí pec k dekontaminaci a tavení radioaktivních kovů k dosažení volného rozptýlení. Zařízení ve Studsviku se od 80. let postupně privatizovala. V roce 2017 dceřiná společnost francouzské energetické firmy EDF odkoupila většinu zařízení firmy Studsvik AB, ale nikoli radioaktivní laboratoř.
- U jaderných elektráren Ringhals, Forsmark a Oskarshamn a ve Studsviku existují lokality pro malé skládání velmi nízkoaktivního odpadu. Skládka odpadu Studsvik je trvale uzavřena.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Švédsko v mezinárodním srovnání začalo nakládání s radioaktivním odpadem financovat relativně brzy, v souladu s původním zákonem o financování z roku 1981. Zákon o financování z roku 2006 stanoví zodpovědnost provozovatele jaderného zařízení nebo každého, kdo produkuje radioaktivní odpad, za jeho vyřazení z provozu a zaručení, že související náklady ponese v plné výši původce.³⁶³ Dvěma hlavními pilíři financování nakládání s odpady a vyřazování reaktorů z provozu jsou poplatek z elektřiny z jaderné energetiky a garantované zajištění ze strany vlastníků elektráren. Jaderný průmysl připravuje každé tři roky zprávu PLAN s prognózami budoucích nákladů na základě různých scénářů. Zpráva poskytuje údaje pro výpočet poplatků a zajištění na radioaktivní odpad. Přezkoumává ji Švédský národní úřad pro kontrolu dluhů, který ji též předkládá k veřejnému přezkoumání. Tato povinnost patřila do roku 2018 regulátoru SSM, ale byla přesunuta kvůli vnímanému rostoucímu riziku, že je systém podfinancovaný. Úřad pro kontrolu dluhů podává doporučení vládě, jež činí konečné rozhodnutí.

³⁶³ Vláda Švédska 2006, *Lag om finansiering av kärntekniska restprodukter*, cit. 28. června 2019, https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2006647-om-finansiering-av-karntekniska_sfs-2006-647

Průměrný poplatek za období 2018-2020 je 50 SEK/MWh (5,40 USD/MWh) elektřiny vyrobené z jádra. Poplatek se stanoví za jednotlivé jaderné elektrárny a nejvyšší je u JE Oskarshamn (64 SEK/MWh, tedy cca 6,90 USD/MWh) a nejnižší u JE Forsmark (33 SEK/MWh, tedy cca 3,50 USD/MWh). Vláda rovněž stanovuje výši zajištění, které musí pokrýt provozovatelé v případě, že poplatky plánované náklady nepokryjí, a na případné neočekávané náklady. V období 2018-2020 je „finanční částka“ tohoto zajištění na případné zvyšování nákladů 23 miliard SEK (3,1 mld. USD) a „dodatečná částka“ zajištění na nepředvídané nové náklady je 15 miliard SEK (1,6 mld. USD).

Poplatky od provozovatelů se ukládají do speciálního Fondu jaderného odpadu, který je oddělený od státního rozpočtu. Fond ke konci roku 2017 obsahoval 67 miliard SEK (7,2 mld. USD). Celkové budoucí náklady na nakládání a konečnou likvidaci veškerého radioaktivního odpadu a na vyřazení jaderných reaktorů z provozu se odhadují na 100-110 miliard SEK (10,7-11,8 mld. USD).³⁶⁴ Vzhledem k tomu, že finanční krize roku 2008 vedla k mnohem nižší než očekávané výnosnosti dlouhodobých obligací, rostlo riziko podfinancování systému.

V roce 2017 proběhla rozsáhlá novelizace zákona o financování ve snaze řešit rizika systému financování. Prostředky z Fondu jaderného odpadu lze dnes investovat do méně zabezpečených investic než jsou státní dluhopisy, čímž je umožněna vyšší výnosnost kapitálu z fondu a průmysl může se zbývajících provozovateli počítat 50 let.

Švédsko se až do nedávna snažilo hradit náklady na likvidaci historického radioaktivního odpadu pomocí samostatného zákona o Studsviku z roku 1988.³⁶⁵ I za tyto náklady byli odpovědní provozovatelé jaderných elektráren, protože je bylo možné považovat za příjemce u nejstarších činností jaderného výzkumu. Poplatek do Fondu jaderného odpadu byl v rozmezí 1-3 SEK/MWh (0,10-0,30 USD/MWh) elektřiny z jádra. Tento systém byl však na konci roku 2017 zrušen a zbývající povinnosti byly převedeny do působnosti novelizovaného zákona o financování.

SHRNUTÍ

Stávající švédský systém řízení nakládání s jaderným odpadem a jeho likvidace vznikl začátkem 80. let a klade odpovědnost za financování i realizaci jednoznačně na jaderný průmysl.

Švédsko využívá ke skladování vyhořelého jaderného paliva pouze mokrých meziskladů a všechno palivo je centralizované v jednom zařízení. Švédsko má fungující úložiště jaderného odpadu s krátkou dobou rozpadu, u kterého probíhá proces znovuudělení licence k umožnění jeho rozšíření na odpad z vyřazování z provozu.

Švédsko má pokročilé plány na hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva. Proces udělování licence je již ve stádiu rozhodování vlády. Z vědeckých kruhů se vyskytla kritika používání mědi na materiál skladovacích nádob, takže není jisté, zda bude licence nakonec udělena.

Švédský systém financování nakládání s jaderným odpadem a vyřazování reaktorů z provozu je vyspělý a transparentní. Ve fondu jaderného odpadu jsou k dispozici značné částky, i tak se ale diskutuje o rostoucím riziku podfinancování systému.

³⁶⁴ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) 2017.

³⁶⁵ Zákon se jmenuje podle zařízení jaderného výzkumu Studsvik, kde je většina historického odpadu uložena. Zákon o Studsviku. Lag (1988:1597) om finansiering av hanteringen av visst radioaktivt avfall m.m., dostupný na https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-19881597-om-finansiering-av-hanteringen-av_sfs-1988-1597

7.6 ŠVÝCARSKO

PŘEHLED

Na rozdíl od velkých zemí, jež vyvíjely a konstruovaly atomové bomby, lze Švýcarsko považovat za hráče druhé jaderné ligy. Omezená velikost země od počátku znamenala, že neměla ani finanční ani lidské zdroje na zahájení tak ambiciózního programu, jako je výstavba vysoce citlivého jaderného projektu. Nicméně po druhé světové válce se uvažovalo o jaderném vyzbrojení Švýcarska. Tato epizoda je významná tím, že měla rozhodující vliv na pozdější strukturu v jaderném sektoru země.

Ženeva se navíc od roku 1955 stala místem několika mezinárodních konferencí o jaderné energetice. Po 1. mezinárodní konferenci o atomové energii v roce 1955 získalo Švýcarsko od USA za velmi příznivých podmínek tehdy vystavovaný bazénový reaktor. Tento projekt byl základem pro vstup Švýcarska do jaderné energetiky.

V 60. letech vyvinulo Švýcarsko vlastní řadu těžkovodních reaktorů a realizovalo ji v jeskyni v katastru obce Lucens na západě země.³⁶⁶ V roce 1969, několik měsíců od zahájení provozu, došlo k částečnému roztavení jádra. Tato událost byla faktickým koncem švýcarských ambicí v oblasti jaderného zbrojení. V roce 1988 odstoupilo Švýcarsko od programu vojenských zbraní.³⁶⁷

V letech 1969–1984 bylo do sítě připojeno pět reaktorů o výkonu od 350 do 1000 megawattů v lokalitách Beznau, Leibstadt, Mühleberg a Gösgen.³⁶⁸ Od rozšíření jaderných elektráren v pěti dalších lokalitách bylo upuštěno zejména kvůli odporu, který nastal v 70. letech, a kvůli předimenzovanosti programu. Jaderná energetika dodávala v roce 2018 okolo 40 % elektřiny ve Švýcarsku.³⁶⁹ Rozšiřování jaderné energetiky v budoucnosti je nepravděpodobné. Zákon o jaderné energetice z roku 2003 stanoví nutnost všeobecné licence od Spolkové rady k výstavbě a provozu jaderného zařízení.³⁷⁰ Jaderný průmysl ve Švýcarsku usiluje o pokračování a dokončení hledání lokalit pro úložiště nízko a středněaktivního a vysokoaktivního odpadu do doby, než se stanou komerčně dostupnými nové typy reaktorů.

Švýcarsko nemá žádné uranové doly a neprovozuje obohacování uranu ani výrobu či přepracování palivových článků. V roce 2006 vstoupilo v platnost desetileté moratorium na vývoz ozářených palivových článků k přepracování a nedávno bylo prodlouženo do roku 2020.³⁷¹ V roce 2016 byl dokončen návrat přepracovaného a vitrifikovaného odpadu z přepracovacích závodů La Hague a Sellafield, čímž se pro Švýcarsko uzavřela kapitola přepracování (plutoniového palivového cyklu).³⁷²

³⁶⁶ Aemmer, F. 1992, *Geschichte der Kerntechnik in der Schweiz. Die ersten 30 Jahre 1939–1969*, Schweizerische Gesellschaft für Kernfachleute (SGK), Olynthus Verlag für verständliche Wissenschaft und Technik

³⁶⁷ Wildi, T. 2003, *Der Traum vom eigenen Reaktor*, Chronos Verlag.

³⁶⁸ Naegelin, R. 2007, *Geschichte der Sicherheitsaufsicht über die Schweizerischen Kernanlagen 1960–2003*, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen.

³⁶⁹ Statista 2019, „Anteil des atomar erzeugten Stroms an der gesamten Stromproduktion in der Schweiz von 2003 bis 2017“, cit. 10. května 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29583/umfrage/anteil-der-atomenergie-an-der-stromerzeugung-in-schweiz-seit-1998/>

³⁷⁰ Tato regulace již byla zavedena Spolkovou vyhláškou z 10. října 1978 a upravena zákonem o jaderné energetice (KEG) z 21. března 2003, články 10 a 13, jež jsou dostupné v němčině na <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20010233/201801010000/732.1.pdf>

³⁷¹ Parlament Švýcarska, *Amtliches Bulletin*, 15.079 *Moratorium für die Ausfuhr abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung, Verlängerung*, cit. 28. června 2019, <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/amtliches-bulletin/amtliches-bulletin-die-verhandlungen?SubjectId=37419>

³⁷² Nuklearforum Schweiz 2016, „Letzter Transport von Wiederaufarbeitungsabfällen in die Schweiz, 21.12.2016“, cit. 22. dubna 2019, <https://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/letzter-transport-von-wiederaufarbeitungsabfaellen-die-schweiz>

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Švýcarsko koncem 70. let začalo vyvíjet vlastní systém klasifikace odpadů, v zásadě sledující strategii dvou úložišť.³⁷³ Klasifikace se desítky let tříbí, takže nyní poskytuje údaje o objemu radioaktivního odpadu pod názvem Vzorová inventura radioaktivních materiálů (MIRAM).³⁷⁴ Švýcarsko odpad klasifikuje na základě jeho radioaktivity a rozlišuje mezi vyhořelým jaderným palivem (VJP), vitrifikovanými roztoky štěpných produktů, alfatoxickým odpadem (ATA) s hodnotami vyššími než 20 000 Bq/g a nízko a středněaktivním odpadem.³⁷⁵ Dělení se ve skutečnosti drží koncepce geologické likvidace, jež počítá pouze s těmito dvěma typy úložišť.

Odpad s krátkou a střední dobou rozpadu zahrnuje nízko a středněaktivní odpad z provozu jaderných elektráren a celý sortiment odpadu ze zdravotnictví, průmyslu a výzkumu.³⁷⁶ Druhý typ zahrnuje vysokoaktivní vyhořelé palivové články, vitrifikovaný odpad z dřívějšího přepracování a středněaktivní transuranový odpad s dlouhou dobou rozpadu. Švýcarsko v posledních letech usiluje o oddělování nízkoaktivního odpadu s velmi krátkou dobou rozpadu prostřednictvím speciálních skladů, což znamená, že tento odpad lze likvidovat bez ohledu na jeho radioaktivitu, čímž se snižuje množství odpadu určeného ke konečné likvidaci.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Švýcarský spolkový inspektorát jaderné bezpečnosti (ENSI) každoročně vykazuje počty balení odpadu uložených v meziskladech. Shrnutí inventáře meziskladů lze nalézt ve švýcarských zprávách pro zasedání Společné úmluvy.³⁷⁷ Vykazování radioaktivního odpadu ve Švýcarsku je jednodušší než v mnoha jiných zemích, protože v podstatě pochází jen ze dvou hlavních zdrojů: jednak z jaderných elektráren a jednak ze zdravotnictví, průmyslu a výzkumu.³⁷⁸ Tím se nakládání s radioaktivním odpadem oproti ostatním zemím poměrně zjednodušuje.

