

Technická zpráva 525/2020

Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030

Praha, říjen 2020

NÁZEV ZPRÁVY: Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Vokál Antonín, Vondrovic Lukáš, Hausmannová Lucie, Dohnálková Markéta, Hanusová Irena, Augusta Jaromír, Konopáčová Kateřina, Urík Jozef, Kováčik Miloš, Vencel Marek, Popelová Eva, Lahodová Zdena, Mikláš Ondrej, Máčelová Martina, Sud Jaromír

Bibliografický zápis: Vokál A., Vondrovic L., Hausmannová L., Dohnálková M., Hanusová I., Augusta J., Konopáčová K., Urík J., Kováčik M., Vencel M., Popelová E., Lahodová Z., Mikláš O., Máčelová M., Sud J. (2020): Střednědobý plán výzkumu a vývoje SÚRAO pro období 2020-2030. – MS SÚRAO, TZ 525/2020, Praha.

Tato verze dokumentu nahrazuje verzi uveřejněnou 21.10. 2020, která obsahovala drobné editoriaální nedostatky.

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obsah

1	Účel dokumentu	18
2	Současný stav nakládání s VJP a RAO v ČR a základní milníky koncepce nakládání s VJP a RAO	19
3	Přístup SÚRAO k výzkumu a vývoji	23
4	Legislativní požadavky	28
5	Řízení přípravy úložišť	33
5.1	Úvod	33
5.2	Provedené práce.....	33
5.3	Plánované práce	34
6	Vývoj bezpečnostního konceptu úložiště	36
6.1	Úvod	36
6.2	Provedené práce.....	36
6.3	Plánované práce	38
7	Strategické studie	39
8	Inventář a vlastnosti radioaktivního odpadu	40
8.1	Úvod	40
8.2	Provedené práce.....	41
8.3	Plánované práce	45
9	Geologická charakterizace lokalit pro umístění HÚ a výběr finální a záložní lokality	47
9.1	Úvod	47
9.2	Geologický popis lokalit.....	49
9.2.1	Provedené práce.....	49
9.2.2	Plánované práce	52
9.3	Hydrogeologický a hydrologický popis lokalit.....	58
9.3.1	Provedené práce.....	58
9.3.2	Plánované práce	58
9.4	Transportní vlastnosti lokalit	61
9.4.1	Provedené práce.....	61
9.4.2	Plánované práce	62
9.5	Geomechanický popis lokalit.....	63
9.5.1	Provedené práce.....	63
9.5.2	Plánované práce	64

9.6	Tepelné vlastnosti lokalit	65
9.6.1	Provedené práce.....	65
9.6.2	Plánované práce	65
9.7	Geochemický a mikrobiologický popis lokalit.....	66
9.7.1	Provedené práce.....	66
9.7.2	Plánované práce	67
9.8	Geodynamická stabilita lokalit	68
9.8.1	Provedené práce.....	68
9.8.2	Plánované práce	70
9.9	Klimatické a doprovodné jevy.....	72
9.9.1	Provedené práce.....	72
9.9.2	Plánované práce	73
10	Příprava projektového řešení hlubinného úložiště	74
10.1	Úvod	74
10.1.1	Provedené práce.....	74
10.2	Plánované práce	77
11	Výzkum a vývoj ukládacích obalových souborů a souvisejících technologií	79
11.1	Ukládací obalový soubor pro VJP.....	79
11.1.1	Úvod	79
11.1.2	Provedené práce.....	80
11.1.3	Plánované práce	81
11.2	Výzkum a vývoj ukládacích obalových souborů pro VAO a SAO.....	83
11.2.1	Provedené práce.....	83
11.2.2	Plánované práce	84
11.3	Výzkum a vývoj UOS pro odpady z experimentálního reaktoru LVR 15.....	85
11.3.1	Úvod	85
11.3.2	Provedené práce.....	85
11.3.3	Plánované práce	85
12	Výzkum a vývoj výplní ukládacích vrtů a ukládacích tunelů.....	86
12.1	Úvod	86
12.1.1	Provedené práce.....	86
12.1.2	Plánované práce	88
13	Výzkum a vývoj ostatních inženýrských komponent hlubinného úložiště	92
	(výplně, zátky, injektáže a ostatní konstrukční prvky)	92
13.1	Úvod	92

13.1.1	Provedené práce.....	92
13.1.2	Plánované práce	93
14	Výzkum ražebních postupů výstavby úložiště a souvisejících prací	95
14.1	Úvod	95
14.2	Provedené práce.....	95
14.3	Plánované práce	95
15	Hodnocení provozní bezpečnosti.....	97
15.1	Provedené práce.....	97
15.2	Plánované práce	98
16	Hodnocení bezpečnosti přepravy obalových souborů s VJP	99
16.1	Provedené práce.....	99
16.2	Plánované práce	99
17	Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti	100
17.1	Úvod	100
17.2	Provedené práce.....	100
17.3	Plánované práce	102
17.3.1	Příprava metodiky bezpečnostního hodnocení, identifikace vybraných zařízení, bezpečnostních funkcí a odvození scénářů vývoje úložiště a jeho komponent.....	102
17.3.2	Bezpečnostní hodnocení funkčnosti a spolehlivosti bariér úložiště (Performance Assessment).....	103
17.3.3	Výzkum chování radionuklidů v navržených bariérách a úložných systémech 104	
17.3.4	Vývoj koncepčních, matematických a výpočetních programů pro bezpečnostní rozboru úložiště.....	105
17.3.5	Verifikace a validace matematických a výpočetních modelů pro bezpečnostní rozboru úložiště.....	106
17.3.6	Bezpečnostní rozboru vybraných lokalit a navržených technických řešení a provádění citlivostních rozborů a rozborů neurčitostí pro vybrané scénáře	107
18	Výzkumné práce v podzemním výzkumném pracovišti Bukov.....	108
18.1	Úvod	108
18.2	Provedené práce.....	109
18.3	Plánované práce	109
19	Vliv hlubinného úložiště na životní prostředí	112
19.1	Provedené práce.....	114
19.2	Plánované práce	114
19.2.1	Potřebné odborné studie a posudky	115
20	Výzkum a vývoj pro bezpečný provoz provozovaných úložišť RAO	119

20.1	Úvod	119
20.2	Provedené práce.....	121
20.2.1	ÚRAO Dukovany.....	121
20.2.2	ÚRAO Richard	122
20.2.3	ÚRAO Bratrství	122
20.3	Plánované práce	123
21	Ukládání odpadů typu NORM/TENORM	125
21.1	Úvod	125
21.2	Provedené práce.....	126
21.3	Plánované práce	126
22	Harmonogram výzkumných a vývojových prací	128
23	Reference.....	131

Seznam použitých zkratk:

ACED	Assessment of Chemical Evolution of ILW and HLW Disposal Cells (Dílčí projekt projektu EURAD - Ohodnocení chemického vývoje úložných prostor)
AZ	Atomový zákon (zákon č. 263/2016 Sb.)
BEACON	Bentonite Mechanical Evolution (Evropský projekt zaměřený na mechanický vývoj bentonitové bariéry)
BIOPROTA	je mezinárodní fórum pro spolupráci určené k podpoře řešení klíčových otázek v biosférických aspektech hodnocení dlouhodobého dopadu úniků kontaminantů spojených s nakládáním s radioaktivními odpady.
B(U)F	Radioaktivní zásilka typ B, (U) – jednostranně schvalovaná kompetentním orgánem země původu konstrukčního typu, F – obsah štěpných produktů
CAST	EURATOM projekt č. 604779 zaměřený na prohloubení znalostí o zdrojovém členu uhlíku C-14 v radioaktivních odpadech (CARbon 14 Source Term)
CEBAMA	CEment-BASed MAterials (EURATOM projekt určeny pro výzkum materiálů na bázi cementu používaný při nakládání s radioaktivními odpady)
CIM	Carbone – Iodine Migration (projekt v podzemní laboratoři Grimsel zaměřený na migraci uhlíku a jódu)
ČEZ	ČEZ, a.s.
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČVUT FJFI	České vysoké učení technické Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
D&B	Drilling and Blasting (trhací práce)
DB	Design Basis
DECOVALEX	DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments – Mezinárodní projekt zaměřený na vývoj a validaci modelů procesů probíhajících v úložišti
DFN	Discrete Fracture Network (puklinová síť)
DIAMO	státní podnik, se sídlem ve Stráži pod Ralskem je organizací, která realizuje zahlazování následků hornické činnosti po těžbě uranu
DONUT	Development and Improvement of Numerical methods and Tools for modelling coupled processes (Dílčí projekt projektu EURAD – Vývoj a zlepšení numerických metod a nástrojů pro modelování sdružených procesů)
DOPAS – EPSP	Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals – Experimental Pressure and Sealing Plug (Evropský projekt zaměřený na konstrukční řešení zátek pro potřeby hlubinného úložiště. Česká zátka EPSP byla realizována ve štole Josef.)
DPZ	dálkový průzkum Země

DSÚ	dotčené samosprávné úřady
DÚSC	dotčené územní samosprávné celky
EBS	Engineered Barrier System (systém inženýrských bariér)
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
EdZ	Excavated Disturbed Zone (Zóna horniny narušená hloubícími pracemi)
EDZ	Excavated Damaged Zone (Zóna horniny porušená hloubícími pracemi)
Eh	oxidačně redukční potenciál systému nebo prostředí
EIA	Environmental Impact Assessment (Vyhodnocení vlivů na životní prostředí)
ENEF	European Nuclear Energy Forum (Evropské jaderné fórum)
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
EURAD	European Joint Programme on Radioactive Waste Management (Evropský program nakládání s radioaktivními odpady)
EURO-CORDEX	Evropský projekt zaměřený na klimatické otázky (https://euro-cordex.net/060374/index.php.en)
FEP	Features, Events and Processes (vlastnosti, události a procesy)
WP-GAS	Část evropského projektu EURAD – Mechanistic understanding of gas transport in clay materials
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
HITEC	Influence of temperature on clay-based material behaviour (dílčí projekt projektu EURAD)
HK	horká komora
HotBent	Hot Bentonite (Mezinárodní projekt o chování a vlastnostech bentonitu nad 100 °C, tento full-scale experiment bude umístěn v podzemní laboratoři v Grimselu.)
HÚ	hlubinné úložiště
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
IB	inženýrská bariéra
IGD-TP	Implementing Geological Disposal for Radioactive Waste – Technology Platform (Mezinárodní technologická platforma pro geologické ukládání radioaktivního odpadu)
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control (Integrovaná prevence a omezování znečištění)

ICRP	Internal Commission on Radiological Protection (Mezinárodní komise pro radiační ochranu)
JE	jaderná elektrárna
JZ	jaderný zdroj
KMS	Knowledge management systém (řízení znalostí)
KBS-3	Švédský úložný koncept
LVR	lehkovodní výzkumný reaktor
LTD	Long Term Diffusion – Projekt v podzemní laboratoři Grimsel zaměřený porozumění difúze radionuklidů do matrice horniny
MACOTE	Material Corosion Test (test koroze materiálů) - Projekt v podzemní laboratoři Grimsel zaměřený na porozumění koroze materiálů v podmínkách hlubinného úložiště
MF ČR	Ministerstvo financí České republiky
Mock-Up CZ	Český projekt studující chování bufferu v laboratorních podmínkách do 100 °C za interakce se syntetickou granitickou vodou. Fyzikální model byl umístěn v laboratoři ČVUT.
Mock-Up Josef	Český projekt zabývající se chováním bufferu v in-situ podmínkách za teplot do 100°C. Model superkonteineru (topidlo obklopené bentonitovými bloky) byl umístěn do štoly Josef.
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MŠMT	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy
MZd	Ministerstvo zdravotnictví
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NAGRA	National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Národní sdružení pro ukládání radioaktivního odpadu)
NAO	nízkoaktivní odpady
NAPRO	národní programy
NEA	Nuclear Energy Agency
NJZ	nový jaderný zdroj
NORM	Naturally occurring radioactive materials (přírodně se vyskytující radioaktivní materiály)
NSRAO	nízkoaktivní a středněaktivní odpady
NV	nařízení vlády
OS	obalový soubor

OS ŠKODA VPVR/M	skladovací a přepravní obalový soubor vyvinutý ve spolupráci Škoda JS a.s. a ÚJV Řež, a. s.
PA	povrchový areál
PHARE	Pologne-Hongrie Actions pour la Reconversion Economique (program ES pro pomoc nově se transformujícím zemím bývalého sovětského bloku)
POS	přepravní obalový soubor
POSIVA	finská organizace pro nakládání s VJP a RAO
PS	palivový soubor
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis
PÚ ZZZK	průzkumné území pro zvláštní zásah do zemské kůry
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
RAO	radioaktivní odpady
RMR	Rock Mass Rating (hodnocení horninového masivu)
ŘSD ČR	Ředitelství silnic a dálnic České republiky
SAO	středněaktivní odpady
Sb.	Sbírka zákonů
SFC	Spent fuel calculation (Dílčí projekt projektu EURAD zaměřený na výpočty inventáře VJP)
SEA prostředí	Strategic Environmental Assessment posouzení vlivů koncepce na životní prostředí
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SRA	Strategic Research Agenda (Evropského plán výzkumu a vývoje) – plán společných výzkumných aktivit prioritní z hlediska zájmů všechny států EU)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
TAČR	Technologická agentura ČR
TAČR	Inženýrská bariéra 200 °C Český projekt zaměřený na chování bentonitové bariéry nad 100 °C. Experiment je umístěn ve štolě Josef.
TBM	Tunnel Boring Machine (plně mechanizovaná ražba)
TDS	Total Dissolved Solids (celkový počet rozpuštěných pevných látek)
TENORM	Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (Radioaktivní materiál vzniklý technologickou úpravou přírodních materiálů)

THMC	Thermal, Hydraulic, Mechanical and Chemical (teplotní, hydraulické, mechanické a chemické) procesy
ÚJV Řež	ÚJV Řež, a. s.
UOS	ukládací obalový soubor
URC	Underground Research Centre (podzemní výzkumné centrum)
ÚRAO	úložiště radioaktivního odpadu
URZ	uzavřený radioaktivní zářič
VAO	vysokoaktivní odpady
VaV	věda a výzkum
VEP	výzkumný a experimentální plán
VJP	vyhořelé jaderné palivo
VSP	Vertical Seismic Profiling (vertikální seismické profilování)
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
vyhl. č.	vyhláška číslo
WP	work package
ZBZ	zadávací bezpečnostní zpráva
z. č.	zákon číslo
ZCHÚ	zvláště chráněné území
ZIZ	zdroj ionizujícího záření
ZOPK	Zákon o ochraně přírody a krajiny
ŽP	životní prostředí

Vysvětlení pojmů:

Betonkontejner

Betonkontejner je typ ukládacího obalového souboru navrženého pro ukládání RAO nepřijatelných do přípovrchových nebo podzemních úložišť.

Bezpečnostní funkce

Bezpečnostní funkce je činnost systému, konstrukce, komponenty nebo jiné součásti jaderného zařízení, která je významná pro zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

Design Basis / Projektová východiska

Soubor informací, zejména předpokladů, podmínek, požadavků, funkcí, hodnot a stavů použitých pro projektování JZ, ze kterých vycházejí konkrétní Projektové požadavky.

Jde o informace obsahující zejména zdůvodnění konkrétních Projektových požadavků:

- využitých pro specifikaci bezpečnostních a provozních funkcí a požadavků na vlastnosti systémů, konstrukcí a komponent,
- pro řešení předpokládaných stavů JZ (normální provoz, abnormální provoz a havarijní podmínky) ve vazbě na požadované vlastnosti systémů, konstrukcí a komponent,
- pro řešení možných vnitřních a vnějších vlivů a událostí a jejich kombinací, které mohou vést k nežádoucí změně stavu JZ, a z toho plynoucí požadavky na odolnost systémů, konstrukcí a komponent,
- využitých pro specifické předpoklady a hodnoty (Kritéria přijatelnosti), představující ohraničující meze funkčnosti a bezpečnosti projektu (za kterých jsou uvedené funkce splněny), musí vycházet z legislativy, obecně uznávané praxe a/nebo musí být odvozeny z analýz, založených na výpočtech nebo experimentech a na výchozích znalostech a zkušenostech dodavatele projektu, specifické předpoklady a pravidla pro projekt JZ.

Z pohledu bezpečnosti, resp. významu lze Projektová východiska dělit na:

- Safety Design Basis (SfDB) jsou DB vztažené pro množinu těch systémů, konstrukcí a komponent, kterou stanovuje národní Regulátor a které naplňují požadavky jaderné bezpečnosti,
- Engineering Design Basis (EDB) jsou ostatní Design Basis.

Design Requirements / Projektové požadavky

Bezpečnostní, funkční a ostatní požadavky na jaderné zařízení, které vycházejí z příslušných Projektových východisek, v rámci všech stupňů projektování:

- existují v hierarchické struktuře pro úroveň jaderného zařízení (Level 1), systémů (Level 2), zařízení (Level 3), i částí zařízení (Level 4) a k nim ve stejné hierarchii i příslušná Projektová východiska,
- obecně jde o odpověď na otázku „**Jak**“, popř. „**Co**“ musí jaderné zařízení splňovat, aby bylo zajištěno plnění všech relevantních projektových funkcí. Může být naplněn popisem, graficky nebo konkrétními parametry s uvedenými číselnými limitními hodnotami, nebo rozsahem apod.

Projektový požadavek může být pro navazující úroveň Projektovým východiskem.

Efektivní dávka

Efektivní dávka je součet součinů tkáňových váhových faktorů a ekvivalentní dávky v ozářených tkáních nebo orgánech; tkáňový váhový faktor stanoví příloha č. 2 k vyhlášce č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

Fyzická ochrana

Fyzická ochrana je systém technických a organizačních opatření zabraňující neoprávněným činnostem s jaderným zařízením nebo jaderným materiálem.

Hlubinné úložiště

Hlubinným úložištěm se rozumí úložiště radioaktivního odpadu umístěné stovky metrů pod zemským povrchem a určené pro ukládání vysokoaktivního odpadu. Hlubinné úložiště je zde odlišeno od podzemního úložiště, které je definováno v § 2 vyhlášky č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, jako úložiště umístěné desítky metrů pod zemským povrchem a určené zejména pro ukládání nízkoaktivního a středněaktivního odpadu.

Charakteristiky území, při jejichž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno

Charakteristikou území k umístění hlubinného úložiště, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno podle § 18 vyhlášky č. 378/2016 Sb., je:

- a) horninové prostředí, které umožňuje migraci radioaktivních, chemických a toxických látek, které se mohou uvolnit z uloženého radioaktivního odpadu tak, že při očekávaném vývoji hlubinného úložiště dojde k většímu ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí (0,25 mSv za kalendářní rok - § 82 zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon),
- b) nemožnost vytvoření:
 - 1) komplexního prostorového modelu geologické stavby z důvodu složité geologické stavby a tektonických poměrů,
 - 2) hydrogeologického modelu v důsledku obtížné popsitelnosti a predikovatelnosti hydrogeologických poměrů území k umístění jaderného zařízení, nebo
 - 3) geomechanických a geochemických modelů území k umístění jaderného zařízení, nebo
- c) přítomnost zdrojů geotermální energie.

V § 18 vyhlášky č. 378/2016 Sb. uveden výčet vlastností území, které je třeba hodnotit, ale nejsou uvedeny hodnoty, podle kterých by bylo možno porovnávat potenciální území pro umístění hlubinného úložiště.

Charakteristika porušení území k umístění jaderného zařízení zlomem, při jejímž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno

Charakteristikou porušení území k umístění hlubinného úložiště, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno podle § 6 vyhlášky č. 378/2016 Sb. je:

- a) výskyt zóny pohybově nebo seismicky aktivního zlomu nebo jiného pohybu zemské kůry, který by mohl způsobit deformaci jaderného zařízení snižující jadernou bezpečnost, do vzdálenosti 5 km,
- b) vznik doprovodného zlomu na pozemku jaderného zařízení.

Chráněný prostor

Chráněný prostor je prostor, v němž se nalézá jaderný materiál II. kategorie, vnitřní prostor nebo životně důležitý prostor.

Indikátor vhodnosti

Parametr, který popisuje vlastnosti a stav horniny a podzemní vody, pro který existují hodnoty, jež mohou být použity v jedné nebo několika etapách prací na umístování, pro doložení, že požadavek nebo preference jsou splněny. Indikátorem vhodnosti může být i jiný parametr, který může mít jak číselné, tak logické hodnoty vyjadřující vhodnost lokality, např. projektové indikátory vhodnosti, environmentální indikátory, indikátory socio-ekonomické přijatelnosti.

Institucionální kontrola

Institucionální kontrola je soubor činností, kterými je zajišťována údržba a sledování území a vlastního úložiště radioaktivního odpadu po uzavření úložiště radioaktivního odpadu, a to po dobu stanovenou v dokumentaci pro povolovanou činnost.

Inženýrská bariéra

Člověkem vytvořená bariéra brání transportu radionuklidů či ztrátě bezpečnostní funkce bariér úložiště, například obalové soubory či těsnicí materiály.

Izolační část úložiště

Horninové prostředí s radioaktivními odpady, kde nejsou přítomny zvodnělé zlomy 3. kategorie, které by mohly představovat preferenční cestu pro migraci radionuklidů.

Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost je stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod.

Jaderné zařízení

- 1) stavba nebo provozní celek, jehož součástí je jaderný reaktor využívající štěpnou řetězovou reakci nebo jinou řetězovou jadernou reakci,
- 2) sklad vyhořelého jaderného paliva,
- 3) sklad čerstvého jaderného paliva, pokud není součástí jiného jaderného zařízení,
- 4) obohacovací závod, závod na výrobu jaderného paliva nebo závod na přepracování vyhořelého jaderného paliva,
- 5) sklad radioaktivního odpadu, s výjimkou zařízení pro skladování radioaktivních odpadů, které je součástí jiného jaderného zařízení nebo jiného pracoviště, kde se vykonává radiační činnost,
- 6) úložiště radioaktivního odpadu, s výjimkou úložiště obsahujícího výlučně přírodní radionuklidy.

Konzervativní přístup

Způsob posuzování vlivu neurčitostí znalostí, vstupních dat, použitých metod a modelů odborným odhadem nebo statistickým vyhodnocením výsledku tak, že výsledek hodnocení posuzované položky zahrnuje též jeho nejméně příznivé věrohodné varianty.

Kritérium

Standard (nástroj), podle kterého hodnotíme určitý jev, proces, skutkový stav a podobně, případně o něm rozhodujeme.

Kritéria v souladu s dokumentem IAEA rozdělujeme (IAEA,2015) následovně:

- 1) vylučující kritéria mají charakteristiky, při jejichž dosažení je úložiště zakázáno,
- 2) porovnávací kritéria nemají charakteristiky, které by vylučovaly umístění, ale charakteristiky, které jsou výhodné či nevýhodné pro plnění bezpečnostních funkcí hlubinného úložiště.

V souladu s předchozím dokumentem budeme rozdělovat kritéria na:

- 1) projektová kritéria posuzující vlastnosti lokalit z hlediska proveditelnosti úložiště v dané lokalitě,
- 2) bezpečnostní kritéria posuzující vlastnosti lokalit z hlediska bezpečnosti,
- 3) environmentální kritéria posuzující vlastnosti lokalit z hlediska vlivu na životní prostředí,
- 4) socio-ekonomická kritéria posuzující úložiště z hlediska dopadu na socio-ekonomické faktory a životní preference místních obyvatel.

Natura 2000

Soustava chráněných území (ptačí oblasti, evropsky významné lokality) na území států Evropské unie.

Obalový soubor

Obalový soubor je soubor konstrukčních dílů nezbytných k úplnému uzavření radioaktivního obsahu.

Ochrana do hloubky

Ochrana do hloubky je způsob ochrany založený na několika nezávislých úrovních stupňovitě bránících vzniku možnosti ozáření pracovníků a obyvatelstva, šíření ionizujícího záření a úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

Optimalizační mez

Efektivní dávka, která podle principu optimalizace radiační ochrany (§ 82 zákona č. 263/2016 Sb.) nesmí být překročena. V případě hlubinného úložiště jde o dávku 0,25 mSv za rok pro reprezentativní osobu.

Posuzování území k umístění jaderného zařízení

Podle vyhlášky č. 378/2016 Sb. výsledky posuzování území k umístění jaderného zařízení musí být srovnány s charakteristikami vlastností území, při jejichž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno. Posuzování musí zahrnout hodnocení:

- a) souběžného působení a vzájemného ovlivňování vlastností, jejich intenzity a doby trvání,
- b) budoucího vývoje vlastností území.

Pozemek jaderného zařízení

Část území k umístění jaderného zařízení, na které se bude ve fázích životního cyklu následujících po umístění jaderného zařízení nacházet areál jaderného zařízení.

Pracoviště IV. kategorie

Pracoviště IV. kategorie je, ve smyslu z. č. 263/2016 Sb. a jeho prováděcích vyhlášek, pracoviště s jaderným zařízením.

Projekt

Slovo projekt má dva významy, jednak jde o:

- 1) časově ohraničenou a ucelenou sadu činností a procesů, jejímž cílem je zavedení, vytvoření nebo změna něčeho konkrétního, například projekt hlubinného úložiště či
- 2) konstrukci, návrh či uspořádání hlubinného úložiště neboli anglicky design.

Místo projektu se v prvním významu tohoto slova používá rovněž termín Program, například program přípravy hlubinného úložiště.

Radiační havárie

Radiační havárie – je radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně HÚ, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo.

Radiační mimořádná událost

Radiační mimořádná událost je událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany.

Radiační ochrana

Radiační ochrana je systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzické osoby a k ochraně životního prostředí před účinky ionizujícího záření.

Radioaktivní odpad

Věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahující nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené zákonem š. 263/2016 Sb. pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.

Referenční lokalita

Lokalita či lokality, které byly vybrány pro účely přípravy projektových a bezpečnostních studií potřebných pro výběr optimálního projektového řešení. Referenční lokality jsou lokality, které byly vybrány jako nejvhodnější podle předběžného hodnocení lokalit v předchozím období výzkumných prací. Nejde však o preferenční lokality pro umístění HÚ, protože pro výběr preferenční lokality musí být ověřeny vlastnosti potenciálních lokalit získané z povrchu pomocí hlubinných vrtů a dalších geologických prací v hloubkách HÚ.

Reprezentativní osoba

Jednotlivec z obyvatelstva zastupující modelovou skupinu fyzických osob, které jsou z daného zdroje a danou cestou nejvíce ozařovány.

Referenční projekt (řešení, komponenty, materiál) HÚ

Referenční projekt (řešení, komponenty, materiál) HÚ je technické řešení HÚ považované v dané době za nejvhodnější řešení bezpečnostního konceptu. Toto řešení se může měnit v závislosti na specifických charakteristikách lokalit či získáváním nových poznatků vedoucích k lepšímu řešení.

Scénář

Posloupnost událostí zahrnující zejména náhodný výskyt iniciační události, odezvu jednotlivých systémů, konstrukcí a komponent zajišťujících bezpečnostní funkce a převedení JZ do bezpečného nebo jiného stavu.

Skladování RAO/VJP

Skladování RAO/VJP je předem časově omezené umístění radioaktivního odpadu nebo vyhořelého jaderného paliva do prostoru, objektu nebo zařízení s úmyslem jej znovu vyjmout.

Střežený prostor

Střežený prostor je prostor, v němž se nalézá jaderný materiál III. kategorie, nebo chráněný prostor.

Technická bezpečnost

Technická bezpečnost je stav trvalé shody vybraného zařízení s technickými požadavky na něj kladenými, při němž není ohroženo lidské zdraví, životní prostředí a majetek.

Testovací lokalita

Lokalita vhodná pro testování metodik geologických průzkumných prací.

Úložiště radioaktivního odpadu

Prostor, objekt nebo zařízení sloužící k ukládání radioaktivního odpadu.

Vyhořelé jaderné palivo

Ozářené jaderné palivo, které bylo trvale vyjmuto z aktivní zóny jaderného reaktoru a původce ho označil za odpad. Před prohlášením za odpad se používá termín použité palivo.

Vyřazování z provozu

Vyřazování z provozu jsou administrativní a technické činnosti, jejichž cílem je úplné vyřazení nebo vyřazení jaderného zařízení, pracoviště III. kategorie nebo pracoviště IV. kategorie s omezením k použití k dalším činnostem souvisejícím s využíváním jaderné energie nebo činnostem v rámci expozičních situací.

Vysvětlení některých geologických pojmů

Duktilní deformace

„Plastické“ deformace hornin, při kterých se nevytvářejí plochy nespojitosti. Opakem jsou křehké deformace. Mezi těmito krajními případy je široké pole deformací duktilně-křehkých. Duktilní deformace je dominantní v hlubší části zemské kůry a v plášti, kde úzce souvisí s podmínkami metamorfózy, případně s parciální anatexí (částečným natavením) hornin.

Glaciál

Jinými slovy – ledová doba, časové období s chladným a suchým podnebím. Glaciály se dělí na dílčí chladnější výkyvy – stadiály a teplejší výkyvy – interstadiály. V historii Země známe více dob ledových, nejlépe prozkoumaná jsou však za posledních 1,8 mil. let. Teplota v nejstudenějším období glaciálu na území Česka byla zhruba o 11-13 °C nižší oproti současnému průměru. Jeden glaciální cyklus trvá zhruba 120 tisíc let (100 tisíc let – doba ledová a 20 tisíc let – doba meziledová).

Hydrostatický tlak (angl. Hydrostatic pressure)

Hydrostatický tlak je tlak, který vzniká v kapalině (obvykle ve vodě) její vlastní tíhou.

Hydraulický sklon (angl. Hydraulic gradient)

Poměr rozdílu hladiny nebo tlakové výšky kapaliny (vody) a dráhy jejího proudění. Synonyma: hydraulický gradient, hydraulický spád.

Křehké deformace

Pukliny a zlomy nacházející se v horninách, které vznikly při samotném vzniku horniny, nebo při jeho mechanickém namáhání vlivem zejména endogenních sil. Na vznik křehkých deformací mají vliv především vlastnosti samotné horniny, velikost napětí a jeho orientace, okolní teplota a rychlost deformace. Opakem křehké deformace je deformace duktilní. Mezi těmito krajními případy je široké pole deformací duktilně-křehkých.

Krystalinikum

Komplex krystalických, většinou metamorfovaných a magmatických hornin, hlavně granitoidů.

Kvartér

Geologické období, zahrnující zhruba posledních 2,6 milionů let. Dělí se na starší čtvrtohory (pleistocén) a mladší čtvrtohory (holocén).

Litostatický tlak

Tlak v hloubce způsobený tíhou nadložních hornin. Přibližný tlak v hloubce hypotetického úložiště v 500 m je cca 13–15 MPa.

Napjatostní stav horninového prostředí

Napětí v horninovém masivu, které je způsobené nahromaděním energie. Příčinou jsou tíha nadložních hornin, horotvorné procesy v geologické minulosti a současnosti a další vlivy, vyplývající z geologické stavby masívu (např. vnitřní nehomogenity, diskontinuity, anizotropie vlastností hornin apod.).

Permafrost (angl. Permafrost)

Věčně zmrzlá půda. Nejsvrchnější část litosféry, která má po dobu dvou let teplotu 0 °C a nižší. Mocnost permafrostu na Zemi bývá od několika cm až více než tisíc metrů. V polárních oblastech se permafrost vyskytuje v místech věčného ledu a v oblasti tundry. Permafrost se může vyskytovat i pod mořskou hladinou. Vznikl v poslední době ledové, na jejímž konci byl zatopen díky zvýšení hladiny oceánů. Teplota moře v současné době nestačí k roztání, a tak permafrost stále přetrvává.

Puklina

Křehké porušení geologického tělesa (horniny) změnou napětí bez pozorovatelného přemístění. Pukliny představují nejběžnější typ porušení mechanické soudržnosti hornin a horninového masivu.

Odprysk (Spalling)

Lokální destrukce masivu, při které dojde k prudkému uvolnění částí stěny (překročení pevnosti materiálu), která odletí (odprýskne) s charakteristickým třaskavým zvukem.

Ztekucení zemin (angl. Soil liquefaction)

Fenomén, když částečně nebo úplně saturovaná zemina podstatně ztratí svou pevnost nebo tuhost. Důvodem je nárůst pórového tlaku, vznik výrazné deformace, přičemž efektivní napětí klesne na nulu a zemina se chová jako tekutina. Ke ztekucení zemin dochází při dynamickém namáhání (např. při seizmických otřesech).

Úložné vrty

Podle typu úložného systému krátké svislé vrty vyhloubené v chodbách hlubinného úložiště, nebo dlouhé horizontální či subhorizontální vrty, ve kterých budou uloženy obalové soubory s odpadem. Mezi samotnými kontejnery a horninovým prostředím bude několik decimetrů mocná vrstva bentonitu.

Vertikální pohyby zemské kůry

Velmi pomalé pohyby bloků svrchní části zemské kůry, při kterých se bloky diferenciálně pohybují podél zlomu ve vertikálním směru. Tento pohyb může být pozitivní (výzdvih), nebo negativní (pokles). Rychlost pohybů je v Českém masivu obecně <0,5 mm/rok, tj. (<50 m/100 000 roků).

Zlom

Je definován jako křehká porucha, podél které došlo k pozorovatelnému přemístění okolních částí většímu než 1 m.

Zóna ovlivnění výrubem EdZ (angl. Excavation disturbed zone, EdZ)

Část horninového masivu v podzemí přiléhající k vyrubanému prostoru (tunel, kaverna, štola), která vykazuje nevýznamné hydromechanické a geochemické nebo reverzibilní změny.

Zóna poškození výrubem EDZ (angl. Excavation damaged zone, EDZ)

Část horninového masivu v podzemí přiléhající k vyrubanému prostoru (tunel, kaverna), která vykazuje významné, nezvratné změny, přičemž vznikly pohyby podél existujících puklin, případně vznikly nové pukliny. V prostředí s vysokým napětím může docházet k odštěpování a vypadávání bloků horniny ze stěn výrubu.

Zvodeň

Hydraulicky jednotná a souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině, tj. spojitě těleso vody (akumulace) v kolektoru, kterým se mohou šířit hydraulické impulsy, resp. může docházet k přenosu (transportu) hmot.

Abstrakt

Tento dokument navazuje na program výzkumu a vývoje SÚRAO připravovaný v letech 2013 až 2014, na jehož základě byla iniciována a implementována řada výzkumných projektů SÚRAO, které přinesly mnoho nových poznatků a zkušeností, které jsou zahrnuty do tohoto plánu výzkumu a vývoje. Plán VaV zohledňuje aktualizaci Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice schválenou usnesením vlády č. 597 ze dne 26. srpna 2019 (dále jen „Koncepce“) a požadavky nového atomového zákona č. 263/2016 Sb. a jeho prováděcích předpisů. Tento plán je určen především pro období do výběru finální lokality hlubinného úložiště, tj. zhruba do roku 2025 až 2030. Podrobněji je zpracován střednědobý plán na příštích 5 let. Hlavním cílem prací pro příštích 5 let je kromě pokračování geologického výzkumu a průzkumu potenciálních lokalit HÚ, příprava dokumentu shrnujícího skutečnosti podmiňující projektování HÚ, požadavky na vybraná zařízení a jejich bezpečnostní funkce a projektová východiska na projekt hlubinného úložiště a projektové požadavky, na jehož základě bude vybráno optimální technické řešení hlubinného úložiště nejvhodnější pro podmínky krystalinických hornin v ČR. Na rozdíl od předchozích plánů výzkumu a vývoje, tento plán zahrnuje i výzkumné činnosti potřebné pro zvyšování jaderné bezpečnosti a radiační ochrany provozu stávajících úložišť ÚRAO Dukovany a ÚRAO Richard a ÚRAO Bratrství.

Klíčová slova

Plán, výzkum a vývoj, SÚRAO, radioaktivní odpady, 2020

Abstract

This document is a follow-up to the SURAO's R&D program, prepared between 2013 and 2014, on the basis of which a number of SURAO's research projects have been initiated and implemented, bringing much new knowledge and experience to be included in this R&D plan. The R&D Plan takes into account the updated Concept of Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management in the Czech Republic approved by Government Resolution No. 597 of 26 August 2019 and the requirements of the new Atomic Act No. 263/2016 Coll. and its implementing regulations. This plan is intended primarily for the period until the selection of the final deep geological repository location, i.e. until approximately 2025 to 2030. The medium-term plan for the next 5 years is elaborated in more detail. In addition to continuing geological research and exploration of potential sites, the main objectives of the work for the next 5 years are the preparation of a document summarizing the facts underlying the design of the DGR, requirements for selected facilities and their safety functions and design bases for the deep geological repository project on the basis of which a technical solution of a repository most suitable for conditions of crystalline rocks in the Czech Republic will be selected. Unlike previous research and development plans, this plan also includes research activities necessary to increase nuclear safety and radiation protection of the operation of the existing repositories of Dukovany and Richard and Bratrství repository.

Keywords

Plan, research and development, SURAO, radioactive waste management, Czech Republic

1 Účel dokumentu

Tento plán výzkumu a vývoje (VaV) navazuje na program výzkumu a vývoje SÚRAO (Pospíšková et al. 2014) připravovaný v letech 2013 až 2014, na jehož základě byla iniciována a implementována řada výzkumných projektů SÚRAO, které přinesly mnoho nových poznatků a zkušeností, které jsou zahrnuty do tohoto plánu výzkumu a vývoje. Významnou událostí bylo vybudování podzemního výzkumného pracoviště v Bukově (PVP Bukov), které umožňuje získávat reálné poznatky z horninového prostředí v předpokládané hloubce úložiště a provádět experimenty za reálných podmínek hlubinného úložiště.

Plán VaV zohledňuje aktualizaci Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice schválenou usnesením vlády č. 597 ze dne 26. srpna 2019 a požadavky nového atomového zákona č. 263/2016 Sb., jeho prováděcí předpisy a bezpečnostní návody. Zohledňuje Směrnici Rady 2011/70/Euratom ze dne 19. července 2011, kterou se stanoví rámec Společenství pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem. Tato směrnice v článku 12, bodu f) požaduje, aby součástí vnitrostátních programů, kterými členské státy prokazují plnění této směrnice, byly popsány činnosti výzkumu, vývoje a prokazování, které jsou nutné k provádění řešení nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem. Provádění výzkumných a vývojových činností je rovněž třeba podle článku 8 této směrnice pro získávání, zachovávání a další rozvoj odborné způsobilosti a dovednosti zaměstnanců.

SÚRAO je součástí mezinárodní technologické platformy pro geologické ukládání radioaktivního odpadu (IGD-TP) a aktivně se podílí na aktualizaci evropského plánu výzkumu a vývoje (Strategic Research Agenda 2020). Získané poznatky jsou rovněž implementovány do tohoto plánu tak, aby byly významně využity poznatky získávané v zahraničí.

Tento plán je určen především pro období do výběru finální lokality hlubinného úložiště, tj. zhruba do roku 2025 až 2030, ale výhledově jsou zmíněny i plány VaV až do doby zhruba roku 2040, kdy by SÚRAO měla předložit SÚJB žádost o umístění hlubinného úložiště ve vybrané finální lokalitě. Podrobněji je zpracován střednědobý plán na příštích 5 let. Hlavním cílem prací pro příštích 5 let je kromě pokračování geologického výzkumu a průzkumu potenciálních lokalit příprava dokumentu shrnujícího skutečnosti podmiňující projektování HÚ, požadavky na vybraná zařízení a jejich bezpečnostní funkce a projektová východiska na projekt hlubinného úložiště. Na základě tohoto dokumentu bude pomocí multikriteriální analýzy vybráno technické, referenční řešení hlubinného úložiště nejvhodnější pro podmínky krystalinických hornin v ČR.

Na rozdíl od předchozích plánů výzkumu a vývoje tento plán zahrnuje i výzkumné činnosti potřebné pro provoz stávajících úložišť ÚRAO Dukovany a ÚRAO Richard a pro uzavírání úložiště Bratrství.

V plánu VaV je rovněž zahrnut výzkum zaměřený na analýzy alternativních strategií konce palivového cyklu, jako je dlouhodobé skladování, pokročilé přepracování paliva, které mohou významně ovlivnit i oblast nakládání s VJP a radioaktivními odpady.

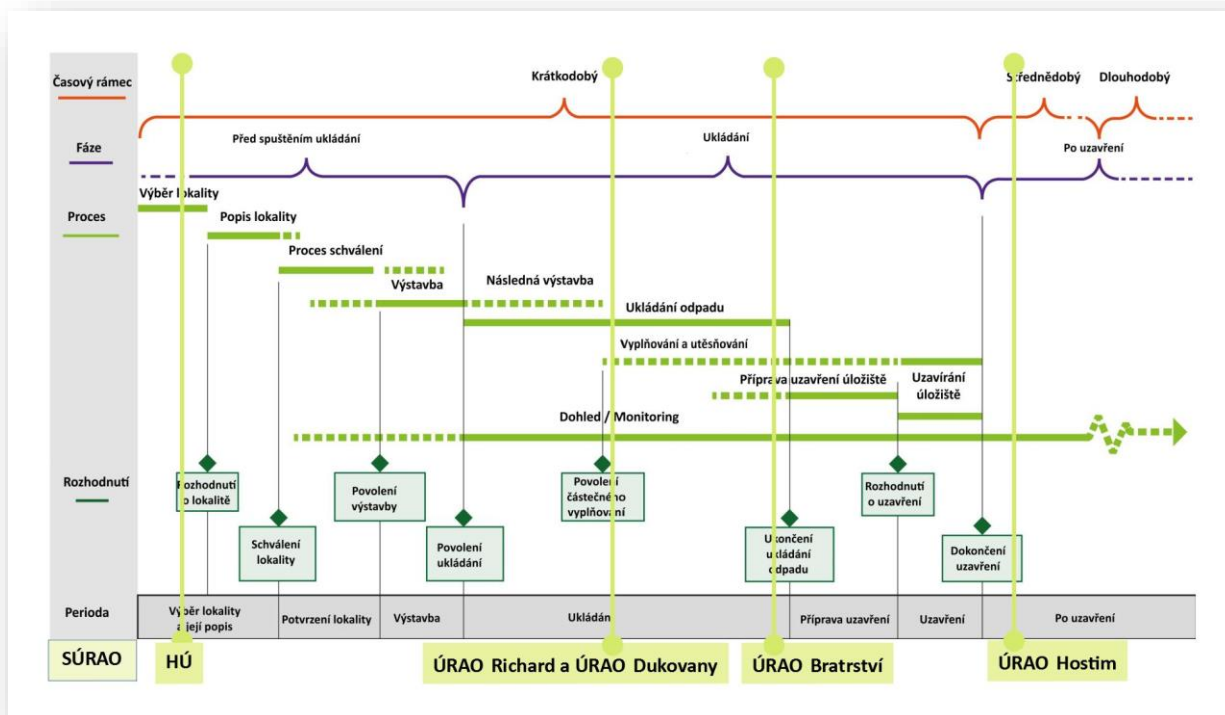
Tento plán bude dále pravidelně zhruba v pětiletých periodách aktualizován v souladu s novými poznatky a zkušenostmi získávanými v rámci probíhajících výzkumných a vývojových prací.

2 Současný stav nakládání s VJP a RAO v ČR a základní milníky koncepce nakládání s VJP a RAO

Současný stav nakládání s RAO v ČR je možno charakterizovat následovně:

- 1) VJP je po vyjmutí z reaktorů skladováno několik let v bazénech hlavních výrobních bloků a poté je přemístěno do suchého skladu, kde je umístěno ve skladovacích obalových souborech. V JE Dukovany (EDU) je provozován od roku 1995 mezisklad VJP s kapacitou 600 t, který byl naplněn v březnu 2006. Nový sklad s kapacitou 1 340 t je v provozu od prosince 2006. V JE Temelín (ETE) je od září 2010 v provozu sklad s kapacitou 1 370 t. Provozované skladovací kapacity pro VJP ze stávajících bloků EDU jsou dostatečné pro 60 let provozu. V případě provozovaných bloků ETE pokrývá kapacita skladu zhruba 30 let provozu. Až do doby zprovoznění hlubinného úložiště bude VJP z jaderných elektráren skladováno v přepravně-skladovacích obalových souborech umístěných ve skladech VJP v areálech obou jaderných elektráren. V souvislosti s přípravou nových jaderných zdrojů jsou vyhodnocovány varianty budoucího skladování RAO a VJP z tohoto zdroje, včetně varianty centrálního skladu pro budoucí produkci VJP. Jaderné palivo s vyšším obohacením z výzkumných reaktorů v ÚJV Řež, a. s. bylo v minulosti odesláno k přepracování do Ruské federace. Odpady z přepracování budou navraceny zpět. Pro další VJP z výzkumných reaktorů a VAO z jeho přepracování se počítá se zajištěním dostatečné skladovací kapacity v ÚJV Řež, a. s., případně v Centru výzkumu Řež, s. r. o.,
- 2) při provozu a vyřazování jaderných reaktorů a při nakládání se zdroji ionizujícího záření vzniká RAO v plynné, kapalně či pevné formě. Menší část RAO jsou přechodné odpady. Ty jsou skladovány a po poklesu jejich aktivity pod uvolňovací úroveň uváděny do životního prostředí. Objemově nejrozsáhlejší třídou radioaktivního odpadu tvoří nízkoaktivní a středněaktivní odpady (NAO a SAO). Technologie jejich zpracování a úpravy jsou dostatečně propracované a jsou v ČR původci RAO využívány. Radioaktivita NAO výrazně poklesne během několika set let, a proto je lze ukládat do přípovrchových úložišť,
- 3) NAO z jaderné energetiky jsou ukládány v povrchovém úložišti v areálu jaderné elektrárny Dukovany. Celkový objem úložných prostor je dostatečný k přijetí všech odpadů z provozu a vyřazování stávajících elektráren Dukovany i Temelín, které splní podmínky přijatelnosti pro uložení, a to i v případě prodloužení provozu elektráren na 60 let,
- 4) zneškodnění NAO a některých typů SAO z průmyslu, výzkumu a zdravotnictví je zajištěno jejich ukládáním v úložištích Richard (u Litoměřic) a Bratrství (u Jáchymova), částečně je využívána i kapacita ÚRAO Dukovany. Provoz všech úložišť včetně monitorování již uzavřeného úložiště Hostim je zajišťován SÚRAO v souladu s příslušnými povoleními SÚJB, v případě důlních děl i v souladu s oprávněními a povoleními podle báňských předpisů,
- 5) specifickou kategorií odpadů jsou odpady kontaminované přírodními radionuklidy. Vyskytují se při zpracování některých uranových rud, fosfátových surovin, v dopravě a zpracování surové ropy a ve vodárenství. Pokud tyto odpady splňují podmínky pro uvádění do ŽP, jsou ukládány na řízené skládky komunálních či nebezpečných odpadů, jinak jsou skladovány nebo ukládány spolu s nízkoaktivními odpady v úložištích.

Příprava úložišť radioaktivního odpadu je velmi dlouhodobá a zahrnuje několik fází (Obr. 1). Zejména příprava hlubinného úložiště je velmi dlouhodobý projekt. Jenom první fáze přípravy úložiště, výběr lokality a její popis, byla zahájena v ČR již kolem roku 1989 a její ukončení se předpokládá nejdříve v roce 2025. Všechny fáze vyžadují získávání nových poznatků, zejména pro zajištění a kontinuální zvyšování jaderné bezpečnosti a radiální ochrany.



Obr. 1: Referenční časový rámec s vyznačením hlavních milníků při budování hlubinného úložiště (ICRP, 2013 upraveno) s vyznačením jednotlivých úložišť

V následující Tab. 1 jsou uvedeny základní milníky Koncepce schválené usnesením vlády ČR č. 597/2019 v roce 2019 (Tab. 18 Koncepce).

Tab. 1: Milníky koncepce nakládání s VJP a RAO schválené Vládou ČR v roce 2019

Poř. č.	Cíl	Milník/odpovídá
Cíle pro komunikaci s veřejností		
1	Zajistit kontinuitu, přehlednost a otevřenost informací v oblasti nakládání s RAO a VJP.	Trvale/SÚRAO, SÚJB, původci
2	Zajistit nezávislou činnost a rozšíření působnosti Pracovní skupiny pro dialog o hlubinném úložišti, vytvořit rámec pro vznik a práci lokálních pracovních skupin na jednotlivých lokalitách, které by současná Pracovní skupina pro dialog zastřešovala.	2020/SÚRAO, MPO

Poř. č.	Cíl	Milník/odpovídá
3	Projednat legislativní návrh pro posílení postavení obcí při výběru lokality hlubinného úložiště a předložit ho ke schválení vládě.	2019/SÚRAO, MPO, vláda
4	Vytvořit dlouhodobý program partnerství SÚRAO/MPO, který bude specifikovat práva a povinnosti všech zúčastněných subjektů v jednotlivých fázích vývoje a provozování úložiště.	2020/SÚRAO, MPO
Cíle pro nakládání s nízko a středněaktivními odpady		
5	Připravit potřebnou dokumentaci k žádosti o vydání povolení k rekonstrukci úložiště Richard.	2019/SÚRAO
6	Připravit potřebnou dokumentaci k žádosti o vydání povolení uzavření úložiště Bratrství.	2025/SÚRAO
7	Připravit studii zaměřenou na možnost plošného screeningu množství NORM v ČR. V případě potřeby zahájit práce na přípravě zařízení pro ukládání odpadů typu NORM.	2020/SÚRAO
Cíle pro nakládání s RAO a VJP nepřijatelnými do přípovrchových úložišť a pro přípravu hlubinného úložiště		
8	Zajistit bezpečné skladování VJP, VAO a NSRAO neuložitelných do přípovrchových úložišť do doby zprovoznění hlubinného úložiště.	Trvale/původci, SÚRAO
9	Vybrat minimálně 2 vhodné kandidátní lokality pro HÚ se stanoviskem dotčených obcí a předložit vládě ke schválení.	2022/SÚRAO
10	Vyvinout, typově schválit a vyrobit přepravně-skladovací obalové soubory pro vitrifikovaný odpad z přepracování VJP z výzkumného reaktoru LVR-15.	2022/původci, SÚJB
11	Připravit projektovou a bezpečnostní dokumentaci k vydání rozhodnutí o finální lokalitě (se souhlasem obcí) a podat žádost o územní ochranu vybrané lokality.	2025/SÚRAO
12	Zahájit výstavbu podzemní laboratoře ve finální lokalitě.	2030/SÚRAO
13	Zahájit výstavbu hlubinného úložiště.	2050/SÚRAO
14	Zahájit provoz hlubinného úložiště.	2065/SÚRAO
Cíle pro program výzkumu a vývoje		
15	Průběžně aktualizovat a realizovat program výzkumu a vývoje pro potřeby hlubinného ukládání RAO a VJP v souladu s harmonogramem přípravy HÚ.	Průběžně/SÚRAO

Poř. č.	Cíl	Milník/odpovídá
16	Podporovat projekty zaměřené na vytvoření báze znalostí v problematice minimalizace vzniku radioaktivního odpadu, redukce jejich objemu a zlepšení jejich charakterizace, bezpečného a ekonomicky přijatelného ukládání RAO a VJP a uzavřeného palivového cyklu pro udržitelnou jadernou energetiku.	Trvale/ MPO
17	Podporovat systematickou přípravu a vzdělávání odborníků pro potřeby nakládání s RAO.	Trvale/ MPO, MŠMT
Ekonomické cíle		
18	Hodnotit tvorbu a čerpání zdrojů jaderného účtu, v případě potřeby novelizovat nařízení vlády o výši poplatků na jaderný účet případně příslušný paragraf Atomového zákona s cílem udržet dlouhodobě vyrovnanou a zdůvodněnou bilanci jaderného účtu.	Průběžně SÚRAO, MPO
19	Zajistit zhodnocování volných prostředků jaderného účtu v souladu s Atomovým zákonem a ostatními právními předpisy.	Trvale MF ČR
20	Provádět pravidelnou kontrolu tvorby rezerv na vyřazování jaderných zařízení z provozu s cílem zajistit dostatečnou výši finančních zdrojů.	Průběžně SÚRAO

Na základě dopisu ministra MPO starostům dotčených obcí z listopadu 2019 č.j. MPO 85746/19/41500/01000 se v současné době předpokládá, že na vybraných čtyřech lokalitách se budou podávat žádosti o stanovení průzkumného území pro zvláštní zásah do zemské kůry až po vstupu zákona o zapojení obcí v platnost, nebo po 1. lednu 2023, a to podle toho, co nastane dříve. Vzhledem k tomuto rozhodnutí se proto do roku 2023 výzkumné a vývojové práce zaměří především na výběr optimálního bezpečnostního a úložného konceptu a přípravu projektu hlubinného úložiště. Vlastní průzkumné a výzkumné práce na vybraných lokalitách začnou ihned po obdržení rozhodnutí o stanovení průzkumného území, a to buď po dohodě s obcemi ještě před rokem 2023, či v roce 2023. Toto rozhodnutí se v budoucnu může projevit případnou úpravou termínu výběru finální a záložní lokality v případě, nemusí však znamenat zdržení zahájení provozu úložiště v roce 2065 v případě, že průzkumné práce skutečně začnou kolem roku 2023. Informace získané na základě výzkumných aktivit do roku 2023 mohou výrazně urychlit následující interpretace výsledků získané později v rámci geologického průzkumu potenciálních lokalit.

