

Technická zpráva číslo 429/2019

**VÝZNAM BEZPEČNOSTNÍCH
ASPEKTŮ PRO PROJEKTOVÉ
ŘEŠENÍ HÚ**

Autor: Václava Havlová, Radek Trtílek

ÚJV Řež, a.s.

Praha, listopad 2019

Název projektu: Význam bezpečnostních aspektů pro projektové řešení HÚ

Název zprávy: Význam bezpečnostních aspektů pro projektové řešení HÚ

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO SO2019-065

Evidenční číslo poskytovatele: 19SMP251

ŘEŠITEL:

ÚJV Řež, a.s.

Autor: Václava Havlová, Radek Trtílek

Schválil				
Funkce	Instituce	Jméno	Datum	Podpis
Osoba poskytovatele zodpovědná za technické řešení	ÚJV Řež, a. s.	RNDr. Václava Havlová, PhD.		
Osoba poskytovatele zodpovědná za koordinaci projektu	ÚJV Řež, a. s.	RNDr. Václava Havlová, PhD		
Osoba objednatele zodpovědná za technické řešení	SÚRAO	Ing. Markéta Dohnálková		
Osoba objednatele zodpovědná za koordinaci projektu	SÚRAO	Ing. Markéta Dohnálková		

Obsah

1	Úvod	10
2	Účel	11
3	Specifikace bezpečnostních aspektů a kritérií s vlivem na technické řešení HÚ 12	
3.1	Definice kritérií pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti	12
3.1.1	Geologické charakteristiky lokality	13
3.1.2	Hydrogeologické charakteristiky	14
3.1.3	Transportní charakteristiky lokality	16
3.1.4	Stabilita lokality	17
3.1.5	Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště	18
3.1.6	Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér	19
3.1.7	Vylučující kritéria z hlediska dlouhodobé bezpečnosti	24
3.2	Definice kritérií pro umístění HÚ z hlediska proveditelnosti HÚ (projektová kritéria) 26	
3.2.1	Proveditelnost podzemní části úložiště	26
3.2.2	Proveditelnost povrchové části úložiště	29
3.2.3	Náklady	31
3.2.4	Vylučující kritéria z hlediska technické proveditelnosti	32
4	Kvalitativní popis vzájemného vztahu jednotlivých aspektů	34
5	Expertní kvantifikace vlivu jednotlivých aspektů	36
5.1	Vztah technického aspektu Proveditelnost podzemní části úložiště k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	38
5.1.1	Vztah kritéria Velikost využitelného horninového masivu k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	38
5.1.2	Vztah kritéria Vlastnosti horninového prostředí pro konstrukci podzemní části HÚ k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	43
5.2	Vztah technického aspektu Proveditelnost povrchové části úložiště k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	53
5.2.1	Vztah kritéria Zajištění stability staveb a vlastností základových půd k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	53
5.2.2	Vztah kritéria Množství a složitost střetů zájmů k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	55
5.2.3	Vztah kritéria Investiční náklady k aspektům dlouhodobé bezpečnosti	57
6	Možná projektová (technická) řešení k eliminaci vlivů	59

7	Přehled bezpečnostních či technických aspektů k budoucímu prozkoumání	62
8	Zhodnocení míry konzervatismu bezpečnostních předpokladů na vybraných příkladech ze zahraničí a možnost optimalizace při zachování celkového stupně bezpečnosti.....	64
8.1	Švýcarsko	65
8.2	Kanada.....	69
9	Závěr	72
10	Seznam literatury	73

Seznam obrázků:

Obr. 1 Postup výběr lokality ve Švýcarsku (Zuiderma 2019).....	65
--	----

Seznam tabulek:

Tab. 1 Přehled kritérií, které mají vylučující charakter z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (Vokál et al. 2017)	24
Tab. 2 Přehled kritérií, která mají vylučující charakter z hlediska technické proveditelnosti (Vokál et al. 2017)	32
Tab. 3 Matice, identifikující vzájemný vztah mezi aspekty dlouhodobé bezpečnosti a proveditelnosti HÚ	35
Tab. 4 Matice, kvantifikující vzájemný vztah mezi aspekty dlouhodobé bezpečnosti a proveditelnosti HÚ na základě 3 stupňové škály, definující významn vztahu jako velmi významný – významný – méně významný. Některé aspekty se v obou oblastech překrývají (uvedeno jako Překrývají se).	37
Tab. 5 Přehled vlivu bezpečnostních aspektů na technické řešení a způsob jejich eliminace	59
Tab. 6 Přehled vlivu bezpečnostních aspektů k budoucímu detailnímu zkoumání	62
Tab. 7 Bezpečnostní kritéria pro výběr lokality (Sectoral plan; Zuiderma 2019 na základě NAGRA 2008)	66
Tab. 8 Požadavky kladené na indikátory kritérií dlouhodobé bezpečnosti. MA – minimální požadavky, VA – zvýšené nároky; BS – použito pro hodnocení. V němčině. (NAGRA 2008).	67
Tab. 9 Příklad bezpečnostních faktorů, uvážených při výběru lokalit v kanadském programu výběru lokalit a indikátorů jejich hodnocení (NWMO 2010).....	70
Tab. 10 Výběr vybraných indikátorů (označeny žlutě), které byly použity pro hodnocení schopnosti hodniny zadržet radionuklidy v iniciální fázi výběru lokalit (Vorauer and Hirsshon 2019).....	71

Seznam textových příloh:

Seznam použitých zkratk:

ČR	Česká republika
EdZ	Excavation damage zone
EDZ	Excavation disturbed zone
HG	hydrogeologický
HÚ	hlubinné úložiště
CHOPAV	chráněné oblasti přirozené akumulace vod
IAEA	International Atomic Energy Agency
IB	inženýrské bariéry
IZS	Integrovaný záchranný sbor
L/ILW	nízko a středně aktivní odpady
MP	metodický pokyn
MP22	Metodický postup 22, Vokál et al. (2017)
OP	ochranné pásmo
PHO	pásmo hygienické ochrany
PUPFL	Pozemek určený k plnění funkcí lesa
RAO	radioaktivní odpad
Sb.	Sbírka zákonů
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivního odpadu
ÚOS	ukládací obalový soubor
VAO	vysokoaktivní odpady
VJP	vyhořelé jaderné palivo
ZPF	zemědělský půdní fond

Abstrakt

Studie je vypracována na základě objednávky Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) s cílem zpracovat a vysvětlit problematiku a významu hodnocení dlouhodobé bezpečnosti a vlivu významných bezpečnostních aspektů na technické řešení HÚ pro potřebu argumentace. V první fázi řešení byly shromážděny podklady a popisy aspektů, ovlivňujících dlouhodobou bezpečnost HÚ a projektové řešení HÚ. V druhé fázi byl vyhodnocen vztah mezi jednotlivými bezpečnostními aspekty a aspekty projektového řešení.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, radioaktivní odpady, vyhořelé jaderné palivo, výběr lokality, bezpečnost

Abstract

The study is prepared on the basis of an order of the Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO) with the aim to elaborate and explain the issue and importance of long-term safety assessment and the impact of significant safety aspects on the DGR technical solution for further argumentation. In the first phase of the project, background materials and descriptions of aspects affecting the long-term safety of DGR and the DGR engineering aspects were collected. In the second phase, the relationship between individual safety aspects and engineering aspects was evaluated.

Key words

Deep repositories, radioactive waste, spent nuclear fuel, site selection, safety

1 Úvod

Usnesením vlády ČR č. 487/2002 přijatá Koncepce nakládání s RAO a VJP v ČR deklaruje základní strategii ČR k nakládání s VJP a ostatním RAO nepřijatelného k uložení do přípovrchových úložišť do hlubinného úložiště. Tyto odpady budou uloženy do hlubinného úložiště (HÚ). HÚ by mělo být připraveno k provozu v roce 2065. Výstavba HÚ úložiště je podmíněna prokázáním jeho bezpečnosti po dobu statisíců až miliónu let.

Hodnocení lokalit se ve fázi výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště soustředí v první řadě na posouzení charakteristik vlastností lokalit, při jejichž dosažení je podle české legislativy, tj. zejména atomového zákona (zákon č. 263/2016 Sb.), vyhlášky o umístění jaderného zařízení (č. 278/2016 Sb.), zákona o ochraně přírody a krajiny (zákon č. 114/1992 Sb.), horního zákona (zákon č. 44/1988 Sb.) a stavebního zákona o územním plánu a stavebním řádu (zákon č. 183/2006 Sb.) umístění hlubinného úložiště zakázáno. V druhé řadě budou posuzovány ty vlastnosti území pro umístění JZ, při jejichž dosažení není umístění hlubinného úložiště zakázáno, ale mohou ovlivnit jadernou bezpečnost, radiační ochranu či ochranu přírody a krajiny. Zvláště budou lokality posuzovány z hlediska dopadu na životní podmínky v lokalitě a přijatelnost úložiště obyvatelstvem (Vokál et al. 2017).

Systematický proces přípravy hlubinného úložiště v ČR začal po roce 1989. ČGÚ v roce 1992 vybral 27 potenciálně vhodných oblastí pro umístění hlubinného úložiště. Do roku 1998 byla provedena obsáhlá rešerše dostupných geologických dat o těchto lokalitách, byly shrnuty dostupné informace o množství VJP a ostatních RAO, které bude třeba uložit do HÚ, a byly analyzovány základní informace o vlastnostech VJP a RAO, potřebných inženýrských bariérách a vlastnostech různých horninových prostředí. Byly navrženy dvouvrstvé ukládací obalové soubory na bázi uhlíkové a korozivzdorné oceli a vypracovány základní ideové projekty podzemní i nadzemní části HÚ. Byla zvolena hloubka pro HÚ kolem 500 m, které by měla splňovat jak bezpečnostní kritéria, tak i kritéria proveditelnosti úložiště.

Po kritickém zhodnocení vytipovaných oblastí z hlediska splnění vylučujících kritérií pro umístění jaderných zařízení, v souladu s vyhláškou č. 215/1997 Sb., a vlivu na přírodu, jak vyplývá ze zákona č. 114/1992 Sb., bylo v roce 2002 vybráno 11 potenciálních lokalit ve třech různých typech hornin. SÚRAO z těchto navržených lokalit upřednostnilo 6 lokalit v granitovém horninovém prostředí. K nim byly následně přiřazeny lokality Kraví hora lokality v blízkosti ETE a EDU. V současné době je posuzováno následujících 9 potenciálních lokalit pro umístění HÚ: Čertovka (Lubenec, Blatno - Ústecký kraj), Březový potok (Pačejov, Chanovice - Plzeňský kraj), Magdaléna (Jistebnice, Vlksice - Jihočeský kraj), Čihadlo (Pluhův Žďár, Lodhěřov - Jihočeský kraj), Hrádek (Nový Rychnov, Rohozná – Kraj Vysočina) a Horka (Budišov, Oslavička - Kraj Vysočina), Kraví hora (Kraj Vysočina), Na Skalním (Kraj Vysočina), Janoch (Jihočeský kraj).

V návaznosti na práce, které byly uskutečněny v rámci projektů Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení HÚ (Havlová et al. 2018) a Poskytování výzkumné podpory pro projektové řešení hlubinného úložiště v rámci přípravy (HÚ) byla identifikována potřeba jasným srozumitelným způsobem identifikovat a vysvětlit souvislosti mezi bezpečnostními charakteristikami lokalit a technickým řešením umístěním HÚ v jednotlivých lokalitách a současně deklarovat, které z bezpečnostních či technických aspektů bude nutno v budoucnosti potvrdit, či přehodnotit.

2 Účel

Účelem této zprávy je zpracování a vysvětlení problematiky a významu hodnocení dlouhodobé bezpečnosti a vlivu významných bezpečnostních aspektů na technické řešení HÚ pro potřebu argumentace. Smyslem zprávy je srozumitelnost pro čtenáře bez vědeckých znalostí v oboru při zachování věcné správnosti.

3 Specifikace bezpečnostních aspektů a kritérií s vlivem na technické řešení HÚ

3.1 Definice kritérií pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

Hodnocení lokalit se ve fázi výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště soustředí v první řadě na posouzení charakteristik vlastností lokalit, při jejichž dosažení je podle české legislativy umístění hlubinného úložiště zakázáno, tj. zejména podle atomového zákona (zákon č. 263/2016 Sb.), vyhlášky o umístění jaderného zařízení (č. 278/2016 Sb.), zákona o ochraně přírody a krajiny (zákon č. 114/1992 Sb.), horního zákona (zákon č. 44/1988 Sb.) a stavebního zákona o územním plánu a stavebním řádu (zákon č. 183/2006 Sb.). V druhé řadě budou posuzovány ty vlastnosti území pro umístění JZ, při jejichž dosažení není umístění hlubinného úložiště zakázáno, ale mohou ovlivnit jadernou bezpečnost, radiační ochranu či ochranu přírody a krajiny. Zvláště budou lokality posuzovány z hlediska dopadu na životní podmínky v lokalitě a přijatelnost úložiště obyvatelstvem (Vokál et al. 2017).

Při hodnocení potenciálních lokalit je třeba rozlišit charakteristiky lokalit vztažené k jadernému zařízení umístěnému na povrchu (horká komora pro přebalení vyhořelého jaderného paliva) a jadernému zařízení umístěnému několik set metrů pod povrchem země (podzemní část hlubinného úložiště). Obecné charakteristiky území pro umístění povrchového jaderného zařízení jsou vztaženy k období provozu a době jeho vyřazování z provozu, tj. pro dobu několika desítek či stovek let, naproti tomu bezpečnost podzemní části hlubinného úložiště je třeba posuzovat pro období několika statisíců až 1 miliónu let. Některé obecné charakteristiky pro umístění jaderného zařízení, jako je seismicita či porušení území zlomem, jsou platné jak pro povrchovou část, tak i pro podzemní část hlubinného úložiště.

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; zákon č. 263/2016 Sb.)
- 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.

Tyto podmínky SÚJB jsou interpretovány jako nemožnost vytvoření důvěryhodných modelů nezatížených nepřijatelnými nejistotami z důvodu složitých poměrů v lokalitě (Havlová et al. 2019a).

3.1.1 Geologické charakteristiky lokality

Podle Vokála et al. (2017) musí zjištěné vlastnosti lokalit umožnit vytvoření důvěryhodných 3D popisných, jednoduchých, vyvážených, logických a obhajitelných modelů lokalit, které tvoří základní podklady pro hodnocení její dlouhodobé bezpečnosti. Důležitá je rovněž možnost predikce vývoje lokality na základě důkladného poznání a porozumění předchozímu vývoji lokality. Přitom bude zhodnocena petrologie, mineralogie, litogeochemie, variabilita horninového prostředí a hydrotermální alterace (odpovídá speciálním požadavkům vyhlášky č. 378/2016 Sb. § 18 písmenům a), e), f)., dále bude popsána duktilní a křehká tektonika na lokalitě (odpovídá požadavku vyhlášky č. 378/2016 Sb. § 18 písmenu b) a popsán geologický vývoj lokality.

Na základě získaných dat bude vytvořen 3D geologický model lokality prokazující možnost vytvoření komplexního prostorového modelu geologické stavby, v souladu s § 18, odst. 4), písm. b), bodem 1., a zhodnocena přijatelnost nejistot geologického popisu lokality a možnost snižování nejistot dalšími výzkumnými a průzkumnými pracemi.

V případě, že geologická stavba zvažované lokality je jen obtížně nebo s nízkou mírou jistoty popsitelná a predikovatelná, je to důvod k pozastavení hodnocení lokality, eventuálně k jejímu úplnému opuštění.

3.1.1.1 Popsatelnost a predikovatelnost

V mezinárodních konceptech HÚ patří „dobrá popsatečnost“ a „dobrá predikovatelnost“ k hlavním kritériím (např. AkEnd committee (2002), NDA-RWM (2008), NWMO (2010) a Vokal et al, 2017).

Pro určení velikosti území vhodného pro umístění HÚ, tzv. homogenních bloků, je třeba identifikovat a popsat regionálně geologickou stavbu území, regionální a větší lokální poruchové zóny, geologická rozhraní a další geologické struktury určující možné geologické bloky pro umístění úložných prostor. Obtížnost určení těchto geologických struktur a následné **vytvoření komplexního, prostorového geologického modelu lokality** je podle vyhlášky SÚJB o umístění jaderného zařízení jednou z charakteristik lokality, při jejímž dosažení je umístění úložiště vyloučeno. Geologické podmínky v úložišti musí umožnit připravit důvěryhodný komplexní, prostorový geologický model nezatížený nepřijatelnými nejistotami. Hloubkový dosah horninového masivu musí být prokazatelně dostatečný s ohledem na max. předpokládanou hloubku umístění úložiště (minimálně 400 m). Nepřijatelná míra nejistoty v identifikaci a popisu regionálních a větších lokálních poruchových zón a dalších geologických struktur může vylučovat umístění úložiště.

Významným parametrem je **počet a vztah** zastoupených **regionálně geologických jednotek**. Čím vyšší je počet předkvarterních regionálně geologických jednotek, tím nižší je potenciální vhodnost lokality pro umístění HÚ. Z hlediska vhodnosti lokality pro umístění HÚ by měl být stupeň křehkého porušení co nejnižší, protože zlomové struktury představují významná mechanická oslabení horninového masivu a zároveň preferenční cesty podzemní vody obzvláště v krystalinickém prostředí. Jejich distribuce a charakter má významný vliv na posuzování vhodnosti lokality a k vytyčení homogenního území, vhodného pro umístění HÚ.

Z hlediska umístění HÚ je dále nejvhodnější prostředí s co nejnižším **počtem puklinových systémů** a nízkou **hustotou puklin**. Puklinové systémy často tvoří v horninovém masivu hustou síť drobných diskontinuit, které jsou obvykle vzájemně propojeny. Blíže neurčená

část z nich je hydraulicky vodivá a může sloužit jako potenciální cesta migrace vody a v ní obsažených plynů, či v případě hlubinného úložiště potenciálně unikajících radionuklidů.

Pokud posuzujeme intenzitu **duktilní deformace a složitost** výsledných **deformačních struktur** (foliace, lineace), pak obecně platí, že čím složitější a intenzivnější jsou projevy duktilní deformace, tím je horninové prostředí komplikovanější z hlediska geotechnických parametrů, zároveň je v něm vyšší pravděpodobnost výskytu křehkých struktur (Havlová et al. 2018).

3.1.1.2 Variabilita vlastností fyzikálních, geomechanický a geochemických vlastností

Prostorová variabilita vystihuje horizontální i vertikální distribuci, tj. charakter a četnost střídání jednotlivých horninových těles v oblasti kandidátské lokality HÚ obvykle v měřítku X–X00 m. Například lokalita, kde se budou opakovaně a v malých mocnostech střídat dva kontrastní horninové typy, bude mít sice malou petrografickou variabilitu, ale vysoká prostorová variabilita může být komplikací z hlediska projektování HÚ.

Petrologická variabilita odráží rozdíly v obsahu hlavních horninotvorných minerálů, zrnitosti a texturních znacích. Tyto vlastnosti vycházejí z podrobného petrologického popisu (makro i mikro) a mohou mít vliv na teplotní vodivost nebo migraci fluid a může ovlivnit i proveditelnost HÚ v dané lokalitě.

Geochemické složení koreluje obvykle s petrologickým složením horniny, ale odráží i geologické procesy během vývoje horniny. Chemické složení hornin indikuje potenciální reaktivitu hornin vzájemně nebo při interakci s fluidy. Složení hornin také může predikovat intenzitu zvětrávání hornin při styku s atmosférou nebo při cirkulaci podzemních vod a prostupnost/sorpci iontů rozpuštěných v podzemních vodách. Vyšší geochemická variabilita znamená složitější hodnocení bezpečnostních parametrů.

Alterace horniny často představují významná transportní, sorpční a geomechanická oslabení horninového masívu a mají vliv na proudění podzemní vody. Stupeň alterace hornin a minerálů zahrnuje jednak alterace způsobené exogenními vlivy, tj. zvětráním či fosilním zvětráním, které se obvykle vyskytují v přípovrchové zóně geologických těles, ale také alterace endogenního původu způsobené fluidy. Všechny typy alterací vedou ke změnám mineralogického, někdy i chemického složení a změnám fyzikálních vlastností hornin.

3.1.2 Hydrogeologické charakteristiky

Hodnocení vhodnosti lokalit pro situování HÚ z hlediska hydrogeologických charakteristik primárně vychází z posouzení souboru legislativních požadavků na lokalitu HÚ a dále ze zvolených doplňujících kritérií, které umožňují jednotlivé kandidátní lokality vzájemně porovnávat.

Dle vyhlášky č. 378/2016 Sb. je lokality HÚ nutné posuzovat podle následujících bodů:

§ 8 odst. 2) Charakteristikou oběhu podzemní vody, při jejímž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno, je existence významných útvarů podzemních vod, u nichž by mohlo dojít k trvalému znečištění radioaktivní látkou.

§ 18 odst. 2) písm. h) Posuzování území k umístění HÚ musí dále hodnotit oběh podzemních vod v území k umístění HÚ z hlediska možné doby transportu, retardace,

rozpuštění a změny koncentrace radioaktivní látky v důsledku mísení s podzemními vodami.

§ 18 odst. 4) Charakteristickou vlastností území k umístění jaderného zařízení, při jejímž dosažení je umístění HÚ zakázáno, je:

- a) horninové prostředí, které umožňuje migraci radioaktivních, chemických a toxických látek, které se mohou uvolnit z uložených radioaktivních odpadů tak, že při očekávaném vývoji hlubinného úložiště dojde k většímu ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí,
- b) nemožnost vytvoření hydrogeologického modelu v důsledku obtížné popsitelnosti a predikovatelnosti hydrogeologických poměrů území k umístění.

Předpokládá se, že v hloubce 500 pod nejnižším místem terénu) se **zvodně (souvislá akumulace podzemní vody)** nevyskytují v žádné z posuzovaných lokalit. Proudění podzemní vody v těchto hloubkách probíhá pouze po vodivých puklinách. Pokud by tomu bylo jinak, pak by byla lokalita pro umístění HÚ nevhodná.

Méně vhodné se jeví lokality se složitější geologickou a strukturní stavbou, u kterých vyšší stupeň heterogenity zvyšuje nejistotu výsledků hydrogeologického (i transportního) modelu. Nejistotu modelového výsledku také zvyšuje menší množství vstupních dat.

Modelové **rychlosti proudění podzemní vody** přímo v prostoru HÚ i v prostoru mezi HÚ a drenážními bázemi umožňují porovnat lokality z pohledu advektivního šíření radionuklidů směrem k biosféře. Pomalé proudění podzemní vody v horninovém masivu je jedním z předpokladů funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry. Méně vhodné se jeví lokality s větší rychlostí proudění podzemní vody.