Švýcarský jaderný odpad je však heterogenní s ohledem na obsažené těžké kovy a organické sloučeniny. Navíc existuje několik různých typů reaktorů, používají se různé palivové články a palivo je vyhořelé v různé míře a zahrnuje i palivové články z havárie reaktoru v Lucens (roztavení jádra) a z výzkumného reaktoru DIORIT.

Následující tabulka uvádí množství odpadu v současné době uloženého v meziskladech.

³⁷³ Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und -Projektanten (GKBP), Konferenz der Überlandwerke (UeW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle 1978, *Die nukleare Entsorgung in der Schweiz*, 9. února.

³⁷⁴ Nagra 2014, *Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien MIRAM 08*, NTB 08-06.

³⁷⁵ SSwiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI) 2015, *Abfallbewirtschaftung im Vergleich, Forschungsprogramm ‚Radioaktive Abfälle‘ der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung*, Zpráva z projektu, únor, str. 53.

³⁷⁶ MAAE 2019, *Predisposal Management of Radioactive Waste from the Use of Radioactive Material in Medicine, Industry, Agriculture, Research and Education, Specific Safety Guide*, No. SG-45

³⁷⁷ Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI) 2017, *Implementation of the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, cit. 22. dubna 2019, https://www.ensi.ch/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017.pdf

³⁷⁸ Naegelin 2007

TABULKA 18: Jaderný odpad ve Švýcarsku k roku 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP + VAO	Mezisklad (mokrý a část suchá)	Skladovací bazény u reaktorů a mezisklad ZWIBEZ u elektrárny	688,8 tHM
	Mezisklad (mokrý)	JE Gösgen, skladovací bazény a doplňkové mokré skladování	238 tHM
	Mezisklad (suchý)	Centralizovaný sklad ZZL	450,4 tHM
ATA*	Mezisklad	Centralizovaný sklad ZZL	99 m ³
	Mezisklad	Centralizovaný sklad BZP (PSI)	83 m ³
LILW*	Mezisklad	U reaktoru a ZWIBEZ	3 865 m ³
	Mezisklad	Centralizovaný sklad ZZL	2 339 m ³
	Mezisklad	Centralizovaný sklad BZL (PSI)	2 109 m ³

Zdroj: Vlastní vyobrazení na základě ENSI (2017)

Poznámky: *ATA (alfatoxický odpad) a NSAO jsou upravené i neupravené. BZL = Bundeszwischenlager (spolkový mezisklad); PSI = Paul-Scherer-Institut; ZWIBEZ = Zwischenlager Beznau (mezisklad JE Beznau); ZZL = Zentrales Zwischenlager (centrální mezisklad)

Plutonium z přepracování se používalo do palivových článků MOX. Zásoba plutonia v roce 2013 činila jeden kilogram. Kromě toho existují zásoby 20 kg plutonia z minulosti, které byly za přísných bezpečnostních podmínek skladovány v Ústavu Paula Scherrera, načež byly v roce 2016 po smísení s uranem, čímž ztratily význam pro výrobu zbraní, konečně vyvezeny do USA.

Vedle tohoto inventáře bylo v letech 1969–1982 přes 5 000 tun radioaktivního odpadu shozeno do Atlantského oceánu.

Množství odpadu předpokládané do roku 2075 uvádí rozdělené podle kategorií a zařízení původu zprávy, které vydává Nagra, švýcarské národní družstvo pro likvidaci radioaktivního odpadu. Odhadované celkové množství jaderného odpadu vzniklého ve Švýcarsku za předpokládanou provozní životnost 60 let je cca 4 000 tun vyhořelého paliva a VAO a 63 000 m³ NSAO. Kromě toho se předpokládá 20 000 m³ NSAO ze zdravotnictví, průmyslu a výzkumu.³⁷⁹

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Ústředním strategickým nástrojem regulace radioaktivního odpadu ve Švýcarsku je zákon o jaderné energetice z roku 2003. Koncepti hlubinné geologické likvidace vypracovala Expertní skupina ke koncepci likvidace radioaktivního odpadu (EKRA).³⁸⁰

Provozovatelé jaderných elektráren a spolková vláda provozují od roku 1972 Národní družstvo pro likvidaci radioaktivního odpadu (Nagra). To je zodpovědné za plánování a realizaci likvidace jaderného odpadu a dohlíží na ně Švýcarský spolkový inspektorát jaderné bezpečnosti (ENSI). Ve fázi plánování (například v procesu výběru lokality v rámci projektu hlubinných úložišť) nemůže bezpečnostní úřad ENSI vydávat rozhodnutí, ale pouze vyjádření.³⁸¹ Za udělování licencí je odpovědný Spolkový úřad pro

³⁷⁹ Nagra, 2017, *Radioaktive Abfälle, woher, wieviel, wohin?* cit. 16. května 2019, [https://www.nagra.ch/data/documents/data-base/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d_th2_RadAbfall_2017.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/data-base/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d_th2_RadAbfall_2017.pdf)

³⁸⁰ Commission for Radioactive Waste Disposal Concepts (EKRA) 2000, *Final Report: Disposal Concepts for Radioactive Waste*, Federal Office of Energy, Bern

³⁸¹ Munz, M. 2016 Interpelace ve švýcarském parlamentu dne 14. 12. 2016, číslo 16.4056, *Hat das ENSI im Sachplanverfahren geologische Tiefenlager Beratungs- und Aufsichtsfunktion*. Spolková rada odpověděla dne 15. února 2017.

energetiku a Ministerstvo životního prostředí, dopravy, energetiky a komunikací (DETEC). Jako poradní orgán v programu funguje Komise pro jadernou bezpečnost a oficiální rozhodnutí činí Spolková rada nebo DETEC.

Odpad se zpočátku několik let skladuje v bazénech u jaderných elektráren a poté se přepravuje do meziskladů. Pro vysokoaktivní odpad existují tři mezisklady:

- mezisklad Gösgen pro mokré skladování vyhořelého paliva z jaderné elektrárny Gösgen
- mezisklad ZWIBEZ v Beznau pro mokré skladování vyhořelého paliva z elektráren Beznau ve skladovacích kontejnerech
- mezisklad ZWILAG ve Würenlingen, centrální mezisklad pro vysokoaktivní odpad a pro vitrifikovaný sklad z dřívějšího přepracování

Nízko a středněaktivní odpad se skladují v různých lokalitách v blízkosti elektráren a v meziskladu ZWILAG. Kromě toho nedaleko meziskladu ZWILAG ve Würenlingen existuje spolkový mezisklad, který přijímá odpad ze zdravotnictví, průmyslu a výzkumu.

Skladové kapacity jsou celkově dostatečné. Dočasné skladování ve Švýcarsku však představuje jiné výzvy, jako je například rozdělení odpadu mezi různými závody a zařízeními a samozřejmě dočasnost skladování v meziskladech. Zvláště při delších časových úsecích vedou tyto podmínky ke zvyšování rizik.

Švýcarsko v roce 2008 zahájilo oborový proces vyhledávání hlubinných úložišť. Jeho cílem je určení jednoho nebo více hlubinných úložišť radioaktivního odpadu ve třech fázích.³⁸² Horninové prostředí zvolené pro vysokoaktivní odpad je opálový jíl, přibližně 100 metrů silná vrstva jílu ležící v pokryvu usazenin nad krystalinikem. Vybrány byly tři lokality podél hranice s Německem, přičemž prioritní je curyšská vinařská oblast v blízkosti města Schaffhausen. Výstavba, uzavírání a monitorování úložišť má odhadem trvat déle než sto let. Koncepce hlubinných úložišť má umožnit případné vyzvednutí odpadu do konce provozu.

Plán hlubinných úložišť má zaručit rozsáhlou účast regionálního i místního obyvatelstva. V praxi se to však omezuje na nabízení veřejných slyšení a poskytování informací. Rozhodnutí, zejména v otázkách bezpečnosti a lokality, činí výlučně Nagra nebo úřady. Nagra očekává, že úložiště bude k dispozici nejdříve v roce 2060.³⁸³

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Ve Švýcarsku se uplatňuje princip *znečišťovatel platí*: původci odpadu jsou odpovědní za realizaci programů nakládání s odpady. Hlavními původci jsou jaderné elektrárny, z nichž většinu přímo nebo nepřímo vlastní veřejný sektor.

Švýcarská vláda v letech 1984 a 2000 ustavila dva fondy: jeden k financování vyřazování z provozu a druhý k financování likvidace odpadu. Za dohled nad fondy je zodpovědná Spolková rada. Dohlíží nad správní komisí Fondu pro vyřazování jaderných zařízení z provozu a Fondu pro likvidaci odpadů z jaderných elektráren (STENFO).³⁸⁴ STENFO poskytuje každých pět let aktualizace odhadů nákladů na vyřazování z provozu a likvidaci odpadu.

³⁸² ENSI webová stránka nedatováno, *Sectoral Plan for Deep Geological Repositories*, cit. 28. června 2019, <https://www.ensi.ch/en/waste-disposal/deep-geological-repository/sectoral-plan-for-deep-geological-repositories-sgt>

³⁸³ Nagra 2016, *Waste Management Report 2016 from the Waste Producers*, Technical Report 16-01E

³⁸⁴ STENFO, Fond pro vyřazování jaderných zařízení z provozu a Fond pro likvidaci odpadů z jaderných elektráren, viz <http://www.stenfo.ch/en/Home>

Provozovatelé jaderných elektráren musí platit poplatky do obou fondů. Poplatky se vypočítávají tak, aby hradily odhadované náklady po předpokládanou dobu provozu 50 let.³⁸⁵ Do roku 2018 provozovatelé zaplatili do fondů 7,5 miliardy CHF (7,39 mld. USD) a celkově měli zaplatit 24 miliard CHF (23,76 mld. USD).³⁸⁶ Výpočty nákladů podléhají neustálým změnám.

Odhady nákladů na vyřazování z provozu a likvidaci odpadů však za posledních 30 let vzrostly více než desateronásobně. Provozovatelé počátkem 80. let předpokládali, že vyřazování z provozu a likvidace budou stát cca 2 miliardy CHF (1,97 mld. USD). Do roku 1994 již Nagra odhadovala samotnou likvidaci na 4 miliardy CHF (3,94 mld. USD). Dnes se celkové náklady za provozní dobu 50 let odhadují na cca 25 miliard CHF (24,63 mld. USD) a další 2,5 miliardy CHF (2,46 mld. USD) za odpad typu ZPV.³⁸⁷ Výpočty prováděné univerzitou v Oxfordu ukazují ještě vyšší náklady.³⁸⁸

Jedním důvodem nejistoty odhadů nákladů je nedostatek zkušeností a referenčních projektů.³⁸⁹ To platí především u nákladů na likvidaci, u kterých jsou k dispozici pouze tunelové referenční projekty, což je rozhodně slabinou těchto odhadů. Navíc náklady se počítají výlučně pro projekty hlubinných úložišť v hloubce okolo 500 metrů. Ostatní varianty hlubinného ukládání (například možnost hlubinných vrtů) se nezapočítávají.