3 Přístup SÚRAO k výzkumu a vývoji

SÚRAO při přípravě plánu VaV vychází ze tří následujících možných způsobů plnění výzkumných a vývojových úkolů:

- vlastním výzkumem na národní úrovni potřebným pro implementaci projektů,
- společnými výzkumnými aktivitami na bilaterální či mezinárodní úrovni využíváním společných zdrojů a poznatků, zejména evropských rámcových programů výzkumu a vývoje,
- na základě kontraktu se zeměmi s pokročilejším výzkumným programem.

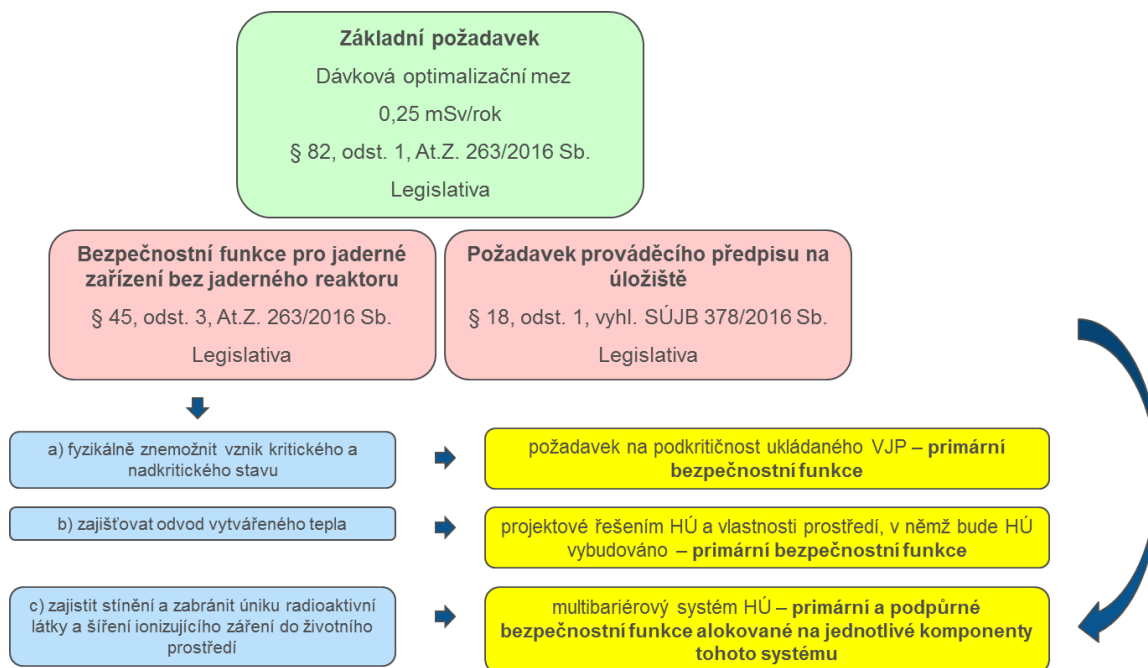
Všechny tyto možnosti jsou posuzovány při přípravě výzkumných a vývojových programů zaměřených na splnění cílů Koncepce. Je zřejmé, že je možné přijmout příslušné metodiky z jiných zemí; použití výsledků experimentů prováděných v jiných zemích je však omezené, protože do značné míry závisí na geologických vlastnostech jednotlivých lokalit úložišť. Vlastní výzkum navíc umožňuje přípravu vlastních pracovních týmů, které budou potřeba po dobu mnoha desítek let.

Společnými výzkumnými aktivitami na bilaterální či mezinárodní úrovni; využíváním společných zdrojů a poznatků, zejména evropských rámcových programů výzkumu a vývoje EURATOM, je však často možné získat výsledky podstatně rychleji a levněji než vlastním výzkumem.

SÚRAO využívá, a chce nadále využívat, bilaterální spolupráci se zeměmi, které jsou mnohem dále než ČR při přípravě HÚ, tj. zejména Finskem a Švédskem, které rovněž chtějí umístit úložiště do krystalinických hornin.

Pravděpodobně nejvýznamnější položka plánu výzkumu a vývoje SÚRAO souvisí s přípravou HÚ. Z pohledu výzkumu a vývoje požadavky na výzkum a vývoj HÚ výrazně přesahují běžné požadavky na přípravu ostatních jaderných zařízení či úložišť určených pro nízkoaktivní odpady vzhledem k potřebě prokazovat bezpečnost v horizontu statisíců let po jeho uzavření. I doba přípravy HÚ a jeho provozu až do jeho uzavření přesahuje dobu obvyklou pro přípravu a provoz ostatních jaderných zařízení. Na rozdíl od procesu umístování jaderných elektráren, který zpravidla vychází již z konkrétního projektu jaderné elektrárny, při přípravě hlubinného úložiště současně probíhá jak příprava projektu hlubinného úložiště, tak i proces umístování hlubinného úložiště. Neméně významnou skutečností je, že při prokazování bezpečnosti hlubinného úložiště je třeba nejdříve porozumět procesům, které mohou v takto dlouhé době probíhat v úložišti a významně ovlivňovat chování jednotlivých komponent HÚ, které je koncipováno jako multibariérový systém. Výzkum a vývoj zejména v začátku přípravy hlubinného úložiště zahrnuje proto prakticky všechny činnosti projektu přípravy hlubinného úložiště.

Jednotlivé komponenty multibariérového systému HÚ se navzájem doplňují a ovlivňují a jako celek musí splňovat všechny legislativní požadavky pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti dané zákonem č. 263/2016 Sb., v platném znění, znázorněné na Obr. 2.

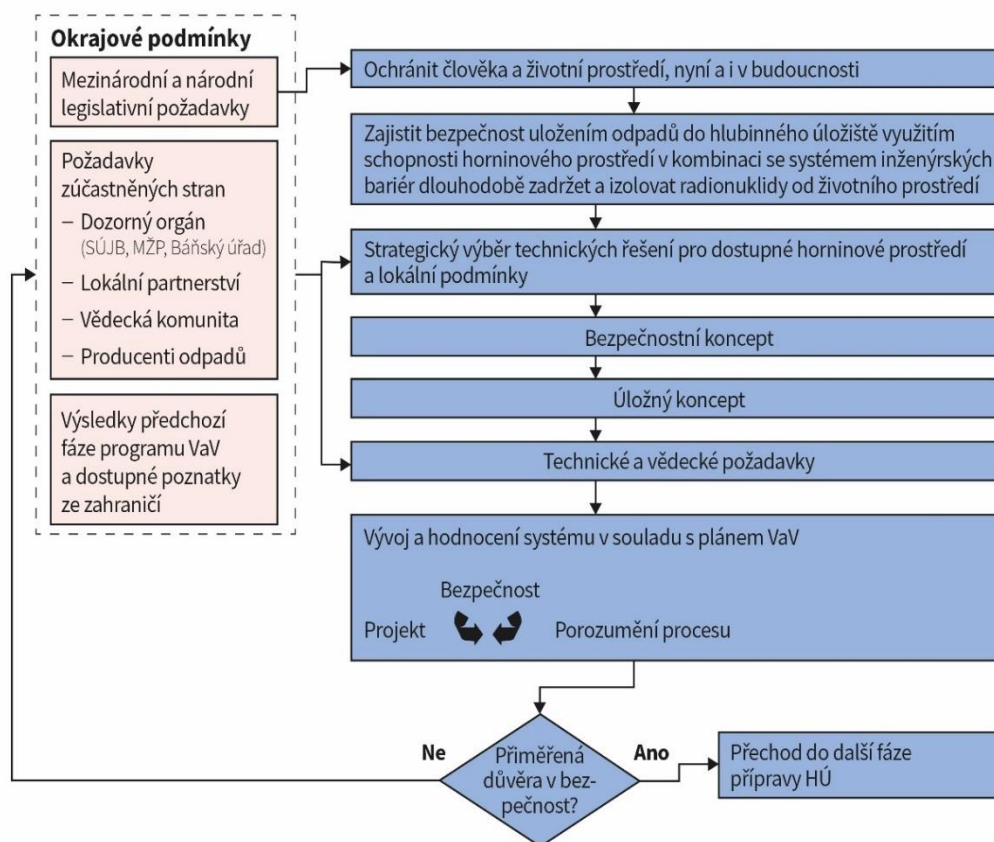


Obr. 2 Požadavky na úložiště dané aktuálně platnou legislativou a vztah mezi bezpečnostními funkcemi (Gondolli et al. 2018a)

Příprava plánu výzkumu a vývoje probíhá rovněž podle doporučení Mezinárodní platformy pro hlubinné ukládání odpadů (IGD-TP – SRA 2011), tak jak je ukázáno na Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3: Fáze přípravy hlubinného úložiště (Zdroj IGD-TP, SRA 2011, Obr. 1.4.1)



Obr. 4: Popis jednotlivých částí plánu VaV HÚ podle IGD-TP – SRA, 2011 (upraveno)

Z obrázků plyne, že příprava HÚ probíhá postupně a iterativně. Výsledkem jednotlivých fází přípravy HÚ je rozhodnutí, zda je přiměřeně prokázáno, že navržené technické řešení úložiště v navržené lokalitě splňuje požadovanou bezpečnost. V případě, že tomu tak není, nebo to nebylo dostatečně prokázáno, je třeba se vrátit zpět a vybrat či modifikovat řešení úložného systému či vybrat jinou lokalitu. Jde o dlouhodobý iterativní proces probíhající od doby výběru lokality až po povolení jeho provozu.

Plán VaV odráží i výsledky strategického plánu VaV připraveného v rámci přípravy společného, dlouhodobého evropského projektu EURAD (EURAD Founding document, 2018), jehož cílem je společné řešení problematiky hlubinného ukládání radioaktivního odpadu. Projekt je rozdělen do následujících 7 témat, které se dále dělí na konkrétní úkoly (vzhledem k obtížnosti přesného překladu významu těchto témat je v závorce uveden i původní text v angličtině):

- 1) Řízení programu nakládání s radioaktivními odpady (Managing implementation and oversight of radioactive waste management programme),
- 2) Charakterizace, zpracování a skladování RAO a výzkum zdrojového členu pro ukládání RAO (Radioactive waste characterisation, processing and storage (pre-disposal activities) and source term understanding for disposal),
- 3) Vlastnosti, funkce a dlouhodobá spolehlivost systému inženýrských bariér (Engineered barrier system (EBS) properties, function and long term performance),
- 4) Geologické poznání vlastností hornin, transport radionuklidů a dlouhodobý geologický vývoj (Geoscience to understand rock properties, radionuclide transport and long term geological evolution),
- 5) Projekt hlubinného úložiště a jeho implementace (Geological disposal facility and the practicalities of implementation),
- 6) Výběr lokality a získání povolení k umístění a provozu (Siting and licensing),
- 7) Bezpečnostní rozbor a analýzy a příprava bezpečnostních zpráv (Performance assessment, safety case development and safety analyses).

Plán VaV pro přípravu hlubinného úložiště je rozdělen do 14 následujících výzkumných oblastí:

- 1) Řízení přípravy úložišť,
- 2) Strategické studie nakládání s VJP a RAO,
- 3) Vývoj bezpečnostního konceptu,
- 4) Aktualizace inventáře a vlastností odpadů,
- 5) Výběr a charakterizace lokalit,
- 6) Projektové řešení úložiště,
- 7) Výzkum a vývoj ukládacích obalových souborů,
- 8) Výzkum a vývoj výplní ukládacích vrtů a tunelů,
- 9) Výzkum a vývoj ostatních komponent úložiště,
- 10) Hodnocení provozní bezpečnosti úložiště,
- 11) Hodnocení bezpečnosti transportu,
- 12) Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti,
- 13) Výzkumné experimenty v PVP Bukov,
- 14) Hodnocení vlivu úložiště na životní prostředí.

Výzkumné činnosti pro oblast provozovaných úložišť Dukovany, Richard a Bratrství vyplývá především ze základních povinností SÚRAO provádět pravidelně deterministické, periodické

a průběžné hodnocení bezpečnosti a zvláštní hodnocení při změně využívání jaderné energie (zákon č. 263/2016 Sb., § 48) těchto úložišť. Na základě hodnocení bezpečnosti je třeba v rozumně proveditelné míře trvale zvyšovat úroveň jaderné bezpečnosti (zákon č. 263/2016 Sb., § 49), a to z hlediska stávající úrovně vědy a techniky (zákon č. 263/2016 Sb., § 5), a hodnotit skutečnosti, které byly rozhodné pro posouzení přijatelnosti území k umístění JZ. Z tohoto plyne, že je nutné kontinuálně sledovat vývoj vědy a techniky a zjištěné poznatky aplikovat do zvýšení jaderné bezpečnosti. Dalším důležitým důvodem pro provádění výzkumu a vývoje je potřeba zajištění dostatečné kapacity pro ukládání všech druhů radioaktivního odpadu, které vzniknou na území ČR. Výzkum a vývoj v této oblasti je proto možno rozdělit do tří oblastí:

- 1) Aktualizace hodnocení bezpečnosti provozovaných úložišť,
- 2) Aplikace nových poznatků do zvýšení jaderné bezpečnosti a radiační ochrany,
- 3) Zajištění dostatečné kapacity úložišť pro ukládání všech odpadů vzniklých na území ČR.

Poslední kapitola se věnuje problematice ukládání NORM/TENORM odpadů, které představují odpadní materiály s obsahem přírodních radionuklidů.

4 Legislativní požadavky

Procesy přípravy HÚ jsou spojeny s rozhodnutími, které na základě prokázání přiměřené důvěryhodnosti hodnocení bezpečnosti a prokázání přijatelného vlivu na životní prostředí odpovídajících poznatkům, které je možno získat v dané fázi, umožňují přejít do další fáze přípravy HÚ.

Základní legislativní dokument je zákon č. 263 ze dne 14. července 2016 (Atomový zákon). Tento zákon zapracovává příslušné předpisy Evropského společenství pro atomovou energii a Evropské unie do české legislativy. Co se týče nakládání s radioaktivním odpadem, jde zejména o směrnici EU 2011/70/Euratom, která stanoví rámec Společenství pro zajištění odpovědného a bezpečného nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem s cílem zabránit nepřiměřenému zatížení budoucích generací. Jedním ze stěžejních požadavků je, že proces rozhodování by měl být založen na souboru argumentů a důkazů, jež mají prokázat, že bylo dosaženo požadovaného standardu bezpečnosti.

Základní přístup pro přípravu jaderných zařízení včetně úložišť radioaktivních odpadů vychází z principu ochrany, do hloubky popsáném v § 6, vyhlášky č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení, a spočívajícím ve vytvoření řady zálohujících se fyzických bezpečnostních bariér, které jsou vloženy mezi radioaktivní látky a okolí hlubinného úložiště.

Tyto fyzické bezpečnostní bariéry musí plnit bezpečnostní funkce. Hlavní bezpečnostní funkce bariér pro všechna jaderná zařízení včetně HÚ jsou podle zákona č. 263/2016 Sb., § 45 následující:

- a) *fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu,*
- b) *zajišťovat odvod vytvářeného tepla a*
- c) *zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí.*

Specifické bezpečnostní požadavky IAEA pro ukládání radioaktivního odpadu (IAEA 2011a, odst. 1.10) formulovaly hlavní bezpečnostní funkce úložiště radioaktivního odpadu takto:

- a) *zadržet odpad,*
- b) *izolovat odpad od dostupné biosféry a podstatně snížit pravděpodobnost a všechny možné důsledky nežádoucího vniknutí člověka k odpadu,*
- c) *inhibovat, omezovat a zpoždovat migraci radionuklidů kdykoli z odpadu do přístupné biosféry,*
- d) *zajistit, aby množství radionuklidu dosahujícího přístupné biosféry v důsledku jakékoli migrace z úložiště bylo takové, aby možné radiologické důsledky byly vždy přijatelné nízké.*

Funkci fyzických bezpečnostních bariér v případě jaderných zařízení bez jaderného reaktoru, jakými jsou úložiště radioaktivního odpadu, zajišťují podle vyhlášky č. 329/2017 Sb., § 6, odst. 3.:

- a) *obalové soubory a*
- b) *jiné systémy, konstrukce a komponenty.*

Na rozdíl od jaderných elektráren všechny bezpečnostní bariéry úložišť radioaktivního odpadu mají v souladu s § 19 vyhlášky č. 329/2017 Sb. charakter pasivní bariéry, tj. bariéry, jejichž zajištění nevyžaduje aktivaci, mechanický pohon nebo dodávku energie.

Bezpečnostní dokumentace musí prokázat jednoznačně splnění všech těchto bezpečnostních funkcí s uvážením všech vlastností, událostí a procesů, které mohou nastat v úložišti po dobu statisíců let (vyhláška č. 377/2016 Sb.).

Jak plyne z § 82 odst.1) z. č. 263/2016 Sb.:

Každý, kdo vykonává radiační činnost, je povinen zajistit, aby v důsledku této činnosti, a to i v případě nahromadění radioaktivní látky uvolňované z pracoviště, byla při optimalizaci radiační ochrany použita dávková optimalizační mez pro reprezentativní osobu 0,25 mSv za rok a v případě energetického jaderného zařízení současně 0,2 mSv pro vypuštění do ovzduší a 0,05 mSv pro vypuštění do povrchových vod.

Podrobnosti k optimalizaci radiační ochrany jsou popsány ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. v § 7 odst 1) a 2):

- 1) *při optimalizaci radiační ochrany musí každý, kdo provádí činnosti v rámci expozičních situací, stanovit varianty zajištění radiační ochrany a z nich vybrat optimální variantu zajištění radiační ochrany v příslušné expoziční situaci,*
- 2) *výběr optimální varianty zajištění radiační ochrany musí být proveden porovnáním možností snížení plánovaných a potenciálních dávek fyzickým osobám nebo skupinám obyvatelstva.*

Speciální požadavky na hlubinné úložiště radioaktivního odpadu jsou uvedeny ve vyhlášce č. 378/2016 Sb. § 18:

Charakteristikou území k umístění hlubinného úložiště, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno, je:

- a) *horninové prostředí, které umožňuje migraci radioaktivních, chemických a toxických látek, které se mohou uvolnit z uloženého radioaktivního odpadu tak, že při očekávaném vývoji hlubinného úložiště dojde k většímu ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí,*
- b) *nemožnost vytvoření¹*
 - 1) *komplexního prostorového modelu geologické stavby z důvodu složité geologické stavby a tektonických poměrů,*
 - 2) *hydrogeologického modelu v důsledku obtížné popsitelnosti a predikovatelnosti hydrogeologických poměrů území k umístění jaderného zařízení, nebo*
 - 3) *geomechanických a geochemických modelů území k umístění jaderného zařízení, nebo*
- c) *přítomnost zdrojů geotermální energie.*

¹ Tato podmínka SÚJB je interpretována jako nemožnost vytvoření důvěryhodných modelů nezátížených nepřijatelnými nejistotami z důvodu složitých poměrů v lokalitě. Nepřijatelnost nejistot bude posouzena ve fázi výběru lokalit renomovanými tuzemskými a zahraničními odborníky.

Při posuzování území k umístění hlubinného úložiště mají být hodnoceny následující vlastnosti a charakteristiky lokalit:

- a) *hloubkový dosah a rozměr vhodného horninového masívu pro umístění hlubinného úložiště a vzdálenost geologických rozhraní a tektonických poruch, které mohou působit jako cesty pro transport radioaktivních látek,*
- b) *strukturně geologické vlastnosti horninového prostředí, ve kterém je umístěno hlubinné úložiště, včetně křehké a duktilní tektoniky,*
- c) *původ a předpokládaný vývoj horninového prostředí,*
- d) *vhodnost mechanických vlastností hornin pro zajištění stability přírodní bariéry hlubinného úložiště,*
- e) *petrografické a mineralogické složení horninového prostředí,*
- f) *výskyt nestejnorodého horninového prostředí s petrograficky a mechanicky odlišnými typy hornin, které jsou postiženy hydrotermálními a jinými druhotnými přeměnami,*
- g) *výskyt endogenních a exogenních jevů, které mohou v přírodní bariéře hlubinného úložiště vyvolat významné změny, zejména tektonických procesů, seismické aktivity, vulkanismu, diapirismu, deformací povrchu území a rychlosti eroze a sedimentace,*
- h) *oběh podzemních vod v území k umístění hlubinného úložiště z hlediska možné doby transportu, retardace, rozpustnosti a změny koncentrace radioaktivní látky v důsledku mísení s podzemními vodami,*
- i) *paleohydrogeologické procesy, klimatickou historii a předpokládaný dlouhodobý vývoj klimatu v regionálním a globálním měřítku,*
- j) *zranitelnost horninového prostředí a oběhu podzemních vod z hlediska dlouhodobých klimatických změn a jejich doprovodných jevů, zejména překrytí hlubinného úložiště ledem, permafrostem nebo vodou,*
- k) *fyzikálně chemické, geochemické a mikrobiologické vlastnosti geologického prostředí, zejména*
 1. *zádržné vlastnosti horninového prostředí a uměle vytvořených překážek,*
 2. *chemické složení podzemní vody,*
 3. *redukční podmínky,*
 4. *obsah kyslíku a*
 5. *přítomnost mikroorganismů, koloidů a organických látek,*
- l) *geomechanické vlastnosti, zejména*
 1. *pevnostní a deformační vlastnosti hornin a*
 2. *napjatostní stav horninového prostředí,*
- m) *plynopropustnost hornin,*
- n) *tepelné vlastnosti horninového prostředí, včetně tepelného gradientu,*
- o) *výskyt současné a budoucí lidské aktivity, která je způsobilá narušit izolační vlastnosti úložného systému, zejména využití hostitelské horniny těžbou nerostných surovin nebo využíváním geotermální energie nebo využíváním systému pro podzemní zásobníky plynu,*
- p) *výskyt změn v hostitelském a okolním geologickém prostředí vzniklých vrtnou a báňskou činností v průzkumné fázi umísťování hlubinného úložiště, při kterých by vznikly nové preferenční cesty pro migraci radioaktivních látek a*
- q) *popsatelnost a predikovatelnost geologické stavby, oběhu podzemních vod a fyzikálních, mechanických a geochemických vlastností horninového prostředí území k umístění hlubinného úložiště.*

Podle § 4 této vyhlášky posuzování území k umístění jaderného zařízení musí dále:

- 1) *hodnotit míru, v jaké jsou jeho vlastnosti schopné ovlivnit jadernou bezpečnost, radiační ochranu, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné situace a zabezpečení,*
- 2) *výsledky posuzování musí být srovnávány s charakteristikami vlastnostmi území, při jejichž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno,*
- 3) *musí zahrnout hodnocení*
 - a) *souběžného působení a vzájemného ovlivňování vlastností, procesů a událostí, jejich intenzity a doby trvání,*
 - b) *budoucího vývoje vlastností během životního cyklu.*

Požadavky na projekt úložiště radioaktivního odpadu jsou dále formulovány v § 19 vyhlášky č. 329/2017 Sb.

Projekt úložiště musí zajistit:

- a) *zohlednění nejméně příznivých vlastností ukládaného radioaktivního odpadu,*
- b) *použití systémů, konstrukcí a komponent s pasivní funkcí systému, konstrukce nebo komponent v nejvyšším rozumně proveditelném rozsahu,*
- c) *soulad úložiště radioaktivního odpadu s*
 1. *požadavky na vlastnosti území, v němž je umístěno, podle vyhlášky o umístění jaderného zařízení,*
 2. *plánovaným množstvím a vlastnostmi radioaktivního odpadu podle vyhlášky o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem,*
 3. *podmínkami normálního provozu a vývojem stavu území k umístění a stavu jaderného zařízení předpokládaným projektem jaderného zařízení během jeho životního cyklu a po uzavření úložiště radioaktivního odpadu,*
 4. *variantami budoucího vývoje stavu území k umístění a stavu jaderného zařízení, které by mohly vést k provozním událostem a radiačním mimořádným událostem,*
 5. *vlivem stárnutí používaných systémů, konstrukcí a komponent s pasivními funkcemi systémů, konstrukce nebo komponenty,*
- d) *vzájemnou chemickou a fyzikální slučitelnost komponent úložiště radioaktivního odpadu s uloženým radioaktivním odpadem a s prostředím uvnitř tohoto úložiště,*
- e) *ochranu úložných prostor úložiště radioaktivního odpadu v provozu proti obousměrnému průsaku vod,*
- f) *minimalizaci možnosti kontaktu uloženého radioaktivního odpadu s vodou při provozu*
a
- g) *ochranu proti záplavě a zatopení vodami, zejména srážkovými nebo podzemními, po uzavření úložiště radioaktivního odpadu.*

Splnění všech požadavků musí být prokázáno v bezpečnostní dokumentaci podle přílohy č. 1 zákona č. 263/2016 Sb. v různých fázích přípravy HÚ, jako je povolení umístění úložiště, povolení výstavby, provozu a uzavření, která sestává z následujících dokumentů:

- 1) *program systému řízení,*
- 2) *zadávací bezpečnostní zpráva,*
- 3) *analýza potřeb a možnosti zajištění fyzické ochrany,*
- 4) *záměr zajištění monitorování výpustí z jaderného zařízení,*
- 5) *program monitorování,*
- 6) *záměr zajištění zvládnutí radiační mimořádné události,*
- 7) *návrh koncepce bezpečného ukončení provozu,*

- 8) *popis způsobu zajišťování kvality přípravy realizace výstavby,*
- 9) *zásady zajišťování kvality následujících etap životního cyklu jaderného zařízení.*

Povolení SÚJB bude třeba rovněž již v etapě přípravy provozu a provozu podzemní laboratoře, například povolení k nakládání se ZIZ podle § 9 odst. 2 písm. f) zákona č. 263/2016 Sb.

Zároveň je třeba v průběhu přípravy HÚ získat:

- Rozhodnutí o stanovení průzkumného území pro zvláštní zásah do zemské kůry pro ukládání RAO v podzemních prostorech pro vybrané lokality na základě archivních informací a omezeného počtu terénních měření (zákon č. 62/1988 Sb.),
- Rozhodnutí o stanovení chráněného území pro zvláštní zásah do zemské kůry pro vybrané území a vybrané lokality na základě výsledků průzkumných prací (zákon č. 44/1988 Sb.),
- Rozhodnutí o povolení k hornické činnosti pro zahájení průzkumných prací na vybrané lokalitě/lokalitách hornickým způsobem (zákon č. 61/1988 Sb.).

V různých fázích přípravy HÚ musí rovněž proběhnout procesy posuzování vlivů na životní prostředí, a to jednak posouzení vlivů koncepce na životní prostředí (proces SEA) a posouzení vlivů záměrů na životní prostředí (proces EIA).

5 Řízení přípravy úložišť

5.1 Úvod

Příprava úložišť radioaktivních odpadů zahrnuje různé fáze (Obr. 1), které trvají několik desítek let. Jenom první fáze přípravy úložiště, výběr lokality a její popis, byla zahájena v ČR již kolem roku 1989 a její ukončení se předpokládá nejdříve v roce 2025.

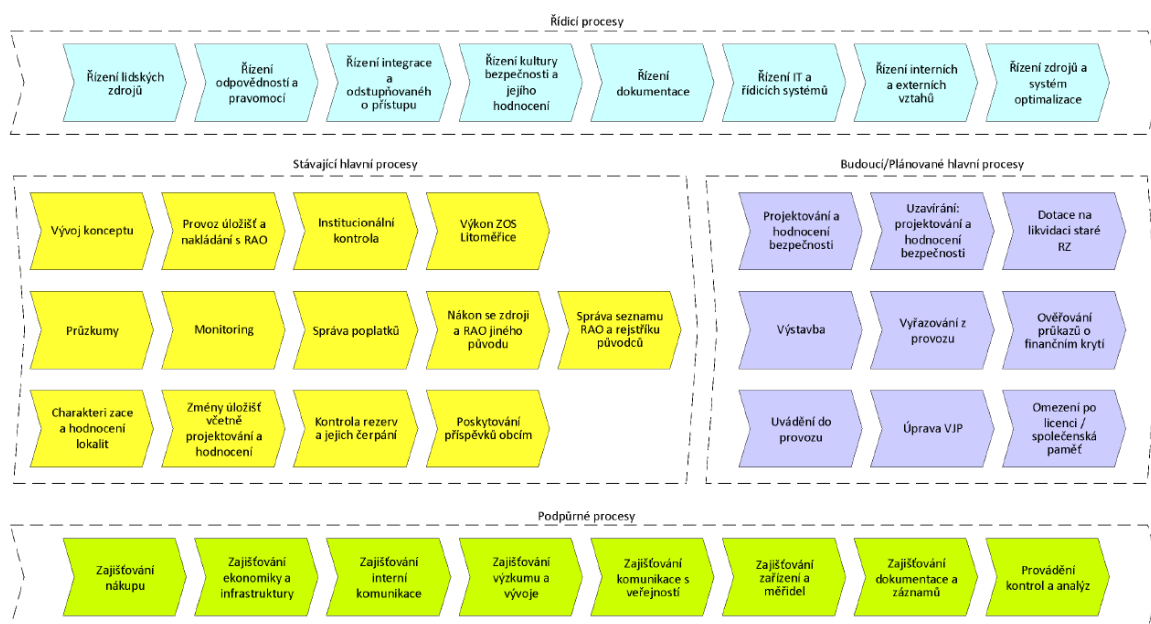
Takto dlouhý proces přípravy hlubinného úložiště vyžaduje zavedení projektového systémového přístupu řízení procesů, požadavků a získávaných dat. V opačném případě hrozí nebezpečí, že některé prioritní oblasti nebudou řešeny či naopak některé oblasti budou řešeny vícekrát, protože již nabyté znalosti a poznatky se mohou časem ztratit. Zcela prioritní je rovněž uchování nejenom informací a dat, ale i znalostí, které se často ztrácejí odchodem starších pracovníků z pracovního poměru.

Většinu procesů přípravy hlubinného úložiště je možno považovat za procesy výzkumu a vývoje. Tyto procesy se neustále opakují až do prokázání bezpečnosti vybrané lokality a navrženého projektu hlubinného úložiště a získání všech povolení pro jeho výstavbu.

5.2 Provedené práce

System řízení procesů

Řízení přípravy hlubinného úložiště a souvisejících výzkumných a vývojových prací je popsán ve směrnících SÚRAO S.36, S.12 a S.04 v souladu se schválenou politikou a systémem řízení SÚRAO (viz Obr. 5).



Obr. 5: Schéma řídicích procesů SÚRAO

Značné množství procesů je úzce svázáno s výzkumem a vývojem, včetně vývoje konceptu HÚ, geologických prací, charakterizace a hodnocení lokalit či projektování a hodnocení

bezpečnosti. S rostoucím množstvím poznatků a zkušeností je proto třeba měnit jak procesy, tak i jejich řízení.

Systém řízení požadavků (Requirement Management)

Požadavky pro výběr lokality pro umístění jaderného zařízení - hlubinné úložiště se zabývala řada předchozích dokumentů SÚRAO. Pro výběr lokality byly tyto dokumenty shrnuty v roce 2014 do dokumentu MP.22. V roce 2017 bylo připraveno 2. vydání tohoto dokumentu MP.22, které zahrnovalo požadavky nového atomového zákona a jeho prováděcích vyhlášek (Vokál et al. 2017). V roce 2020 bude dále probíhat aktualizace kritérií v souladu s novými poznatky a zkušenostmi.

Zatím nebyl připraven žádný dokument SÚRAO shrnující tzv. Design Basis, tj. bezpečnostní cíle hlubinného úložiště, skutečnosti podmiňující projektování hlubinného úložiště a projektová východiska pro jeho přípravu v souladu s vyhláškou č. 329/2017 Sb. (§5 až §10, §19) o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

Systém správy dat a uchovávání informací

Výstupy ze všech aktivit jsou ve formě tištěných dokumentů, elektronických verzí těchto dokumentů, podpůrných dat, modelů, mapových výstupů apod. Uchovávají se také některé fyzické předměty, představující např. dokladovou část experimentů z oblasti výzkumů materiálů, či hmotná dokumentace geologických prací. Velmi důležitým parametrem v oblasti managementu dat, informací a znalostí je „zpětná dohledatelnost“ podkladů, na základě kterých bylo konkrétní rozhodnutí učiněno. K této identifikaci slouží unikátní kód datového zdroje SÚRAO, skládající se z textových řetězců. Kromě tohoto unikátního identifikátoru, který umožňuje dohledat původ dat až ke smlouvě, na jejímž základě byla získána data, jsou data popsána klíčovými slovy a metadatovým popisem. Data jsou také vztažena, pokud je to relevantní, ke konkrétní lokalitě.

5.3 Plánované práce

Systém řízení procesů

Směrnice řízení procesů související s výzkumnými a vývojovými pracemi je třeba průběžně aktualizovat v souladu s vývojem hlubinného úložiště a získávanými poznatky z probíhajících projektů a rovněž v souladu s aktualizací legislativních předpisů (vyhláška č. 408/2016 Sb., o požadavcích na systém řízení). SÚRAO chce při aktualizaci systému řízení procesů více využít základní principy projektového řízení.

Česká republika se stále pohybuje v počátečních fázích přípravy hlubinného úložiště, jak je ukázáno na Obr. 3, tj. ve fázích vývoje optimálního bezpečnostního a úložného konceptu pro geologické prostředí ČR, přípravě úvodního, referenčního projektu a výběru a charakterizace vhodné lokality. V některých výzkumných oblastech je však mnohem dále a v předchozím období si vytvořila dobrý základ pro vývoj projektového řešení úložiště a prokázání bezpečnosti na základě vědeckého poznání.

Systém řízení požadavků

Systematicky bude zahájen vývoj systému řízení požadavků na hlubinné úložiště a zpracován dokument shrnující bezpečnostní cíle hlubinného úložiště, skutečnosti podmiňující

projektování HÚ, požadavky na vybraná zařízení a jejich bezpečnostní funkce a projektová východiska na projekt HÚ podle § 5 až 10 a § 19 vyhlášky č. 329/2017 Sb. (propojení projektových východisek a projektových požadavků). Tento dokument bude průběžně aktualizován s rostoucím množstvím poznatků a zkušeností a bude tvořit základ pro přípravu bezpečnostního a úložného konceptu a technického řešení HÚ.

Vlastní příprava dokumentu bude vycházet z analýzy českých a mezinárodních legislativních předpisů (vyhlášky č. 329/2017 Sb., IAEA 2011a, IAEA 2011b, IAEA 2014) a zahraničních zkušeností (například POSIVA SKB Report 01, 2017). Postupně s rozvojem projektu hlubinného úložiště budou upřesňovány předběžné technické specifikace, zejména na tzv. vybraná zařízení hlubinného úložiště (UOS, výplňové materiály vrtů a tunelů, ukládací vrty a ukládací chodby), která musí splnit nejpřísnější bezpečnostní požadavky.

Systém správy dat a informací

Práce v oblasti zpracování a nakládání s daty a informacemi budou v následujícím období zaměřeny především na budování systému řízení informací (information management), systému řízení dat (data governance), řízení změn (change management) a adekvátní IT infrastruktury datových skladů a systém metadatových popisů (klíčových slov) s ohledem jak na harmonogram postupného zužování počtu potenciálních lokalit dle Konceptu, tak se zaměřením na bezpečný provoz již provozovaných úložišť RAO.

6 Vývoj bezpečnostního konceptu úložiště

6.1 Úvod

Bezpečnostní koncept SÚRAO pro přípravu hlubinného úložiště vychází z principu optimalizace radiační ochrany popsané výše a použití správné praxe (nejlepší dostupné technologie a materiály) pro zajištění radiační ochrany s ohledem na nutné náklady a velikost efektivní, kolektivní dávky. SÚRAO chce využít především technologie a materiály dostupné v České republice, pokud budou s dostatečnou rezervou splněny všechny požadavky na bezpečnost hlubinného úložiště tak, aby náklady na vybudování úložiště byly přiměřené.

6.2 Provedené práce

Bezpečnostní úložný koncept, který byl připraven již v roce 1999 (Holub et al. 1999), vycházel ze švédského ukládacího konceptu KBS-3 (SKBF/KBS 1983), založeného na termodynamické stabilitě UOS s měděným přebalem, který velmi pomalu koroduje v redukčním prostředí krystalinických hornin v hloubce několik set metrů pod povrchem a zhuťného bentonitu. Zhuťný bentonit jednak brání migraci koroziaktivních látek (sulfidů, chloridů) k povrchu UOS a jednak brání proliferaci sulfát redukujících bakterií vyvolávajících mikrobiální korozi vysokým bobtnacím tlakem.

Z důvodu zejména menšího obsahu chloridů v podzemních vodách krystalinických hornin v ČR, než mají podzemní vody ve Švédsku či Finsku a zároveň i z ekonomických důvodů byl v původním českém konceptu (Holub et al. 1999) měděný UOS nahrazen dvouvrstvým UOS navrženým ve Škoda JS a. s. s vnitřním tenkostěnným pouzdrém (5 mm) z korozi-vzdorné oceli a vnějším přebalem z uhlíkové oceli (6 cm). Sodný bentonit typu Wyoming navržený ve švédském konceptu byl z ekonomických důvodů nahrazen vápenato-hořečnatým bentonitem z českých ložisek. Jinak navržený úložný koncept odpovídal i rozměrově švédskému konceptu KBS-3 V, tj. UOS jsou vloženy do vertikálních vrtů v hloubce 500 m pod povrchem země a obklopeny zhuťným bentonitem o tloušťce 350 mm. V roce 2011 (Pospíšková et al. 2011) byl připraven další referenční koncept, který vycházel ze švédského konceptu KBS-3 H, kde UOS jsou ukládány horizontálně ve vrtech (Posiva SKB, Report 06 2017). Jedinou odlišností od švédského konceptu bylo opět použití dvouvrstvého UOS s vnitřním pouzdrém z korozi-vzdorné oceli a vnějším přebalem z uhlíkové oceli českého typu bentonitu. V průběhu následujících projektů však bylo zjištěno, že navržená koncepce UOS s vnitřním tenkostěnným pouzdrém z korozi-vzdorné oceli nemůže s dostatečnou rezervou splnit bezpečnostní požadavky, zejména z důvodu nízké mechanické pevnosti tenkostěnného pouzdra. Proto byl tento koncept UOS nahrazen konceptem UOS s vnitřním pouzdrém z korozi-vzdorné oceli, jehož tloušťka zaručí i po korozi vnějšího obalu dlouhodobou odolnost hydrostatickému tlaku podzemní vody i bobtnacímu tlaku bentonitu.

Současný bezpečnostní koncept SÚRAO pro přípravu HÚ lze formulovat takto:

- 1) Zadržet odpad co nejdéle v dvouvrstvých, ocelových ukládacích obalových souborech, které zároveň fyzicky zabraňují vzniku kritických a superkritických podmínek během provozu i po uzavření úložiště a zadržují uvolnění radionuklidů po nezbytnou dobu s ohledem na všechny vlastnosti, události a procesy, které mohou nastat. SÚRAO

vybrala jako referenční dvouvrstvý UOS, ve kterých je první vrstva tvořena několika centimetry silné vrstvy uhlíkové oceli zajišťující stínění, nízkou a predikovatelnou rychlost koroze a vysokou mechanickou pevnost a druhá vrstva je tvořena několika centimetry korozivzdorné oceli, zajišťující velmi nízkou rychlost koroze a vysokou mechanickou pevnost. Uhlíková ocel chrání korozivzdornou ocel v přechodném období vysokých teplot, aerobního prostředí a možné vyšší koncentrace chloridů akumulovaných na povrchu UOS, které by mohly iniciovat lokalizovanou korozi. Tato koncepce je založena na řadě dlouhodobých experimentů (King 2014, Dobrev et al. 2018b), ve kterých se ukázalo, že vrstva uhlíkové oceli, s výjimkou krátkého období na začátku po uložení, bude korodovat rovnoměrně nízkou rychlostí koroze pod 2 $\mu\text{m}/\text{rok}$ v prostředí bentonitu se stálou tendencí se v průběhu času snižovat. Po uplynutí této doby se teplota kolem UOS sníží na teplotu jen mírně vyšší, než je teplota okolní hostitelské horniny. Při nízkých teplotách a nízké koncentraci koroziaktivních látek je rychlost koroze korozivzdorné oceli výrazně nižší než 0,1 $\mu\text{m}/\text{rok}$ (Dobrev et al. 2018 b). Podle dosavadních výsledků tuzemských i zahraničních experimentů (King et al. 2016, Smart et al. 2017, Dobrev et al. 2018a,b), navržený koncept UOS může zadržet radionuklidy po dobu stovek tisíců let v případě horninového prostředí bez výrazné mikrobiální aktivity a bez přítomnosti větší koncentrace koroziaktivních látek v podzemní vodě. Tyto podmínky je možno ovlivnit použitím vhodných výplňových materiálů, které zabrání proliferaci bakterií urychlujících korozi a zabrání toku vody kolem UOS a rychlém transportu korozi-aktivních látek k UOS. Jak bylo uvedeno výše, nízkopropustný kompaktní bentonit z českých ložisek je v konceptu SÚRAO testován jako referenční výplňový materiál. Některé zkoušky byly také provedeny s cementovým materiálem, který by mohl tvořit první vrstvu dvouvrstvého výplňového systému cement–bentonit a snížit ještě více rychlost koroze uhlíkové oceli.

- 2) Zpomalit po poškození některého z UOS migraci radionuklidů ve výplňovém materiálu kolem UOS. Tento výplňový systém (zhuťněný bentonit) především brání migraci radionuklidů ve formě koloidů, které by mohly rychle pronikat do horninového prostředí a zpomaluje migraci radionuklidů tím, že migrace může probíhat pouze difúzí. Rychlost migrace většiny radionuklidů bude zpomalena sorpcí. SÚRAO chce využít bentonit z českých nalezišť v případě, že splní uvedené požadavky.
- 3) Zajistit vhodnou lokalitou s vhodným horninovým prostředím:
 - a) plnění bezpečnostních funkcí inženýrských bariér zejména stabilním, redukčním prostředím bez přítomnosti kyslíku vytvářejícím příznivé podmínky pro pomalou degradaci inženýrských bariér, nízkou rozpustnost uranové matrice VJP, nízkou rozpustnost radionuklidů a vysokou sorpci radionuklidů,
 - b) velmi malou pravděpodobnost seismo-tektonických událostí v hloubce několika set metrů pod povrchem země, které by mohly předčasně mechanicky poškodit UOS,
 - c) neúmyslný kontakt člověka s odpadem tím, že úložiště je umístěno několik set metrů pod povrchem země,
 - d) velmi pomalou migraci radionuklidů do životního prostředí v důsledku nízké rychlosti toku vody, nízké hustotě puklin a dostatečnou vzdáleností od zvodnělých struktur s velkou rychlostí toku vody.

6.3 Plánované práce

Dosavadní bezpečnostní koncept je založen na řadě předpokladů, které je třeba ověřit pomocí výzkumných a vývojových prací.

V případě úložiště VJP jde zejména o ověření:

- funkčnosti a spolehlivosti dvouvrstvého UOS,
- možnosti využití bentonitů z českých úložišť,
- předpokladů o vlastnostech hornin v předpokládané hloubce úložiště,
- inventáře VJP (zejména užší spoluprací s ČEZ).

V rámci výzkumných a vývojových prací však budou studovány i jiné bezpečnostní koncepty. Například možnost využití cementu pro snížení rychlosti koroze uhlíkové či korozivzdorné oceli materiálů UOS. Nadále bude sledován švédský a finský koncept založený na velmi nízké rychlosti koroze mědi. Bezpečnostní koncept může být rovněž ovlivněn výsledky strategických studií, například rozhodnutím o přepracování paliva v zahraničí.

V případě úložiště vysoko a středně aktivních odpadů, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, které je nyní plánováno umístit do stejné lokality, jako je úložiště VJP, je třeba vytvořit základní bezpečnostní koncept, na jehož základě bude připravován projekt. Jde především o vzájemnou pozici tohoto úložiště k úložišti VJP a výběr materiálů výplňového systému.

7 Strategické studie

Podle § 5, odst. 5), písm. b.) zákona č. 263/2016 Sb. každý, kdo využívá jadernou energii nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen soustavně a komplexně hodnotit naplňování zásad mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření z hlediska stávající úrovně vědy a techniky a zajišťovat uplatnění výsledků hodnocení v praxi. SÚRAO tento bod plní kontinuálním sledováním stavu úrovně vědy a techniky ve světě, účastí v mezinárodních projektech a iniciací strategických studií vedoucích ke zvýšení jaderné bezpečnosti a radiační ochrany a efektivnosti ukládání radioaktivního odpadu.

Strategické studie budou zaměřeny zejména na analýzy alternativ konce palivového cyklu a zvýšení jaderné bezpečnosti, radiační ochrany provozovaných úložišť, efektivnímu využívání kapacit úložišť či přípravu efektivních způsobů nakládání s RAO.

V aktualizaci Koncepce nakládání s VJP a RAO, schválené usnesením vlády č. 597 ze dne 26. srpna 2019, byly zváženy následující možné alternativy zneškodnění vyhořelého jaderného paliva:

- A1) Nulová varianta (dlouhodobé skladování VJP),
- A2) Přímé uložení VJP do HÚ na území ČR,
- A3) Přepřacování paliva v zahraničí a uložení zbylých odpadů v HÚ na území ČR,
- A4) Uložení VJP/VAO do mezinárodního či regionálního úložiště.

Všechny tyto alternativy kromě alternativy přímého uložení VJP do hlubinného úložiště vybudovaného na území ČR byly odmítnuty (Koncepce) z důvodu neslučitelnosti s evropskou legislativou, velkých ekonomických nákladů či v době přípravy koncepce nereálnou možností vybudování společného, mezinárodního úložiště.

Vzhledem k současné energetické politice ČR preferující jadernou energetiku je však třeba některé varianty znovu zvažovat a případně i uvažovat o nových alternativách. V příštím období se SÚRAO chce zaměřit i na iniciaci strategických studií směřujících k optimalizaci konce palivového cyklu. Jde například o následující typy studií:

- analýza možnosti dlouhodobého skladování VJP a jeho dopadu na HÚ,
- analýza možnosti ukládání všeho RAO do HÚ po ukončení provozu ÚRAO Bratrství, Richard a Dukovany,
- analýza možnosti uložení VJP v používaných přepravních a skladovacích obalových souborech,
- analýza možnosti přepracování VJP a jeho dopadu na HÚ,
- nakládání s radioaktivními odpady z navrhovaných nových typů jaderných reaktorů,
- aktualizace nakládání s odpady z vyřazování jaderných elektráren včetně analýz kapacity ÚRAO Dukovany, možnosti využití skládek nebezpečných odpadů pro ukládání velmi nízké aktivních odpadů a finančního ocenění nákladů na vyřazování,
- studie možností snížení objemu nízké a středně aktivních odpadů vznikajících v ČR vhodnými solidifikačními technologiemi.

8 Inventář a vlastnosti radioaktivního odpadu

8.1 Úvod

V ČR jsou provozovány dvě jaderné elektrárny, a to Jaderná elektrárna Dukovany a Jaderná elektrárna Temelín. Projektová životnost elektrárny Dukovany je 30 let a elektrárny Temelín 40 let. Provozovatel realizuje program dlouhodobého provozu za horizontem projektové životnosti tak, aby doba provozu mohla být prodloužena pro obě elektrárny minimálně na 60 let. Při přípravě HÚ je třeba počítat i s plánovanými novými jadernými zdroji rovněž s minimální životností 60 let.

Přehled základních parametrů pro projektové řešení HÚ je uveden v Tab. 2 (Rataj et al. 2015a). V současné době se pro projektové řešení HÚ neuvažuje o přepracování VJP a uložení jeho zbytků po vitifikaci. Základním předpokladem plynoucím z energetické koncepce je výstavba 3 nových bloků. V případě rozhodnutí o přepracování či změně počtu uvažovaných nových reaktorů by bylo nutné tento plán VaV výrazně modifikovat. U všech bloků (i nových zdrojů) je uvažována doba mezi vyjmutím paliva z reaktoru a uložením do HÚ 65 let. Stávající jaderné bloky mají maximální vyhoření 60 MWd/kg. Pro NJZ se v současné době předpokládá palivo s maximálním vyhořením 70 MWd/kg. Za těchto předpokladů vychází celkový počet ukládacích obalových souborů 7 600 ks. V Tab. 3 je pro jednotlivé elektrárny uvedena úhrnná hmotnost uranu, hmotnost U v jednom ukládacím obalovém souboru a spočítaný průměrný tepelný výkon jednoho ukládacího obalového souboru po 65 letech skladování VJP.

Tab. 2: Přehled základních parametrů VJP pro EDU, ETE a NJZ

Typ reaktoru	Jednotky	VVER-440	VVER-1000	NJZ
Max. vyhoření	MWd.kg ⁻¹	60	60	70
Max. doba provozu	roky	60	60	60
Min. doba chlazení	roky	65	65	65
Počet PS	ks	21 700	5 400	8 100
Počet PS v UOS	ks	7	3	3
Počet UOS	ks	3 100	1 800	2 700

Tab. 3: Celková hmotnost U z VJP určeného pro ukládání do HÚ

Typ JE	Hmotnost U (kg) na jeden UOS	Počet PS	Celková hmotnost U (t)	Průměrný tepelný výkon OS/65 let skladování (W)
EDU (4 bloky)	855	21 700	2 650	655
ETE (2 bloky)	1419	5 400	2 555	1 125
NJZ (3 bloky)	1419	8 100	4 300	1 221
Suma		35 200	9 505	

Do hlubinného úložiště budou vedle VJP ukládány i ostatní vysokoaktivní a středněaktivní odpady, které nesplňují limity a podmínky přijatelnosti pro uložení do přípovrchových úložišť.

Jedná se o VAO/SAO pocházející z vyřazování jaderných zařízení, z průmyslových a lékařských aplikací a z výzkumné činnosti. VAO/SAO bude ukládáno ve stejné lokalitě jako VJP, a to v takové vzdálenosti, aby nedocházelo k jejich vzájemnému ovlivňování. To musí být potvrzeno studií, která prokáže toto tvrzení. Vyřazování jaderných zařízení je založeno na konstrukční dokumentaci jednotlivých zařízení a na výpočtech aktivace doplněné kvalifikovanými odhady. Bilanční přehledy jsou zpracovány pro variantu tzv. postupného vyřazování z provozu, kdy demontážní činnosti jsou posunuty o 40 let po ukončení provozu zařízení. Tím se sníží aktivita, a to umožňuje uložení odpadů do menšího počtu betonkontejnerů. Při variantě postupného vyřazování se počet obalových souborů sníží až o 30 % proti okamžitému vyřazování.

8.2 Provedené práce

Vyhořelé jaderné palivo

Inventář VJP byl řešen v rámci projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště v dílčím úkolu „Databáze VJP“ (Rataj et al. 2015b). Pro potřeby výpočtů složení vyhořelého paliva byl využit výpočetní balík SCALE ve verzi 6.1.3. Výpočty probíhaly pomocí řídicího modulu TRITON s využitím 2D transportního kódu NEWT. Databáze VJP obsahuje aktivity a hmotnosti požadovaných dlouhodobých radionuklidů. Seznam klíčových radionuklidů, které jsou důležité z hlediska dlouhodobé i provozní bezpečnosti, je uveden v Tab. 4. Podrobné výsledky, způsob výpočtu i s uvažovanými předpoklady jsou popsány v závěrečné zprávě Rataj et al. (2015a).

Tab. 4: Klíčové radionuklidy

Aktivační produkty	Aktinidy					Štěpné produkty
^3H						^{79}Se
^{10}Be	^{229}Th	^{230}Th	^{232}Th			^{85}Kr
^{14}C	^{231}Pa					^{90}Sr
^{36}Cl	^{233}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{93}Zr
^{41}Ca	^{237}Np					^{99}Tc
^{59}Ni	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{242}Pu		^{107}Pd
^{63}Ni	^{241}Am	^{242}Am	^{243}Am			^{126}Sn
^{93}Zr	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm			^{129}I
^{93}Mo						^{135}Cs
^{94}Nb						^{137}Cs
$^{108\text{m}}\text{Ag}$					$^{226}\text{Ra}^*$	^{151}Sm
$^{166\text{m}}\text{Ho}$						

* ^{226}Ra nepatří mezi aktinidy, vzniká jako dceřiný produkt při rozpadu aktinidů

Součástí výpočtů bylo i stanovení zbytkového výkonu pro jeden UOS zaplněný VJP. Zbytkový výkon byl spočítán pro následující typy paliva:

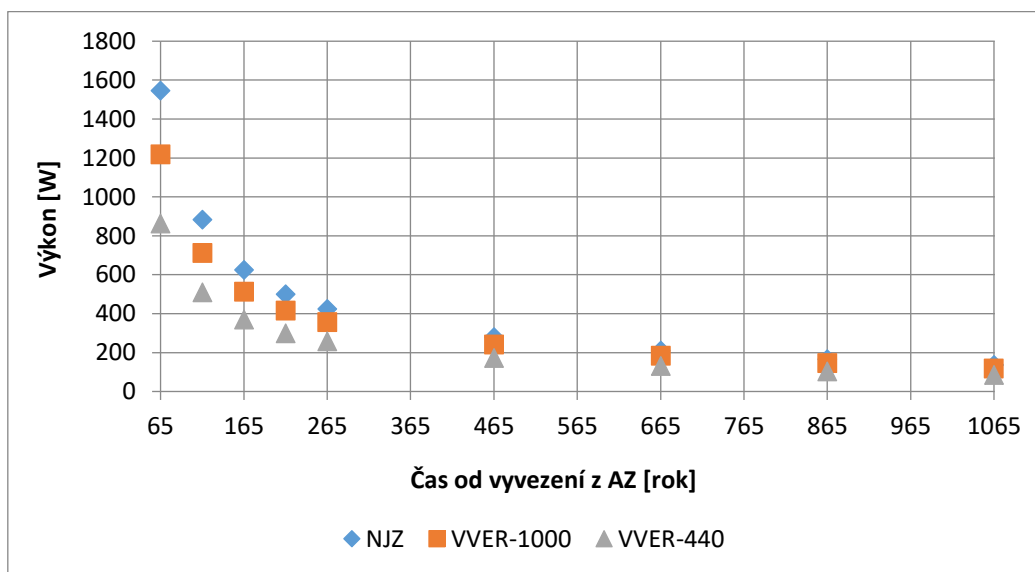
- VVER-440 Gd-2M+ s průměrným obohacením 4,38 % a vyhořením 60 MWd/kg_{HM}

- VVER-1000 TVSAT s průměrným obohacením 4,60 % a vyhořením 60 MWd/kg_{HM}
- NJZ s průměrným obohacením 4,50 % a vyhořením 70 MWd/kg_{HM}

Vypočtené hodnoty výkonů jsou uvedeny v Tab.5. Grafické znázornění zbytkového výkonu pro jeden UOS je na Obr. 6.

Tab.5: Zbytkový výkon v místě maximální hodnoty vzhledem k UOS pro všechny typy JE

Čas od vyvezení [rok]	VVER-440	VVER-1000	NJZ
	Výkon [W/UOS]		
65	$8,65 \cdot 10^{+2}$	$1,22 \cdot 10^{+3}$	$1,55 \cdot 10^{+3}$
115	$5,10 \cdot 10^{+2}$	$7,12 \cdot 10^{+2}$	$8,83 \cdot 10^{+2}$
165	$3,70 \cdot 10^{+2}$	$5,13 \cdot 10^{+2}$	$6,26 \cdot 10^{+2}$
215	$3,00 \cdot 10^{+2}$	$4,16 \cdot 10^{+2}$	$5,00 \cdot 10^{+2}$
265	$2,58 \cdot 10^{+2}$	$3,58 \cdot 10^{+2}$	$4,25 \cdot 10^{+2}$
465	$1,73 \cdot 10^{+2}$	$2,42 \cdot 10^{+2}$	$2,79 \cdot 10^{+2}$
665	$1,31 \cdot 10^{+2}$	$1,84 \cdot 10^{+2}$	$2,10 \cdot 10^{+2}$
865	$1,04 \cdot 10^{+2}$	$1,46 \cdot 10^{+2}$	$1,67 \cdot 10^{+2}$
1065	$8,53 \cdot 10^{+1}$	$1,19 \cdot 10^{+2}$	$1,37 \cdot 10^{+2}$



Obr. 6: Zbytkový výkon v místě maximální hodnoty vzhledem k UOS pro VVER-440, VVER-1000 a NJZ

VAO a SAO pro hlubinné úložiště

Na základě analýz zpracovaných ve zprávě Touš a Čubová (2017) lze pro uložení v HÚ předpokládat následující typy materiálů radioaktivního odpadu:

- uhlíková ocel (vnitřní stěny šachty reaktoru ETE, stavební části reaktoru ETE, EDU),

- nerezová ocel (reaktorová nádoba ETE a EDU včetně výstelky reaktoru ETE, EDU a vnitřních částí reaktoru ETE, EDU),
- materiály Al (absorpční tyče – slitina $B_4C + Al$; Koš aktivní zóny, horizontální kanály a tepelná kolona – slitina hliníku $AlMg_5$; výzkumný reaktor LVR-15),
- slitina BeO (berylíové reflektory; výzkumný reaktor LVR-15),
- beton (šachta reaktoru),
- těžký beton,
- serpentinitový beton (zásypy),
- vitrifikát sodno–hlinité fosfátové sklo (přepracované palivo z výzkumného reaktoru LVR-15),
- solidifikované kapaliny nebo kaly v cementu,
- URZ (zdroje ionizujícího záření v těsném ocelovém pouzdře, ZIZ v kovové nebo krystalické formě, hladinoměry, terapeutické ozařovače, průmyslové ozařovače),
- ionizační hlásiče požáru (kovové plíšky s napařeným radionuklidem, převážně ^{241}Am , ve zdvojeném OS).

Pro výše uvedené odpady byly identifikovány klíčové radionuklidy, které mohou nejvíce ovlivnit bezpečnost HÚ (Touš a Čubová 2017), přičemž kritériem výběru byla mobilita radionuklidů, jejich poločas rozpadu, dlouhodobý negativní účinek na lidský organismus a na životní prostředí. Mezi klíčové radionuklidy patří: ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{93}Mo , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{94}Nb , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{237}Np a izotopy Am, Pu a Cm.

Pro každý typ odpadu byl proveden návrh vhodné formy matrice a odhad jejích vlastností potřebný pro výpočet zdrojového členu (loužitelnost, stabilita). Výsledky jsou uvedeny ve zprávě Čubová et al. (2017).

Pro výpočet množství odpadů z vyřazování jaderných elektráren je třeba ověřovat údaje pro množství radionuklidů vzniklých aktivací. K tomuto účelu byla využita unikátní možnost destruktivní radiochemické analýzy reálných vzorků ozářeného betonu, pocházejícího z vyřazované jaderné elektrárny Greifswald, která byla stejného typu, jako je jaderná elektrárna Dukovany. Výsledky jsou uvedeny ve zprávě Svoboda K. et al. (2017).

Inventarizace VAO/SAO určeného k ukládání v HÚ umožnila vytvořit databázi, která rozděljuje VAO/SAO podle kategorií, která současně umožňuje určit množství odpadů připadající na jednotlivé elektrárny nebo spočítat aktivity odpadů v určitém časovém období.

V následujících Tab. 6 až

Tab. 8 jsou shrnuty hmotnostní bilance technologických částí reaktoru včetně počtu OS pro dva bloky JE Temelín, čtyři bloky JE Dukovany a experimentální reaktor LVR 15.

Tab. 6: Hmotnostní bilance aktivovaných technologických částí reaktoru pro postupné vyřazování z provozu doplněné o počet betonových kontejnerů pro JE Temelín

Komponenty reaktoru	HÚ	Betonové kontejnery
	(kg)	(ks)
Ocel s nízkou koncentrací příměsí	384 150	123
Serpentinitový beton	32 000	10
Ostatní aktivované předměty	14 000	14
Suma - 1 reaktor	430 150	147
Suma - 2 reaktory	860 300	294

Tab. 7: Hmotnostní bilance aktivovaných technologických částí reaktoru pro postupné vyřazování z provozu doplněné o počet betonových kontejnerů pro JE Dukovany

Komponenty reaktoru	HÚ	Betonové kontejnery
	(kg)	(ks)
Ocel s nízkou koncentrací příměsí	220 000	220
Serpentinitový beton	77 000	77
Konstrukční beton	200 000	200
Ostatní aktivované předměty	50 000	50
Suma - 1 reaktor	547 000	547
Suma - 4 reaktory	2 188 000	2 188

Tab. 8: Množství vyřazovaných odpadů a počet betonových kontejnerů pro reaktor LVR-15

Komponenty reaktoru	HÚ	Betonové kontejnery
	(kg)	(ks)
Ocel 08Ch18N10T	7 900	10
Hliník	275	11
Absorpční tyče – B ₄ C + Al	10	1
Suma	8 185	21

Do HÚ se bude ukládat i VAO/SAO, které je v režimu skladování v ÚRAO Richard, protože nespĺňuje podmínky a limity přijatelnosti pro uložení do přípořchových úložišť. Celková hmotnost tohoto odpadu ke konci roku 2018 je 48 174 kg. Dále je třeba pro ukládání v HÚ počítat se zdroji ionizujícího záření, především se zdroji typu ²⁴¹Am a ²³⁹Pu. Databáze ZIZ, kterou spravuje SÚJB, obsahuje více jak 4 000 položek. Po analýze jednotlivých skupin zářičů se ukazuje, že položek určených k ukládání do HÚ bude méně než 1 000. Hmotnosti ZIZ jsou zanedbatelné vůči ostatním odpadům, ale vzhledem k jejich vysoké aktivitě a dlouhým poločasům rozpadu, je třeba navrhnout způsob, jak se ZIZ nakládat a provést inventarizaci ZIZ s ohledem na ukládání do HÚ.

Do HÚ bude uložen vitrifikát vzniklý přepracováním vysoce obohaceného vyhořelého paliva z výzkumného reaktoru LVR-15. Zhruba v roce 2028 bude z Ruské federace navraceno 740 kg vitrifikovaného VAO a v roce 2033 (z druhého odvozu vyhořelého paliva) to bude 720 kg. Pro vitrifikát bude třeba navrhnout speciální ukládací obalový soubor.

8.3 Plánované práce

Vzhledem k nejasnosti, kolik nových jaderných bloků bude schváleno a kdy se začne s jejich výstavbou, jaká bude skutečná životnost elektráren a jaká bude doba skladování VJP, je potřeba se zaměřit na:

- 1) aktualizace databáze inventáře VJP a vlastností RAO pro HÚ. Tento projekt bude zahrnovat i aktualizaci seznamu klíčových radionuklidů. Seznam radionuklidů je třeba doplnit o radionuklidy významné z hlediska provozní bezpečnosti, a pak na základě současných znalostí stanovit hlediska, podle kterých by bylo možné posoudit důležitost jednotlivých radionuklidů a získat tak objektivní hodnotící kritéria, ze kterých by vyšel aktualizovaný seznam klíčových radionuklidů pro provozní a dlouhodobou bezpečnost. Na základě tohoto seznamu by bylo možné blíže analyzovat vlastnosti (loužitelnost, sorpce, stabilita) menšího počtu radionuklidů s větším důrazem na jejich významnost. Vypočítaný inventář musí zahrnovat i nejistoty klíčových radionuklidů důležitých z hlediska bezpečnosti HÚ. Pro některé klíčové radionuklidy (např. ^{14}C , ^{36}Cl) nejsou dobře známy vstupní údaje jako např. koncentrace zdrojových prvků. Dusík, který je hlavním zdrojem pro uhlík ^{14}C , se vyskytuje v kovových částech jako příměs a jeho koncentrace je udávána v intervalu s velkým rozpětím, a to je pro stanovení aktivit ^{14}C nedostačující. Současně bude nutné podobně analyzovat také další příměsi a identifikovat významné přispěvatele k celkové aktivitě vyhořelého paliva,
- 2) analýzu nejnovějších poznatků o okamžitě uvolnitelných radionuklidech. Okamžité uvolnitelné frakce jsou důležitým faktorem pro kvantitativní vyhodnocení zdrojového členu. Tato problematika se musí řešit na mezinárodní úrovni, protože se jedná o velmi náročné (práce s aktivitou) a drahé experimenty,
- 3) porovnání výsledků s reálným provozem jaderných elektráren. Projekt umožní porovnat a zpřesnit výsledky získané v rámci projektu příprava HÚ s aktuálním stavem inventáře VJP přítomného na Jaderné elektrárně Temelín a Jaderné elektrárně Dukovany. Porovnání výpočtů s reálnými provozními podmínkami umožní prokázat správnost přístupu a výpočtů a zároveň umožní navrhnout optimální způsob zavážení VJP z hlediska distribuce teploty v HÚ,
- 4) výpočet zdrojového členu pro různé varianty vývoje jaderné energetiky s uvážením navržených dob skladování i s analýzou nejistot způsobenou neznalostí skutečného provozu elektráren a typu NJZ a přepracování. U popsanych jevů je třeba provést analýzu míry konzervativnosti, která má vliv na nadhodnocení (podhodnocení) výsledků (vazba na strategické studie – Kap. 7),
- 5) vliv prodlouženého skladování na poškození pokrytí PS a degradaci matrice. Bude třeba provést analýzy vlastností PS, jeho chování při přepravě a následných manipulacích v HÚ pro různou dobu skladování. Jaký to bude mít vliv na počet poškozených PS a jaké jsou varianty nakládání s poškozenými PS (vlastní pouzdro pro poškozená PS, přepracování poškozených PS). Vzhledem k tomu, že experimentální testování PS je velmi drahé a náročné jak na vybavení laboratoří, tak i na schvalovací

procesy, musíme v této oblasti sledovat mezinárodní dění a zapojovat se do mezinárodních projektů např. v rámci NEA, IAEA, EURAD apod. (vazba na evropský projekt EURAD WP SFC).

9 Geologická charakterizace lokalit pro umístění HÚ a výběr finální a záložní lokality

9.1 Úvod

Geologické charakterizační práce mají za úkol přinést data pro účely popisu a výběru finální a záložní lokality hlubinného úložiště. V konečném důsledku všechny charakterizační a monitorovací práce budou použity pro bezpečnostní studii (safety case) a pro potvrzení provozní a dlouhodobé bezpečnosti vybrané lokality.

Proces výběru lokality pro vybudování hlubinného úložiště v ČR probíhá s malými přestávkami od 90. let 20. století. Původní představy o vývozu jaderného odpadu do bývalého SSSR se ukázaly právně a eticky nepřijatelné. Po změně politického systému v Československu v r. 1989 byl přijat strategický dlouhodobý plán vybudování vlastního hlubinného úložiště.

První geologickou studii realizoval tehdejší Ústřední ústav geologický (dnes Česká geologická služba) v roce 1989. Na základě geologické stavby České republiky, ložisek nerostných surovin, poznatků z dálkového průzkumu Země, hydrogeologie, seismicity a recentních pohybů zemské kůry, geofyziky a inženýrské geologie bylo vybráno 27 geologických těles, která byla doporučena k dalšímu zkoumání. Tyto lokality byly z převážné většiny budovány kyselými vyvěřelými horninami (granit a granodiorit), v menší míře také bazickými a ultrabazickými horninami (peridotit, diorit, gabro, syenit) a metamorfovanými horninami (rula, fylit, migmatit).

V roce 1998 vypracoval Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. zprávu *Kritická rešerše archivovaných geologických informací* (Woller et al. 1998). Cílem bylo shromáždění a kritické zhodnocení existujících archivovaných geovědních informací a následné provedení výběru potenciálně vhodných oblastí (lokalit). Výsledkem bylo doporučení pokračovat v hodnocení osmi lokalit o rozloze 16-56 km².

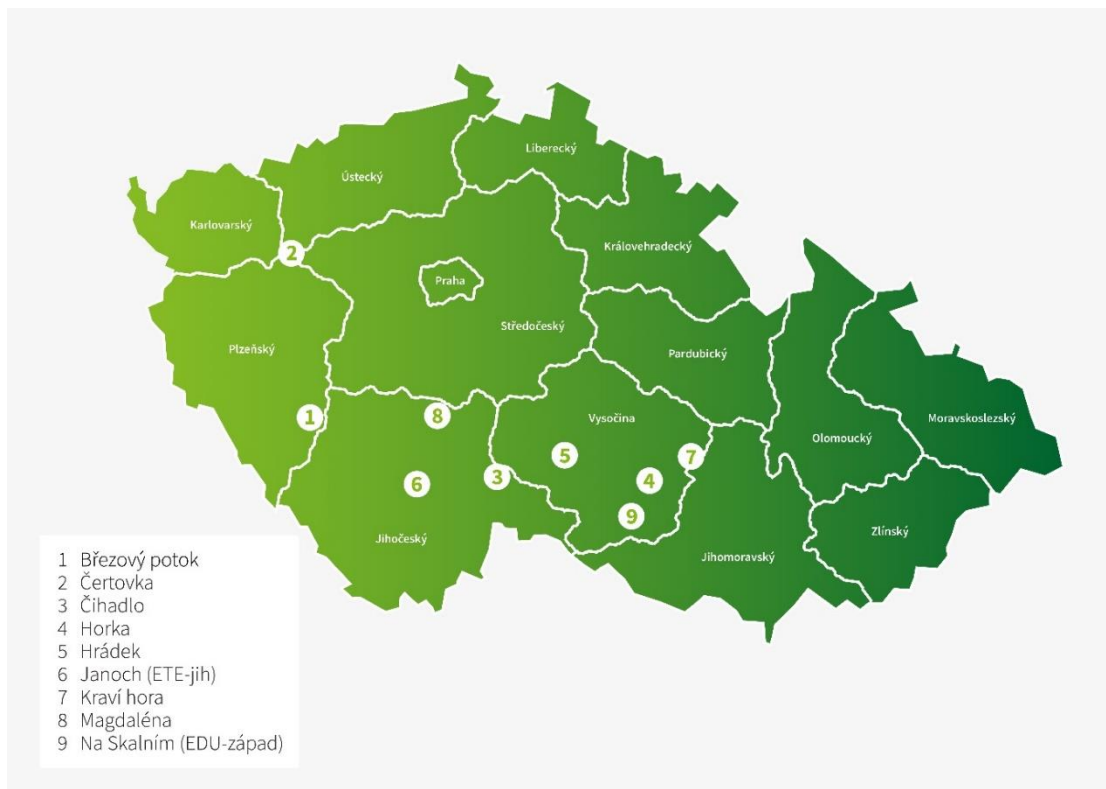
Nově zřízená organizační složka státu Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) poté provedla revizi dosavadních prací a rozhodla o doplnění prací dle doporučení IAEA (IAEA 1994). Výsledkem prací byla závěrečná zpráva *Výběr lokality a staveniště HÚ RAO v ČR, Analýza území ČR, fáze regionálního mapování* (Šimůnek et al. 2003).

Hodnocení území ČR a výběru lokality pro umístění HÚ (Šimůnek et al. 2003) probíhalo v několika na sebe navazujících krocích. Prvním krokem bylo vyloučení nevhodných území, a to zejména z důvodu nepříznivých geologických poměrů (tektonického porušení a tektonické aktivity, seismického zatížení, vulkanismu a postvulkanické aktivity apod.), tak i z důvodu uplatnění hlediska nedodržení základních sociálních a právních jistot obyvatel ČR a uplatnění neporušitelnosti mezinárodních smluv a závazků. Druhým krokem byl výběr oblastí s vhodnými geologickými podmínkami. Podstatou tohoto kroku bylo zevrubné posouzení geologické stavby území ČR a vymezení typů hornin vhodných pro ukládání radioaktivních odpadů. S ohledem na geologickou stavbu Českého masívu byly preferovány krystalinické horniny (magmatické a metamorfované). Tyto horniny budují podstatnou část území ČR. Sedimentární horniny představují jen malou část území a její využití pro vybudování HÚ je omezen významnými zdroji podzemní vody. Třetím krokem bylo vyloučení oblastí z důvodů vylučujících kritérií (podle zákona č. 114/1992 Sb., vyhlášky SÚJB č. 215/1997 Sb. a z hlediska

chráněných zájmů). Čtvrtým krokem bylo uplatnění systému přednosti (hustota osídlení, krajinný pokryv, příkon gama záření horninového prostředí, radonové riziko atd.) Na základě těchto kroků bylo vybráno jedenáct lokalit a jedna záložní (umělá).

Na základě této závěrečné zprávy SÚRAO rozhodla, že další etapa prací bude pokračovat v šesti lokalitách, které jsou situované ve stejném horninovém prostředí – v krystaliniku (v granitoidech). Rozhodnutí o jednom horninovém prostředí bylo motivováno zejména snahou soustředit výzkum procesů v poli blízkých i vzdálených interakcí na jeden horninový typ a netříštit síly a prostředky do řady paralelních výzkumných aktivit. Později do souboru hodnocených přibýly ještě tři lokality (v území s těžbou uranové suroviny a v blízkosti dvou českých jaderných elektráren). V roce 2011 byla k šesti původním lokalitám přidána lokalita Kraví hora, která se také nachází v prostředí krystalinických, přesněji vysoko metamorfovaných hornin (granulit, migmatit). Po vzoru zemí s pokročilým výběrem lokality pro HÚ, byla také v ČR přijata myšlenka hledání vhodné lokality v blízkosti stávajících jaderných elektráren. Pro tento účel byl realizován projekt *Moldanubikum* s cílem rozšíření počtu potenciálních lokalit HÚ (Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a). Na základě výsledku tohoto projektu byly obě lokality v roce 2017 zařazeny mezi potenciální lokality pro hlubinné úložiště.

Ve výsledku, v letech 2014-2019 bylo komplexně zkoumáno a charakterizováno celkem 9 potenciálních lokalit pro HÚ. Jednalo se o lokality: Březový potok (granit), Čertovka (granit), Čihadlo (granit), Horka (durbachit), Hrádek (granit), Kraví hora (granulit), Magdaléna (durbachit), Na Skalním (EDU-západ - durbachit), Janoch (ETE-jih - migmatitizovaná pararula) (Obr. 7).



Obr. 7: Potenciální lokality hlubinného úložiště v letech 2014-2019

Pro tyto lokality byly na základě získaných dat vytvořeny popisné modely lokalit (Franěk et al. 2018, Mixa et al. 2020, Baier et al. 2020a,b, Černý et al. 2020a,b, Jankovec et al. 2020a,b, Polák M. 2020, Uhlík et al. 2020a,b), na jejichž základě byly mezi sebou tyto lokality vzájemně porovnány (Vondrovic et al. 2020).

V roce 2020 SÚRAO v procesu hodnocení a porovnávání lokalit vybrala a vládě doporučila 4 lokality – Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (ETE-jih). K definitivnímu potvrzení výběru těchto čtyř lokalit pro další fázi Vládou ČR v době psaní tohoto dokumentu zatím nedošlo.

Na základě již zmíněného dopisu ministra MPO starostům dotčených obcí z listopadu 2019 č.j. MPO 85746/19/41500/01000 se předpokládá, že na vybraných čtyřech lokalitách se budou podávat žádosti o stanovení průzkumného území pro zvláštní zásah do zemské kůry až po vstupu zákona o zapojení obcí v platnost, nebo po 1. lednu 2023, a to podle toho, co nastane dříve. Vzhledem k tomuto rozhodnutí bude charakterizace potenciálních lokalit rozdělena do tří fází:

- 1) aktualizace popisných modelů jedné či dvou vybraných, referenčních lokalit v hloubkách úložiště a získání dalších geovědních informací pro výběr optimálního technického řešení pro podmínky krystalinických hornin ČR na základě informací z PVP Bukov a analogických lokalit v ČR či zahraničí. Informace získané v této fázi budou plně využitelné i v dalších fázích charakterizace jednotlivých lokalit (do 06/2024),
- 2) aktualizace popisných modelů a dalších geovědních informací o referenčních lokalitách na základě průzkumných a výzkumných prací pro výběr finální a záložní lokality (do 06/2029),
- 3) charakterizace finální lokality v souladu s požadavky zákona č. 263/2016 Sb. a dalších legislativních předpisů (po roce 2029).

9.2 Geologický popis lokalit

9.2.1 Provedené práce

Rozsáhlý geologický a strukturní popis potenciálních lokalit HÚ byl v letech 2014-2019 proveden na základě analýzy archivních informací, terénních prací provedených z povrchu a geofyzikálního výzkumu (Franěk et al. 2018, Mixa et al. 2019b, Kopačková et al. 2017, Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a, Bárta et al. 2017, Kabele et al. 2018, Bukovská et al. 2017, Havlová et al. 2015). Všechny provedené práce jsou přehledně shrnuty v práci (Kováčik et al. 2019).

Základní sadu dat poskytl projekt *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti HÚ*, konkrétně dílčí projekt *3D strukturně-geologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště* (Franěk et al. 2018). V rámci tohoto projektu byly syntetizovány všechny dosud známé poznatky o geologické stavbě, kompilovány syntetické mapy a vytvořena databáze geologických znalostí. Vývoj funkčních databází, systém správy dat a uchovávání informací je blíže popsán v Kap. 5.3. Následně byla vybraná geologická rozhraní ověřována metodami terénní rekognoskace. V rámci projektu *Morfostrukturní analýza širšího okolí průzkumných území HÚ pomocí DPZ* (Kopačková et al. 2017) byly aktualizovány všechny dostupné morfologické lineamenty a lineární indikace, které byly rozděleny do kategorií a byl jim přiřazen geologický význam.

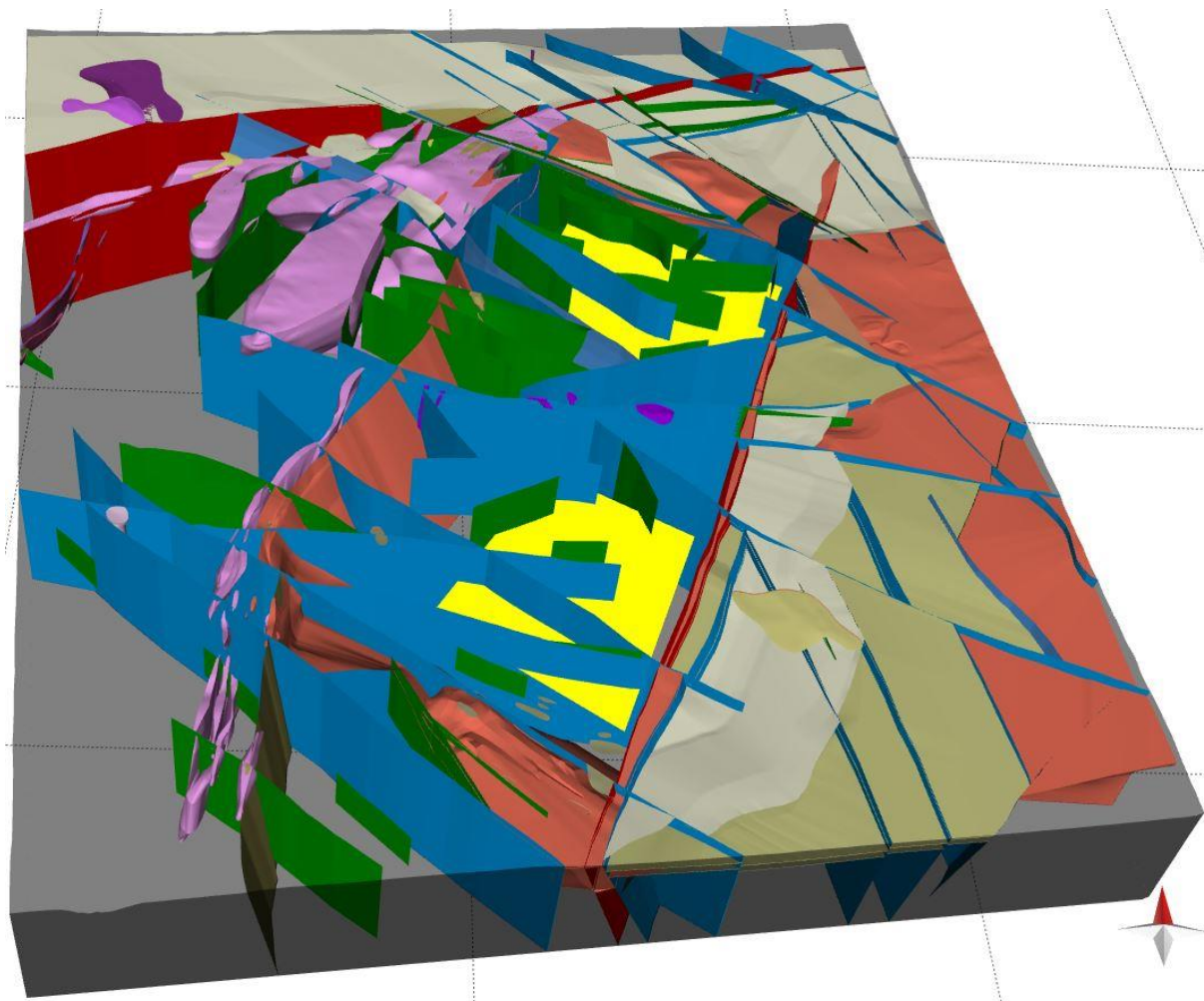
Komplexním syntetickým projektem byl projekt získání geologických a jiných informací z českého moldanubika (Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a). Tento projekt zhodnotil potenciál k umístění hlubinného úložiště v polygonu v okolí stávajících jaderných zdrojů (lokality EDU-západ a ETE-jih).

Projekt zaměřený na popis a statistické vyhodnocení puklinových systémů (Kabele et al. 2018) přinesl první statistické vyhodnocení a první reálná data z této oblasti z potenciálních lokalit HÚ.

Geofyzikální data byla získána jednak z archivu DIAMO pro lokality Horka, Kraví hora a Hrádek, v okolí kterých se v minulosti prováděly rozsáhlé průzkumy pro vyhledávání uranu (Ondřík et al. 2016a,b, Hlisenkovský et al. 2018) a pro účely tvorby povrchových map a 3D modelů byla tato data reinterpretována (Fischer et al. 2017, 2019). Nově byla také přehodnocena primární data z leteckých geofyzikálních měření projektu GeoBariéra a získané indikace byly porovnány s nejnovějšími daty SÚRAO (Bárta et al. 2017). Posledním projektem byl projekt *Geofyzikální práce pro popis geologické stavby potenciálních lokalit HÚ v ČR*, jehož hlavním účelem bylo přinést data a poznatky upřesňující geologickou stavbu studovaných území, včetně přesnějšího popisu jejich nejistot (Beneš et al. 2019, Duras a Bláha 2019, Hrutka et al. 2019, Jirků et al. 2019, Karous et al. 2019, Kašpar et al. 2019, Levá et al. 2019, Levý et al. 2019a,b, Nikl a Gürtler 2019).

Petrografická a základní mineralogická charakteristika hornin z potenciálních lokalit HÚ byla popsána v práci (Franěk et al. 2018). V rámci projektu *Moldanubikum* byly pro lokality EDU-západ (Na Skalním) a ETE-jih (Janoch) detailně petrograficky a geochemicky popsány jednotlivé dílčí variety přítomného horninového prostředí (Hanžl et al. 2017, Navrátilová et al. 2017). Zhodnocení petrografického a mineralogického složení horninového prostředí pro účely odhadu transportních parametrů provedla (Havlová et al. 2015).

Geologické modely potenciálních lokalit HÚ byly vytvořeny v projektu *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti HÚ*. Tyto modely reflektují dvě úrovně podrobnosti: (i) regionální v menší míře podrobnosti, která vizualizuje hlavní litologické celky a zlomy regionálního měřítká (kategorie 1, Vokál et al. 2017) a (ii) detailní zaměřené na popis území, ve kterém jsou prováděny práce k nalezení homogenního bloku horninového prostředí. V tomto měřítku jsou vizualizována všechna známá horninová rozhraní a všechny známé zlomové struktury (viz Obr. 8).



Obr. 8: Vizualizace detailního 3D strukturně geologického modelu lokality Čertovka s pozicí předpokládaného perspektivního bloku. Žlutá plocha představuje předpokládaný perspektivní blok. Červené strmé plochy reprezentují zlomy kategorie 1, modré plochy zlomy kategorie 2 a tmavě zelené plochy zlomy kategorie 3. Oranžové plochy uprostřed obrázku vymezují rozsah tiského plutonu. Šedou a zelenošedou barvou jsou znázorněny permokarbonské sedimentární pánve; světle fialová pak představuje lubenecký granit (Mixa et al. 2020).

Nejdříve byly vytvořeny modely sestavené pouze na základě archivních dat, které byly následně aktualizovány po provedení terénních rekognoskačních prací (Franěk et al. 2018, Mixa et al. 2019b). V rámci projektu *Moldanubikum* byly vytvořeny strukturně geologické modely lokalit v okolí jaderných elektráren (Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a). Modely malého měřítka (výchozu) byly použity pro kalkulaci DFN modelů (Kabele et al. 2018).

PVP Bukov

Cílem generické laboratoře PVP Bukov (více v Kap. 18) je především získat dostatek zkušeností pro prokázání bezpečnosti a proveditelnosti hlubinného úložiště na finální lokalitě. Velká většina činností v rámci prvních projektů je spojena s charakterizací a výzkumem lokálních vlastností horninového masivu, které jsou nezbytné pro navazující komplexnější projekty. V rámci charakterizace Podzemního výzkumného pracoviště Bukov byla provedena kompletní analýza horninového prostředí včetně analýzy a datování zlomových výplní

(Bukovská et al. 2017). V rámci aktivit v PVP Bukov byla provedena komplexní geologická charakterizace od získání primárních dat do jejich syntézy v geologické popisné modely lokalit (Bukovská et al. 2017). V rámci ostatních geologických a jiných činností bylo v rámci PVP Bukov odvrtno a podrobně charakterizováno cca 3 km vrtného jádra (Bukovská et al. 2017, Patočka a Jaroš 2018, Bukovská et al. 2020, Souček et al. 2018).

V rámci projektu *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti HÚ* byly na základě komplexní geologické charakterizace vytvořeny geologické modely jak vlastních prostor PVP Bukov, tak souvisejících částí dolu Rožná (Bukovská et al. 2017). Tyto modely jsou aktuálně zpřesňovány a aktualizovány sadou nových geologických dat v projektu *Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná* (Bukovská et al. 2020).

9.2.2 Plánované práce

Strukturně geologické vlastnosti

Do výběru finální a záložní lokality hlubinného úložiště budou práce zaměřeny na potvrzení předpokládaných vlastností horninového prostředí potenciálních lokalit v hloubce úložiště aproximovaných z povrchu lokality dle (Franěk et al. 2018). V součinnosti s geologickým mapováním budou dále prováděny strukturní, petrologické, mineralogické a geochemické práce s návazností na hydrogeologické a hydrogeochemické měření, jejichž výsledky mají největší dopad na bezpečnostní rozbor (Safety Assessment).

Hlavním cílem bude zpřesnění průběhu všech významných litologických rozhraní a známých zlomů a upřesnění úklonu těchto rozhraní. Bude interpretován přibližný dosah zájmové geologické struktury (perspektivního horninového bloku) vrtnými pracemi.

Vrtné práce budou realizovány ve třech kategoriích: hluboké vrty (min. do úrovně předpokládaného HÚ), mapovací vrty a mělké vrty monitorovací, které budou určeny především pro monitorování podzemní vody dle potřeb hydraulických modelů, zejména však k režimnímu sledování úrovně hladiny podzemní vody a vývoje jejího chemismu. Všechny vrty budou využity pro potřeby získání odporových a kapacitních parametrů horninového prostředí (koeficienty hydraulické vodivosti, storativity, hydraulické parametry puklin a puklinových zón, případně alespoň hydrogeologická interpretace funkce puklin). Mělké monitorovací a hluboké vrty budou rovněž sloužit pro odběr vzorků vod k chemickým analýzám. Pro speciální analýzy vod je účelné vzorky odebírat za anaerobních podmínek. Z hlediska časové posloupnosti prací je důležité naplánovat první odběry tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků jinými pracemi a aby byly získané informace o výchozích podmínkách („baseline conditions“) kvalitní. K těmto účelům je nezbytné zdokonalování přístrojového vybavení a zpřesnění metodických postupů. Hluboké vrty ověří do potřebných detailů změny fyzikálně-chemických parametrů hornin a podzemní vody s hloubkou, strukturně tektonické poměry v nižších hloubkových úrovních masivu a zpřesní hydrogeologickou charakteristiku prostředí až do hloubky plánovaného úložiště. Mapovací vrty budou sloužit ke zpřesnění geologické stavby území a k získání podrobnější charakteristiky svrchních částí zkoumaného masivu. Lokalizace vrtů bude cílená na konkrétní geologické fenomény. Během vrtnání budou ve všech vrtech prováděny karotážní práce, odběry jader (tzn. všechny vrty – mimo kvartér – budou vrtány jádrově pro příslušné geologické, strukturní, geomechanické a jiné vyhodnocení) a in-situ testy ve vrtech. Po ukončení vrtnání budou vrty využity pro další testy (např. seismické tomografické metody, VSP,

hydrogeologické a geomechanické testy apod.). V každém případě, z hlediska kvality získaných dat a informací, bude důležité správné nastavení časové souslednosti všech výzkumných a technických prací ve vrtu tak, aby nedocházelo k jejich vzájemné kolizi a rušivému ovlivňování pořizovaných dat (blíže Mixa et al. 2019a).

Dalším významným okruhem činností jsou geofyzikální práce. Tyto práce budou realizovány ve dvou základních měřítcích podobně jako geologické mapování: regionálním a detailním. V regionálním měřítku budou práce zaměřeny především pro detailnější popis geologické stavby území (informace důležité pro tvorbu 3D modelů), např. pro podrobnější popis hranic regionálních těles a určení jejich geometrie, průběh a charakter regionálně významných tektonických linií apod. Budou užity metody pro dosažení větších hloubek (seismika, sondážní elektromagnetické metody) tak, aby byl získán obraz geofyzikálních parametrů minimálně v plánované hloubce úložiště a hlouběji. V detailním měřítku budou geofyzikální měření situována do pravidelné sítě profilů tak, aby bylo možné sestavit mapy fyzikálních parametrů (např. zdánlivých odporů, magnetického, popř. tíhového pole, gamaspektrometrie apod.). Jejich cílem bude především identifikovat homogenitu horninového prostředí v hloubce řádově desítek až stovek metrů (v závislosti na užitých geofyzikálních metodice) a na území homogenního horninového bloku detailně popsat litologické a tektonické rozhraní a rozsah zájmového horninového masivu (geometrii, charakter apod.). Geofyzikální práce bude dále nutné kalibrovat dalšími geologickými pracemi a měřeními ve vrtech a na vrtných jádrech.

Za účelem definování homogenních bloků hostitelského horninového prostředí bude stanoven klasifikační index vhodnosti horninového prostředí, který vedle geologických charakteristik zahrne i geomechanické a hydrogeologické a hydrogeochemické požadavky na vlastnosti horninového prostředí. Pro vytvoření vlastního klasifikačního systému budou přehodnoceny používané klasifikační systémy (např. Barton 1987, Bieniawski 1989, Andersson et al. 2000, McEwen 2002, Hagros et al. 2005, Hagros 2006). Budou posuzovány parametry prostředí, které mají vliv na dlouhodobou bezpečnost (pole blízkých a vzdálených interakcí), design úložiště a náročnost při výstavbě (razitelnost, vrtatelnost, mechanická stabilita horniny, podzemní voda atd.) s ohledem na vyvíjený systém řízení požadavků na hlubinné úložiště a respektující bezpečnostní cíle hlubinného úložiště (Kap. 5.3). Stěžejní parametry, které budou použity pro sestavení vlastního klasifikačního systému jsou: litologie hostitelské horniny (mineralogie, foliace, zrnitost, pórovitost a jiné), regionální a lokální poruchové zóny, individuální křehké deformace, mechanické vlastnosti horninového materiálu a poruch (pevnostní a deformační), napjatostní stav, termální vlastnosti hornin, teplota prostředí, hydrogeologické parametry (hydraulické parametry, viskozita vody apod.), hydrogeochemie a transportní vlastnosti.

Terénními pracemi budou získávána další doplňující data o litologii, strukturních poměrech, fyzickém stavu horninových těles, zvodnění atd., která umožní zpřesňování 3D modelů. Při aplikaci výše zmíněné metodiky prací a po aktualizaci databáze geologických znalostí (v souladu se systémem správy dat a uchování informací v Kap. 5.3) budou aktualizovány stávající 3D strukturně geologické modely horninového prostředí a zpřesněny kontury potenciálně vhodného bloku horninového prostředí, včetně jeho 3D rozsahu. Jednotlivé potenciálně vhodné bloky horniny budou vyčleňovány na základě klasifikačního systému (viz předchozí odstavec) a požadavků na bezpečnostní cíle hlubinného úložiště, skutečností podmiňujících projektování HÚ a požadavky na vybraná zařízení a jejich bezpečnostní funkce (tzv. Design Basis, Kap. 5.3). Aplikovaná metodika získávání dat pro účely tvorby geologických

a ostatních návazných modelů bude reflektovat nutnost tvorby těchto modelů až do hloubky 1 km.

Nedílnou součástí získávaných dat bude i charakterizace kvartérního pokryvu a hloubky zvětrání za účelem vývoje biosférického modelu včetně pedologických analýz.

Samostatnou a specifickou částí strukturně-geologické charakterizace bude získání dat popisujících křehkou tektoniku a jejich následné zpracování do geologických DFN (Discrete Fracture Network) modelů, které poskytují počáteční statistické parametry modelu. Následně je ale důležitá selekce vodivých puklin a určení jejich propustnosti (tzv. hydrogeologické DFN), co vede k statistickému posouzení jejich vlivu na proudění podzemní vody (přístup k problematice DFN modelů je popsán podrobněji v Kap. 9.3.2).

Doplňkově bude použita i metodika geomorfologické analýzy, a to zejména v regionálním měřítku za účelem předběžného hodnocení požadavků dle vyhlášky č. 378/2016 Sb. Popisované geodynamické procesy utvářející zemský povrch je možné vymezit podrobnou geomorfologickou a morfostrukturní analýzou. Metodika bude kombinována s terénními pracemi a případným monitoringem takto identifikovaných morfolineamentů a potenciálně aktivních struktur.

PVP Bukov

V rámci aktivit na PVP Bukov budou vytipovány, a pro účely vývoje klasifikace horninového prostředí dostatečně robustně charakterizovány a testovány, všechny geologické fenomény (např. křehké struktury 1., 2. a 3. řádu a puklinová síť), které budou vstupovat do klasifikačního schématu vhodnosti horninového prostředí (angl. *Rock mass suitability index*). Tyto struktury budou popsány jak z hlediska geologického a geomechanického, tak z hlediska migračních parametrů horninového prostředí. Pomocí in-situ zkoušek budou odvozeny vzdálenosti jednotlivých křehkých struktur vyšších řádů od izolační části hlubinného úložiště. V rámci výzkumných prací na PVP Bukov bude využita metodika získání orientovaného vrtného jádra.

Testovací lokalita Melechov

Výzkumné aktivity lze provádět i v prostoru testovací lokality Melechov (granit). Přínos této lokality při provádění geologických úkolů spojených s výběrem lokality pro umístění HÚ je znám z let 2002-2006. Činnosti budou na lokalitě Melechov prováděny v případě, že rozhodnutí Vlády ČR o výběru lokalit se bude prodlužovat takovým způsobem, že nebude možné stihnout termíny uvedené v Kap. 22, a v případě, že dojde k prodloužení lhůty uvedené v již zmínovaném dopisu ministra MPO starostům dotčených obcí z listopadu 2019 (č.j. MPO 85746/19/41500/01000), kdy se předpokládá, že na vybraných čtyřech lokalitách se budou podávat žádosti o stanovení průzkumného území pro zvláštní zásah do zemské kůry až po vstupu zákona o zapojení obcí v platnost, nebo po 1. lednu 2023, a to podle toho, co nastane dříve.

Testovací lokalita má potenciál přinést znalosti při výzkumné aplikaci souboru nejrůznějších nových metodických postupů geologických disciplín. Díky jejich ověření na testovací lokalitě by tak byly odzkoušené postupy aplikované později na potenciálních lokalitách HÚ. Cílem prací na testovací lokalitě Melechov by bylo rovněž co nejefektivnější využití finančních prostředků doposud vložených do vrtných a souvisejících prací v oblasti Melechovského masivu, např. jedna z možných výzkumných činností by mohla směřovat k prohloubení stávajících vrtů do hloubky alespoň 500 m s dodržáním všech technických požadavků např.

získání orientovaného jádra. Výsledky měření by pak byly srovnávány s poznatky získanými v PVP Bukov a vstupovaly by do dalších výzkumných projektů.

Zlomy

Přítomnost určitých typů zlomů na lokalitě představuje podle vyhlášky č. 378/2016 Sb. charakteristiku vylučující umístění hlubinného úložiště v lokalitě. Jde o:

- a) aktivní zlom potenciálně schopný posunu do vzdálenosti 5 km od pozemku jaderného zařízení (§ 6, odst. (2) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 Sb.) či
- b) zlom, který může působit jako preferenční cesta pro transport radionuklidů (§ 18, odst. (2), písm. a) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 Sb.).

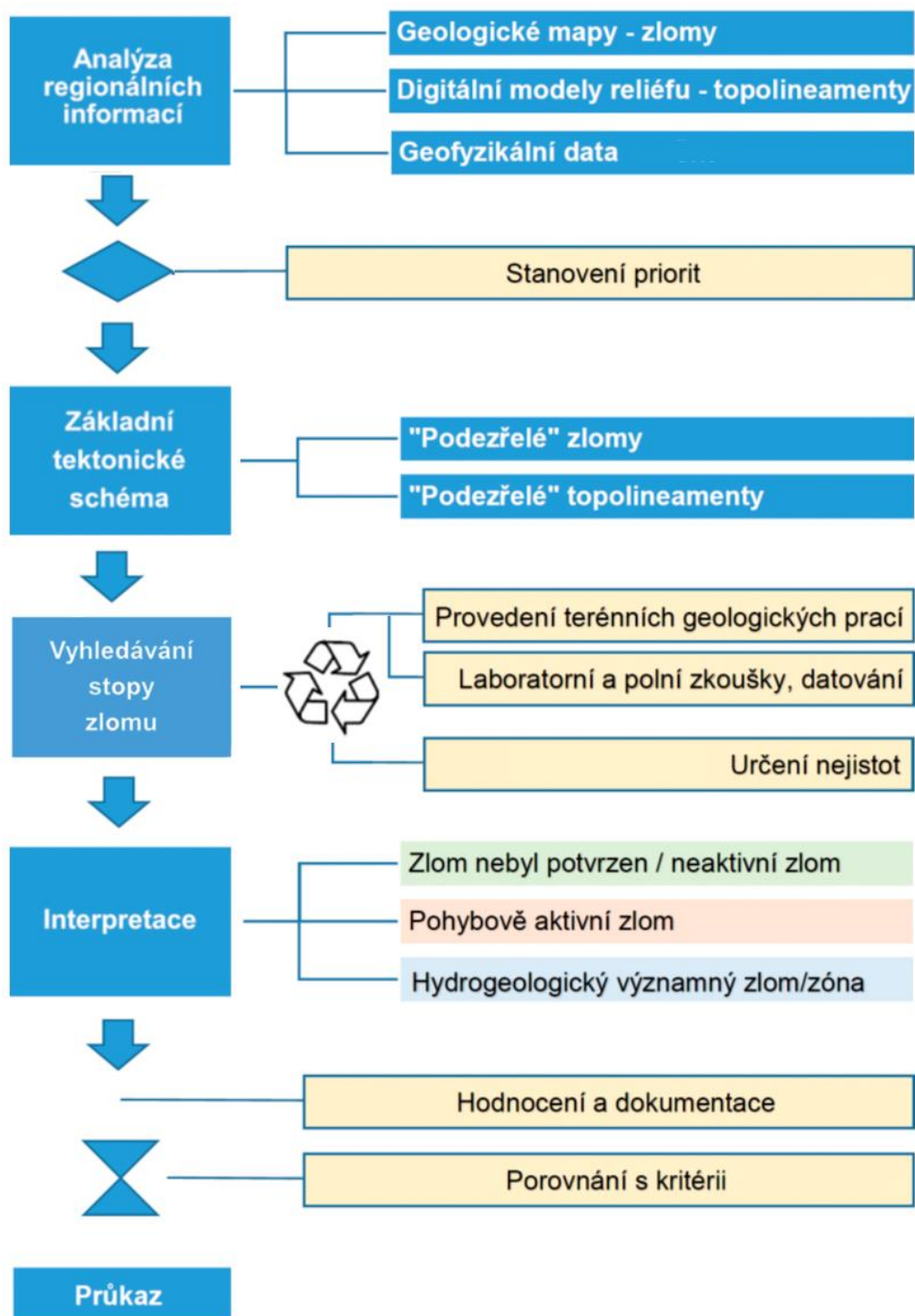
Hodnocení zlomů na základě výše jmenovaných hledisek vyžaduje rozdílné přístupy, nasazení rozdílných metod zkoumání a samozřejmě i akcentování různých parametrů (vlastností) zlomu při odhadu jeho potenciálního vlivu na jadernou bezpečnost.

Proto v následujícím období bude nutné kombinovat různé metody a plánovat jejich nasazení tak, aby směřovalo k hlavnímu cíli – tj. k ověření počáteční hypotézy *Základního tektonického schématu* (Mixa et al. 2019b, 2020), k nalezení stopy zlomu a vhodného místa k získání průkazu do vzdálenosti 25 km od jaderného zařízení (§ 6, odst. (1), písm. c) vyhlášky č. 378/2016 Sb.). Nejobtížnějším krokem bude nalezení stopy zlomu a výběr vhodného místa pro provedení technických prací (vrtů, průzkumné rýhy). K základním činnostem pro zjištění průkazu zlomu budou patřit:

- 1) geologické mapování, včetně podrobné dokumentace výchozů,
- 2) mapování toplineamentů, projevujících se v morfolonii území,
- 3) geofyzikální měření,
- 4) vrtné a kopné práce.

Vzhledem k aktuálním tektonickým schématům, která má SÚRAO k dispozici, je zřejmé, že geologické a technické práce pro získávání průkazu zlomů a jejich charakteristik je nutné prioritizovat, tzn. provádět ověřování indikací možného porušení území zlomů dle priority. K tomu je možné využít řadu vodítek, zejména takových, která mají vztah k nepříznivým vlastnostem zlomů z hlediska vylučujících kritérií, jako jsou např. funkce zlomu, tvary zlomu, geometrie zlomu (délka, mocnost, hloubka), viz (Prachař 2020).

Principiálním požadavkem standardů IAEA (IAEA 2015) je požadavek na vypořádání nejistot. Proto každý krok hodnocení zlomů v území k umístění HÚ musí zahrnovat určení nejistot a nedostatků ve znalostech. V dalším kroku tyto nejistoty musí být vypořádány a znalosti doplněny. Cílem je postupné snižování epistemických nejistot na přijatelnou míru. Schéma plánovaného postupu činností při zkoumání zlomů v lokalitách HÚ je uvedeno na Obr. 9.



Obr. 9: Schéma činností při zkoumání zlomů v lokalitách HÚ (Prachař 2020)

Petrografické a mineralogické složení horninového prostředí

Cílem prací v etapě do výběru finální a záložní lokality je získání dat o variabilitě horninového prostředí, a především dat pro zhodnocení vývoje geologické stavby a tvorbu geochemického modelu úložiště.

V rámci studia horninového prostředí bude zhodnocen makrochemizmus hornin v hloubce úložiště a mikrochemizmus jednotlivých minerálních fází. Bude zhodnocen i obsah akcesorických a stopových minerálů, zejména pak obsah sulfidů. Pro účely interpretace alteračních procesů budou studovány i přeměny vybraných minerálních fází a zhodnocena jejich míra alterace. Speciální pozornost bude věnována rozsahu alteračních zón spojených se zlomovými strukturami.

Znalost petrografického a mineralogického složení hornin je jedním ze základních vstupů pro porozumění mikrostrukturálním charakteristikám, fázovému a chemickému složení při interpretaci transportních vlastností. Za tímto účelem budou popsány hlavní a akcesorické minerály, včetně amorfních fází. Mineralogicky a geochemicky budou charakterizovány puklinové a zlomové výplně včetně odhadu stáří pohybu na těchto strukturách. Při mineralogickém výzkumu puklin je možné použít většinu běžných technik obecně využívaných pro mineralogické studium. Při studiu puklinové výplně je užitečné využít i zdánlivě vzdálenější fyzikální informace o studovaných horninách, jako jsou průtočnost či neprůtočnost pukliny apod. Stejně důležité jako studium fázového a chemického složení je i studium morfologie minerálů či povrchu puklin. Podzemní voda proudí po povrchu pukliny a výplně ne ve tvaru plochy, ale ve formě lineárních útvarů – kanály. Průtočnost puklin je také ovlivněna jejich místním zatmelením puklinovou výplní. Pohyb vody neprobíhá pouze po puklinách, ale i samotnou horninou, a to zvláště v těsné blízkosti puklin. Na materiálech z vrtů jsou vidět alterace zrn živců podél puklin do vzdálenosti cca 5-10 mm od pukliny. Chemickou korozi vznikají drobné dutinky nebo porézní zrna a v nich se ukládají druhotné minerály (např. jílové minerály). Tyto jevy lze zkoumat pomocí rtg difrakce, elektronové mikroskopie a elektronové mikroanalýzy.