Modelové simulace proudění podzemní vody v posuzovaných lokalitách jsou založeny na expertním odhadu hydraulické vodivosti horninového masivu. Méně vhodné se jeví lokality s vyššími hodnotami propustnosti v izolační části horninového masivu.

Primárním **recipientem podzemní vody** potenciálně kontaminované radionuklidy v prostoru HÚ budou sedimenty údolních niv a následně říční síť. Počet úseků říční sítě, do nichž jsou podzemní vody z prostoru HÚ odvodněny, poskytuje informaci o rozptýlení potenciální kontaminace. Na základě předpokladů formulovaných SÚRAO je vhodnější větší počet drenážních úseků říční sítě. Větší míra rozptylu drenáže z prostoru HÚ umožní větší snížení koncentrací radionuklidů. Méně vhodné se jeví lokality, kde drenáž z prostor HÚ (a transport radionuklidů) směřuje do jediného úseku říční sítě a povodí.

Poruchové zóny lokálního a především regionálního rozsahu představují riziko vzhledem k **možnosti preferenčního proudění** v prostředí jinak velmi málo propustného hydrogeologického masivu. Preferenční proudění lze rovněž předpokládat v prostorech zaplavených důlních děl. Méně vhodné se jeví lokality s větším počtem poruchových zón v blízkosti HÚ.

Výrazné rozdíly v nadmořské výšce terénu a tím v **rozložení potenciálu proudění** v přivrchné vrstvě odlišují kandidátní lokality HÚ v ČR od lokalit posuzovaných v severských zemích, kde je terén v místech projektovaných HÚ plochý. Méně vhodné se jeví lokality, kde k drenáži podzemní vody z úrovně HÚ může dojít přímo v nadloží HÚ (nulová odlehlost drenážního místa od okraje). Vhodnější je také situovat HÚ do oblasti sestupného gradientu proudění podzemní vody vzhledem k prodloužení délky transportních cest. Méně

 SÚRAO	Vliv bezpečnostních aspektů na technické řešení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 429/2019

vhodné se jeví lokality s menším plošným zastoupením sestupné složky proudění (Havlová et al. 2018).

Množství podzemní vody protékající prostorem projektovaného HÚ ovlivňuje mobilitu radionuklidů při advektivním transportu do biosféry. Větší průtok přes prostor projektovaného HÚ signalizuje méně vhodné lokality. Do klasifikace jednotlivých lokalit vstupují specifické hodnoty průtoku prostorem úložiště, vztahené na půdorysnou plochu HÚ.

3.1.3 Transportní charakteristiky lokality

Transport různých forem radionuklidů spolu s proudící vodou je ovlivněn řadou procesů, jako je jejich srážení, rozpouštění, difúze, sorpce či ředění v důsledku mísení s nekontaminovanou vodou.

Vyhláška č. 378/2016 Sb. posuzuje území k umístění hlubinného úložiště mimo jiné dle hloubkového dosahu a rozměru vhodného horninového masívu pro umístění hlubinného úložiště a vzdálenosti geologických rozhraní a tektonických poruch, které mohou působit jako cesty pro transport radioaktivních látek, oběhu 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,

Význam transportu radionuklidů pro hodnocení bezpečnosti dokladuje §20 vyhlášky č. 378/2016 Sb., kdy charakteristikou vlastností území k umístění jaderného zařízení, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno, je 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 (Havlová et al. 2017).

Doba transportu radionuklidů sítí puklin krystalinického prostředí je dána zejména poměrem délky transportní cesty a Darcyho rychlosti násobené kinematickou porozitou. Při výpočtu celkové délky transportní cesty je třeba vycházet ze součtu jednotlivých úseků celkové cesty na základě výsledků detailních, hydrogeologických a transportních modelů a určení pravděpodobných transportních cest. Doba transportu radionuklidů však rovněž závisí na možnosti retardace pohybu radionuklidů v důsledku migrace do matrice horniny či sorpce na povrchu puklin či jejich výplní. Preferovány budou lokality s co možná nejdelší dobou transportu radionuklidů z úložiště do životního prostředí (Vokál et al. 2017).

Doba transportu radionuklidů je rovněž závislá na procesech **retardace** (zpoždění **radionuklidů v horninovém prostředí**). Hodnota retardace radionuklidů v horninovém masívu ve srovnání s proudící vodou je specifická pro jednotlivé radionuklidy a závisí na hodnotě difúzního koeficientu D_e radionuklidu do matrice horniny, hodnotě porozity matrice, hodnotě smáčeného povrchu pukliny, sorpčních vlastnostech matrice horniny, sorpčních vlastnostech výplní poruchových zón, chemických vlastnostech podzemní vody (Havlová et al. 2018). O těchto vlastnostech v daném stupni poznání máme jen limitované množství informací, přičemž samy nemají přímý vliv na technické řešení HÚ.

Maximální koncentrace radionuklidů při advektivním transportu je kromě **sorpce** ovlivněna také procesem **srážení a spolusrážení radionuklidů** v podzemní vodě. Tato vlastnost je specifická pro jednotlivé radionuklidy. Pro řadu radionuklidů jsou primárními faktory ovlivňujícími jejich rozpustnost a tím i maximální koncentraci radionuklidu, složení podzemní vody E_h a pH a přítomnost některých komplexujících látek či koloidů. Preferovány budou

lokality s podzemní vodou, jejíž složení je příznivé pro srážení či spolu-srážení kritických radionuklidů, například s nižším E_h bez koloidů, organických látek a dalších komplexantů (Vokál et al. 2017). O těchto vlastnostech v daném stupni poznání máme jen limitované množství informací, přičemž samy nemají přímý vliv na technické řešení HÚ.

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující transport radionuklidů z úložiště do životního prostředí je i **mísení kontaminované vody** s nekontaminovanou vodou na cestě z úložiště do životního prostředí. Hodnoty ředění v důsledku mísení s nekontaminovanou vodou mohou sloužit jako pomocné kritérium při porovnávání transportních vlastností lokalit (Vokál et al. 2017).

3.1.4 Stabilita lokality

Geologická stavba území k umístění hlubinného úložiště musí zaručit stabilitu hlubinného úložiště po dobu nejméně v řádu statisíců až 1 miliónu let. Podle § 18, odst. 2, písm. g), i), či j) vyhlášky č. 378/2016 Sb. musí být posouzen výskyt endogenních a exogenních jevů (g) předpokládaný vývoj klimatu (i), či zranitelnost horninového prostředí z hlediska dlouhodobých klimatických změn (j). Podle IAEA hostitelské prostředí (2011b) pro hlubinné úložiště by nemělo být náchylné k poškození budoucími geodynamickými procesy a následnými jevy a jinými faktory (např. změnou klimatu, neotektonickými pohyby, vysokou seizmicitou) do té míry, že by tyto vlivy mohly nepřijatelně poškodit bezpečnostní funkce celého úložného systému. Na základě předchozích poznatků plyne, že v ČR mohou být důležité především následující vlivy:

- 1) Zemětřesení vyšší intenzity a přítomnost potenciálně aktivních zlomů (seismická stabilita),
- 2) Pokles nebo výzdvih povrchu území (geodynamická stabilita),
- 3) Postvulkanické jevy,
- 4) Klimatické změny.

Požadavky na **seismickou stabilitu území** pro povrchová jaderná zařízení typu jaderných elektráren jsou velmi podrobně diskutovány například v dokumentech SÚJB (SÚJB 2012) a IAEA (2010). Vzhledem k tomu, že účinky seismo-tektonické události jsou vždy větší na povrchu, než v prostředí několik set metrů pod povrchem země je možno předpokládat, že v případě, že území splní požadavky na zařízení umístěná na povrchu nebo blízko povrchu, splní i požadavky pro zařízení umístěné několik set metrů pod povrchem země.

Vertikální pohyby zemské kůry (výzdvihy, poklesy) jsou projevem geodynamické aktivity svrchní části zemské kůry. Z dlouhodobého hlediska (v horizontu statisíců až miliónu let) představuje výzdvih území resp. diferenciální pohyby v hodnoceném území potenciální nebezpečí (hazard) pro úložiště. Za předpokladu stálého směru a rychlosti výzdvihu 1 mm/rok by bylo možné, že dojde k vynoření úložiště z hloubky 500 m za období 500 tisíc let. Změny povrchu území navíc mohou vést k následným změnám v říční síti, gradientu území apod. Vertikální pohyby zemské kůry mají úzkou souvislost s jinými geodynamickými procesy a jevy, jako např. se seizmicitou území, aktivitou tektonických poruch, tektonicky podmíněnými svahy, apod.

V lokalitě rovněž nesmějí probíhat **tektonické linie**, u kterých jsou prokázány, nebo je možno v budoucnosti očekávat pohybové aktivity a související diferenciální pohyby potenciálně ohrožující integritu úložiště v čase až 1 milion let. V některých zemích umístění

úložiště je vyloučeno v lokalitách, kde pohyby zemské kůry mohou být větší než 1 mm/ročně (Vokál et al. 2017).

Přítomnost karbonátových hornin na území předurčuje **možnost výskytu krasových jevů**, které mohou ovlivňovat zejména hydrogeologické parametry lokality a jejich přítomnost tak může představovat negativní faktor pro bezpečnost úložiště.

3.1.4.1 Postvulkanické jevy

Vliv **postvulkanických jevů** na vývoj úložiště je spojen s možným zvýšeným tepelným tokem, výskytem minerálních a termálních vod, seismickými jevy a výrony plynů. Lokality, ve kterých by se tyto jevy projevíly, nemohou být využity pro umístění hlubinného úložiště (Vokál et al. 2017).

3.1.4.2 Klimatické změny

Z globálního hlediska má nástup doby ledové vliv na vznik, rozšíření a parametry zalednění, permafrostu (trvale zmrzlé půdy) a na rozsáhlé změny v hydrogeologických a hydrologických poměrech území, dynamice zvětrávání a denudace území a na výskyt flóry a fauny apod. Mimo vnější teploty, na celkovou hloubku permafrostu má vliv také geografická poloha, orientace svahů, geotermický gradient, albedo lokality apod. Predikce vývoje klimatu na následujících 100 000 let ve Skandinávii ukazují, že území ČR bude s velkou pravděpodobností mimo dosahu kontinentálního zalednění (Vokál et al. 2017).

- a) **Přítomnost ledovce** na lokalitě je jedním z možných faktorů, které může způsobovat mechanické porušení horninového prostředí. V souvislosti s ústupem ledovce může dojít k indukci postglaciálních zemětřesení.
- b) **Vznik permafrostu** má vliv vlivu na hluboký oběh podzemních vod. Výskyt permafrostu zásadně ovlivňuje oběh podzemních vod především díky minimální infiltraci povrchové vody do hlubších částí zemské kůry. V případě jeho vzniku by hluboký hydrogeologický oběh byl efektivně oddělen od povrchového hydrologického oběhu. Vznik permafrostu může tak představovat pozitivní faktor, kdy dojde k oddělení povrchového hydrologického a hlubinného hydrogeologického oběhu vod.

3.1.5 Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Pro zajištění bezpečnosti HÚ je důležité zabránit neúmyslnému vniknutí člověka do úložiště. Požadavky týkající se rizika intruze člověka do úložiště jsou formulovány v doporučení IAEA (2011b) výhradně pro neúmyslné vniknutí člověka do úložiště.

Vyhrazená **ložisková území, zásoby nerostných surovin** a jejich prognózy představují strategické faktory pro stát a jeho rozvoj, a jako takový může být přítomnost významných zásob nerostných surovin vylučujícím kritériem při hodnocení a porovnávání vhodnosti jednotlivých lokalit.

Přítomnost starých důlních prací a poddolovaných území ovlivňuje bezpečnost podzemních děl a může představovat cestu pro průnik člověka do blízkosti hlubinného úložiště. Množství, hloubka, rozsah děl a jejich geologicko-báňská dokumentace jsou parametry, které jsou zohledněny slovním hodnocením důlní zátěže jednotlivých lokalit.

Vrtné práce jsou na většině lokalit rozmístěny velmi nepravidelně a v převážné většině vrtů registrovaných v archivu jde o mělké účelové sondy zaměřené na místní inženýrsko-

geologické a hydrogeologické poměry. V případě přítomnosti těchto mělkých vrtů a vrtů nedosahujících hloubky přes 100 m nehrozí žádné nebezpečí ovlivnění podzemního úložiště. Hlubší ložiskové, strukturní a další vrty převážně dosahující hloubek od 100 do 300 m nejsou ve střetu s vylučujícím kritériem hloubky přes 500 m. Pro lokality s přítomností hlubokých strukturních a vyhledávacích vrtů do hloubek přes 500 m může v závislosti na lokalizaci vrtů a průzkumných prací hrozit střet či nezbytnost technických řešení.

Zdroje podzemních vod patří mezi významné parametry posuzované v rámci nebezpečí průniku člověka do hlubinného úložiště. V posuzovaných lokalitách existují různé kombinace hloubky, vydatnosti a významu zdrojů podzemních vod a jejich ochranných pásem.

Všechny hodnocené lokality mají srovnatelné, velmi nízké parametry úrovně geotermálního toku, využívání geotermální energie ve smyslu hlubinného čerpání geotermální energie z anomálních geotermálních zdrojů zde není pravděpodobné (Havlová et al. 2018).

3.1.6 Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Podle doporučení IAEA (2011a), požadavek 16), inženýrské bariéry musí být fyzikálně i chemicky kompatibilní s hostitelským horninovým prostředím a celkové projektové řešení úložiště musí být navrženo tak, aby zajistilo bezpečnost po celou dobu trvání životnosti úložiště. Posuzování lokalit z hlediska bezpečnosti je proto třeba vždy vztahovat k navrženému projektovému řešení úložiště a systému inženýrských bariér. Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér a projektovým řešením úložiště je možno rozdělit podle vlivu následujících vlastností horninového prostředí na bezpečnostní funkce inženýrských bariér (Vokál et al. 2017):

1. Tepelné vlastnosti
2. Hydraulické vlastnosti
3. Mechanické vlastnosti
4. Chemické vlastnosti
5. Mikrobiologické vlastnosti
6. Plynopropustnost

Hodnocení se pak řídí vyhláškou č. 378/2016 Sb. o umístění jaderného zařízení, zejména § 18 odst. 2, kde posuzované území pro umístění hlubinného úložiště (HÚ) musí zhodnotit zejména:

písm. d) **Vhodnost mechanických vlastností** hornin pro zajištění dlouhodobé stability přírodní bariéry úložiště.

písm. f) **Výskyt nestejnorodého horninového prostředí** s petrograficky a mechanicky odlišnými typy hornin, postiženými hydrotermálními a jinými druhotnými přeměnami.

Dle písm. k) **fyzikálně chemické, geochemické a mikrobiologické vlastnosti** geologického prostředí a to:

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

Dále musí zhodnotit **geomechanické vlastnosti**, písm. l) zejména:

1. Pevnostní a deformační vlastnosti hornin
2. Napjatostní stav horninového prostředí

A rovněž dle písm. m) zhodnotit **plynopropustnost** horninového prostředí (tj. schopnost odvádět plyn) a dle písm. n) zhodnotit **tepelné vlastnosti** horninového prostředí, včetně tepelného gradientu.

Charakteristikou vlastností území k umístění jaderného zařízení, při jejímž dosažení je umístění hlubinného úložiště zakázáno, je písm. b) nemožnost vytvoření:

3. Geomechanických a geochemických modelů území k umístění jaderného zařízení.

3.1.6.1 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti horninového prostředí jsou jedním z kritických vstupů pro dimenzování a hodnocení HÚ. Odolnost úložiště proti působení tepla je vyjádřena funkčností jeho primárních bariér, tj. UOS, bentonitu, formy odpadu, neporušené horninové zóny. V prvních letech provozu HÚ jsou určující pro teplotu na povrchu kontejneru tepelné vlastnosti bentonitu a tloušťka bentonitové vrstvy obklopující UOS, avšak z dlouhodobého hlediska je rozhodující geometrie úložiště a tepelné vlastnosti horniny (Blaheta et al. 2012).

Parametry, které hrají klíčový vliv, jsou následující

Za kritickou hodnotu bývá považována zejména **teplota na rozhraní ukládací obalový soubor/bentonit**, která by neměla překročit 100 °C z důvodů snížení rychlosti degradace inženýrských bariér, zejména bentonitu a rovněž z důvodu komplikovanosti hodnocení procesů probíhajících v úložišti při teplotách nad 100 °C. (Vokál et al. 2017).

Přirozená teplota prostředí v hloubce je dána především geotermálním stupněm, který je charakterizován jako hloubkový úsek v metrech, při kterém se teplota prostředí zvýší o 1 stupeň. V podmínkách ČR je to zhruba 25-30 m/ 1°C. (Vokál et al. 2017).

Tepelná vodivost horniny má vliv na rychlost vedení tepla v horninovém prostředí. Příliš nízké hodnoty tepelné vodivosti horninového prostředí by byly příčinou špatného odvodu tepla generovaného uloženým VJP s rizikem růstu teploty v blízkém okolí v důsledku akumulace tepla. Výhodná je vysoká tepelná vodivost prostředí.

Homogenita a izotropie tepelné vodivosti má vliv na směr šíření tepla v horninovém prostředí. Anizotropie tepelné vodivosti by byla příčinou rozdílného šíření tepla v různých směrech (Havlová et al. 2018a).

Měrná tepelná kapacita má vliv na rychlost změny teploty v okolí HÚ v neustáleném stavu (v počáteční fázi po uložení VJP i při snižování radiogenní produkce tepla z kontejnerů s VJP). Má vliv zejména při počátečním ustalování teplotního pole po uložení VJP do prostor HÚ. Parametr je potřebný pro matematické modelování šíření tepla z HÚ, avšak není kritický z pohledu bezpečnosti HÚ. Vyšší hodnoty jsou příznivější.

Radiogenní produkce tepla má vliv na hustotu tepelného toku v horninovém prostředí. Horniny s vyššími obsahy přirozených radioaktivních prvků (U, Th, K) generují větší množství

radiogenního tepla, které bude snižovat teplotní gradient mezi HÚ a okolním horninovým prostředím. Důsledkem by bylo zpomalení odvodu tepla z HÚ do okolí. Výhodné jsou horniny s nízkou radiogenní produkcí tepla (Havlová et al. 2018a).

Tepelný tok má vliv na teplotu horninového prostředí. Přirozený tepelný tok je při absenci magmatické aktivity dán součtem tepelného toku ze zemského pláště a velikostí radiogenní produkce tepla horninami v zemské kůře. Výhodné jsou lokality s nízkým tepelným tokem.

Samotná teplota horninového prostředí má vliv na rychlost chemických reakcí a minerálních přeměn, termomechanické změny v hostitelských horninách. Teplota horninového prostředí je určována velikostí tepelného toku. Teplota by měla být v hloubkové úrovni HÚ (tj. 500 až 600 m pod povrchem) menší než 25 °C (Andersson et al. 2000).

3.1.6.2 Hydraulické vlastnosti

Nízká **rychlost proudění vody** horninového prostředí je příznivá pro pomalou degradaci inženýrských bariér. Rychlost degradace ukládacích obalových souborů (UOS) a následně i forem odpadů může být přímo závislá na množství vody, které se dostane do kontaktu s UOS s odpady (Vokál et al. 2017).

Hydraulické vlastnosti jsou dány hydrogeologickými vlastnostmi zkoumané lokality. Pro počáteční nasycení IB je rozhodující množství podzemní vody v okolí HÚ. Funkčnost IB ovlivňuje proudění podzemní vody a její chemismus. Směry a rychlosti proudění podzemní vody v granitovém masivu jsou závislé na puklinových systémech v okolí HÚ – rozevření, konektivitě a transmisivitě puklin (Havlová et al. 2018). Kromě toho souvisí s prostorovou distribucí puklin, která může např. vést k bodovému sycení úložného vrtu.

Hydraulické parametry nelze hodnotit odděleně. **Rychlost proudění a objem podzemní vody** definují všechny uvedené parametry. Negativní vliv na IB může mít především intenzivní proudění ve spojitosti s nevhodným chemizmem podzemní vody. Navíc jevy, s nimiž kritéria souvisí, vyplývají jak z vlastnosti lokality, tak z projektu a postupu realizace HÚ, což znemožňuje určit konkrétní číselné meze.

Čím více je v okolí HÚ podzemní vody, tím spíše hrozí eroze bentonitové vrstvy, rychlejší koroze obalových souborů či rychlejší uvolňování radionuklidů z bentonitu do horniny. Rychlé proudění na kontaktu bentonitové IB a hostitelské horniny způsobuje sufozi (vymývání bentonitu). Ta závisí také na složení vody a zvoleném materiálu IB. Bodové přítoky mohou vést k nerovnoměrnému sycení bentonitové IB vedoucí k nerovnoměrnému odvodu tepla z kontejnerů, jejich korozi či lokální erozi bentonitové IB (Havlová et al. 2018).

3.1.6.3 Mechanické vlastnosti

Požadavek hodnocení **geomechanických vlastností** horninového prostředí, který je uveden v § 18, odst. 2, písm. l) (Vyhláška č. 378/2016), je důležitý zejména z hlediska proveditelnosti úložiště. Může však mít význam i pro hodnocení slučitelnosti úložiště s inženýrskými bariérami. Z hlediska posuzování slučitelnosti horninového prostředí má charakter porovnávacího kritéria.

V horninovém masivu, nezávisle na něm, existuje **primární napjatostní stav horninového masivu**. Ten bývá v různých směrech rozdílný. Ve vertikálním směru v hloubce 500 m je litostatický tlak, v závislosti na objemové hmotnosti nadložních hornin, cca 13-15 MPa. Horninový masiv je mechanický systém, který je v konsolidovaných podmínkách v rovnovážném stavu. Změny v napjatostním stavu a jejich anizotropie však vedou k nestabilitě

horninového masívu, a to zejména ve výrubech (tunely, vrty).

Velmi nepříznivé mechanické vlastnosti horninového prostředí mohou mít hodnoty vylučující umístění úložiště v lokalitě či jeho vybudování může vyžadovat jiné technické řešení, například řešení chodeb a úložných prostor vzhledem ke směru maximální složky horizontálního napětí (Vokál et al 2017).

Pevnost horniny mají vliv na stabilitu horninového masívu jakožto přírodní bariéry úložiště a na rozsah a charakter zóny ovlivnění, vyvolané razíci pracemi. Horniny s vyššími pevnostmi budou obecně lépe odolávat nepříznivým napěťovým stavům, projevujícím se koncentracemi napětí v blízkosti líce výrubu a následným poškozením samotné horniny, která je v těchto oblastech k porušování náchylnější.