³⁸⁵ Vláda Švýcarska 2007, *Verordnung über den Stilllegungsfonds und den Entsorgungsfonds für Kernanlagen*, cit. 22. dubna 2019, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20070457/index.html>

³⁸⁶ Swiss Nuclear 2019, *Stand der Stilllegungs- und Entsorgungsfonds*, cit. 22. dubna April 2019, <http://www.swissnuclear.ch/de/Stand-Stilllegungs-und-Entsorgungsfonds.html>

³⁸⁷ Swiss Federal Office of Public Health 2018, *Der Bund aktualisiert seine Kostenschätzungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle*, 30. listopadu, cit. 22. dubna 2019, https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radioaktive-materialien-abfaelle/entsorgung-von-radioaktiven-abfaellen/der_bund_aktualisiert_seine_kostenschaetzungen_fuer_die_entsorgung_radioaktiver_abfaelle.html

³⁸⁸ Budzier, A. a kol. 2018, *Oxford Global Projects, Quantitative Cost and Schedule Risk Analysis of Nuclear Waste Storage*, Schweizerische Energie-Stiftung, cit. 22. dubna 2019, <https://www.energiestiftung.ch/files/energiestiftung/fliesstextbilder/Studien/QRA%20Report%20V1.0.pdf>

³⁸⁹ Schweizerische Energie-Stiftung, *Atommüll müsste massiv teurer sein*, cit. 22. dubna 2019, <https://www.energiestiftung.ch/atomenergie-kosten.html>

SHRNUTÍ

Nakládání s radioaktivním odpadem ve Švýcarsku se drží mezinárodní praxe, kterou koordinují především velké mezinárodní organizace (MAAE, NEA/OECD). Švýcarsko jako malá země na poli jaderné energie nikdy nehrála vedoucí úlohu, ale v podstatě se držela zahraniční praxe.

Základní koncepcí konečné likvidace ve Švýcarsku je koncepce několikanásobné bariéry. Postupný odklon od přepracování koncem 70. let vedl k zásadní změně strategií ukládání vysokoaktivního odpadu. Namísto vitrifikace vysokoaktivního odpadu z přepracování bylo nutno vyhořelé palivové články balit do speciálních skladovacích kontejnerů vyrobených z oceli nebo v kombinaci s mědí.

Švýcarsko je i po více než 50 letech svého jaderného programu stejně jako řada jiných zemí stále ve velmi rané fázi svého programu likvidace odpadů. Vysokoaktivní odpad a vyhořelé palivo se mezitím nadále skladují v meziskladech, zatímco nízko a středněaktivní odpad se většinou upravují a ukládají v centrálních zařízeních pro dočasné skladování. Švýcarská koncepce úložišť vychází z původní švédské koncepce hloubky 500 metrů. Program výběru lokality probíhá a měl by být dokončen do roku 2030. Úložiště vysokoaktivního odpadu nebude k dispozici před rokem 2060.

Ve Švýcarsku se jako i jinde uplatňuje princip *znečišťovatel platí*. Provozovatelé, financování především z veřejných prostředků, nesou odpovědnost za plánování a realizaci dočasného skladování a konečné likvidace. Zajištění na likvidaci je spravováno ve dvou fondech. Celkové náklady za 50 let provozu se odhadují na minimálně 25 miliard CHF (24,63 mld. USD). Efektivnost celé švýcarské koncepce likvidace, organizace tohoto programu a modelu financování se teprve uvidí.

7.7 SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ

PŘEHLED

Spojené království patřilo mezi jednu z prvních zemí, které začaly s vývojem jaderné technologie. Prvotním účelem byla od 40. let výroba jaderných zbraní a lokalita Sellafield (dříve Windscale) v severozápadní Anglii sloužila k výstavbě tzv. „Windscaleských komínů“, v nichž se vyrábělo plutonium do zbraní. Poté následoval vývoj dvouúčelových reaktorů, jež sloužily jak k výrobě plutonia do zbraní, tak i k výrobě elektrické energie.³⁹⁰

Británie prošla třemi zřetelně oddělenými fázemi vývoje energetických reaktorů. Jako první vznikla na základě dvouúčelových reaktorů technologie Magnox. Reaktory pracovaly s přírodním uranem a byly moderovány grafitem a chlazeny oxidem uhličitým. Dnes jsou všechny uzavřeny. Druhá generace rovněž vycházela z grafitu a chlazení plynem, tzv. pokročilé plynem chlazené reaktory (AGR), které dnes pracují s obohaceným uranem.³⁹¹ Třetí, zkrácená fáze, spočívala v dovozu tlakovodních reaktorů (1997), z nichž jeden byl dokončen v roce 1997. Jaderné elektrárny na vrcholu svých sil v roce 1998 dodávaly 28 % elektrické energie vyrobené v Británii, tento podíl však postupně klesal až na 21 % v roce 2017 kvůli odstavování starých elektráren a problémům s dostupností stárnoucích bloků.^{392, 393}

Po dlouhé odmlce se nyní staví blok Hinkley Point C, evropský tlakovodní reaktor (EPR) podobné konstrukce jako dřívější PWR. Přestože možná vznikne ještě pět dalších velkých jaderných elektráren, v současnosti o tom panují pochyby, neboť stavební investoři zastavili práce kvůli údajným finančním problémům.³⁹⁴

Demontáž starých jaderných konstrukcí je pomalý proces. „Péče a údržba“³⁹⁵ (pojem používaný v Británii) je stav, kdy jsou z místa reaktoru odstraněny všechny budovy kromě samotné reaktorovny, konstrukcí bazénů a skladů nízko a středněaktivního odpadu (SAO). Tato zbývající zařízení se potom zajistí proti povětrnostním vlivům. Předpokládá se jejich demontáž za zhruba 80 let. Stav „péče a údržba“ dosud dosáhla pouze jediná elektrárna typu Magnox a britský Úřad pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (NDA) předpokládá, že ostatní jej dosáhnou do roku 2029.³⁹⁶

Ve Spojeném království se nachází široké spektrum dalších jaderných staveb. Kromě zařízení k výrobě jaderných zbraní k nim patří dva rychlé množivé reaktory, několik prototypů reaktorů a mnoho dalších výzkumných zařízení. V Británii se nikdy netěžil ani neupravoval uran, ale jsou tu závody všech ostatních fází jaderného palivového cyklu. K nim patří úprava, obohacování a výroba jaderného paliva a též přepracování vyhořelého paliva k separaci plutonia a uranu. Británie provozovala dva velké přepracovací závody v Sellafieldu. Jeden z nich, B205, je konstruován k přepracování kovových paliv z reaktorů Magnox; provoz zahájil v roce 1962 a uzavřen má být v roce 2020. Druhým je závod na přepracování

³⁹⁰ Pocock, R.F. 1977. *Nuclear power. Its development in the United Kingdom*. Gresham Books

³⁹¹ MacKerron, G. and Sadnicki, M. 1995, *UK nuclear privatisation and public sector liabilities* (No. 4). University of Sussex, Science Policy Research Unit.

³⁹² Department of Energy and Climate Change 2009, *60th Anniversary Digest of UK Energy Statistics*, str. 40.

³⁹³ Department of Energy, Industry and Industrial Strategy 2018, *Digest of Energy Statistics 2018*, str. 117.

³⁹⁴ Vaughan, A. 2019 'UK's nuclear plans in doubt after report Welsh plant may be axed,' *The Guardian*, cit. 22. dubna 2019, <https://www.theguardian.com/environment/2018/dec/10/uk-nuclear-plant-hitachi-wylfa-anglesey>

³⁹⁵ Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 2018, *Business Plan 1 April 2018 to 31 March 2021*, cit. 28. června 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/695245/NDA_Business_Plan_2018_to_2021.pdf, str. 9

³⁹⁶ Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 2018

tepelných oxidů (THORP), spuštěný v roce 1994 a uzavřený v roce 2018.³⁹⁷ Závod THORP přepracoval značné množství zahraničního paliva, zejména z Japonska a z Německa, ale jeho hlavní činností vždy bylo přepracování britského paliva z reaktorů AGR. Jeho plná kapacita nebyla využívána a uzavřen byl v důsledku komerčních a technických problémů. V Británii se též nachází fungující suchý sklad paliva v Sizewellu a zařízení k likvidaci nízkoaktivního odpadu (NAO) v Driggu nedaleko Sellafieldu a v Dounreay ve Skotsku.

Lokalita Sellafield je zvláště složitá a nachází se zde stovky opuštěných budov a skladišť. Zbývá spousta práce, než se podaří všechen odpad, který se tu nachází, alespoň popsat, nemluvě o tom, aby s ním bylo bezpečně naloženo.³⁹⁸ Jako většina ostatních zemí i Spojené království plánuje k likvidaci středněaktivního odpadu (SAO) a vysokoaktivního odpadu (VAO) využít hlubinné likvidace (DGD), ale pokrok je dosud nepatrný. Strategie Skotska se od zbytku Spojeného království liší, neboť předpokládá pří-povrchovou likvidaci veškerého jaderného odpadu na svém území.³⁹⁹

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Britský systém klasifikace odpadu je velmi podobný systému MAAE. Kategorie se primárně zakládají na úrovních aktivity bez výslovného zohlednění, zda se jedná o odpad s krátkou dobou rozpadu. Jsou následující:⁴⁰⁰

- Velmi nízkoaktivní odpad (VNAO): odpad s dostatečně nízkou úrovní radioaktivity, aby jej bylo možno likvidovat především na licencovaných skládkách odpadu.
- Nízkoaktivní odpad (NAO): odpad s nízkou úrovní radioaktivity, který je ještě nutno likvidovat v umělých mělkých úložištích.
- Středněaktivní odpad (SAO): obsahuje aktivitu nad horní hranicí pro NAO, ale neuvolňuje teplo.
- Vysokoaktivní odpad (VAO): vzniká přepracováním vyhořelého paliva, uvolňuje teplo a zároveň je vysoce radioaktivní.

Definice toho, co je a co není odpad, se liší v jednotlivých zemích a v čase. Stejně jako ve Francii, ani britská strategie neuznává separované plutonium, vyhořelé palivo a ochuzený nebo přepracovaný uran jako odpad, takže se nezahrnují do oficiálního inventáře odpadů. Toto rozhodnutí se oficiálně odůvodňuje tím, že tyto materiály je možné v budoucnosti použít k výrobě jaderného paliva. Takové využití má však k jistotě daleko, a i kdyby se všechen materiál použil při výrobě paliva, vedlo by to ke vzniku dalšího odpadu, jenž se v oficiálním britském inventáři odpadů rovněž nevyskytuje.

³⁹⁷ Vláda Spojeného království 2018, *End of reprocessing at THORP signals new era for Sellafield*, cit. 5. dubna 2019, <https://www.gov.uk/government/news/end-of-reprocessing-at-thorp-signals-new-era-for-sellafield>

³⁹⁸ National Audit Office (NAO) 2018, *The Nuclear Decommissioning Authority: progress with reducing risk*. HC 1126, cit. 22. dubna 2019, <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/The-Nuclear-Decommissioning-Authority-progress-with-reducing-risk-at-Sellafield.pdf>

³⁹⁹ Vláda Skotska 2011, *Scotland's higher activity radioactive waste policy*, cit. 22. dubna 2019, <https://www.gov.scot/publications/scotlands-higher-activity-radioactive-waste-policy-2011/>

⁴⁰⁰ Department of Business Energy and Industrial Strategy (BEIS) and NDA 2017, *Radioactive wastes in the UK: UK radioactive waste inventory report*, cit. 22. dubna 2019, <https://ukinventory.nda.gov.uk>

MNOŽSTVÍ ODPADU

Britská vláda vydává inventuru odpadů každé tři roky. Níže uvedené údaje pocházejí z nejnovější evidence, která zahrnuje objem odpadů a jejich aktivitu ke dni 1. dubna 2016 a předpokládaný budoucí objem. Inventura se vyznačuje následujícími zvláštnostmi:

- Rozeznává mnoho různých typů odpadu (celkem 1 337). Tyto typy jsou rozděleny do 24 skupin.
- Vysoký podíl všeho jaderného odpadu je v „surové“ formě (britský termín je „nahlášená“ forma). Jde o odpad, který dosud nebyl upraven ani zabalen. Ze všech 24 „skupin“ odpadu je pouze jedna popsána jako „upravený odpad“. Přestože podíl odpadu v této surové podobě není uveden, zdá se pravděpodobné, že bude dělat hodně přes polovinu celkového objemu.
- Inventura nezahrnuje kapalně a plynně vypouštěné odpady, takže sestává pouze z různých forem tuhého odpadu.
- Většina odpadu podle úrovně aktivity (58 %) se soustřeďuje v Sellafieldu (pouze 0,03 % bylo ve vojenských lokalitách).
- Odpady zahraničních vlastníků nejsou v britské inventuře zahrnuty. Některé smlouvy o výměně mezi britskou vládou a vládami zahraničních zemí-vlastníků odpadu drženého ve Spojeném království stanoví, že vlastnické země obdrží stejné množství radioaktivity, jaké obsahovalo původní vyhořelé palivo. Tyto vrácené odpady však budou v podobě VAO, tedy mnohem menšího objemu než jednotlivé typy odpadu vznikající přepracováním tohoto paliva.