Tvorba geologického modelu

V první etapě do výběru finální a záložní lokality budou na preferovaných lokalitách geologické modely konstruovány na základě postupujících geologických prací. Stávající modely budou aktualizovány nejprve na základě výsledků realizovaných geofyzikálních měření (Mixa et al. 2019b). Následně budou modely rešeršním způsobem rozšířeny do širšího regionu za účelem identifikace geologických struktur požadovaných pro hodnocení dle požadavků vyhlášky č. 378/2016 Sb. Současně budou zhotovené geologické modely (Franěk et al. 2018) aktualizovány do vysoké přesnosti hranice horninových těles, a navíc budou upraveny na topologicky korektní modely. V oblasti geofyzikální charakterizace budou vyhotoveny gravimetrické modely za účelem interpretace dosahu zájmových litologií a tyto modely budou promítnuty do geologických modelů. Geologické modely také zahrnou mikrolineamenty získané geofyzikálními metodami.

9.3 Hydrogeologický a hydrologický popis lokalit

9.3.1 Provedené práce

Cílem hydrogeologického popisu lokalit je především vytvoření spolehlivého hydrogeologického modelu lokalit, který následně umožní vyhodnocení transportu radionuklidů podzemní vodou do životního prostředí.

V rámci provedených prací v letech 2014-2019 byly potenciální lokality HÚ charakterizovány jak vlastními pracemi v oblasti hydrogeologické rekognoskace (Franěk et al. 2018, Mixa et al. 2019b, Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a), tak iniciálními monitorovacími pracemi (Bartoň a Mátl 2018, Černý a Šedivá 2018, Šedivá 2018). Byla provedena také jednorázová termometrická měření (Kuchovský et al. 2017), zhodnocení vertikální hydrogeologické a hydrochemické zonality podzemních a důlních vod, datování a izotopická analýza podzemní vody, definována základní zonalita (Bukovská et al. 2017, Rukavičková et al. 2017). Byly také získány orientační hodnoty Eh, pH a teploty vody v hloubce úložiště (Rukavičková et al. 2017). Získané poznatky byly použity pro konstrukci hydrogeologických modelů lokalit HÚ (Uhlík et al. 2018). V roce 2018 byl ukončen dlouhodobý monitoring v prostředí tunelu Bedřichov (Hokr et al. 2018). V rámci tohoto projektu byla vybudována komplexní monitorovací síť a zhodnocen vliv sezónních variací na mělký oběh podzemních vod a vazba křehkých struktur na hydrogeologii, stejně tak byly testovány a vyvíjeny měřicí zařízení a metodické postupy. V letech 2015 – 2018 proběhl hydrogeologický monitoring a sledování vývoje stavu a kvality podzemních vod na potenciálních lokalitách SÚRAO (Bartoň a 2018, Černý a Šedivá 2018, Šedivá 2018, Řička et al. 2018).

Hydrogeologické modely potenciálních lokalit HÚ (Uhlík et al. 2018) byly vytvořeny za účelem popisu a predikce proudění podzemních vod. Byly zkonstruovány regionální a detailní hydrogeologické modely všech potenciálních lokalit, pomoci tří různých softwarů Modflow, Feflow a Flow123d.

9.3.2 Plánované práce

Terénní hydrogeologické práce

V rámci prvních fází do výběru finální a záložní lokality budou dále upřesňovány základní hydraulické charakteristiky horninového masivu v návaznosti na provedené práce. Na základě výsledku hydrogeologického mapování a rekognoskace (dle metodiky Mixa et al. 2019a) bude vybudována hydrogeologická a hydrologická monitorovací síť s cílem poskytnout detailnější sadu dat pro stávající hydrogeologické modely potenciálních lokalit (Uhlík et al. 2018) a stanovit iniciální hydrogeologické a hydrologické podmínky lokality před samotnou výstavbou HÚ.

Hydrogeologickým mapováním lokality bude doplněna databáze hydrogeologických dokumentačních bodů. Protože pro prostředí se strukturami křehké tektoniky je nezbytná znalost o (statistické) distribuci puklinové transmisivity, bude v rámci metodických prací nejprve otestován a následně aplikován systém měření hydraulické vodivosti a odběru vzorků z hlubokých vrtů na testovací lokalitě (Rukavičková et al. 2006). V rámci výzkumu budou

testovány možnosti využití systémů pro dlouhodobý monitoring tlakových poměrů puklinových systémů v různých hloubkách krystalinického masivu a systém odběru vod (multipakový systém).

Důležitým aspektem, který je nutné studovat, jsou charakteristiky puklin (např. geometrie puklinových systémů, jejich hustota, délka puklin, jejich otevřenost, výplň a jiné) ovlivňujících hydraulické vlastnosti puklin a puklinových sítí. Propustnost systému diskontinuit v horninovém bloku je závislá na hydraulických vlastnostech jednotlivých diskontinuit a zejména na míře propojení jednotlivých vodivých puklin. Hydraulické vlastnosti diskontinuit se srovnatelnými geometrickými vlastnostmi mohou být proto velmi rozdílné. Řada terénních výzkumů ukázala, že ne všechny geologicky významné puklinové zóny (poruchy) se chovají jako hydraulický vodič. Vysoká deformace v puklinové zóně a vznik sekundární mineralizace na puklinách tak např. mohou vést v konečném důsledku k tomu, že se porucha jako celek může chovat jako regionální izolátor a místně vzdouvat hladinu podzemních vod. Mnohem významnější pro proudění podzemních vod jsou pak menší otevřené pukliny vyskytující se mezi významnými puklinovými systémy s velkou mírou deformace. Např. na testovací lokalitě Melechov (granit), drcené, alterované puklinové zóny měly hydraulickou vodivost srovnatelnou s neporušeným granitem, zatímco úseky s výskytem jedné – při pohledu na jádro nevýrazné – otevřené pukliny měly koeficient hydraulické vodivosti velmi vysoký.

Další prováděné práce budou zaměřeny na zvýšení znalosti tlakového pole a jeho vývoje s hloubkou, což je nutná informace pro simulace proudění v nadloží a okolí budoucího úložiště. Hydraulický gradient je hlavní silou ovlivňující rychlost a směr proudění podzemních vod. Prováděné práce budou zaměřeny na verifikaci vstupních dat pro hydrogeologické modely lokality, zejména na stanovení odporově-kapacitních vlastností (např. koeficient filtrace) jednotlivých horninových typů v lokalitě a jejich změny v prostoru a s hloubkou, stanovení bilance a celkového odtoku z území, získání srážkových dat z lokality. Půjde zejména o hydrogeologickou rekognoskaci a režimní měření významných hydrogeologických objektů, režimní monitoring a in-situ testy v mělkých pozorovacích vrtech, a i v hlubokých strukturních vrtech. Při odběru vzorků vod z vrtů je účelné tyto vzorky získat v anaerobních podmínkách. Tento postup byl testován v rámci spolupráce s finskou Posivou, která na testovací lokalitě Melechov provedla ve stávajících vrtech Mel-1 a Mel-2 odběr vzorků vod prostřednictvím zařízení Posiva Flow Log, které bylo mimo jiné speciálně navrženo právě pro potřeby tohoto vzorkování. Použití tohoto zařízení je účelné otestovat i v podmínkách podzemí, ideálně v prostoru PVP Bukov.

Ve druhé etapě charakterizace finální lokality bude probíhat upřesňování hydraulických a transportních parametrů a modelů lokality. Bude doplněna síť hlubokých vrtů a v rámci výstavby konfirmační laboratoře budou aplikovány zejména metodiky získané a ověřené v podzemních pracovištích např. PVP Bukov a tunelu Bedřichov.

Hydrogeologický, hydrologický a meteorologický monitoring

V rámci výstavby monitorovací sítě bude brán zřetel zejména na plnou automatizaci pozorovací sítě, tvorbu přehledných databází a na optimalizaci kvantity a kvality získávaných dat. Při návrhu monitorovacích sítí musí být zohledněny požadavky plynoucí z koncepce hydrogeologických modelů stejně tak i potřeby ochrany kvality stávajících vodních zdrojů a přirozených akumulací podzemních a povrchových vod. V rámci sledování klimatických jevů, budou instalovány meteorologické stanice s cílem dlouhodobého pozorování a měření

meteorologických jevů zejména pak množství srážek, rychlost proudění a směr větru, teplota vzduchu, evapotranspirace apod.

Tvorba hydrogeologického modelu

Aktualizace hydrogeologických modelů bude úzce spjata s modifikací 3D strukturně-geologických modelů v návaznosti na implementaci nových terénních poznatků. Důraz bude kladen na snížení nejistot, identifikovaných v průběhu dosavadních modelářských prací. K modelům zaměřeným na popis hlubokého proudění bude potřeba přidat modely hydrologické a významný důraz musí být kladen na modelování proudění v přípovrchové zóně (ředění, vstup do biosféry). Právě rozpukanost masívu v přípovrchové zóně hraje důležitou roli na množství a rychlost infiltrujiící vody do hlubších částí masívu. Tvorba hydrogeologického modelu bude probíhat v několika měřítkách, od aktualizace regionálních modelů až po tvorbu detailní v měřítku ukládacích vrtů. Metodika tvorby modelů pro různá měřítka se může lišit v způsobu diskretizace a rovněž v rozdílném přístupu k charakterizaci modelové domény (DFN, CPM, duální porozita atd.), propojenosti na jiné geovědní modely a nároky na vstupní data. Proto je nezbytné vyvinout koncepci tvorby hydrogeologického modelu, která bude zahrnovat a vzájemně propojovat hydrogeologické modely různých měřítek a všechny další související matematické a popisné modely. Tato metodika integrace všech geovědních modelů různých měřítek bude validovaná vůči terénním datům, získaným například v generické laboratoři.

Pro charakterizaci finální lokality budou spolu se získáváním nových poznatků o horninovém prostředí vytvářeny stále detailnější modely až po měřítko „ukládacích jednotek“. Znalostní oblastí, kterou je nezbytné v souvislosti s projekty bezpečnosti HÚ rozvíjet, je oblast stochastických metod, využitelných při přípravě vstupních dat deterministických modelů (včetně přístupu k upscalingu a downscalingu parametrů ověřených průzkumy horninového prostředí), hodnocení spolehlivosti (nejistot) modelů či přímo stochastické modelování procesů. Pozornost je třeba zaměřit i na hodnocení citlivosti prediktivních simulací ve vztahu k nejistotě řízené vstupními modelovými parametry. Je proto nutno testovat možnosti paralelizace výpočtů s využitím tzv. „high performance computingu“ a škálovacích úloh pro vybrané softwarové nástroje. Jak hodnocení nejistot, tak kalibrační postupy lze výrazně urychlit vhodnou volbou paralelizačních technik zpracování jednotlivých modelových simulačních výpočtů.

Výpočetní kódy, které budou simulovat proudění podzemní vody a transport radionuklidů, musejí být pro tento úkol validovány. V současnosti jsou již na odborných pracovištích vyvíjeny SW nástroje (např. projekt TAČR TK02030120 *Paralelizovaný reakčně-transportní model šíření kontaminace v podzemních vodách*), které umožní provozování obdobných simulačních výpočtů, a je potřeba ověřit jejich využitelnost pro podmínky HÚ z hlediska náročnosti na výpočetní výkon a možnosti konceptualizace potřebných úloh.

Tvorba DFN modelů

Důležitou roli pro popis proudění v puklinovém prostředí hraje tvorba DFN modelů, které popisují proudění přímo v puklinách. Tvorba hydrogeologického DFN modelu bude probíhat v úzké součinnosti s tvorbou geologického DFN modelu, který poskytuje počáteční statistické parametry modelu. Následně je ale důležitá selekce vodivých puklin a určení jejich propustnosti, které ovlivní prvotní statistické parametry.

Součástí studia puklinových sítí bude ověření metodické správnosti vyvíjených výpočetních kódů proti již ověřeným zahraničním přístupům a software (například program DFram v Kabele et al. 2018). Zatím pro většinu modelů (s výjimkou PVP Bukov, kde byly dokumentovány stěny podzemních chodeb) byly jako vstupní data využity výsledky měření puklin na výchozech, proto se bude v další fázi nutné zaměřit na sběr dat z hloubek relevantních pro hodnocení HÚ.

Nedílnou součástí tvorby DFN sítě je sběr terénních dat pro optimalizaci statistických parametrů puklinové sítě. Po provedení vrtných prací bude k dispozici databáze puklinových systémů na lokalitách, které budou použity k tvorbě DFN modelů. V rámci tvorby DFN modelů budou za účelem validace pro tvorbu modelů puklinových sítí testovány vhodné programy (např. DFram, Napsac, ADFNE, Fracman, dfnWorks) a jejich využití pro hydrogeologické a transportní modely. Kromě stochasticky generované sítě puklin bude v návaznosti na výzkum geomechanických vlastností masivu testován výpočet parametrů DFN sítě na základě geomechanických vlastností horninového masivu a vlivu napěťového pole masivu na vznik, průběh a propustnost puklin. Velmi důležité je porozumění konceptu smáčeného povrchu puklin, vyjadřujícího možnost záchytu radionuklidů v důsledku migrace do matrice. Bude třeba vyvinout metodiku stanovení smáčeného povrchu puklin.

Záměrem je integrovat hydraulické, hydrogeochemické a mechanické informace do stochasticky založeného geostrukturálního modelu DFN (tzv. geoDFN). V případě potřeby bude model geoDFN interaktivně upraven s doplňkovými informacemi. Tento přístup bude v následujícím období porovnáván s jinými integrovanými DFN přístupy ve světě (např. Hartley et al. 2017).

Predikce hydrogeologického vývoje lokalit

Pro výběr finální a záložní lokality budou definovány základní scénáře hydrogeologického vývoje lokalit, a to i na základě analýzy paleohydrogeologických a hydrogeochemických dat, tj. popisu změn v minulosti. Bude vyhodnocena možnost interakce vod z hlubokého oběhu s vodami povrchovými. Budou zhodnoceny režimy podzemních vod a jejich změny v návaznosti na předpokládané klimatické a tektonické scénáře. Práce budou zaměřeny na výzkum možných dlouhodobých geologických a morfologických změn a jejich vlivu na vývoj a změnu hydrogeologických podmínek. Budou stanoveny možné scénáře vývoje geosféry v podmínkách České republiky (relevantních ve vztahu k HÚ) a jejich potenciální vliv na proudění a transport v lokalitě.

9.4 Transportní vlastnosti lokalit

9.4.1 Provedené práce

Transportní vlastnosti lokality určují zádržné vlastnosti horninového prostředí. Nejdůležitějšími parametry jsou:

- konektivita zvodnělých puklin včetně určení poměru zvodnělých a nezvodnělých puklin,
- smáčený povrch puklin vyjadřující možnost záchytu radionuklidů v důsledku migrace do matrice,
- sorpční a difúzní vlastnosti hornin,

- chemické vlastnosti (pH, Eh) a složení podzemních vod,
- ředění koncentrace aktivity při migraci do životního prostředí.

V rámci metodických prací byl vyvinut postup získání reálných dat o puklinové síti a určení, dat, která jsou aplikovatelná pro potřeby tvorby modelů puklinových. Na Stavební fakultě ČVUT byl pro tvorbu DFN sítí vyvinut program DFram (Kabele et al. 2018).

Základní analýzy sorpčních a difúzních vlastností hlavních litologií potenciálních lokalit HÚ byly provedeny v rámci projektu *Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ* (Havlová et al. 2017). Vliv anizotropie na transportní charakteristiky horninového prostředí byl hodnocen v práci Bukovská et al. (2017). Nicméně do současné doby kromě aktivit na PVP Bukov neprobíhalo vyhodnocení transportních vlastností hornin v přímé návaznosti na vrtné práce na potenciální lokalitě v hloubce úložiště.

9.4.2 Plánované práce

Konektivita zvodnělých puklin

Při studiu puklinových sítí bude dále více věnována pozornost také jejich mineralogii, zhodnocení jejich relativního stáří, geneze a konektivitě a studován vliv orientace hlavních napětí na propustnost jednotlivých generací křehkých struktur. Tato data pak budou přímým vstupem do hydraulických a transportních modelů lokalit.

Pro testování metodik získání dat pro tvorbu puklinových sítí a testování migračních vlastností puklinového prostředí bude využito PVP Bukov. Aktivity budou zahrnovat studium transportních vlastností vybraného horninového bloku jako ekvivalentu izolační části hlubinného úložiště, a dále bude studován vliv orientace složek in-situ napětí na propustnost různých generací křehkých struktur. Studium propojení zvodnělých puklin za účelem stanovení transportních parametrů horninového prostředí bude navazovat na tvorbu DFN modelů (viz Kap. 9.3.2).

Sorpční a difúzní vlastnosti hornin

Difúze radionuklidů do horninové matrice a jejich sorpce na jednotlivé minerály představují důležitý mechanismus pro zpomalení migrace radionuklidů do životního prostředí. Vzhledem k velmi různorodé povaze horninového prostředí je třeba vyvinout metodiku umožňující zjednodušený popis difúze a sorpce radionuklidů v krystalinickém prostředí. Na vzorcích hornin reprezentujících izolační část úložiště budou vyhodnoceny sorpční vlastnosti vybraného stopovače – sorpce radionuklidů, kationtová výměnná kapacita, specifický povrch. V rámci studia difúze bude vyhodnocen difúzní koeficient a porozita. Sorpční a difúzní vlastnosti budou hodnoceny jak u vzorků intaktní horniny (neporušená homogenní horninová matrice), tak u vzorků horniny z poruchových zón (např. hornina s významnou puklinovou výplní v podobě jílových minerálů či oxidů Fe). Budou vytvořeny reprezentativní soubory dat za účelem upřesnění transportních modelů lokalit. Výzkum bude probíhat jak in-situ, tak v laboratoři na vzorcích reprezentativních hornin. Očekává se, že budou provedena měření v plynné, tak i vodní fázi. Budou využity zkušenosti POSIVA a SKB v tomto tématu (např. Selnert et al. 2008, Voutilainen et al. 2017). Nutno podotknout, že při plánování experimentů ke zjištění transportních vlastností je potřeba počítat s velkou časovou náročností a požadavky na přístrojové a laboratorní vybavení.

Transportní modely

Předmětem transportních modelů v geosféře bude popis transportních cest radionuklidů, doby zdržení a změn koncentrací. Modely budou počítány pro konzervativní i sorbující radionuklidy. Sorpční a difúzní vlastnosti horninového prostředí, které budou vstupovat do tvorby modelů, budou přebrány z charakterizace horninového prostředí. Adevktivní složka transportu, včetně ředění, bude navazovat na hydrogeologické modely a modely „particle tracking“. V rámci charakterizace transportních vlastností horninového prostředí bude identifikována přítomnost koloidů v podzemních vodách. V případě jejich výskytu v podzemních vodách budou určeny vlastnosti přítomných koloidů, zejména ty, které jsou relevantní pro transport radionuklidů (stabilita, mobilita, schopnost vázat radionuklidy), jejich zdroje (přírodní zdroje, inženýrské bariéry), a bude modelován a zhodnocen jejich vliv na transport radionuklidů.

9.5 Geomechanický popis lokalit

9.5.1 Provedené práce

Předchozí práce se zabývaly mechanickými a petrofyzikálními vlastnostmi hornin (Hanák et al. 2015, Petružálek 2017, Hanák a Ondra 2017, Hanák et al. 2017). Jejich výstupy poskytují základní data o fyzikálních, pevnostních, deformačních, hydraulických, petrofyzikálních a tepelných vlastnostech reprezentativních hornin, vyskytujících se ve vybraných lokalitách. Zkoušky byly provedeny na vzorcích hornin z přirozených odkryvů, přičemž byla snaha o výběr co možná nejméně porušených a zvětralých hornin. V roce 2018 byly zpracovány inženýrskogeologické mapy M 1:10 000 průzkumných území (Rout a Mašín 2018, Bednarik et al. 2018, Aue 2018, Novotný 2018, Malík 2018, Schröfel et al. 2018, Pospíšil et al. 2018). Účelové mapy, představující model území zobrazující horniny podkladu a kvarterního pokryvu, poskytují informace o hydrogeologických poměrech (prameny, hloubky podzemních vod, chemismus apod.) a o probíhajících geodynamických procesech v území. Komplexním řešením geomechanického stavu horninového prostředí včetně předběžných hodnot orientace a velikosti napětí se v rámci projektu *Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov* zabýval Souček et al. (2018). Inženýrskogeologické mapování a základní stanovení geotechnických vlastností hornin v lokalitách EDU-západ a ETE-jih bylo součástí projektu *Moldanubikum* (Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2017). V poslední době byly geotechnické vlastnosti horninového prostředí studovány v rámci projektu *Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná* (Bukovská et al. 2020).

In-situ zkoušky a modelování napjatostního tenzoru probíhalo v rámci projektu LASMO (Stoš et al. 2020). Projekty *Komplexní geologická charakterizace podzemních prostor PVP Bukov* (Souček et al. 2018) a *Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov* (Stoš et al. 2018) přinesly první představy o orientaci a velikosti horizontálního napětí v hloubce úložiště v Českém masivu. Výpočet hodnot probíhal při aplikaci tří různých metod měření (overcoring, tenzometrické svorníky a konvergenční měření). Je nutné konstatovat, že poznání skutečných hodnot pevnostních, deformačních a jiných vlastností hornin v hloubce hypotetického úložiště, jejich napjatostní stav, zvětrání a tektonické porušení je minimální.

9.5.2 Plánované práce

Geomechanické vlastnosti hornin

V rámci charakterizace potenciálních lokalit budou odebrány vzorky pro laboratorní zkoušky, které budou komplexně zhodnoceny z hlediska geomechanických vlastností postupy a metodikami popsanými ve zprávě Mixa et al. (2019a). Budou testovány vzorky hornin z přirozených odkryvů a z vrtů. Výsledky budou vstupními daty geomechanického modelu hlubinného úložiště. Pevnostní a deformační parametry budou získávány jak pro hlavní litologické celky, ve kterých bude úložiště umístěno (povrchový areál, izolační část horninového masivu, obslužné chodby atd.), tak pro významné zlomové struktury. Bude vyhodnocena predikce chování horninových masivů jako systému hornina-voda-napětí-diskontinuity. Budou upraveny klasifikační indexy kvality horninového masivu pomocí klasifikačních systémů pro účely hodnocení horninového masivu z hlediska vhodnosti pro hlubinné úložiště.

V další fázi bude provedena hierarchizace významu (váhy) jednotlivých parametrů masivů (vlastnosti horniny a jejich anizotropie, duktilní a křehké porušení hornin a masivů, přítomnost podzemní vody a její vliv na vlastnosti hornin a stabilitu masivu apod.) a predikce dlouhodobého chování horninového masivu jako celku (viz. Kap. 9.8).

Napjatostní stav horninového masivu a deformace hornin vlivem změn napjatosti

Napjatostní stav horninového masivu v hloubce úložiště je významný parametr zásadně ovlivňující dlouhodobou stabilitu podzemních prostorů, a tím i dlouhodobou bezpečnost. Má také přímý vliv na bezpečnost razících prací. Nevhodná orientace tunelů a štol ke směru napětí spolu s puklinovou sítí, podzemní vodou a nevhodnými geomechanickými vlastnostmi horninového prostředí může způsobit náhlý kolaps stěn tunelu. Vysoké horizontální napětí spolu s nižší pevností horniny může způsobovat odprsky (spalling) stěn podzemních chodeb a ukládacích vrtů. Navíc, jak popsali Schmidtke a Lajtai (1985), v neporušených granitech v Lac du Bonet (Kanadský štít), pevnost horniny ve stěnách kaveren v podzemí se může snížit o cca 25 % v průběhu jednoho roku a až 35 % v průběhu století. Pro výběr finální a záložní lokality bude v hlubokých vrtech v hypotetické hloubce úložiště na jedné reprezentativní lokalitě měřeno horizontální napětí (směr, velikost a možné změny v čase). Toto měření bude aplikováno na všechny zbylé lokality, a to z důvodu pravděpodobnosti kolapsu vrtu při zkouškách. Dále budou porovnány tři široce používané metody určení in-situ napjatosti hornin, a to (a) metoda „Flat Jack“, (b) metoda odlehčení vrtného jádra a (c) hydraulického štěpení stěn vrtu. Při charakterizaci finální lokality budou v podzemí provedeny metody pro určení tenzoru napjatosti (určení velikosti a směrů jednotlivých složek napětí). Bude rovněž sledováno přerozdělení napětí v horninovém masivu vlivem výrubů podzemních prostor, tepelným tokem generovaným uloženými UOS a možnými seismickými otřesy.

Geomechanický model

Při geotechnickém posuzování lokality z hlediska mechaniky hornin jsou důležité zejména dvě komponenty – přirozený napjatostní stav horninového prostředí a vlastnosti samotné horniny (zejména mechanické a deformační). Další důležité komponenty prostředí, důležité pro sestavení geomechanického modelu, jsou např. údaje o propustnosti prostředí a její proměnlivosti, údaje o proudění vody a jejím tlaku, charakteristiky diskontinuit a puklinových sítí apod. Kombinace napětí v horninovém masivu a pevnosti určuje stabilitu budoucích

podzemních prostor úložiště. Geomechanický model bude sloužit ke studiu efektů regionálních a lokálních geologických jevů na napjatostní stav horninového prostředí a na jeho změny v čase, v bezprostředním okolí HÚ. Poslouží rovněž při návrhu prostorového uspořádání úložiště, technologie výstavby a následnosti prací.

Pro zhotovení geomechanických modelů budou získána nejdříve vstupní data pro naplnění modelu (geologický vývoj území, specifické vlastnosti hornin, geometrie a jiné vlastnosti diskontinuit a puklinových sítí, podzemní voda, iniciální napjatostní stav, RMR – Rock Mass Rating a jiné klasifikační systémy horninových masivů, rychlost šíření seismických vln apod.). Na vybrané lokalitě bude následně modelován iniciální stav horninového prostředí před výstavbou vlastního podzemního díla a model ovlivnění horninového prostředí při výstavbě. Bude provedena seismická analýza a analýza změn v distribuci napětí. Dále bude na základě tohoto modelu vyhodnocen optimální druh ražeb, doporučené zajištění podzemního díla a zhodnocen vliv předpokládaných zlomových zón na stabilitu důlního díla. Bude zhodnocen vliv orientace hlavních napětí na situování ukládacích prostor (vrtů a chodeb) a obslužné infrastruktury. Bude vyhodnocena také možnost vzniku nežádoucích doprovodných jevů (spalling, kolaps stěn podzemních prostor aj.).

9.6 Tepelné vlastnosti lokalit

9.6.1 Provedené práce

Tepelné charakteristiky hornin, zejména tepelná vodivost hornin, přímo ovlivňují prostorové uspořádání úložných prostor (vzdálenosti mezi tunely a samotnými vrty), čímž přímo ovlivňují rozměry, a tím i celkové náklady hlubinného úložiště.

Tepelné vlastnosti horniny (tepelná vodivost a kapacita) byly studovány ve zprávě Hanák et al. (2017) pro sedm potenciálních lokalit, v rámci ověření vhodnosti území v okolí jaderných elektráren byly orientačně stanoveny také tepelné vlastnosti hornin (Hanžl et al. 2017, Navrátilová et al. 2017). V rámci procesu hodnocení lokalit byly orientačně vypočítány hodnoty tepelného toku a původní teploty horninového masivu (Dědeček et al. 2020). Důležitým parametrem pro tepelné výpočty je také hodnota přirozené radioaktivity hornin, tyto hodnoty byly pro reprezentativní litologie stanoveny Hanákem et al. (2017). Některé lokality vykazují mírně zvýšené hodnoty přirozené radioaktivity. Nicméně, obsah radioaktivních izotopů v horninovém prostředí je dostatečně mimo kritických hodnot a nepředstavuje potenciální negativní faktor pro umístění hlubinného úložiště. Vliv anizotropie horniny na koeficient tepelné vodivosti byl studován v rámci projektu *Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov* (Souček et al. 2018).

9.6.2 Plánované práce

Pro výběr finální a záložní lokality budou získány reprezentativní hodnoty tepelných vlastností hornin (tepelná konduktivita, tepelná difuzivita, měrná tepelná kapacita, tepelná roztažnost), a to ze všech uvažovaných litologií pro umístění hlubinného úložiště. Důraz bude kladen zejména na vzorky z předpokládané hloubky. Pro účely tvorby teplotního chování úložiště bude také měřena iniciální teplota horninového masivu, upřesněny hodnoty tepelného toku

včetně upřesnění termálního gradientu na každé lokalitě. Budou stanoveny obsahy radiogenních prvků, které mají vliv na tepelnou produkci horninového prostředí. Zvláštní důraz bude kladen na hodnocení vlivu diskontinuit, žilních hornin, podzemní vody, xenolitů apod. na šíření tepla prostředím. Získaná data budou zároveň významným vstupem pro tepelné výpočty, modely a technologické úvahy v rámci projektování inženýrských bariér a hlubinného úložiště.

V rámci aktivit v podzemních laboratořích bude proveden in-situ experiment, který porovná stanovení tepelných hodnot horninového prostředí získaných laboratorními měřeními a srovnáním s reprezentativním objemem horniny a umožní tak reálnou kalibraci dosavadních termálních modelů úložiště. Podobné studie byly realizovány v některých krajinách s pokročilými výzkumnými programy, výsledky těchto studií ale nemohou být plně aplikované na geologické podmínky České republiky. Plánované práce mohou odhalit specifické podmínky vybrané lokality a zvýšit důvěryhodnost jejího termálního modelu. Druhým experimentem bude stanovení a interpretace původní teploty horninového masivu a dosah termálního ovlivnění horniny antropogenní činností. Cílem projektu bude ověřit nakolik jsou reprezentativní stanovení původní teploty horninového masivu a interpretace změn horninového prostředí při antropogenním zásahu.

9.7 Geochemický a mikrobiologický popis lokalit

9.7.1 Provedené práce

Cílem geochemického popisu lokalit je především vytvoření geochemického modelu lokalit, který umožní vyhodnotit kompatibilitu lokalit se systémem inženýrských bariér. Nutno podotknout, že veškeré geochemické práce je nutno koordinovat a plánovat v součinnosti s ostatními metodami geologického a hydrogeologického průzkumu a výzkumu, které musí být nedílnou součástí, resp. poskytují základní vstupní informace pro tyto práce.

Fyzikálně-chemické vlastnosti povrchových a podzemních vod byly studovány v rámci několika projektů, a to: *3D strukturně-geologické modely potenciálních lokalit HÚ* (Franěk et al. 2018), *Moldanubikum* (Hanžl et al. 2018, Navrátilová et al. 2018a), dále v rámci monitorovacích prací SÚRAO (Bartoň a Mátl 2018, Černý a Šedivá 2018, Šedivá 2018, Bukovská et al. 2017, Hokr et al. 2018, Vylamová et al. 2020) a v rámci projektu *Aktualizace strukturně-geologických modelů potenciálních lokalit HÚ na základě geofyzikálních dat* (Mixa et al. 2020). Při řešení projektu *Komplexní geologická charakterizace podzemních prostor PVP* byla získána hydrogeochemická data a interpretován vývoj chemizmu podzemních vod v hloubkovém řezu 1200 m (Bukovská et al. 2017). Řešením dílčího projektu na PVP Bukov byly získány iniciální hodnoty Eh a hodnoty obsahu kyslíku v uzavřených vrtech (Rukavičková et al. 2017).

Mikrobiální charakterizace horninového prostředí byla zaměřena na ověření metodik studia a odlišení antropogenního signálu od přirozeně vyskytujících se společenstev a vliv mikrobiální aktivity na korozi (Steinová et al. 2019, Černík et al. 2019). Iniciální geochemický model a model reakčního transportu byl zpracován v práci Červinka et al. (2018).

9.7.2 Plánované práce

Hydrogeochemický výzkum lokalit je závislý především na správné metodice odběrů a nakládání se vzorky, terénních měřeních fyzikálně-chemických parametrů vod a správném nastavení laboratorních a chemických analýz, stejně tak i na přípravě vzorků na náročné laboratorní analýzy (radiochemie, organické látky atp.). Hydrogeochemický výzkum není možný bez paralelního mineralogického a geochemického výzkumu hornin a puklinových mineralizací zkoumaných puklinových kolektorů. Hlavním cílem geochemických prací je tedy charakterizovat zájmové území z pohledu geochemie, vymezit na základě distribuce prvků a vztahů mezi nimi anomální zóny a nehomogenity, které budou předmětem dalšího výzkumu a provést interpretaci možných příčin geochemických anomálií ve vazbě na geologickou stavbu území. Musí být zkoumány interakce voda-hornina-atmosféra. Hydrochemický výzkum se zaměřuje zejména na analýzu chemického složení vod, na němž závisí reaktivita, rozpouštěcí, transportní a alterační schopnosti podzemní vody. Významnou samostatnou oblastí hydrochemie vod je výzkum jejich izotopického složení, což je zejména důležité pro určení původu a stáří vod. Výstupem hydrochemického monitoringu jsou data nutná pro transportně-chemické matematické modelování vývoje složení vod a horninového prostředí v geologické budoucnosti úložiště. Důležité je u vzorků vod stanovovat především fyzikálně-chemické parametry, hlavní ionty, stopové prvky, plyny, částice, izotopy a mikrobiologické parametry. Mezi důležité sledované parametry patří TDS, Na, K, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, stabilní a radioaktivní izotopy ²H, ¹⁸O, ³⁴S, ¹⁴C, ¹³C, ³H a ⁸⁷Sr, redoxně sensitivní (stopové) prvky Fe²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, S²⁻, U⁴⁺, organický materiál (např. fulvokyseliny a huminové kyseliny), obsah koloidů a změny pH a Eh a další. Přesný rozsah jednotlivých analýz bude stanoven na konkrétním řešení příkladu, stejně tak i četnost odběrů. V následujícím období bude studována vertikální zonalita chemizmu podzemních vod, včetně hloubky přechodu oxidačního a redukčního prostředí, zejména s využitím experimentů v PVP Bukov. Budou odvozeny průměrné hodnoty Eh a pH pro hloubky úložiště Českého masivu a aktualizováno průměrné hydrochemické složení podzemních vod a na vybraných objektech budou sledovány i změny hydrochemického složení vod ve vertikálním profilu vrtů. Dále bude zhodnocena průměrná hodnota mineralizace podzemních vod a její vývoj s hloubkou a interpretovány možné změny chemizmu podzemních vod a změn redukčního prostředí při otevření horninového masivu důlním dílem. Vzorky vod budou datovány různými izotopickými systémy (H₃, freony, ¹⁴C). Dále bude stanoven obsah vybraných izotopů v hlubinných vodách za účelem interpretace jejich původu. Tyto hodnoty budou sloužit také jako vstup pro paleohydrogeologické simulace. Jedním z výstupů geochemického popisu lokalit tak bude i provedení geochemického modelování vývoje vod a hornin za použití ověřených softwarových nástrojů a jejich příslušnou termodynamickou databází.

Pro výběr finální a záložní lokality budou dopracovány metodiky odběru a vyhodnocení vzorků mikrobiálních společenstev. Ve vzorcích odebraných z cílové hloubky budou stanoveny kritické taxony zejména z pohledů koroze kandidátních materiálů inženýrských bariér (železo a síran redukující a metanogenní). Vrty budou pravidelně monitorovány pro vyhodnocení případného rozvoje těchto zájmových společenstev. V rámci aktivit v PVP Bukov bude pokračovat monitoring rozvoje mikrobiálních společenstev identifikovaných v práci Steinová et al. (2019) a také rozvoj metodických postupů odběru vzorků. Tyto aktivity budou zahrnovat monitoring korozního experimentu pro účely zhodnocení vlivu mikrobů na korozi kandidátních materiálů inženýrských bariér, zejména pak UOS.

Při charakterizaci finální lokality bude důležité poznat jak původní stav před intruzí člověka do horninového masivu, tak společenstva antropogenně ovlivněná a společenstva, u kterých dochází k rozvoji díky okysličení horninového masivu. Jako hlavní nebezpečné procesy je třeba uvažovat mikrobiálně indukovanou korozi (především síran-redukující a síru oxidující bakterie, železo-redukující a železo-oxidující bakterie a nitrát-redukující bakterie), ovlivnění funkčních vlastností bentonitu (především železo-redukující bakterie, ale i další skupiny), jakoukoliv mikrobiální produkci či konzumaci plynů a mikrobiální produkci organických látek. Hlavním cílem dalších aktivit bude tedy nalezení takových podmínek, které rozvoj mikrobiální aktivity výrazně omezí.

9.8 Geodynamická stabilita lokalit

9.8.1 Provedené práce

Dlouhodobá exogenní a endogenní stabilita lokality pro vybudování HÚ je určována přítomností aktivních geodynamických procesů probíhajících v celém geologickém regionu. Uvedené procesy jsou přímo spojeny s napěťovým polem regionu, jeho časovými změnami, s izostatickou vyvážeností bloků zemské kůry v regionu zájmového území a se strukturní stavbou zemské kůry, a to jak v širším okolí zájmového území, tak i lokálními poruchami.

Z *endogenních* geodynamických procesů jsou z hlediska bezpečnosti budoucího hlubinného úložiště nepříznivé především tektonické procesy vedoucí ke vzniku dislokací, představující následek deformace a také k duktilním deformacím.

Hlavní *exogenní procesy*, které mohou ovlivnit vlastnosti a chování hlubinného úložiště, jsou zvětrávání hornin a eroze, resp. denudace zemského povrchu, které jsou úzce spojeny s klimatickými podmínkami a jejich změnami (blíže v Kap. 7.9), především se změnami teplotního hloubkového profilu a případným zaledněním, resp. vytvořením permafrostu. Klimatické poměry následně ovlivňují povrchový odtok, režim a oběh podzemních vod, typ a charakter vegetačního pokryvu. Všechny procesy jsou úzce propojeny a vytvářejí složitý, vzájemně propojený systém.

Český masiv je relativně stabilní geologická jednotka, která je vůči okolním geologickým strukturám (Východní Alpy, Baltský štít, Západní Karpaty) v relativní rovnováze. Geologické a geomorfologické procesy probíhají v Českém masivu velice pomalu. Vulkanická činnost byla v Českém masivu ukončena řádově před sta tisíci až milióny lety, v samotném prostoru hodnocených lokalit řádově před stovkami miliónů let. Vertikální diferenciální pohyby jsou v současnosti řádově jen v desetínách mm ročně (Hroch et al. 2015, Balatka a Kalvoda 2008, Czudek 2005). Eroze a denudace horninových komplexů nad úložištěm může vést ke snížení hloubky úložiště. V extrémním případě (který je ale téměř nemožný) by mohlo v časovém horizontu jednoho miliónu let dojít k vynoření HÚ na povrch. Zmenšení/zvětšení hloubky ale způsobí změny v režimu a oběhu podzemních vod a může dojít ke změně možných cest pro únik radionuklidů do životního prostředí. Současné poznání velikosti a charakteru vertikálních pohybů zemské kůry v potenciálních lokalitách HÚ se opírá zejména o expertní odhady (Hroch et al. 2015) a o nepřímé kvartérně geologické a geomorfologické metody (hodnocení paleoreliéfu, zpětné eroze, erozních svahů a údolí apod.), případně o rešerše z české a světové odborné literatury. Specifický výzkum zaměřený na výzdvihové, resp. poklesové,

tendence zemské kůry v konkrétních potenciálních lokalitách HÚ v České republice nebyl dosud prováděn.

Vulkanické a postvulkanické aktivity

Protože na základě minulých prací nebyly na potenciálních lokalitách zjištěny projevy vulkanické ani postvulkanické aktivity za posledních 250 milionů let, tato problematika nebyla v minulých pěti letech řešena. Jedinou výjimku může tvořit lokalita Čertovka, kde ve vzdálenosti asi 4 km severozápadním směrem začínají výskyty reliktů okraje vulkanického komplexu Doupovských hor (vulkanicky aktivní před 20-34 miliony let) a asi 4 km západním směrem se nachází relikt menší sopky Vladař (stáří aktivity 8-22 milionů let). V případě, že by lokalita Čertovka postoupila do další fáze, bude tomuto parametru věnována pozornost, a to i navzdory tomu, že na lokalitě není překročeno vylučující kritérium.

Tektonická stabilita

Dlouhodobá tektonická stabilita lokality pro vybudování HÚ je určována přítomností endogenních geodynamických procesů probíhajících v celém geologickém regionu. Uvedené procesy jsou přímo spojeny s napěťovým polem regionu, jeho časovými změnami, s izostatickou vyvážeností bloků zemské kůry v regionu zájmového území a se strukturní stavbou zemské kůry, a to jak v širším okolí zájmového území, tak i lokálními poruchami.

Seismická stabilita a monitoring

Výpočet seismického ohrožení hlubinného úložiště se řídí stejnými zásadami jako výpočet seismického ohrožení jiných jaderných zařízení (např. jaderných elektráren), je však specifické tím, že předpokládaná doba existence hlubinného úložiště je mnohem delší (řádově desítky až statisíce let). Při výpočtu seismického rizika je potřebné zohlednit především dvě specifické okolnosti:

- 1) při výpočtu seismického ohrožení se předpokládá, že seismický režim je stacionární. Z geologických pozorování je však velmi dobře známo, že pohyb tektonických desek, stejně tak jako tektonický tlak, se mění. Tyto změny sebou přirozeně nesou i změny v seismickém režimu. Může dojít k oživení zlomů, které byly v předchozí fázi neaktivní. Tyto procesy jsou velmi nepravidelné ve všech časových měřítcích od minut (po které se šíří seismické vlny od velkých zemětřesení k nám) až po desítky milionů let (za které může dojít k přeskupení kontinentů),
- 2) při budování podzemního úložiště bude vznikat indukovaná seismicitata. Zkušenosti z hlubinných dolů ukazují, že k indukované seismicitě došlo ve všech významných hlubinných dolech v ČR. Avšak před zahájením báňských činností je těžké/nemožné stanovit, jak silná indukovaná seismicitata vznikne.

SÚRAO v minulosti prováděla pouze práce zaměřené na odhad seismického rizika pro účely porovnání lokalit, a to buď neo-deterministickou analýzou (Kaláb et al. 2015), nebo PSHA analýzou (Málek et al. 2018).

Český masiv je oblastí s výskytem slabé seismické aktivity, kterou je však potřeba posuzovat z dlouhodobého hlediska. Pochopení deformačních procesů a aktivních deformačních struktur vyžaduje především přesnou lokalizaci ohnisek zemětřesení a ideálně i znalost ohniskového mechanismu. V okolí potenciálních lokalit, které neleží v detailně monitorovaných oblastech, se limit spolehlivé detekce při současném stavu monitorovací infrastruktury pohybuje okolo

magnituda $M_L = 1-1,5$ (Mixa et al. 2019a). Seismicita na celém území České republiky je monitorována/sledována sítí seismických stanic několika českých výzkumných institucí zahrnutých do virtuální seismické sítě (tzv. česká regionální seismologická síť), jejichž záznamy jsou dostupné bez omezení a online. SÚRAO v letech 2016–2018, v rámci pilotního projektu, monitorovala území lokality Čertovka (Brož et al. 2018). Během dvou let kontinuálního sledování nebyl zaznamenán žádný seismický jev uvnitř sítě.

9.8.2 Plánované práce

Tektonická stabilita prostředí

Pro získání informací o tektonické stabilitě území je důležité terénními pracemi získat základní prostorové geologické informace, jako jsou: geometrie a charakteristika křehkých struktur a jejich konektivita (puklin, puklinové a zlomové systémy/zóny), pevnostní a deformační charakteristiky horninového materiálu, horninového masivu a puklinových systémů, statické a dynamické vlastnosti, reologické vlastnosti (dlouhodobé pevnosti a přetváření v čase). Je potřebné porozumět jejich mechanismu vzniku a významu, aby bylo možné predikovat jejich možnou aktivitu v budoucnu. Je nutné provést mikrostrukturní a paleonapětovou analýzu, měření akustické emise ve vztahu k napjatosti a rozrušenosti při dlouhodobém zatěžování, sledování kinematických a dynamických parametrů procházejících ultrazvukových vln. Důležitou součástí všech analýz budou pevnostní a deformační charakteristiky a reologické vlastnosti hornin (vrtných jader). V případě posuzování a hodnocení tektonické stability území je nutný průnik prací a vzájemná multioborová spolupráce především mezi geology, geofyziky, seismology, geomechaniky aj.

Posouzení tektonické stability musí být založeno jak na zjištění minulé a recentní (kvartérní) geodynamické aktivity, tak na odhadu jejího vývoje a průběhu v budoucnosti. Po získání dostatečného objemu terénních a monitorovaných dat a popisu současné, recentní aktivity je nutné vytvořit model, který umožňuje extrapolaci procesů do budoucnosti.

Seismická stabilita a monitoring

Hodnocení seismické stability území vychází ze široké škály geologických a geotechnických informací, a především ze zaznamenaných seismických jevů (zemětřesení), jejichž základní údaje jsou obsaženy v existujících katalozích zemětřesení. Z tohoto důvodu se v první etapě budou aktualizovat všechny geovědní databáze a hlavním cílem bude vybudovat/aktualizovat seismotektonický model, který představuje základní vstup z hlediska vymezení zdrojových oblastí seismických jevů. V oblasti do 25 km budou také zkoumány a zhodnoceny významné zlomy z hlediska jejich seismické aktivity a možné reaktivace. Bude studován vliv případných seismických událostí na reaktivaci zlomu, příp. sekundárního pohybu na větších zlomových strukturách a její dopad na celý koncept hlubinného úložiště. Budou rovněž podporovány výzkumné práce v rámci celé ČR s důrazem na hodnocení paleoseismicity. Na základě aktualizace dat bude následně proveden aktualizovaný výpočet pravděpodobnostní a neo-deterministické analýzy seismického rizika. Následně budou oba přístupy porovnány a zhodnoceny. Budou doplňovány a aktualizovány geologické, geofyzikální a seismologické charakteristiky území finální lokality, především pro účely hodnocení seismických rizik v místě hlubinného úložiště, a to jak jeho podzemní části, tak i povrchového areálu. Na základě aktualizací uvedených dat bude vypracována aktualizovaná pravděpodobnostní analýza seismického rizika pro finální lokalitu.

Pro stabilitu úložiště jsou relevantní i slabé seismické jevy, které ale nejsou v tomto režimu monitorovány detekovány. Proto je potřebné vybudovat lokální seismickou monitorovací síť pro studování detailu širšího okolí zájmového území a provádět měření a analyzovat a vyhodnocovat záznamy. Seismologické monitorování bude prováděno především za účelem a) zjištění geodynamicky aktivních oblastí a struktur a celkové úrovně přirozené mikroseismicity v blízkém okolí zájmové lokality a b) zjištění a sledování indukované seismicity způsobené výstavbou úložiště. Časový harmonogram monitorování je proto nutné stanovit pro oba účely.

Do roku 2025 bude dobudována veřejně dostupná regionální síť stávajících stanic se zaměřením na širší okolí potenciálních lokalit. Doplněním stávající sítě lze vytvořit virtuální síť, která umožní spolehlivou detekci a přibližnou lokaci jevů s magnitudem $M_L \geq 0,5$. Nové stanice zajistí rovnoměrné pokrytí zájmových oblastí, a tím i srovnatelnou úroveň meze detekce/lokalizace v oblasti všech zvažovaných lokalit.

Na finální lokalitě pro vybudování hlubinného úložiště bude vybudována autonomní lokální monitorovací síť, schopná lokalizovat jevy uvnitř sítě bez použití záznamů regionálních stanic. Geometrii této stále stanice bude potřebné stanovit tak, aby vyhověla oběma níže stanoveným podmínkám:

- 1) monitorování minimálně v oblasti dané vyhláškou č. 378/2016 Sb. (§5b), tj. do vzdálenosti 25 km,
- 2) monitorování v užší oblasti prvních km do důlního díla.

Monitoring vertikálních pohybů zemské kůry

V úvodní fázi řešení problematiky je nutné základní porovnání přesnosti používaných, resp. vyvíjených měřících metod, definování jejich výhod, resp. nevýhod měření. Měření a hodnocení vertikálních pohybů zemské kůry bude prováděno různými metodami: GPS měření, velmi přesná nivelizace, DPZ – radarová interferometrie, geologické a geomorfologické studium (výzkum) kvartérních sedimentů, morfostrukturní a geomorfologický výzkum. Budou stanoveny první hodnoty výzdvihu v regionálním měřítku.

Predikce vývoje morfologie, možných deformací povrchu a rychlost eroze a sedimentace

Pro charakterizaci a výběr finální a záložní lokality budou podrobně charakterizovány geomorfologické formy, na jejichž základě bude interpretován vývoj území během nejmladšího kvarterního období (erozní a denudační formy, rychlost geomorfologických procesů, podíl vodní a eolické eroze a její rychlost a jiných denudačních procesů. kryogenní fenomény (např. mrazové klíny, termokrasové tvary , vývoj vegetace, antropogenní vlivy apod.).

Na finální lokalitě proběhne výpočet (expertní odhad) velikosti výzdvihu, resp. poklesu území za dobu požadované bezpečnosti HÚ, přičemž do úvahy se budou brát zejména různé klimatické scénáře (zalednění, permafrost), očekávané využití území a jiné faktory. Obdobnou problematikou se zabývala NAGRA při hodnocení území pro hlubinné úložiště v severním Švýcarsku (Rösch et al. 1988, Diebold a Müller 1994, Müller et al. 1994).

Geomorfologický vývoj území, mimo jiné úzce souvisí s klimatickými podmínkami, a proto se některé metody výzkumu geomorfologie území a klimatu budou překrývat, resp. doplňovat.

Při studiu tektonické a seismické stability, vertikálních pohybů zemské kůry a jejich monitorování bude nevyhnutná úzká mezioborová spolupráce týmů odborníků, především v oblastech strukturní geologie, geomechaniky, seismicity, geomorfologie, geodesie a klimatologie. V konečném důsledku výsledky ze všech oblastí budou muset být propojeny s výsledky hydrologie a hydrogeologie.

9.9 Klimatické a doprovodné jevy

9.9.1 Provedené práce

Při posuzování vhodnosti lokalit pro hlubinné úložiště je třeba zhodnotit zranitelnost a predikci vývoje změn horninového prostředí a režimu a oběhu podzemních vod z hlediska dlouhodobých klimatických změn a jejich doprovodných jevů. Jde především o fenomény jako: překrytí území s hlubinným úložištěm pevninským nebo horským ledovcem, permafrostem dosahujícím do značné hloubky, změny rychlosti denudace a akumulace, nebo významné změny v hydrologii a hydrogeologii území.

V předcházejícím výzkumném období byly realizovány některé práce zaměřené na vývoj klimatu, morfologie území a její změny (erozní a klimatická stabilita, inženýrskogeologické mapy, morfotektonická analýza území apod.), které představují prvotní úvahy o dlouhodobé stabilitě území z různých hledisek. Dosud provedené práce měly charakter pouze expertních odhadů na základě literatury, resp. jednoduchého statistického vyhodnocení klimatických dat z lokalit za časové období 6 až 32 let. Výjimkou bylo zpracování inženýrskogeologických map, v rámci kterých byly realizovány rozsahem omezené terénní inženýrskogeologické mapovací práce, geofyzikální měření a laboratorní práce. Závěrečná zpráva kromě jiného popisuje geomorfologické podmínky a probíhající procesy, jejich změny v čase, a také klimatické podmínky, včetně trendů změn (srážky, teplota vzduch a vítr). V rámci programu vývoje HÚ byla zpracována jedna studie týkající se klimatických změn na potenciálních lokalitách (Nývlt a Dobrovolný 2015). Z klimatologických stanic ČHMÚ byly získány a statisticky zpracovány denní údaje (srážky, teplota, směr a rychlost proudění vzduchu) za 32leté období (Kováčik et al. 2018a-i). Výsledky potvrzují dlouhodobý trend oteplování území o 0,4-1,3 °C.

Změny morfologie území jsou stimulovány vnitřní dynamikou zemské kůry (výzdvihy a poklesy území, resp. laterální posuny), klimatickými poměry a extrémními klimatickými jevy, které úzce souvisí s typem vegetace, vlastnostmi pokryvných útvarů a hornin podkladu (granulometrické složení, typu zvětrávání, náchylnosti hornin na zvětrávání apod.), přítomností tekoucí vody a jinými aspekty. Budoucí práce budou zaměřeny na hodnocení morfologického vývoje během kvartéru, zejména nejmladšího období (würm-holocén), určení klíčových faktorů negativně ovlivňujících bezpečnost HÚ a predikce dalšího vývoje území na období sto tisíc let.

V rámci projektu *Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ* (SÚRAO, SO2014-061) byla zpracována studie, která se zabývala morfologií území a jejími změnami (Hroch et al. 2015). Jde o stručnou práci přinášející jen základní morfologické údaje o území. Podrobný prediktivní geomorfologický výzkum v lokalitách HÚ dosud systematicky nebyl prováděn.

9.9.2 Plánované práce

Změny klimatu

V současnosti dochází ke globální změně klimatu, která společně s očekáváním ledové doby během 10-12 tisíc let zvyšuje nejistotu ohledně předvídatelného klimatického scénáře. Některé klimatické studie a modely poukazují (např. Thölix et al. 2018, Lord et al. 2019), že standardní střídání glaciálů a interglaciálů během celého kvartéru (posledních cca 2,56 mil. let) může být narušeno. S klimatem úzce souvisí charakter a typ vegetace, rychlost geomorfologických procesů, charakter režimu a oběhu podzemních vod apod.

Pro charakterizaci a výběr finální a záložní lokality budou nejprve shrnuty klimatické scénáře (EURO-CORDEX, IPCC, scénáře v rámci vývoje HÚ v Evropě), týkající se území ČR a severní a střední Evropy a definovány varianty nejpravděpodobnějších klimatických scénářů pro území v okolí HÚ. Na těchto scénářích je předpoklad spolupráce i v rámci mezinárodních platforem (např. IGD-TP). Bude proveden screeningový výpočet jednoho vybraného scénáře pro vybranou referenční lokalitu.

V rámci charakterizace finální lokality budou upřesněny klimatické scénáře a budou detailně definovány scénáře vývoje reliéfu v návaznosti na změny klimatu (např. vliv permafrostu, střídání jednotlivých stadiálů a interstadiálů v rámci glaciálů). V rámci modelovacích aktivit pak bude hodnocen vliv těchto procesů na hydraulické a transportní vlastnosti lokality. Bude zhodnocena pravděpodobnost těchto klimatických scénářů.

10 Příprava projektového řešení hlubinného úložiště

10.1 Úvod

Hlubinné úložiště je specifickým typem jaderného zařízení, které se skládá ze dvou provozních částí s rozdílnými činnostmi při nakládání s radioaktivními látkami a rozdílnými nároky na životnost objektů a zařízení. První provozní částí jsou objekty, zařízení a technologie nezbytné k zajištění provozu hlubinného úložiště, tj. objekty sloužící k příjmu, přeložení VJP do UOS a zavážení VJP a RAO, které mohou být umístěny jak na povrchu, tak v přípovrchových objektech. Druhá provozní část HÚ – ukládací prostory - je umístěna v podzemí. Požadavky na projekt jaderných zařízení všech typů jsou z hlediska jaderné legislativy obecně formulovány v Atomovém zákoně a podrobněji související vyhlášce č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Odlišností hlubinného úložiště od jiných jaderných zařízení je to, že i vlastní projekt hlubinného úložiště výrazně závisí na vlastnostech území, ve kterém má být vybudováno. Projekt hlubinného úložiště tedy není možné převzít od zahraničního dodavatele, jak je tomu například u výstavby jaderných elektráren.

Hlubinné úložiště musí být navrženo tak, aby bylo možné bezpečně uložit všechny radioaktivní odpady, existující, a i dle strategických záměrů ČR plánované, a nepřijatelné do přípovrchových úložišť (včetně VJP prohlášeného za odpad), do hlubinného úložiště. Úložiště musí být ve vybrané lokalitě proveditelné pomocí ověřených technologií, dostupných v současné době, přičemž radiační ochrana musí být optimalizována k zajištění nejvyšší úrovně bezpečnosti, která může být rozumným způsobem dosažena.

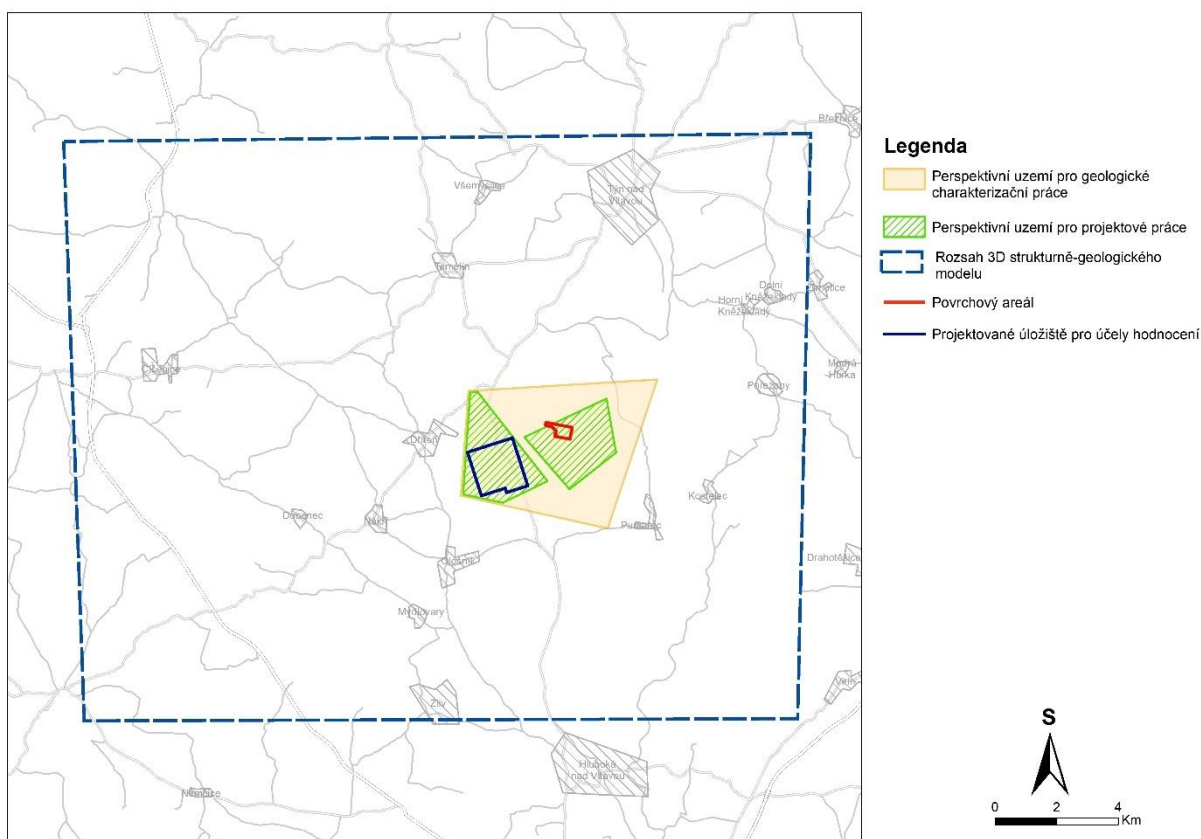
V době výběru lokality zatím nejsou a nemohou být podrobně známy podmínky potřebné pro přípravu konečného projektu hlubinného úložiště:

- 1) ještě dlouho nebude známo konečné celkové množství radioaktivního odpadu, které bude třeba uložit, vzhledem k probíhající diskusi o výstavbě nových jaderných zdrojů,
- 2) ještě dlouho nebudou známy charakteristiky lokality potřebné pro podrobné projektové řešení hlubinného úložiště vyžadující znalost lokality v hloubce úložiště,
- 3) stále probíhá diskuze o způsobu zapojení veřejnosti do přípravy HÚ, což ovlivní zejména umístění povrchového areálu.

10.1.1 Provedené práce

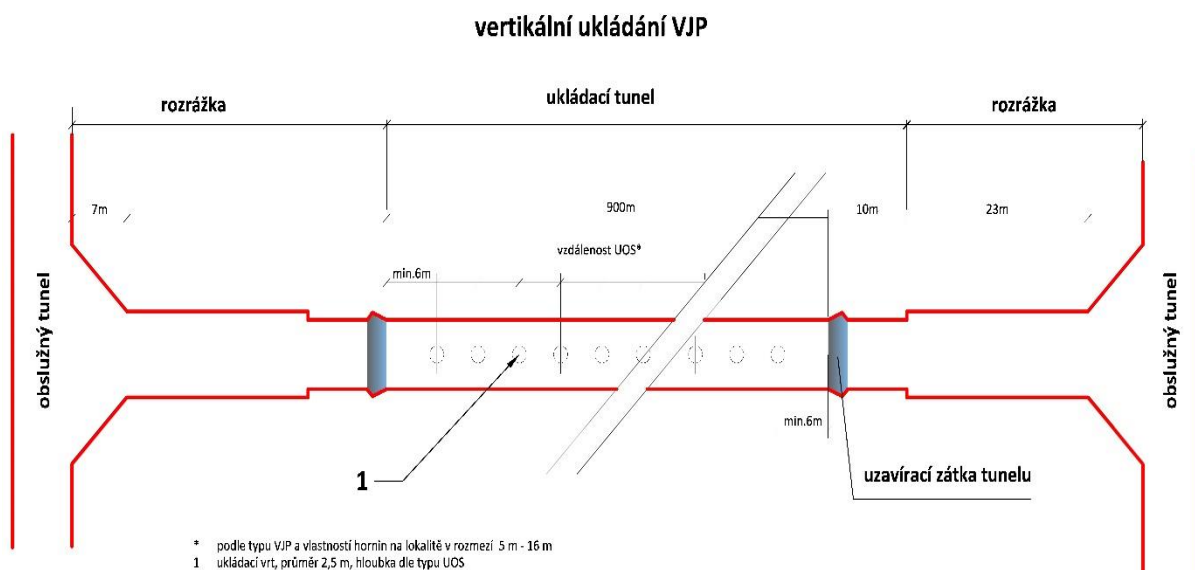
V souladu se Střednědobým plánem (Pospíšková et al. 2015) byly v roce 2018 dokončeny Studie umístitelnosti/proveditelnosti HÚ na potenciálních lokalitách. Studie slouží k vzájemnému porovnání jednotlivých lokalit z hlediska vybudování HÚ v procesu výběru lokalit pro další etapu prací. Souběžně byla zpracována *Optimalizace podzemní části HÚ v úrovni referenční lokality*. Optimalizace podrobněji zpracovává koncepty jednotlivých referenčních řešení a soustřeďuje je v jednom společném výstupu. Dále zohledňuje vývoj změn vstupních parametrů, zejména zdrojového členu, množství odpadů, doby skladování, parametrů materiálů úložného systému a hornin z potenciálních lokalit. Jedná se především o mechanické a tepelné vlastnosti hornin a bentonitu a tepelné výkony UOS.

Na základě výsledků výzkumných prací v předchozím období (např., Vokál et al. 2018a-i, Bureš et al. 2018a-d, Špinka et al. 2018a-c, Marek et al. 2017a-g, Navrátilová et al. 2018, Málek et al. 2018, Zahradník et al. 2020, Butovič et al. 2020) byly definovány polygony pro možné umístění hlubinného úložiště pro 9 potenciálních lokalit. Na Obr. 10 je uveden příklad lokalizace umístění úložiště v jedné z potenciálních lokalit.

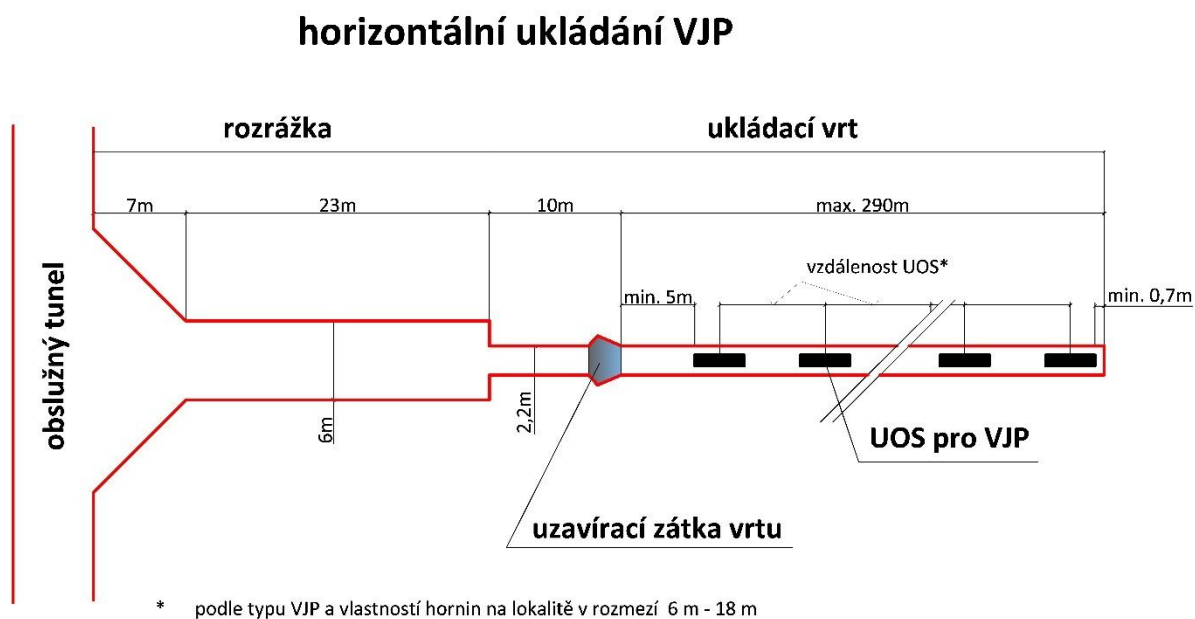


Obr. 10: Lokalizace hodnocených území lokality Janoch (ETE-jih)

Technické řešení uspořádání úložiště bylo zpracováno ve čtyřech variantách. Varianty vznikly kombinací dvou způsobů ukládání vertikálně (Obr. 11) a horizontálně (Obr. 12) a dvou technologií ražby podzemních prostor (trhací práce – D&B a plně mechanizovaná ražba – TBM).

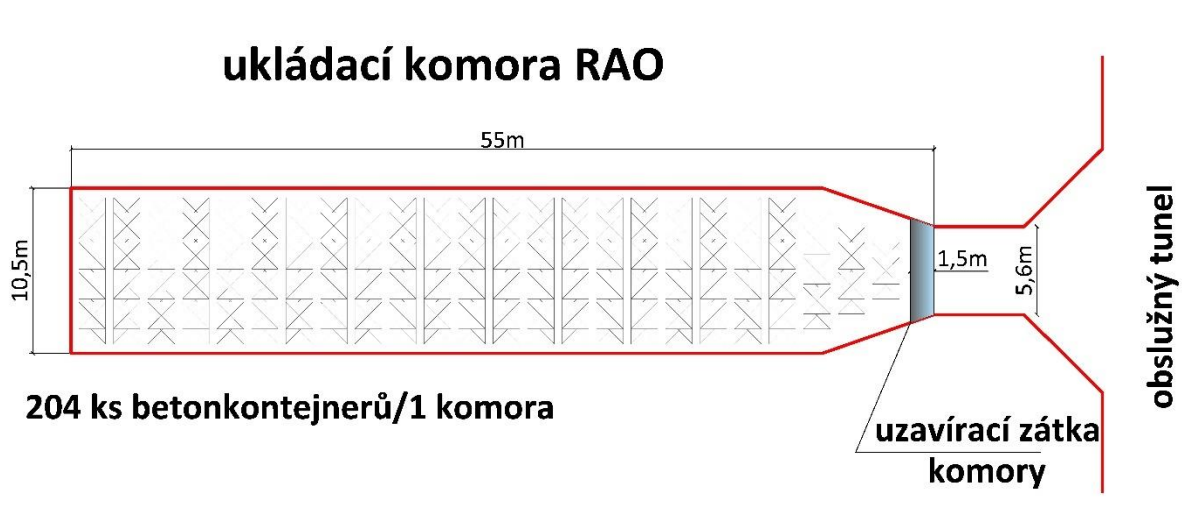


Obr. 11: Vertikální řešení ukládacího tunelu



Obr. 12: Horizontální řešení ukládacího tunelu

Byl navržen technický návrh konceptu pro ukládání NAO a SAO, které není možno ukládat do přípovrchových úložišť (Obr. 13).



Obr. 13: Ukládací komora RAO

Ukládací komory RAO umístěné na ukládacím horizontu HÚ budou po svém naplnění betonkontejnery vyplněny vhodným výplňovým materiálem, trvale uzavřeny konstrukční zátkou a dále postupně uzavírány přístupové chodby výplněmi v souladu s koncepcí pro výplňové materiály a systém uzavírání celého hlubinného úložiště.

Dosavadní návrhy neřešily způsoby vyplňování komor RAO, ukládacích vrtů a tunelů a vlastní proces uzavírání úložiště.

Současně byly v každé lokalitě vyhodnocovány střety zájmů, především z pohledu Atomového zákona a legislativy o ŽP. Řešeny byly i možnosti napojení areálu HÚ na obslužnou infrastrukturu. Spolu s upřesněním projektového řešení byly též komplexně zpracovány odhady nákladů pro zpracované varianty s předpokladem čerpání v čase dle současného předpokládaného harmonogramu.

10.2 Plánované práce

V rámci oblasti VaV popsané v této kapitole bude řešena syntéza všech podoblastí včetně jejich vazeb a všechny aktivity, které nejsou zahrnuty ve výše uvedených kapitolách s cílem shrnout všechny informace do formy první verze úvodního projektu. Tato oblast VaV zahrnuje především následující činnosti:

- identifikace a shrnutí projektových požadavků na hlubinné úložiště (Design Basis, Design Requirments) v souladu s požadavky vyhlášky č. 329/2017 Sb. - tato etapa bude koordinována v rámci přípravy systému řízení požadavků tak, aby projektové požadavky a předpoklady zahrnovaly všechny skutečnosti podmiňující projektování hlubinného úložiště, legislativní požadavky a doporučení mezinárodních organizací,
- návrh možných technických řešení,
- teplotní dimenzování úložiště pro specifické podmínky vybrané lokality pro různé uspořádání úložiště,
- řešení transportu odpadů od původců na úložiště,

- řešení přeložení VJP ze skladovacích a přepravních obalových souborů do ukládacích obalových souborů,
- koncepční návrh manipulačních technologií pro umístění UOS s VJP do úložných vrtů,
- alternativní řešení výběru (lokalizace) a uspořádání povrchové části úložiště,
- syntéza a zhodnocení ukládacích systémů z hlediska proveditelnosti a nákladů (vyžaduje podklady z etapy z řešení inženýrských bariér) zahrnující jak různé uspořádání úložiště (vertikální, horizontální), tak i různé varianty inženýrských bariér,
- výběr a zdůvodnění referenčního úložného systému pro následující období.

Cílem prací v tomto období, zhruba do roku 2024, je ohodnotit možné ukládací koncepty hlubinného úložiště a vybrat na základě multikriteriální analýzy referenční řešení na koncepční úrovni nejvhodnější pro horninové prostředí ČR. Předpokládáme, že toto referenční řešení bude dostatečně flexibilní pro úpravy zohledňující specifické podmínky finální lokality s cílem zajistit maximální jadernou bezpečnost a radiační ochranu ve všech fázích životního cyklu hlubinného úložiště.

Navržené ukládací varianty budou hodnoceny podle následujících kritérií:

- 1) bezpečnost navrženého úložného konceptu pro vybranou lokalitu – důležitá je robustnost navrženého systému dokládající odolnosti proti projektovým i nadprojektovým událostem (viz podrobněji Kap. 15 až 17),
- 2) proveditelnost navrženého ukládacího konceptu,
- 3) náklady.

Součástí vývoje projektového řešení jsou i následující oblasti, které jsou vzhledem k jejich velkému rozsahu popsány zvlášť:

- výzkum a vývoj UOS a souvisejících technologií (kapitola 11),
- výzkum a vývoj výplní ukládacích vrtů a tunelů a souvisejících technologií (kapitola 12),
- výzkum a vývoj ostatních inženýrských komponent (kapitola 13),
- výzkum ražebních postupů výstavby úložiště a souvisejících prací (kapitola 14).

11 Výzkum a vývoj ukládacích obalových souborů a souvisejících technologií

11.1 Ukládací obalový soubor pro VJP

11.1.1 Úvod

Primární fyzickou bariérou pro zadržení radionuklidů v hlubinném úložišti jsou ukládací obalové soubory (UOS), které

- 1) zajišťují prakticky úplnou izolaci² radionuklidů po dobu 100 000 let³ tak, že žádný UOS nebude porušen v době vysoké aktivity štěpných a aktivačních produktů,
- 2) fyzikálně znemožňují vznik kritického a nadkritického stavu jak v době provozu, tak i po uzavření úložiště s uvážením všech vlastností, jevů, procesů a událostí, které se mohou vyskytnout.

Zajištění těchto bezpečnostních funkcí UOS je zabezpečeno vhodnou konstrukcí UOS a výběrem vysoce korozivzdorných materiálů s vysokou mechanickou pevností odolávajícím hydrostatickému tlaku podzemní vody, bobtnacímu tlaku bentonitu obklopujícího UOS a případným pohybům horninových bloků. Vhodná konstrukce UOS zároveň musí zajistit, aby VJP vznikajícím teplem a dávkovým příkonem neohrozilo jak bezpečnostní funkce samotného UOS, tak i ostatních bariér úložiště.

Ve světě je rozpracováno několik koncepcí ukládacích obalových souborů VJP. Tyto koncepce jsou do značné míry závislé na výběru horninového prostředí. Nároky na UOS určené pro jílové prostředí jsou zpravidla menší než na UOS pro krystalinické prostředí, protože jíla tvoří hlavní bariéru proti úniku radionuklidů.

Jako vhodné materiály pro UOS byly v minulosti testovány různé typy kovových i nekovových materiálů. Jako referenční UOS byl ve švédském a finském konceptu, které jsou stejně jako český koncept v krystalinických horninách, vybrán UOS s měděným přebalem a pevnou litinovou vestavbou. Hlavním důvodem výběru mědi byla termodynamická stabilita mědi v redukčním prostředí bez přítomnosti sulfidů a sulfát redukujících bakterií. Litinová vestavba poskytuje potřebnou pevnost. Z důvodu odlišného prostředí krystalinických hornin v České republice, zejména menšího obsahu chloridů v podzemní vodě, a zároveň i z ekonomických důvodů, jsou v českém konceptu uvažovány UOS na bázi uhlíkové a korozivzdorné oceli, které by měly poskytnout dostatečnou izolaci VJP po požadovanou dobu.

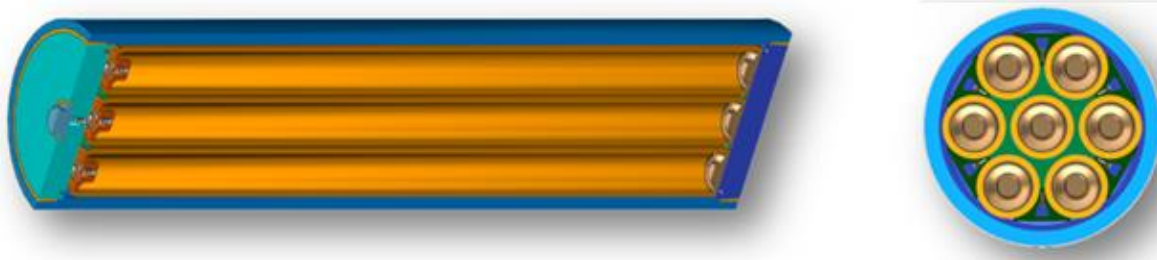
² Termín prakticky úplná izolace znamená, že pouze za velmi nepříznivých podmínek daných souběhem výjimečných událostí s velmi malou pravděpodobností může dojít k poškození jednotlivých UOS i před dobou 100 000 let.

³ Doba sto tisíc let byla vybrána na základě dokumentu švédského úřadu pro jadernou bezpečnost (SSMFS 2008:37), která doporučuje provádět analýzu po dobu 100 000 let či do první doby ledové. Tato doba vychází rovněž z faktu, že po sto tisících letech hlavní nebezpečí pochází převážně z mobilního ¹²⁹I, jeho poločas přeměny (15 milionů let) výrazně převyšuje dobu 1 miliónu let uvažovanou jako maximální pro provádění modelových výpočtů.

11.1.2 Provedené práce

Výzkumu UOS byla v českém programu přípravy HÚ věnována velká pozornost již od roku 1995, kdy byl navržen první koncept UOS ve Škoda JS a.s. Tento UOS měl vnitřní tenkostěnné pouzdro (5 mm) z korozivzdorné oceli a vnější přebal z uhlíkové oceli (6 cm). Tento koncept se však ukázal jako málo vhodný zejména z důvodu malé mechanické pevnosti tenkostěnného pouzdra z korozivzdorné oceli, které by mohlo být poškozeno ihned po poškození přebalu hydrostatickým tlakem a bobtnacím tlakem bentonitu. Proto byl v roce 2013 iniciován rozsáhlý výzkumný projekt na výzkum a vývoj UOS. V rámci projektu Kotnour et al. (2019) bylo vypracováno 12 variant řešení pro uložení palivových souborů z reaktoru VVER 440 a jedna srovnávací varianta pro palivo z VVER 1000 s využitím různých materiálů (oceli, mědi, titanu).

Na Obr. 14 je návrh jedné z variant konceptu pro typ paliva VVER 440. V této variantě je pro každý palivový soubor navrženo samostatné vnitřní pouzdro z korozivzdorné oceli (typ 1.4404), která má jak funkci zajišťující korozivzdornost, tak i mechanickou pevnost.



Obr. 14: Ukládací obalový soubor je tvořen vnějším obalem z uhlíkové oceli, sedmi nerezovými vnitřními pouzdry a vestavbou zajišťující vzájemnou polohu vnitřních pouzder. Tato varianta je určena pro vyhořelé palivové soubory z VVER 440.

Pro vnější obal byla navržena ocel X65MS. Jedná se o uhlíkovou ocel, která má řízený obsah prvků nepříznivě ovlivňujících korozi (síra a fosfor) a zároveň vyšší hodnoty mechanické pevnosti. Ze zprávy Dobrev et al. (2018b), která shrnovala nejenom výsledky zmíněného projektu, ale i výsledky prací probíhajících v rámci projektu *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště* (SÚRAO, SO2014-061), vyplývají následující závěry pro další výzkumné práce.

Pro korozivzdornou ocel je nutné zajistit podmínky, aby teplota po ztrátě funkčnosti vnějšího pouzdra byla nižší než kritická teplota, která je zatím experimentálně ověřena pro hodnotu 40 °C. Při teplotě nižší, než je kritická teplota, je u korozivzdorné oceli zaručena zvýšená odolnost vůči korozi. Dále musí být okolní prostředí anaerobní a bez vyšší koncentrace chloridů, které by se mohly při vyšších teplotách akumulovat na povrchu UOS. Důležitý závěr z experimentů je, že už při teplotách nad 70 °C bylo prokázáno bodové napadení oceli.

U varianty s měděným nástřikem vnějšího obalu má vliv na poškození UOS mikrobiální koroze a ionizující záření. Ve zprávě Dobrev et al. (2018b) je prezentováno lokální napadení měděného nástřiku již po dvou letech, kdy byl vzorek umístěn v hornině v anaerobním prostředí a obklopen bentonitem, toto pozorování bude ověřeno v následujících letech na dalších vzorcích. U mědi je také technicky více náročné svařování víka a zaručení těsnosti a mechanické odolnosti UOS.

U titanové slitiny představuje největší nejistotu přítomnost bludných proudů, které by mohly způsobit navodíkování titanové slitiny. Pokud by se přítomnost bludných proudů v budoucnu nepotvrdila, je titanová slitina z hlediska korozní odolnosti potenciálně vhodný materiál pro vnější obal UOS.

Významné poznatky byly získány v rámci mezinárodního projektu MACOTE probíhajícího v podzemní laboratoři Grimsel, kde byly umístěny vzorky uhlíkové oceli i mědi. Na všech vzorcích uhlíkové oceli i mědi byla pozorována lokální koroze. Z projektu jasně plyne potřeba provádět experimenty v reálném prostředí podzemních laboratoří za zvýšené teploty.

V rámci projektu *Výzkumná podpora hodnocení bezpečnosti HÚ* bylo řešeno i možné použití alternativního výplňového materiálu na bázi cementu či směsi cementu a bentonitu kolem UOS, které by udržovaly zejména v době zvýšené teploty a zvýšeného dávkového příkonu vysoké pH udržující ocel v pasivním stavu. Tento typ UOS by při prokázání toho, že nedojde k lokální korozi, mohl poskytnout podstatně delší ochranu než koncept UOS bez přítomnosti cementu. Výsledky jsou uvedeny ve zprávě Dobrev et al. (2019).

Největší nejistotu celého procesu stanovení životnosti UOS představují počáteční podmínky, mezi které patří aerobní prostředí, vyšší teplota či radiační zátěž materiálu. Ukládací obalový soubor musí být navržen i s ohledem na manipulace v horké komoře, kde je potřeba provést hermetické utěsnění víka už s naloženým VJP. Předpokládaný počet UOS je 7 600 ks. Nebude se tedy jednat o kusovou výrobu, ale sériovou výrobu, a tomu musí také odpovídat návrh UOS.

11.1.3 Plánované práce

- Na základě výsledků projektu Kotnour et al. (2019) byla zatím vybrána jako referenční varianta dvouvrstvý UOS na bázi jednoho pouzdra z korozivzdorné oceli pro každý palivový soubor a vnějšího obalu z uhlíkové oceli (viz Obr. 14) a varianta jednoho pouzdra z korozivzdorné oceli pro všechny obalové soubory určené pro jeden UOS a vnějšího obalu z uhlíkové oceli. Přesto je stále třeba sledovat vývoj obalových souborů ve světě a mít připravený záložní koncept UOS pro případ, že nebudeme schopni prokázat dlouhodobou bezpečnost navrhované varianty. Jeden z těchto konceptů je celoměděný kontejner, který je schválen ve Finsku a Švédsku a vyhovoval by i horninovému prostředí v ČR. Dalším možným typem UOS je již výše zmíněný UOS navržený v Belgii a založený na ochraně vnějšího přebalu UOS z uhlíkové oceli pasivací povrchu ochrannou vrstvou z cementu (Poyet et al. 2006).

V následujícím výzkumu UOS je nutné potvrdit rozsáhlým výzkumným programem pro vybrané materiály korozní odolnost v prostředí hlubinného úložiště za různých podmínek, které se mohou vyskytnout v úložišti po dobu statisíců let a specifikovat podmínky výplně vrtů obklopující UOS.

Testování vybraných materiálů musí probíhat nejen v laboratořích, ale i v reálném prostředí. Je plánováno pokračovat jak s experimenty v podzemní laboratoři Grimsel, tak zahájit experimenty na podzemním pracovišti PVP Bukov, v podmínkách dlouhodobě stálých a bližších předpokládaným podmínkám v hlubinném úložišti. Pozornost bude zaměřena na možnost dlouhodobé predikce a schopnost modelovat tyto procesy. V dlouhodobých experimentech je třeba sledovat současný vliv různých podmínek, kdy některé procesy se mohou vzájemným působením potlačovat, jiné naopak urychlovat.

Při vývoji UOS a analýze různých návrhů řešení se musí neustále vycházet z aktualizovaných údajů o VJP, o stavu skladovacích obalových souborů, o záměrech ČEZ o nakládání s poškozenými palivovými soubory, o době skladování VJP a o plánovaných nových zdrojích. Po celou dobu vývoje UOS je třeba spolupracovat s provozovateli jaderných elektráren a ověřovat si reálná data a reagovat na všechny případné změny.

V rámci vývoje UOS je třeba se již v začátku zabývat možnostmi manipulace. Pro manipulace s UOS se vzhledem k rozsahu HÚ a jeho geometrického uspořádání předpokládá rozpracování manipulací ve více fázích, resp. s ohledem na část procesu manipulace. Zvláštní pozornost bude věnována činnostem v HK, která je v normálním režimu nepřístupná.

Pozornost bude zaměřena též na automatizaci systémů a různé úrovně kontroly funkčnosti a bezpečnosti procesů.

Technologické prostředky pro práce s dalšími inženýrskými bariérami (IB) budou závislé na vybraných materiálech a formě uložení a provedení jednotlivých částí IB. V zásadě se jedná o využití existujících technologických celků, případně řešení jejich úprav a možnosti plně automatizovaných činností. Součástí vývoje bude i příprava souvisejících řídicích a kontrolních systémů a postupů s provozním ověřováním a zkoušením funkčnosti.

V příštím období je třeba se především zaměřit na:

- 1) aktualizace požadavků na UOS (bude zahrnuto do souhrnu požadavků zpracovávaného v systému řízení požadavků),
- 2) identifikace a zhodnocení možných alternativních typů UOS navrhovaných v zahraničních programech (švédský, finský, belgický),
- 3) zahájení dlouhodobého laboratorního a in-situ programu pro vybrané materiály a stanovení distribuce poškození UOS v hlubinném úložišti,
- 4) průběžné zhodnocení analýz a laboratorních a in-situ experimentů,
- 5) výběr a zdůvodnění vybraných UOS pro syntézu úložného systému.

Dílní výstupy pro splnění výše uvedených cílů jsou:

- vybudovat databázi korozních experimentů. Přehledně shrnout provedené experimenty, za jakých podmínek se uskutečnily a s jakými výsledky. Provést jejich analýzu a navrhnout sadu experimentů, které by ověřily, případně doplnily závěry získané z uskutečněných projektů,
- pokračovat s experimenty v podzemní laboratoři v Grimselu,
- připravit a zahájit experimenty v PVP Bukov pro vybrané vzorky zahrnující uhlíkovou ocel, korozivzdornou ocel a pro srovnání i měď využívanou ve švédském a finském konceptu,
- stanovení kritické teploty pro korozivzdornou ocel. Kritická teplota je teplota, pro kterou je u ocele zaručena zvýšená odolnost vůči korozi. Je to důležitý parametr, který ovlivní nejen návrh UOS, ale i návrh vlastního HÚ. Hodnota kritické teploty musí být prokázána řadou dlouhodobých korozních experimentů,
- ověření možnosti příznivého ovlivnění korozní odolnosti UOS použitím alternativních výplňových materiálů na bázi cementu či kombinace cementu a bentonitu (zde je třeba úzce spolupracovat s projektem zaměřeným na vývoj výplňových materiálů – viz Kap. 12),

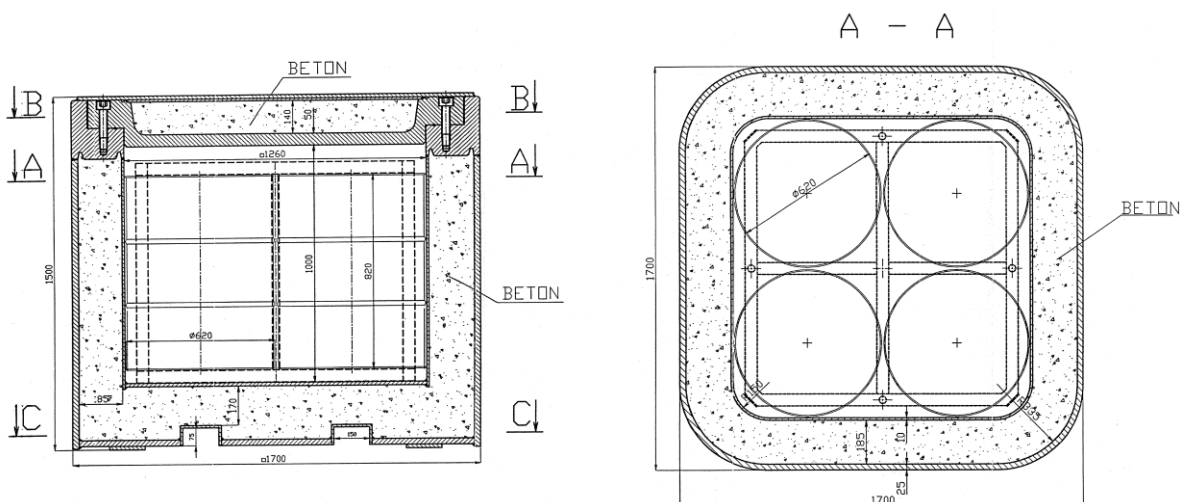
- prověřit proveditelnost, podkritičnost za všech podmínek úložiště a náklady spojené s výrobou navržených UOS,
- navrhnout způsob manipulačních technologií s UOS zahrnující i technologie pro transport UOS ze skladů VJP do HÚ či vnitrostátní přepravu,
- průběžná spolupráce s provozovatelem jaderných elektráren. Plánované nakládání s VJP v HÚ vycházejí z podkladů a strategie provozovatele jaderné elektrárny. Teplotnické výpočty, stanovení zdrojového členu nebo např. manipulace v horké komoře musí reagovat na to, jaká bude skutečná doba skladování VJP, jaké bude skutečné vyhoření a jak bude nakládáno s poškozenými PS, zda budou posílány k přepracování nebo budou mít vlastní speciální obalové soubory.

11.2 Výzkum a vývoj ukládacích obalových souborů pro VAO a SAO

11.2.1 Provedené práce

VAO a SAO zejména z vyřazování jaderných elektráren budou ukládány separátně do vyražených kaveren ve schválených typech UOS. Jeden z možných typů UOS, tzv. betonkontejner, byl navržen v Referenčním projektu v roce 1999 (Holub et al. 1999). Předpokládá se, že tyto UOS budou sloužit nejen jako ukládací, ale i přepravní soubory. Vývoj UOS pro NAO a SAO, který je nepřijatelný pro uložení do přípovrchových úložišť, musí probíhat ve spolupráci s dodavateli. SÚRAO musí navrhnout podmínky pro přijatelnost těchto UOS do úložiště.

Betonkontejner (viz Obr. 15) byl navržen z vnějšího a vnitřního pláště z ocelových plechů tloušťky 10 mm se zavařeným vnitřním a vnějším dnem o tloušťce 15 mm. V horní části jsou tyto pláště přivařeny k hornímu přírubovému prstenci. Prostor mezi vnitřním a vnějším pláštěm je vyplněn betonem. UOS bude zakryt příšroubovaným víkem, které je odlito ze stejné oceli jako přírubový prsteneček. Ve spodním dnu jsou vytvořeny obdélníkové podélné otvory, které slouží k překládání obalového souboru v chodbách HÚ. Povrch betonkontejneru je opatřen ZnAl nástřikem (Holub et al. 1999).



Obr. 15: Náčrtek betonkontejneru a umístění 4 sudů s RAO

11.2.2 Plánované práce

Otázka výzkumu a vývoje kontejnerů pro VAO a SAO nebyla zatím v rámci projektu přípravy hlubinného úložiště do této doby samostatně a podrobně zpracována. V současné době tak bude prioritou především navrhnout ucelený koncept ukládání ostatních RAO v HÚ tak, aby byly zohledněny současné poznatky a vývoj v oblasti nakládání RAO a dříve zpracované studie v rámci Referenčních projektů (Holub et al. 1999, Pospíšková et al. 2011) a projektu *Výzkumná podpora pro projektové řešení hlubinného úložiště* (SÚRAO, SO2016-017).

Vývoj v následujícím období bude zaměřen především na:

- 1) rešeršní studie pro zmapování přístupu k ukládání ostatních RAO v ostatních zemích se zvláštním důrazem na státy EU. Je zde třeba zahrnout jak formu UOS, tak i design úložiště, jeho výstavbu a manipulace s odpadem,
- 2) definování požadavků na UOS pro NAO a SAO, a to nejen z hlediska aktivity a vlastností odpadů, ale také očekávaného objemu (viz rovněž Kap. 8) ve formě podmínek přijatelnosti,
- 3) výběr možných typů UOS ve spolupráci s původci odpadů (je třeba i vytipovat UOS, které je možno zakoupit v zahraničí a zároveň analýza možnosti licencování v ČR),
- 4) přípravu a zahájení podrobného výzkumu a vývoje vybraných typů UOS.

Vzorky kandidátních materiálů pro obalový soubor by měly být průběžně podrobeny procesu řízeného stárnutí v laboratorních i později v in-situ podmínkách. Práce se zaměří na výzkum možných interakcí materiálů a možného vývinu plynů uvnitř OS.

11.3 Výzkum a vývoj UOS pro odpady z experimentálního reaktoru LVR 15

11.3.1 Úvod

Vyhořelé jaderné palivo vzniká rovněž provozem reaktoru LVR-15 provozovaného Centrem výzkumu Řež, s. r. o. Provozem ostatních výzkumných reaktorů LR-0 (Centrum výzkumu Řež, s. r. o.) a VR-1 (ČVUT FJFI) nevzniká vzhledem k jejich malému tepelnému výkonu a omezené době provozu vyhořelé jaderné palivo, pouze mírně ozářené, které po ukončení provozu reaktorů bude pravděpodobně recyklováno (použito na výrobu nového paliva) nebo s ním bude nakládáno jako s palivem vyhořelým (viz podrobněji Kap. 8). Část paliva s vyšším stupněm obohacení, která byla převezena do Ruské federace na přepracování, bude vrácena do ČR zhruba kolem roku 2030. Do této doby je třeba připravit vhodné obalové soubory jak pro jejich skladování, tak i případně jejich ukládání.

Pro zbylé palivo s menším obohacením bude rovněž třeba vyrobit skladovací a ukládací OS.

11.3.2 Provedené práce

Pro skladování je k dispozici 16 obalových souborů ŠKODA VPVR/M s celkovou kapacitou 576 ks PS. To s rezervou postačuje pro veškeré vzniklé VJP (požadovaná kapacita bude 8 OS).

11.3.3 Plánované práce

Je třeba ve spolupráci s původci a SÚJB:

- 1) identifikovat požadavky na UOS pro vitrifikát a VJP z LVR-15 ve formě podmínek přijatelnosti do hlubinného úložiště,
- 2) navrhnout vhodné OS pro ukládání a případně skladování (víceúčelové obalové soubory vhodné jak pro skladování, tak i ukládání),
- 3) připravit zadávací dokumentaci pro vývoj UOS pro vitrifikát a VJP z LVR-15.

12 Výzkum a vývoj výplní ukládacích vrtů a ukládacích tunelů

12.1 Úvod

Výplně ukládacích vrtů jsou inženýrskou bariérou, která má tlumicí a těsnicí funkci (používá se pro ni rovněž anglický termín buffer, který je v této problematice zavedeným termínem, a proto bude v textu dále použit). Výplně ukládacích tunelů představují další významný bezpečnostní prvek hlubinného úložiště (v angličtině je používán název backfill).

Především buffer brání kontaktu UOS, který v úložišti plní primární bezpečnostní funkci kategorie II. v souladu s vyhláškou § 8 odst. 1 vyhlášky č. 329/2017 Sb., s vodou a korozi-aktivními látkami horninového prostředí (chloridy, sulfidy) tak, že za normálního vývoje úložiště se jak podzemní voda, tak i koroziaktivní látky mohou dostat k UOS pouze velmi pomalou difúzí. Zároveň vysokou hustotou zabraňuje aktivitě mikrobů, a tím mikrobiální korozi UOS.

Hlavní funkcí výplně ukládacích tunelů (při vertikálním uspořádání) je zabránit pohybu bufferu tak, aby nedošlo k ohrožení jeho bezpečnostních funkcí.

Ostatní bezpečnostní funkce jak výplně ukládacích vrtů, tak i výplně ukládacích tunelů, je možno shrnout následovně:

- přispět k nízké mobilitě radionuklidů tak, že radionuklidy uvolněné z UOS po jeho poškození pouze velmi pomalu migrují do horninového prostředí,
- zabezpečovat spolu s vhodným uspořádáním úložiště a vhodnou hloubkou úložiště dostatečný odvod tepla tak, aby nebyla překročena teplota 100 °C, vyšší teploty mohou přispívat k rychlejší alteraci bariér úložiště a v současné době znesnadňují predikci vývoje bariér,
- zajišťovat mechanickou stabilitu UOS a celého úložiště.

Pro buffer byla ve švédském konceptu KBS-3 navržena hornina bentonit, která díky svým vlastnostem (geomechanickým a chemickým) vyplní i případné technologické spáry a celé místo dostatečně utěsní (Savage et al. 1999). Tento materiál byl převzat i pro český referenční koncept.

Výplň ukládacích tunelů úložiště VJP je inženýrská bariéra, která nebude v přímém kontaktu s UOS, ale bude v přímém kontaktu s bufferem. Jako referenční materiál pro tento konstrukční prvek byl rovněž navržen bentonit či směs bentonitu a kameniva.

Materiál výplně komor pro ukládání ostatních RAO zatím nebyl v ČR řešen. V zahraničí (SKB, SFL) se uvažují dva typy materiálů, jednak cement pro ukládání kovových materiálů z vyřazování jaderných elektráren a bentonit pro ukládání ostatních odpadů.

12.1.1 Provedené práce

Výzkum v oblasti vývoje bufferu pro potřeby HÚ probíhá na SÚRAO již od roku 1999 a je směřován primárně k využití českých bentonitů. Nejprve se jednalo o izolované národní projekty, později se rozvinula mezinárodní spolupráce.

Požadavky pro buffer jsou v českém konceptu definovány jen obecně (jsou převzaty z požadavků SKB a Posiva – Posiva SKB Report 01, 2017). Číselné parametry a konkrétní hodnoty pro bezpečnostní hodnocení bentonitů jsou stále předmětem výzkumu a vývoje (Hausmannová et al. 2018).

Již ukončené experimenty si kladly za cíl vytipovat a popsat jílové suroviny vhodné pro HÚ (bentonity a montmorillonitické jíly české provenience). Studována byla především mineralogie, chemie a geotechnika. Jedním z významných cílů těchto projektů bylo verifikovat vybrané metodiky pro jednotlivá stanovení důležitých parametrů.

Po základní charakterizaci bentonitů a montmorillonitických jílů se experimenty zaměřily také na interakce materiálů relevantních pro HÚ a výstavbu fyzikálního modelu bufferu (Mock-Up CZ).

Na základě dat získaných z uvedených experimentů byla naplánována další experimentální fáze, která se podrobněji věnuje studiu interakcí materiálů v prostředí HÚ, matematickému modelování, výstavbě a demonstraci v in-situ prostředí. Podrobnější informace o jednotlivých projektech jsou uvedeny ve zprávě Hausmannová et al. (2018).

Probíhající experimenty: Mock-Up Josef (Šťástka 2014), DOPAS – EPSP (Hanusová et al. 2016), CEBAMA (CEBAMA D4.11), BEACON (Haiquan et al. 2019), Interakční experiment (Svoboda et al. 2019) atd., se zaměřují na detailní studium klíčových parametrů vybraných českých bentonitů: B75, BAM a BCV.

Osm probíhajících projektů se věnuje materiálovým interakcím (bentonit/hornina, bentonit/UOS a bentonit/beton). Nově probíhají experimenty zaměřené na mikrobiální aktivitu a plynopropustnost.

Od experimentů v menším měřítku (v laboratorním prostředí) se výzkum přesunul také do prostředí reálného horninového masivu v podzemních laboratořích (URC Josef, PVP Bukov, Grimsel Test Site apod.).

Od roku 2019 probíhají také 3 projekty zaměřené na stabilitu českého bentonitu za teplot nad 100 °C (HotBent, Hot Mock-Up TAČR a EURAD HITEC). Vlastnosti bentonitu důležité pro HÚ (např. propustnost, bobtnací schopnosti, plasticita, alterační stabilita, schopnost sorpce) jsou velice dobře charakterizované pro teploty pod 100 °C. Nad 100 °C může být chování bentonitu v prostředí HÚ jiné než pod touto teplotní hranicí. Může především docházet k degradaci bentonitu (ke zhoršení jeho fyzikálně-chemických vlastností) nebo k alteračním pochodům (transformaci jednotlivých minerálních fází). Přestože většina konceptů počítá s nepřekročením hranice 100 °C, je důležité znát chování bentonitových materiálů i nad 100 °C. Je to klíčové zejm. pro porozumění chování materiálů na rozhraních: bentonit/kontejner, bentonit/horninové prostředí. Znalost chování bentonitu za zvýšených teplot – nad 100 °C (kdy je v systému přítomna vodní pára) je také důležité pro možnou optimalizaci HÚ se zachováním všech bezpečnostních funkcí inženýrských bariér.

Ze stávajícího výzkumu (Červinka et al. 2017, Červinka et al. 2018 a TAČR Inženýrská bariéra 200 °C) je zřejmé, že české bentonity obsahují vyšší procento akcesorických minerálů (nad 5 hm. %). Jedná se zejména o oxidy a oxohydroxidy Fe (popř. Fe-karbonáty). Stabilita těchto minerálů a interakce s dalšími materiály není zatím dostatečně popsána.

Projekty konkrétně zaměřené na výzkum materiálu pro potřeby výplní ukládacích tunelů byly řešeny pouze dva (v rozmezí let 2007–2012): *Technologie stříkaných výplní* a *Výzkum možnosti využití stříkaného bentonitu pro konstrukci těsnicí vrstvy hlubinného úložiště*. Pomocí těchto projektů byla technologie stříkaného bentonitu ověřena, ale pro její využití v reálném měřítku by musela být optimalizována. Výzkum byl také zaměřen i na možnost výroby bentonitových pelet z českých typů bentonitu (Pacovský et al. 2018, Obr. 16).

V současnosti je dokončen projekt *Ekonomická rozvaha – bentonit pro české hlubinné úložiště radioaktivního odpadu*, jehož cílem je zhodnocení zásob a ceny bentonitu jak na domácím, tak i zahraničním trhu.



Obr. 16: Materiál bentonitových pelet M 182 VZK IV 0-8 ze závěrečné zkoušky lisování (Pacovský et al. 2018)

12.1.2 Plánované práce

12.1.2.1 Výplně ukládacích vrtů a tunelů VJP

Cílem prací následujícího období je především:

1. identifikace a shrnutí bezpečnostních a projektových požadavků pro výplně ukládacích vrtů a tunelů do formy předběžné technické specifikace,
2. výzkumné práce pro výběr výplňových materiálů, zejména zhodnocení a srovnání českých typů bentonitů s vybranými zahraničními materiály⁴,
3. zhodnocení možné varianty výplňových materiálů a zdůvodnění výběru nejvhodnějších výplňových materiálů a jejich formy (lisované tvárnice, pelety či kombinace) pro výplně

⁴ Výzkumné práce budou koordinovány s výsledky již probíhajících tuzemských a zahraničních projektů popsaných dále v textu.

jak ukládacích vrtů, tak tunelů na základě analýzy tuzemských a zahraničních poznatků.

Zároveň bude probíhat analýza běžících experimentů jak domácích, tak i zahraničních, které významně přispějí k výběru vhodných materiálů pro český koncept. Jde zejména o následující projekty:

- Mock-Up Josef (SÚRAO projekt),
- Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov (SÚRAO projekt),
- Ekonomická rozvaha – bentonit pro české hlubinné úložiště radioaktivního odpadu (SÚRAO projekt),
- Inženýrská bariéra 200 °C (TAČR, SÚRAO aplikačním garantem),
- Limitní faktory pro přežití a proliferaci mikrobiálních společenstev, významných pro korozi bariér hlubinného úložiště radioaktivního odpadu (TAČR, SÚRAO aplikačním garantem),
- HotBent (mezinárodní projekt koordinovaný švýcarskou NAGRA),
- BEACON (EU projekt),
- EURAD HITEC (EU projekt),
- EURAD GAS (EU projekt),
- EURAD ACED (EU projekt).

Po výběru materiálů bude následovat jejich testování při simulaci podmínek HÚ, pro tuto fázi bude nutné znát již data z hloubek vybraných lokalit. Nejprve budou provedeny laboratorní testy v menším a středním měřítku, pokud se v rámci těchto testů materiál osvědčí, budou následovat testy in-situ v delších časových horizontech. Většina testů (in-situ i laboratorních) bude muset být provedena jak na samotném materiálu bufferu, tak i pro kombinaci buffer a UOS (společně s aktivitami popsány v Kap. 11). Současně se budou upřesňovat požadavky na buffer a výplně tunelů dle nových dat a znalostí.

Společně s materiálovým výzkumem budou probíhat práce na výběru formy materiálů (pelety, tvárnice, kombinace), velikosti komponent (nutná šířka bufferu mezi horninou a UOS) a technologií přípravy a instalace.

Celý proces návrhu bufferu bude završen demonstračními experimenty v podzemní laboratoři, kde bude ověřeno chování celého systému v reálném prostředí a měřítku.