Všeobecně se dá předpokládat, že granitoidní horniny budou představovat dostatečně vhodné prostředí pro zajištění dlouhodobé stability přírodní bariéry úložiště z hlediska geomechanických vlastností. Obecně totiž platí, že čím je pevnost hornin, v nichž je raženo důlní dílo, vyšší, tím je rozsah zóny ovlivnění, vyvolané vlastní ražbou (construction induced EDZ ve smyslu např. Siren et al. 2015), menší. V této oblasti může docházet jak k sekundárnímu porušení hornin nově vzniklými trhlinami ovlivňujícími soudržnost okolního horninového masívu, tak mohou být reaktivovány preexistující prvky primární nespojitosti hornin a může docházet k jejich rozevírání. Horniny s vyšší pevností budou obecně lépe odolávat nepříznivým napěťovým stavům, projevujícím se většinou koncentrací napětí v blízkosti líce výrubu a poškozením samotné horniny, která je v těchto oblastech k porušování náchylnější. Tyto nepříznivé napěťové stavy mohou být vyvolány nehomogenním primárním napěťovým polem, které je pak dále deformováno sekundárními lokálními koncentracemi napětí vlivem velikosti, tvaru a orientace vlastního důlního díla.

3.1.6.4 Geochemické vlastnosti

Podle § 18, odst. 2, písm. k) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 je třeba posuzovat fyzikálně chemické a geochemické vlastnosti horninového prostředí, zejména s ohledem na zádržné vlastnosti horninového prostředí, chemické složení podzemní vody, redukční podmínky a obsah kyslíku. Procesy degradace inženýrských bariér jsou úzce svázány především s chemickými procesy, které nastávají při kontaktu inženýrských bariér a podzemní vody (Vokál et al. 2017).

Hostitelská hornina dané lokality uvažované pro HÚ musí mít takové geochemické vlastnosti, aby negativně neovlivňovala vlastní HÚ po dobu v řádu statisíců až miliónu let. Negativním ovlivněním se v tomto případě myslí jakékoliv ovlivnění zejména inženýrských bariér HÚ (ukládací obalové soubory VJP, bentonitové těsnění ukládacích míst, zásypy všech přístupových prostor, betonové konstrukční prvky a betonkontejnery sekce VAO), které by mohlo přímo (např. **erozí materiálu zásypu**) či nepřímo (např. změnou **bobtnací schopnosti bentonitového těsnění**) vést k předčasnému selhání bezpečnostních funkcí těchto bariér. Za významnou oblast ovlivnění HÚ se v rámci slučitelnosti bariér HÚ s horninovým prostředím uvažují rozhraní tohoto prostředí s inženýrskými bariérami. Lze předpokládat, že hlavním geochemickým činitelem, jímž může horninové prostředí působit na inženýrské bariéry HÚ, je **podzemní voda a její vlastnosti** (pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek, obsah organických látek a CO₂, obsah látek typu dusičnany, sírany, chloridy apod.). Minoritní vliv je očekáván u nestabilních akcesorických minerálů horniny (např. pyrit) a u plynných, přirozeně se vyskytujících fází (např. hlubinný CO₂, pokud by byl přítomen).

3.1.6.5 Mikrobiologické vlastnosti

Podle § 18, odst. 2, písm. k), bodu 5) vyhlášky SÚJB č. 378/2016 je třeba hodnotit **přítomnost mikroorganismů, koloidů a organických látek**. Mikrobiologická charakteristika horninového prostředí je důležitá pro hodnocení rychlosti degradace inženýrských bariér, ale stejně jako v případě většiny chemických vlastností podzemní vody slouží především pro porovnávání horninových vlastností. Lépe bude hodnocena lokalita s nižší aktivitou mikroorganismů, které mohou mít negativní vliv na rychlost degradace inženýrských bariér. Je však obtížné odhadnout hodnoty, které by vylučovaly umístění úložiště či úložných prostor.

Přítomnost, a především **metabolická aktivita mikroorganismů** může výrazně narušit funkčnost IB, v návaznosti na předešlé části byly uvažovány: vnější materiál UOS VJP, bentonitová bariéra, betonové konstrukční prvky a betonkontejnery sekce VAO. Nejrizikovější skupiny mikroorganismů představují síran-redukující bakterie (SRB) z důvodu mikrobiálně indukované koroze (MIC), železo-redukující bakterie (IRB) z důvodu MIC a destabilizace montmorillonitu a mangan-redukující bakterie z důvodu MIC. Acetogenní a metanogenní bakterie jsou dalšími potenciálně nebezpečnými skupinami, které produkují látky (konkrétně metan a acetát), které mohou sloužit jako donory elektronů pro SRB a IRB. Obecně pro mikroorganismy platí, že jejich metabolická aktivita vede k produkci plynů a následným změnám tlaků.

3.1.6.6 Odvod plynu

Hostitelské prostředí musí zajistit, aby nedocházelo k takové kumulaci plynu v úložných prostorech, které by mohlo představovat ohrožení pro správnou funkčnost úložného systému. Hostitelské prostředí proto musí zajistit **odvod plynu** prouděním (plynopropustnost) nebo odnosem či difúzí (rozpuštěného) plynu vodou obsaženou v hostitelském prostředí (Norris et al. 2013, POSIVA 2013).

Vzhledem k extrémně nízké propustnosti vlastní matrice horninového prostředí je celková plynopropustnost (a proudění vody) určena zejména přítomností puklinové sítě a jejími vlastnostmi (Norris et al. 2013). V případě transportu plynu pomocí vody jsou navíc důležité hydrogeologické poměry, zejména pak rychlost, tlak a množství proudící vody.

Pro zhodnocení vlivu plynu na funkčnost HÚ je nutno zhodnotit geologické a hydrogeologické poměry v širším okolí HÚ (např. možnost vzniku stratigrafického trapu – tj. geologické struktury, která může zadržovat plynné fáze díky změnám v jejím horninovém složení, struktuře nebo facii (Havlová et al. 2018).

Při nedostatečném úniku či odvodu plynu z prostoru kolem UOS a bentonitové IB dojde ke kumulaci plynů. Důsledkem může být:

- Mechanické poškození IB a hostitelského prostředí
 - Zvýšené mechanické namáhání horninového prostředí:
 - Otevření dosud intaktních puklin
 - Zvýšené mechanické namáhání IB:
 - Možné překročení pevnostně deformačních parametrů/ odolnosti IB, vytvoření preferenčních cest v IB
 - Redistribuce materiálu IB, tedy vytváření volných prostor v IB, které mohou přetrvat i po případném úniku plynu do okolí
- Desaturace IB
- Lokální změna hydrogeologických poměrů, změna gradientu proudění

Přítomnost proudící podzemní vody je dobrým indikátorem, že budou splněny podmínky pro dostatečný odvod plynu.

3.1.7 Vylučující kritéria z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

V souvislosti s hodnocením kritérií, které mají vliv na dlouhodobou bezpečnost, je nutno identifikovat jednoznačně, které kritéria mají vylučující charakter pro umístění HÚ (zejm. dle vyhl. 378/2016). Souhrnně jsou uvedena v

Tab. 1. (Vokál et al. 2017)

Tab. 1 Přehled kritérií, které mají vylučující charakter z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (Vokál et al. 2017)

Položka	Název kritéria	Popis kritéria/ hodnota	Legislativní předpis
2.1	Geologické charakteristiky		
2.1.1	popsatelnost a predikovatelnost homogenních bloků	Geologické podmínky v úložišti musí umožnit připravit důvěryhodný komplexní, prostorový geologický model. Hlubkový dosah horninového masivu musí být dostatečný s ohledem na max. předpokládanou hloubku umístění úložiště (minimálně 400 m). Nepřijatelná míra nejistoty v identifikaci a popisu regionálních a lokálních poruchových zón a dalších geologických struktur může vylučovat umístění úložiště. V první fázi povrchového geologického průzkumu však tento faktor nemusí být vylučující, ale může sloužit pro porovnání lokalit.	Vyhl. 378/2016, § 18 (4) b)
2.1.2	variabilita vlastností	Velká variabilita vlastností neumožňující připravit důvěryhodný 3 D geologický, hydrogeologický, či geochemický model je jednou z vylučujících kritérií. Ve stávající fázi povrchové geologické charakterizace však tento faktor nemůže být vylučující, ale může sloužit pro porovnání lokalit.	Vyhl. 378/2016, § 18 (4) b)
2.2	Hydraulické charakteristiky		
2.2.1	přítomnost zvodní v izolační části úložiště	Přítomnost zvodní v izolační části úložiště je vylučujícím kritériem pro umístění úložiště.	
2.2.2	obtížnost vytvoření hydrogeologických modelů a predikce vývoje hydrogeologických poměrů v lokalitě	Nepřijatelné nejistoty v důsledku obtížného stanovení vlivu poruchových zón a dalších struktur na vytvoření hydrogeologického modelu lokality. V první fázi povrchového geologického průzkumu však tento faktor nemusí být vylučující, ale může sloužit pro porovnání lokalit.	Vyhl. 378/2016, § 18 (4) b) 2.

Položka	Název kritéria	Popis kritéria/ hodnota	Legislativní předpis
2.3	Stabilita lokality		
2.3.1	zeměřesení a přítomnost potenciálně aktivních zlomů pro období statisíců let (seismická stabilita)	Pro umístění nemůže být využit pozemek jaderného zařízení, na kterém nebo ve vzdálenosti do 5 km od jeho hranice se vyskytuje zlom potenciálně schopný posunu s projevem na povrchu nebo blízko povrchu. Hodnoty maximálního potenciálního magnituda a hodnoty zrychlení kmitů půdy s četností mohou být použity pro porovnání lokalit.	Vyhl. 378/2016, § 6 (2) a).
2.3.2	pokles nebo výzdvih povrchu území (vertikální pohyby zemské kůry)	Umístění úložiště je vyloučeno v lokalitách, kde pohyby zemské kůry jsou větší než 1 mm/rok.	vyhl. 378/2016, § 18 (2) g
2.3.3	postvulkanické jevy	Budou vyloučeny lokality s postvulkanickými jevy (výrony plynů, horké vody, atd.).	Vyhl. 378/2016, § 9 (3) a) 2.
2.4	Charakteristiky, které by mohly vést k narušení úložiště budoucími aktivitami člověka		
2.4.1	přítomnost starých důlních děl	Na pozemku jaderného zařízení se nesmí vyskytovat stará důlní díla.	Vyhl. 378/2016, § 9 (3) b)
2.4.2	přítomnost zásob nerostných surovin	V hloubce větší než 100 m nesmí být zásoby nerostných surovin.	vyhl. 378/2016, § 18 (2) o)
2.4.3	přítomnost zdrojů podzemní vody či geotermální energie	Horninové prostředí nesmí obsahovat významné zdroje vody či potenciál pro využívání geotermální energie.	Vyhl. 378/2016, § 8 (2), § 18 (4) c)
2.5	Transportní vlastnosti horninového prostředí		
2.5.1	Velikost efektivní dávky pro reprezentativní osobu		Vyhl. 378/2016, § 16 b) 3.

3.2 Definice kritérií pro umístění HÚ z hlediska proveditelnosti HÚ (projektová kritéria)

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 HÚ jsou objekty, zařízení a technologie nezbytné k zajištění provozu hlubinného úložiště, tj. objekty sloužící k příjmu, přebalení a zavážení VJP a RAO, které mohou být umístěny jak na povrchu, tak v přípovrchových objektech. Na tato zařízení je nutné v přiměřené míře odpovídající charakteru zařízení aplikovat kritéria a výběrové postupy uvedené v české legislativě z jaderné a environmentální oblasti a oblasti pozemního, příp. podzemního stavitelství.

Druhá provozní část HÚ - ukládací prostory - je umístěna v podzemí. Požadavky na její umístění jsou z hlediska jaderné legislativy pouze obecně formulovány v Atomovém zákoně a souvisejících vyhláškách SÚJB (viz Legislativa v kapitole 10) a doporučeních IAEA (IAEA 2006 a 2011). Jedním z důvodů této obecnosti mezinárodních předpisů je to, že požadavky na hlubinné úložiště jsou úzce spjaty s konkrétní lokalitou a zahrnují řadu předpokladů specifických pro vybrané geologické prostředí dostupné v zemi, kde odpady vznikly.

Hlubinné úložiště musí být navrženo tak, aby bylo možné bezpečně uložit všechny radioaktivní odpady 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.

Navržené technické řešení musí být ověřeno prokázáním bezpečnosti, a to jak provozní, tak dlouhodobé, která se vzhledem k charakteru uložených odpadů pohybuje v řádech statisíců let. Hodnocení provozní i dlouhodobé bezpečnosti musí být provedeno jak pro normální provoz, tak pro projektové nehody, které by mohly mít největší dopad na životní prostředí a obyvatelstvo. Výsledky těchto výpočtů se musí zpětně promítnout do návrhu technického řešení. Jde tedy o iterativní proces vedoucí k optimalizaci radiační ochrany a jaderné bezpečnosti obyvatelstva, ochraně životního prostředí při respektování všech socio-ekonomických požadavků (Vokál et al. 2017).

3.2.1 Proveditelnost podzemní části úložiště

3.2.1.1 Velikost využitelného horninového masivu

Technické řešení hlubinného úložiště musí především respektovat strukturně a tektonické poměry hostitelského horninového masivu tak, aby byly splněny požadavky na dlouhodobou bezpečnost.

Homogenní bloky horniny musí být v takové hloubce a v dostatečné vzdálenosti od zvodnělých poruchových zón, aby bylo zamezeno přístupu člověka k odpadům, ovlivnění úložiště procesy probíhajícími na povrchu a zabráněno rychlé migraci radionuklidů ke zvodnělým poruchovým zónám.

Za **dostatečnou hloubku úložiště** pro uložení vyhořelého jaderného paliva se považuje několik set metrů (min. 300 m) pod povrchem země (IAEA 2011a).

Pro posouzení potřebné **vzdálenosti úložných prostor** (izolační části úložiště) od poruchových zón je možno vycházet ze zahraničních doporučení, které rozlišují regionální, větší a menší poruchové zóny a kategorizace (Marek et al. 2005; Andersson et al. 2000),

Využitelný masiv musí mít takové rozměry, aby při dodržení všech technických a bezpečnostních požadavků byl schopen s rezervou pojmout předpokládané množství odpadu k uložení (Vokál et al. 2018). Využití horninového bloku vychází z vlastní **velikosti horninového bloku a velikosti ukládacího horizontu**, která je odvozena z roztečí ÚOS a roztečí ukládacích chodeb, které vycházejí z teplotních výpočtů (Butovič et al. 2018). Tyto výpočty jsou silně ovlivněny počátečním tepelným počátečním tokem VJP, který závisí na době skladování VJP v meziskladech před jeho uložení. (Butovič et al. 2018).

Důležitou vlastností puklinového prostředí je i **hustota menších poruchových zón a větších puklin** neumožňujících umístění UOS v neporušené hornině v hloubce úložiště. Tuto vlastnost však nelze hodnotit ve fázi geologického průzkumu prováděného z povrchu, v době výběru lokalit (Vokál et al. 2017).

3.2.1.2 Vlastnosti horninového prostředí pro konstrukci podzemní část úložiště

3.2.1.2.1 Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin

Mechanické vlastnosti samotné horniny a **chování horninového masivu** sehrávají důležitou roli při budování podzemních prostor a ovlivňují technologii razících prací a její ekonomiku. Důležitou roli při budování podzemních prostor hrají mechanické vlastnosti samotné horniny a chování horninového masivu. Tyto vlastnosti ovlivňují bezpečnost, technologii ražby i ekonomiku. Důležitou roli hrají vlastnosti ovlivňující mechanickou stabilitu podzemních prostor, výskyt křehkých poruch (pukliny, zlomy) a vlastnosti ovlivňující obtížnost razících prací (Butovič et al. 2018).

Důležitou nepříznivou roli v rámci horninového masivu mají **křehké poruchy** (pukliny a zlomy). Diskontinuity mohou vést k vytváření nadvýlomů, deformacím stěn nebo reaktivaci posunů podél diskontinuit. Horninový masiv by měl vykazovat co možná nejmenší tektonické postižení, projevujícím se křehkými a duktilními deformacemi horniny, nízký stupeň alterací a zvětráním. **Početnost a prostorové a jiné charakteristiky poruch** ovlivňují požadavky na dočasnou nebo trvalou výztuž stěn výrubu. Zóna narušená či poškozená (tzv. EDZ a EdZ) v důsledku razících prací by měla být co nejmenší. Velikost vzniklé zóny narušení ovlivňuje mimo jiné i technologie razících prací.

Obtížnost razících prací výrubu podzemních prostor budou charakterizovány zejména pevnostními parametry, parametry abrazivnosti a rozpojitelosti horniny, vrtatelnost, trhatelnost (Butovič et al. 2018). Tyto parametry jsou dány zejména litologickými charakteristikami (mineralogické složení horniny, zrnitost, usměrnění zrn – foliace, stupeň zvětrání horniny), charakteristikami diskontinuit a rovněž pevnostními parametry hornin (Vokál et al. 2018). Významnou roli hraje i napjatostní stav horninového masivu (Butovič et al. 2018).

Velmi nepříznivé mechanické vlastnosti hornin ve spojení s intenzivním křehkým porušením hornin, jakož i nemožnost využít osvědčených důlních technologií mohou vylučovat umístění hlubinného úložiště.

3.2.1.2 Tepelné vlastnosti hornin

Tepelné charakteristiky hornin, zejména tepelná vodivost hornin a tepelná difuzivita, přímo ovlivňují prostorové uspořádání úložných prostor (vzdálenosti mezi tunely a samotnými vrty), čímž přímo ovlivňují celkové rozměry úložiště (Vokál et al. 2017; Butovič et al. 2019).

Koeficient tepelné roztažnosti společně s veličinami **přenosu tepla** jsou důležitými charakteristikami, které se užívají při výpočtech změn napětí a následných deformací. Zvýšení termálního zatížení v provozní fázi způsobí sekundární napětí kolem výrubu a na jeho výstroj. Velikost tohoto zatížení závisí na zejména na **objemové roztažnosti** (volumetric thermal expansion) hostitelské horniny, na **množství tepelné energie** generované odpadem a na **tepelné vodivosti**, tedy na rychlosti odvodu tepla do vzdálenějších míst.

Hodnoty koeficientu tepelné roztažnosti hornin by měly být v předpokládaném podzemním areálu HÚ pokud možno relativně uniformní. Koeficient tepelné roztažnosti je závislý zejména na mineralogickém složení hornin. Běžné hodnoty jsou 10^{-6} až 10^{-5} K^{-1} . Specifické hodnoty jednotlivých typů hornin budou studovány při detailní charakterizaci lokality. Teplotní charakteristiky nemají vliv na způsob a rychlost razících prací. Koeficient tepelné roztažnosti spolu s geometrií puklin a počátečním napjatostním stavem jsou vstupní proměnné pro termomechanickou analýzu.

Nepříznivé hodnoty teplotních charakteristik hornin nejsou vylučujícím kritériem pro umístění úložiště (Vokál et al. 2017; Butovič et al. 2019).

3.2.1.3 Hydrogeologické poměry

Nepříznivé **hydraulické parametry horninových masivů** (vysoká transmisivita poruchových zón, nepřipustně malá vzdálenost ukládacích prostor od zvodnělých poruchových zón) ovlivňují umístění ukládacích a přístupových tunelů, a to jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru a ovlivňují také podmínky výstavby.

Ve fázi budování podzemních prostor velký přítok vody, který je determinován zejména početností, průběžností, otevřeností diskontinuit a také gradientem, ovlivní rychlost a technickou náročnost razících a zabezpečovacích prací. V extrémním případě velmi vysoký **hydrostatický tlak** může zhoršit stabilitu výrubu, a tím negativně ovlivnit pracovní podmínky a bezpečnost práce. Do jisté míry je tato rizika možná eliminovat technickými nápravnými opatřeními, jako je použití výztuží nebo injektáže, nicméně zejména v případě injektáží je třeba volit řešení tak, aby z dlouhodobého hlediska použité materiály negativně neovlivnily slučitelnost inženýrských bariér s horninovým prostředím. **Chemické složení podzemních vod** může rovněž z dlouhodobého hlediska ovlivňovat korozi oceli, betonových výztuží a cementových injektáží.

Z projektového hlediska hydrogeologické poměry v lokalitě mohou vést k vyloučení určitých částí horninového prostředí nebo být důvodem k vyloučení celé lokality (Vokál et al. 2017, Butovič et al. 2018).

3.2.2 Proveditelnost povrchové části úložiště

V současné době koncepční řešení předpokládá, že na povrchu, příp. v přípoверхových partiích, budou prováděny činnosti, které svým charakterem přísluší dikci atomového zákona č. 263/2016 Sb., v platném znění a jeho prováděcích vyhlášek. V případě posuzování vlastností lokalit se zde prolínají projektová a bezpečnostní kritéria. V této části jsou identifikována kritéria, která mají vztah k fázi projektové přípravy úložiště a k jeho výstavbě (Vokál et al. 2017).

3.2.2.1 Zajištění stability staveb a vlastnosti základových púd

Z hlediska zajištění proveditelnosti staveb na dané lokalitě se jedná zejména o geotechnické charakteristiky základových púd (zejména únosnost a stlačitelnost), přítomnost svahových deformací (zejména hluboko založených poruch) a výmolové eroze, hodnocení režimu a oběhu podzemních vod v území, výšku hladiny podzemních vod a její kolísání, chemické složení podzemních vod nebo seismickou stabilitu.

Podle vyhlášky SÚJB č. 378/2016, § 9 posuzování území z hlediska dalších geodynamických jevů a geotechnických parametrů základových púd musí

a) hodnotit

1. vulkanismus a projevy postvulkanické činnosti,
2. svahové pohyby, včetně sněhových lavin,
3. propady a deformace povrchu území, včetně poddolování,
4. nepříznivé vlastnosti základových púd,
5. větrnou erozi a
6. zdroje prachových částic a úlomků hornin a

b) být provedeno v případě jevů podle písmene a)

1. bodu 1 do vzdálenosti 25 km,
2. bodů 2 a 3 do vzdálenosti 5 km a
3. bodu 4 na pozemku jaderného zařízení.