Protože Británie nebude mít ještě desítky let funkční zařízení DGD, po sobě jdoucí britské inventury ukazují, že se nadále hromadí objem i aktivita odpadu vyšších kategorií, jež vyžadují stále větší kapacitu meziskladů.

Následující tabulka uvádí objemy a hmotnosti jaderného odpadu ve skladech k 1. dubnu 2016. VAO vzniká výhradně jako vedlejší produkt přepracování a v současné době se skladuje v Sellafieldu. Tento odpad je zpočátku v podobě vysoce aktivní kyseliny dusičné (vysokoaktivní roztok, HAL), která prochází procesem odpařování a poté se vitrifikuje do bloků skla uvnitř nerezových nádob.

SAO je mnohem rozmanitější a ani pro něj v současnosti neexistuje způsob likvidace, takže se musí skladovat. Zhruba 74 % SAO podle objemu je v Sellafieldu. Téměř celý zbytek je u elektráren. Pokud dochází k balení odpadu, může jít o cementování (uvnitř ocelových nebo betonových kontejnerů) nebo fixování v polymeru uvnitř kontejnerů z nízkouhlíkové oceli. NAO a VNAO se běžně likvidují, takže jejich objem aktuálně čekající na likvidaci je malý.

TABULKA 19: Jaderný odpad ve Spojeném království ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Typ skladování	Skladovací lokalita	Množství
VJP (VAO)	Mezisklad (mokrý)	Skladovací bazény u jaderných elektráren	3 549 tHM
	Mezisklad (mokrý)	Sellafield	4 151 tHM
VAO	Mezisklad	Sellafield	1 960 m ³
ILW	Mezisklad	Sellafield, Aldermaston, Dounreay, Harwell, JE	99 000 m ³
LLW	Mezisklad	Sellafield, Capenhurst, Dounreay	30 100 m ³
	Likvidovaný odpad	Uzavřené (2005) přípovrchové úložiště v Dounreay	33 600 m ³
	Likvidovaný odpad	Nové přípovrchové úložiště v Dounreay	3 130 m ³
	Likvidovaný odpad	Přípovrchové úložiště NAO v Driggu	905 000 m ³
VNAO	Mezisklad		935 m ³
	Skládky		n.a.

Zdroj: Vlastní sestavení podle BEIS/NDA 2017, Naumann 2010

Poznámky: Nezahrnuje plutonium a uran. Spojené království neklasifikuje vyhořelé jaderné palivo, uran ani plutonium jako odpady

Význam SAO, a především VAO se odvíjí od jejich vysoké úrovně radioaktivity oproti NAO a VNAO. VAO obsahuje převážnou většinu aktivity v britském inventáři, z níž se většina bude v nejbližších sto letech snižovat v důsledku radioaktivního rozpadu, přestože zbudou radionuklidy s velmi dlouhou dobou rozpadu, které bude nutno izolovat po tisíce let.

MNOŽSTVÍ DALŠÍCH RADIOAKTIVNÍCH MATERIÁLŮ NEKLASIFIKOVANÝCH JAKO ODPAD

Spojené království v dnešní době neklasifikuje uran, separované plutonium ani vyhořelé palivo jako odpad, protože plutonium a uran by se v budoucnosti mohly použít jako suroviny na jaderné palivo. V praxi je však velmi nepravděpodobné, že k takovému využití dojde, a tyto materiály budou pravděpodobně někdy v budoucnosti řešeny jako odpady. V *tabulce 19* je VJP zahrnuto. Britské zásoby separovaného plutonia budou po ukončení přepracování v roce 2020 činit 140 tun, z nichž 23 bude v zahraničním vlastnictví. Jedná se o největší zásobu civilního separovaného plutonia na světě.⁴⁰¹ V Británii se k měsíci dubnu 2016 rovněž nacházelo 113 000 tHM přírodního, ochuzeného a přepracovaného uranu, téměř všechen v Sellafieldu. Většina z této velmi velké zásoby sestávala z ochuzeného uranu po obohacování.⁴⁰²

Jakmile budou konečně překlasifikovány jako odpad, plutonium, vyhořelé palivo a uran celkově velmi značně navýší jak aktivitu (vyhořelé palivo a plutonium), tak i objem (uran) britského jaderného odpadu, přičemž stávající politika tuto vysoce pravděpodobnou skutečnost přehlíží. Britská inventura též předpokládá vznik velmi velkého množství odpadu mezi lety 2016 a 2125. Při množině budoucích scénářů, které nepředpokládají žádnou novou výstavbu jaderných elektráren, je očekávaný objem odpadu v budoucnosti následovný:⁴⁰³

⁴⁰¹ NDA 2019, *Progress on plutonium conditioning, storage and disposal*, cit. 22. dubna 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/791046/Progress_on_Plutonium.pdf

⁴⁰² Department for Business, Energy and Industrial Strategy, and NDA, 2017, *Radioactive Wastes in the UK: Radioactive Wastes and Materials not Reported in the 2016 Waste Inventory*, březen, str. 16.

⁴⁰³ Department for Business Energy and Industrial Strategy 2017, *Radioactive Wastes in the UK: UK Radioactive Waste Inventory Report*, str. 23.

- VAO 366 m³
- SAO 299 000 m³
- NAO 1 570 000 m³
- VNAO 2 720 000 m³

Budoucí objem VAO je relativně malý, protože přepracování má v budoucnosti omezenou životnost. Nárůst objemu SAO se však předpokládá zhruba trojnásobný a NAO zhruba 1,5násobný. Většina tohoto budoucího odpadu bude pocházet z vyřazování z provozu elektráren a zařízení v Sellafieldu (ty mají představovat 62 % všeho budoucího SAO, 84 % budoucího NAO a 95 % budoucího VNAO).

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

V Británii vznikl od 40. let vojenský odpad a od 50. let civilní odpad. NAO se vždy likvidoval formou mělkého skládkování. Jedinou skutečnou strategií nakládání s ostatním případným odpadem byl závazek přepracovávat všechno vyhořelé palivo. Přepracování bylo založeno na přesvědčení, že plutonium bude nakonec potřebné na výrobu zbraní a později bude možná nutné jako palivo pro rychlé množivé reaktory. Toto druhé zdůvodnění se rozplynulo a od vývoje rychlých reaktorů bylo v roce 1994 upuštěno, ačkoli přepracování pokračovalo.⁴⁰⁴ Veškerý SAO se řešil meziskladováním.

Strategie nakládání s odpady o vyšší aktivitě byla zanedbávána až do 70. let, kdy Královská komise k znečišťování životního prostředí doporučila pozastavení dalšího rozvoje jaderné energetiky, dokud nebudou prokázány důvěryhodné způsoby nakládání s odpady.⁴⁰⁵ To vedlo k otevřené formulaci plánů na hlubinnou likvidaci SAO a případného pozdějšího VAO. Všechny pokusy o dosažení tohoto cíle skončily nezdarem kvůli odporu v místech navrhovaných lokalit.

V roce 2006 se nezávislá Komise k nakládání s radioaktivním odpadem (CoRWM) vyjádřila ve prospěch hlubinné likvidace (DGD) všeho odpadu o vyšší aktivitě.⁴⁰⁶ Zároveň doporučila odolné mezisklady a nový dobrovolný proces, v němž by místní obyvatelstvo bylo přizváno k vyjednání podmínek, za nichž by pro ně byla přijatelná výstavba DGD. Vláda se v roce 2008 rozhodla tento obecný přístup podpořit a podnikla jeden vážný (ale neúspěšný) pokus o přesvědčení obcí v okolí Sellafieldu k souhlasu s umístěním DGD.⁴⁰⁷ K začátku roku 2019 se vláda zapojila do obnoveného procesu, jehož cílem je nalezení obce ochotné přijmout hlubinné úložiště.⁴⁰⁸

Za politiku nakládání s jaderným odpadem odpovídá britské Ministerstvo energetické a průmyslové strategie (BEIS). S uzavřením elektráren Magnox a nedobrým a zhoršujícím se stavem závodu Sellafield bylo začátkem 21. století jasné, že k zvládnutí odpadu v krátkodobém a střednědobém horizontu je zapotřebí formulovat smysluplnější politiku a zajistit vyšší výdaje. Energetický zákon z roku 2004 zajistil základ pro zřízení Úřadu pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (NDA) v roce 2005.⁴⁰⁹ Jeho

⁴⁰⁴ International Panel on Fissile Materials 2015, *Plutonium separation in nuclear power programs: Status, problems, and prospects of civilian reprocessing around the world*.

⁴⁰⁵ Royal Commission on Environmental Pollution 1976, *Nuclear power and the environment: 6th report of the Royal Commission on Environmental Pollution*, Cm 6618

⁴⁰⁶ Committee on Radioactive Waste Management 2006, *Managing our radioactive waste safely: CoRWM's recommendations to Government Doc 700*

⁴⁰⁷ Defra, BERR and the devolved administrations of Wales and Northern Ireland 2008, *Managing our radioactive waste safely: a framework for implementing geological disposal*, cit. 24. dubna 2019, <https://www.gov.uk/government/publications/managing-radioactive-waste-safely-a-framework-for-implementing-geological-disposal>

⁴⁰⁸ World Nuclear News 2018, „UK relaunched repository site selection process,” 20. prosince, cit. 22. dubna 2019, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK-relaunched-repository-site-selection-process>

⁴⁰⁹ Vláda Spojeného království 2004, *Energy Act*, cit. 28. června 2019, <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2004/20/contents>

smyslem je zajištění vyřazení z provozu a likvidace škod ve všech jaderných lokalitách ve veřejném vlastnictví a též dlouhodobé nakládání s jaderným odpadem. Jedná se o první instituci založenou v Británii, jejímž prvořadým smyslem je nakládání s jaderným odpadem.

NDA uznala, že nejproblematictější lokalitou je Sellafield, který obsahuje obrovské množství bývalých vojenských i civilních budov a odpadů. Sellafield obsahuje čtyři takzvané historické laguny a zásobníky, z nichž všechny představují významné riziko, a zároveň se zde nachází prakticky všechno britské vyhořelé palivo, z něhož většina se zde přepracovává. To znamená, že likvidace škod v Sellafieldu je pro NDA nejvyšší prioritou.⁴¹⁰

NDA se pokouší inovovat správu jaderných lokalit, kterých je nyní vlastníkem. Zejména pořádá soutěže o stanovení „Ústředních organizací“ (PBO) k dohledu nad prací firem licencovaných k asanaci jednotlivých lokalit po určenou dobu. Tyto soutěže byly navrženy tak, aby vedly ke snižování nákladů a využití širší mezinárodní odbornosti. Tento model však nefungoval dobře a NDA přebrala přímou zodpovědnost za řízení dvou největších úkolů v oblasti vyřazování z provozu a nakládání s odpady v Británii: lokality Sellafield a lokalit reaktorů Magnox.⁴¹¹

Británie kromě konečných úložišť NAO blízko Sellafieldu a v Dounreay nemá žádné dlouhodobé úložiště. U všech ostatních odpadů se na mnoha místech uplatňuje dočasné skladování, jak ukazuje tabulka 19, přestože většina všeho odpadu, co do objemu i aktivity, se nachází v Sellafieldu.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Celkové náklady na nakládání se vším britským jaderným odpadem jsou velmi vysoké. NDA uvádí odhady budoucích nákladů z veřejného sektoru na „historický“ odpad. Tato stará zátěž zahrnuje odpad, který buď vznikl v minulosti, nebo je nevyhnutelný v budoucnosti (hlavně kvůli nutnosti vyřazení mnoha jaderných staveb z provozu). NDA odhadovala k roku 2006 nediskontované budoucí náklady na tento úkol ve výši 53 miliard liber (cca 98 mld. USD v cenách roku 2006). Do roku 2018 narostla tato částka na 121 miliard GBP (162 mld. USD), z čehož náklady na Sellafield, kde se tento nárůst soustřeďoval, byly předpokládány ve výši 91 miliard GBP (121 mld. USD). V současné době NDA pracuje s rozpětím nejistoty hlavního odhadu 99–225 miliard liber (129–292 mld. USD).⁴¹² Výdaje se předpokládají zhruba do roku 2125.