Dílčí cíle pro výplně ukládacích vrtů a ukládacích tunelů budou v následujícím období zaměřeny na:

- metodiky testování bentonitu (rešerše a doporučení vhodných metodik) – v současnosti již máme zkušenosti s testováním bentonitu, metodik pro vyhodnocení jednoho parametru je v mnoha případech více a hodnoty jsou poté neporovnatelné. Proto vznikne zpráva, která shrne metodiky (pro relevantní parametry), jejich výhody a nevýhody a možné porovnání. Cílem bude výběr metodik, které jsou z pohledu SÚRAO nejvhodnější,
- popis matematických modelů využívaných pro predikci vývoje vlastností výplňových materiálů – výstupem bude zpráva, kde budou shrnuty a popsány všechny dostupné modely a zároveň budou identifikovány modely, které nejsou k dispozici a vyžadují další vývoj,

- příprava tvorby databáze pro data z předchozího a budoucího výzkumu českých bentonitů – pro efektivnější využití dat je nutná databáze,
- porovnání českých a zahraničních bentonitů – výstupy z bodu d) budou využity pro porovnání českých a zahraničních bentonitů,
- doměření potřebných dat – z analýzy všech dosud naměřených dat (bod e) budou zřejmá i chybějící data (např. nedostatečně velké soubory dat využitelné i pro statistické vyhodnocení hodnot daných parametrů), která bude nutné získat pomocí doplňkových měření,
- rešerše technických řešení bufferu a backfillu a zhodnocení variant – rešerše zahraničních zkušeností jak z materiálového hlediska, tak i z hlediska dimenzování a tvarů. Výsledkem bude návrh základního technického řešení bufferu a backfillu a také případné alternativy, které budou dále rozvíjeny,
- vliv mikrobiální aktivity na české bentonity – tato problematika si vyžaduje zvýšenou pozornost. Je nutné ověřit, jestli vyšší množství železa v českých bentonitech nezapříčiní nepříjemné zhoršení vlastností bentonitu mikrobiální aktivitou. Nejprve bude provedena rešerše všech dostupných informací, na základě které bude naplánován experiment, který maximalizuje mikrobiální aktivitu v českém bentonitu a ověří míru jeho ovlivnění (tato část bude řešena společně s plánovanými aktivitami výzkumu a vývoje UOS – viz Kap. 11.1),
- demontáž stávajících experimentů a analýza výsledků:
 - plán demontáže in-situ experimentu Mock-Up Josef – v současnosti běží in-situ experiment Mock-Up Josef, který má být ukončen na konci roku 2020 (pokud nevyvstanou zásadní důvody pro jeho prodloužení). Plán demontáže musí být detailně připraven před ukončením experimentu, aby nedošlo ke ztrátě důležitých dat,
 - demontáž in-situ experimentu Mock-Up Josef a analýza vzorků – zhodnocení stability českého bentonitu,
 - plán demontáže in-situ Interakčního experimentu v PVP Bukov - v současnosti běží tento in-situ experiment, který má být ukončen na konci roku 2022 (pokud nevyvstanou zásadní důvody pro jeho prodloužení). Plán demontáže musí být detailně připraven před ukončením experimentu, aby nedošlo ke ztrátě důležitých dat,
 - demontáž in-situ Interakčního experimentu v PVP Bukov a analýza všech relevantních vzorků – zhodnocení míry interakce studovaných materiálů a vliv interakce na tyto materiály.

12.1.2.2 Výplně ukládacích prostor úložiště VAO a SAO

Problematika výplní ukládacích tunelů či ukládacích kaveren pro ostatní RAO nebyla do této doby komplexně řešena. Jelikož se předpokládá užití českých bentonitů, tak se bude většina prací překrývat s aktivitami popsány v předchozí kapitole 12.1.2.1.

V návaznosti na plánovaný vývoj celého ukládacího systému ostatních VAO a SAO je nyní potřeba zpracovat:

- rešerši pro materiály výplní (beton, bentonit, směsi bentonit-hornina atd.),
- podrobněji definovat požadavky na výplně ukládacích prostor VAO a SAO,

- připravit VaV plán pro výplně ukládacích prostor a související technologie pro VAO a SAO a zahájit výzkumné práce.

13 Výzkum a vývoj ostatních inženýrských komponent hlubinného úložiště (výplně, zátky, injektáže a ostatní konstrukční prvky)

13.1 Úvod

Systém výplní ukládacích vrtů a tunelů je třeba doplnit mnoha dalšími komponenty, které budou mít rozdílné funkce v závislosti na požadavcích na ně kladených a jejich umístění. Jde o komponenty, které zpravidla nepředstavují primární fyzickou bezpečnostní bariéru, ale jejich interakce s primárními bariérami může ovlivnit bezpečnostní funkce primárních bariér. Například beton, který má typicky vysoké pH, může urychlit degradaci bentonitu chránícího UOS.

Velmi důležité jsou především zátky vrtů či tunelů, které jsou navrženy tak, aby provozně oddělily již zaplněné části úložiště od těch provozovaných, a tím je bezpečně uzavřely. Významné jsou i výplně ostatních prostor úložiště (chodeb, vrtů, obslužných prostor atd.), které mohou tvořit preferenční cesty pro migraci radionuklidů. Výzkum a vývoj ostatních výplní a těsnění inženýrských komponent slouží primárně pro proces uzavírání úložiště.

Pro budoucí výstavbu HÚ je také nutné se zabývat konkrétními konstrukčními materiály (betony) a prvky (např. výztuže a injektáže). Jedná se zejména o systém vyztužování a zajišťování podzemních prostor úložiště. Jde především o cementové materiály, které musí splňovat nejen požadavky z hlediska chemických a mechanických vlastností, ale také požadavky plynoucí z interakcí s dalšími materiály v HÚ.

Oblast konstrukčních systémů HÚ, která je v České republice studována od roku 1999 (Holub et al. 1999, Pospíšková et al. 2011), je primárně založena na zkušenostech v oblasti podzemního stavitelství.

Při realizaci HÚ je uvažováno o využití zejména ocelových kotev a cementových materiálů pro zajištění některých konstrukčních prvků, např. stříkaný beton pro primární ostění, betonáž počvy a těsnící cementové injektáže.

13.1.1 Provedené práce

Problematika ostatních inženýrských komponent, kromě problematiky zátek, které byly řešeny v rámci evropského projektu DOPAS zabývajících se technickým řešením zátek v hlubinných úložištích, nebyla řešena. V rámci projektu DOPAS vznikla v ČR experimentální těsnící zátka EPSP v in-situ prostředí štoly Josef. Tato zátka byla navržena ze stříkaného vláknobetonu se sníženým pH s bentonitovým těsněním uprostřed. Zátka byla podrobena tlakovému zatížení a dlouhodobému monitoringu chování. Výsledky z tohoto stále provozovaného experimentu zatím nebyly implementovány do aktuálního projektového řešení HÚ.

V této souvislosti byl v roce 2014 zahájen v rámci projektu DOPAS (Dvořáková et al. 2014) výzkum využití Low pH betonu, na který později navázal samostatný projekt *Vývoj betonu se sníženým pH* (Pernicová et al. 2019). Směs pro litý beton byla již vyvinuta s pH nižším než 11 a pevností srovnatelnou s běžně používaným stavebním betonem s CEM 42,5 (viz Pernicová

et al. 2019). Beton vyvinutý pro nástřik je ve fázi testování, výsledky by měly být dostupné na začátku roku 2020.

13.1.2 Plánované práce

V oblasti výzkumu a vývoje ostatních inženýrských komponent je zejména potřeba:

- 1) definovat základní požadavky a kritéria na materiály (bentonit, směs bentonitu a kameniva, písku, případně jiné) v závislosti na funkci komponenty. Funkce výplně se bude lišit dle charakteru a umístění (přístupové tunely, obslužné chodby, zázemí, jámy, průzkumné vrtů atd.). Při navrhování výplňových směsí ostatních prostor je nutné se zabývat možnou interakcí výplňových materiálů,
- 2) navrhnout technické řešení všech ostatních inženýrských a konstrukčních prvků úložiště s případnými alternativami a na jejich základě navrhnout konkrétní plán výzkumu a navrhnout koncepci systému uzavírání – zátek zaplněných komor a zpracovat do aktuálního projektového řešení HÚ,
- 3) připravit a zahájit podrobný výzkumný program pro výzkum a vývoj ostatních inženýrských komponent a konstrukčních materiálů zejména s ohledem na možnost interakce s inženýrskými bariérami, jejich proveditelnost a náklady.

Pro splnění těchto cílů bude třeba dále:

- v oblasti výplně a uzavírání HÚ realizovat detailní charakterizace vybraných materiálů a bude stanoven referenční materiál pro tyto systémy s ohledem na jejich funkci a umístění v HÚ, dále bude řešena interakce těchto materiálů v návaznosti především na výzkum výplně ukládacích vrtů a tunelů,
- v oblasti řešení zátek budou nejprve definovány typy zátek plánovaných v HÚ, zároveň bude vytipováno jejich umístění a stanoveny základní požadavky na jejich funkci. Dále pak budou zohledněny a zpracovány výsledky projektu DOPAS a realizace zátky EPSP do projektového řešení HÚ. V dlouhodobém horizontu bude zpracován podrobný systém zátek do projektového řešení HÚ v závislosti na konkrétním typu zátky a její funkci. Bude realizována demontáž experimentu EPSP zaměřený především na chování konstrukce zátky dlouhodobě zatížené tlakem a působením vody,
- výzkum a vývoj konstrukčních systémů pro stavbu HÚ bude zaměřen zejména na betonové prvky, výztuže a injektáže, na něž jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska možné vzájemné interakce použitých materiálů s inženýrskými bariérami a jejichž bezpečnostní funkcí je především bezpečný provoz úložiště,
- konstrukční systémy hlubinného úložiště budou v následujícím období vybrány s ohledem na jejich funkci (konstrukční prvek, injektáž atd.) a především dle jejich materiálového složení. Na základě toho budou definována rizika (např. pro interakce materiálů) pro dlouhodobou bezpečnost,
- v oblasti cementových materiálů je v dlouhodobém horizontu třeba definovat a vyvinout cementové materiály, případně směsi, které budou finálně použity v hlubinném úložišti, ať už jako konstrukční materiály, materiály inženýrské bariéry (obalový soubor pro VAO) nebo matrice pro vybrané typy RAO,

- bude realizována detailní charakterizace vybraných cementových materiálů (mineralogie, mikrostruktura, chemismus atd.) a stanoven referenční cementový materiál pro konstrukční systémy (beton, Low pH beton atd.). V tomto musí být zohledněna také interakce materiálů konstrukčních prvků s ostatními materiály v HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti,
- dále je nutné řešit problém degradace těchto materiálů, zejména změnu mechanických vlastností betonu v čase v prostředí HÚ,
- celý proces návrhu těchto materiálů je třeba završit demonstračními experimenty v podzemní laboratoři, kde bude ověřeno chování těchto materiálů v reálném prostředí a měřítku,
- degradace betonu v prostředí HÚ – řízené stárnutí vzorků cementových materiálů. V rámci tohoto projektu budou testovány již připravené vzorky low pH betonu umístěné v PVP Bukov a případně další konstrukční materiály.

14 Výzkum ražebních postupů výstavby úložiště a souvisejících prací

14.1 Úvod

Výzkumné činnosti v oblasti související s ražbou úložiště vycházejí z požadavku vyhlášky č. 378/2016 Sb., § 18. odst. 2) písm. p), požadujícím, aby výskyt změn v hostitelském a okolním geologickém prostředí vzniklých vrtnou a báňskou činností v průzkumné fázi umístování hlubinného úložiště nezpůsobil nové preferenční cesty pro migraci radioaktivních látek, a požadavku plynoucím z vyhlášky č. 329/2017 § 19, odst. 2, písm. a), aby byly zachovány původní vlastnosti geologického prostředí v nejvyšší míře při výstavbě úložiště.

Způsob ražby může ovlivnit jeden z velmi důležitých parametrů pro hodnocení bezpečnosti, což je možnost vzniku části hornin narušených (EdZ – Excavated Disturbed Zone) či poškozených (EDZ – Excavated Damaged Zone) razíciemi pracemi. S těmito pracemi souvisí i nakládání s rubaninou.

14.2 Provedené práce

Dosud byla tato oblast řešena jen okrajově v rámci aktualizace referenčních projektů v letech 1999, 2010 a 2018. O EdZ a EDZ se komplexně diskutuje ve zprávách SÚRAO (Vavro et al. 2016 a Staš et al. 2016).

14.3 Plánované práce

V oblasti ražeb budou provedeny:

- 1) rešeršní práce v oblasti technologií ražeb a souvisejících operací, optimalizace způsobu ražeb na základě zpracovaných variant řešení podzemní části. Především je nutné se zaměřit na technologie výstavby ukládacích míst pro UOS, v závislosti na požadovaných rozměrech, případně posouzení vhodnosti řešení pomocí stávajících technologií,
- 2) ověřování poškození horniny různými ražebními postupy,
- 3) studie nakládání s rubaninou.

Předpokládá ověření funkčnosti vyvinutých technologických prostředků pro ražby, manipulace, dopravu apod. v důlních podmínkách včetně funkčních zkoušek automatizovaných systémů řízení.

Oblast nakládání s rubaninou bude řešena v těsné závislosti na konkrétní lokalitě a prostorových možnostech jejího okolí. S ohledem na výsledky průzkumů – vlastnosti hornin a optimalizaci technologií ražeb bude zkoumáno i řešení optimálního využití rubaniny jak pro zpětné použití v HÚ pro výplňové a konstrukční systémy, tak i komerční využití přebytků. Cílem bude minimalizovat objemy určené k trvalému uložení, a tím dojde k minimalizaci nákladní dopravy v okolí lokality vlivem výstavby HÚ a zároveň nalezení vhodné lokalizace dočasné deponie pro zpětně využitelný materiál.

Pro monitoring a systémy kontroly a řízení budou ověřovány systémy bezdrátových komunikací.

15 Hodnocení provozní bezpečnosti

15.1 Provedené práce

Provozní bezpečnost, tj. bezpečnost klasická a radiační, je nedílnou součástí vývoje technologií, přepravy a manipulací s VJP a VAO či vývoje obalových souborů. Bezpečnost provozu a soulad s příslušnými předpisy bude nutno zajistit v potřebné úrovni vždy, a to bez ohledu na vybranou lokalitu v souladu s legislativními požadavky (zákon č. 263/2016 Sb., vyhláška č. 422/2016 Sb.). Bezpečnostní rozbor pro jednotlivé pracovní činnosti bude nutno provádět souběžně s vývojem dotčeného zařízení tak, aby výsledek bezpečnostního rozboru bylo možno zpětně promítnout do technického řešení. Projekt hlubinného úložiště je specifický tím, že v ukládacím horizontu úložiště bude probíhat současně jeho výstavba i ukládání. Z tohoto požadavku musí vycházet nejen přístup k hodnocení bezpečnosti, ale i následně přijatá potřebná technicko-organizační opatření.

Bezpečnostní hodnocení musí být provedeno jak pro normální provoz, tak i pro rozšířené projektové podmínky, které by mohly mít největší dopad na životní prostředí a obyvatelstvo. Bezpečnostní výpočty v případě rozšířených projektových podmínek (únik radionuklidů z UOS) se musí zpětně promítnout do návrhu konstrukce UOS i přijatého technického řešení (např. do řešení speciální vzduchotechniky horké komory). Základními předpoklady pro hodnocení bezpečnosti je podrobná znalost zdrojového členu, konkrétních manipulací s UOS a znalosti konstrukce UOS pro VJP a RAO, a dalších konstrukcí, komponent a struktur hlubinného úložiště. Vyhodnocování provozní bezpečnosti bude nutné provádět při změně nebo úpravě technického řešení, neboť tato změna technického řešení bude mít dopad do bezpečnostní dokumentace pro danou lokalitou.

V aktualizaci Referenčního projektu (Pospíšková et al. 2011) byly vyhodnoceny krizové scénáře uvolňování radionuklidů do životního prostředí a provedeny předběžné kvantitativní výpočty.

Byly uvažovány následující scénáře:

- nehoda během přepravy přepravního OS po areálu úložiště,
- nehody při zavážce VJP do UOS,
- nehody při přepravě UOS a superkontejneru do místa uložení.

V rámci výběru lokalit byly vypracovány studie provozní bezpečnosti pro všech 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ (Martinčík et al. 2018a-i).

Byly popsány scénáře úniků, popsány modely šíření radionuklidů, vytvořeny modely pro každou lokalitu, popsány podmínky (normální provoz a mimořádná situace) a scénáře šíření radionuklidů, včetně odhadu dopadů na zdraví obyvatelstva.

Veškeré práce týkající se provozní bezpečnosti je vždy třeba brát jako podpůrné ke zjištění stavu navrženého technického řešení, ale zároveň nutné k prokázání, že navržené technické řešení je realizovatelné a bezpečné.

Dostupné dokumenty z archivu SÚRAO, které se týkají dané problematiky, jsou uvedeny v (Holub et al. 1999, Pospíšková et al. 2011, Martinčík et al. 2018a-i).

15.2 Plánované práce

Návrh výzkumných a vývojových činností nelze v případě provozní bezpečnosti hodnotit bez reálného návrhu technologie, procesu či komponenty HÚ. Tato část proto bude úzce navazovat na projektové práce, zejména týkající se manipulací s odpady.

Tato činnost se zaměří zejména na:

- 1) shrnutí různých aspektů provozní bezpečnosti vybraných variant navržených úložných systému a souvisejících technologií,
- 2) bezpečnostní ohodnocení technologií navržených v projektových pracích (kapitola 10).

16 Hodnocení bezpečnosti přepravy obalových souborů s VJP

16.1 Provedené práce

V rámci projektu *Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ* byly vypracovány Studie vlivu na životní prostředí pro všech 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ (Marek et al. 2018a-g, Krajíček et al. 2018, Skořepa et al. 2018), kde na základě předpokládaného umístění povrchového areálu (PA) bylo řešeno jeho napojení na silniční a železniční síť, včetně uvažované přepravy VJP po železniční vlečce do areálu HÚ. Předpokládá se, že VJP budou do areálu HÚ převáženy v typově schválených přepravních obalových souborech na speciálních, pro tyto účely vyrobených vagoněch. V současnosti je VJP na JE Dukovany skladováno v obalových souborech CASTOR® 440/84 a CASTOR® 440/84M s typovým schválením B(U)F. Na JE Temelín je VJP skladováno v obalových souborech CASTOR® 1000/19 s typovým schválením rovněž B(U)F.

Ve všech studiích (Marek et al. 2018a-g, Krajíček et al. 2018, Skořepa et al. 2018) je ve formě „námetů směrového řešení“ řešeno napojení PA na stávající železniční síť.

16.2 Plánované práce

V návaznosti na projekt *Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ* a vypracované Studie vlivu na životní prostředí pro všech 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ (Marek et al. 2018 a-g, Krajíček et al. 2018, Skořepa et al. 2018) je nutné v dalším kroku projektu (po zúžení počtu lokalit na čtyři a dále na 2 (finální a záložní)) vypracovat:

- 1) studie variant proveditelnosti přepravy VJP z EDU a ETE do vybraných lokalit,
- 2) zhodnocení vybraných řešení z hlediska bezpečnosti.

17 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti

17.1 Úvod

Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště shrnuje všechny vědecké a technické argumenty a důkazy zdůvodňující jeho bezpečnost. Součástí hodnocení dlouhodobé bezpečnosti je jak popis geologických, hydraulických či geomechanických vlastností lokalit, tak hodnocení vlastností, funkčnosti a spolehlivosti inženýrských bariér či navrženého projektového řešení (Performance Assessment). V případě bezpečnostního hodnocení úložišť radioaktivního odpadu se toto hodnocení anglicky nazývá „safety case“. Bezpečnostní rozbor neboli anglicky safety assessment je v případě hodnocení úložišť radioaktivních odpadů součástí safety case a je zaměřen na vyhodnocení efektivní dávky, kterou může obdržet reprezentativní osoba za různých scénářů vývoje úložiště. Safety case není možno zcela ztotožnit se zadávací bezpečnostní zprávou či bezpečnostní dokumentací, která je součástí žádosti o povolení umístění, výstavby či provozu jaderného zařízení podle přílohy 1 zákona č. 263/2016 Sb., definované podrobněji v § 20 vyhlášky č. 378/2016 Sb. SÚRAO při přípravě safety case bude vycházet proto nejenom z požadavků české legislativy, ale i z mezinárodních doporučení daných především dokumenty IAEA (IAEA 2009, IAEA 2011a, IAEA 2011b a IAEA 2012) a dokumentů POSIVA a SKB (SKB 2011, POSIVA 2012), jejichž bezpečnostní koncept je velmi podobný konceptu SÚRAO.

17.2 Provedené práce

Velká většina prací shrnutých v předchozí kapitolách vycházela z výsledků projektu SÚRAO *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště* (SÚRAO, SO2014-061), jehož hlavním cílem bylo získat potřebné znalosti, dovednosti a nástroje pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti.

Hlavním řešitelem projektu bylo ÚJV Řež, a. s. s jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v.v.i.; a společnostmi SG Geotechnika a.s.; Progeo, s.r.o.; Chemcomex, a.s. a Centrum výzkumu Řež s.r.o. Projekt byl rozdělen do následujících oblastí:

- chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- chování horninového prostředí;
- transport radionuklidů z úložiště;
- další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Řešení tohoto projektu se zúčastnilo více než 200 odborníků z více než 20 organizací. Výsledky výzkumných prací byly rovněž konzultovány se společností Posiva Solutions tvořené odborníky z finské společnosti Posiva a švédské společnosti SKB, které jsou zodpovědné za

přípravu hlubinného úložiště ve Finsku a Švédsku. Nejvýznamnější výsledky více než 200 výzkumných zpráv, které vznikly v rámci tohoto projektu, jsou shrnuty ve zprávě Havlová et al. (2020). Pro každou z devíti lokalit byly výsledky rovněž shrnuty do formy studie zadávací bezpečnostní zprávy (ZBZ) (Vokál et al. 2018a-i). Nejdůležitějším výsledkem celého projektu však bylo vytvoření odborných týmů, které získaly důležité poznatky a nástroje pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště. Výsledky tohoto projektu zároveň tvořily základní zdroj informací pro srovnání potenciálních lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

V rámci zmíněného projektu byl stanoveny migrační parametry dostupných vzorků z povrchu potenciálních lokalit (Havlová et al. 2018k) a navrženy migrační parametry pro výpočty. Dále byly vytvořeny transportní modely, které vytypovaly kritické transportní cesty pro radionuklidy do životního prostředí (Říha et al. 2018 pro všechny potenciální lokality). V návaznosti na tuto práci byl iniciován dílčí projekt, který popisoval transport radionuklidů v izolační části úložiště, tj. od úložných vrtů zhruba do vzdálenosti 50 m, kde se předpokládá možnost neidentifikovaného zvodnělého zlomu 3. kategorie (Gvoždík et al. 2020). Tento projekt, který propojoval interpretaci puklinové sítě zjištěné v PVP Bukov s transportními modely, přinesl důležité poznatky o migraci radionuklidů v krystalinické prostředí, ze kterých bude možno vycházet v příštích bezpečnostních rozborech.

Transportní parametry a mechanismy transportu radionuklidů přes zhutněný bentonit obklopující UOS byly shrnuty ve zprávě Hofmanová et al. (2019). Bylo zjištěno, že do modelu transportu radionuklidů v bentonitu vstupují parametry, jejichž odhad může být obtížný. Jedním z důvodů je variabilita hodnot, která může být v závislosti na experimentálních podmínkách značná. Důležitým zjištěním bylo, že hodnota tzv. zdánlivého koeficientu (D_a) není významně závislá na externích podmínkách. Naopak hodnota efektivního difúzního koeficientu (D_e), která se využívá v bezpečnostních rozborech, je závislá na externích podmínkách. Tento problém bude nutno vyřešit v rámci příštích projektů.

Transportní parametry a transportní mechanismy radionuklidů přes cementové materiály, které představují významnou komponentu HÚ, jsou popsány ve zprávě Večerník et al. (2019). Jedním z významných výsledků bylo to, výsledky sorpčních experimentů prezentované v této zprávě, ukázaly, že cementové materiály mají značný potenciál v zachycení některých kritických, mobilních radionuklidů (^{129}I , ^{36}Cl), které se na jiné uvažované bariérové materiály, jako jsou horniny Českého masivu nebo bentonity, prakticky nesorbují. V rámci tohoto dílčího projektu byla zkoumána i možnost využití směsí bentonitu a cementu, zejména z důvodu zmírnění koroze UOS. Bylo zjištěno, že uhlíková ocel v těchto směsích sice koroduje podstatně pomaleji než v kontaktu s bentonitem, ale nelze vyloučit lokální korozi (Dobrev et al. 2019). Naopak žádná lokální koroze nebyla pozorována při kontaktu uhlíkové oceli se samotným cementem bez přítomnosti bentonitu.

Všechny poznatky potřebné pro výpočet efektivní dávky byly shrnuty v předběžném bezpečnostním rozboru pro vybranou lokalitu (Kraví hora) (Trpokošová et al. 2018). V této zprávě, která byla oponována i zahraničním partnerem (POSIVA Solutions), byla shrnuta všechna data do formy vstupních souborů pro výpočty, byly připraveny koncepční, matematické a výpočetní modely a spočítána efektivní dávka pro vybrané scénáře vývoje hlubinného úložiště.

17.3 Plánované práce

Hlavní cíle pro následující období zhruba do roku 2025 až 2030 v oblasti hodnocení dlouhodobé bezpečnosti je:

- 1) připravit bezpečnostní hodnocení (safety case I) pro výběr optimálního úložného systému pro podmínky ČR na základě archivních informací o vybrané referenční lokalitě a informací z výzkumných prací v PVP Bukov a zahraničních lokalit, které umožní predikovat vlastnosti lokality v hloubce úložiště,
- 2) připravit podklady pro bezpečnostní hodnocení čtyř vybraných lokalit (safety case II) pro výběr finální a záložní lokality.

Díličními cíli projektu do roku 2024 (bez informací z průzkumných prací z lokalit) jsou:

- příprava metodiky bezpečnostního hodnocení, identifikace vlastností, událostí a procesů (§ 9, vyhláška č. 377/2016 Sb.), které mohou ovlivnit bezpečnost úložiště („Features, Events and Processes“, zkr. FEP), odvození scénářů normálního a alternativního vývoje úložiště pro různé varianty úložného systému a vytvoření systému řízení požadavků a procesů z hlediska bezpečnosti,
- bezpečnostní hodnocení funkčnosti a spolehlivosti navržených bariér úložiště (Performance Assessment),
- výzkum chování radionuklidů v navržených bariérách úložiště,
- vývoj koncepčních, matematických a výpočetních modelů pro bezpečnostní rozbor úložiště,
- verifikace a validace matematických a výpočetních modelů pro bezpečnostní rozbor úložiště,
- bezpečnostní rozbor navržených technických řešení ve formě bezpečnostní studie pro úložný systém (safety case) pro vybranou, referenční lokalitu včetně citlivostních rozborů a rozborů nejistot.

Všechny výše uvedené činnosti se budou opakovat po provedených průzkumných pracích na lokalitách pro vybraný (referenční) úložný systém. Výsledkem těchto prací bude bezpečnostní studie zahrnující výsledky průzkumných prací.

17.3.1 Příprava metodiky bezpečnostního hodnocení, identifikace vybraných zařízení, bezpečnostních funkcí a odvození scénářů vývoje úložiště a jeho komponent

Dlouhodobá bezpečnost úložiště je založena na pasivním plnění bezpečnostních funkcí přírodních a inženýrských bariér úložiště, které zajišťují bezpečnost úložiště do doby, kdy je splněna podmínka dávkové optimalizační meze pro reprezentativní osobu. Hlubinné úložiště představuje velmi složitý systém zahrnující velké množství komponent majících různé vlastnosti, které jsou ovlivněny událostmi a procesy probíhajícími v úložišti po dobu tisíců let. Před odvozením scénářů vedoucích k možnému, náhlému či postupnému poškození těchto

bariér je třeba shrnout všechny vlastnosti, události a procesy (FEPů⁵), které mohou ovlivnit bezpečnost úložiště (§ 9, odst.6, písm. d, vyhláška č. 377/2016 Sb.).

Výstupem této etapy prací bude systematická příprava metodiky bezpečnostního hodnocení, budou shrnuty a klasifikovány bezpečnostní komponenty a popsány jejich počáteční vlastnosti, bezpečnostní funkce, analyzovány možné FEPy a scénáře vedoucí ke ztrátě bezpečnostních funkcí jednotlivých komponent úložného systému v interakci s ostatními komponenty. V rámci této etapy budou připraveny studie potřebné pro aktualizaci databáze FEPů relevantních pro vybrané technické řešení a podmínky lokalit v ČR. Budou připraveny studie shrnující nové poznatky pro identifikaci a analýzu:

- vlastnosti, události a procesy ovlivňující rychlost uvolňování radionuklidů z vyhořelého jaderného paliva a odvození normálního a alternativních⁶ scénářů ovlivňující uvolňování radionuklidů z vyhořelého paliva po poškození obalového souboru,
- vlastnosti, události a procesy ovlivňující životnost obalového souboru a odvození normálního a alternativních scénářů ovlivňující životnost UOS,
- vlastnosti, události a procesy ovlivňující bezpečnostní funkci tlumicí bariéry a ostatních komponent úložiště a odvozeny relevantní scénáře,
- vlastnosti, události a procesy ovlivňující bezpečnostní funkce horninového prostředí a odvozeny normální a alternativní scénáře vývoje úložiště,
- vlastnosti, události a procesy ovlivňující expozici člověka a životní prostředí v biosféře a odvozeny tzv. stylizované scénáře.

17.3.2 Bezpečnostní hodnocení funkčnosti a spolehlivosti bariér úložiště (Performance Assessment)

V případě hlubinného úložiště je obtížné prokázat funkčnost a spolehlivost bariér úložiště vzhledem k velmi dlouhé době projektové životnosti a velkému množství vlivů, kterými jsou tyto bariéry ovlivněny v souladu s § 9, vyhlášky č. 329/2017 Sb. Hodnocení funkčnosti a spolehlivosti bariér úložiště (Performance Assessment) vyžaduje důkladné porozumění procesům, které probíhají v úložišti mezi jednotlivými komponenty po dobu tisíců let. Vzhledem k takto dlouhé době funkčnosti bariér úložiště je třeba vycházet z prediktivních modelů, které zahrnou všechny důležité události a procesy ovlivňující vlastnosti bariér úložiště v čase a prostoru.

Hlavním cílem této etapy bude ověřit bezpečnostní funkce a spolehlivost bariér srovnáním předpokládaného termo-hydro-mechanicko-chemického (THMC) chování bariér v úložišti s výsledky laboratorních a in-situ experimentů prováděných v podzemní laboratoři. Při THMC modelování je zpravidla odděleno THM a THC modelování, protože kompletní modelování se zahrnutím všech procesů a faktorů je zatím velmi obtížné.

Pro predikci a poznání THMC procesů je třeba pokračovat s dlouhodobými laboratorními a in-situ experimenty zahájenými v předchozím období v rámci projektu *Výzkumná podpora*

⁵ V textu bude dále používat ve světě využívanou zkratku FEP/FEPy podle anglických výrazů Features, Events and Processes.

⁶ Normální scénáře představují soubory událostí a procesů, které mohou nastat s určitou pravděpodobností v úložišti, alternativní scénáře zahrnují velmi málo pravděpodobné události a procesy,

pro bezpečnostní hodnocení HÚ a současně pokračovat s vývojem metodik numerického modelování THMC procesů.

SÚRAO předpokládá, že bude pokračovat prediktivní modelování funkčnosti a spolehlivosti dvouvrstvého, ocelového UOS obklopeného zhuťným bentonitem ve vertikálních či horizontálních vrtech v prostředí krystalinických hornin v hloubce 500 m pod povrchem, včetně:

- analýzy korozních produktů vznikajících při kontaktu uhlíkové oceli se zhuťným bentonitem či jiným typem tlumicího materiálu umístěného kolem obalových souborů. Pro účely zhodnocení dlouhodobého vlivu koroze oceli na bentonitovou bariéru, a naopak bentonitové bariéry na rychlost koroze oceli, počítáme se systémy, které jsou svým uspořádáním co možná nejbližší reálnému systému – a to jak v rámci experimentů, tak i v rámci geochemického modelování (v návaznosti na práci Gondoli et al. 2018),
- analýzy experimentů a hodnocení zaměřeného na vznik a transport plynů v úložišti – je třeba prokázat, že vznikající plyny nemohou negativně ovlivnit bezpečnostní funkce inženýrských bariér ani bezpečnostní funkci horninového prostředí (v návaznosti na práci Svoboda et al. 2019),
- analýzy hodnocení vlivu mikrobů na korozi materiálů (v návaznosti na práci Černík et al. 2019),
- stanovení transportních parametrů koroziaktivních látek, jako je kyslík či sulfidy a transportní parametry korozních produktů, ovlivňujících, jak vlastní korozi, tak i vlastnosti okolních materiálů,
- zhodnocení vlivu změny napětí v poli blízkých interakcí v důsledku procesů probíhajících v úložišti (v návaznosti na práce Hasal et al. 2019, Dobrev et al. 2018).

Součástí této oblasti výzkumu mohou být i experimenty potřebné k získání dat či informací, které nejsou dostupné z jiných zdrojů. Výsledkem dílčích projektů budou výzkumné zprávy, které na základě všech dostupných informací posoudí vhodnost navržených bariér pro využití v hlubinném úložišti a případně navrhnou jejich možnou náhradu či modifikaci. Případně budou navrženy další studie zaměřené na ověřování alternativních bariér.

Pro THMC modelování budou využity experimenty z PVP Bukov (Kap. 18), ať již nové určené přímo pro validaci THMC modelů či již probíhající nebo plánované pro jiné účely. Je možné vycházet i z experimentů prováděných v zahraničí a analýzy antropogenních analogů.

17.3.3 Výzkum chování radionuklidů v navržených bariérách a úložných systémech

Po poškození obalových souborů se část radionuklidů, která se nepřeměnila na stabilní izotopy, začne uvolňovat z obalového souboru do okolního prostředí. Mobilita radionuklidů je po poškození obalového souboru determinována chemickými, geochemickými a retardačními vlastnostmi horninového prostředí a ostatních bariér, které jsou specifické pro různé formy chemických prvků. Pro zhodnocení transportu radionuklidů přes navržené bariéry je třeba znát soubor parametrů pro výpočtové programy (rozpuštěnost, sorpční a difúzní koeficienty) ve všech materiálech bezpečnostních bariér, kterými radionuklidy mohou procházet, a to za

všech možných podmínek, tj. s uvážením všech vlastností, událostí a procesů, které mohou v úložišti nastat.

Pozornost bude zaměřena zejména na kritické mobilní radionuklidy, jako jsou ^{129}I , ^{36}Cl či ^{79}Se a radionuklidy, které mohou tvořit koloidy či jiné radionuklidy, které mohou mít vliv na hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště. Cílem prací je podrobně porozumět procesům ovlivňujícím transport kritických radionuklidů v úložišti a získat ověřené a validované modely, které umožní vyjádřit změnu transportních parametrů kritických radionuklidů pro různé scénáře vývoje úložiště v čase a prostoru. V rámci tohoto výzkumu budou získány transportní parametry ve formě distribučních křivek pro různé složky pole blízkých i vzdálených interakcí.

V této oblasti budou využity experimenty a poznatky z předchozích dílčích projektů projektu *Výzkumná podpora pro hodnocení bezpečnosti HÚ* (Havlová et al. 2018j, Hofmanová et al. 2019), projektu LTD 3 prováděného v podzemní laboratoři Grimsel a zaměřeného na stanovení transportních parametrů v matici krystalinických hornin (Havlová et al. 2018k) a projektu SKB Task Force Groundwater (Hokr et al. 2020) zaměřeného na ověření transportu radionuklidů v poli blízkých interakcí krystalinických hornin. Rovněž budou využity výsledky začínajícího projektu EURAD-FUTURE zaměřeného na bližší poznání základních mechanismů migrace radionuklidů a projektu CIM probíhajícího v podzemní laboratoři Grimsel a zaměřeného na migraci radionuklidů v cementovém prostředí. SÚRAO podporuje účast českých výzkumníků v projektech se zahraniční účastí.

Bude připraven projekt v PVP Bukov, který umožní srovnat chování radionuklidů v granitu a metamorfovaných horninách.

17.3.4 Vývoj koncepčních, matematických a výpočetních programů pro bezpečnostní rozbory úložiště

Do doby předložení žádosti o povolení umístění, výstavby, provozu, a uzavření hlubinného úložiště na SÚJB bude třeba postupně vyvíjet výpočtové programy pro hodnocení bezpečnosti úložiště. Jde o následující typy výpočetních modelů:

- model zdrojového členu (rychlost uvolňování radionuklidů z VJP a jiných forem VAO a SAO),
- model transportu radionuklidů v poli blízkých interakcí pro vybrané lokality a vybrané inženýrské bariéry,
- model transportů radionuklidů v poli vzdálených interakcí pro vybrané lokality se zaměřením na hlubší porozumění DFN modelů,
- model výpočtu transportů radionuklidů v biosféře pro vybrané lokality.

Tyto modely využívají i procesní geologické, hydrogeologické, geochemické, geomechanické, tepelné (viz například modely popsané v Kap. 9) a další modely (viz Kap. 8, 10, 11 či 12). V současné době nejsou k dispozici komerční verifikované a validované výpočetní programy pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště. Není možné jednoduše přebírat výpočetní programy ze zahraničí, které jsou buď specifické pro vybrané technické řešení a horninové prostředí či naopak představují pouze platformu pro vytvoření vlastních výpočetních modulů (GoldSim, Amber).

Modely pro výpočet zdrojového členu

V rámci této části je třeba připravit modely a vstupní soubory pro výpočet zdrojového členu pro úložiště VJP a úložiště VAO a SAO nepřijatelných do přípovrchového úložiště. Modely zahrnují zejména rychlost uvolňování radionuklidů z různých částí VJP a z různých forem odpadů. Je třeba zohlednit rovněž vliv různých faktorů (viz Kap. 17.3.1) na rychlost uvolňování radionuklidů a dobu a případně rozsah porušení UOS.

Modely pro výpočet transportu radionuklidů v poli blízkých interakcí

Pole blízkých interakcí zahrnuje inženýrské komponenty a část horninového prostředí obklopující ukládací vrty a tunely. V rámci této etapy se řeší transport radionuklidů od vlastního odpadu, přes korozní produkty, výplně vrtů a tunelů, EDZ až do zvodnělých puklin puklinové sítě horninového prostředí. Velmi důležité je porozumět roli rozhraní mezi jednotlivými bariérami na rychlost transportu radionuklidů. Zejména rozhraní mezi materiálem vyplňujícím úložné vrty a první zvodnělou puklinou v hornině. Práce by měly navazovat na práce prováděné v rámci projektu *Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ* (Trpkošová et al. 2018).

Modely pro výpočet transportu radionuklidů v poli vzdálených interakcí

Pole vzdálených interakcí rozlišujeme na:

- 1) část horninového prostředí od první zvodnělé pukliny až do prvního zvodnělého zlomu či pukliny kategorie 3 s rychlým průtokem podzemní vody vedoucím s určitou pravděpodobností až do životního prostředí,
- 2) horninové prostředí zahrnující zvodnělé zlomy s možným rychlým průtokem vody do životního prostředí.

Tato část navazuje na hydrogeologické modelování popsané v Kap. 9.3. a transportní vlastnosti lokalit popsané v Kap. 9.4.

Příprava modelu transportu v poli vzdálených interakcí by měla úzce navazovat na výstupy z projektu *Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ* shrnuté ve zprávách (Říha et al. 2018, Gvoždík et al. 2020). Zároveň by měla úzce navazovat na již probíhající experiment *Puklinová konektivita* v PVP Bukov. Výsledkem bude koncentrace aktivity kritických radionuklidů na rozhraní geosféra/biosféra.

Modely výpočtu transportu radionuklidů v biosféře

Cílem této práce bude aktualizace biosférického modelu pro vybranou, referenční lokalitu a různé stylizované scénáře vycházející z možného vývoje biosféry v lokalitě.

17.3.5 Verifikace a validace matematických a výpočetních modelů pro bezpečnostní rozbory úložiště

V bezpečnostní zprávě shrnující výsledky bezpečnostního hodnocení HÚ je třeba vždy používat verifikované a validované modely v souladu s požadavky § 9, odst. 2 vyhlášky č. 377/2016 Sb. Verifikace modelů, spočívající ve srovnání výsledků výpočtů využitím různých typů modelů a výpočetních kódů, bude prováděna jednak srovnáním různých přístupů při vývoji modelů a jednak srovnáním výsledků dosažených v ČR a v zahraničních programech.

SÚRAO bude podporovat verifikaci modelů zahraničními partnery. Například do projektů jako je BIOPROTA, EURAD-WP GAS, WP DONUT, WP-ACED, SKB Task Force EBS či projektu DECOVALEX a dalších.

Velmi náročná je validace modelů srovnáním výpočtů s výsledky laboratorních a především in-situ experimentů. Pro validace vyvinutých výpočetních kódů budou využívány jak výsledky experimentu z PVP Bukov (viz Kap. 18), tak i výsledky experimentů prováděných v zahraničních laboratořích. Velmi přínosná je například účast SÚRAO v projektech prováděných v podzemní laboratoři v Grimselu CIM a LTD. Bude podporována účast českých, výzkumných institucí v zahraničních projektech.

Společný výzkum v této oblasti přináší významný synergický efekt vedoucí k hlubšímu porozumění hodnocení funkčnosti bariér úložiště.

17.3.6 Bezpečnostní rozbor vybraných lokalit a navržených technických řešení a provádění citlivostních rozborů a rozborů neurčitostí pro vybrané scénáře

V rámci tohoto úkolu:

- 1) budou vybrány na základě screeningových, konzervativních výpočtů scénáře pro bezpečnostní výpočty včetně zdůvodnění vybraných scénářů, přijatých zjednodušení a předpokladů,
- 2) budou systematicky shrnuty všechny informace a data pro navržené varianty komponent úložiště a navržená technická řešení úložného systému do formy vstupních souborů tak, aby byla zajištěna transparentnost a vystopovatelnost všech dat. Bude odhadnuto rozmezí možných hodnot a jejich rozložení a určeny nejpravděpodobnější, konzervativní hodnoty v souladu s požadavky vyhlášek č. 162/2017 Sb. a č. 329/2017 Sb.,
- 3) integrace dílčích modelů do robustního, komplexního modelu bezpečnostního rozboru,
- 4) provedeny konzervativním přístupem bezpečnostní rozbor pro vybrané úložné systémy a vybrané scénáře,
- 5) provedeno bezpečnostní hodnocení navržených technických řešení, při kterém bude hodnocena i robustnost navržených řešení, tj. charakteristika systému, která vyjadřuje menší vliv možných změn vlastností, událostí a procesů v úložišti na úložný systém,
- 6) analyzován vliv variability a nejistoty hodnot parametrů na výsledky bezpečnostních rozborů v souladu s § 9, odst.3, písm. c) vyhlášky č. 377/2016 Sb.

18 Výzkumné práce v podzemním výzkumném pracovišti Bukov

18.1 Úvod

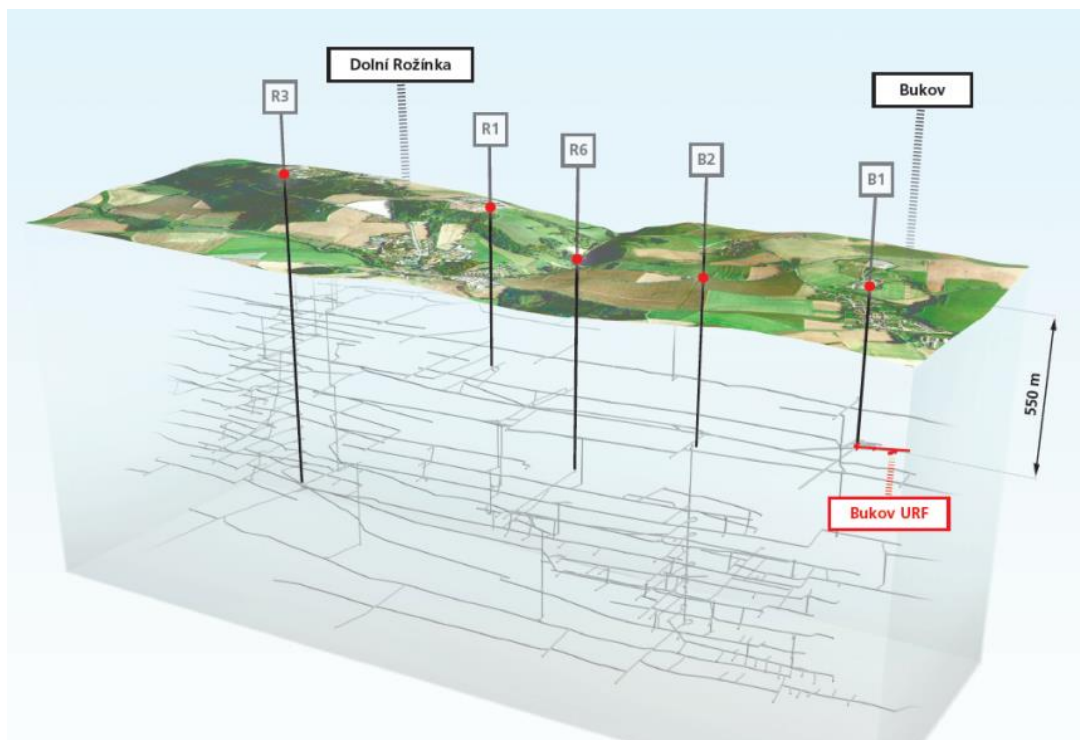
Projekt generické laboratoře PVP Bukov byl založen na postupu ověřeném v minulosti u řady obdobných projektů. Jeho cílem je především získat dostatek zkušeností pro prokázání bezpečnosti a proveditelnosti hlubinného úložiště na finální lokalitě. Předpokládáme, že PVP Bukov bude využíváno zhruba do roku 2035 a na tento projekt navážou práce v konfirmační podzemní laboratoři na finální lokalitě.

Záměrem vybudování PVP Bukov bylo částečně využít již vytvořených nevyužívaných podzemních děl. V tomto případě bylo využito stávající důlní infrastruktury uranového dolu Rožná I, který byl v době plánování a prvních letech výstavby laboratoře v plném těžebním provozu. Laboratoř byla vystavěna poblíž jámy B-1 na 12. patře dolu v hloubce okolo 550 m. Ražba podzemních prostor realizovaná společností DIAMO s.p., o.z. GEAM byla zahájena v roce 2013 a infrastruktura laboratoře byla kompletně dokončena v roce 2017. V průběhu výstavby došlo z důvodu zastižení nevhodných horninových struktur ke změnám oproti původně plánovanému uspořádání prostor laboratoře. Výsledkem je celkem 470 m chodeb. Dílo bylo předáno k užívání v květnu 2017, kdy byla zahájena experimentální fáze laboratoře, 2 měsíce po ukončení těžebních činností na 24. patře dolu. Důl Rožná I byl nejstarším provozovaným uranovým dolem ve střední Evropě a za více než šedesátiletou dobu provozu se zde vytěžilo okolo 21 000 tun uranu. V navazující etapě provozu, tj. od 1.7.2020 do roku 2035 se předpokládá výstavba II. etapy PVP Bukov v předpokládaném rozsahu cca 900 m zkušebních chodeb s předpokladem uvedení do plného provozu v roce 2024.

Z hlediska geologické stavby se laboratoř nachází ve vulkano-sedimentárním komplexu tvořeném metamorfovanými horninami, převážně migmatity a amfibolity. Vzhledem ke zvolené pozici laboratoře nejsou laboratorní chodby kříženy žádnými strukturami s uranovými minerály a monitorovaná aktivita ionizujícího záření je zde téměř nulová. Nicméně, protože je laboratoř součástí dolu s jednotnou infrastrukturou, je součástí kontrolovaného pásma a výzkumníci musí být registrováni jako radiační pracovníci kategorie A.

Laboratoř se skládá z 300 m dlouhého přístupového překopu, který byl vytvořen konvenčním způsobem ražby, a kratších děl, která byla ražena metodou hladkého výlomu (Augusta et al. 2018). Přístupový překop je ve velké části opatřen TH obloukovou výztuží se zapažením stropů a boků, případně byla pro stabilizaci stěn použita svorníková výztuž v kombinaci s tahokovem či pletivem. Laboratorní chodby jsou bez obloukové výztuže a v místech s nepříhodnými směry puklinových systémů byly použity sklolaminátové svorníky.

I po ukončení aktivních těžebních činností pokračoval provoz dolu v původním zavedeném režimu. Znamená to přístup i do spodních pater dolu pod úroveň PVP Bukov, a to až na 24. patro do hloubky 1200 m. Přístup do těchto pater je využíván v rámci některých projektů a jsou tak získávána unikátní data (například projekt nazývaný „Hluboké horizonty“ (Bukovská et al. 2020).



Obrázek 17: Schéma hlavních důlních děl dolu Rožná I s vyznačením pozice PVP Bukov

18.2 Provedené práce

Aktivity v podzemí zohledňují výzkumné potřeby SÚRAO a možnosti místního horninového prostředí. Vědecký program byl zahájen již v průběhu ražby podzemních prostor. V roce 2017 skončil rozsáhlý projekt, který měl za cíl zmapování a charakterizaci horninového masivu (Bukovská et al. 2017; Souček et al. 2018). Výsledkem práce je ucelený soubor dat s informacemi o prostorové distribuci parametrů hornin (Bukovská et al. 2020), který je využíván v dalších projektech. V laboratorních chodbách vznikla série měřících stanic pro monitorování změn geostatického napětí v hornině nebo hydrogeologická monitorovací síť pro sledování vývoje přítoků podzemní vody.

18.3 Plánované práce

Činnosti spojené s projektem českého HÚ lze rozdělit do celkem sedmi oblastí, v dokumentech SÚRAO označovaných jako VEP (Výzkumný a experimentální plán). Stručný popis cílů těchto oblastí je v tabulce Tabulka 9. Prozatím byly dokončeny celkem 3 výzkumné projekty, 7 projektů podporovaných SÚRAO je v realizaci a další jsou ve fázi přípravy. Podrobnější informace o dokončených a probíhajících činnostech je možné nalézt v dokumentu na webových stránkách SÚRAO (SÚRAO 2019). Velká většina činností v rámci prvních projektů je spojena s charakterizací a výzkumem lokálních vlastností horninového masivu, které jsou nezbytné pro navazující komplexnější projekty. V rámci průzkumných prací a pro potřeby konkrétních experimentů již bylo vytvořeno více než 1 500 m jádrových vrtů o průměru 76 mm

v různých částech dolu. Vrtná jádra jsou uložena ve skladu hmotné dokumentace SÚRAO a představují unikátní zdroj materiálu pro další studium.

Tabulka 9: Oblasti realizovaných a plánovaných činností v PVP Bukov

Oblast programu SÚRAO	Zkrácený název	Cíle
VEP1	Charakterizace	Vývoj metodik popisu horninového prostředí. Sběr popisných geologických dat, jejich uložení do databází a interpretace ve formě 3D modelů.
VEP2	Monitoring	Testování a vývoj metod dlouhodobého monitoringu procesů probíhajících v horninovém masivu (hydrogeologie, pohyby křehkých struktur, mikrobiologické osídlení, teplota masivu, seismicity). Vývoj nedestruktivních geofyzikálních metod.
VEP3	Transport	Výzkum proudění podzemních vod a transportu radionuklidů v horninovém prostředí. In-situ testy ve vrtech. Vývoj a testování modelovacích nástrojů.
VEP4	Inženýrské bariéry THMC procesy	Vývoj a výzkum materiálů inženýrských bariér. Výzkum korozních vlastností materiálů pro UOS. Výzkum interakcí mezi materiály inženýrských bariér (bentonit, beton) a horninou. Verifikace a validace THMC modelů.
VEP5	EDZ	Vývoj a testování metod pro charakterizaci porušené (EDZ) a ovlivněné (EdZ) oblasti hornin v okolí podzemních prostor.
VEP6	Technologické postupy	Vývoj nových konstrukčních postupů výstavby podzemních děl (vrtné a razicí práce, injektáže, zajištění výrubu při prostupu přes poruchové zóny).
VEP7	Demonstrační experimenty	Komplexní experimenty testující chování prvků ukládacího systému v reálném měřítku a podmínkách v HÚ. Testování technologií pro manipulaci, konstrukce experimentálních modelů a monitoring procesů.

Do roku 2023–2024 budou hlavní cíle výzkumných prací v PVP Bukov zaměřeny zejména na:

- 1) stanovení přenositelnosti poznatků získaných z povrchových částí horninového prostředí PVP Bukov do hlubinných částí (VEP 1) pro predikci vlastností lokalit v hloubce úložiště,
- 2) zhodnocení vývoje mikrobiální aktivity (původní i zanesené) na základě monitoringu (VEP 2),
- 3) ověření šíření teploty v úložišti od zdrojů simulujících VJP (VEP 2),
- 4) ověření predikce transportu mobilních radionuklidů v izolační části úložiště (VEP 3),
- 5) ověření vlastností materiálů UOS v reálných podmínkách horninového prostředí (VEP 4),

- 6) ověření predikce THMC procesů v reálných podmínkách úložiště (VEP 4),
- 7) ověření vlivu ražebních postupů na rozsah poškození horniny (EDZ) a izolační schopnosti horniny (VEP 5).

19 Vliv hlubinného úložiště na životní prostředí

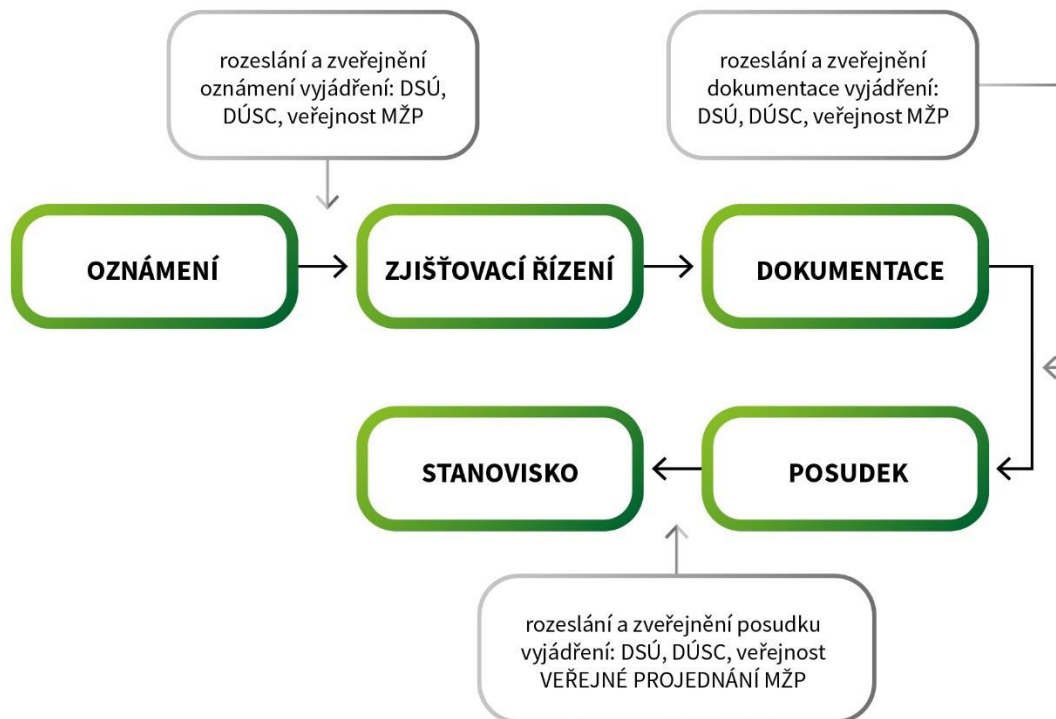
Umístění hlubinného úložiště by nemělo být ve zjevném, obtížně odstranitelném střetu zájmů v posuzovaném území indikujícím velmi významné dlouhodobé ohrožení či nadměrné poškození zvláště citlivých ekosystémů a zhoršení stavu jednotlivých složek ŽP s negativním vlivem na zdraví člověka. Podle doporučení IAEA (IAEA 2011b, I.44-I.47) umístění hlubinného úložiště má být navrženo tak, že kvalita životního prostředí (ŽP) bude dostatečně chráněna a potenciální negativní dopady bude možné zmírnit na přijatelnou úroveň, s ohledem na technické, ekonomické, sociální a environmentální faktory.

To musí být prokázáno vyhodnocením dopadů umístění HÚ v dané lokalitě na jednotlivé složky ŽP, veřejné zdraví, přírodní zdroje, kulturní památky a hmotný majetek. Celý průběh hodnocení je podrobně popsán v zákoně o posuzování vlivů na životní prostředí (zákon č. 100/2001 Sb.), do kterého jsou promítnuty požadavky evropské legislativy (Směrnice 2001/42/ES; Směrnice 2011/92/EU; Směrnice 2014/52/EU).

Dlouhodobým cílem je prostřednictvím kompletní studie vlivů HÚ na životní prostředí (proces EIA) prokázat a doložit, že HÚ v celém svém životním cyklu nepovede k významnému zhoršení stavu jednotlivých složek ŽP a nebude mít negativní dopad na zdraví obyvatelstva. Podle aktuálně platné Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR (dále jen Koncepce) je kompletní EIA plánována na finální lokalitě. Nicméně i v průběhu procesu zužování počtu lokalit budou vlivy na ŽP systematicky posuzovány v souladu s požadavky zákona č. 100/2001 Sb. Tato hodnocení budou postoupena veřejnému projednání.

Proces EIA je založený na systematickém zkoumání a posuzování možného působení vlivů, spojených s realizací HÚ, na životní prostředí a veřejné zdraví. Předmětem posouzení jsou vlivy na faunu, flóru, ekosystémy, biologickou rozmanitost se zvláštním zřetelem na evropsky významné lokality a ptačí oblasti (Natura 2000), vlivy na půdu, vodu, ovzduší, klima a krajinu, vlivy na přírodní zdroje, hmotný majetek, kulturní dědictví a zdraví obyvatelstva. Posuzují se rovněž vzájemná působení a souvislosti těchto vlivů, a to ve všech fázích životního cyklu HÚ.

Zjednodušené schéma procesu EIA včetně účasti dotčených samosprávných úřadů (DSÚ), dotčených územních samosprávných celků (DÚSC) a dotčené veřejnosti znázorňuje následující Obr. 18.



Obr. 18: Schéma procesu EIA

Oznámení – souhrn základních informací o projektu HÚ. Náležitosti oznámení stanovuje příloha č. 3 zákona o posuzování vlivů na životní prostředí (zákon č. 100/2001 Sb.). Oznámení obsahuje mj. údaje o stavu území dotčeném HÚ, údaje o možných významných vlivech na ŽP a veřejné zdraví, porovnání variant řešení (pokud byly varianty předloženy).

Zjišťovací řízení – probíhá podle kritérií uvedených v příloze č. 2 zákona č. 100/2001 Sb. Cílem řízení je upřesnění informací, které bude vhodné uvést do dokumentace a vyhodnocení variant řešení (pokud byly varianty předloženy).

Výsledkem zjišťovacího řízení může být také požadavek Naturového posouzení dle § 1, resp. Hodnocení vlivu HÚ na zájmy ochrany přírody a krajiny dle § 7 vyhlášky o posouzení vlivu záměru a koncepce na evropsky významné lokality a ptačí oblasti a o náležitostech hodnocení vlivu závažného zásahu na zájmy ochrany přírody a krajiny (vyhláška. č. 142/2018 Sb.). Obě tato hodnocení mohou zpracovávat pouze osoby autorizované MŽP.

Dokumentace – rozsáhlá textová a grafická dokumentace k záměru HÚ a jeho vlivům. Náležitosti dokumentace jsou uvedeny v příloze č. 4 zákona č. 100/2001 Sb. Při zpracování dokumentace musí být zohledněny současné poznatky a metody posuzování včetně výsledků dalších environmentálních hodnocení/studií podle příslušných právních předpisů. Dokumentaci může zpracovávat pouze osoba autorizovaná MŽP.

Posudek – odborné posouzení dokumentace jinou autorizovanou osobou, než která se podílela na jejím zpracování. Podkladem zpracování posudku je zveřejněná dokumentace, vyjádření k ní podaná, závěry veřejného projednání. Náležitosti posudku jsou stanoveny v příloze č. 5 zákona č. 100/2001 Sb.

Stanovisko – výsledek procesu EIA. Stanovisko vydává MŽP na základě dokumentace, vyjádření podaných k dokumentaci, závěrů veřejného projednání a posudku a může být souhlasné nebo nesouhlasné. Náležitosti stanoviska jsou stanoveny v příloze č. 6 zákona č. 100/2001 Sb.

Stanovisko obsahuje rovněž podmínky pro všechny fáze životního cyklu HÚ, jimiž se zabezpečí prevence, snížení, popř. kompenzace negativních vlivů HÚ na ŽP a veřejné zdraví, podmínky monitoringu včetně parametrů a délky sledování.

Stanovisko je odborný podklad pro správní orgány vydávající nezbytná navazující rozhodnutí a povolení potřebná k realizaci HÚ – územní řízení, stavební řízení, povolení k hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, povolení plynoucí ze složkových zákonů ŽP (např. zákon č. 254/2001 Sb.; zákon 201/2012 Sb.; zákon č. 289/1995 Sb.; zákon č. 334/1992 Sb.). Podmínky a doporučení uvedené ve stanovisku by měly být do těchto rozhodnutí a povolení zahrnuty.

"Ideální" délka procesu EIA (zákonně lhůty ponechány v plné délce; nezapočítány: lhůta pro vrácení dokumentace, prodloužení lhůty zpracování posudku, doba potřebná pro zajištění konání veřejného projednání aj.) je cca 7,5 měsíců. Skutečná délka procesu se může z výše uvedených, časově složitě spočitatelných, důvodů i x-násobně prodloužit.

19.1 Provedené práce

V letech 2014–2018 byla pro vymezená průzkumná území zpracována řada studií a dokumentů. Jedná se především o: Studie umístitelnosti, resp. proveditelnosti (Bureš et al. 2018a-d; Špinka et al. 2018a-c; Fiedler et al. 2018; Navrátilová et al. 2018b), Studie vlivů na životní prostředí (Marek 2018a-g; Krajíček et al. 2018; Navrátilová et al. 2018c), Hodnocení vhodnosti lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al. 2020a-i), Studie zadávací bezpečnostní zprávy (Vokál et al. 2018a-i), Socioekonomické analýzy (Hampl et al. 2017, Hampl a Hůle 2018). Informace pro výše citované práce byly čerpány především z veřejně dostupných zdrojů (archivní práce, datové zdroje resortních organizací, resp. samospráv) a terénních šetření. Dalšími realizovanými pracemi byly monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí (Šedivá 2018; Černý a Šedivá 2018; Bartoň a Mátl 2018; Říčka et al. 2018), monitoring ovzduší z hlediska výskytu radonu a monitoring ionizujícího záření v místech známých anomálií (Froňka a Fojtíková 2017), měření kvality ovzduší v lokalitě Kraví hora (Skeřil et al. 2017).

19.2 Plánované práce

Práce hodnocení vlivu úložiště na životní prostředí se budou soustřeďovat na:

- 1) zpřesnění a shrnutí informací v souvislosti s postupujícími výzkumnými a průzkumnými pracemi v dalších etapách výběru (biologické hodnocení, rozptylová studie, hluková studie, hodnocení dopravní zátěže apod),
- 2) vypracování studie zpracované v souladu s metodikou EIA (nejedná se o kompletní proces EIA), která bude představovat hlavní dokument zahrnující odborné studie a posudky vztahující se k ŽP a veřejnému zdraví, prokazující, že umístění hlubinného

úložiště ve vybrané lokalitě má v průměru méně negativních vlivů na životní prostředí a veřejné zdraví než ostatní kandidátní lokality,

- 3) projednání studie s dotčenými obcemi a dalšími zainteresovanými stranami formou veřejných slyšení.

Připomínky budou zohledněny při revizi dokumentu a při rozhodování o výběru lokality pro umístění HÚ. Harmonogram prací bude vycházet z platné Koncepce.

V této etapě:

- budou zpracovány odborné studie a posudky, které budou vstupovat do studie EIA,
- bude přehodnocen výskyt národních parků a chráněných krajinných oblastí v dotčených lokalitách (v souvislosti se stanoviskem MŽP ke Koncepti),
- budou do hodnocení zahrnuta celá území národních parků a chráněných krajinných oblastí, nejen území I. a II. zóny,
- budou posouzeny možnosti umístění a parametry deponie rubaniny, resp. deponie ornice (šetrné ukládání kulturních vrstev půdy) v souvislosti s reliéfem krajiny a pohledovou exponovaností, bude vypracován sumář lomů potenciálně vhodných pro trvalé uložení přebytků rubaniny, včetně dojezdových vzdáleností.

V případě postupu lokalit Janoch nebo Na Skalním do užšího výběru (4 lokality), bude nutná aktualizace Koncepce.

19.2.1 Potřebné odborné studie a posudky

Biologický průzkum / biologické hodnocení

Cílem biologického průzkumu je shromáždit informace o flóře a fauně (ekologickém potenciálu) v území zasaženém HÚ. Je vhodné, aby součástí biologického průzkumu byly migrační studie, biotopové hodnocení, analýzy (např. analýza potřeb výjimky z ochrany zvláště chráněných druhů rostlin a živočichů) a doporučení ke snížení, resp. odstranění negativních dopadů HÚ v daném území.

Biologický průzkum se provádí ve vegetačním období (cca duben až říjen), a to jako orientační nebo podrobný.

Povinnost provádět biologický průzkum nestanovuje žádný legislativní předpis, nicméně je podkladem pro biologické hodnocení.

Biologické hodnocení ve smyslu § 67 ZOPK (zákon č. 114/1992 Sb.) je zpráva obsahující zjištění, popis a vyhodnocení současného stavu krajiny a předpokládaných přímých i nepřímých vlivů HÚ v celém svém životním cyklu na rostliny a živočichy v krajině. Zpráva dále uvádí možná rizika, popis opatření navržených k prevenci, omezení, resp. vyloučení negativních dopadů, kompenzační opatření, návrh monitoringu a srovnání možných variant s návrhem optimální varianty. Postup zpracování hodnocení a obsah hodnocení vycházejí z § 18 vyhlášky č. 395/1992 Sb.

Biologické hodnocení může provádět pouze osoba autorizovaná podle § 45i ZOPK (zákon č. 114/1992 Sb.). Hodnocení bývá samostatnou přílohou EIA.

Dendrologický průzkum

Dendrologický průzkum slouží k inventarizaci (zmapování) dřevin na daném území. Cílem je určení druhů dřevin, příp. kultivarů, sadovnické hodnoty, dendrologických charakteristik, zjištění zdravotního stavu, poškození a stability.

Dendrologický průzkum je nezbytný podklad pro vydání rozhodnutí o povolení kácení dřevin.

Dendrologický průzkum může provádět pouze autorizovaný architekt pro obor krajinářská architektura dle § 4 zákon č. 360/1992 Sb.

Studie vlivu na krajinný ráz

Cílem studie je posoudit, jakou měrou se bude úložiště dotýkat znaků a hodnot krajinného rázu v souladu s § 12 ZOPK (zákon č. 114/1992 Sb.). Hodnocení se provádí zejména s ohledem na zachování: významných krajinných prvků, ZCHÚ, estetických hodnot krajiny, kulturních dominant v krajině, harmonického měřítko a harmonických vztahů v krajině.

Hodnocení se provádí pro tzv. "potenciálně dotčený krajinný prostor", který se vymezuje pomocí okruhu potenciální viditelnosti a vizuálních bariér (např. terénní horizonty, okraje lesních porostů apod.). Studie se standardně skládá ze tří částí: vyhodnocení dotčeného území (nezatížené HÚ), vyhodnocení vlivů HÚ na toto území, návrh opatření.

Pro zpracování studie vlivu na krajinný ráz neexistuje žádná autorizace nebo oprávnění.

Rozptylová studie

Rozptylová studie je dokument, který na základě vypočtených modelových hodnot znečištění, posuzuje vliv HÚ (ve všech fázích životního cyklu) včetně dopravních staveb a deponie rubaniny na stávající úroveň znečištění ovzduší v dotčené lokalitě. Jde o kvantifikaci emisní a imisní zátěže ovzduší. Podkladem pro zpracování studie jsou informace o veškerých zdrojích emisí (bodové, plošné, liniové) souvisejících s úložištěm, stav ovzduší v úložištěm nezatížené lokalitě zjištěný z podkladů ČHMÚ, ventilační faktor území a četnost výskytu větrů o rychlosti 2 m/s a nižší. Modelové hodnocení se provádí programem schváleným MŽP dle metodického pokynu MŽP.

Zpracovat rozptylovou studii může pouze osoba autorizovaná MŽP v souladu s § 32 písm. e) zákona o ochraně ovzduší (zákon č. 201/2012 Sb.).

Na základě rozptylové studie lze vybrat vhodná měřicí místa pro monitoring ovzduší (včetně využití stávajících stanic ČHMÚ).

Studie bývá samostatnou přílohou EIA.

Hluková studie

Předmětem hlukové studie je posouzení, zda hlukem z výstavby a provozu HÚ nedojde k překročení hygienických limitů v chráněném venkovním prostoru, resp. v chráněném venkovním prostoru staveb. Hygienické limity pro hluk a vibrace jsou stanoveny v NV č. 272/2011 Sb. Součástí studie jsou rovněž návrhy případných protihlukových opatření.

Podkladem pro zpracování studie jsou informace o základní akustické situaci v dotčeném území (hodnocení hluku z dopravy vychází z údajů ŘSD ČR a SŽDC) a informace o veškerých budoucích zdrojích hluku.

K vyhodnocení je využíván speciální software schválený hlavním hygienikem ČR respektující *Metodický pokyn pro stanovení hlukové zátěže z dopravy na území ČR a Manuál pro zpracování hlukových studií pro posuzování hluku ze železniční dopravy a pro měření hluku ze železniční dopravy.*

Pro zpracování hlukové studie není nutná autorizace nebo oprávnění zpracovatele, na rozdíl od vlastního měření hluku, kde je požadována autorizace podle § 83c zákona o ochraně veřejného zdraví (zákon č. 258/2000 Sb.).

Hodnocení dopravní zátěže

Cílem hodnocení je stanovit zvýšení dopravní zátěže způsobené výstavbou a provozem HÚ a následně posoudit únosnost struktury stávajících dopravních systémů např.: únosnost místních komunikací a jejich krajnic, únosnost mostních konstrukcí, poloha tras v území.

Podkladem pro hodnocení jsou: celostátní sčítání dopravy, speciálně provedené dopravní průzkumy, dopravně-inženýrská dokumentace jednotlivých sídelních útvarů, územně-plánovací dokumentace, odhad nárůstu dopravy včetně kategorií vozidel.

Problematiku hodnocení dopravní zátěže řeší např. dopravní ústavy nebo katedry na stavebních fakultách s oborem dopravní stavby. Pro zpracování hodnocení se nevyžaduje autorizace, resp. speciální oprávnění zpracovatele.

Hodnocení vlivu na stav vodních útvarů povrchových a podzemních vod

Cílem hodnocení je posoudit, zda a jak vybudování a provoz HÚ ovlivní povrchové a podzemní vody v dotčeném území s důrazem na zdroje podzemních vod, tj. posoudit hydrologické poměry, hydrogeologické charakteristiky, chemický stav vod, vodní bilanci. Jeho součástí je rovněž návrh zmírňujících, resp. kompenzačních opatření.

Podklady pro hodnocení jsou:

- evidence vodních toků, objektů na tocích, dílčích povodí, záplavových území,
- evidence vodních útvarů včetně umělých vodních útvarů,
- evidence zdrojů povrchových a podzemních vod, které jsou využívány nebo u kterých se předpokládá jejich využití jako zdroje pitné vody včetně evidence ochranných pásem vodních zdrojů a forma zásobování záměrem dotčených obyvatel pitnou vodou,
- množství a jakost evidovaných povrchových a podzemních vod,
- evidence chráněných oblastí přirozené akumulace vod,
- evidence povrchových vod, které jsou nebo se mají stát trvale vhodnými pro život a reprodukci původních druhů ryb a dalších vodních živočichů,
- evidence vodních děl k vodohospodářským melioracím pozemků,
- evidence oblastí povrchových vod využívaných ke koupání,
- evidence citlivých a zranitelných oblastí,
- určení předpokládaného množství odebíraných povrchových a podzemních vod,
- určení předpokládaného množství a jakosti vypouštěných odpadních a důlních vod.

Nakládání s vodami upravuje vodní zákon (zákon 254/2001 Sb.).

Demografická studie

Předmětem studie je hodnocení rozložení, hustoty a struktury obyvatelstva včetně prognózy populačního vývoje. Základními tématy jsou změny počtu obyvatel a populační přírůstek. Hodnocení se provádí v okruhu 30 km od HÚ. Z výstupů studie lze určit velikost populace dotčené životními fázemi HÚ, ale také potřebný sociálně – ekonomický, resp. kulturní potenciál území.

Zdrojem dat pro zpracování studie jsou především statistiky vedené Českým statistickým úřadem, výsledky sčítání lidu, domů a bytů, prognózy Katedry demografie a geodemografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Dalším zdrojem dat jsou registry obyvatel a evidence (migrací, nemocnosti apod.).

Pro zpracování demografické studie není nutná autorizace nebo oprávnění zpracovatele. Obecně se doporučuje aktualizovat studii pravidelně po cca 3–4 letech.

Vyhodnocení zdravotních rizik

Podkladem pro vyhodnocení zdravotních rizik souvisejících s realizací a provozem HÚ jsou především hluková studie a rozptylová studie. K rizikovým faktorům se také řadí případné kvalitativní a kvantitativní ovlivnění povrchových a podzemních vod, změny v oslunění, světelný smog a další. Hodnocení zdravotních rizik může zpracovat pouze osoba s akreditací MZd.

Výše uvedené studie, hodnocení a průzkumy budou použity při zpracování hodnocení vlivů na ŽP a obyvatelstvo pro čtyři lokality (dle přílohy č. 4 zákona č. 100/2001 Sb.). Tato hodnocení budou sloužit k porovnání lokalit.

Monitoring životního prostředí a obyvatelstva

Monitoring ŽP a obyvatelstva je ve většině případů vyžadován legislativou (např. zákon č. 254/2001 Sb.; zákon č. 201/2012 Sb.; NV č. 272/2011 Sb.; zákon č. 258/2000 Sb.) Monitoring na finální lokalitě bude obsahově i věcně navazovat na monitoring na čtyřech lokalitách. Podrobně je rozpracován v Návrhu monitorovacího plánu (Svoboda et al. 2019), který reflektuje celý životní cyklus HÚ.

Potřeba dalšího monitoringu může vyplynout z vydaného Stanoviska procesu EIA a z navazujících rozhodnutí dle složkových zákonů, resp. z rozhodnutí IPPC. Na čtyřech potenciálních lokalitách bude monitoring zahájen v době, kdy bude zpracován projektový návrh PA včetně souvisejících staveb umístěných mimo PA a bude známé trasování dopravní infrastruktury. Předmětem monitoringu budou následující neradiační vlivy: klimatické poměry, kvalita ovzduší, hluková zátěž, režim a jakost podzemních a povrchových vod, biodiverzita.

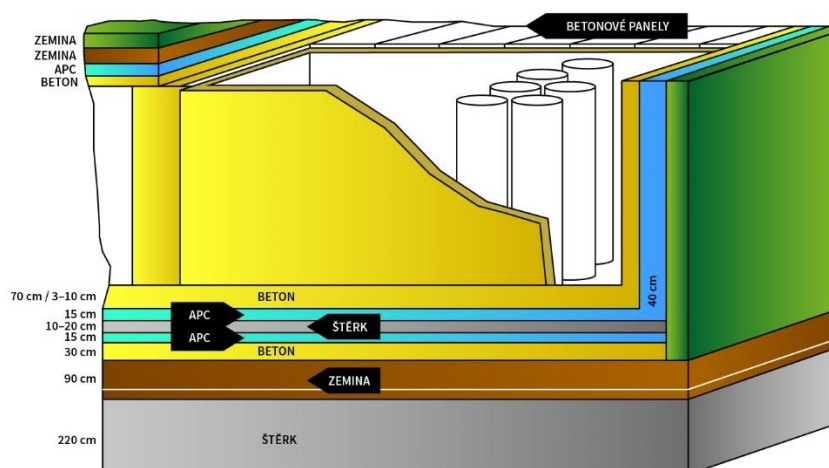
V této fázi bude monitoring sloužit k porovnání potenciálních lokalit pro umístění HÚ a zároveň bude zdrojem informací o stavu ŽP v lokalitách nezatížených záměrem.

Odborné studie, posudky a monitoring budou konfrontovány s vývojem biosférických modelů pro hodnocení bezpečnosti.

20 Výzkum a vývoj pro bezpečný provoz provozovaných úložišť RAO

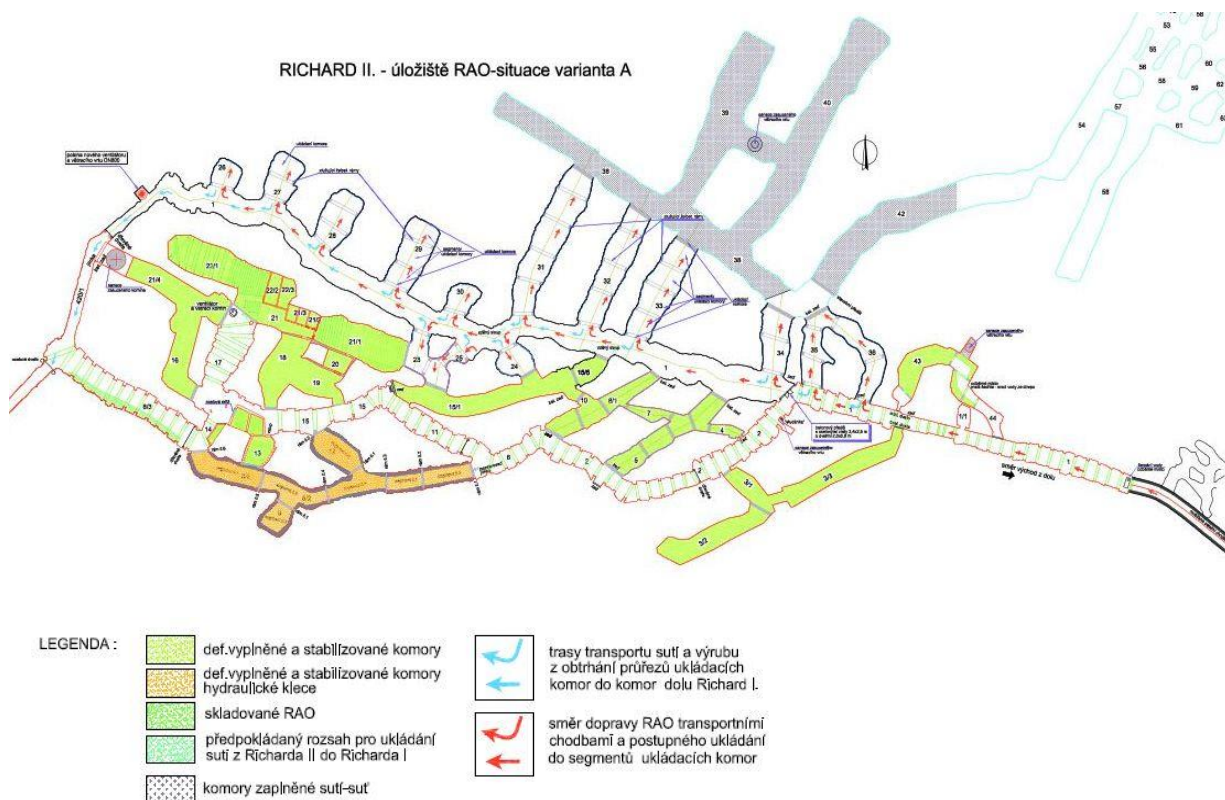
20.1 Úvod

SÚRAO v současné době provozuje 3 úložiště radioaktivního odpadu, ÚRAO Dukovany a ÚRAO Richard a ÚRAO Bratrství. Přípovrchové ÚRAO Dukovany (Obr. 19) se nachází v jihovýchodní části areálu JE Dukovany (EDU) a bylo uvedeno do trvalého provozu v roce 1995 a slouží zejména pro ukládání RAO z jaderných elektráren EDU a jaderné elektrárny Temelín (ETE).



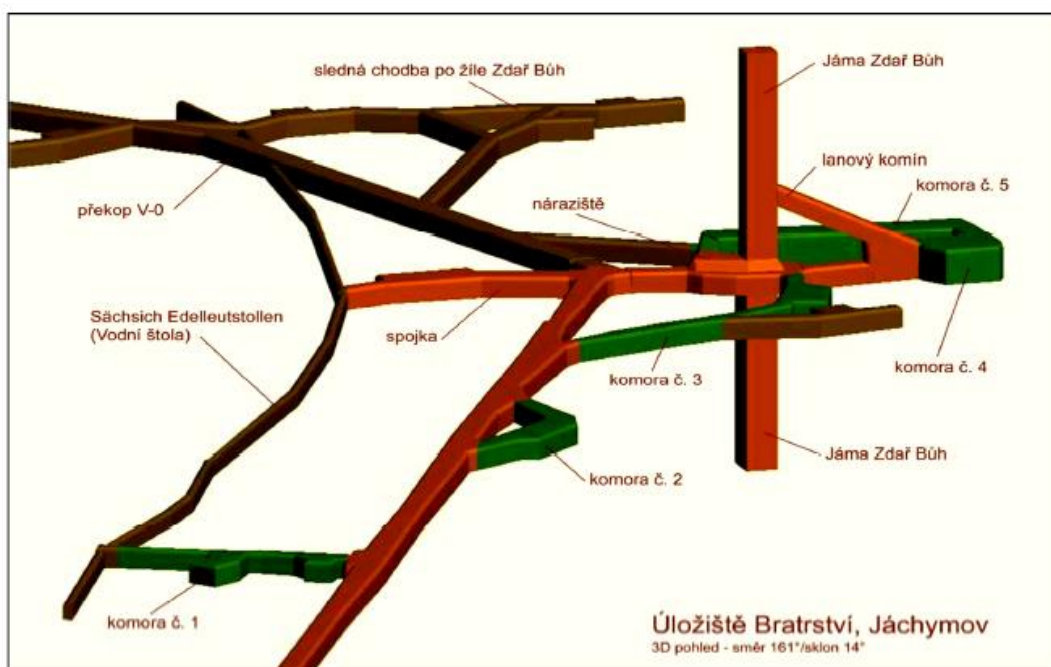
Obr. 19: Konstrukce jímky a systém bariér ÚRAO Dukovany

ÚRAO Richard je umístěno v důlním díle Richard, na severozápadním okraji města Litoměřice, a bylo uvedeno do trvalého provozu v roce 1964. Jedná se o úložiště institucionálních nízko a středně aktivních odpadů tzn. radioaktivních odpadů, které vznikají ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství či výzkumu. V současné době probíhá rekonstrukce ÚRAO Richard s cílem navýšit jeho kapacitu (Obr. 20).



Obr. 20: Dispozice podzemních prostor ÚRAO Richard po rekonstrukci

Podzemní úložiště Bratrství určené pro ukládání odpadů kontaminovaných přírodními radionuklidy nacházející se v úvodní části štolového patra bývalého uranového dolu Bratrství situovaného poblíž města Jáchymov bylo uvedeno do trvalého provozu v roce 1974 (Obr. 21).



Obr. 21: Uspořádání v prostoru úložiště Bratrství

V souladu s Koncepcí nakládání s RAO schválené vládou v roce 2019 (Koncepce 2019) je třeba se zaměřit zejména na

1. přípravu potřebné dokumentace k žádosti související s rekonstrukcí úložiště Richard,
2. přípravu potřebné dokumentace k žádosti o vydání povolení uzavření úložiště Bratrství včetně přípravy bezpečnostního hodnocení potřebného pro povolení uzavření úložiště.

V případě ÚRAO Dukovany je nutné v souvislosti s výstavbou nových jaderných zdrojů zahájit práce na možném rozšíření ÚRAO Dukovany tak, aby tam bylo možno umístit i odpady z nových jaderných zdrojů.

Všechny tyto práce vyžadují pro hodnocení bezpečnosti analýzu ověření předpokladů, na jejichž základě byly provedeny předchozí bezpečnostní rozborů, a případně i získání nových dat.

20.2 Provedené práce

20.2.1 ÚRAO Dukovany

Pro potřeby vyhodnocení dlouhodobé bezpečnosti ÚRAO Dukovany byly v letech 1989-95 postupně vypracovány tři bezpečnostní zprávy (SÚRAO BR Dukovany 1991, Nachmilner et al. 1992, Konopásková et al. 1995), které odrážely aktuální stav technologií při ukládání nízkoaktivních RAO vznikajících při provozu jaderných elektráren Dukovany a Temelín. V roce 2007 byla zpracována aktualizace bezpečnostní zprávy pro povolovací řízení (Konopásková et al. 2007), zohledňující nově mj. používání aluminosilikátového ztužidla pro ionexy a kaly.

Poslední aktualizace bezpečnostní zprávy byla připravena v roce 2016 (Konopásková et al. 2016a).

Jak stav úložiště ÚRAO Dukovany, provozovaného od roku 1995, tak i předpisy dozorného orgánu pro provádění bezpečnostních rozborů, se průběžně mění a vyžadují podrobnější zdůvodnění dat a předpokladů použitých v bezpečnostním rozboru a zohlednění všech vlastností, událostí a procesů, které mohou nastat jak v době provozu úložiště, tak i po jeho uzavření. Práce zaměřené na zpřesnění dat a předpokladů je proto třeba začít s dostatečným předstihem před prováděním vlastního bezpečnostního rozboru.

20.2.2 ÚRAO Richard

Pro úložiště Richard, které je v provozu již od roku 1964, byla provedena řada bezpečnostních rozborů (Janů et al. 1995, SÚRAO BR Richard 1999; Dusílek et al. 2001, Baloun et al. 2003). Poslední projekt pro ÚRAO Richard týkající se bezpečnosti byl vypracován v letech 2016 – 2017 (Dostál et al. 2016, Konopásková et al. 2016b) a jedná se o projekt aktualizace bezpečnostní zprávy, které byly zpracovány ve Studii rekonstrukce úložiště radioaktivního odpadu Richard (Kochánek et al., 2016), jenž se zabývá rozšířením úložných kapacit ÚRAO (možnost ukládat RAO v delším časovém horizontu).

V letech 2006–2007 byla na základě projektu PHARE CZ č. 01.14.03 německou firmou DBE realizována pro tři vybrané komory na ÚRAO Richard (komory č. 8/2, 9 a 12) tzv. „hydraulická klec“, která zlepšuje bezpečnost ÚRAO Richard. V rámci této činnosti byla řada nebezpečných odpadů z těchto komor přebalena a je skladována v úložišti do doby dostupnosti HÚ.

Na základě provedené optimalizace (cena, radiační vlivy) byl koncept „hydraulická klec“ pro úpravu dalších úložných komor opuštěn a od roku 2008 do současnosti se ukládací komory upravují sice méně robustním, avšak méně nákladným způsobem zvaným prostá stabilizace (Dostál et al. 2016, Konopásková et al. 2016).

20.2.3 ÚRAO Bratrství

Pro potřeby vyhodnocení dlouhodobé bezpečnosti ÚRAO Bratrství byly v letech 2003 a 2008 na SÚRAO vypracovány dvě bezpečnostní zprávy. Poslední aktualizace bezpečnostní zprávy byla vypracována v roce 2013 (Konopásková et al. 2013). Jak stav ÚRAO Bratrství, provozovaného od roku 1974, tak i předpisy dozorného orgánu (SÚJB) pro provádění bezpečnostních rozborů se průběžně mění a vyžadují podrobnější zdůvodnění dat a předpokladů použitých v bezpečnostním rozboru, včetně zohlednění všech jevů, událostí a procesů, které mohou nastat v tomto případě, zejména v době uzavírání a dále po uzavření ÚRAO Bratrství. Poslední Studie uzavření ÚRAO Bratrství (Řibříd et al. 2017) byla vypracována ÚJV Řež, a.s., jejímiž dodavateli byly firmy METROPROJEKT Praha a. s. a PROGEO, s.r.o. V současné době se připravuje realizace stabilizace komor v zadní části přístupové chodby s předpokladem vytvoření dalších ukládacích segmentů v přístupové chodbě.

20.3 Plánované práce

Výzkum a vývoj provozovaných úložišť je především svázán s aktualizací bezpečnostních rozborů zohledňujících jak stav úložiště, tak i stav poznání v ČR a ve světě a s přípravou uzavření úložiště Bratrství. Pro zhodnocení stavu jednotlivých úložišť je třeba vycházet i z dat z monitorování. Speciální pozornost bude proto věnována funkční způsobilosti jednotlivých prvků monitorovacích sítí. V případě seismického monitoringu bude provedeno vyhodnocení dat a zhodnocení funkčnosti seismické stanice. Všechny prvky monitorovacích sítí (hydrogeologické, seismické, klimatické) budou napojeny na online monitorovací systém a data budou přenášena v reálném čase do databází SÚRAO.

Dalším z cílů aktualizace bezpečnostních rozborů bude zahrnout do bezpečnostního rozboru nové poznatky získávané v ČR a ve světě. Jde například o výsledky společných evropských projektů, například projektu EURATOM CAST, zaměřeného na prohloubení znalostí o chování uhlíku C-14, který se v poslední době ukazuje jako velmi významný vzhledem k tomu, že se může uvolňovat při korozi kovových materiálů v organické formě, která je mnohem mobilnější než anorganická forma. Je třeba rovněž zhodnotit jeho možný únik v plynné fázi. Zkontrolovat je nutné i hodnoty rozpustnosti a distribučních koeficientů využitých v bezpečnostních rozbořech a případně iniciovat nové laboratorní experimenty.

Aktualizace bezpečnostních rozborů všech tří úložišť musí však vycházet ze zhodnocení stavu a předpokládaných aktivit na konkrétních úložištích. Obecně pro všechna úložiště bude:

- prověřen stav jednotlivých úložišť na základě dat z monitorování horninového prostředí a stavu inženýrských komponent a provedena případná aktualizace výpočetních modelů a monitorování horninového prostředí i inženýrských bariér,
- aktualizace bezpečnostních zpráv z hlediska zahrnutí prověření stavu úložiště, uvažovaných změn v úložišti a nových poznatků ve světě od posledních aktualizací bezpečnostních zpráv.

V případě úložiště v Dukovanech je třeba do aktualizace bezpečnostních zpráv zahrnout:

- možné rozšíření úložiště vybudováním třetího dvouřadu tak, aby zde byla vytvořena kapacita i pro odpady z nových jaderných zdrojů (viz Kap. 7),
- dopracování uzavření ÚRAO Dukovany ve formě úvodního projektu.

Bezpečnost úložiště Richard je založena na funkci inženýrských bariér a geologické bariéry. Systém bariér působí jako celek, proto je zajišťována integrita bariérového systému všude, kde bariéry navazují, nebo kde byly narušeny, ať důlními pracemi při hloubení komor nebo později při provozních činnostech úložiště. Výsledná propustnost výplní komor a těsnění šachet a tunelů by měla být alespoň tak nízká, jako je propustnost neporušené horniny v okolí. Od roku 2009 je zaveden systém odběru svědečných vzorků konstrukčního a výplňového betonu z jednotlivých ukládacích komor. Zatím však nebylo prováděno systematické zhodnocení stavu inženýrských bariér a konstrukčních materiálů ovlivňujících bezpečnost, ale plánuje se, že při dalším hodnocení budou využity i výsledky analýzy svědečných vzorků.

V rámci provozu ÚRAO Richard je nutné počítat s rozšířením současného úložiště a případně i s novými typy skladovacích a ukládacích OS. V rámci aktualizace bezpečnostního rozboru bude proveden screeningový výpočet vlivu rozšíření ÚRAO Richard na bezpečnost a do bezpečnostních modelů budou případně zahrnuty nové typy OS.

ÚRAO Bratrství je provozované již od roku 1974 a v současné době je již téměř naplněna celá jeho kapacita. Všechny výzkumné činnosti budou souviset s přípravou jeho uzavření.

Součástí provedení aktualizace bezpečnostních rozborů je třeba počítat s výzkumným programem zahrnujícím:

- aktualizaci vlastností, událostí a procesů ovlivňujících bezpečnost a odvození souvisejících scénářů vývoje úložiště a expozice člověka a životního prostředí,
- výzkumné práce související s aktualizací dat a ověřením předpokladů pro bezpečnostní rozbor, případně aktualizací výpočetních kódů pro bezpečnostní rozbor.

21 Ukládání odpadů typu NORM/TENORM

21.1 Úvod

NORM/TENORM odpady jsou odpadní materiály s obsahem přírodních radionuklidů, které vznikají při činnostech nesouvisejících se záměrným mírovým využíváním jaderné energie a ionizujícího záření (přírodní radionuklid není využíván pro své radioaktivní, štěpné nebo množivé charakteristiky, včetně činnosti související se získáváním radioaktivního nerostu – odpad není původem z radiačních činností definovaných v § 2 odst. 2 písm. f) bod 2 zákona č. 263/2016 Sb.). Původcem jsou zpravidla provozovatelé pracovišť s materiálem se zvýšeným obsahem přírodního radionuklidu (§ 93 odst. 1 písm. b) zákona č. 263/2016 Sb.), zdrojem odpadů charakteru NORM/TENORM může být ale teoreticky i nezajištěná „stará ekologická zátěž“.

Potřeba odstraňovat významná množství odpadů charakteru NORM/TENORM jako RAO v podmínkách ČR by mohla mít významné dopady na kapacitní, případně jiné technické možnosti provozovaných ÚRAO, a může proto v budoucnu ohrozit bezproblémové plnění povinností SÚRAO vyplývajících ze zákona č. 263/2016 Sb., případně dalších právních předpisů a dokumentů (např. Konceptce nakládání s RAO a VJP v ČR).

Problémy a rizika při mapování výskytu a predikci vzniku odpadů charakteru NORM/TENORM vyplývají zejména z následujících skutečností:

- odpady charakteru NORM/TENORM vznikají v řadě různých průmyslových odvětví, nakládání s materiály charakteru NORM/TENORM v ČR nepodléhá licencování (jejich původci nemusí být držiteli povolení k činnostem podle některého z ustanovení § 9 zákona č. 263/2016 Sb.) a obsah přírodních radionuklidů je z pohledu původců pouze nežádoucím „doprovodným jevem“, kterého si v řadě případů sami původci nejsou vědomi. Přestože platná legislativa (ve vyhlášce č. 422/2016 Sb.) stanoví výčet hospodářských odvětví (činností), ve kterých se výskyt materiálů charakteru NORM/TENORM předpokládá, ke zjištění existence některých zdrojů NORM/TENORM odpadů dochází často náhodně a neočekávaně. To souvisí i se skutečností, že problematice NORM/TENORM odpadů a souvisejícím radiačním rizikům je pozornost věnována zatím pouze po poměrně krátkou dobu (ve srovnání se záměrným mírovým využíváním jaderné energie a ionizujícího záření),
- odpady charakteru NORM/TENORM vzhledem ke svému původu (mimo činnosti související se záměrným mírovým využíváním jaderné energie a ionizujícího záření) nejsou v souladu s platnou legislativou a priori považovány za radioaktivní odpad a předpokládá se jejich primární zneškodňování způsobem „uvolnění z pracoviště“, resp. uvolnění do životního prostředí, kterým se z hlediska atomové legislativy rozumí jiný způsob zneškodnění než prohlášením za RAO a následným uložením v ÚRAO. V praxi ale vznikají i NORM/TENORM odpady s tak vysokými hmotnostními nebo objemovými aktivitami obsažených přírodních radionuklidů, že splnění podmínek pro uvolnění z pracoviště (resp. uvolnění do životního prostředí) je velmi obtížné až nemožné (zejména v případě TENORM). V těchto případech je v současnosti poslední možností zneškodnění prohlášením za RAO a následné odstranění jako RAO,
- problematika NORM/TENORM odpadů souvisí do značné míry s obory, kde se nakládá s velkými objemy látek – těžba a zpracování nerostných surovin vč. těžby fosilních

paliv, úprava vod z podzemních zdrojů, chemický průmysl apod. Od toho se odvíjí i riziko nárazového výskytu větších objemů odpadů NORM/TENORM, které v relaci ke kapacitním možnostem provozovaných ÚRAO tzv. institucionálních RAO mohou představovat v budoucnu problém.

Z výše uvedených skutečností vyplývají i potenciální možné dopady a požadavky na kapacity úložišť RAO v důsledku vzniku NORM/TENORM odpadů.

21.2 Provedené práce

Při řešení této problematiky je možno vycházet z řady předchozích projektů mimo jiné z výsledků projektu TB02SUJB038, *Optimalizace ozáření obyvatel a pracovníků z pracovišť s přírodními zdroji ionizujícího záření v České republice*, řešeného Státním ústavem radiační ochrany, v.v.i. v letech 2014–2016 a podpořeného TAČR formou účelové podpory z veřejných prostředků v rámci Programu veřejných zakázek ve výzkumu, experimentálním vývoji a inovacích pro potřeby státní správy „BETA“ na základě Smlouvy o poskytnutí účelové podpory.

21.3 Plánované práce

Předmětem řešení úkolu bude:

- 1) provedení analýzy a predikce vzniku odpadů charakteru NORM/TENORM (Naturally Occurring Radioactive Materials / Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials) a zpracování přehledu dostupných způsobů jejich odstraňování v podmínkách České republiky (ČR),
- 2) vyhodnocení případných rizik vzniku významných objemů odpadů tohoto charakteru, které by bylo nutno v budoucnu odstraňovat jako radioaktivní odpad (RAO) uložením v úložištích radioaktivního odpadu (ÚRAO) a
- 3) vyhodnocení možností ukládat perspektivně tyto odpady na specializovaných skládkách určených k ukládání velmi nízkou aktivních odpadů.

V rámci řešení problematiky se předpokládá:

- rešerše relevantních zahraničních zdrojů o poznacích v oblasti výskytu NORM/TENORM a způsobu jejich zneškodňování odpadů s důrazem na státy v EU (oblast působnosti Směrnice rady 2013/59/Euratom),
- rešerše relevantních zdrojů o poznacích v oblasti výskytu NORM/TENORM odpadů a způsobu jejich zneškodňování na území ČR,
- spolupráce formou konzultací se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost, Odborem přírodních zdrojů, který se problematikou výskytu NORM/TENORM odpadů dlouhodobě zabývá a provádí v této oblasti státní dozor, zaměřená kromě výskytu a vlastností známých odpadů NORM/TENORM i na současné a perspektivní způsoby jejich zneškodňování,
- spolupráce formou konzultací se státními institucemi, případně komerčními subjekty, poskytujícími služby původcům odpadů NORM/TENORM (provozovatelům pracovišť s materiálem se zvýšeným obsahem přírodního radionuklidu),

- šetření u vybraných známých nebo potenciálních původců (provozovatelů pracovišť s materiálem se zvýšeným obsahem přírodního radionuklidu, vč. případného provedení analýz vzorků, zahrnující stanovení obsahu přírodních radionuklidů a chemické, případně jiné analýzy,
- podle možností šetření u subjektů provádějících pro původce zneškodnění („uvolnění z pracoviště“),
- sestavení „katalogu“ existujících i potenciálních NORM/TENORM odpadů v podmínkách ČR s predikcí předpokládaných vznikajících objemů jejich jednotlivých druhů a s uvedením předpokládaných způsobů odstraňování („uvolnění z pracoviště“, včetně recyklace nebo využití jako sanační materiál, prohlášení za RAO, příp. jiné),
- v rámci projektu bude posouzena perspektivní možnost odstraňování uložením na skládkách pro ukládání velmi nízko aktivních odpadů společně s těmito odpady.

V případě potřeby se předpokládá zadání realizace doplňující odborné studie (studií) k řešené problematice.

22 Harmonogram výzkumných a vývojových prací

V Tab. 10 jsou shrnuty orientační výstupy a orientační termíny hlavních činností popsaných v tomto plánu. Přesnější výstupy a termíny budou upřesněny v rámci přípravy veřejných soutěží a výběru řešitelů jednotlivých prací. Termín výběru finální a záložní lokality závisí především na začátku zahájení výzkumných a průzkumných prací na lokalitách, které umožní získávat potřebné poznatky z lokalit. Tento harmonogram bude proto postupně upřesňován podle vývoje situace na lokalitách.

Tab. 10: Předpokládané výstupy VaV přípravy HÚ do roku 2030 – orientační harmonogram

Zpráva č.	Název výstupu	Termín
1	Aktualizace systému řízení požadavků, procesů, dat, informací a znalostí	12/2023
2	Aktualizace inventáře a vlastností odpadů	12/2023
3	Charakterizace lokalit pro umístění hlubinného úložiště (popisné modely) pro přípravu referenčního technického řešení HÚ a ohodnocení jeho bezpečnosti na základě aktualizace archivních dat, zahraničních dat a dat z experimentů v podzemní laboratoři	06/2024
4	Návrh možného uspořádání hlubinné části HÚ pro referenční lokalitu na základě postupně upřesňovaného popisu lokality	06/2024
5	Návrhy vhodných výplňových materiálů ukládacích vrtů a ukládacích tunelů včetně jejich parametrů a možných technologií jejich výroby a umístování	06/2024
6	Návrhy vhodných výplňových materiálů HÚ VAO a SAO včetně jejich parametrů a možných technologií jejich výroby a umístování	06/2024
7	Návrhy ostatních inženýrských komponent HÚ včetně odhadu jejich parametrů a možných technologií jejich výroby a umístování	06/2024
8	Koncepční návrhy manipulací v podzemní části HÚ, vyhodnocení jejich proveditelnosti a provozní bezpečnosti	06/2024
9	Posouzení vhodnosti navrženého technického řešení UOS pro VJP	06/2024
10	Návrhy vhodných UOS pro VJP z reaktoru LVR 15 a ostatní VAO a SAO	06/2024
11	Shrnutí výsledků experimentů z PVP Bukov	06/2024
12	Aktualizace ceny navržených technických řešení HÚ	09/2024
13	Celkové zhodnocení navržených technických řešení na základě vyhodnocení proveditelnosti, provozní bezpečnosti a ceny	06/2025
14	Bezpečnostní ohodnocení navržených technických řešení podzemní části HÚ (Safety case I)	12/2025
15	Aktualizace plánu VaV do roku 2030	06/2026

Zpráva č.	Název výstupu	Termín
16	Charakterizace vybraných lokalit metodami geologického průzkumu s využitím hlubokých vrtů a dat z podzemní laboratoře	06/2029
17	Výsledky pokračujících experimentů VaV	06/2029
18	Technické řešení povrchových části HÚ na vybraných lokalitách a výsledky aktualizací projektů podzemní části HÚ	06/2029
19	Ohodnocení vlivu úložiště na životní prostředí ve vybraných lokalitách	12/2029
20	Bezpečnostní dokumentace pro výběr a zdůvodnění vybraných lokalit na základě multikriteriální analýzy pro vyjádření SÚJB a zahraniční review (Safety case II)	12/2029
21	Dokumentace a zdůvodnění finální a záložní lokality, projednání se všemi dotčenými stranami a předložení návrhu finální a záložní lokality vládě k rozhodnutí	06/2030

V následující Tab. 11 jsou shrnuty výzkumné a vývojové činnosti potřebné pro zajištění a zvyšování jaderné bezpečnosti a radiální ochrany stávajících úložišť.

Tab. 11: Plánované výzkumné činnosti pro provozované úložiště

Oblast	Výstupy	Termín
ÚRAO Dukovany	Prověření stavu ÚRAO Dukovany na základě monitoringu horninového prostředí a stavu inženýrských komponent	12/2023
	Aktualizace vlastností, procesů a událostí ovlivňujících bezpečnost ÚRAO Dukovany	12/2023
	Výzkumné práce pro aktualizaci dat a výpočetních kódů pro bezpečnostní rozbor	12/2025
	Aktualizace bezpečnostního rozboru ÚRAO Dukovany zohledňující stav úložiště a uvažované změny úložiště	12/2026
ÚRAO Richard	Prověření stavu ÚRAO Richard na základě monitoringu horninového prostředí a stavu inženýrských komponent	06/2021
	Aktualizace vlastností, procesů a událostí ovlivňujících bezpečnost ÚRAO Richard	12/2021
	Výzkumné práce pro aktualizaci dat a výpočetních kódů pro bezpečnostní rozbor	06/2024
	Aktualizace bezpečnostního rozboru ÚRAO Richard zohledňující stav úložiště a uvažované změny, zejména rekonstrukci úložiště	12/2024

Oblast	Výstupy	Termín
ÚRAO Bratrství	Prověření stavu ÚRAO Bratrství na základě monitoringu horninového prostředí a stavu inženýrských komponent a podrobný projekt uzavření ÚRAO Bratrství	12/2022
	Aktualizace vlastností, procesů a událostí ovlivňujících bezpečnost ÚRAO Bratrství	12/2022
	Výzkumné práce pro aktualizaci dat a výpočetních kódů pro bezpečnostní rozbor	12/2024
	Příprava bezpečnostního rozboru pro uzavření ÚRAO Bratrství zohledňující stav před uzavřením	12/2025

23 Reference

- ANDERSSON J., STRÖM A., SVEMAR C., ALMÉN K.-E. AND ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and evaluation. SKB Technical report TR-00-12. SKB Stockholm.
- AUE M. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 153/2017, Praha.
- AUGUSTA J., SLOVÁK J., SMUTEK J., VONDROVIC L., KŘÍŽ P., MAGYAR P (2018): Výstavba a charakterizace Podzemního výzkumného pracoviště Bukov. Tunely a podzemné stavby 2018, 23.–25. 5. 2018 Žilina [online]. s. 11 [cit. 2019-01-18].
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Březový potok. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 470/2020, Praha.
- BAIER J., JANKOVEC J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Hrádek. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 469/2020, Praha.
- BALATKA, B., KALVODA, J. (2008): Evolution of Quaternary river terraces related to the uplift of the central part of the Bohemian Massif. – Geografie – Sborník České geografické společnosti, 113, 3, Praha, pp. 205–222.
- BALOUN S., ČERNÍK., M., SLOVÁK J. (2003): Bezpečnostní analýza ÚRAO Richard, Závěrečná zpráva, opravená verz. - MS SÚRAO 58/2000/SKo-92-3-000292-02, Praha.
- BÁRTA J., GRAND T., HRONČEK S., JIRKŮ J., TEKULA B., TESAŘ M. (2017): Detailní reprocessing geofyzikálních leteckých dat z projektu „GeoBariéra“. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 190/2017, Praha.
- BARTOŇ J., MÁTL V. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Horka, Hrádek, Kraví hora. Závěrečná zpráva pro lokalitu Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 287/2018, Praha.
- BARTON N. R. ET AL. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6 (4): 189-236.
- BARTON N. (1987): Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system. In: Kirkaldie, L. (ed.) 1987. *Rock classification systems for engineering purposes: papers from the symposium on rock classification systems for engineering purposes*, Cincinnati, OH, June 25, 1987. American Society for Testing and Materials. ASTM-STP-984, p. 59-84.
- BEDNARIK M., HOLZER R., TORNAYAI R. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 151/2017, Praha.

- BENEŠ V., BELOV T., JIRKŮ J., BUNEŠ J. BÁRTA J. (2019): Ověření geologických struktur lokality Hrádek geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 435/2019, Praha.
- BIENIAWSKI Z. T. (1973): Engineering classification of jointed rock masses. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, No. 15: 335-344.
- BIENIAWSKI Z. T. (1989): Engineering rock mass classifications. Wiley, New York.
- BROŽ M., LEVÝ O., ŠTRUNC J., HAISLOVÁ R., PEŇÁZ J. (2018): Mikroseismické monitorování potenciální lokality pro umístění HÚ Čertovka. Závěrečná zpráva z plnění za období 1.9.2016 až 30.6.2018. - MS SÚRAO, ZZ 296/2018, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BRÁZDA L., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KAŠPAR V., KOLOMÁ K., KOPAČKOVÁ V., KOUČKÁ L., KUČERA P., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., NOVOTNÁ I., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., TOMEK F., VESELOVSKÝ F., ZUNA M. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. – MS SÚRAO, ZZ 191/2017, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., KRYL J., BOHDÁLEK P., BUDA J., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., HAVLOVÁ V., HOLECZY D., CHABR T., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KNĚSL I., KŘÍBEK B., LAUFEK F., LEICHMANN J., NAVRÁTIL P., POŘÁDEK P., SOEJONO I., SOSNA K., SOUČEK K., ŠVAGERA O., VAVRO L., VAVRO M., VESELOVSKÝ F., WACLAWIK P., ZUNA M. (2019a): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. Technická zpráva za rok 2019. - MS SÚRAO, TZ 421/2019, Praha.
- BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., VONDROVIC L., VAVRO M., SOUČEK K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., ŠVAGERA O., WACLAWIK P., ŘIHOŠEK J., VERNER K., SLÁMA J., VAVRO L., KONÍČEK P., STAŠ L., PÉCSKAY Z., VESELOVSKÝ F., (2019b): Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments. *Engineering Geology*. 2019, 259. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105186. ISSN 00137952. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001379521831723X>.
- BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., LEICHMANN J., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZUNA M., NAVRÁTIL P., BOHDÁLEK P., BOŠKOVÁ M., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., GALEKOVÁ E., GEORGIOVSKÁ L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HLISNIKOVSKÝ K., HOLECZY D., JANKOVSKÝ F., JAROŠ M., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KNĚSL I., KOUČKÁ L., KRYL J., KŘÍBEK B., KUBEŠ M., KUBINA L., KUČERA R., KUKUTSCH R., LAUFEK F., MIXA P., MOZOLA J., NÁSIR M. M., PALÁT J., PATOČKA M., POŘÁDEK P., ROSENDORF T., SOEJONO I., STAŠ L., VAVRO L., VESELOVSKÝ F., VOREL J., WACLAWIK P., WERTICH V., ZAJÍCOVÁ V., ZELINKOVÁ T. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 464/2020, Praha.
- BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018a): Studie umístitelnosti v lokalitě Horka. – MS SÚRAO, TZ 137/2017, Praha.
- BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P. (2018b): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 140/2017, Praha.
- BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P., BÜRGERMEISTEROVÁ R. (2018c): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 141/2017, Praha.

- BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., BAUDIS J., KOBYLKA D., MAREK P., BÜRGERMEISTEROVÁ R. (2018d): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 142/2017, Praha.
- CEBAMA D4.11, Amphos 21 and KIT eds. (2018): Draft of the 2nd Annual Project Workshop Proceeding.
- CZUDEK T. (2005): Vývoj reliéfu krajiny České republiky v kvartéru – Moravské zemské muzeum, Brno, 238 s.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): Mikrobiální koroze za podmínek HÚ pro koncepci ocelový UOS – zhutněný bentonit. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 403/2019, Praha.
- ČERNÝ M., ŠEDIVÁ K. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Horka, Hrádek, Kraví hora. Závěrečná zpráva pro lokalitu Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 287/2018, Praha.
- ČERNÝ M., BAIER J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Čertovka. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 472/2020, Praha.
- ČERNÝ M., BAIER J., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Magdaléna. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 471/2020, Praha.
- ČERNÝ M., ŠEDIVÁ K. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Horka, Hrádek, Kraví hora. Závěrečná zpráva pro lokalitu Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 287/2018, Praha.
- ČERVINKA R., KLAJMONT M., ZEMAN J., VENCELIDES Z. (2018): Chování horninového prostředí / Příprava geochemického modelu úložiště – geochemické výpočty a model reakčního transportu. - MS SÚRAO, TZ 271/2018, Praha.
- ČERVINKA R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., VAŠIČEK R. (2017): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017 – samostatná příloha č. 3. - MS SÚRAO, TZ 271/2018, Praha.
- ČUBOVÁ K., BABOROVÁ L., NĚMEC M., JOHN J. (2017): Speciace radionuklidů v prostředí úložného systému úložiště pro odpady nepřijatelné do přípovrchových úložišť. - MS SÚRAO, TZ 207/2017, Praha.
- DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných údajů. - MS SÚRAO, TZ 486/2018, Praha.
- DIEBOLD P., MÜLLER W. H. (1994): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. NAGRA Baden.
- DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., STOULIL J., STRAKA M. (2018a): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů. - MS SÚRAO, TZ 248/2018, Praha.

- DOBREV D., HANČILOVÁ I., HASAL M., HOKR M., KAŠPAR V., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N., ZUNA M. (2018b): Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech. - MS SÚRAO, TZ 291/2018, Praha.
- DOBREV D., KOUŘIL M., MIRANDA M. A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí. - MS SÚRAO, TZ 406/2019, Praha.
- DOSTÁL, J. ET AL. (2016): Bezpečnostní rozbor ÚRAO Richard, DP1, DP2, DP3, sdružení AmecFW-FJFI-EnviAqua, Brno, 2016.
- DURAS R., BLÁHA P. (2019): Ověření geologických struktur lokality horka geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 434/2019, Praha.
- DUSÍLEK P. ET AL. (2001): Bezpečnostní analýza úložiště RAO Richard, 51-3-000291-000, AQUATEST a. s., 2000-2001.
- DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., SVOBODA J., VENCL M. (2014): Experiment EPSP – stavba zátky pro hlubinné úložiště radioaktivního odpadu v rámci Evropského projektu Dopas. Tunel 23 (2), 4-10.
- EURAD Founding document (2018): Vision, Strategic Research Agenda (SRA), Roadmap, Implementation Plan and Governance Scheme_ European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD), Final 21st September, 2018.
- FIEDLER F., FIEDLER J., NOHEJL J. (2018): Předběžná studie proveditelnosti HÚ v lokalitě Na Skalním. Samostatná příloha závěrečné zprávy. - MS SÚRAO, TZ 219/2018, Praha.
- FISCHER T., KACHLÍK V., VALENTA J., DE ANDRADE F. C. M., VILHELM J. (2017): Reinterpretace archivních geofyzikálních dat. Lokalita Horka. - MS SÚRAO, TZ 124/2017, Praha,.
- FISCHER T., VALENTA J., PEŘESTÝ V., DE ANDRADE F. C. M., VILHELM J., ALEXA M. (2019): Reinterpretace archivních geofyzikálních dat. Lokalita Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 322/2018, Praha.
- FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. - MS SÚRAO, TZ 229/2018, Praha.
- FROŇKA A., FOJTÍKOVÁ I. (2017): Monitoring ovzduší z hlediska výskytu radonu a monitoring ionizujících záření v místech známých anomálií. Průběžná zpráva za rok 2017. - MS SÚRAO, TZ 223/2018, Praha.
- Gondolli J., Červinka R., Dobrev D., Havlová V., Husťáková H. (2018a): Vlastnosti, události a procesy pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště. – MS SÚRAO, TZ 330/2018, Praha.
- GONDOLLI J., KLAJMON M., KOUŘIL M. (2018b): Korozní produkty. - MS SÚRAO, TZ 329/2018, Praha.
- GRÜNWARD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018a): Studie umístitelnosti – Březový potok. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 139/2017, Praha.

- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018b): Studie umístitelnosti – Čertovka. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 141/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018c): Studie umístitelnosti – Čihadlo. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 140/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018d): Studie umístitelnosti – Horka. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 137/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018e): Studie umístitelnosti – Hrádek. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ138/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018f): Studie umístitelnosti – Kraví hora. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 136/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018g): Studie umístitelnosti – Magdalena. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 142/2017, Praha.
- GRÜNWALD, L. ŠPINKA O., POŘÍZEK J., NOHEJL J., FIEDLER F., KOBYLKA D., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A. (2018h): Optimalizace podzemních částí HÚ referenčního projektu. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 134/2017, Praha.
- GVOŽDÍK L., KABELE P., ŘÍHA J., ŠVAGERA O., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A. (2020): Transport radionuklidů z hlubinného úložiště – Testování koncepčních a výpočetních modelů. – MS SÚRAO, TZ 463/2020, Praha.
- HAGROS A., MCEWEN T., ANTILLA P., ÄIKÄS K. (2005): Host Rock Classification. Phase 3: Proposed Classification System (HRC-System). Posiva Workreport 2005-7. POSIVA OY Olkiluoto.
- HAGROS A. (2006): Host Rock Classification (HRC) System for Nuclear Waste Disposal in Crystalline Bedrock. Academic Dissertation. University of Helsinki, Faculty of Science, Dept. of Geology. Pp. 250
- HAIQUAN S., MAŠÍN D., NAJSER J., NEDĚLA V., NAVRÁTILOVÁ E. (2019): Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting-drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements, Géotechnique 69, No. 8, 713 – 726.
- HAMPL S., HŮLE D. (2018): Socioekonomická analýza lokalit ETE jih a EDU západ. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 197/2017, Praha.
- HANÁK, J., ONDRA P., HAVLOVÁ V. (2015): Rešerše petrofyzikálních dat pro území potenciálních lokalit HÚ. – MS SÚRAO, TZ 23/2015, Praha.
- HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., HROUDA F., SOSNA K., ŽIŽKA J., KAŠPAREC I., DĚDEČEK P. (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 103/2017, Praha.

- HANÁK J., ONDRA P. (2017): Petrofyzikální charakteristika horninového prostředí na lokalitě HÚ EDU-západ. Samostatná příloha k průběžné zprávě 2. dílčího plnění. – MS SÚRAO, TZ 116/2017, Praha.
- HANUSOVÁ I., SVOBODA J. A VEČERNÍK P. (2016): Experimental pressure and sealing plug as part of the European DOPAS project – deep geological repository plug demonstration, Clay Minerals 51, 589 – 601.
- HANŽL P., HRDLIČKOVÁ K., AUE M., BÁRTA F., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., ČOUPEK P., FRANĚK J., HROCH T., JANOUŠEK V., JELÍNEK J., KAROUS M., KRAJÍČEK L., KRYŠTOFOVÁ E., KUNCEOVÁ E., MAREČEK L., NOVOTNÁ J., PACHEROVÁ P., PALEČEK M., PERTOLDOVÁ J., POŘÁDEK P., RUKAVIČKOVÁ L., ŘEZNÍČEK P., SEDLÁČEK Z., SEDLÁČKOVÁ I., SKORŠEPA M., SOEJONO I., SVOJTKA M., ŠVAGERA O., VÍT J. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě EDU-západ. - MS SÚRAO, TZ 116/2017, Praha.
- HANŽL P., AUE M., ČOUPEK P., FIEDLER F., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., KAROUS M., KRAJÍČEK L., KRYŠTOFOVÁ E., PALEČEK M., PERTOLDOVÁ J., POŘÁDEK P., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I. A ŠVAGERA O. (2018): Zhodnocení geologických a dalších informací vybraných částí českého moldanubika z hlediska potenciální vhodnosti pro umístění HÚ – EDU Západ; Lokalita HÚ EDU západ – souhrnná závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 219/2018, Praha.
- HARTLEY L., APPELYARD P., BAXTER S., MOSLEY K., WILLIAMS T., FOX A. (2017): Demonstration area discrete fracture network modelling at Olkiluoto. Posiva Working Report 2017-3, Posiva Oy, Finland.
- HASAL M., MICHALEC Z., BLAHETA R. (2019): Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS. - MS SÚRAO, TZ 388/2019, Praha.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I. A DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. - MS SÚRAO, TZ 309/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., VIDENSKÁ K., GONDOLLI J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L. (2015): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalických hornin a migrační parametry hornin Českého masivu. - MS SÚRAO, TZ 13/2015, Praha.
- HAVLOVÁ V., KOLOMÁ K., BRÁZDA L., RUKAVIČKOVÁ L. (2017): Odhad hodnot transportních charakteristik krystalinických hornin Českého masivu. - MS SÚRAO, TZ 102/2017, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018a): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok– MS SÚRAO, TZ 276/2018, Praha..
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018b): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka– MS SÚRAO, TZ 277/2018 , Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., POLÁK M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R., BUKOVSKÁ Z. (2018c): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo– MS SÚRAO, TZ 278/2018, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018d): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z

hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Dukovany-západ (EDU-Z) – MS SÚRAO, TZ 279/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., UHLÍK J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018e): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka– MS SÚRAO, TZ 280/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BAIER J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018f): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek, – MS SÚRAO, TZ 281/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018g): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora– MS SÚRAO, TZ 282/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018h): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna – MS SÚRAO, TZ 283/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., ŘÍHA J., ČERVINKA R. (2018i): Hodnocení vhodnosti lokality pro umístění úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Temelín-jih (ETE-J) – MS SÚRAO, TZ 284/2018, Praha.

HAVLOVÁ V., HOFMANOVÁ E., KOLOMÁ K., TRPKOŠOVÁ D. (2018j): Realizace a vyhodnocení LTD etapa III experimentu v Grimsel Test Site. - MS SÚRAO, TZ 345/2018, Praha.

HAVLOVÁ, V (2018k): Migrační procesy radionuklidů v prostředí krystalinických hornin a migrační parametry hornin českého masivu. - MS SÚRAO, TZ 333/2018, Praha.

HAVLOVÁ, V. (2020): Závěrečná zpráva projektu Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení HÚ. - MS SÚRAO, TZ 462/2020, Praha,.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., DUŠEK K., FIFERNOVÁ M., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., SOJONO I., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020a): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 447/2020, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., DUŠEK K., FIFERNOVÁ M., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KŮRKOVÁ I., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČEK V., ŽÁČKOVÁ E. (2020b): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 448/2020, Praha.

HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., POLÁK M., ČERNÝ M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., NÝVL D., PETYNIÁK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H. (2020c): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.

- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA I., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HANŽL P., HOLEČEK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNYIAK O., RUKAVIČKOVÁ L., SEDLÁČKOVÁ I., SOEJONO I., ŠÍR P., ŠVAGERA O., ŽÁČKOVÁ E., VOJTĚCHOVÁ H., UHLÍK J., GVOŽDÍK L. (2020d): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita EDU-západ. – MS SÚRAO, TZ 450/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BAIER J., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNYIAK O., POLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H. (2020e): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Horka. – MS SÚRAO, TZ 452/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., MILICKÝ M., BUKOVSKÁ Z., ČERNÝ M., DUDÍKOVÁ B., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PETYNYIAK O., POLLÁK M., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020f): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 453/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., UHLÍK J., JANKOVEC J., MILICKÝ M., BURIÁNEK D., BUKOVSKÁ Z., DUŠEK K., FRANĚK J., HOLEČEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PEŘESTÝ V., PETYNYIAK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H. (2020g): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Kraví hora – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., ČERNÝ M., POLÁK M., MILICKÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., DUDÍKOVÁ B., DUDKOVÁ I., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., JANKOVEC J., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., PACHEROVÁ P., PETYNYIAK O., RAPPRIČH V., RUKAVIČKOVÁ L., ŠÍR P., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VOJTĚCHOVÁ H. (2020h): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 455/2020, Praha.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., MIXA P., JANKOVEC J., UHLÍK J., ČERNÝ M., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., BAIER J., DUŠEK K., FRANĚK J., GVOŽDÍK L., HEJTMÁNKOVÁ P., HOLEČEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KUČERA R., MILICKÝ M., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PETYNYIAK O., PEŘESTÝ POLÁK M., V., RAPPRIČH V., ŘIHOŠEK J., RUKAVIČKOVÁ L., ŠVAGERA O., VOJTĚCHOVÁ H., ŽÁČKOVÁ E. (2020i): Hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti. Lokalita Janoch (ETE-jih). – MS SÚRAO, TZ 449/2020, Praha.
- HLISNIKOVSKÝ K., MIŠTARKA J., NAVRÁTIL P., ONDRÍK J., SVOBODA M., ŠVARCOVÁ H. (2018): Digitalizace archivních geofyzikálních dat průzkumného území Hrádek a jeho širšího okolí. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 234/2018, Praha.

- HOFMANOVÁ E., ČERVINKA R., VOPÁLKA D. (2019): Transport radionuklidů z úložiště/vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry. - MS SÚRAO, TZ 420/2019, Praha,.
- HOKR M., RUKAVIČKOVÁ L., HAVLOVÁ V., BALVÍN A., BÁRTA J., DĚDEČEK P., HOFMANOVÁ E., HOLEČEK J., MÁLEK J., MARTÍ X., PETRUŽÁLEK M., RÁLEK P., ROWBERRY M., ŠAFANDA J., ŽANDA L. (2018): Vývoj a ověřování metodik pro charakterizaci horninového prostředí – Výsledky monitoringu v přivaděči Bedřichov. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 289/2018, Praha.
- HOKR M., TRPKOŠOVÁ D., VETEŠNÍK A., ŘIHA J., HAVLOVÁ V., VOPÁLKA D., GVOŽDÍK L. (2020): Testování transportních modelů s využitím in-situ zahraničních experimentů. – MS SÚRAO, TZ 480/2020, Praha.
- HOLUB, J. ET AL. (1999): Referenční projekt povrchových i podzemních systémů HÚ v hostitelském prostředí granitových hornin v dohodnuté skladbě úvodního projektu a hloubce projektové studie. – MS SÚRAO, Praha.
- HROCH T., HOŠEK J., NÝVLT D., PAČES T., ŠEBESTA J., HEJTMÁNKOVÁ P. (2015): Erozní stabilita území. - MS SÚRAO, TZ 25/2015, Praha.
- HRUTKA M., NEDVĚD J., SPĚŠNÝ M. (2019): Ověření geologických struktur lokality Čihadlo geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 433/2019, Praha.
- IAEA (1994): International Atomic Energy Agency, Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series No. 111-G-4.1, IAEA, Vienna 1994.
- IAEA (2009): Safety assessment for facilities and activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR, Part 4, Vienna 2009.
- IAEA (2011a): Disposal of radioactive waste, specific safety requirements, SSR-5, Vienna 2011.
- IAEA (2011b): Geological disposal facilities, Specific Safety Guide, SSG-14, Publication 1483, , Appendix I" Siting of geological disposal facilities, Vienna 2011.
- IAEA (2012): The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG 23, Vienna 2012.
- IAEA (2014): Planning and design considerations for geological repository programmes of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1755, Vienna 2014.
- IAEA (2015): Site survey and site selection for nuclear installations. Specific Safety Guide, Safety Standards Series No. SSG-35. IAEA. Vienna 2015.
- ICRP 2013. Radiological protection in geological disposal of long-lived radioactive waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42 (3).
- IGD-TP Strategic Research Agenda (SRA), July 2011, ISBN 978-91-979786-0-6.
- JANKOVEC J., BAIER J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Na Skalním (EDU-západ). Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 473/2020, Praha.

- JANKOVEC J., BAIER J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., POLÁK M., UHLÍK J. (2020b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Janoch (ETE-jih). - Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 474/2020, Praha.
- JANŮ M., MARŠÁL J., HOLUB J. (1995): Bezpečnostní studie jaderné zařízení důl Richard Litoměřice, NYCOM a. s., 1995.
- JIRKŮ J., BELOV T., BENEŠ V., BÁRTA J., DVOŘÁKOVÁ K., VERNER K. (2019): Ověření geologických struktur lokality Kraví hora geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 439/2019, Praha.
- KABELE P., ŠVAGERA O., SOMR M., NEŽERKA V., ZEMAN J., JELÍNEK J., BUKOVSKÁ Z., SOEJONO I., FRANĚK. J. (2018): Mathematical modelling of brittle fractures in rock mass by means of the DFN method. - MS SÚRAO, TZ 286/2018, Praha.
- KALÁB Z., ŠÍLENÝ J., LEDNICKÁ M., JECHUMTÁLOVÁ Z. (2015): Seismická stabilita území. – MS SÚRAO, TZ 26/2015, Praha.
- KAROUS M., NIKL P., GÜRTLER R. (2019): Ověření geologických struktur lokality EDU-západ geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 438/2019, Praha.
- KAŠPAR R., NEDVĚD J., SPĚŠNÝ M. (2019): Ověření geologických struktur lokality ETE-jih geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 439/2019, Praha.
- KING F, (2014): Durability of high level waste and spent fuel disposal containers – an Overview of combined effect of chemical and mechanical degradation mechanisms, Appendix B.2 – R-Corrosion of Carbon steel, Amec Report Reference 17697-TR-03, Appendix B.2, January 2014
- KOCHÁNEK, M. ET AL. (2016): Studie rekonstrukce ÚRAO Richard, sdružení METROPROJEKT+ÚJV Řež – ÚRAO Richard. – MS SÚRAO, Praha.
- KONOPÁSKOVÁ S., ŠTEFAN J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L. (2016a): Bezpečnostní zpráva ÚRAO Dukovany, Aktualizace k povolovacímu řízení, SÚRAO s využitím podkladů Progeo. - MS SÚRAO, Praha.
- KONOPÁSKOVÁ S., LIETAVA P., NACHMILNER L. , VOKÁL A. (1995): Průběžná bezpečnostní zpráva ÚRAO Dukovany, - MS SÚRAO, Praha.
- KONOPÁSKOVÁ S., MILICKÝM., POLÁK M., LANDA J., LUKIN D., A. VOKÁL (2007): Bezpečnostní zpráva ÚRAO Dukovany, Aktualizace k povolovacímu řízení, SÚRAO s využitím podkladů zpracovaných ÚJV a Progeo. - MS SÚRAO, Praha.
- KONOPÁSKOVÁ, S. ET AL. (2013): Bezpečnostní zpráva ÚRAO Bratrství, Aktualizace k povolovacímu řízení, SÚRAO, s využitím zkušeností z provozu ÚRAO Bratrství v letech 2003-2013, předchozích bezpečnostních zpráv a bezpečnostních rozborů z let 2008-2010, a s využitím výsledků HG monitorování spol. GEOTIP s.r.o. - MS SÚRAO, Praha.
- KONOPÁSKOVÁ, S. ET AL. (2016b): Bezpečnostní rozbor ÚRAO Richard, Hodnocení ke Studii rekonstrukce Richard (s využitím výsledků hodnocení HG modelu Progeo s.r.o.). - MS SÚRAO, Praha.

- KOPAČKOVÁ V., JELÍNEK J., ŠVAGERA O., HROCH T., KOUCKÁ L., JELÍNEK J., SKÁCELOVÁ Z., FÁROVÁ K. (2017): Morfostrukturní analýza širšího okolí průzkumných území HÚ pomocí DPZ. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 115/2017, Praha.
- KOTNOUR P., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MATOUŠEK J., LOVECKÝ M., ŠIK J., MACÁK P., PECHMANOVÁ E., KRÍŽOVSKÝ M., MALINA J., MATAL O., ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČERMÁK J., KRÁL L. (2019): Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku 3. etapa. - MS SÚRAO, TZ 411/2019, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018a): Popis lokality – Březový potok. – MS SÚRAO, TZ 260/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018b): Popis lokality – Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 261/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018c): Popis lokality – Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 262/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018d): Popis lokality – Horka. - MS SÚRAO, TZ 263/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018e): Popis lokality – Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 264/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018f): Popis lokality – Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 265/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018g): Popis lokality – Magdaléna. - MS SÚRAO, TZ 266/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018h): Popis lokality – Na Skalním. - MS SÚRAO, TZ 267/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., POSPÍŠKOVÁ I., KONOPÁČOVÁ K., ELIÁŠ M. (2018i): Popis lokality – Janoch. - MS SÚRAO, TZ 268/2018, Praha.
- KOVÁČIK M., VONDROVIC L., VENCL M., URÍK J., ELIÁŠ M. (2019): Výčet realizovaných geologických průzkumných a výzkumných prací v lokalitách a polygonech pro hlubinné úložiště vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů v České republice (2015-2018). - MS SÚRAO, TZ 482/2020, Praha.
- KRAJÍČEK L., BRODECKÁ A., DANĚK T., CEJNAR P., CHLANOVÁ L., KAREL J., KUBEŠOVÁ A., VOLF O., WICHSOVÁ M. (2018): Studie vlivů HÚ v lokalitě „Na Skalním“ na životní prostředí. Samostatná příloha č. 3 závěrečné zprávy. - MS SÚRAO, TZ 2019/2018, Praha.
- KUCHOVSKÝ T., ŘÍČKA T., NEČAS P., DALAJKOVÁ I., SIONOVÁ P., VOŠÍHLÍKOVÁ D., KNÍŽEK M., PRACNÝ P., DAŇKOVÁ L., BEDNÁŘ D., URBAN M. (2017): Termometrie povrchových toků a vývěrů podzemních vod na lokalitách Čihadlo, Magdaléna, Březový potok, Čertovka a Hrádek. Dílčí zpráva. - MS SÚRAO, TZ 111/2017, Praha.

- LEVÁ B., CHABR T., ŠTAINBRUCH J., VALENTOVÁ H. (2019): Ověření geologických struktur lokality Březový potok geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 431/2019, Praha.
- LEVÝ O., FILIPSKÝ D., GRINČ M. (2019a): Geofyzikální výzkum hlubokých struktur a geometrie horninového masivu. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 440/2019, Praha.
- LEVÝ O., LINHARTOVÁ R., FILIPSKÝ D., ŠTAINBRUCH J. (2019b): Ověření geologických struktur lokality Čertovka geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 432/2019, Praha.
- LORD N. S., LUNT., THORNE M. (2019): Modelling changes in climate over the next 1 million years. SKB TR 19-09.
- MÁLEK J., PRACHAŘ I., VACKÁŘ J., MAZANEC M. (2018): Pravděpodobnostní hodnocení seismického ohrožení lokalit vybraných pro umístění hlubinného úložiště. Expertní posouzení. – MS SÚRAO, TZ 232/2018, Praha.
- MALÍK J. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Čertovka. – MS SÚRAO, TZ 155/2017, Praha.
- MAREK P. (2018a): Studie vlivů na životní prostředí – Kraví Hora. - MS SÚRAO, TZ 143/2017, Praha.
- MAREK P. (2018b): Studie vlivů na životní prostředí – Horka. - MS SÚRAO, TZ 144/2017, Praha.
- MAREK P. (2018c): Studie vlivů na životní prostředí – Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 145/2017, Praha.
- MAREK P. (2018d): Studie vlivů na životní prostředí – Březový potok. - MS SÚRAO, TZ 146/2017, Praha.
- MAREK P. (2018e): Studie vlivů na životní prostředí – Čihadlo. - MS SÚRAO, TZ 147/2017, Praha.
- MAREK P. (2018f): Studie vlivů na životní prostředí – Čertovka. - MS SÚRAO, TZ 148/2017, Praha.
- MAREK P. (2018g): Studie vlivů na životní prostředí – Magdaléna. - MS SÚRAO, TZ 149/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018a): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Kraví hora – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 157/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018b): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Horka – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 158/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018c): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Hrádek – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 159/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018d): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Březový potok – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 160/2017, Praha.

- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018e): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Čihadlo – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 161/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018f): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Čertovka – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 162/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018g): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Magdaléna – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 163/2017, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018h): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Janoch – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 317/2018, Praha.
- MARTINČÍK J., VRBA T., ČECHÁK T., THINOVÁ L., PRŮŠA P., MUSÍLEK L., ZAHRADNÍK O., LOUŽENSKÝ T., VEVERKA A., NOHEJL J. A FIEDLER F. (2018i): Studie zadávací bezpečnostní zprávy na lokalitě Na Skalním – provozní bezpečnost. - MS SÚRAO, TZ 318/2018, Praha.
- MC EWEN T. (2002): Host rock classification. Phase 1: The factors that determine the location and layout of a repository – a review. Working Report 2002-36. POSIVA OY, Olkiluoto.
- MIXA P., RUKAVIČKOVÁ L., MILICKÝ M., SKÁCELOVÁ Z., HROCH T., TENENKO V., ŠPAČEK P., NOVOTNÝ J., BUKOVSKÁ Z., ČERNÍK M., DOBEŠ P., DONÁT A., HANÁK J., HANŽL P., HAVLOVÁ V., PRCHAL K., HRDLIČKOVÁ K., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KONÍČEK P., KYCL P., LEXA O., PECINA V., PERTOLDOVÁ J., SEDLÁČEK J., SOUČEK K., STEINOVÁ J., SVOBODA J., ŠTRUPL V., ŠVAGERA O., VAVRO M., WACLAWIK P. (2019a): Aktualizace a konkretizace projektu geologických prací na hypotetické lokalitě. - MS SÚRAO, TZ 390/2019, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., JELÍNEK J., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V. (2019b): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. - MS SÚRAO, TZ 412/2019, Praha.
- MIXA P., SKÁCELOVÁ Z., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ B., FRANĚK J., HRDLIČKOVÁ K., NAHODILOVÁ R., SOEJONO I., VERNER K., ŽÁČEK V., JELÍNEK J., PETYNIÁK O., RUKAVIČKOVÁ L., KRYŠTOFOVÁ E., KŮRKOVÁ I., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., GRUNDLOCH J., PACHEROVÁ P., KOLEJKA V., HUDEČKOVÁ E., JELÉNEK J., PECINA V., KRYL J., ŠVAGERA O., GILÍKOVÁ H., LOJKA R., PEŘESTÝ V., VOREL T., KNOTEK J., MÜLLEROVÁ P., HEJTMÁNKOVÁ P., KUNCEOVÁ E., ZEMKOVÁ M., KARENOVÁ J., FIFERNOVÁ M., AMBROZEK V., HÁJEK T., ŽÁČKOVÁ E., ZELINKOVÁ T., KUČERA R. (2020): Aktualizace 3D strukturně geologických modelů potenciálních lokalit hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Verze 1.2. - MS SÚRAO, TZ 500/2020, Praha.
- MÜLLER W. H., NOLD A. L., PÖTTINFER J., VAN DORP F., VOMVORIS S., UMEKI H., CURTI E., HADERMANN J., KLOS R., MAZUREK M., GAUTSCHI A., MCCOMBIE C., MCKINLEY I., SMITH P., THURY M., ZUIDEMA P. (1994): Kristallin I. Gesamtsynthese der regionalen Untersuchungen zur Entlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. Technischer Bericht 93-09. NAGRA Wettingen.

- NACHMILNER L., VANĚČEK M., LIETAVA P., KONOPÁSKOVÁ S., LAŠTOVKA J., KOUŘÍM V. (1992): Bezpečnostní rozbory ÚRAO Dukovany, ÚJV Řež.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A. (2017): Zpráva o provedení geologicko-výzkumných prací na lokalitě ETE-jih. - MS SÚRAO, TZ 126/2017, Praha.
- NAVRÁTILOVÁ V., NOL O., KAŠPAR R., LANČA D., MIŠUREC J., NEDVĚD J., RAJCHL M., SOSNA K., ŠINDELÁŘ M., TLAMSA J., VOJTĚCHOVSKÁ A., KRUPIČKOVÁ L. (2018a): Hodnocení PÚ ZZZK a návrh navazujících geologických prací. Souhrnná závěrečná zpráva ETE – jih. - MS SÚRAO, TZ 222/2018, Praha.
- NAVRÁTILOVÁ V., TLAMSA J., SOSNA K., SKOŘEPA Z., NOŽIČKA L., BROTÁNEK F., KRUPIČKOVÁ L., KOUBOVÁ R., ŠINDELÁŘOVÁ J., HEJRAL J., PROVAZNÍK J. (2018b): Předběžná studie proveditelnosti – lokalita ETE – jih. Samostatná příloha D1 závěrečné zprávy. - MS SÚRAO, TZ 222/2018, Praha.
- NAVRÁTILOVÁ V., TLAMSA J., SOSNA K., SKOŘEPA Z., NOŽIČKA L., BROTÁNEK F., KRUPIČKOVÁ L., KOUBOVÁ R., ŠINDELÁŘOVÁ J., HEJRAL J., PROVAZNÍK J. (2018c): Studie vlivů na životní prostředí (EIA) – lokalita ETE – jih. Samostatná příloha D2 závěrečné zprávy. - MS SÚRAO TZ 222/2018, Praha.
- Návrh způsobu vyřazování výzkumného jaderného reaktoru LVR-15 z provoz. - evid. zn. DPP 8400.16, Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2015.
- Návrh způsobu vyřazování z provozu JE Dukovany, 12/2012. - EGP Invest, spol. s r.o., arch. číslo EGPI-6-120400.
- Návrh způsobu vyřazování z provozu JE Temelín, 7/2014, ÚJV Řež, a.s. divize ENERGOPROJEKT. - arch. číslo EGP 5014-F-140502.
- NIKL P., GÜRTLER R. (2019): Ověření geologických struktur lokality Magdaléna geofyzikálními metodami. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 437/2019, Praha.
- NOVOTNÝ J. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Čihadlo. – MS SÚRAO, TZ 154/2017, Praha.
- NÝVL D., DOBROVOLNÝ P. (2015): Klimatická stabilita území. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 22/2015, Praha.
- ONDŘÍK J., HLISNIKOVSKÝ K., MIŠTARKA J., SVOBODA M., ŠVARCOVÁ H. (2016a): Digitalizace archivních geofyzikálních dat průzkumného území Horka a jeho širšího okolí. - MS SÚRAO, TZ 46/2016, Praha.
- ONDŘÍK J., HLISNIKOVSKÝ K., MIŠTARKA J., SVOBODA M., NAVRÁTIL P. (2016b): Digitalizace archivních geofyzikálních dat průzkumného území Kraví hora a jeho širšího okolí. - MS SÚRAO, TZ 70/2016, Praha.
- PACOVSKÝ J., ŠTÁSTKA J.. (2018): Návrh a výroba směsi bentonitových pelet. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, ZZ 362/2019, Praha.
- PATOČKA M., JAROŠ M. (2018): Interpretace geologické dokumentace vrtů S-22, S-23, S-24, S-25 a S-26. - MS SÚRAO, TZ 225/2018, Praha.

- PERNICOVÁ R., KOLÍSKO J., DOBIÁŠ D., ČÍTEK D., MANDLÍK T. (2019), Souhrnná zpráva 3. etapy k problematice betonu s nízkým pH určeným do prostředí úložiště radioaktivního odpadu. - MS SÚRAO, TZ 405/2019, Praha.
- PETRUŽÁLEK M. (2017): Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů na potenciálních lokalitách HÚ. - MS SÚRAO, TZ 88/2017, Praha.
- POLÁK M., BAIER J., ČERNÝ M., JANKOVEC J., GVOŽDÍK L., MILICKÝ M., UHLÍK J. (2020): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Čihadlo. Závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 475/2020, Praha.
- POSIVA SKB, REPORT 01 (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for SKB-3V repository, 2017.
- POSIVA SKB, REPORT 06 (2017): KBS-3H, System Design Phase 2011-2016, Final Report, July 2017.
- POSPÍŠIL P., KOVÁŘ L., GRYGAR R., RAPANTOVÁ N., CAMFRLOVÁ M., RACIOK M., POLÁČEK A., LEÓN T. C., BERÁNEK J. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Kraví hora. – MS SÚRAO, TZ 150/2017, Praha.
- POSPÍŠKOVÁ I. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivního odpadu v hypotetické lokalitě, ÚJV Řež a.s. divize Energoprojekt, 2011.
- POSPÍŠKOVÁ I., VOKÁL A., VONDROVIC L., DUSÍLEK P., DVOŘÁKOVÁ M., HANUSOVÁ I., KOVÁČIK M., VENC L., VOKÁL A., WOLLER F., (2015): Střednědobý plán výzkumu a vývoje pro potřeby umístění hlubinného úložiště v ČT 2015 – 2025. - MS SÚRAO, TZ 1/2015, Praha.
- POYET S. (2006): The Belgian supercontainer concept: Study of the concrete buffer behaviour in service life. Journal de Physique 4, EDP Sciences, 2006, Corrosion and Long Term Performance of Concrete.
- PRACHAŘ I. (2018): Vyhodnocení lokality EDU – Z z hlediska vhodnosti k umístění hlubinného úložiště. Zhodnocení geologických, geotechnických, seismotektonických a hydrogeologických hazardů. Samostatná příloha č. 1 závěrečné zprávy. - MS SÚRAO, TZ 219/2018, Praha.
- PRACHAŘ I. (2020): Použití geofyzikálních metod při hodnocení zlomů na lokalitách vybraných pro umístění hlubinného úložiště. Odborné posouzení. - MS SÚRAO, TZ 466/2020, Praha.
- RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015a): Rešeršní složení a geometrie analyzovaných palivových souborů. - MS SÚRAO, TZ 7/2015, Praha.
- RATAJ J., FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., FEJT F. (2015b): Databáze VJP pro bezpečnostní rozborů. - MS SÚRAO, TZ 28/2015, Praha.
- RÖSCH H., MISSELWITZ I., EBERT M., MOSSMANN D. (1988): Höhenänderungen in der Nordschweiz und in Südschwarzwald bis zum Bodensee. Technischer Bericht 85-05. NAGRA Baden.
- ROUT J., MAŠÍN D. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Hrádek. – MS SÚRAO, TZ 152/2017, Praha.

- RUKAVIČKOVÁ L., BLÁHA, V., OTRUBOVÁ, D. (2006): Melechovský masiv – Hydrogeologický výzkum ve vrtech Mel-1, Mel-2, Mel-3, Mel-4, Mel-5 2. etapy výběru testovacích polygonů. - MS SÚRAO, TZ 43/06, Praha.
- RUKAVIČKOVÁ L., ŘIHOŠEK J., MYŠKA O. (2017): Měření Eh a obsahu kyslíku ve vrtech v PVP Bukov. Odběr vzorků vod z monitorovací sítě. - MS SÚRAO, TZ 188/2017, Praha.
- ŘIBŘID J. et al. (2017): Studie uzavření ÚRAO Bratrství. – MS SÚRAO, Praha.
- ŘÍČKA A., KUCHOVSKÝ T., NEČAS P., DALAJKOVÁ I., SIONOVÁ P., VOŠAHLÍKOVÁ D. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Čihadlo, Magdaléna, Březový potok a Čertovka. - MS SÚRAO, TZ 216/2018, Praha.
- ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., MARYŠKA J., KRÁLOVCOVÁ J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., MILICKÝ M., BAIER J., TRPKOŠOVÁ D., HAVLOVÁ V. (2018): Transportní modely – závěrečná zpráva. – MS SÚRAO, TZ 324/2018, Praha.
- SANDÉN, T., OLSSON, S., ANDERSSON, L., DUECK, A., JENSEN, V., HANSEN, E., JOHNSON, A. (2014): Investigation of backfill candidate materials, SKB R-13-08.
- SAVAGE D., LIND A. AND ARTHUR R. (1999): Review of the properties and use of bentonite as a buffer and backfill material. SKI report 98233.
- SELNERT E., BYEGARD J., WIDERSTRAND H. (2008): Forsmark site investigation. Laboratory measurements within the site investigation programme for the transport properties of the rock. Final report – SKB, P-07-139.
- SCHMIDTKE R. H., LAJTAI E. Z. (1985): The Long Term Strength of Lac du Bonnet Granite. Intl. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 22. No. 6, pp. 461-645.
- SCHRÖFEL J., CHAMRA S., STEIGER M., VALENTA J. (2018): Účelová mapa inženýrskogeologické rajonizace 1:10 000, lokalita Magdaléna. – MS SÚRAO, TZ 156/2017, Praha.
- SKB [online]. [cit. 2019-08-16]. <https://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-methodology/>.
- SKBF/KBS document (1983), Final Storage of Spent Nuclear Fuel – KBS-3.
- SKEŘIL R., ANTOŠOVÁ Š. (2017): Měření kvality ovzduší v lokalitě Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 118/2017, Praha.
- SKOŘEPA Z. (2018): Studie vlivů na životní prostředí (EIA) – lokalita ETE-jih. – MS SÚRAO, TZ 222/2018, Praha.
- SMART N.R., RANCE A.P., NIXON D.J., FENNEL A.H., REDDY B. AND KURSTEN B. (2017): Summary of studies on the anaerobic corrosion of carbon steel in alkaline media in support of the Belgian supercontainer concept, Corrosion Engineering, Science and Technology, 52: sup1, 217-226, DOI: 10.1080/1478422X.2017
- SOUČEK K., VAVRO M., STAŠ L., KALÁB Z., KONÍČEK P., GEORGIOVSKÁ L., KALÁB T., KONEČNÝ P., KOLCUN P., KRÁLOVÁ L., KUBINA L., LEDNICKÁ M., MALÍK J., MARTINEC P., PTÁČEK J., VAVRO L., WACLAWIK P., ZAJÍCOVÁ V. (2018): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část II: Geotechnická charakterizace. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 221/2018, Praha.

SSMFS 2008:37 dokument: The Swedish radiation safety authority regulations and general advice concerning the protection of human healths and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste, ISSN 2000- 09987.

STAŠ L., BLÁHA P., DURAS R. GEBAUER J., GEORGIOVSKÁ L., KAJZAR V., KALÁB T., KOHUT R., KOLCUN A., KUKUTSCH R., MALÍK J., NOVOTNÁ J., SOUČEK K., VAVRO M., ZAJÍCOVÁ V. (2018): Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov. Závěrečná zpráva – MS SÚRAO, TZ 351/2019, Praha.

STAŠ L., MALÍK J., FRANĚK J., KOLCUN A., KOHUT R., KALÁB T., PETRLÍKOVÁ A., BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BURIÁNEK D. (2020): Study of the stress conditions and internal anisotropy in an environment of granitic rocks. Final report. – MS SÚRAO, TR 499/2020/ENG, Praha.

STEINOVÁ J., BURKARTOVÁ K., MIKEŠ J., ZUNA M., ČERNÍK M. (2019): Mikrobiální screening PVP Bukov a dolu Rožná. Závěrečná zpráva projektu. – MS SÚRAO, TZ 382/2019, Praha.

SÚJB dokument (2018), BN.JB-OD-1.1, Povolování činností v oblasti nakládání s RAO (Rev.0.0), srpen 2018.

SÚRAO (2019), Podzemní výzkumné pracoviště Bukov – Experimentální program 2015–2019. https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/09/surao_brozura_bukov_online.pdf.

SÚRAO dokument, Bezpečnostní rozbor lokality ÚRAO Dukovany (BR Dukovany, 1991), ÚJV Řež, březen 1991.

SÚRAO dokument, Bezpečnostní rozbor ÚRAO Richard, dokumentace k povolovacímu řízení (BR Richard, 1999), ev. ozn. ZA.B.04/Ri, SÚRAO, říjen 1999.

SVOBODA J. ET AL.(2019): Experimentální hodnocení plynopropustnosti inženýrských bariér HÚ. - MS SÚRAO, TZ 384/2019, Praha.

SVOBODA J., VAŠÍČEK R., SMUTEK J., HAUSMANNOVÁ L., FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L. A VEČERNÍK P. (2019): Interakční experiment v PVP Bukov, Sborník abstraktů 14. mezinárodní konference Pozemní stavby, Praha 2019.

SVOBODA K., ŠÍR D., BURIAN P., MILER V., MATĚCHA J., POŠVAŘ R., TRTÍLEK R. (2017): Biologické stínění reaktoru. - MS SÚRAO, TZ 203/2017, Praha.

ŠEDIVÁ K. (2018): Monitoring vodních zdrojů, vodních ploch a vodotečí v ploše průzkumného území Horka, Hrádek, Kraví hora. Závěrečná zpráva pro lokalitu Horka. - MS SÚRAO, TZ 287/2018, Praha.

ŠIMŮNEK P., PISKAČ J., PRACHAŘ I., TUCAUEROVÁ D., ROMPORTL B., BLAŽEK J. (2003): Výběr lokality a staveniště HÚ RAO v ČR. Analýza území ČR. Fáze regionálního mapování. – MS SÚRAO, TZ 55/2003, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018a): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 136/2017, Praha.

ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018b): Studie umístitelnosti v lokalitě Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 138/2017, Praha.

- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J. A KOBYLKA D. (2018c): Studie umístitelnosti v lokalitě Březový potok. - MS SÚRAO, TZ 139/2017, Praha.
- ŠTÁSTKA J. (2014): Demonstrační experiment Mock-Up Josef, Tunel 23, TZ 2/2014, str. 65 – 73.
- THÖLIX L., KORHONEN H., RUOSTEENOJA K. (2018): Climate Projections for Olkiluoto, WR 2018-9. POSIVA.
- Touš M., ČUBOVÁ K. (2017): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť. - MS SÚRAO, TZ 201/2017, Praha.
- Touš M., HAVLOVÁ V., ČUBOVÁ K. (2018): Inventarizace RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť, Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 230/2018, Praha.
- TRPKOŠOVÁ, D., HAVLOVÁ, V., DOBREV, D., HUSŤÁKOVÁ, H., GONDOLLI, J., KLAJMON, M., MIRANDA, A. N. M., VAČERNÍK, P., BUKOVSKÁ, Z., RATAJ, J., FRÝBORT, J., FEJT, F., ŠTAMBERG, K., VETEŠNÍK, A., VOPÁLKA, D., UHLÍK, J., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ, J., ŘÍHA, J., MARYŠKA, J., STEINOVÁ, J., STAŠ, L. (2018): Bezpečnostní rozbor dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště na lokalitě KRAVÍ HORA. - MS SÚRAO, TZ 334/2018, Praha.
- UHLÍK J., BAIER J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., JANKOVEC J., MILICKÝ M., POLÁK M. (2020a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Horka. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 476/2020, Praha.
- UHLÍK J., BAIER J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., JANKOVEC J., MILICKÝ M., POLÁK M. (2020b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – lokalita Kraví hora. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 477/2020, Praha.
- UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., POLÁK M., ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. Závěrečná zpráva. - MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.
- VAVRO M. (2016): Shrnutí zahraničních poznatků o vzniku a vývoji EDZ v krystalinických horninách – rešerše. - MS SÚRAO, TZ 50/2016, Praha.
- VOKÁL A., POSPÍŠKOVÁ I., VONDROVIC L., STEINEROVÁ L., KOVÁČIK M. A ČECH P (2017): Metodický pokyn SÚRAO MP.22, Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště, vydání 03, 2017.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018a): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Březový potok. - MS SÚRAO, TZ 297/2018, Praha.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018b): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Čertovka. - MS SÚRAO, TZ 298/2018, Praha.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018c): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Čihadlo. - MS SÚRAO, TZ 299/2018, Praha.

- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018 d): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Horka. - MS SÚRAO, TZ 300/2018, Praha.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018e): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Hrádek. - MS SÚRAO, TZ 301/2018, Praha.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018f): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Janoch. - MS SÚRAO, TZ 302/2018, Praha.
- VOKÁL, A., ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018g): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Kraví hora. - MS SÚRAO, TZ 303/2018, Praha.
- VOKÁL A. ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018h): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění hlubinného úložiště v lokalitě Magdaléna. - MS SÚRAO, TZ 304/2018, Praha.
- VOKÁL, A. ANTOŠ J., AUGUSTA J., BÁRTA K., ČECH P., KONOPÁČOVÁ K., KOVÁČIK M., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., POSPÍŠKOVÁ I. A VONDROVIC L. (2018i): Studie zadávací bezpečnostní zprávy pro umístění HÚ v lokalitě Na Skalním. - MS SÚRAO, TZ 305/2018, Praha.
- VOKÁL A., POSPÍŠKOVÁ I., VONDROVIC L., KOVÁČIK M., STEINEROVÁ L., DUSÍLEK P., WOLLER F. (2017): Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. MP.22, revize 3. MS SÚRAO Praha.
- VONDROVIC L., AUGUSTA J., VOKÁL A., HAVLOVÁ V., KONOPÁČOVÁ K., LAHODOVÁ Z., POPELOVÁ E., URÍK J., BAIER J., BUKOVSKÁ Z., BUREŠ P., BURIÁNEK D., BUTOVIČ A., ČERNÝ M., DUŠEK K., FRANĚK J., GRÜN WALD L., GVOŽDÍK L., HANŽL P., HOLEČEK J., HRDLÍČKOVÁ K., HROCH T., HUBÁČEK O., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KACHLÍKOVÁ R., KOBYLKA D., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., JANKOVEC J., KRAJÍČEK L., MAREK P., MARTINČÍK J., MILICKÝ M., MIXA P., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., PETYNIÁK O., POLÁK M., RUKAVIČKOVÁ L., SEDLÁČKOVÁ I., SKOŘEPA Z., SOEJONO I., ŠÍR P., ŠPINKAO., ŠTĚDRÁ V., ŠVAGERA O., UHLÍK J., VERNER K., VOJTĚCHOVÁ H., ZAHRADNÍK O., ŽÁČEK V., ŽÁČKOVÁ E. (2020): Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. – MS SÚRAO, TZ 465/2020, Praha.
- VOUTILAINEN M., IKONEN J., SAMMALJÄRVI J., SIITARI-KAUPPII M., LINDBERG A., KUVA J., TIMONEN J., LÖFGREN M. (2017): Investigation of Rock Matrix Retention Properties – Supporting Laboratory Studies II: Diffusion Coefficient and Permeability. POSIVA Workreport 2017-35, POSIVA Oy, Olkiluoto.
- VYLAMOVÁ P., KOČMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P. (2020): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, etapová zpráva za rok 2019. - MS SÚRAO, TZ 487/2020, Praha.
- WOLLER F., BÍLÝ P., DOMEČKA K., FEDIUK F., HERCÍK M., JELÍNEK E., KAROUS M., LACIOK A., SKOPOVÝ J. (1998): Kritická rešerše archivovaných geologických informací. Závěrečné zhodnocení – ÚJV Řež.

Zákony a směrnice:

Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice schválená 26. srpna usnesením vlády České republiky č. 597/2019.

Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, v platném znění.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/42/ES ze dne 27. června 2001 o posuzování vlivů některých plánů a programů na životní prostředí.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/92/EU ze dne 13. prosince 2011 o posuzování vlivů některých veřejných a soukromých záměrů na životní prostředí.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/52/EU ze dne 16. dubna 2014, kterou se mění směrnice Rady 2011/92/EU o posuzování vlivů některých veřejných a soukromých záměrů na životní prostředí.

Směrnice Rady 2011/70/EURATOM ze dne 19. července 2011, kterou se stanoví rámec Společenství pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem.

Směrnice SÚRAO S.36 (2016): Příprava hlubinného úložiště. - MS SÚRAO

Vyhláška č. 329/2017 Sb., (SÚJB, 2017) o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

Vyhláška č. 377/2016 Sb., (SÚJB, 2016 c), Vyhláška o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie.

Vyhláška č. 378/2016 Sb., (SÚJB, 2016 b), o umístění jaderného zařízení.

Vyhláška č. 395/1992 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona České národní rady č. 114/1992 Sb., v platném znění.

Vyhláška č. 408/2016 Sb. o požadavcích na systém řízení

Zákon č. 100/2001 Sb. (MŽP, 2001), o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí), v platném znění.

Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, v platném znění.

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v platném znění.

Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), v platném znění.

Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, v platném znění.

Zákon č. 263/2016 Sb. (SÚJB, 2016 a), Atomový zákon, v platném znění.

Zákon č. 289/1995 Sb., o lesích a o změně některých zákonů (lesní zákon), v platném znění.

Zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu, v platném znění.

Zákon č. 360/1992 Sb., o výkonu povolání autorizovaných architektů a o výkonu povolání autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, v platném znění.



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@suraao.cz | www.suraao.cz