Dále pak posuzování území k umístění jaderného zařízení z hlediska dalších geodynamických jevů a geotechnických parametrů základových púd musí zohlednit

a) v případě jevů podle odstavce 1 písm. a) bodu 1 výskyt vulkanických hornin paleogenního až holocenního stáří a projevů postvulkanické činnosti, zejména výronů plynů nebo minerálních vod, spojených s minulou vulkanickou aktivitou,

b) v případě jevů podle odstavce 1 písm. a) bodu 2 nestabilitu svahů,

c) v případě jevů podle odstavce 1 písm. a) bodu 3 výskyt

1. kaveren a krasových formací,
2. hlubinných dolů, podzemních zásobníků plynu a jiných staveb realizovaných v podzemních prostorech a pozůstatků historické těžby a

3. čerpacích vrtů a technologií rozpouštění k těžbě nerostných surovin a podzemní vody, včetně propadu nebo deformace povrchu, a

d) v případě jevů podle odstavce 1 písm. a) bodu 4

1. geotechnické vlastnosti přítomných zemin a hornin a
2. stabilitu základových zemin a hornin při statickém a dynamickém namáhání.

Charakteristikou dalších geodynamických jevů a geotechnických parametrů základových půd, při jejímž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno, je výskyt

a) vulkanických hornin pliocenního až holocenního stáří nebo projevů postvulkanické činnosti, zejména výronu plynů nebo minerálních vod, spojených s minulou vulkanickou aktivitou, do vzdálenosti 5 km,

b) jevů podle odstavce 2 písm. c)

1. na pozemku jaderného zařízení, nebo
2. mimo pozemek jaderného zařízení, hrozí-li propad nebo deformace povrchu území k umístění jaderného zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost,

c) svahových pohybů snižujících jadernou bezpečnost, nebo

d) přetrvávajících nevhodných vlastností základových půd, a to

1. nevhodnosti základových půd pro zakládání objektů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti, pokud průměrná rychlost příčných vln v základové půdě je nižší než 360 m/s,

2. výskytu základové půdy s únosností nižší než 0,2 MPa,

3. výskytu prosedavých nebo silně bobtnavých základových půd,

4. výskytu základové půdy zařazené mezi středně organické nebo vysoce organické, nebo

5. výskytu ztekucení zemin.

3.2.2.2 Dostupnost infrastruktury

K zajištění výstavby a provozu hlubinného úložiště jsou v procesu projektové přípravy kladeny požadavky na **dostupnost stavby** a jeho potřeby **nápojení na infrastrukturu**, a to nejen dopravní, ale i technologickou.

Příslušná dopravní a technická infrastruktura je nutná k zajištění výstavby a provozu hlubinného úložiště. Významným faktorem, důležitým pro provoz HÚ a to zejména pro bezpečnou přepravu VJP do areálu HÚ, je dostupnost železnice a silnice. Posouzení ostatní infrastruktury bude zahrnovat elektrickou rozvodnou síť, vodu pitnou i povrchovou, kanalizaci, plynové rozvody, možnosti skladování skřívky a rubaniny, dojezdová vzdálenost složek integrovaného zásahového systému apod. (Vokál et al. 2017).

3.2.2.3 Množství a složitost střetů zájmů

Při hodnocení proveditelnosti úložiště v lokalitách bude třeba posoudit množství a složitost **řešení střetů zájmů se zákonnou ochranou vlastností, jevů a objektů**, které se vyskytují ve vymezených lokalitách (elektroenergetika, plynoenergetika, produktovody, spoje, ochrana povrchových a podzemních vod, doprava, ochrana přírody a krajiny, nerostné suroviny a horninové prostředí, archeologie, ochrana lesa). Střety zájmů mohou dosáhnout charakteristiky, které vylučují umístění hlubinného úložiště v lokalitě.

Podle § 15 vyhlášky SÚJB č. 378/2016 je třeba hodnotit, zda pozemek jaderného zařízení zasahuje do ochranného pásma vymezeného podle jiného předpisu, zejména do

a) ochranného pásma silnic

b) ochranného pásma dráhy,

c) ochranného pásma leteckých staveb,

d) ochranného pásma plynovodu, ropovodu nebo jiného produktovodu a podzemního nebo nadzemního zásobníku plynu,

e) ochranného pásma zařízení elektrizační soustavy,

f) ochranného pásma zařízení na výrobu či rozvod tepelné energie,

g) chráněného ložiskového území nebo dobývacího prostoru,

h) ochranného pásma zvláště chráněného území,

i) ochranného pásma nemovité kulturní památky, ochranného pásma nemovité národní kulturní památky, ochranného pásma památkové rezervace nebo ochranného pásma památkové zóny,

j) ochranného pásma vodního zdroje,

k) ochranného pásma přírodních léčivých zdrojů, zdrojů přírodních minerálních vod nebo území lázeňského místa,

l) zóny havarijního plánování jiného jaderného zařízení nebo stanovené podle jiného právního předpisu a

m) ochranných pilířů jam, celíků a pásem povrchových a důlních objektů.

Charakteristikou kolize s ochranným nebo bezpečnostním pásmem, při jejímž dosažení je umístění jaderného zařízení zakázáno, je zasahování pozemku jaderného zařízení do ochranného pásma uvedených zařízení podle § 15 odstavce 1 písm. a) a b) (Vyhláška č. 378/2016).

3.2.3 Náklady

Zvolené technické řešení musí v první řadě prokázat to, že je dostatečně **robustní z hlediska bezpečnosti** (Vokál et al. 2017).

Lze zvolit řešení, které bude z hlediska bezpečnosti několikanásobně převyšovat požadované parametry, což může vést k výraznému zvýšení investičních i provozních nákladů. Z hlediska optimalizace ekonomických nákladů je však vhodné zvolit řešení, které je s **přiměřenou mírou konzervativnosti** po bezpečnostní i technické stránce vyhovující, ale **ekonomicky optimální**.

Významnými mohou být především (Butovič et al. 2018)

- Investiční náklady na výstavbu a uzavírání podzemní části HÚ
- Provozní náklady
- Napojení na ostatní technickou infrastrukturu
- Povrchový areál
- Silniční napojení
- Vyvolané náklady

- Železniční napojení

Protože podmínky pro technické řešení stavby na jednotlivých lokalitách mohou být různé, je možné z tohoto pohledu porovnat potřeby nákladů na zajištění navrhovaného technického, a bezpečnosti vyhovujícího řešení.

3.2.4 Vylučující kritéria z hlediska technické proveditelnosti

V souvislosti s hodnocením kritérií, které mají vliv na technickou proveditelnost, je nutno identifikovat jednoznačně, které kritéria mají vylučující charakter pro umístění HÚ (zejm. dle vyhl. 378/2016). Souhrnně jsou uvedena v Tab. 2. (Vokál et al. 2017)

Tab. 2 Přehled kritérií, která mají vylučující charakter z hlediska technické proveditelnosti (Vokál et al. 2017)

Položka	Název kritéria	Popis kritéria/ hodnota	Legislativní předpis
1.	Vylučující projektová kritéria		
1.1	velikost využitelného horninového masivu	Využitelný masiv musí mít takové rozměry, aby při dodržení všech technických a bezpečnostních požadavků byl schopen s rezervou pojmout předpokládané množství odpadu k uložení.	Vyhl. 378/2016, § 18 (2) a)
1.2	hydrogeologické poměry	Velmi nepříznivé hydrogeologické poměry pro umístění hlubinného úložiště mohou vést k vyloučení některých částí úložiště, zpravidla však je možno nepříznivé podmínky napravit technickým či administrativním opatřením. Předběžným kritériem je hodnota toku vody do úložného vrtu 0,1 l/min, do úložného tunelu 0,25 l/min).	Vyhl. 378/2016, § 18 (4) a)
1.3	zajištění stability staveb	výskyt a) vulkanických hornin pliocenního až holocenního stáří nebo projevů postvulkanické činnosti, zejména výronu plynů nebo minerálních vod, spojených s minulou vulkanickou aktivitou, do vzdálenosti 5 km,	Vyhl. 378/2016, § 9 (3) a)

Položka	Název kritéria	Popis kritéria/ hodnota	Legislativní předpis
		<p>b) jevů podle odstavce 2 písm. c) (1. kaveren a krasových formací, 2. hlubinných dolů, podzemních zásobníků plynu a jiných staveb realizovaných v podzemních prostorech a pozůstatků historické těžby, 3. čerpacích vrtů a technologií rozpouštění k těžbě nerostných surovin a podzemní vody, včetně propadu nebo deformace povrchu,)</p> <p>1. na pozemku jaderného zařízení, nebo</p> <p>2. mimo pozemek jaderného zařízení, hrozí-li propad nebo deformace povrchu území k umístění jaderného zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost,</p> <p>c) svahových pohybů snižujících jadernou bezpečnost, nebo</p>	<p>Vyhl. 378/2016, § 9 (3) b)</p> <p>Vyhl. 378/2016, § 9 (3) c)</p>
		<p>d) přetrvávajících nevhodných vlastností základových půd, a to</p> <p>1. nevhodnosti základových půd pro zakládání objektů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti, pokud průměrná rychlost příčných vln v základové půdě je nižší než 360 m/s,</p> <p>2. výskytu základové půdy s únosností nižší než 0,2 MPa,</p> <p>3. výskytu prosedavých nebo silně bobtnavých základových půd,</p> <p>4. výskytu základové půdy zařazené mezi středně organické nebo vysoce organické, nebo</p> <p>5. výskytu ztekucení zemin.</p>	<p>Vyhl. 378/2016, § 9 (3) d)</p>
1.4	množství složitost zájmů a střetů	<p>Charakteristikou kolize s ochranným nebo bezpečnostním pásmem, při jejímž dosažení je umístění pozemku jaderného zařízení zakázáno, je zasahování pozemku jaderného zařízení do ochranného pásma podle § 15 odstavce 1 písm. a) a b) vyhlášky SÚJB, tj.:</p> <p>a) silničního ochranného pásma,</p> <p>b) ochranného pásma dráhy,</p>	<p>Vyhl. 378/2016, § 15 (2)</p>

4 Kvalitativní popis vzájemného vztahu jednotlivých aspektů

Technické řešení hlubinného úložiště bude výrazně ovlivněno řadou vstupních a okrajových podmínek. Tyto podmínky lze rozčlenit v zásadě do několika skupin (Vokál et al. 2017):

- 1) První skupinou jsou **podmínky strategického charakteru**, to znamená zejména specifikace množství a vlastností ukládaného odpadu a jeho forma k uložení. K těmto podmínkám lze zařadit rozhodnutí o tom, zda bude uloženo nepřepřacované palivo nebo se budou ukládat odpady z přepracování; zda horká komora, která slouží k přeložení paliva do ukládacích obalových souborů, bude součástí areálu hlubinného úložiště, nebo se tyto činnosti budou vykonávat jinde, a do hlubinného úložiště se budou přivážet už připravené ukládací obalové soubory.

Při řešení HÚ předpokládáme, že v něm bude ukládáno nepřepřacované palivo a že horká komora bude součástí HÚ.

- 2) Druhou skupinou jsou **požadavky a omezení, vzniklé na základě charakteristiky lokality**. Pro řešení podzemního areálu jsou to zejména požadavky, které se týkají proveditelnosti hlubinného úložiště, aniž by byly ovlivněny vlastnosti lokality důležité pro zajištění dlouhodobé a provozní bezpečnosti. Primárním požadavkem však je to, aby horninový masiv byl dostatečně velký pro umístění všech současných i předpokládaných radioaktivních odpadů, které vzniknou na území ČR. Pro povrchový areál pak například morfologie terénu v místě výstavby areálu, parametry základových půd, přítomnost svahových deformací, výmolvé eroze apod., které mohou ovlivnit velikost nadzemního areálu i umístění některých důležitých i podpůrných technologií, možnosti napojení na místní infrastrukturu atd. Důležitá jsou i specifická přírodní a environmentální omezení, jako například povětrnostní podmínky nebo krajinný ráz.
- 3) Další důležitou skupinou jsou **legislativní požadavky**. Hlubinné úložiště je jaderné zařízení a zároveň báňské dílo, s povrchovým a podzemním areálem. Proto spadá pod působnost a musí splňovat veškeré relevantní požadavky z oblasti jaderné a báňské legislativy, pozemního stavitelství a environmentálních vlivů.
- 4) Poslední skupinu tvoří **socio-ekonomické podmínky**. V tomto případě se jedná především o to, jak vyhovět požadavkům veřejnosti na zakomponování areálu do okolní krajiny nebo jak minimalizovat vlivy výstavby na okolní prostředí.

Na základě analýzy podkladů (Vokál et al. 2017; Havlová et al. 2018 a Butovič et al. 2018) – viz Tab. 3 – byl v matici posouzen potenciální vliv alokovaných bezpečnostních aspektů na projektové a technické aspekty řešení HÚ, či indikován vzájemný vztah mezi aspekty. Vzájemný vztah je indikován Ano; minimální vazba Ne.

Jak je z matice patrné, významnou provázanost lze nalézt zejména mezi Proveditelností podzemní části úložiště a Bezpečnostními aspekty napříč všemi charakteristikami, protože některé indikátory se více méně dublují či je nutno je pojímat v širším kontextu a v souvislostech (typicky tepelné vlastnosti hornin či hydraulické vlastnosti horninového masivu – viz Tab. 3).

Tab. 3 Matice, identifikující vzájemný vztah mezi aspekty dlouhodobé bezpečnosti a proveditelnosti HÚ

Technické aspekty	B1 Proveditelnost podzemní části úložiště				B3. Proveditelnost povrchové části úložiště			B4 Ekonomická kritéria	
	B1.1 Velikost využitelného horninového masivu	B1.2 Vlastnosti horninového prostředí pro konstrukci podzemní části		B1.2.3 Hydrogeologické poměry	B3.1 Zajištění stability staveb a vlastností základových púd	B3.2 Dostupnost infrastruktury	B3.3 Množství a složitost střetů zájmů	B4.1 Investiční náklady	B4.2 Provozní náklady
Bezpečnostní aspekty		B1.2.1 Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin	B1.2.2 Tepelné vlastnosti hornin						
A1.1 Geologické charakteristiky									
A1.1.1 Popsatelnost a predikovatelnost homogenních bloků	Ano	Ano	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
4.2.1.2 Variabilita fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
4.2.1.3 Dostupnost dat pro popis horninového prostředí	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.2 Hydrogeologické charakteristiky lokality									
A1.2.1 Přítomnost zvodní v izolační části úložiště	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.2.2 4.2.2.2 Obtížnost vytvoření HG modelu a predikce vývoje hydrogeologických poměrů	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.2.3 Rychlost proudění vody v úložišti a propustnost horninového masivu	Ano	Ano	Ne	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
A1.2.4 Identifikace a umístění drenážních bází v lokalitě	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.3 Transportní charakteristiky lokality									
A.1.3.1 Doba transportu radionuklidů	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.3.2 Rozpustnost radionuklidů v podzemní vodě	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.3.3 Redění v důsledku mísení s nekontaminovanými vodami	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4 Stabilita lokality									
A1.4.1 Seismická stabilita	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.2 Geodynamická stabilita (pokles nebo výdřív povrchu)	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.4.3 Postvulkanické jevy	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.5 Klimatické změny	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.5 Charakteristiky lokality, které by mohly vést k narušení úložiště									
A1.5.1 Ložiskové poměry na lokalitě (dobývací prostory, CHLÚ, prognózy nerostných surovin)	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne
A1.5.2 Poddolovaná území a stará a opuštěná důlní díla na pozemku pro povrchová zařízení.	Ano	Ano	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
A1.5.3 Vrtná prozkoumanost	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
A1.5.4 Zdroje podzemních vod (viz § 8 vyhlášky č. 378/2016 Sb.)	Ano	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne
A1.5.5 Potenciál geotermální energie	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne
A1.6 Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských									
A1.4.1 Tepelné vlastnosti	Ano	Ne	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
A1.4.2 Hydraulické vlastnosti	Ne	Ne	Ano	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.2 Mechanické vlastnosti	Ne	překrývají se	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.3 Fyzikálně chemické a geochemické vlastnosti	Ne	Ano	Ano	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.4 Mikrobiologické vlastnosti	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.5 Plynopropustnost	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne

5 Expertní kvantifikace vlivu jednotlivých aspektů

Na základě analýzy podkladů (Vokál et al. 2017; Havlová et al. 2018 a Butovič et al. 2018) – byl v matici posouzen význam vlivu alokovaných bezpečnostních aspektů na projektové a technické aspekty řešení HÚ či vzájemný vztah mezi aspekty – viz Tab. 4. Vzájemný vztah je hodnocen na škále Velmi významný, Významný a Méně významný. Význam vztahu byl hodnocen konzervativně - v situaci, kdy se míra vlivu pohybovala na rozhraní, byla na základě expertního názoru přijata hodnota konzervativní (významnější stupeň vztahu).

Jak je z matice patrné, významnou provázanost lze nalézt zejména mezi Proveditelností podzemní části úložiště a Bezpečnostními aspekty napříč všemi charakteristikami, přičemž vazby mezi některými indikátory se více méně dublují či jejich vztah je nutno pojímat v širším kontextu a v souvislostech (typicky tepelné vlastnosti hornin či hydraulické vlastnosti horninového masivu – viz Tab. 4).

V dalším textu je stručně popsána míra vzájemné vlivu bezpečnostních a technických kritérií, posuzujících umístění HÚ.

Tab. 4 Matice, kvantifikující vzájemný vztah mezi aspekty dlouhodobé bezpečnosti a proveditelnosti HÚ na základě 3 stupňové škály, definující význam vztahu jako velmi významný – významný – méně významný. Některé aspekty se v obou oblastech překrývají (uvedeno jako Překrývají se).

Technické aspekty	B1 Proveditelnost podzemní části úložiště				B3. Proveditelnost povrchové části úložiště			B4 Ekonomická kritéria	
	B1.1 Velikost využitelného horninového masivu	B1.2 Vlastnosti horninového prostředí pro konstrukci podzemní části		B1.2.3 Hydrogeologické poměry	B3.1 Zajištění stability staveb a vlastnosti základových púd	B3.2 Dostupnost infrastruktury	B3.3 Množství a složitost střetů zájmů	B4.1 Investiční náklady	B4.2 Provozní náklady
Bezpečnostní aspekty									
A.1.1 Geologické charakteristiky lokality									
A1.1.1 Popsatelnost a predikovatelnost	velmi významný	velmi významný	Ne	velmi významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.1.2 Variabilita fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností	velmi významný	velmi významný	významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.1.3 Dostupnost dat pro popis hornin	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.2 Hydrogeologické charakteristiky lokality									
A1.2.1 Přítomnost zvodní v izolační části	velmi významný	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.2.2 4.2.2.2 Obtížnost vytvoření HG modelu a predikce vývoje hydrogeologických poměrů	velmi významný	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.2.3 Rychlost proudění vody v úložišti a propustnost horninového masivu	velmi významný	méně významný	Ne	překrývají se	Ne	Ne	Ne	velmi významný	Ne
A1.2.4 Identifikace a umístění drenážní soustavy	významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.3 Transportní charakteristiky lokality									
A1.3.1 Doba transportu radionuklidů	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.3.2 Rozpustnost radionuklidů v podzemní vodě	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.3.3 Ředění v důsledku mísení s nekontaminovanou podzemní vodou	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.4 Stabilita lokality									
A1.4.1 Seismická stabilita	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.2 Geodynamická stabilita (pokles úrovně podzemní vody)	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.3 Postvulkanické jevy	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.5 Klimatické změny	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A.1.5 Charakteristiky lokality, které mohou ovlivnit proveditelnost									
A1.5.1 Ložiskové poměry na lokalitě (dobývací prostory, CHLÚ, prognózy nerostných surovin)	významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	významný	Ne	Ne
A1.5.2 Poddolovaná území a stará a opuštěná důlní díla na pozemku pro povrchová zařízení.	méně významný	méně významný	Ne	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne
A1.5.3 Vrtná prozkoumanost	méně významný	méně významný	méně významný	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne
A1.5.4 Zdroje podzemních vod (viz § 8 vyhlášky č. 378/2016 Sb.)	významný	Ne	Ne	významný	Ne	Ne	významný	Ne	Ne
A1.5.5 Potenciál geotermální energie	Ne	Ne	méně významný	Ne	Ne	Ne	méně významný	Ne	Ne
A.1.6 Slučitelnost horninového prostředí									
A1.4.1 Tepelné vlastnosti	velmi významný	Ne	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	velmi významný	Ne
A1.4.2 Hydraulické vlastnosti	Ne	Ne	významný	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.2 Mechanické vlastnosti	Ne	překrývají se	méně významný	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.3 Fyzikálně chemické a geochemické vlastnosti	Ne	méně významný	méně významný	překrývají se	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.4 Mikrobiologické vlastnosti	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
A1.4.5 Plynopropustnost	Ne	méně významný	méně významný	méně významný	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne

5.1 Vztah technického aspektu Proveditelnost podzemní části úložiště k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Podzemní dílo je umístěno vždy v určitém horninovém prostředí, na němž je závislá jak volba konstrukce díla, tak volba technologie ražení. Ty jsou úzce závislé na mechanických vlastnostech samotné horniny a na chování horninového masivu. Důležitou roli hrají také výskyt křehkých poruch (pukliny, zlomy) a přítomnost podzemní vody.

5.1.1 Vztah kritéria Velikost využitelného horninového masivu k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Metodický pokyn MP.22 stanoví (Vokál et al. 2017), že využitelný masiv musí mít takové rozměry, aby při dodržení všech technických a bezpečnostních požadavků byl schopen s rezervou pojmout předpokládané množství odpadu k uložení a stanoví toto kritérium jako vylučující. Vzhledem k tomu, že se předpokládá určité množství porušení homogenity využitelného masivu diskontinuitami 3. řádu, které však nelze v průzkumné fázi s dostatečnou jistotou předvídat a projektově zpracovat, je nutná dostatečně velká prostorová rezerva v potencionálně využitelném horninovém masivu (Butovič et al. 2018).

Z hlediska proveditelnosti HÚ je třeba počítat s tím, že úložné vrty se mohou křížit s řadou křehkých deformací (zlomů a puklin), poruchových pásem a dalších litologických a strukturních nehomogenit. Jednodušší poruchy mohou být zřejmě sanovány již v průběhu vrtání pomocí injektážních směsí. Použité materiály injektáže musí být vybrány tak, aby nedošlo k vzájemnému negativnímu ovlivnění jednotlivých složek inženýrských bariér. Prostory s přítomností nehomogenit vyšší závažnosti je třeba vyloučit (prorazit a vynechat). Při určování velikosti masivu je nutné mít na zřeteli i dostatečnou vzdálenost od výraznějších zlomů/puklin, a to nejen z důvodu zajištění dlouhodobé bezpečnosti, ale i z důvodu mechanické stability stavby.