Historie financování nakládání s odpady v Británii není nijak závratná. Země zřizovala malé oddělené fondy pro nakládání s odpady z veřejného sektoru vždy jen na velmi krátkou dobu a ode všech upustila. V současné době jsou tři různé systémy financování:

- Hlavním systémem pro odpady z veřejného sektoru jsou roční vládní dotace, přičemž žádný fond k hrazení likvidace těchto odpadů neexistuje. Tato dotace financuje NDA a doplňuje ji příjem, který má NDA za poskytované služby, například přepracování a dlouhodobé skladování vyhořelého paliva. V letech 2017–18 dělal tento komerční příjem celkem 1,2 miliardy liber (1,5 mld. USD), z čehož většina byla za služby spojené s vyhořelým palivem. Vládní dotace činila 2,1 miliardy liber (2,7 mld. USD), takže celkové výdaje v letech 2017–18 byly 3,3 mld GBP (4,3 mld. USD). Z toho šedesát procent šlo na Sellafield. Celkové roční výdaje NDA jsou již několik let okolo 3 miliard liber (3,9 mld. USD). Komerční příjmy za služby v oblasti vyhořelého paliva v budoucnosti prudce klesnou kvůli uzavření veškerého přepracování v roce 2020.

⁴¹⁰ National Audit Office (NAO) 2018, část 2.

⁴¹¹ James, S. 2018, „Magnox becomes NDA subsidiary,” *Nuclear Matters*, 4. července, cit. 22. dubna 2019, www.nuclearmatters.co.uk/2018/07/magnox-becomes-nda-subsidiary

⁴¹² NDA 2018, Annual Report and Accounts 2017, viewed 22 April 2019, <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2017-to-2018>

- Druhý systém financování je Fond jaderných závazků (NLF), nezávislá nadace, jejíž skutečné prostředky jsou v současné době 9,26 miliardy liber (12 mld. USD).⁴¹³ Využívají se k vyřazování z provozu a nakládání s odpady v soukromém vlastnictví, tj. z reaktorů AGR (nezahrnuje však trvalé platby NDA za vyhořelé palivo z AGR). Všechny tyto reaktory vlastní EDF Energy. Předpokládá se, že fond pokryje diskontovanou hodnotu závazků EDF Energy. Způsobilost výdajů musí schválit fond. Protože reaktory jsou stále v provozu, jsou zatím výdaje z fondu omezené, především na suchý mezisklad vyhořelého paliva v Sizewellu.
- Třetí systém je plánovaný Fond vyřazování z provozu, který se bude týkat všech nových reaktorů. Vlastníci reaktorů mají vypracovat plán, který podléhá schválení vlády. Pokrývá všechny budoucí závazky a má zajistit, aby vlastníci reaktorů nesli úplné náklady na vyřazování z provozu a nakládání s odpady.⁴¹⁴ Součástí této úpravy bude systém, v něm se stanoví cena za přesun odpadu v budoucnosti, kdy po odstavení reaktorů budou vlastníci platit britské vládě za převzetí vlastnictví odpadu. Záměr je zajistit, aby tato cena byla dost vysoká, aby více než pokryla veškeré následné náklady na nakládání s odpady.

SHRNUTÍ

V Británii existuje historická zátěž více než 1 300 typů odpadu a strategií vždy bylo spíše přehlížení aktivního nakládání s odpady a vyřazování z provozu, a to až do vzniku Úřadu pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (NDA) v roce 2005. Předpokládá se, že budoucí objem odpadů do roku 2125 bude výrazně větší než inventář roku 2016 a v budoucnosti vznikne i více odpadu z vyřazování z provozu.

Výdaje potřebné k zvládnutí těchto odpadů jsou nesmírně vysoké a samotný úkol je velmi náročný. Větší část budoucích výdajů na nakládání s odpady bude pocházet z veřejných výdajů a předpokládá se, že přesáhne 120 miliard liber (156 mld. USD). Vyhořelé palivo, separované plutonium a uran se v Británii nepovažují za odpad, což znamená, že skutečný objem odpadů je vyšší než činí oficiální odhad. Stejně jako v jiných zemích, má se i zde uplatňovat u odpadu vyšších stupňů aktivity hlubinné ukládání. Pokrok je však pomalý a žádné úložiště pravděpodobně před rokem 2040 k dispozici nebude.

⁴¹³ Nuclear Liabilities Fund 2018, *Protecting the future: Annual Report and Accounts 2018*, cit. 22. dubna 2019, http://www.nlf.uk.net/media/1076/nlf_annual_report_2018.pdf

⁴¹⁴ Vláda Spojeného království 2011, Energy Act 2008 „Funded decommissioning programme guidance for new nuclear power stations“, prosinec, část 2b

7.8 SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ

PŘEHLED

Spojené státy byly jednou z prvních zemí, která vyvíjela jadernou technologii, a to nejprve za účelem vývoje atomové bomby. Program *Atomy pro mír* přeorientoval po druhé světové válce značné výzkumné úsilí směrem k civilním programům jaderné energetiky. Americký program jaderné elektroenergetiky byl zahájen v roce 1959 elektrárnou Dresden nedaleko města Morris ve státě Illinois.⁴¹⁵ V současné době je v USA v provozu 97 reaktorů na 59 lokalitách, jež poskytují zhruba 20 % elektřiny vyrobené v zemi.⁴¹⁶ Ve výstavbě jsou jen dva reaktory, oba v elektrárně Vogtle v Georgii. Oba jsou typu Westinghouse AP-1000. Od výstavby dvou dalších reaktorů AP-1000 v Jižní Karolině bylo upuštěno v červnu 2017 kvůli stavebním problémům a překračování nákladů.⁴¹⁷

Trendem jaderné energetiky v USA je v poslední době spíše uzavírání reaktorů. Od roku 2013 již bylo trvale odstaveno osm reaktorů a u jedenácti dalších hrozí uzavření do roku 2025. Sedm jaderných elektráren je zcela vyřazeno z provozu a v lokalitách po nich zůstávají jen nezávislé sklady vyhořelého paliva. Komerční sektor provozuje jedno samostatné bazénové zařízení pro vyhořelé palivo ve městě Morris v Illinois. Šest reaktorů je uzavřeno v elektrárnách, kde jsou další reaktory v provozu. Reaktory ve čtyřech uzavřených elektrárnách se v současnosti aktivně vyřazují z provozu, zatímco pět dalších je, slovy Jaderné regulační komise (NRC), ve stavu SAFSTOR, což je inertní stav, v němž se v elektrárně provádí údržba, dokud ji nebude možné zcela vyřadit z provozu. Podle pravidel Jaderné regulační komise USA musí být elektrárny plně vyřazeny z provozu do 60 let od uzavření.⁴¹⁸

Vzhledem k dlouhé historii jaderné energetiky se v USA nachází mnoho zařízení palivového cyklu.⁴¹⁹ Na jeho samém začátku je úpravna uranové rudy v Utahu a jedenáct licencovaných zařízení pro in-situ filtraci, z nichž ale pouze pět dobývá v současné době uran (čtyři ve Wyomingu a jedno v Nebrasce).⁴²⁰ Ve dvaceti zařízeních pro regeneraci uranu probíhá vyřazování z provozu.⁴²¹ V USA se nachází jedno zařízení pro konvertování fluoridu uranového, závod Honeywell v jižním Illinois, který je od začátku roku 2018 neaktivní kvůli snížení potřeby uranu jako paliva pro reaktory.⁴²²

V současné době je v USA v provozu jeden závod na obohacování uranu, centrifugální závod Louisiana Energy Services v Eunice v Novém Mexiku. Závod vlastní evropská společnost Urenco, což znamená, že neexistuje žádný závod na obohacování uranu v čistě americkém vlastnictví. Jaderná regulační komise udělila firmě AREVA licenci na výstavbu centrifugálního závodu na obohacování uranu v Eagle Rocku ve státě Idaho a firmě GE na laserový závod v Severní Karolině, ale ani jeden závod dosud nestojí. Americký centrifugální závod v Piketonu v Ohiu i starší difuzní závody v Paducah v Kentucky a v Portsmouthu

⁴¹⁵ Walker, S.1992, *Containing the Atom: Nuclear Regulation in a Changing Environment 1963-1971*, University of California Press.

⁴¹⁶ US Nuclear Regulatory Commission (NRC) 2019, „List of Operating Power Reactors,” cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html>

⁴¹⁷ Plummer, B. 2017, ‘U.S. Nuclear Comeback Stalls As Two Reactors Are Abandoned,’ *The New York Times*, 31. července, cit. 9. května 2019, <https://www.nytimes.com/2017/07/31/climate/nuclear-power-project-canceled-in-south-carolina.html>

⁴¹⁸ NRC 2019, *Background on Decommissioning Nuclear Power Plants*, cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>

⁴¹⁹ NRC 2019, „Fuel Cycle Facilities,” cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>.

⁴²⁰ US Energy Information Administration 2019, *Domestic Uranium Production Report – Quarterly*, cit. 9. května 2019, <https://www.eia.gov/uranium/production/quarterly/>.

⁴²¹ NRC 2019, *Locations of Uranium Recovery Sites Undergoing Decommissioning*, cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/uranium/>

⁴²² NRC 2018. *January 11th Letter from Jeff Fulks, Plant Manager, Honeywell Conversion Plant to Craig Erlanger*, cit. 28. června 2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1802/ML18023A384.pdf>

v Ohiu jsou všechny zavřené.⁴²³ Komerční vyhořelé palivo se v letech 1966–1972 krátce přepracovávalo v rámci pilotního projektu ve West Valley ve státě New York a tato lokalita dnes obsahuje značné množství vysoko i nízkoaktivního jaderného odpadu..

V USA se vyrábí jak nízkoobohacené, tak i vysokoobohacené uranové palivo, přestože tuzemské komerční reaktory jsou všechny lehkovodního typu a pracují pouze s nízkoobohaceným palivem. Nízkoobohacené jaderné palivo se v současné době vyrábí v následujících závodech: Global Nuclear Fuel Americas ve Wilmingtonu v Severní Karolině, Westinghouse Columbia Fuel Fabrication Facility v Columbii v Jižní Karolině a závod firmy Framatome v Richlandu ve státě Washington. Závod firmy AREVA v Lynchburgu ve Virginii je již uzavřen. Nízko i vysokoobohacené uranové palivo se vyrábí v závodě Nuclear Fuel Services v Erwinu v Tennessee a v závodě BWXT Nuclear Operations Group v Lynchburgu ve Virginii.

SYSTÉM KLASIFIKACE ODPADU

Systém klasifikace odpadu v USA se liší od systému Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) i řady ostatních zemí. Vzhledem k dlouhé historii vývoje jaderných zbraní v USA je zde větší rozmanitost druhů odpadu než v ostatních zemích, jež mají pouze komerční jadernou energetiku. K nakládání s tímto materiálem vyvinuly USA složitý systém klasifikace, který je zakotven v zákonech i v regulaci. V USA se nachází vyhořelé jaderné palivo, vysokoaktivní jaderný odpad z přepracování vyhořelého jaderného paliva (z něhož naprostá většina je v komplexu pro vývoj jaderných zbraní) a transuranový odpad, což je kategorie vyhrazená pouze pro odpad v komplexu pro vývoj jaderných zbraní.⁴²⁴ Tento odpad je nutno likvidovat v hlubinném úložišti. Odpad spojený s komplexem pro vývoj jaderných zbraní zahrnuje i relativně novou kategorii označenou „odpad provázející přepracování“. Tento materiál představuje z větší části „sedlinu“ z vysokoaktivního kalu z odpadních nádrží z přepracování vyhořelého paliva a dobývání plutonia na jaderné zbraně. Odstranění této sedliny z nádrží je obtížné a nákladné. Americké Ministerstvo energetiky proto plánuje tuto sedlinu v části podzemních nádrží ponechat, zalít cementovou kaší a poté vyrovnat koncentraci radionuklidů v celém objemu nádrží tak, aby bylo dosaženo průměrných koncentrací charakteristických pro nízkoaktivní odpad (NAO).⁴²⁵

Nízkoaktivní jaderný odpad se v USA definuje negativně. Podle zákona jde o materiál, který není napříkladem vyhořelé palivo, vysokoaktivní odpad (VAO) ani vedlejší produkt. Nízkoaktivní odpad se v USA dělí do čtyř podkategorií, a to nepřímě na základě původu materiálu. Zda daný odpad spadá do třídy A, B, C nebo „třídy vyšší než C“, závisí na přítomnosti určitých klíčových radionuklidů a na poločas rozpadu těchto radionuklidů.⁴²⁶ Odpad třídy A, B a C lze likvidovat v mělkých skládkách. Ministerstvo energetiky a Jaderná regulační komise v současné době určují, zda odpad „třídy vyšší než C“ je nutno likvidovat ve větších hloubkách.

Kritika systému klasifikace odpadu v USA se zaměřuje na skutečnost, že systém se zakládá na původu odpadu a nikoli na jeho rizikovitosti. Například VAO a odpad třídy A mohou obsahovat stejné radionuklidy, ale protože VAO pochází z přepracování vyhořelého paliva, je nutno jej likvidovat jinak než odpad

⁴²³ NRC 2019, Fuel Cycle Facilities, cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>

⁴²⁴ US Transuranic waste contains „transuranic“ elements, those with atomic numbers larger than uranium, at concentrations Transuranový odpad v USA představuje „transuranové“ články, články s atomovými čísly vyššími než má uran v koncentraci vyšší než 10 nanocurie na 1 gram. Viz NRC 2018, *Greater Than Class C and Transuranic Waste*, Federal Register, 83FR6475, 14. února, str. 6475–6477, cit. 9. května 2019, <https://www.federalregister.gov/documents/2018/02/14/2018-03085/greater-than-class-c-and-transuranic-waste>

⁴²⁵ Macfarlane, A. 2019 ‘Incidental’ nuclear waste: reconceiving a problem won’t make it go away, *the Bulletin of the Atomic Scientists*, 31. ledna, cit. 9. května 2019, <https://thebulletin.org/2019/01/incidental-nuclear-waste-reconceiving-a-problem-wont-make-it-go-away/>

⁴²⁶ NRC vypracovala tabulku a podrobný algoritmus k správnému stanovení třídy odpadu v 10. Věstníku federálních předpisů v oddíle 61.55.

třídy A.⁴²⁷ K dalším kategoriím odpadu v USA patří jalovina z mletí a ochuzený uran. Druhý z nich pravděpodobně není vhodný pro mělké skládování.

MNOŽSTVÍ ODPADU

Přestože neexistuje žádná ucelená účetní evidence, je pravděpodobné, že v USA se nachází největší a nejrozmanitější objem jaderného odpadu na světě. Neexistují žádné oficiální zprávy o objemu vyhořelého paliva v komerčním sektoru, protože regulátor nevyžaduje vykazování objemu vyhořelého paliva. Inventury ostatních druhů odpadu se zveřejňují sporadicky v různých vládních dokumentech. S touto výhradou tabulka 20 uvádí odhad objemu jednotlivých druhů odpadu v USA. Federální vláda vlastní velké množství vysokoaktivního, transuranového a nízkoaktivního odpadu v řadě různých zařízení. Veškerý vysokoaktivní odpad a vyhořelé palivo zůstávají v režimu dočasného skladování. Část transuranového odpadu z vojenských lokalit již byla trvale zlikvidována v rámci Pilotního projektu izolace odpadu (WIPP), což je zařízení k hlubinné geologické likvidaci (DGD) na jihovýchodě Nového Mexika, a též v tzv. Národní bezpečnostní lokalitě v Nevadě. Nízkoaktivní odpad se likviduje v 18 různých vládních zařízeních v USA. Jalovina z mletí zahrnuje státní i komerční odpad.

Vyhořelé palivo v komerčním sektoru zůstává v jaderných elektrárnách, v chladicích bazénech nebo v suchých meziskladech. Vyhořelé palivo se skladuje rovněž u výzkumných a zkušebních reaktorů a reaktorů k výrobě izotopů. Odpad třídy A, B a Ca nízkoaktivní odpad se likvidují v mnoha zařízeních, ale odpad „třídy vyšší než C“ zůstává v meziskladech, kde čeká na rozhodnutí o způsobu likvidace.

TABULKA 20: Jaderný odpad ve Spojených státech ke dni 31. prosince 2016

Typ odpadu	Množství ve skladech	Množství zlikvidované
VLASTNÍK: VLÁDA USA		
VAO a VJP	14 000 tun	-
TRU (WIPP)	64 630 m ^{3**}	93 500 m ^{3***}
TRU (Nevada, uzavřený závod)	-	200 m ³
Ochuzený uran	75 296 tun	-
Jalovina z mletí	228 milionů tun	-
NAO (třídy A, B, C)*	17 milionů m ³	-
VLASTNÍK: KOMERČNÍ PROVOZOVATELÉ		
VJP (VAO)	81 518 tun****	-
VJP (univerzitní výzkumné reaktory)	1 042 kgU	-
VJP (výzkum a zařízení palivového cyklu)	79 kgU	-
NAO (lokalita v provozu)	-	4,8 milionů m ³
NAO (uzavřené lokality)	-	438 000 m ³
GTCC	-	130 m ³

Zdroje: Sestaveno podle údajů US General Accounting Office (2019), Department of Energy (2009, 2017, 2018 a 2019) a Nuclear Energy Institute (2018)

Poznámky: *Nezahrnuje dalších 129 reaktorových oddílů v přípovrchové likvidaci ve vládních zařízeních

**Ke dni 31. prosince 2017

***K červnu 2018

****Ke dni 31. prosince 2018

TRU = transuranový odpad, WIPP = Pilotní projekt izolace odpadu, GTCC = radioaktivní odpad třídy vyšší než C

⁴²⁷ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012, *Report to the Secretary of Energy*, cit. 9. května 2019, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf

Odhady budoucího množství odpadu nejsou k dispozici. Nicméně velký lehkovodní reaktor produkuje každoročně okolo 20 metrických tun vyhořelého paliva. Tím pádem se objem vyhořelého paliva v USA zvyšuje o cca 2 000 metrických tun ročně.

STRATEGIE A ZAŘÍZENÍ K NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

Nakládání s jaderným odpadem v USA se řídí celou řadou zákonů a předpisů. V komerčním sektoru je za nakládání a likvidaci vysokoaktivního jaderného odpadu včetně vyhořelého jaderného paliva z komerčních reaktorů ze zákona odpovědné Ministerstvo energetiky, zatímco s nízkoaktivním odpadem nakládají soukromé subjekty. Nakládání s vysoko i nízkoaktivním odpadem a jeho likvidaci reguluje Jaderná regulační komise.

Po zkoušce „mírového“ jaderného zařízení v Indii v roce 1974 byla v USA zavedena politika odložení přepracování komerčního vyhořelého jaderného paliva „na neurčito“. Přestože tuto politiku různí (nejčastěji republikánští) prezidenti otáčeli, přepracování vyhořelého paliva v USA nikdy nebylo ekonomicky schůdnou možností nakládání s odpadem. Pilotní projekt ve West Valley sice v letech 1966–1972 zahrnoval přepracování určitého množství vyhořelého paliva, ale nikdy nebyl ekonomicky úspěšný. Vlastnictví této lokality mezitím přešlo na Ministerstvo energetiky.

Likvidace vysokoaktivního odpadu v USA se řídí zákonem o politice jaderného odpadu z roku 1982 ve znění novely z roku 1987. Zákon zavedl nutnost hlubinného geologického ukládání (DGD) komerčního vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivního odpadu z komplexu pro vývoj jaderných zbraní. Zavedl povinnost Jaderné regulační komise USA vydat licenci na provoz úložiště, jehož lokalitu vybere a jež bude provozovat Ministerstvo energetiky na základě radiačních standardů vypracovaných Agenturou ochrany životního prostředí USA. Zákon o politice jaderného odpadu zavedl „standardní smlouvu“, podle které držitelé licence zůstávají vlastníky vyhořelého paliva do doby, kdy jej převezme Ministerstvo energetiky, až bude nutno jej přepravit z lokality do konečného úložiště. Vyhořelé palivo v současné době zůstává u reaktorů s výjimkou malých množství vyhořelého paliva přesouvaného k reaktorům vlastněným energetickými firmami nebo do centrálního skladu vlastněného energetickou firmou (zařízení Morris v Illinois).

Kongres USA v novelách zákona o politice jaderného odpadu vybral lokalitu Yucca Mountain v Nevadě jako jedinou lokalitu pro posouzení vhodnosti pro DGD. Ministerstvo energetiky podalo Jaderné regulační komisi žádost o licenci k výstavbě úložiště v roce 2008, ale administrativa prezidenta Obamy žádost o licenci v roce 2009 stáhla, zrušila Úřad pro nakládání s civilním radioaktivním odpadem při Ministerstvu energetiky USA a místo něho zřídilo Komisi k jaderné budoucnosti USA „Blue Ribbon“ k vypracování nové strategie pro konečnou část jaderného palivového cyklu. Komise „Blue Ribbon“ v roce 2012 vydala zprávu, která zdůraznila naléhavou nutnost DGD a požadavek, aby se výběr lokality uskutečnil metodou nalezení shody.⁴²⁸ Ačkoli zákon o politice jaderného odpadu je stále platný, Kongres je v současné době nejednotný v otázce dalšího osudu lokality Yucca Mountain.

Horninové prostředí úložiště Yucca Mountain je sopečný tuf (ztuhlý popel) nacházející se v seizmicky a vulkanicky aktivní oblasti. Horizont úložiště by se oproti požadavkům programů hledání úložišť v ostatních zemích nacházel nad hladinou podzemní vody v geochemicky oxidujícím prostředí. Samotnou lokalitu vybralo Ministerstvo energetiky spolu se třemi dalšími lokalitami, k nimž patřily čediče podél řeky Columbia nedaleko lokality Hanford v Richlandu ve státě Washington a ložiska kamenné soli v severním Texasu. Původní zákon o politice jaderného odpadu požadoval souběžnou charakteristiku všech tří lokalit, ale Kongres se v novele zákona zaměřil výlučně na lokalitu Yucca Mountain. Stát Nevada

⁴²⁸ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future 2012

soustavně vystupuje proti výběru této lokality, a to od schválení novely zákona v roce 1987, o které mluví jako o „zákoně o odrbání Nevady“.

Vyhořelé palivo se v jaderných elektrárnách skladuje buď v chladicích bazénech u reaktorů, z nichž většina se musela přerovnat tak, aby se skladovací kapacita navýšila téměř na čtyřnásobek původní velikosti, nebo v suchých meziskladech.⁴²⁹ Bazény na vyhořelé palivo jsou v mnoha elektrárnách téměř plné. V důsledku toho se v 56 z celkem 59 jaderných elektráren v USA uplatňuje nějaký druh suchého skladování.⁴³⁰ Některé elektrárny nedodržují princip vykládání celého obsahu aktivní zóny reaktoru, protože to žádný předpis nevyžaduje. Předpisy nevyžadují ani vykazování množství vyhořelého paliva, ani způsob nakládání s vyhořelým palivem v bazénech. Kvůli tomu není známo, zda elektrárny naposledy vyjmuté vyhořelé palivo rozptylují po celém bazénu nebo je umísťují do jedné části bazénu, a vláda nemá žádné oficiální přehledy o objemu vyhořelého paliva u reaktorů.