5.1.1.1 Vliv geologických charakteristik lokality

Popsatelnost a predikovatelnost

Základním předpokladem vybudování podzemní části HÚ je vytyčení takové části horninového masivu, který s dodržení všech bezpečnostních požadavků schopen s rezervou pojmout HÚ v předpokládaném rozsahu chodeb, které umožní uložit předpokládané množství odpadu se zajištěním všech bezpečnostních předpokladů. Pro určení velikosti území, vhodného pro identifikaci umístění HÚ, tzv. homogenních bloků, je třeba identifikovat a popsat regionálně geologickou stavbu území, regionální a větší lokální poruchové zóny, geologická rozhraní a další geologické struktury určující možné geologické bloky pro umístění úložných prostor. **Jde tedy o velmi významný parametr, ovlivňující velmi významně projektové řešení HÚ, který není překonatelný technickými opatřeními.**

Hloubkový dosah horninového masivu musí být prokazatelně dostatečný s ohledem na max. předpokládanou hloubku umístění úložiště (minimálně 400 m). Nepřijatelná míra nejistoty v identifikaci a popisu regionálních a větších lokálních poruchových zón a dalších geologických struktur může vylučovat umístění a/nebo projektové řešení úložiště.

Projektové řešení může být významně ovlivněno přítomností zlomových struktur a křehkého porušení masivu. Složitější a intenzivnější projevy duktilní deformace a složitost výsledných duktilních struktur (foliace, lineace) má přímý vliv na geotechnické parametry, jako například: napjatostní stav horninového masivu, mechanické vlastnosti hornin, vrtatelnost a trhatelnost atd. (viz 5.1.2.1.)

Variabilita vlastností fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností

Variabilita fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností významně ovlivňuje projektové řešení podzemní části HÚ a tedy i velikost využitelného horninového bloku.

Horizontální i vertikální střídání jednotlivých horninových těles (prostorová variabilita) může ovlivnit projektové řešení HÚ, a tedy i stanovení velikosti využitelného horninového masivu, vzhledem k možnosti výskytu zlomových struktur na rozhraní rozdílných petrologických těles, křehkého porušení či duktilní deformace. Petrologická variabilita obdobným způsobem může ovlivnit projektové řešení, jež je významně ovlivněno tepelnými a mechanickými vlastnostmi hornin.

Variabilita geochemických vlastností bude významně ovlivňovat jednak vlastnosti spojené se způsobem ražení podzemní části HÚ (viz 5.1.2.1.), a to vzhledem ke změnám pevnosti v důsledku geochemických změn hornin, jednak funkčnost inženýrských bariér. Negativním ovlivněním se v tomto případě myslí jakékoliv ovlivnění ukládacích obalových souborů VJP, bentonitového těsnění ukládacích míst, zásypu všech přístupových prostor, betonových konstrukčních prvků a betonkontejnerů sekce VAO), které by mohlo přímo (např. erozí materiálu zásypu) či nepřímo (např. změnou bobtnací schopnosti bentonitového těsnění) vést k předčasnému selhání bezpečnostních funkcí těchto bariér. Alterace hornin vedou ke změnám mineralogického, někdy i chemického složení a změnám fyzikálních vlastností hornin.

5.1.1.2 Vliv kritéria Hydrogeologické charakteristiky

Hydrogeologické vlastnosti velmi významně ovlivňují projektové řešení podzemní části HÚ.

Předpokládá se, že v hloubce 500 pod nejnižším místem terénu se **zvodně (souvislá akumulace podzemní vody)** nevyskytují v žádné z posuzovaných lokalit a že proudění podzemní vody v těchto hloubkách probíhá pouze po vodivých puklinách. Pokud by tomu bylo jinak, není možno HÚ v této lokalitě vybudovat. Co nejpomalejší proudění podzemní vody v horninovém masivu je jedním z předpokladů funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry. Nepříznivé hydraulické podmínky, stejně tak jako nejistoty v jejich predikci (možnost vytvoření HG modelu) mohou velmi významně ovlivnit umístění ukládacích a přístupových tunelů a mohou ovlivnit i podmínky výstavby.

Pomalé proudění podzemní vody v horninovém masivu je jedním z předpokladů bezpečnostní funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry, a to jak ve vztahu k migraci radionuklidů, tak ve vztahu k zajištění bezpečnostní funkce inženýrských bariér (zabránění vymývání bentonitu apod.). Méně vhodné se jeví lokality s větší rychlostí proudění podzemní vody.

Umístění drenážních bází ovlivňuje významně projektové řešení HÚ ve smyslu toho, že homogenní blok hornin pro umístění ukládacích vrtů je vždy vhodnější situovat v takové části

horninového masivu, kde k drenáži podzemní vody nedochází přímo nad HÚ (nulová odlehlost drenážního místa od okraje).

5.1.1.3 Vliv kritéria Stabilita lokality

Jak už bylo uvedeno výše, požadavky na **seismickou stabilitu území** pro povrchová jaderná zařízení jsou diskutovány například v dokumentech SÚJB (SÚJB 2012) a IAEA (2010). Pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti úložiště v hloubce několika set metrů pod povrchem země je za nejdůležitější považován vliv zemětřesení na možné poškození ukládacích korodujících obalových souborů. Konzervativně se předpokládá (Mc Ewen 2012; La Pointe et al. 1997), že zemětřesení může způsobit **posunutí podél křehkých struktur** procházejících úložnými vrty, což následně může vést v extrémním případě k mechanickému poškození obalových souborů. Ve švédském či finském programu je této vlastnosti věnována velká pozornost vzhledem k předpokladu, že po roztání vysokých vrstev ledu po skončení uvažované doby ledové, může v důsledku odlehčení dojít k poměrně velkým zemětřesením. Vzhledem k tomu, že v České republice nejsou žádné indicie, že by v minulosti došlo k trvalému zalednění (vysokých vrstev ledu), je však možno předpokládat, že k těmto zemětřesením nedojde (Vokál et al. 2017). Vliv na velikost využitelného horninového masivu je tedy velmi malý.

Vertikální pohyby zemské kůry představují potenciální nebezpečí pro úložiště. Za předpokladu stálého směru a rychlosti výzdvihu 1 mm/rok by bylo možné, že dojde k vynoření úložiště z hloubky 500 m za období zhruba 500 tisíc let. Změny povrchu území navíc mohou vést k následným změnám v říční síti, gradientu území apod. Vertikální pohyby zemské kůry mají úzkou souvislost s jinými geodynamickými procesy a jevy, jako např. se seismicitou území, aktivitou tektonických poruch, tektonicky podmíněnými svahy, apod. Kritickým prvkem může být i rozdílná míra výzdvihu/poklesu v rámci lokality spojená zpravidla se zlomovým pásem (tektonickou linií) na lokalitě. V některých zemích je umístění úložiště vyloučeno v lokalitách, kde pohyby zemské kůry mohou být větší než 1 mm/ročně (Vokál et al. 2017). Vertikální pohyby zemské kůry tak mohou potenciálně ovlivnit lokalitu k umístění HÚ jako celek (regionálně) spíše než přímo samotný využitelný horninový blok. Pokud budou vertikální pohyby zemské kůry rychlejší pro lokalitu jak celek, bude lokalita k umístění HÚ méně vhodná.

Intenzita a převažující typ denudačních procesů závisí na geomorfologických vlastnostech území. Pro zhodnocení stability HÚ vyhořelého jaderného palivu a radioaktivních odpadů je proto velmi důležitou veličinou tzv. **geomorfologická pozice**. Tu lze definovat jako komplex faktorů a procesů, mezi které patří především (Hroch et al. 2015):

- (i) litologické a strukturní podmínky ovlivňující rezistentnost hornin vůči zvětrávání a denudaci,
- (ii) tektonická predispozice vývoje reliéfu a vertikální pohyb území řídicí místní erozní báze a tím intenzitu eroze,
- (iii) hydrologická pozice, hlavně vztah k rozvodí, jelikož oblasti hlavních rozvodí jsou nejméně postiženy zpětnou erozí a obvykle představují nejstarší zachované reliky reliéfu,
- (iv) klima ovlivňující typ zvětrávání, intenzitu a charakter erozních procesů a přítomnost periglaciálních jevů příp. výšku erozní báze

Efektivita denudace a eroze je z dlouhodobého hlediska podmíněna vertikálními pohyby povrchu. Výzdvih dané oblasti má za následek relativní pokles absolutní erozní báze a změnu spádové křivky fluvialního systému. V důsledku změny spádových poměrů dochází

ke spouštění nového cyklu zpětné eroze postupující ve směru proti proudu toku a projevující se zahlubování dna toků v daném povodí (Hroch et al. 2015).

Zatímco za předpokladu stálého směru a rychlosti výzdvihu 1 mm/rok by bylo možné, že dojde k vynoření úložiště z hloubky 500 m za období 500 tisíc let, v literatuře se uvádějí rozsahy výzdvihu Českého masivu 0,04 – 0,1 mm.a-1 (Hroch et al, 2015). **Je tedy patrné, že k vynoření úložiště na povrch by došlo o řádově delší dobu a lze tedy vyhodnotit vliv aspektu geodynamické stability na projektové řešení HÚ (a tedy i na velikost využitelného horninového masivu) jako méně významné.**

V případě vyššího výzdvihu či významně vyšší erozní rychlost by bylo možno problém řešit posunem HÚ do hloubky větší než 500 m.

Vliv **postvulkanických jevů** na vývoj úložiště je spojen s možným zvýšeným tepelným tokem, výskytem minerálních a termálních vod, seismickými jevy a výrony plynů a mohou tak ovlivnit i využitelného horninového bloku. **Výskyt těchto jevů je však v Českém masivu limitován na oblasti jiné než potenciálních lokalit HÚ a jejich význam je tedy zanedbatelný.**

5.1.1.4 Vliv kritéria Faktory zvyšujících pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Vyhrazená **ložisková území, zásoby nerostných surovin** a jejich prognózy představují strategické faktory pro stát a jeho rozvoj, a jako takový může být přítomnost významných zásob nerostných surovin vylučujícím kritériem při hodnocení a porovnávání vhodnosti jednotlivých lokalit. **Výskyt těchto území tedy může vzhledem k potenciálnímu středu zájmů významně ovlivnit umístění podzemní části HÚ a tím i velikosti využitelného horninového masivu.**

Přítomnost starých důlních prací a poddolovaných území ovlivňuje bezpečnost podzemních děl a může představovat cestu pro průnik člověka do blízkosti hlubinného úložiště. Kromě toho ovlivňuje napjatostní stav horninového masivu či tvorbu preferenčních cest pro migraci radionuklidů horninovým prostředím. Obdobně je tomu i u **vrtných prací** na lokalitě. Pro lokality s přítomností hlubokých strukturních a vyhledávacích vrtů do hloubek přes 500 m může v závislosti na lokalizaci vrtů a průzkumných prací hrozit střet či nezbytnost technických řešení.

Zdroje podzemních vod představuje **významný parametr**, ovlivňující umístění HÚ (nebezpečí průniku člověka do hlubinného úložiště či potenciální budoucího střetu zájmů při zajištění potřeb obyvatelstva). Dle legislativních požadavků (vyhláška č. 378/2016 Sb.) je umístění jaderného zařízení zakázáno na lokalitě, je-li zde prokázána existence významných útvarů podzemních vod, u nichž by mohlo dojít k trvalému znečištění radioaktivní látkou.

5.1.1.5 Vliv kritéria Slučitelnosti horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti horninového prostředí jsou jedním z kritických vstupů pro dimenzování a hodnocení HÚ a tedy i pro velikost využitelného horninového bloku.

V prvních letech provozu HÚ jsou určující pro teplotu na povrchu kontejneru tepelné vlastnosti bentonitu, tloušťka bentonitové vrstvy obklopující ÚOS a rozteče ukládacích chodeb, avšak z dlouhodobého hlediska je rozhodující geometrie úložiště a tepelné vlastnosti horniny (Blaheta et al. 2012). Tepelné vlastnosti hornin (zejména tepelná vodivost a tepelná difuzivita) vstupují jako proměnné do geomechanických a geochemických modelů a procesních modelů popisujících a predikujících degradaci inženýrských bariér (Vokál et al. 2017).

Vliv na velikost ukládacího horizontu HÚ, které je přímo odvozeno od roztečí ÚOS a roztečí ukládacích chodeb, mají především samotné tepelné vlastnosti hornin, jako je měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost či koeficient tepelné roztažnosti, či homogenita a izotropie tepelné vodivosti. Tyto vlastnosti se mohou měnit v rámci horninového masivu (viz Variabilita hornin v 5.1.1.1)

Tepelné vlastnosti horninového prostředí jsou dány především texturou horniny, mineralogickým složením horniny, porozitou, přítomností kapalin a plynů a konečně obsahem přirozeně se vyskytujících radioaktivních izotopů uranu, thoria a draslíku v horninovém prostředí. Významná je tedy i přirozená teplota v hloubce, tepelný tok a radiogenní produkce tepla v horninovém masivu. Tyto vlastnosti jsou obvykle charakteristické pro horninový masiv jako celek, ale přímo se promítají i do teplotních výpočtů a projektového řešení HÚ. Teplota by měla být v hloubkové úrovni HÚ (tj. 500 až 600 m pod povrchem) menší než 25 °C (Andersson et al. 2000).

Tyto hodnocené aspekty jsou totožné s kritérii Tepelné vlastnosti (kap. 3.2.1.2.2) v rámci Hodnocení potenciálních lokalit z hlediska technické proveditelnosti (Butovič et al. 2018).

5.1.2 Vztah kritéria Vlastnosti horninového prostředí pro konstrukci podzemní části HÚ k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Podzemní dílo je umístěno vždy v určitém horninovém prostředí, na němž je závislá volba konstrukce díla, tak volba technologie ražení. Mechanické vlastnosti samotné horniny a chování horninového masivu hrají důležitou roli při budování podzemních prostor. Důležitou roli hrají vlastnosti ovlivňující mechanickou stabilitu podzemních prostor, výskyt křehkých poruch (pukliny, zlomy) a vlastnosti ovlivňující obtížnost razících prací.

5.1.2.1 Vztah kritéria Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

5.1.2.1.1 Vliv kritéria Geologické charakteristiky lokality

Popsatelnost a predikovatelnost

Geologické metody by měly svými postupy popsat i chování horninového masivu a fyzikálně – chemické vlastnosti, včetně vlastností mechanických. Důležitou roli v tomto případě hrají vlastnosti ovlivňující mechanickou stabilitu podzemních prostor, výskyt křehkých poruch (pukliny, zlomy) a vlastnosti ovlivňující obtížnost razících prací (Butovič et al. 2018).

Jednotlivé typy hornin mají rozdílné fyzikální, mechanické a deformační vlastnosti. Stejně i vlastnosti v rámci jednoho litologického typu vykazují jistou variability vlastností. Při posuzování různých horninových prostředí by z hlediska geomechanických vlastností měly být sledovány následující charakteristiky (Havlová et al. 2018):

1. **Pevnostní a deformační vlastnosti horniny**, které by měly být „standardní“, tj. měly by odpovídat parametrům běžných krystalinických hornin Českého masívu.
2. **Geomechanické (geotechnické) vlastnosti** litologických typů hornin tvořících hostitelské prostředí (kvazihomogenní blok) by měly být pokud možno co nejvíce homogenní.
3. Horninový masiv by měl vykazovat co možná nejmenší **tektonické postižení**, projevující se křehkými a duktilními deformacemi horniny a stupněm přeměny.
4. **Napjatostní stav** by neměl dosahovat „extrémních“ hodnot a měl by být co možná nejvíc izotropní. V úložných prostorách nesmí dosahovat hodnot, které by mohly způsobit excesivní deformace stěn výrubů („spalling“, porušení pevnosti stěn apod.).

Mechanická stabilita podzemních prostor úložiště je ovlivňována zejména pevnostními parametry horninového masivu (zejména **pevnosti horniny v prostém tlaku** – σ_c) a napětím v něm (zejména **velikostí a směrem horizontálního napětí**). V úložných prostorách nesmí dosahovat napjatostní stav hodnot, které by mohly způsobit nepřípustné deformace stěn výrubů („spalling“, porušení pevnosti stěn). Pevnost horniny musí mít dostatečnou „rezervu“ také vůči deformacím a namáhání horniny vlivem termální objemové roztažnosti hornin, redistribuci napětí vlivem výrubu a reologickými vlastnostmi horniny a je tedy i tyto vlastnosti vzít v úvahu při projektování HÚ (Havlová et al. 2018).

Důležitou nepříznivou roli v rámci horninového masivu mají **křehké poruchy** (pukliny a zlomy). Diskontinuity mohou vést k vytváření nadvýlomů, deformacím stěn nebo reaktivaci posunů podél diskontinuit. Horninový masiv by měl vykazovat co možná nejmenší tektonické postižení, projevujícím se křehkými a duktilními deformacemi horniny, nízký stupeň alterací a zvětráním.

Schopnost predikovat a popsat horninový masiv s ohledem na mechanické vlastnosti hornin a vlastnosti hornin, ovlivňující ražení hornin má velmi významný vliv na proveditelnost podzemní části úložiště.

Variabilita vlastností fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností

Horizontální i vertikální střídání jednotlivých horninových těles (prostorová variabilita) může výrazným způsobem ovlivnit zejména napjatostní stav masivu i mechanické charakteristiky jeho jednotlivých částí.

Při mechanickém hodnocení horninového prostředí je třeba v zásadě rozlišovat dva jeho podsystémy, a to: samotnou neporušenou horninu (intact rock) a diskontinuity, tj. prvky porušující horninový masiv (pukliny, zlomy, drcená pásma apod.).

V horninovém masivu, nezávisle na něm, existuje primární napjatostní stav horninového masivu. Ten bývá v různých směrech rozdílný, i vlivem variability horninového prostředí. Ve vertikálním směru v hloubce 500 m je litostatický tlak, v závislosti na objemové hmotnosti nadložních hornin, cca 13-15 MPa. Změny v napjatostním stavu a jejich anizotropie však vedou k nestabilitě horninového masivu, a to zejména ve výrubech (tunely, vrtý; Vokál et al. 2017). Napěťový stav v horninovém masivu by neměl dosahovat „extrémních“ hodnot a měl by být pokud možno co nejvíce izotropní. V úložných prostorách nesmí napětí dosahovat hodnot, které by mohly způsobit deformace stěn (např. spalling) výrubů nebo vývrtů (Havlová et al. 2018).

Vlastnosti horninového masivu jsou, kromě vlastností samotné horninové matrice, ovlivňovány i **strukturně-tektonickou stavbou** masivu, litologickou rozmanitostí, hydrogeologickými poměry apod. Vliv na oblast porušení v okolí výrubů pak má, kromě tvaru a velikosti profilu důlního díla, také technologie ražení a projevuje se i vliv blízkých, navzájem se ovlivňujících, důlních děl.

Variabilita litologických typů bude mít vliv i na technologické vlastnosti jednotlivých částí masivu – abrazivnost a rozpojitelnost hornin, vrtatelnost, trhatelnost a přetvárné vlastnosti hornin. Obecně platí, že čím je pevnost hornin, v nichž je raženo důlní dílo, vyšší, tím je rozsah zóny ovlivnění vyvolané vlastní ražbou menší. Extrémně vysoké hodnoty pevností průvodních hornin mohou, na druhé straně, mít vliv na vysoké hodnoty abrazivnosti, tj. na výrazné mechanické opotřebení rozpojovacích nástrojů během razících prací. Výsledné pevnostní parametry horniny jsou v úzkém vztahu s mineralogickým složením a strukturně-texturními vlastnostmi horniny. Mineralogické složení, velikost a uspořádání minerálních zrn, pórovitost horniny a z nich se odvíjející pevnost mají pak vliv rovněž na parametry vrtatelnosti a rozpojitelnosti horniny.

Variabilita fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností velmi významně ovlivňuje technické řešení HÚ ve smyslu plánování konstrukčních prací a provozních činností.

5.1.2.1.2 Vliv kritéria Hydrogeologické charakteristiky lokality

Při umístění HÚ předpokládáme, že proudění podzemní vody v horninovém masivu probíhá pouze po křehkých strukturách a **souvislá zvedeň se v izolační části HÚ nevyskytuje.**

Schopnost vytvoření HG modelu, umístění zlomových struktur, u kterých předpokládáme zvodnění, je předpokladem pro projektové řešení HÚ a plánování způsobu ražby.

V horninovém masivu, nezávisle na něm, existuje **primární napjatostní stav horninového masivu**. Ten bývá v různých směrech rozdílný. Horninový masiv je mechanický systém, který je v konsolidovaných podmínkách v rovnovážném stavu. Na horninu působí jak tlak nadložních hornin (litostatický tlak), tak tlak podzemní vody (hydrostatický) i fluid. Změny v napjatostním stavu, způsobené případně i změnami hydrostatického tlaku, a jejich anizotropie vedou k nestabilitě horninového masivu, a to zejména ve výrubech (tunely, vrtly).

Při výstavbě podzemního díla musí být vždy posouzeny hydrogeologické poměry, výška hladiny podzemní vody a její kolísání, směr a rychlost proudění, propustnost horniny, hydrostatický tlak apod. Podzemní voda přitéká do podzemního díla, zatěžuje ostění, snižuje stabilitu horniny a komplikuje technologii výstavby. Technologie ražení může být například výrazně ovlivněna hydrostatickým tlakem. Mechanizovaná ražba pod vysokým hydrostatickým tlakem (nad 400 kPa) znamená výraznou komplikaci pro ražbu a vyžaduje speciální technologie při návrhu a během vlastní ražby (Hillar et al. 2010). Kromě toho podzemní dílo drénuje okolní prostředí a může způsobit změny v hydrogeologickém režimu okolního horninového masivu.

Zde lze předpokládat, že spíše než by mechanické vlastnosti hornin měly vliv na hydrogeologické poměry, pak spíše hydrogeologické poměry mají vliv na napětový stav masivu a mechanické vlastnosti hornin.

Pevnostní parametry horniny jsou v úzkém vztahu s mineralogickým složením a strukturně-texturními vlastnostmi horniny a tedy i s obsahem vody a fluid. Mineralogické složení, velikost a uspořádání minerálních zrn, pórovitost horniny a z nich se odvíjející pevnost. Obsah vody v pórech může ovlivnit i pevnostní charakteristiky hornin (uváděný jako tzv koeficient změknutí). Je proto pro výběr vhodných horninových typů uvažovat horniny, které mají koeficient c_0 nejvyšší (blízký 1). Lze však předpokládat, že v krystalických horninách Českého masivu, kde se pórovitost pohybuje kolem 0,5% (Havlová et al. 2017), a spíše méně, tento vliv bude spíše minoritní.