Jaderná regulační komise obdržela v nedávné době dvě žádosti o vydání licence k výstavbě centralizovaných skladů vyhořelého paliva, a to od firmy Holtec International na jihovýchodě Nového Mexika nedaleko lokality WIPP a od firmy Waste Control Specialists nedaleko zařízení k likvidaci nízkoaktivního odpadu ve městě Andrews v Texasu. Jaderná regulační komise vydala v roce 2006 licenci na centralizovaný sklad nedaleko Salt Lake City v Utahu, ale stát i federální Ministerstvo vnitra zabránily uvedení lokality do provozu.⁴³¹

V USA se nachází jediné funkční hlubinné úložiště na celém světě: Pilotní projekt izolace odpadu (Waste Isolation Pilot Project, WIPP). Zařízení, které se nachází v hloubce 600 metrů v ložisku kamenné soli, likviduje transuranový odpad ze zařízení komplexu pro výrobu jaderných zbraní nedaleko Carlsbadu v Novém Mexiku. K umístění lokality WIPP se dobrovolně přihlásila zdejší obec v 70. letech a odpad začala přijímat v roce 1999. Zdejší obec vyjadřuje úložišti silnou podporu, její školy prošly výrazným vylepšením a zažívá značné rozšíření občanské vybavenosti s tím, jak se do terénní kanceláře Ministerstva energetiky v Carlsbadu přistěhovalo množství kancelářských pracovníků. Obec zůstává zařízení příznivě nakloněna i po havárii v roce 2014, při níž došlo k úniku radioaktivity a zařízení muselo být přes dva roky uzavřeno.

Likvidace nízkoaktivního odpadu v USA se řídí zákonem o politice nízkoaktivního odpadu z roku 1980 ve znění novely z roku 1985. Tento zákon stanoví, že likvidaci svého nízkoaktivního odpadu musí řídit a spravovat jednotlivé státy, avšak mají možnost vytvářet „pakty“ s dalšími státy. Prostřednictvím těchto paktů mělo dojít k výběru jedné lokality, v jednom ze států paktu, k umístění zařízení k likvidaci. Vzniklo deset paktů, přičemž deset států se nepřidalo k žádnému z paktů. Pouze tři pakty vedly k úspěšnému zřízení nových zařízení k likvidaci nízkoaktivního odpadu.

Čtyři zařízení k likvidaci nízkoaktivního odpadu v USA jsou již uzavřeny:

- zařízení Maxey Flats v Kentucky, jež bylo v provozu v letech 1963–1977, vlastnila jej firma NECO (nyní US Ecology) a způsobilo rozsáhlou kontaminaci půdy, povrchové vody i podzemních vod

⁴²⁹ Alvarez, R a kol. 2003, Reducing the hazards from stored spent power reactor fuel in the United States, *Science and Global Security*, 11(1), str. 1–51.

⁴³⁰ NRC 2019, *US Independent Spent Fuel Storage Installations*, cit. 9. května 2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1907/ML19071A163.pdf>

⁴³¹ *World Nuclear News* 2013, 'Cancellation leaves no options for US nuclear waste,' 4. ledna, cit. 9. května 2019, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cancellation-leaves-no-options-for-US-waste>

- zařízení Sheffield v Illinois, v provozu v letech 1967-1978, vlastníkem byla rovněž NECO
- zařízení ve West Valley ve státě New York bylo uzavřeno v roce 1975;
- zařízení v Beatty v Nevadě bylo v provozu v letech 1962-1993, vlastníkem byla firma US Ecology

V provozu jsou v současnosti další čtyři zařízení k likvidaci nízkoaktivního odpadu. Dvě z nich, Barnwell v Jižní Karolině, provozované firmou Energy Solutions, a Richland ve státě Washington, provozované firmou US Ecology, přijímají odpad pouze ze států svého paktu. Zařízení Clive v Utahu, vlastněné firmou Energy Solutions, přijímá odpad ze všech států a zařízení firmy Waste Control Solutions v Andrews v Texasu přijímá po dohodě i odpad ze států mimo svůj pakt.

NÁKLADY A FINANCOVÁNÍ

Likvidaci vysokoaktivního jaderného odpadu podporuje Fond jaderného odpadu, který byl zřízen v roce 1982 zákonem o politice jaderného odpadu. Tyto peníze jsou vyhrazeny výlučně na vývoj hlubinného úložiště vysokoaktivního odpadu. Fond ukládá plátcům za elektřinu poplatek 1 USD/MWh a spravuje jej Kongres. Fond za dobu své existence nashromáždil přes 34,3 miliardy USD.

Přestože byl fond zamýšlen jako svěřenecký účet, Kongres s jeho pomocí kompenzuje zadluženost USA. S penězi vybíranými do fondu se nakládá jako s výnosem z daní, zatímco peníze vyčleňované z fondu podléhají výdajovým omezením. Pro Kongres je kvůli tomu obtížné dodávat v případě nutnosti finanční prostředky. Peníze se však již ve fondu neshromažďují v důsledku federální žaloby na Ministerstvo energetiky z roku 2013, protože nedělalo dostatečně velký pokrok při odstraňování paliva z elektráren.⁴³² Ministerstvo energetiky odhadlo v roce 2008 náklady na likvidaci vysokoaktivního odpadu z USA v úložišti Yucca Mountain na 96 miliard dolarů.⁴³³ Ministerstvo energetiky již na výstavbu úložiště Yucca Mountain vynaložilo přibližně 15 miliard USD.

Finanční obraz jaderných elektráren v USA je složitější kvůli tzv. „standardním smlouvám“ obsaženým v zákoně o politice jaderného odpadu. Podle zákona bylo Ministerstvo energetiky povinné začít přejímat vlastnická práva k vyhořelému palivu u reaktorů do 31. ledna 1998 a přepravovat je do geologického úložiště. K tomu samozřejmě nedošlo a smlouva byla porušena. Americké soudy rozhodly ve prospěch držitelů licencí na provoz elektráren, kterým se nyní vyplácí kompenzace. Americké Ministerstvo spravedlnosti spravuje soudní fond z peněz daňových poplatníků ve výši cca 2 milionů dolarů denně pro všechny jaderné elektrárny, které vládu žalovaly o navrácení finančních prostředků, ať již v provozu či uzavřené, z něhož jim pomáhá nakládat s jejich vyhořelým jaderným palivem.⁴³⁴

Všichni držitelé licencí na provoz jaderných elektráren jsou povinni dokládat vlastnictví dostatečných finančních prostředků na vyřazení svých reaktorů z provozu po jejich konečném odstavení. Většina elektráren shromažďuje nezbytné prostředky po dobu své životnosti. Každé dva roky ohlašují částku svých prostředků na vyřazování z provozu Jaderné regulační komisi, která jejich dostatečnost posuzuje pomocí algoritmu. Finanční prostředky na vyřazování z provozu není možné využívat na nakládání s vyhořelým jaderným palivem.

⁴³² Ewing, R. a kol. 2018, 'Reset of America's Nuclear Waste Management, Strategy and Policy,' Stanford University, George Washington University, 15. října, cit. 9. května 2019, https://fsi-live.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/reset_report_2018_final.pdf

⁴³³ US Department of Energy 2008, Revised Total System Life Cycle Cost Estimate and Fee Adequacy Report for Yucca Mountain Project, cit. 9. května 2019, <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-releases-revised-total-system-life-cycle-cost-estimate-and-fee>

⁴³⁴ Dillon, J. 2019, 'Perry: „We have to find a solution,”' Energywire, 27. března, cit. 9. května 2019, <https://www.eenews.net/energywire/stories/1060130031>

SHRNUTÍ

USA mají ze všech zemí nejnáročnější úkol nakládání se svým jaderným odpadem. Nejenže tu existuje velké množství odpadu z komerčního provozu, ale impozantní množství nesmírně obtížně likvidovatelných odpadových materiálů vyprodukoval i komplex pro výrobu jaderných zbraní. Nakládání se vším tímto odpadem a jeho likvidace bude trvat mnoho desítek let a bude stát stovky miliard dolarů. Spojené státy z větší části vyřešily problém nakládání s nízkoaktivním odpadem, ale se středně a vysokoaktivním odpadem se teprve musí vypořádat. V blízké budoucnosti není zřejmé žádné jednoznačné řešení.



8 TABULKA ZKRATEK

ZKRATKA DRUH ODPADU

VNAO	Velmi nízkoaktivní odpad
VKDO	Odpad s velmi krátkou dobou rozpadu
NAO	Nízkoaktivní odpad
NAO-DD	Nízkoaktivní odpad s dlouhou dobou rozpadu
NAO-KD	Nízkoaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu
NSAO	Nízko a středněaktivní odpad
NSAO-DD	Nízko a středněaktivní odpad s dlouhou dobou rozpadu
NSAO-KD	Nízko a středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu
SAO	Středněaktivní odpad
SAO-DD	Středněaktivní odpad s dlouhou dobou rozpadu
SAO-KD	Středněaktivní odpad s krátkou dobou rozpadu
VAO	Vysokoaktivní odpad

ZKRATKA NÁZEV V ČEŠTINĚ (A PŘÍPADNĚ V PŮVODNÍM JAZYCE)

ABWR	Pokročilý varný reaktor
AGR	Pokročilý plynem chlazený reaktor
AKEND	Pracovní skupina pro výběr lokalit pro úložiště (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte)
ANDRA	Francouzská národní agentura pro nakládání s radioaktivním odpadem (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs)
ASN	Francouzský úřad pro jadernou bezpečnost (Autorité de Sûreté Nucléaire)
ATA	Alfatoxický odpad
BEIS	Britské Ministerstvo energetické a průmyslové strategie (Department of Business Energy and Industrial Strategy)
BFE	Německý spolkový úřad pro bezpečnost nakládání s jaderným odpadem (Bundesgesellschaft für kernteschnische Entsorgungssicherheit)
BFS	Německý spolkový úřad radiační ochrany (Bundesamt für Strahlenschutz)
BGE	Německá spolková firma pro likvidaci odpadů (Bundesgesellschaft für Endlagerung)
BGZ	Německá spolková firma pro dočasné skladování (Gesellschaft für Zwischenlagerung)
BRC	Pod limitem regulace (Below Regulatory Control; termín používaný v USA pro kategorii MAAE „Vyňato“)
BWR	Varný reaktor
BZL	Federální mezisklad ve Švýcarsku (Bundeszwischenlager)
CCSE	Italský Fond kompenzací v energetice (La Cassa conguaglio per il settore elettrico)
CDD	Francouzská Národní komise pro udržitelný rozvoj a územní plánování (Commission du Développement durable et de l'Aménagement du territoire de l'Assemblée nationale française)

CEA	Francouzská Komise pro atomovou energii a alternativní energie (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)
CORWM	Britská Komise pro nakládání s radioaktivním odpadem (Committee on Radioactive Waste Management)
CSM	Skladovací centrum La Manche, Francie (Centre stockage de la Manche)
CTS	Centralizovaný mezisklad
DEFRA	Britské Ministerstvo životního prostředí, potravinářství a venkova (Department for Environment, Food and Rural Affairs)
DETEC	Švýcarské Ministerstvo životního prostředí, dopravy, energetiky a komunikací (Department of the Environment, Transport, Energy and Communication)
DGD	Hlubinná geologická likvidace
DOE	Ministerstvo energetiky USA (Department of Energy)
EDF	Francouzská národní energetická společnost (Électricité de France)
EDF Energy	Britská dceřiná společnost francouzské Électricité de France
EKRA	Švýcarská Komise pro koncepci likvidace jaderného odpadu (Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle)
ENSI	Švýcarský spolkový inspektorát jaderné bezpečnosti (Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat)
EPR	Evropský tlakovodní reaktor
EURATOM	Evropské společenství pro atomovou energii (European Atomic Energy Community)
FBR	Rychlý množivý reaktor
GCR	Plynem chlazený reaktor
GW	Gigawatty (instalovaného výkonu)
GWh	Gigawatthodiny (vyrobené elektřiny)
HAL	Vysoce aktivní roztok, termín se používá pro kyselinu dusičnou
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICPE	Francouzské klasifikované zařízení pro ochranu životního prostředí (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement)
ISDC	Mezinárodní struktura oceňování vyřazování z provozu (International Structure for Decommissioning Costing)
KEG	Švýcarský zákon o jaderné energetice (Kernenergiegesetz)
LLWR	Úložiště nízkoaktivního odpadu
LWR	Lehkovodní reaktor
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MIRAM	Švýcarská vzorková inventura radioaktivních materiálů (Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien)
MOX	Smíšené oxidické palivo
MVP	Mezisklad vyhořelého paliva
MW	Megawatty (instalovaného výkonu)
MWh	Megawatthodiny (vyrobené elektřiny)
NAGRA	Švýcarské Národní družstvo pro likvidaci radioaktivního odpadu (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle)

NAO	Britský Národní kontrolní úřad (National Audit Office)
NBC	Německá Národní komise pro občanskou společnost (National Begleitsgremium)
NDA	Britský Úřad pro vyřazování jaderných zařízení z provozu (Nuclear Decommissioning Authority)
NEA	Agentura pro jadernou energetiku OECD (Nuclear Energy Agency)
NLF	Britský Fond jaderného ručení (Nuclear Liabilities Fund)
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
P+T	Rozdělování a transmutace
PBO	Ústřední organizace (v Británii; Parent body organisation)
PHWR	Těžkovodní reaktor
PIMCU	Ruská akciová společnost Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union
PNGMDR	Francouzský Národní plán nakládání s jaderným materiálem a radioaktivním odpadem (Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs)
PSI	Institut Paula Scherera
PWR	Tlakovodní reaktor
RBMK	Lehkovodní grafitový reaktor
SFL	Švédské konečné úložiště radioaktivního odpadu s dlouhou dobou rozpadu (Slutförvar för långlivat [radioaktivt avfall])
SFR	Švédské konečné úložiště radioaktivního odpadu s krátkou dobou rozpadu (Slutförvar för [kortlivat] radioaktivt [avfall])
SKB	Švédská společnost pro nakládání s jaderným palivem a odpadem (Svensk Kärnbränslehantering)
SSM	Švédský Úřad pro radiační bezpečnost (Strålsäkerhetsmyndigheten)
STENFO	Švýcarský Fond pro vyřazování jaderných zařízení z provozu
SÚRAO	Česká Správa úložišť radioaktivních odpadů a Fond pro likvidaci odpadů z jaderných elektráren
SVAFO	Švédská společnost pro likvidaci jaderného odpadu
t HM	Tun těžkých kovů
THORP	Britský závod na přepracování tepelných oxidů (Thermal Oxide Reprocessing Plant)
UNGG	Grafitový plynem chlazený uranový reaktor (Uranium Naturel Graphite Gaz)
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
WIPP	Pilotní projekt izolace odpadů v USA (Waste Isolation Pilot Project)
WNWR	Zpráva o jaderném odpadu ve světě (World Nuclear Waste Report)
ZPV	Zdravotnictví, průmysl a výzkum
ZWIBEZ	Mezisklad u JE Beznau (Zwischenlager Beznau)
ZZL	Švýcarský centrální mezisklad (Zentrales Zwischenlager)



9 PŘÍSPĚVATELÉ

MANON BESNARD je jaderná inženýrka z francouzské Národní vysoké školy energetické, vodohospodářské a environmentální (ENSE3) při Polytechnickém institutu v Grenoblu, od roku 2014 pracuje jako expertka na jádro a energetiku ve francouzské neziskové poradenské agentuře WISE-Paris (World Information Service on Energy). Zaměřuje se na otázky jaderné bezpečnosti a nakládání s odpady. Je členkou stálých poradenských expertních skupin francouzského Úřadu pro jadernou bezpečnost (ASN) v oblasti radioaktivního odpadu (GPD) a vyřazování z provozu (GPDEM).

MARCOS BUSER, narozen v roce 1949, je geolog a sociolog, přes 40 let pracuje v oblasti jaderné energetiky a likvidace chemotoxických nebezpečných odpadů. Řídil velké odpadové projekty ve Švýcarsku a v sousedních státech a úzce spolupracoval s univerzitami, výzkumnými ústavy, mezinárodními institucemi, vládními agenturami i soukromými technologickými firmami. Buser byl předsedou a členem expertních komisí, jako například expertní komise pro vypracování švýcarské koncepce úložišť EKRA (1999–2002), Spolkové komise pro jadernou bezpečnost (2008–2012) a několika expertních komisí v oblasti sanace skládek průmyslového odpadu. Byl předsedou řídicího orgánu (2000–2013/2014) Mezinárodní výzkumné laboratoře Mont Terri pro vysokoaktivní odpad a působil v projektech v oblasti podzemního skladování/likvidace nebezpečných chemotoxických odpadů v bývalých dolech.

IAN FAIRLIE je nezávislý konzultant v oblasti radiace v životním prostředí s tituly z chemie a radiální biologie. Při doktorandském studiu na Imperial College v Londýně a na Princetonské univerzitě v USA se zabýval zdravotními vlivy technologií nakládání s jaderným odpadem. Dr. Fairlie byl vědeckým tajemníkem britské vládní Komise pro zkoumání radiačních rizik vnitřních záříčů (www.cerrie.org), a je i nadále konzultantem IPPNW, environmentálních nevládních organizací a místních samospráv v několika zemích.

ALLISON M. MACFARLANE je v současné době profesorkou vědecké politiky a mezinárodních vztahů na Univerzitě George Washingtona a ředitelkou Ústavu mezinárodní vědy a technologické politiky na tamní Elliottově škole mezinárodních vztahů. Dr. Macfarlane od července 2012 do prosince 2014 pracovala jako předsedkyně Jaderné regulační komise USA, má titul PhD z geologie z Massachusettského technologického institutu a BSc z geologie z Univerzity v Rochesteru. Je vědeckou pracovnící na Radcliffe College, MIT a Stanfordské a Harvardské univerzitě. Je členkou pedagogického sboru univerzity Georgia Tech a Univerzity George Masona. V letech 2010–2012 byla členkou Komise k jaderné budoucnosti USA „Blue Ribbon“, kterou zřídila administrativa prezidenta Obamy k vypracování národní strategie nakládání s vysokoaktivním jaderným odpadem.

GORDON MACKERRON je ředitelem vědeckého a technologického výzkumu na Univerzitě v Sussexu. Od dubna 2005 je ředitelem Sussexské energetické skupiny SPRU (Science Policy Research Unit) na Univerzitě v Sussexu, předtím čtyři roky působil jako pomocný ředitel londýnské společnosti NERA Economic Consulting a přes 20 let pracoval v SPRU. Je ekonom se specializací na energetickou a environmentální ekonomii a má tituly z ekonomie z Univerzit v Cambridgi a v Sussexu. Ve své akademické kariéře se specializuje na ekonomii a politiku elektroenergetiky, a především jaderné energetiky a v této oblasti významně publikuje v časopisech i rozhlasu a televizi.

YVES MARIGNAC je ředitelem organizace WISE-Paris (World Information Service on Energy), do níž vstoupil v roce 1996 po absolvování oboru vědecká informatika na Univerzitě Orsay/Paris-Sud. Svou odborností přispívá k činnosti a vydávání zpráv mnoha národních a mezinárodních organizací, akademiků, nevládních organizací a médií o rozmanitých otázkách energetiky a jaderné energetiky. V letech 2006-2013 koordinoval Mnohostrannou odbornou skupinu k uranovým dolům (GEP-Mines). Je členem Mezinárodního panelu k štěpným materiálům, který zřizuje Princetonská univerzita (IPFM), a členem stálých expertních poradních skupin ASN k otázkám reaktorů (GPR), dalších jaderných zařízení (GPU) a tlakových zařízení (GPESPN).

ESZTER MATYAS absolvovala obor politologie na Středoevropské univerzitě a Univerzitě Loránda Eötvöse (ELTE), kde se zabývala především výzkumem na poli politiky životního prostředí. V září 2019 zahájila doktorandský program v oboru environmentálních věd na Středoevropské univerzitě. Její zájem o jadernou energetiku ji přivedl do sdružení Energiaklub, kde má na starosti řízení jaderných projektů. Publikuje články o stavu životního prostředí v neliberálních demokraciích a o vlivu Ruska na jaderný průmysl. Spolu s kolegy má rozhlasový pořad o otázkách životního prostředí. Je členem týmu investigativních žurnalistů, kteří chtějí odhalovat problémy s jadernou energetikou v Maďarsku.

EDVARD SEQUENS je předsedou Calla – Sdružení za záchranu prostředí, kde působí i jako energetický konzultant. Má titul z oboru automatizace řízení systémů z Vojenské technické univerzity v Liptovském Mikuláši. Pracoval ve vládě Nezávislé expertní komisi k posouzení energetických potřeb České republiky a též jako externí konzultant pro Ministerstvo životního prostředí. Je členem Vládní komise pro udržitelnou energii. Přispěl k vypracování alternativního plánu vývoje energetiky v České republice pod názvem Chytrá energie.

JOHAN SWAHN je ředitelem MKG, švédské nevládní organizace zvané Úřad pro přezkoumání jaderného odpadu. Vede činnost organizace v oblasti přezkoumání žádosti jaderného sektoru o povolení k výstavbě konečného úložiště vyhořelého jaderného paliva ve Švédsku. Je držitelem magisterského titulu v oboru technická fyzika a doktorátu v oboru věda, technologie a globální bezpečnost z Chalmersovy technické univerzity v Göteborgu. Jeho doktorandská i postdoktorandská činnost se zaměřují na otázky nešíření jaderných zbraní a likvidace jaderného odpadu a vojenského štěpného materiálu. Před svým současným působením byl výzkumným pracovníkem a přednášejícím v oblasti energetiky, životního prostředí a globální bezpečnosti na Chalmersově technické univerzitě.

BEN WEALER je výzkumný partner v Pracovní skupině pro ekonomickou a infrastrukturní politiku (WIP) v Berlínském technologickém institutu (TU Berlín) a hostující výzkumný pracovník v Německém institutu ekonomického výzkumu (DIW) v Berlíně a zároveň badatel v nadaci Heinrich-Böll-Stiftung. Jeho výzkum se zaměřuje na ekonomiku jaderné energetiky, a především na vyřazování z provozu, nakládání s radioaktivním odpadem, novou výstavbu jaderných elektráren a otázky dvouúčelovosti jaderné energie. Je zakládajícím členem výzkumného projektu k jaderné energetice v Německu, Evropě a zahraničí, který společně uskutečňují TU Berlín a DIW Berlín a mimo jiné autorem prvního nezávislého průzkumu vyřazování německých jaderných zařízení z provozu; od roku 2018 je přispívajícím autorem Zprávy o stavu jaderné energetiky ve světě.

TIRÁŽ

Vydáno pod licencí Creative Commons:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>. Uveďte původ — je Vaší povinností uvést autorství, poskytnout s dílem odkaz na licenci a vyznačit Vámi provedené změny. Toho můžete docílit jakýmkoli rozumným způsobem, nicméně nikdy ne způsobem naznačujícím, že by poskytovatel licence schvaloval nebo podporoval Vás nebo Váš způsob užití díla. Neužívejte dílo komerčně — je zakázáno užívat dílo pro komerční účely. Nezasahujte do díla — pokud dílo zpracujete, zpracujete s jinými díly, doplníte nebo jinak změníte, nesmíte toto upravené dílo dále šířit.

ZPRÁVA O JADERNÉM ODPADU VE SVĚTĚ – ZAMĚŘENO NA EVROPU

Listopad 2019

PŘÍSPĚVATELÉ:

Manon Besnard, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison Macfarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn a Ben Wealer.

PROJEKTOVÝ TÝM:

Rebecca Harms, Mycle Schneider, Gordon MacKerron, Wolfgang Neumann, Anna Turmann a Arne Jungjohann.

ŠÉFREDAKTOR:

Arne Jungjohann

PARTNEŘI A SPONZOŘI:

Altner-Combecher Stiftung, Bäuerliche Notgemeinschaft Trebel, Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., Climate Core a skupina poslanců za Zelené/EFA v Evropském parlamentu, nadace Heinrich-Böll-Stiftung (HBS) a její kanceláře v Berlíně, Bruselu, Paříži, Praze a Washingtonu DC, KLAR! Schweiz, Annette a Wolf Römig a Swiss Energy Foundation.

DESIGN:

Agentura pro obnovitelné zdroje energie, Andra Kradolfer

TITULNÍ FOTO:

Sean Gallup/Getty Images News

Fotografie ukazuje kontejnery typu Castor naplněné vysoce radioaktivním odpadem z jaderných elektráren vyřazených z provozu u meziskladu Zwischenlager Nord v německém Lubminu dne 8. června 2011.

Tato publikace je ke stažení na WWW.WORLNUCLEARWASTEREPORT.ORG

www.WorldNuclearWasteReport.org