Významná část vlivu podzemní vody však lze odstranit pomocí technického řešení (injektáž masivu, odvodnění). Vliv hydrogeologických charakteristik na způsob ražení bude tedy spíše méně významný.

5.1.2.1.3 Vliv kritéria Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Přítomnost starých důlních prací a poddolovaných území může mít vliv na napjatostní stav horninového masivu či tvorbu preferenčních cest pro migraci radionuklidů horninovým prostředím. Obdobně je tomu i u **vrtných prací** na lokalitě. Pro lokality s přítomností hlubokých strukturních a vyhledávacích vrtů do hloubek přes 500 m může v závislosti na lokalizaci vrtů a průzkumných prací hrozit střet zájmů či nezbytnost technických řešení.

Vliv těchto aspektů je však spíše méně významný a lze ho snížit technickými opatřeními.

5.1.2.1.4 Vliv kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Bezpečnostní kritéria **Mechanické vlastnosti (3.1.6) a Fyzikálně-mechanické vlastnosti (3.1.6)** částečně hodnotí prakticky totožné požadavky s požadavky na horniny, jaké jsou kladeny i v kritériu Parametry, ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin (3.2.1.2.1). Nelze tedy hovořit o jejich závislosti, ale spíše o provázanosti či překryvu. Všechna tato kritéria směřují především k definování technologické proveditelnosti HÚ. Požadavky na daná kritéria v obou oblastech hodnocení jsou uvedeny v kapitole 3.1.6 a 3.2.1.2.1.

Geochemické vlastnosti

Jedním z vlivů, který může navíc působit na horniny a mít vliv na jejich pevnost, mechanické vlastnosti i napětí v hornině, je podzemní voda (viz také 5.1.2.1.2). Lze předpokládat, že hlavním **geochemickým činitelem**, jímž může horninové prostředí působit na horniny, je **podzemní voda a její vlastnosti** (pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek, obsah organických látek a CO₂, obsah látek typu dusičnany, sírany, chloridy apod.). Minoritní vliv je očekáván u nestabilních akcesorických minerálů horniny (např. pyrit) a u plynných, přirozeně se vyskytujících fází (např. hlubinný CO₂, pokud by byl přítomen). **Může tak docházet k přeměně minerálů, vzniku nových fází, změně jejich mechanických a pevnostních charakteristik a tím i ke změně napětí v hornině. Z hlediska celkového vlivu je však vliv tohoto parametru možno považovat za méně významný.**

Odvod plynu (Plynopropustnost)

Hostitelské prostředí musí zajistit, aby nedocházelo k takové kumulaci plynu v úložných prostorech, které by mohlo představovat ohrožení pro správnou funkčnost úložného systému.

Při nedostatečném úniku či odvodu plynu z prostoru kolem ÚOS a bentonitové bariéry dojde ke kumulaci plynů. Důsledkem může být:

- Mechanické poškození bentonitové bariéry a hostitelského prostředí
 - Zvýšené mechanické namáhání horninového prostředí:
 - Otevření dosud intaktních puklin
- Lokální změna hydrogeologických poměrů, změna gradientu proudění

Přítomnost proudící podzemní vody je dobrým indikátorem, že budou splněny podmínky pro dostatečný odvod plynu. **Z hlediska významu však jde o spíše méně významný vliv na horninový masiv.**

 SÚRAO	Vliv bezpečnostních aspektů na technické řešení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 429/2019

5.1.2.2 Vztah kritéria Tepelné vlastnosti k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

5.1.2.2.1 Vliv kritéria Geologické charakteristiky

Variabilita vlastností fyzikálních, geomechanický a geochemických vlastností

Tepelné vlastnosti horninového prostředí jsou dány především texturou horniny, mineralogickým složením horniny, porozitou, přítomností kapalin a plynů a konečně obsahem přirozeně se vyskytujících radioaktivních izotopů uranu, thoria a draslíku v horninovém prostředí (Havlová et al. 2018). Petrologická a geochemická variabilita hornin či alterace hornin v horninovém masivu tak mohou výrazným způsobem ovlivnit i variabilitu tepelných vlastností. Příliš velká variabilita tepelných vlastností hornin by následně mohla ovlivnit projektové řešení HÚ - velikost roztečí ukládacích vrtů a ukládacích chodeb.

Vliv fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností na vlastnosti tepelné lze tedy vyhodnotit jako významný.

5.1.2.2.2 Vliv kritéria Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Pro zajištění bezpečnosti HÚ je důležité zabránit neúmyslnému vniknutí člověka do úložiště. Požadavky týkající se rizika intruze člověka do úložiště jsou formulovány v doporučení IAEA (2011b) odst. I.36 až I.40) výhradně pro neúmyslné vniknutí člověka do úložiště.

Vrtné práce jsou na většině lokalit rozmístěny velmi nepravidelně a v převážné většině vrtů registrovaných v archivu jde o mělké účelové sondy zaměřené na místní inženýrsko-geologické a hydrogeologické poměry. V případě přítomnosti těchto mělkých vrtů a vrtů nedosahujících hloubky přes 100 m nehrozí žádné nebezpečí ovlivnění podzemního úložiště. Hlubší ložiskové, strukturní a další vrty převážně dosahující hloubek od 100 do 300 m nejsou ve střetu s vylučujícím kritériem hloubky přes 500 m. Pro lokality s přítomností hlubokých strukturních a vyhledávacích vrtů do hloubek přes 500 m může v závislosti na lokalizaci vrtů a průzkumných prací hrozit střet či nezbytnost technických řešení.

Odběry vzorků z vrtných prací, případně výzkumné práce zaměřené např. na EDZ/NDZ ve starých důlních dílech mohou výrazně přispět k rozšíření informací o pevnostních charakteristikách hornin a jejich chování v horninovém masivu.

Všechny hodnocené lokality mají srovnatelné, velmi nízké parametry úrovně geotermálního toku, využívání geotermální energie ve smyslu hlubinného čerpání geotermální energie z anomálních geotermálních zdrojů zde není pravděpodobné a **má tedy jen velmi malý význam** (Havlová et al. 2018).

Vliv tohoto kritéria je vzhledem k možnosti technického řešení spíše méně významný.

5.1.2.2.3 Vliv kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Hydraulické vlastnosti

Hydraulické vlastnosti jsou dány hydrogeologickými vlastnostmi zkoumané lokality. Pro počáteční nasycení bentoniu je rozhodující množství podzemní vody v okolí HÚ. Funkčnost bentonitové bariéry ovlivňuje proudění podzemní vody, její chemismus a teplota.

Teplota horninového prostředí je určována intenzitou tepelného toku. Přirozený tepelný tok je při absenci magmatické aktivity dán součtem tepelného toku ze zemského pláště a velikostí radiogenní produkce tepla horninami v zemské kůře. Teplota horninového prostředí má vliv na rychlost chemických reakcí a minerálních přeměn, termomechanické změny v hostitelských horninách. Teplota by měla být v hloubkové úrovni HÚ (tj. 500 až 600 m pod povrchem) menší než 25 °C (Andersson et al. 2000).

Současně je však podzemní voda médiem, umožňujícím odvod tepla, stejně tak jako je tomu u odvodu plynu, a to jak difúzí, tak prouděním. Voda má nízkou tepelnou vodivost, ale velmi vysokou objemovou tepelnou kapacitu, mnohem větší nežli ostatní horninové složky. Proto podzemní voda zásadním způsobem ovlivňuje rychlost šíření teplotních změn do okolí. Názorným příkladem je písek. Za sucha se v něm přenáší teplo jen na bodech dotyku jednotlivých zrn, a proto je jeho tepelná vodivost nízká. Zvýšením vlhkosti se začnou tvořit na zrnech vodní filmy a tepelná vodivost písku prudce vzrůstá, dokud se zrna úplně neobalí vodou. (<https://www.tzb-info.cz/2190-jak-geologicke-pomery-ovlivnuji-provoz-tepelnych-cerpadel>). Výrazný vliv však může mít právě rychlost proudění, jak identifikovali Gehlin a Hellstrom (2002): šíření tepla v prostředí nasyceného masivu bez přítomnosti advektivního proudění je výrazně vyšší než v případě přítomnosti advektivního toku. Přítomnost podzemní vody lze tedy považovat za dobrým indikátor, že budou splněny podmínky pro lepší odvod tepla (viz 3.1.2).

Vztah mezi těmito parametry je tedy spíše vzájemný – produkce tepla ovlivňuje teplotu podzemní vody a chemické a minerální přeměny. Podzemní voda může naopak ovlivňovat vedení tepla v horninovém prostředí.

Mechanické vlastnosti

Účinkem tepelné energie předané do materiálu dochází ke změně jeho teploty. V důsledku teplotní změny pak dochází ke změnám v rozměrech, resp. objemu materiálu. Zároveň dochází ke změnám mechanických vlastností (pevnosti, tvrdosti, tažnosti). Teplotní závislost, více či méně výraznou, vykazují všechny materiálové charakteristiky. Délkové (objemové) změny vyvolané v materiálu v důsledku působení tepelné energie mohou vést ke vzniku trhlin. V tomto směru jsou zvláště citlivá souvrství tvořená vrstvami s rozdílnou teplotní roztažností (Svoboda et al. 2013).

Působení tepla vlivem tepelného výkonu v prvních fázích po uzavření úložiště v důsledku tepelného výkonu ukládaného odpadu, přímo spojené s vlastnostmi ovlivňujícími vedení tepla v horninách, tak může potenciálně ovlivnit soudržnost masivu v okolí úložných vrtů.

Vzhledem k tomu, že primární napjatost horninového masivu, která je důsledkem gravitačních účinků nadloží, tektonických pochodů v zemské kůře, teplotních prnutí, slapových účinků nebo změn zatížení zemského povrchu (Bárta et al. 2016), má tedy i teplota potenciální efekt na napětí v horninovém masivu.

Tento vliv však bude spíše méně významný vzhledem k předpokladu optimalizace rozložení úložných vrtů s ohledem na tepelné vlastnosti hornin.

Geochemické vlastnosti

Lze předpokládat, že hlavním geochemickým činitelem, jímž může horninové prostředí působit na inženýrské bariéry HÚ, je **podzemní voda a její vlastnosti** (pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek, obsah organických látek a CO₂, obsah látek typu dusičnany, sírany, chloridy apod.). Může dojít ke změně minerálního složení a tím i ke změně tepelných vlastností.

Tyto procesy však mají vzhledem k rozsahu spíše lokální charakter a tedy i malý význam.

Vliv podzemní vody na tepelné vlastnosti je vyhodnocen v kapitole Hydraulické vlastnosti.

Odvod plynu

Tepelný tok (a s tím související teplotní pole, teplota hornin, teplota vody...) je ovlivněn např. tvarem a stářím geologických struktur, hloubkou uložení struktur, prouděním kapalin a plynů, paleoklimatickými poměry (prochlazená připovrchová část vlivem dob ledových), vzdáleností od vulkanických center (Myslil a kol. 2007). Vliv plynů je tedy spíše spojen s odvodem tepla směrem od systému inženýrských bariér. Přítomnost proudící podzemní vody je dobrým indikátorem, že budou splněny podmínky pro dostatečný odvod plynu. Je tedy významně propojen s aspektem 5.2.4.2 (Hydraulické vlastnosti).

Pro zhodnocení vlivu plynu na funkčnost HÚ je nutno zhodnotit geologické a hydrogeologické poměry v širším okolí HÚ (např. možnost vzniku stratigrafické pasti – tj. geologické struktury, která může zadržovat plynné fáze díky změnám v jejím horninovém složení, struktuře nebo facii (Havlová et al. 2018).

Vliv odvodu plynu na tepelné vlastnosti horninového prostředí je spíše málo významný.

5.1.2.3 Vztah kritéria Hydrogeologické poměry k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

5.1.2.3.1 Vliv kritéria Geologické charakteristiky lokality

Nepříznivé hydraulické parametry horninových masivů ovlivňují umístění ukládacích a přístupových tunelů, a to jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru a ovlivňují také podmínky výstavby.

Popsatelnost a predikovatelnost

Významným parametrem charakterizace horninového prostředí je **počet a vztah zastoupených regionálně geologických jednotek**. Z hlediska vhodnosti lokality pro umístění HÚ by měl být stupeň křehkého porušení co nejnižší, protože zlomové struktury představují významná mechanická oslabení horninového masívu a zároveň preferenční cesty podzemní vody obzvláště v krystalinickém prostředí.

Z hlediska umístění HÚ je dále nejvhodnější prostředí s co nejnižším **počtem puklinových systémů a nízkou hustotou puklin**. Puklinové systémy často tvoří v horninovém masívu hustou síť drobných diskontinuit, které jsou obvykle vzájemně propojeny. Blíže neurčená část z nich je hydraulicky vodivá a může sloužit jako potenciální cesta migrace vody a v ní obsažených plynů, či v případě hlubinného úložiště potenciálně unikajících radionuklidů. (Havlová et al. 2018).

Míra přesnosti predikce těchto podmínek je **významně závislá** na schopnosti vytvoření 3D strukturně geologického modelu a následně i hydrogeologického modelu.

Vztah popsateľnosti a predikovatelnosti geologických charakteristiky lokality je možno vyhodnotit jako velmi významný.

5.1.2.3.2 Vliv kritéria Hydrogeologické charakteristiky

Ve zprávě Butovič et al. (2018) byly pro hodnocení potenciálních lokalit z hlediska proveditelnosti pro kritérium **Hydrogeologické poměry** definovány indikátory **Zvodnění horninového prostředí, Hydrostatický tlak a Chemické složení podzemní vody**.

Tato kritéria se překrývají s bezpečnostními kritérii **Hydrogeologické charakteristiky** (kap. 3.1.2) a **Geochemické vlastnosti v rámci** kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér (kap. 3.1.6.3) a hodnotí prakticky totožné požadavky na horniny. Nelze tedy hodnotit jejich vzájemný vztah, v hodnocení se překrývají.

V daném případě předpokládáme, že se v ukládacím horizontu proudící voda vyskytuje jen v křehkých strukturách.

Platí rovněž předpoklad, že HG model je výchozím podkladem pro projektové řešení a jeho existence je nutností.

5.1.2.3.3 Vliv kritéria Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Přítomnost starých důlních prací a poddolovaných území a starých vrtných děl ovlivňuje bezpečnost podzemních děl a může ovlivňovat hydrogeologické poměry, proudění i vznik

potenciálních migračních cest pro radionuklidy. Z hlediska technologické proveditelnosti mohou dále mít vliv na hydrostatický tlak a napětí v masivu, a tedy i na technologii výstavby.

Nicméně informace, dosažení těmito díly a strukturami přinášejí znalosti o hydrogeologické situaci na lokalitě a snižují nejistoty spojené s nedostatkem dat.

Nicméně přítomnost těchto struktur je technicky řešitelná a je tedy možno význam tohoto aspektu považovat za méně významný.

Zdroje podzemních vod patří mezi významné parametry posuzované v rámci nebezpečí průniku člověka do hlubinného úložiště. V posuzovaných lokalitách existují různé kombinace hloubky, vydatnosti a významu zdrojů podzemních vod a jejich ochranných pásem. **Přítomnost zdrojů podzemní vody představují vylučující kritérium pro umístění HÚ a jeho vliv je tedy významný.**

5.1.2.3.4 Vliv kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Podle doporučení IAEA (2011a), požadavek 16), inženýrské bariéry musí být fyzikálně i chemicky kompatibilní s hostitelským horninovým prostředím a celkové projektové řešení úložiště musí být navrženo tak, aby zajistilo bezpečnost po celou dobu trvání životnosti úložiště. Posuzování lokalit z hlediska bezpečnosti je proto třeba vždy vztahovat k navrženému projektovému řešení úložiště a systému inženýrských bariér.

Hydraulické vlastnosti

Ve zprávě Butovič et al. (2018) byly pro hodnocení potenciálních lokalit z hlediska proveditelnosti pro kritérium **Hydrogeologické poměry** definovány indikátory **Zvodnění horninového prostředí, Hydrostatický tlak a Chemické složení podzemní vody**.

Tato kritéria se dublují a překrývají s bezpečnostními kritérii **Hydrogeologické charakteristiky** (3.1.2) a **Geochemické vlastnosti v rámci kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér** (3.1.6.3) a hodnotí prakticky totožné požadavky na horniny. Nelze tedy hodnotit jejich vzájemný vztah.

Mechanické vlastnosti

Vztah mechanických vlastností hornin a hydrogeologických poměrů je hodnocen v kapitole 5.1.2.1.2..

Geochemické vlastnosti

Lze předpokládat, že hlavním geochemickým činitelem, jímž může horninové prostředí působit v prostředí HÚ, je **podzemní voda a její vlastnosti** (pH, Eh, iontová síla, celkový obsah rozpuštěných látek, obsah organických látek a CO₂, obsah látek typu dusičnany, sírany, chloridy apod.). Minoritní vliv je očekáván u nestabilních akcesorických minerálů horniny (např. pyrit) a u plyných, přirozeně se vyskytujících fází (např. hlubinný CO₂, pokud by byl přítomen).

Tato kritéria se z velké části překrývají.

Odvod plynu

Hostitelské prostředí musí zajistit, aby nedocházelo k takové kumulaci plynu v úložných prostorech, které by mohlo představovat ohrožení pro správnou funkčnost úložného systému. Hostitelské prostředí proto musí zajistit **odvod plynu** prouděním (plynopropustnost) nebo odnosem či difúzí (rozpuštěného) plynu vodou obsaženou v hostitelském prostředí (Norris et al. 2013, POSIVA 2013).

Vzhledem k extrémně nízké propustnosti vlastní matrice horninového prostředí je celková plynopropustnost (a proudění vody) určena zejména přítomností puklinové sítě a jejími vlastnostmi (Norris et al. 2013). V případě transportu plynu pomocí vody jsou navíc důležité hydrogeologické poměry, zejména pak rychlost, tlak a množství proudící vody, tj. hydrogeologické poměry spíše mají vliv na odvod plynu než vice versa.

Pro zhodnocení vlivu plynu na funkčnost HÚ je nutno zhodnotit geologické a hydrogeologické poměry v širším okolí HÚ (např. možnost vzniku stratigrafického trapu – tj. geologické struktury, která může zadržovat plynné fáze díky změnám v jejím horninovém složení, struktuře nebo facii (Havlová et al. 2018).

Při nedostatečném úniku či odvodu plynu z prostoru kolem ÚOS a bentonitové bariéry dojde ke kumulaci plynů. Důsledkem může být:

- Mechanické poškození bentonitové bariéry a hostitelského prostředí
 - Zvýšené mechanické namáhání horninového prostředí:
 - Otevření dosud intaktních puklin
- Lokální změna hydrogeologických poměrů, změna gradientu proudění

Přítomnost proudící podzemní vody je dobrým indikátorem, že budou splněny podmínky pro dostatečný odvod plynu.

Význam vlivu odvodu plynu na hydrogeologické poměry v HÚ však lze vyhodnotit jako méně významný a lze ho eliminovat technickým řešením inženýrských bariér.

5.2 Vztah technického aspektu Proveditelnost povrchové části úložiště k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Povrchovou částí HÚ tvoří objekty, zařízení a technologie nezbytné k zajištění provozu hlubinného úložiště, tj. objekty sloužící k příjmu, přebalení a zavážení VJP a RAO, které mohou být umístěny jak na povrchu, tak v přípovrchových objektech.

5.2.1 Vztah kritéria Zajištění stability staveb a vlastností základových půd k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Z hlediska zajištění proveditelnosti staveb na dané lokalitě se jedná zejména o geotechnické charakteristiky základových půd (zejména únosnost a stlačitelnost), přítomnost svahových deformací (zejména hluboko založených poruch) a výmolové eroze, hodnocení režimu a oběhu podzemních vod v území, výšku hladiny podzemních vod a její kolísání, chemické složení podzemních vod nebo seismickou stabilitu.

5.2.1.1 Vliv kritéria Stabilita lokality

Seismická stabilita

Účinky seismo-tektonické události jsou vždy větší na povrchu, než v prostředí několik set metrů pod povrchem země je možno předpokládat, že v případě, že území splní požadavky na zařízení umístěná na povrchu nebo blízko povrchu, splní i požadavky pro zařízení umístěné několik set metrů pod povrchem země.

Kaláb et al. (2014) ve své studii konstatovali, že vliv seismických událostí (vibrací) na stabilitu horninových masivů v hloubce 500 m a na úložné prostory v horizontu 100 000 let bude velmi nízký. Do odhadu nelze zahrnout další související vlivy, jako je například degradace horninového masivu, změna vlastností výplně okolí kontejnerů a vlastních kontejnerů v důsledku probíhajících geochemických procesů a stárnutí. Nelze očekávat z výsledků provedených seismologických studií, že by v některé z lokalit vzniknulo zemětřesení s magnitudem 5 a více, a proto i zatížení daného podzemního díla vibracemi zřejmě nebude zásadní a poškozující (Kaláb et al. 2014).

Význam tohoto aspektu pro zajištění staveb povrchového areálu je vzhledem k malé pravděpodobnosti zemětřesení vyššího magnituda než 5 tedy méně významný.

Geodynamický stabilita

Z dlouhodobého hlediska (v horizontu statisíců až miliónu let) představuje výzdvih území resp. diferenciální pohyby v hodnoceném území potenciální nebezpečí pro úložiště. Indikátorem malé intenzity vertikálních pohybů jsou zarovnaná území s malou intenzitou eroze, resp. agradace. Indikátorem vhodnosti pro posouzení vhodnosti lokality pro umístění HÚ je rychlost výzdvihu/poklesu území oproti sousedním blokům (zjištěné např. geodetickými metodami), resp. morfologie území, nebo mocnost kvartérních sedimentů.

Intenzita a převažující typ denudačních procesů závisí na geomorfologických vlastnostech území. Pro zhodnocení stability HÚ vyhořelého jaderného palivu a radioaktivních odpadů je jak pro povrchový, tak pro podzemní areál podstatná tzv. **geomorfologická pozice** (viz kap. 5.1.1.3).

Soubor procesů a vlastností prostředí, jako jsou rezistence hornin vůči zvětrávání, intenzita a charakter erozních procesů pak řídí geomorfologický vývoj dané lokality, a tím i ovlivňují stabilitu staveb umístěných na povrchu. Vzhledem však k míře eroze a výzdvihu v Českém masivu (viz kap. 5.1.1.3) a tedy potenciálního ovlivnění např. vznikem svahů či ovlivnění zpětnou erozí toků, je **vliv tohoto aspektu na zajištění stability staveb méně významný. Lze ho výrazně minimalizovat přihlédnutím k umístění pozemního areálu.**

5.2.2 Vztah kritéria Množství a složitost střetů zájmů k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Dle metodiky MP.22 je při hodnocení proveditelnosti úložiště v lokalitách třeba posoudit množství a složitost řešení střetů zájmů se zákonnou ochranou vlastností, jevů a objektů, které se vyskytují v kandidátních lokalitách (elektroenergetika, plynoenergetika, produktovody, spoje, ochrana povrchových a podzemních vod, doprava, ochrana přírody a krajiny, nerostné suroviny a horninové prostředí, archeologie, ochrana lesa). Na základě toho byly pro dané kritérium stanoveny následující indikátory:

- Přítomnost OP vodních zdrojů
- Územní plánování
- Střety se ZPF a PUPFL
- Dostupnost IZS
- Střety s OP dopravní a technické infrastruktury

Z nich jsou v hodnocení dlouhodobé bezpečnosti uvažovány aktivity spojené zejména s dobýváním nerostných surovin a přítomnost zdrojů vody.

5.2.2.1 Vliv kritéria Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Ložiskové poměry na lokalitě

Pro zajištění bezpečnosti HÚ je důležité zabránit neúmyslnému vniknutí člověka do úložiště. Vyhrazená **ložisková území, zásoby nerostných surovin** a jejich prognózy představují strategické faktory pro stát a jeho rozvoj, a jako takový může být přítomnost významných zásob nerostných surovin vylučujícím kritériem při hodnocení a porovnávání vhodnosti jednotlivých lokalit. Z tohoto důvodu se jeví přítomnost zásob nerostných surovin na potenciální lokalitě pro umístění jako velmi závažná a **vztah tohoto bezpečnostního aspektu ke kritériu Množství a složitost střetů zájmů je významná.**

Zdroje podzemní vody

Ochrana vodních zdrojů je svázána s řadou právních předpisů, jimiž je nutno při vyhledávání vhodné lokality se bezpodmínečně řídit. Jedná se například o atomový zákon (263/2016 Sb.) nebo vodní zákon (č. 254/2001 Sb.).

Obecná ochrana podzemních vod je souhrn veškerých opatření k zajištění ochrany vod jako složky přírody a životního prostředí. Vyplývá z celé řady právních předpisů, především z podstatné části současného vodního zákona č. 254/2001 Sb., v platném znění a jeho prováděcích předpisů, ale také z mnoha dalších předpisů chránících životní prostředí, jedná se zejména o oblasti: ochrana přírody, ochrana životního prostředí, odpadové hospodářství, stavební zákon, ochrana půdních fondů atd.

Ochrana zvláštní je stanovena zákonem, případně jeho prováděcími předpisy a má za účel zajistit z různých důvodů vyšší stupeň ochrany než ochrana obecná. Jedná se především o tzv. chráněné oblasti přirozené akumulace vod (CHOPAV), které stanoví vláda nařízením. Jde o významné přirozené akumulace vod, o jejichž ochranu má stát zájem nebo také

o ochranu vod, které jsou pro další využití, zejména jako zdroje pitné vody, ohroženy nebo znečištěny.

Ochranu speciální stanovuje vodoprávní úřad (v minulosti vodohospodářský orgán) opatřením obecné povahy (dříve rozhodnutím), k čemuž ho zmocňuje příslušný právní předpis (dnes vodní zákon v § 30). Především jde o ochranná pásma vodních zdrojů (OP) (např. ale i o různé monitoringy apod. doplňující prvky speciální ochrany). Dle zákona č. 254/2001 Sb., v platném znění se stanovují ochranná pásma I. a II. stupně. OP se zpravidla stanovují u vodních zdrojů využívaných nebo využitelných pro zásobování pitnou vodou s průměrným odběrem nad $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{rok}^{-1}$. V současné době vedle sebe v praxi mohou existovat původní plošná pásma hygienické ochrany (PHO) i OP. V případě, že u ochrany vodního zdroje neproběhla revize nebo nebyla stanovena nová OP, platí stále PHO stanovená v minulosti.

Zdroje podzemních vod patří mezi významné parametry posuzované v rámci nebezpečí průniku člověka do hlubinného úložiště. Střety zájmů mohou dosáhnout charakteristiky, které vylučují umístění hlubinného úložiště v lokalitě. **Vztah tohoto kritéria ve vztahu ke střetům zájmů se tedy jeví jako významný.**

Je však nutno podotknout, že výskyt zdroje podzemní vody není neřešitelným problémem a lze o překonat technickým řešením (zajištění jiného zdroje pitné vody novým vodovodním řadem z jiného zdroje apod.)

Potenciál geotermální energie

Všechny hodnocené lokality mají srovnatelné, velmi nízké parametry úrovně geotermálního toku, využívání geotermální energie ve smyslu hlubinného čerpání geotermální energie z anomálních geotermálních zdrojů je zde málo pravděpodobné.

Z tohoto důvod je vliv tohoto kritéria na Množství a složitost střetů zájmů málo významný.

5.2.3 Vztah kritéria Investiční náklady k aspektům dlouhodobé bezpečnosti

Při přípravě HÚ lze zvolit řešení, které na jedné straně velmi robustně zajistí dlouhodobou bezpečnost, ale výrazně navýší investiční i provozní náklady. Z hlediska optimalizace ekonomických nákladů je však vhodné zvolit řešení, které je s **přiměřenou mírou konzervativnosti** po bezpečnostní i technické stránce vyhovující, ale **ekonomicky optimální**.

5.2.3.1 Vliv kritéria Hydrogeologické charakteristiky

Předpokládá se, že v hloubce 500 pod nejnižším místem terénu) se **zvodně (souvislá akumulace podzemní vody)** nevyskytují v žádné z posuzovaných lokalit. Proudění podzemní vody v těchto hloubkách probíhá pouze po vodivých puklinách. Pomalé proudění podzemní vody v horninovém masivu je jedním z předpokladů funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry.

Přítok podzemní vody do prostředí HÚ ve zvýšené míře či přítomnost zvodněných struktur, zaplavených starých důlních děl či vrtů může vést k nutnosti provedení opatření pro snížení přítoku podzemní vody do HÚ (injektáž, izolace, nástřik, speciální ostění, čerpání vod apod.).

Kromě toho vysoký hydrostatický tlak v horninovém masivu může vyvolat i nutnost použít speciální techniky vrtných prací (Hillar et al. 2010) a tedy i zvýšení nákladů.

Přítomnost rychle proudících vod v horizontu ukládání se tedy jeví jako významný aspekt ve vztahu k Investičním nákladům.

5.2.3.2 Vliv kritéria Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště

Poddolovaná území a Vrtná prozkoumanost

Obdobně, jako je tomu u přítomnosti rychlého proudění podzemní vody mohou být překážkami i přítomnost starých důlních děl a plynů, představující potenciální transportní cesty s preferenčním prouděním. Přítomnost takovýchto struktur může být až vylučujícím kritériem (nad 500 m), nicméně v menším rozsahu vyžaduje spíše nutnost technického řešení a tím i nárůst investičních nákladů.

Na druhé straně, větší počet vrtů rovněž předpokládá větší znalost o geologických a hydrogeologických poměrech, což umožní zpřesnění znalostí, menší nejistotu v projektovém řešení a plánování ražby a tím potenciálně v investičních nákladech.

Vzhledem k tomu, že platí předpoklad, že bude při výběru umístění HÚ přihlíženo k tomu, aby směřoval do místa, kde bude výskyt starých důlních děl a vrtů minimální, lze předpokládat, že dopad tohoto aspektu na Investiční náklady bude méně významný.

5.2.3.3 Vliv kritéria Slučitelnost horninového prostředí se systémem inženýrských bariér

Tepelné vlastnosti

Velmi výrazným aspektem, který se odráží v investičních nákladech, jsou tepelné vlastnosti hornin.

Z pohledu tepelného výpočtu je optimalizace vzdáleností hledáním minimální možné vzdálenosti mezi zdroji tepla (ÚOS) vytvářejícími nestacionární teplotní pole, které v žádném časovém okamžiku od uložení nesmí překročit limitní teplotu. Limitní teplota teplotního pole v masivu je přitom dána limitní teplotou bentonitu (95°C) a odvodem tepla z ÚOS vrstvou bentonitu a předpokládanou mezerou mezi bentonitem a masivem (Špínka et al. 2018).

Tepelná vodivost horniny má vliv na rychlost vedení tepla v horninovém prostředí. Příliš nízké hodnoty tepelné vodivosti horninového prostředí by byly příčinou špatného odvodu tepla generovaného uloženým VJP s rizikem růstu teploty v blízkém okolí v důsledku akumulace tepla. Řešením je navržení větší rozteče ukládacích vrtů a případně i větší vzdálenost ukládacích chodeb či jejich délka, čímž se následně zvětšuje projektovaná plocha ukládacího horizontu a rostou i náklady na jeho budování i uzavírání. Stejným způsobem se může projevit variabilita hornin a tím i variabilita jejich tepelných vlastností.

Význam tepelných vlastností hornin v lokalitě umístění HÚ na Investiční náklady na výstavbu a uzavírání se tedy jeví jako velmi významný.

6 Možná projektová (technická) řešení k eliminaci vlivů

Navržené technické řešení musí být ověřeno prokázáním bezpečnosti, a to jak provozní, tak dlouhodobé, která se vzhledem k charakteru uložených odpadů pohybuje v řádech statisíců let. Hodnocení provozní i dlouhodobé bezpečnosti musí být provedeno jak pro normální provoz, tak pro projektové nehody, které by mohly mít největší dopad na životní prostředí a obyvatelstvo. Výsledky těchto výpočtů se musí zpětně promítnout do návrhu technického řešení (Vokál et al. 2017).

Lze tedy předpokládat, že vlivy některých bezpečnostních aspektů lze eliminovat úpravou projektového či technického řešení, a to i za předpokladu vývoje technologií a metod výstavby a konstrukce HÚ, ÚOS či transportních postupů.

Následující vlivy bezpečnostních aspektů je možno řešit pomocí technického řešení (viz Tab. 5).

Tab. 5 Přehled vlivů bezpečnostních aspektů na technické řešení a způsob jejich eliminace

Bezpečnostní aspekt	Technický aspekt	Vliv	Způsob eliminace
Hydrogeologické charakteristiky (Rychlost proudění vody)	Velikost využitelného horninového masivu	Výskyt zón rychlého proudění podzemní vody	Projektové řešení; Injektáž, čerpání, ostění
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Poddolovaná území, Vrtná prozkoumanost)	Velikost využitelného horninového masivu	Výskyt zón s preferenčním prouděním	Injektáž, tamponáž Výplň důlních děl Na druhou stranu – dostatečná prozkoumanost
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Zdroje podzemních vod)	Velikost využitelného horninového masivu	Výskyt významných zdrojů podzemních vod	Přivedení zdroje vod z jiné lokace
Slučitelnost horninového prostředí s inženýrskými bariérami (Tepelné vlastnosti)	Velikost využitelného horninového masivu	Velikost ukládacího obzoru	Projektové řešení na základě teplotních výpočtů; optimalizace ukládání VJP
Geologické charakteristiky (Popsatelnost a predikovatelnost)	Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin	Výskyt tektonických struktur	Volba způsobu ražby na základě pozice tektonických struktur
		Vliv na napjatostní stav masivu	Konstrukční řešení
Hydrogeologické charakteristiky	Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a	Výskyt zón rychlého proudění podzemní vody, hydrostatický	Injektáž, čerpání, ostění Způsob ražení

	mechanické vlastnosti hornin	tlak Vliv na způsob ražení	
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Poddolovaná území, Vrtná prozkoumanost)	Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin	Vliv na napjatostní stav masivu	Technické řešení (injektáž, tamponáž)
Slučitelnost horninového prostředí s inženýrskými bariérami (Odvod plynu)	Parametry ovlivňující způsob ražení podzemních prostor a mechanické vlastnosti hornin	Vliv na vznik trhlin, napjatostní stav masivu	Technické řešení inženýrský barier
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Poddolovaná území, Vrtná prozkoumanost)	Hydrogeologické poměry	Výskyt zón s preferenčním prouděním	Injektáž, tamponáž
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Zdroje podzemních vod)	Hydrogeologické poměry	Výskyt významných zdrojů podzemních vod	Přivedení zdroje vod z jiné lokace
Slučitelnost horninového prostředí s inženýrskými bariérami (Odvod plynu)	Hydrogeologické poměry	Vliv na vznik trhlin, napjatostní stav masivu, změna režimu proudění podzemní vody	Technické řešení inženýrský barier
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Ložiskové poměry na lokalitě)	Množství a složitost střetu zájmů	Výskyt významných zdrojů nerostných surovin	Přehodnocení ložiskových poměrů a zásob; vyjmutí CHLÚ
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Zdroje podzemních vod)	Množství a složitost střetu zájmů	Výskyt významných zdrojů podzemních vod	Přivedení zdroje vod z jiné lokace
Hydrogeologické charakteristiky	Investiční náklady	Výskyt zón rychlého proudění podzemní vody, hydrostatický tlak Vliv na způsob ražení	Nutnost investice do technického řešení
Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Poddolovaná území, Vrtná prozkoumanost)	Investiční náklady	Nutnost sanace starých důlních děl a vrtů	Nutnost investice do technického řešení

Faktory zvyšující pravděpodobnost intruze člověka do úložiště (Zdroje podzemních vod)	Investiční náklady	Výskyt významných zdrojů podzemních vod	Nutnost investice do přivedení zdroje vod z jiné lokace
Slučitelnost horninového prostředí s inženýrskými bariérami (Tepelné vlastnosti)	Investiční náklady	Velikost ukládacího obzoru	Nutnost investice do rozsáhlejšího ukládacího obzoru

7 Přehled bezpečnostních či technických aspektů k budoucímu prozkoumání

Míra poznání v rámci programu výběru finální (a záložní) lokality pro umístění HÚ se neustále rozšiřuje a zpřesňuje. Celý proces probíhá jakoby po spirále, přičemž činnosti se cyklicky opakují spolu se zvyšující se mírou detailu. V každém kroku se provede se posouzení postupu a jeho vyhodnocení, v pozdějších fázích výběru lokality založeném na bezpečnostním hodnocení umístění HÚ na dané lokalitě. Detailní modely se přitom konfrontují s výsledky modelů globálních trendů.

Takové vyhodnocení a pochopení systému je možné provést i prostřednictvím předběžného odhadu (predikce) výsledků budoucích průzkumných aktivit pro následující skupinu činností a následným porovnáním této předpovědi s reálnými výsledky. Rozdíl mezi predikcí a výsledkem odráží úroveň znalostí a stupeň nejistoty. Tyto rozdíly by měly postupně snižovat v důsledku vylepšených a podrobnějších modelů a zpřesňováním získaných údajů. V průběhu tohoto vývoje se vytváří potřebné know-how, probíhá rozvoj znalostí a potřebných kompetencí. Iterativní testování předpovědí a reálných údajů by mělo nakonec napomoci k identifikaci momentu, kdy se dosáhne potřebné úrovně znalostí. (NEA/OECD, 2012, (POSIVA 2000).

V tomto případě na základě výše uvedené analýzy byly vyhodnoceny následující bezpečnostní a technické aspekty, na jejichž zkoumání by v následujících fázích kladen prioritní význam (viz Tab. 8)

Tab. 6 Přehled vlivu bezpečnostních aspektů k budoucímu detailnímu zkoumání

Aspekt	Typ aspektu	Cíl/Důvod zkoumání
Popsatelnost a predikovatelnost	Bezpečnostní aspekty/ Geologické charakteristiky	Detailní popis s cílem eliminovat nejistoty v umístění ukládacího horizontu Identifikace zón s potenciálním prouděním podzemní vody a fluid
Variabilita fyzikálních, geomechanických a geochemických vlastností	Bezpečnostní aspekty/ Geologické charakteristiky	Detailních charakteristika s cílem eliminovat nejistoty v alokaci domén s odlišnými tepelnými a mechanickými vlastnostmi
Hydrogeologické charakteristiky	Bezpečnostní aspekty/ Technické aspekty	Detailní popis s cílem eliminovat nejistoty v umístění ukládacího horizontu Identifikace zón s potenciálním prouděním podzemní vody a fluid Identifikace vlivu na optimalizaci úložného obzoru (vliv na odvod tepla a plynu) Identifikace vlivu na ražbu Identifikace a eliminace vlivu na IB a migraci radionuklidů (chemismus podzemních vod)

Tepelné vlastnosti hornin	Bezpečnostní aspekty/ Technické aspekty	Identifikace možnosti optimalizace projektového řešení HÚ Identifikace vlivu na napjatostní stav horninového masivu Identifikace vlivu na chemismu podzemních vod, přeměnu minerálů hornin a inženýrské bariéry
Mechanické vlastnosti hornin	Bezpečnostní aspekty/ Technické aspekty	Identifikace vlivu na napjatostní stav masivu Identifikace vlivu na způsob ražby a výstavby Identifikace vlivu na vznik EDZ a BDZ
Odvod plynu (Plynopropustnost)	Bezpečnostní aspekty	Identifikace vlivu na napjatostní stav masivu Identifikace vlivu na porušení horniny Identifikace vlivu na změnu režimu podzemní vody
Množství a střet zájmů	Technické aspekty	Identifikace možných střetů zájmů a definování způsobu jejich eliminace, např. technickým řešením

8 Zhodnocení míry konzervatismu bezpečnostních předpokladů na vybraných příkladech ze zahraničí a možnost optimalizace při zachování celkového stupně bezpečnosti

Proces výběru vhodného místa pro úložiště radioaktivních odpadů je rozdělován na čtyři fáze (IAEA 2011b)

1. Fáze vytváření koncepce a plánování
2. Fáze vyhledávání vhodné lokality
3. Fáze podrobného průzkumu na jedné či více lokalitách s cílem detailnějšího posouzení
4. Fáze potvrzení výběru lokality/lokalit

Různé země mají různě definované přístupy ke každé z výše uvedených fází.

Přístupy některých zemí jsou založeny od počátku na komunikaci s veřejností (dobrovolnický přístup, Japonsko, Kanada), kdy teprve na základě ochoty komunit přijmout úložiště jsou tyto lokality hodnoceny na základě zvolených kritérií (NWMO 2010). Jiné země procházejí postupným procesem, založeným na zvyšování detailu znalostí o jednotlivých lokalitách a následně i zpracováním analýz dlouhodobé bezpečnosti umístění HÚ na daných lokalitách (Švédsko, Finsko) v paralelní diskuzi s komunitami na předpokládaných lokalitách. Jiné země volí přístup umístění v předpokládaných vhodných lokalitách v zónách tzv. jaderného zájmu (Ruská federace), kde lze očekávat širokou akceptovanost „jaderných aktivit“.

Pro výběr vhodných lokalit by měly být v prvních fázích výběru použity především geovědní kritéria.

Na závěr prvních fáze vyhledávání vhodných lokalit (Fáze 2) by měly být vyhodnoceny požadavky jak legislativní, tak dostupnost dat, především s přihlédnutím k přítomnosti hlavních aktivních tektonických zón, vulkanických oblastí apod. Tato data jsou z velké části založena na dostupných informacích z předchozích výzkumů, historických seizmických datech či datech z dálkového sledování země (IAEA 2011b).

Tato kritéria by měla definovat požadavky či preference na hostitelskou horninu, jako jsou např. tektonické podmínky, vlastnosti hornin a složení podzemní vody ad. Na základě těchto kritérií bude vhodnou metodou vybrána/vybrány vhodné oblasti či hostitelské prostředí a následně vhodná lokalita/lokality. **Je jednoznačné, že s postupem procesu výběru s nárůstem znalostí o lokalitách se budou limity či požadavky kritérií měnit. Současně se také předpokládá, že i význam kritérií se na základě rozsahu znalostí může měnit** (IAEA 2011b).

Základní postupy k vytvoření metodiky výběru lokality byly v ČR vytvořeny na základě doporučení IAEA, legislativních požadavků ČR i EU i na základě zahraničních zkušeností (Vokál et al. 2017; Havlová et al. 2018a). Zahraniční přístupy jsou založeny na podobné bázi, jako v ČR, založené na několikastupňovém postupu, založeném na konzervativním přístupu k nejistotám, spojeným s mírou informací o lokalitě a optimalizací kritérií v každém kroku. Příklady ze zahraničí ukazují, že příklad optimalizačního postupu je možno ukázat na příkladu Švýcarska, zatímco konzervatismu v přístupu ke stupni vědění a stavu znalostí o lokalitách v prvních fázích výběru HÚ je možno demonstrovat na příkladu Kanady

8.1 Švýcarsko

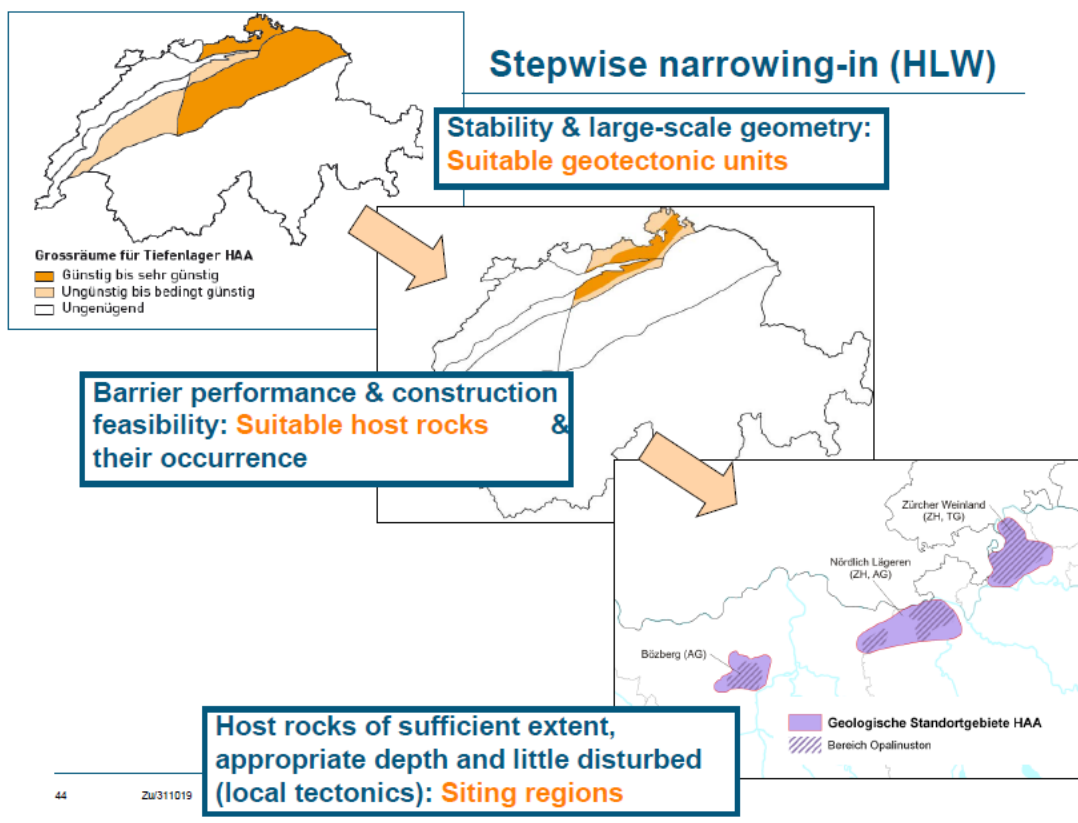
Na odstupovaný přístup ve vztahu k úrovni znalostí o lokalitách lze ukázat i na příkladu Švýcarska.

Výběr lokality pro umístění HÚ je řízen dokumentem Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (2008) a dělen na následující fáze

1. Výběr regionu pro umístění HÚ
2. Výběr oblasti pro umístění HÚ
3. Výběr lokality pro umístění HÚ

Postup výběru lokality je zobrazen na následujícím obrázku (Zuiderma 2019)

Obr. 1 Postup výběru lokality ve Švýcarsku (Zuiderma 2019)



Základní prioritou pro umístění HÚ je bezpečnost. Bezpečnostní kritéria pro výběr lokalit jsou dle Sectoral plan následující (viz Tab. 7). Ty jsou dále rozděleny na indikátory (40 indikátorů – NAGRA 2008).

Tab. 7 Bezpečnostní kritéria pro výběr lokality (Sectoral plan; Zuiderma 2019 na základě NAGRA 2008)

Skupina kritérií	Kritéria
1. Vlastnosti horninového prostředí	1.1. Prostorový rozsah
	1.2. Hydraulická vodivost
	1.3. Geochemické vlastnosti
	1.4. Migrační cesty
2. Dlouhodobá stabilita	2.1. Stálost vlastností
	2.2. Eroze
	2.3. Vlivy vyvolané úložištěm
	2.4. Konflikty zdrojů
3. Důvěryhodnost geologických informací	3.1. Charakterizace horninového prostředí
	3.2. Prostorová popsateľnost
	3.3. Dlouhodobá predikovatelnost
4. Technická proveditelnost	4.1. Mechanické vlastnosti horniny
	4.2. Podzemní přístup

Hodnocení, které proběhlo v první fázi výběru, bylo zpracováno kvalitativní hodnocení.

Pro všechny indikátory bylo zavedeno základní hodnocení

- Velmi vhodné
- Vhodné
- Vhodné s výhradami
- Méně vhodné
- Nevhodné

Některé specifické indikátory musely splňovat definované nároky

- Minimální požadavky (MA) – musí splňovat alespoň stupeň „vhodné s výhradami“ (např. fungování barrier, technická proveditelnost, dlouhodobá stabilita, geometrie apod.)
- Zvýšené požadavky (VA) – musí splňovat alespoň kritérium „vhodné“

Jaké nároky byly kladeny na jednotlivé indikátory, je patrné v následující tabulce (Tab. 8)

Tab. 8 Požadavky kladené na indikátory kritérií dlouhodobé bezpečnosti. MA – minimální požadavky, VA – zvýšené nároky; BS – použito pro hodnocení. V němčině. (NAGRA 2008).

SGT-Kriterien	Verwendete Indikatoren	MA	VA	BS
1.1 Räumliche Ausdehnung	<i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit</i>	x	x	x
	<i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion</i>	x	x	x
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	x		x
	<i>Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion</i>	x	x	x
	<i>Mächtigkeit</i>	x	x	x
	Abstand zu regionalen Störungszonen	x		
	Laterale Ausdehnung	x		x
	<i>Platzangebot untertags</i>		x	x
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	<i>Hydraulische Durchlässigkeit</i>	x	x	x
	Grundwasserstockwerke			x
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			x
	pH			x
	Redox-Bedingungen	x		x
	Salinität			x
	Mikrobielle Prozesse			x
	Kolloide			x
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			x
	<i>Homogenität des Gesteinsaufbaus</i>		(x)	x
	Länge der Freisetzungspfade			x
	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	x		x
	Tongehalt	x		
	Selbstabdichtungsvermögen			x

SGT-Kriterien	Verwendete Indikatoren	MA	VA	BS
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik	x		x
	Seismizität			x
	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen ¹⁾			x
	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	x		x
	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	x		x
2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum	x		x
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			x
	Chemische Wechselwirkungen			x
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			x
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(x)
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	x		x
	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	x		x
	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins			x
	Mineralquellen und Thermen	x		x
	Geothermie			x
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	<i>Diffus gestörte Zonen</i>		x	
	<i>Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit</i>		x	x
	Erfahrungen			x
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse	x		x
	Kontinuität der interessierenden Schichten			x
	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund			x
	Explorationsbedingungen an Oberfläche	x		x
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	<i>Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)</i>		x	
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation			x
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	x		x
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen			x
	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	x		x

¹⁾ Nur für Beschreibung verwendet.

I zde je ze zprávy patrné, že ne všechna kritéria nebyla použita k vyhodnocení (např. tektonický režim, difúzní porušená zóna, obsah jílu), přihlížejíc k tomu, že míra informace o lokalitách v prvních fázích výběru lokalit je limitovaná. Stejně tak nebyly na všechny indikátory kladeny stejné nároky (odstupňovaný význam indikátorů). Cílem bylo prokázat, zda charakteristiky lokality splňují výše uvedené požadavky a postoupí k dalšímu kroku hodnocení (Fáze 2).

Na počátku fáze Fáze 2 byla metodika použitá ve Fázi 1 upravena tak, aby odrážela změny okrajových podmínek (NAGRA 2014). Kromě požadavků stanovených v koncepční části Sectoral planu a upřesnění, poskytnutého dozorným orgánem ENSI, se berou v úvahu také připomínky a přezkumy, provedené ve Fázi 1 a specifické vlastnosti hostitelských hornin a regionů geologického umístění, které jsou navrženy ve Fázi 1. **Optimalizace je považována za klíčový prvek ve Fázi 2 procesu: za účelem co nejlepšího využití návrhů z Fáze 1 se provádí třístupňová optimalizace** (identifikace prioritních hostitelských hornin v hodnocených regionech s více než jednou potenciální hostitelskou horninou,

definování optimalizovaných území ve zvolených regionech a umístění regionů s jasnými nevýhodami do rezervy).

Ve druhém kroku je v hostitelských regionech pro LLW/ILW úložiště s více než jednou hostitelskou horninou provedeno bezpečnostní srovnání hostitelských hornin vedoucí k identifikaci prioritních hostitelských hornin, které budou použity pro další kroky. Tento krok nebyl vyžadován pro úložiště VJP a RAO, protože pouze jako hostitelská hornina byl definován jen Opalinus clay.

Tento postup vedl k identifikaci dvou geologických úložných oblastí, z nichž každá byla pro L / ILW a HLW úložiště.

Oblasti umístění navržené pro úložiště L / ILW jsou

- Curych Nordost s místem umístění ZNO-6b pro povrchové zařízení
- Jura Ost s umístěním JO-3 + pro povrchové zařízení

a oblasti umístění navržené pro úložiště HÚ jsou

- Curych Nordost s místem umístění ZNO-6b pro povrchové zařízení
- Jura Ost s umístěním JO-3 + pro povrchové zařízení.

V obou regionech existuje potenciál pro konstrukci úložišť L / ILW a HLW ve stejném místě, tj. tzv. kombinované úložiště.

8.2 Kanada

Jako příklad odlišného přístupu lze uvést kanadský program výběru lokalit, který v krocích 1 – 9 vede program vývoje HU od předběžného výběru lokalit až po výběr finální lokality, výstavbu HÚ a zahájení jeho provozu (NWMO 2010). V iniciální fázi jsou aplikována základní kritéria

Na lokalitě musí být k dispozici území dostatečné velikosti pro umístění povrchových a podzemních zařízení.

Dostupné území musí být mimo chráněná území, kulturní památky, provinční parky a národní parky.

- Na dostupném území se nesmí vyskytovat známé zdroje podzemní vody.
- Na dostupném území se nesmí vyskytovat ekonomicky využitelné přírodní zdroje
- Zamýšlené území k umístění nesmí být umístěno v oblastech se známými geologickými a hydrogeologickými charakteristikami, které by ovlivňovaly a klíčové faktory dlouhodobé bezpečnosti

Upřednostňovaným místem bude skalní masiv s žádoucími charakteristikami (geologickými, hydrogeologickými, chemickými a mechanickými), které podporují bezpečnostní funkci kontejnmentu a úložiště tak, aby splňovaly požadavky Kanadské komise pro jadernou bezpečnost, pokyny IAEA a zkušenosti v jiných zemích s programy nakládání s jaderným odpadem.

V každé fázi výběru lokality by mělo být možno zodpovědět na šest základních otázek, spojených s dlouhodobou bezpečností. Lokalita bude vyhodnocena systémem detailního odborného a technického vyhodnocení s přihlédnutím k definovaným klíčovým faktorům:

1. Schopnost horniny zadržet radionuklidy po dostatečně dlouhou dobu
2. Dlouhodobá stabilita lokality
3. Výstavba HÚ, jeho provoz a uzavření
4. Intruze budoucích pokolení
5. Predikovatelnost geologických vlastností lokality
6. Dopravní infrastruktura

V každé fázi však vzhledem k dostupnosti informací na lokalitě není možno posuzovat všechny indikátory pro zvolené faktory.

Příkladem může být např. faktor, ovlivňující schopnost horniny zadržet radionuklidy po dostatečně dlouhou dobu. Jeho hodnocení je založeno na indikátorech, uvedených v Tab. 9.

Tab. 9 Příklad bezpečnostních faktorů, uvážených při výběru lokalit v kanadském programu výběru lokalit a indikátorů jejich hodnocení (NWMO 2010)

Faktory ovlivňující bezpečnost	Předpokládaná bezpečnostní funkce	Hodnocené indikátory
Schopnost horniny zadržet radionuklidy po dostatečně dlouhou dobu	1. Geologické, hydrogeologické, chemické a mechanické vlastnosti lokality by měly <ul style="list-style-type: none"> • Poskytovat dlouhodobou izolaci VJP od člověka, životního prostředí a poruch na povrchu • Poskytovat dlouhodobou izolaci VJP v HÚ • Zamezovat přístupu podzemní vody a zadržovat pohyb radionuklidů směrem z úložiště 	1.1. Hloubka umístění HÚ by měla být dostatečná pro izolaci h _u od povrchu a změn, způsobených člověkem a přírodními událostmi
		1.2. Objem horniny v hloubce HÚ je dostatečný a poskytuje dostatečnou vzdálenost od aktivních geologických struktur
		1.3. Mineralogické složení horniny, jeho geochemické složení a složení pórové vody nesmí ovlivňovat funkci materiálů bariér v HÚ
		1.4. HG režim v hostitelské hornině by měl vykazovat nízké rychlosti proudění podzemních vod
		1.5. Mineralogické složení horniny, jeho geochemické složení a složení pórové vody by mělo pozitivně ovlivňovat retardaci radionuklidů
		1.6. Hostitelské prostředí by mělo být schopno tlumit změny, způsobené mechanickými a termálními procesy v průběhu výstavby, provozu a po uzavření HÚ

V přípravě iniciální fáze výběru lokality, založené na archivních datech nebylo možno hodnotit všechny indikátory a tak byly na základě expertního výběru zvoleny ty, u nichž bylo hodnocení dostatečně relevantně dokladovatelné (viz žlutě označená pole v Tab.)

Tab. 10 Výběr vybraných indikátorů (označeny žlutě), které byly použity pro hodnocení schopnosti horniny zadržet radionuklidy v iniciální fázi výběru lokalit (Vorauer and Hirschon 2019)

Faktory ovlivňující bezpečnost	Předpokládaná bezpečnostní funkce	Hodnocené indikátory
Schopnost horniny zadržet radionuklidy po dostatečně dlouhou dobu	Geologické, hydrogeologické, chemické a mechanické vlastnosti lokality by měly <ul style="list-style-type: none"> • Poskytovat dlouhodobou izolaci VJP od člověka, životního prostředí a poruch na povrchu • Poskytovat dlouhodobou izolaci VJP v HÚ • Zamezovat přístupu podzemní vody a zadržovat pohyb radionuklidů směrem z úložiště 	1.1 Hloubka umístění HÚ by měla být dostatečná pro izolaci HÚ od povrchu a změn, způsobených člověkem a přírodními událostmi
		1.2 Objem horniny v hloubce HÚ je dostatečný a poskytuje dostatečnou vzdálenost od aktivních geologických struktur
		1.3 Mineralogické složení horniny, jeho geochemické složení a složení pórové vody nesmí ovlivňovat funkci materiálů bariér v HÚ
		1.4 HG režim v hostitelské hornině by měl vykazovat nízké rychlosti proudění podzemních vod
		1.5 Mineralogické složení horniny, jeho geochemické složení a složení pórové vody by mělo pozitivně ovlivňovat retardaci radionuklidů
		1.6 Hostitelské prostředí by mělo být schopno tlumit změny, způsobené mechanickými a termálními procesy v průběhu výstavby, provozu a po uzavření HÚ

Podobně tomu bylo i u dalších klíčových faktorů (Vorauer and Hirschon 2019), kdy byly pro primární hodnocení zvoleny pouze vybrané indikátory. Nebyly tudíž hodnoceny indikátory, pro jejichž posouzení chyběla dostatečná data z úrovně HÚ či doplňujících výzkumů (mechanické či tepelné vlastnosti) a jejichž zatížení nejistotami bylo příliš velké v daném stavu poznání lokalit.

Na základě tohoto přístupu bylo k dalšímu průzkumu vybráno 5 lokalit, z 22 lokalit, jež v prvním kroku projevily zájem o umístění HÚ. Na lokalitách probíhá i vrtných průzkum (Vorauer and Hirschon 2019).

..

9 Závěr

Hlubinné úložiště radioaktivní odpadů musí být navrženo tak, aby bylo možné bezpečně uložit všechny radioaktivní odpady nepřijatelné do přípovrchových úložišť. Úložiště musí být ve vybrané lokalitě proveditelné pomocí ověřených technologií, dostupných v současné době, tak aby bylo možno dosáhnout takové míry dlouhodobé bezpečnosti, která může být rozumným způsobem dosažena.

Výběr lokality je proces, který je založen na několikastupňovém vyhodnocení souboru kritérií, jež zajišťují, aby bylo možno předpokládat dosažení odpovídajícího stupně dlouhodobé a provozní bezpečnosti, technické proveditelnosti a současně dopady na člověka životní prostředí byly při umístění na vybranou lokalitu co nejmenší.

Kritéria pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti na základě umístění HÚ ve vhodně zvolené lokalitě a technická proveditelnost na tomto místě se navzájem prolínají, ovlivňují a v některých případech se překrývají.

Zcela jednoznačně se projevuje dominantní vliv geologických a hydrogeologických charakteristik na proveditelnost HÚ na lokalitě, s významným akcentem i na mechanické a tepelné vlastnosti, hodnocené v obou oblastech. Významné aspekty představují přítomnost nerostných surovin a zdrojů podzemních vod na lokalitě.

Řadu méně významných vlivů bezpečnostních aspektů ve vztahu k proveditelnosti HÚ na lokalitě je možno překonat pomocí technického řešení, jako je např. vhodná volba razících technik, vhodně zvolené metody odvodnění či izolace ukládacího horizontu, zajištění náhradních zdrojů vody apod.

Lze předpokládat, že se s rozšiřujícím se stupněm poznání a s postupujícími průzkumnými pracemi na zvolených lokalitách bude možno vzájemné vztahy mezi bezpečnostními a technickými aspekty dále blíže specifikovat, či přímo kvantifikovat.

10 Seznam literatury

- AKEND COMMITTEE (2002): Site Selection Procedure for Repository Sites, Recommendations, Německo, 2002.
- ANDERSSON J., ALMÉN K.-E., ERICSSON L. O., FREDRIKSSON A., KARLSSON F., STANFORS R., STRÖM A. (1998): Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation. SKB Technical report 98-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden, 115 pp.
- ARP (2011): Vokál A., Havlová V., Hercík M., Landa J., Lukin D., Vejsada J.: Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. III. Etapa. Studie zadávací bezpečnostní zprávy. C. Dokumentační část. C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ. Zpráva ÚJV Řež, a.s. EGP 5014-F-101420, 12/2010.
- BÁRTA J., DOSTÁL D., JIRKŮ J., VILHELM J. (2016): Metodiky prací se systémem SGI 1 (seismika, geoelektrika, internet). Realizační výstup úkolu TA 0 3020408. G Impuls, PŘF UK, Technická univerzita v Liberci.
- BLAHETA R., BYCZANSKI P., MALÍK J., KOHUT R., KOLCUN A., STARÝ J., HOKR M., KRÁLOVCOVÁ J., FRYDRYCH D. (2012): Tepelná analýza referenčního návrhu úložiště vyhořelého jaderného paliva. Závěrečná zpráva řešení projektu. Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., 39 str.
- BUTOVIČ A., ZAHRADNÍK O., GRUNWALD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., FIEDLER F., MARTINČÍK J., KOBYLKA D., NOHEJL (2018): Hodnocení potenciálních lokalit z hlediska proveditelnosti. Technická zpráva SÚRAO č. 358/2019.
- GEHLIN, S., HELLSTRÖM, G. (2002): Influence on Thermal Response Tests by Groundwater Flow in Vertical Fractures in Hard Rock. In Doctoral Thesis. Lulea: University of Technology. 2002. <https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-cerpadla>
- HAVLOVÁ V. (2018): Hierarchizace kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. Technická zpráva SÚRAO č. 285/2018, Praha.
- HILLAR M., SRB M., NOSEK J. (2010): Riziko vysokého hydrostatického tlaku na tunelu Praha – Beroun. Sborník konference Podzemní stavby 2010.
- HROCH T. A PAČES T., HOŠEK, J., ŠEBESTA, J. (2015A): Erozní stabilita lokalit. Průběžná zpráva zpráva. – Technická Zpráva 25/2015, SÚRAO. Praha, 18 str.
- IAEA (2006) Safety fundamentals SF-1, IAEA, Vienna, 2006
- IAEA (2010): Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. SSG-9. (2010)
- IAEA (2011a): Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, No. SSR-5, Pub. 1449, IAEA, Vienna, 2011
- IAEA (2011b): Geological disposal facilities, Specific Safety Guide, SSG-14, Publication 1483, 2011, Appendix I” Siting of geological disposal facilities
- KALÁB, Z., JECHUMTÁLOVÁ, Z. LEDNICKÁ. M., ŠILENÝ, J. (2015) Seismická na území ČR a v příhraničních oblastech. Závěrečná zpráva číslo 26/2015, SÚRAO, 2015 105 s.
- LA POINTE P., P, WALLMAN, A, THOMAS, S. FOLLIN (1997): A methodology to estimate earthquake effects on fractures intersecting canister holes, SKB Technical Report 97-07, March 1997.
- MAREK J. ET AL. (2005): Kritéria pro zúžení lokalit a kategorizace tektonických zón. Dokument projektu Geobariéra, 2005
- MC EWEN T. (ed) (2012): Rock Suitability Classification, RSC 2012, POSIVA 2012-24.
- MYSLIL, V., KUKAL, Z., POŠMOURNÝ, K., FRYDRYCH, Z. (2007): Ekologická energie z hlubin Země-současné možnosti využívání. - Planeta. Roč. XV, č. 4/2007. MŽP ČR. Praha

 SÚRAO	Vliv bezpečnostních aspektů na technické řešení HÚ	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 429/2019

- NAGRA (2008): Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Technische Bericht 08-03. NAGRA, Switzerland (v němčině).
- NAGRA (2014): Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Technische Bericht 14-01. NAGRA, Switzerland (v němčině)
- NDA-RWMD, A proposed framework for stage 4 of the MRWS Site Selection Process, Technical Note No. 8150715, 2008
- NEA/OECD (2012): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste - Outcomes of the NEA MeSA Initiative. OECD-NEA No. 6923, Paris, 2012
- NORRIS, S., LEMY, F., DEL HONEUX, C.-A., VOLCKAERT, G., WEETJENS, E., WOUTERS, K., WENDLING, J., DYMITROWSKI, M., PELLEGRINI, D., SELLIN, P., JOHNSON, L., SENTIS, M. AND HARRINGTON, J. (2013): Synthesis Report: Updated Treatment of Gas Generation and Migration in the Safety Case. FORGE Report D1.5R. <https://www.bgs.ac.uk/forge/docs/reports/D1.5-R.pdf>
- NWMO (2010): Moving forward together: Process for selecting a site for Canada's deep geological repository for used nuclear fuel, NWMO 2010
- POSIVA (2013): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. – POSIVA Report 2012-04, POSIVA Oy, Olkiluoto, Finland.
- SÚJB (2012): Interpretace kritérií pro umístování jaderných zařízení a návrh jejich průkazů, Bezpečnostní návod BN-JB-1.14, SÚJB, duben 2012
- SVOBODA L. ET AL. (2013): Stavební hmoty. 3. Vydání. Praha. [ISBN 978-80-260-4972-2](https://doi.org/10.1007/978-80-260-4972-2). Online: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>.
- ŠPINKA O., GRÜNWARD L., ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J. (2017): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. Technická zpráva SURAO č. 139/2017.
- VOKÁL, A., POSPÍŠKOVÁ, I., VONDROVIC, L., KOVÁČIK, M., STEINEROVÁ, L. (2017): Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Metodický pokyn SÚRAO MP 22, verze 3, SÚRAO, Praha, 41 str.
- VORAUER A., HIRSHON S. (2019): Geoscientific data availability, use, and assessment of relative suitability during early stages of a voluntary site selection process. Presentation at Crystalline club meeting, Krasnoyarsk, June 2019; NWMO.
- ZUIDERMA P. (2019): NAGRA experience with site selection. Prezentace na semináři k výběru lokality. SURAO, Praha 16.11.2019.

Legislativa

- Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon. In: Sbírka zákonů, 2016. – Částka 102, 3938–4060.
- Zákon č. 254/2001 Sb. ákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: Sbírka zákonů, 2016. – Částka 98, 3938–4060
- Vyhláška č. 379/2016 Sb. - Vyhláška o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky
- Vyhláška č. 408/2016 Sb. - Vyhláška o požadavcích na systém řízení
- Vyhláška č. 422/2016 Sb. – Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

Vyhláška č. 162/2017 Sb. - Vyhláška o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona (PDF, 99 kB)

Vyhláška č. 266/2019 Sb. - Vyhláška o koncepci nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení. In: Sbírka zákonů, 2016. – Částka 151, 5989–5997.

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz