

Prováděcí smlouva č. SO2021-053-08

k Rámcové smlouvě (dohodě) o poskytování služeb (Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště – Hodnocení bariér) ze dne 24. 6. 2021

Níže uvedeného dne, měsíce a roku smluvní strany

Česká republika – Správa úložišť radioaktivních odpadů

Sídlo: Dlážděná 1004/6, 110 00, Praha 1 – Nové Město

IČ: 66000769

DIČ: CZ66000769

Jejmž jménem jedná: RNDr. Lukáš Vondrovic, Ph.D., ředitel

Bankovní spojení: ČNB v Praze 1

Číslo účtu 64726011/0710

E-mail: podatelna@surao.cz

Datová schránka: 6qsigjs

Manažer SÚRAO Dílčí zakázky: xxx xxxxx xxxxxxxx

Zástupce manažera SÚRAO Dílčí zakázky: xxx xxxxxxx xxxxxxx

Osoba odpovědná za smluvní jednání: xxx xxxxxxxxxx xxxx, xxx

(dále jen "SÚRAO")

a

Technická univerzita v Liberci

právní osoba, zřízena zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů

Sídlo: Studentská 1402/2, 461 17 Liberec 1

Kontaktní adresa: Studentská 1402/2, 461 17 Liberec 1

IČ: 46747885

DIČ: CZ46747885

Zastoupená: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D., děkan

Bankovní spojení: ČSOB Liberec, 1.máje 18, Liberec

Číslo účtu: 305806603/0300

Datová schránka: td7j9ft

Osoba odpovědná za technické řešení: xxx xxxxx xxxxx, xxxx

(dále jen "Poskytovatel")

(SÚRAO a Poskytovatel dále společně jen „Smluvní strany“, jednotlivě „Smluvní strana“)

uzavřely tuto Prováděcí smlouvu (dále jen „**Prováděcí smlouva**“) k Rámcové smlouvě (dohodě) o poskytování služeb (Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení technického řešení hlubinného úložiště) – Hodnocení bariér ze dne 24. 6. 2021, č. j. SÚRAO SO2021-053 (dále jen „**Smlouva**“) ve znění dodatku č. 1, č. j. SO2021-053-01, a dodatku č. 2, č. j. SO2021-053-03, dle zákona č. 134/2016 Sb., o zadávání veřejných zakázek, v platném

znění (dále jen „ZZVZ“) a v souladu s ustanovením § 1746 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů.

Smluvní strany vědomy si svých závazků v této Prováděcí smlouvě obsažených a v úmyslu být touto Prováděcí smlouvou vázány, se dohodly na následujícím znění Prováděcí smlouvy.

Preamble

- A. Dne 24. 6. 2021 uzavřela SÚRAO s Poskytovatelem Smlouvu, na základě které se Poskytovatel zavázal poskytovat SÚRAO Služby spočívající ve výzkumné podpoře v oblasti vymezené ve Smlouvě.
- B. Za účelem sjednání dohody o rozsahu konkrétních Služeb požadovaných ze strany SÚRAO od Poskytovatele, uzavírají Smluvní strany, v souladu s čl. 4 Smlouvy, tuto Prováděcí smlouvu na Dílčí zakázku.
- C. Smluvní strany se dohodly, že pojmy, uvedené v této Prováděcí smlouvě velkými písmeny, mají stejný význam jako tytéž pojmy, uvedené ve Smlouvě, není-li dále v této Prováděcí smlouvě stanoveno jinak. Smluvní strany se dále dohodly, že otázky, neupravené v této Prováděcí smlouvě, se řídí Smlouvou a jsou nedílnou součástí této Prováděcí smlouvy v souladu s odst. 3.2.3 Smlouvy.

I.

Předmět Prováděcí smlouvy

- 1. Poskytovatel se touto Prováděcí smlouvou, v souladu se Smlouvou, zavazuje poskytovat SÚRAO Služby na Dílčí zakázku ve smyslu a za podmínek stanovených v čl. 6 Smlouvy a v Příloze č. 3 Smlouvy. Pro plnění předmětu této Prováděcí smlouvy nejsou nezbytné Vstupy. Konkrétní popis a specifikace Služeb poskytovaných v rámci této Dílčí zakázky, respektive další náležitosti pro realizaci předmětu této Prováděcí smlouvy jsou uvedeny v Příloze č. 1 této Prováděcí smlouvy.
- 2. Maximální a nepřekročitelný rozsah Služeb tvořících předmět Dílčí zakázky stanovený touto Prováděcí smlouvou je Smluvními stranami stanoven na **2 860** (slovy: **dva tisíce osm set šedesát**) člověkohodin.
- 3. Konkrétní rozložení a maximální (nepřekročitelný) rozsah jednotlivých činností realizovaných v rámci Služeb tvořících předmět Dílčí zakázky stanovený touto prováděcí Smlouvou je uveden v Příloze č. 3 této Prováděcí smlouvy.
- 4. SÚRAO se zavazuje zaplatit Poskytovateli Smluvní cenu za poskytnuté plnění, a to v rozsahu a způsobem stanoveným v čl. III této Prováděcí smlouvy.
- 5. Smluvní strany se zavazují poskytnout si navzájem součinnost nezbytnou k řádnému splnění jejich povinností dle této Prováděcí smlouvy.

II.

Doba a místo plnění

1. Smluvní strany se dohodly, že Poskytovatel je povinen poskytovat SÚRAO Služby dle čl. I odst. 1 této Prováděcí smlouvy v termínech uvedených v Časovém harmonogramu, jež tvoří Přílohu č. 2 této Prováděcí smlouvy, a který vychází z termínů uvedených v Příloze č. 1 Smlouvy.
2. Místem plnění Služeb dle této Prováděcí smlouvy je sídlo SÚRAO.

III.

Smluvní cena za předmět plnění Dílčí zakázky

1. Smluvní strany se dohodly, že maximální možná a nepřekročitelná Smluvní cena za poskytování Služeb tvořících Dílčí zakázku dle čl. I odst. 1 této Prováděcí smlouvy činí maximálně **2 964 000 Kč (slovy: dva miliony devět set šedesát čtyři tisíc korun českých) bez DPH, tj. 3 586 440 Kč (slovy: tři miliony pět set osmdesát šest tisíc čtyři sta čtyřicet korun českých) včetně DPH.**

Maximální Smluvní cena za poskytování Služeb tvořících Dílčí zakázku specifikovanou touto Prováděcí smlouvou je stanovena na základě maximálního rozsahu Služeb uvedeného v čl. I odst. 2 této Prováděcí smlouvy a příslušných hodinových sazeb, které jsou uvedeny v příloze č. 2 Smlouvy.

2. Pro vyloučení všech pochybností Smluvní strany uvádí, že Poskytovatel je oprávněn fakturovat
(i) Smluvní cenu pouze za skutečně realizované Služby a dále (ii) případné náklady vynaložené na Vstupy, jsou-li nezbytné k plnění předmětu Dílčí zakázky specifikovaného touto Prováděcí smlouvou.
3. Ostatní podmínky vztahující se k platbě Smluvní ceny za plnění poskytnuté Poskytovatelem dle této Prováděcí smlouvy, jakož i lhůta splatnosti, jsou uvedeny ve Smlouvě.

IV.

Ostatní ujednání

1. Veškerá ujednání této Prováděcí smlouvy navazují na Smlouvu a Smlouvou se také řídí, tj. práva, povinnosti či skutečnosti neupravené v této Prováděcí smlouvě se řídí ustanoveními Smlouvy.
2. V případě, že se ujednání obsažené v této Prováděcí smlouvě bude odchylovat od ustanovení obsaženého ve Smlouvě, má ujednání obsažené v této Prováděcí smlouvě přednost před ustanovením obsaženým ve Smlouvě, ovšem pouze ohledně plnění sjednaného v této Prováděcí smlouvě a pokud neodporuje principům stanoveným ve Smlouvě.
3. Pro vyloučení pochybností Smluvní strany uvádí, že sankční ujednání a pravidla pro trvání závazků této Prováděcí smlouvy jsou uvedeny ve Smlouvě.
4. Jestliže se ukáže jakékoliv ustanovení této Prováděcí smlouvy jako neplatné, nevymahatelné nebo neúčinné, nedotýká se tato neplatnost, nevymahatelnost nebo

neúčinnost ostatních ustanovení této Prováděcí smlouvy. Smluvní strany se zavazují nahradit do 30 pracovních dnů od doručení výzvy jedné Smluvní strany druhé Smluvní straně neplatné, neúčinné nebo nevymahatelné ustanovení ustanovením platným, účinným a vymahatelným se stejným nebo obdobným obchodním a právním smyslem, případně uzavřít smlouvu novou.

5. Tato Prováděcí smlouva nabývá platnosti dnem jejího podpisu oběma Smluvními stranami a účinnosti dnem jejího zveřejnění v souladu se zákonem č. 340/2015 Sb., o zvláštních podmínkách účinnosti některých smluv, uveřejňování těchto smluv a o registru smluv (zákon o registru smluv), v registru smluv.
6. Nedílnou součástí této Prováděcí smlouvy jsou následující přílohy:
 - Příloha č. 1 – Popis a specifikace předmětu plnění Dílčí zakázky;
 - Příloha č. 2 – Časový harmonogram
 - Příloha č. 3 – Rozsah činností tvořících Služby
7. Na důkaz toho, že Smluvní strany s obsahem této Prováděcí smlouvy souhlasí, rozumí jí a zavazují se k jejímu plnění, připojují své podpisy a prohlašují, že tato Prováděcí smlouva byla uzavřena podle jejich svobodné a vážné vůle prosté tísně.

SÚRAO

V Praze 9.1.2025

el. podepsáno

.....
RNDr. Lukáš Vondrovic, Ph.D.
ředitel

Poskytovatel

V Liberci, dne 10.1.2025

el. podepsáno

.....
doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
děkan Fakulty mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Příloha č. 1

Popis a specifikace předmětu plnění Dílčí zakázky

Popis a specifikace předmětu plnění v následujícím textu odpovídá formulaci výzvy zadavatele k uzavření prováděcí smlouvy.

Název dílčí zakázky: **Modelování teplotního pole v celém objemu UOS.**

Správné porozumění šíření tepla na ukládacím horizontu hlubinného úložiště (HÚ) hraje důležitou roli při hodnocení dlouhodobé bezpečnosti českého ukládacího konceptu, a to hned ze dvou pohledů:

- 1) Úložiště radioaktivního odpadu musí zajišťovat odvod vytvářeného tepla. Kritériem pro odvod tepla je požadovaná teplota v bentonitu, která nesmí přesáhnout 95°C. Je potřeba zajistit, aby při navrženém uspořádání ukládacích obalových souborů (UOS) na ukládacím horizontu bylo toto kritérium splněno.
- 2) Český ukládací koncept pro vyhořelé jaderné palivo (VJP) počítá s dvouvrstvým UOS. Vnější obal navržený z uhlíkové oceli musí překonat pouze počáteční období uložení VJP, kdy podmínky v okolí UOS nejsou vhodné pro vnitřní pouzdro navržené z korozivzdorné oceli. V ukládacím konceptu se předpokládá, že životnost vnitřního pouzdra bude milion let. Jedna z nutných podmínek pro použití korozivzdorné oceli je, aby teplota na povrchu vnitřního pouzdra klesla pod 40 °C. Při vyšší teplotě může dojít k iniciaci bodové koroze (Stoulil et al. 2024).

Cílem této dílčí zakázky je pokračování ve vývoji modelů šíření tepla v HÚ s přidáním složité vnitřní geometrie UOS pro různé typy VJP a detailnější analýza jednotlivých jevů, které ovlivňují šíření tepla.

Dílčí zakázka bude rozdělena na 3 etapy.

- Etapa 1: Modelování teplotního pole v celém objemu UOS se zahrnutím složité vnitřní geometrie UOS. Cílem etapy bude vypracování modelu pro 1 UOS bez ovlivnění ostatními uvažovanými UOS v ukládacím systému. Modelování teplotního pole bude řešeno ve dvou podetapách pro obě varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3 (Hausmannová et al. 2023).
- Etapa 2: Aktualizace výsledků dílčí zakázky „Ověření teplotních výpočtů pro HÚ VJP (Prováděcí smlouva č. SO2021-053-05)“. Aktualizace zahrne výsledky získané v etapě 1. Tato etapa bude řešena pouze pro UOS ŠKODA 1000/3. Výsledkem bude zhodnocení vlivu vnitřního pouzdra na maximální teplotu na rozhraní vnějšího obalu UOS a bentonitu.
- Etapa 3: Výpočet doby snížení teploty na **povrchu vnitřního pouzdra UOS na 40° C**. Tento výpočet bude proveden pro obě varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3.

Vstupní údaje výpočtů:

Výpočty teplotního pole ukládacího systému HÚ budou provedeny pro 1 800 UOS uspořádaných do 30 zavážecích chodeb. Každá chodba bude mít 60 ukládacích vrtů. Vzdálenost mezi zavážecími chodbami bude 35 m (Hausmannová et al. 2023). Vzdálenosti mezi ukládacími vrty budou 6 až 20 m s krokem 1 m. Předpokládá se současné uložení všech

1 800 UOS. Vývoj tepelného výkonu jednotlivého UOS v čase je uveden v Příloze č. 2. Geometrie ukládacího vrtu je na Obr. 7, TZ644/2022rev. 1 (Svoboda et al. 2023).

Přehled parametrů pro výpočet:

- počáteční teplota horniny ve hloubce 500 m je 20° C (průměrná očekávaná hodnota podle hodnocení potenciálních lokalit HÚ),
- součinitel tepelné vodivosti horniny je od 2,0 W/m.K do 3,4 W/m.K, s krokem 0,2 W/m.K, celkové pro 8 výpočtů (očekávaný rozptyl hodnot na různých lokalitách, na základě hodnocení potenciálních lokalit HÚ),
- měrná tepelná kapacita horniny je 770 J/kg.K (průměrná hodnota potenciálních lokalit HÚ),
- součinitel tepelné vodivosti bentonitových bloků je 0,75 W/m.K (TZ 644/2022),
- měrná tepelná kapacita bentonitových bloků je 926 J/kg.K (TZ 644/2022),
- součinitel tepelné vodivosti bentonitových pelet je 0,3 W/m.K (TZ 644/2022),
- měrná tepelná kapacita bentonitových pelet je 1010 J/kg.K (TZ 644/2022).

Výpočet doby snížení teploty povrchu UOS na 40° C bude proveden pro minimální vzdálenost mezi ukládacími vrty, která splní požadavek nepřekročení maximální teploty bentonitu 95° C a pro součinitel tepelné vodivosti horniny 2,6 W/m.K.

Kontrolní dny budou v četnosti (zpravidla) jednou za 3 měsíce (podle potřeby mohou být i častěji).

Výstupem dílčí zakázky bude technická zpráva v českém jazyce v tištěné (1 paré) a elektronické verzi v šabloně SÚRAO v aktuálním znění dostupné na interním úložišti. V rámci odevzdání výstupů proběhne také odevzdání modelů a podkladových dat dle interního metodického pokynu SÚRAO MP.23. Dílčí zakázka bude ukončena externí oponenturou, kterou zajistí zadavatel.

HAUSMANNOVÁ L, DOHNÁLKOVÁ M., MATUŠKOVÁ E., LAHODOVÁ Z., A AUGUSTA J. (2023): Technické řešení hlubinného úložiště 2023, SÚRAO TZ 711/2023, Praha.

SVOBODA, J, ŠTÁSTKA, J., VAŠÍČEK, R., ŠPINKA, O., BUREŠ, P., POSPÍŠKOVÁ, I., VOZÁR, M., KRAJŇÁK, M., ŠACHLOVÁ, Š., VEČERNÍK, P., ZUNA M., HAVLOVÁ, V., STIBLÍKOVÁ, P., ČERNÁ, K., HLAVÁČKOVÁ, V. (2023), Návrh českého koncepčního řešení bufferu, backfillu, zátek, výplní komor ostatních RAO, ostatních výplní a konstrukčních prvků, TZ 644/2022rev.1, SÚRAO, Praha.

STOULIL J. A KOL. (2024): Vliv radiolýzy a bakteriálních extremofilů na životnost kontejneru pro hlubinné úložiště RAO, Technická zpráva SÚRAO TZ 731/2024.

Rizika projektu

Analýza rizika byla provedena s ohledem na čtyři základní oblasti – personální, organizační, finanční a rychlost a kvalitu dosažení výsledků.

Metody a způsoby hodnocení rizik byly aplikovány ve spolupráci všech řešitelských organizací. Byla zde využita kombinace metod, zejména základní jednoduché bodové metody a metody „What if“.

Oblasti a identifikované riziko

Personální – řešitelský tým je sestaven z organizací, které dlouhodobě spolupracují při řešení projektů a zakázek zaměřených na numerické modelování procesů v HU, a jejich pracovníků zajišťujících odbornou znalost a zkušenost spojenou s předmětem zakázky. Řešitelské organizace jsou schopny tým doplnit či částečně nahradit v případě neočekávané personální změny. V tomto případě by ale měla případná náhrada větší dopad, protože tým navazuje už na předchozí vyladěnou spolupráci konkrétních pracovníků na podobných úkolech.

Organizační – řešitelské organizace spolupracují dlouhodobě při řešení zakázek a projektů s podobným odborným zaměřením a mají nastavené mechanismy na řízení projektů a rizik. Mezi ně patří pravidelné schůzky a jednání pracovníků projektového týmu a jednání ohledně řízení a realizace. Velká část jednání probíhá formou telekonferencí. V tomto projektu jsou náročnější podmínky na provázání dílčích prvků výpočtu mezi sebou, tj. ve větší míře je jeden krok/pracovník závislý na druhém.

Finanční – oba subjekty jsou finančně stabilní a rozpočtově schopny alokovat potřebné zdroje na předfinancování zakázky.

Rychlost a kvalita dosažení výsledků – rychlost a kvalita dosažení výsledků je podmíněna schopnostmi a zkušenostmi členů týmu, dobrým odhadem náročnosti prací a dostatkem vstupních dat. Tým je sestaven z odborníků, jejichž schopnosti a zkušenosti jsou prověřené z řešení minulých projektů a zakázek. Část řešení je obdobná dříve použitým postupům, ale v části budou použity dosud nevyzkoušené postupy.

Potřebná vstupní data jsou zajištěna zadavatelem. Stále existují nejistoty např. ve vnitřním uspořádání jednotlivých palivových tyčí, plnicích plynech. Kvalita řešení výrazně závisí na vstupních datech, z nichž jen část je součástí v zadání, přičemž získání nebo upřesnění zbylých se předpokládá až v průběhu řešení. Dodat výsledek bude možné v každém případě, ale při omezených datech ne v ideální dosažitelné přesnosti.

Analýza rizik ohrožujících dosažení cíle zakázky

Identifikované riziko	Pravděpodobnost	Dopad	Úroveň rizika
Personální (fluktuace důležitých pracovníků)	Velmi nízká	Větší	4
Organizační (řízení a management)	Nízká	Malý	3
Finanční (ztráta platební schopnosti)	Velmi nízká	Velmi malý	1
Rychlost a kvalita dosažení výsledků	Střední	Větší	6

Příloha č. 2
Časový harmonogram

		2025				2026			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
ETAPA	ÚLOHA								
1	Přípravné práce, definice vstupů								
1	Vytvoření detailní geometrie UOS								
1	Model palivových proutků a palivového souboru								
1	Model VO s jednotlivými VP								
2	Výpočet maximální teploty na povrchu UOS s citlivostní analýzou								
3	Výpočet snížení teploty na povrchu VP na 40° C a citlivostní analýza								
	Zpracování závěrečné zprávy, zpracování připomínek								

Příloha č. 3
Rozsah činností tvořících Služby

1. Označení subjektů, osob a jejich rolí

Označení subjektu	Hlavní řešitel (osoba)	Řešený okruh prací, řízení Dílčí zakázky, odpovědnost
Technická univerzita v Liberci (TUL)	Xxx xxx xxxxx xxxx, xxxx	Manažer dílčí zakázky Zpracování metodiky, vyhodnocení
Technická univerzita v Liberci (TUL)	Xxx xxxx xxxxx xxxx	Vytvoření geometrie, výpočet modelu tepla uvnitř VP
Ústav geoniky AV ČR (ÚGN)	Xxx xxxxxxx xxxxxxx, xxxx	Koordinace týmu ÚGN Formulace modelu, vyhodnocení.
Ústav geoniky AV ČR (ÚGN)	Xxx xxxxxxx xxxxxxx	Výpočet modelu periodické buňky a 3D modelu HÚ, parametrické studie

2. Cena Dílčí zakázky

Druh prací	Časová náročnost v hodinách			Celkem cena (počet hodin*smluvní hodinová sazba) (tis. Kč)
	TUL	ÚGN	celkem	
1. Vysoce kvalifikované a koncepční, koordinační práce	20	40	60	Xxx
2. Velmi náročné a koncepční práce	200	400	600	Xxx
3. Náročné práce	400	800	1200	Xxxx
4. Méně náročné práce	300	500	800	Xxx
5. Pomocné práce	50	150	200	xxx
Celkem cena bez DPH (tis. Kč)				2964
Celkem cena s DPH (tis. Kč)				3586,44

3. Návrh technického řešení Dílčí zakázky

Východiska:

Tepelný výkon uvolňovaný ve vyhořelém jaderném palivu (VJP) je určován intenzitou radioaktivních rozpadů nestabilních izotopů, které se nacházejí v různých částech VJP – ve vlastním palivu, jeho pokrytí a konstrukčních materiálech. Množství těchto izotopů se v průběhu času mění v závislosti na různých parametrech VJP, které jsou stručně popsány níže. Princip vzniku zbytkového tepelného výkonu je obdobný jako u štěpení během provozu

jaderného reaktoru. Teplo vzniká v důsledku interakcí částic uvolněných při rozpadu s okolním prostředím.

Zbytkový tepelný výkon závislý na vyhoření paliva a hmotnosti paliva v palivovém souboru (PS). Hmotnost paliva v PS se liší podle typu paliva používaného v různých reaktorech (např. VVER-440 vs. VVER-1000, regulační soubory pro VVER-440) i mezi jednotlivými dodavateli paliva (např. Westinghouse vs. TVEL) a jejich vývojovými variantami, které se postupně zaváděly během životnosti elektráren. Výkon různě vyhořelých, avšak konstrukčně shodných palivových souborů, se může v závislosti na vyhoření výrazně lišit. Tato závislost je nejvýraznější v prvních letech po vyvezení vyhořelého jaderného paliva (VJP) z aktivní zóny (AZ) reaktoru. V pozdějších fázích, například při ukládání VJP v hlubinném úložišti (HÚ), dochází k poklesu této závislosti, přesto rozdíly v tepelném výkonu stále dosahují několika procent.

Cíle:

Cílem této dílčí zakázky je pokračování v rozvoji modelů šíření tepla v HÚ s přidáním složité vnitřní geometrie UOS pro různé typy VJP a detailnější analýza jednotlivých jevů, které ovlivňují šíření tepla s ohledem na problematiku koroze neboli úbytku materiálu na VO.

Tvorba modelu musí vycházet od přesného modelu jednotlivých palivových proutků a jejich uspořádání v palivovém souboru a následného přenosu tepelného výkonu vedením a sáláním na vnitřní povrch vnitřního pouzdra (VP). Další úroveň je přenos tepla skrze stěnu VP na jeho povrch. Zahrneme přenos tepla do oblasti vnitřního prostoru UOS tj. přenos sáláním a vedením mezi daným počtem VP (3 nebo 7) ve vnitřním prostoru VO. Na to navazuje přenos tepla skrze vnější obal (VO) na jeho povrch. Finálně bude následovat interakce s bentonitem a horninou.

Oproti podobným pracím v historii je naším cílem zpracovat analýzu shrnující data a výsledky z modelů samotných palivových souborů i modelů tepelného dimenzování úložiště, které dosud se dělaly izolovaně. Přitom z palivových modelů jsme schopni si převzít postupy a data, které byly použity, přiměřeně je zjednodušit nebo naopak doplnit a výsledné efektivní parametry navázat na modely dimenzování ve velkém měřítku, včetně zahrnutí nových poznatků z oblasti koroze UOS. Jde o propojení tří až čtyř úrovní prostorového měřítka (PS/VP, UOS, okolí vrtu, celé HÚ).

Postup řešení je do následujících Etap dle výzvy:

Etapa 1: Teplotní pole uvnitř UOS

1.1 Přípravné práce, definice vstupů

Studie vstupních parametrů na výpočet teplot uvnitř kontejnerů pro použité jaderné palivo při jejich uložení v geologických úložištích. Analýza materiálů a palivových pelet při různých podmínkách rozpadu tepelného výkonu. Budou stanoveny geometrie UOS a palivových souborů, tepelné vlastnosti materiálů a rozložení tepelného výkonu v čase a podél palivových souborů.

1.2 Vytvoření detailní geometrie UOS

Vytvoření geometrického modelu ukládacího obalového souboru (UOS) v COMSOL softwaru, zahrnující všechny relevantní dimenze a materiálové vlastnosti pro přesnější simulaci.

Struktura uvnitř kontejneru obsahuje řadu prvků: nerezovou vložku, části pro uchycení paliva a vlastní palivové soubory sestávající z několika stovek palivových prutů a mnoha plynem vyplněných mezer. Kvalita a přesnost modelu bude podmíněna adekvátními podklady ze strany SÚRAO – okótované výkresy. Přenos tepla bude probíhat vedením v pevných materiálech a plynu a tepelným zářením přes plynem vyplněné mezery.

- Společné řešení TUL a ÚGN.

1.3 Model palivových proutků a palivového souboru

Pro model přenosu tepla uvnitř vnitřního pouzdra (VP) pro VVER 440 i 1000 je třeba definovat tepelný přenos mezi palivovými proutky a mezi celým palivovým souborem a vlastním VP - přenos tepla sáláním a vedením přes upevňovací konstrukci. Vstupem bude jak celkový tepelný výkon, tak jeho rozložení v prostoru – rozdíly mezi jednotlivými proutky a rozložení podél jednoho proutku. Vytvoříme postup homogenizace, tj. zjednodušení složitého přenosu tepla uvnitř palivového souboru do formy anizotropní tepelné vodivosti v závislosti na teplotě (v důsledku sálání).

- Řešení TUL

1.4 Model VO s jednotlivými VP

Nejprve budeme počítat s homogenizovanými palivovými soubory, kdy efektivní vodivost bude vypočítána pomocí homogenizovaných modelů, což umožní snazší výpočty v komplexních geometriích. Neboli VP nejprve zadáme jako plný ocelový válec a zadali bychom jen průběh výkonu podél VP. Následně by byly zahrnuty podrobné výsledky z modelu v bodě 1.3 Další přenos je vedení a sálání na vnitřní část vnějšího obalu (VO) a postupně budeme zesložitovat geometrii, přidáváním prvků až se dostaneme na reálnou podobu UOS.

Takto bude vytvořen detailní model UOS, zahrnující vedení a sálání v jednotlivých částech. Zahrneme vliv přítomnosti plynu uvnitř VO a později i VP. Modelování teplotního pole bude řešeno pro obě varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3, přičemž si nahradíme teplotu na povrchu UOS referenční hodnotou, jako náhradu odvodu tepla přes bentonit a horninu.

- Řešení ÚGN

Etapa 2 – Výpočet maximální teploty na povrchu UOS s citlivostní analýzou

Jedná se dle zadání o aktualizaci výsledků dílčí zakázky „Ověření teplotních výpočtů pro HÚ VJP (Prováděcí smlouva č. SO2021-053-05)“, přičemž je původní model s rovnoměrným zdrojem tepla v UOS nahrazen přesnější reprezentací.

Vytvořený detailní model UOS z Etapy 1 se naváže na teplotní procesy v HÚ (zahrnující přítomnost bentonitu, masivu, technologických chodeb a ostatních UOS). Parametry materiálů budou převzaty z textu výzvy a uvedených referencí. Bude simulován efekt postupného poklesu tepelného výkonu. K tomuto účelu vytvoříme 3D model pro blízké okolí jednoho vrtu s periodickou okrajovou podmínkou. Složitá geometrie zahrnující i vnitřek UOS ale bude omezující na diskretizační síť, proto budou testovány varianty až na limity dostupného hardware a software – pokud bude potřeba provedeme zjednodušení geometrie tak, aby toto zjednodušení mělo co nejmenší vliv přesnost výsledků.

Zhodnotíme vliv vnitřního pouzdra na maximální teplotu na rozhraní vnějšího obalu UOS a bentonitu, jednak hodnotu teploty, jednak polohu místa maxima. Výpočet dle původního zadání zahrnuje citlivostní analýzu na rozestupy ukládacích vrtů a tepelnou vodivost horniny.

- Řešení ÚGN

Etapa 3 - Výpočet snížení teploty na povrchu vnitřního pouzdra UOS na 40° C

Výpočet doby snížení teploty povrchu VO na 40° C. Technicky necháme model počítat po velmi dlouhou dobu a budeme hledat a sledovat nejteplejší bod na povrchu VO v úložišti během každé iterace výpočtu pro obě varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3.

Součástí bude také testování vlivu geometrického úbytku materiálu na VO vlivem koroze a obecné zhodnocení nejistot souvisejících se změnami geometrie a parametrů vlivem koroze.

Na základě porovnání výsledků modelů a zhodnocení vlivů (nekonečné/skutečné úložiště, reprezentace chodeb, potřeba propojení modelů velkého a malého měřítka apod.) bude vybrána varianta, na níž bude proveden výpočet citlivosti.

Modely v COMSOL mohou být zadány pomocí parametricky definované geometrie, a tedy by mělo být možné relativně efektivně upravovat geometrii a diskretizační síť pro různé vzdálenosti úložných vrtů.

- Řešení ÚGN

Zpracování závěrečné zprávy, zpracování připomínek

Veškeré závěry studie budou sepsány do závěrečné zprávy ve formě dle výzvy.

- Společné řešení ÚGN a TUL

Metodika vývoje teplotních modelů

Bude vycházet z již zavedených postupů verifikovaných v různých projektech. Inverzním modelováním dílčích dostupné literatury bude možné zpřesnit parametry a validovat modely, pomocí nichž bude sestaven predikční model se všemi sdruženými ději (vedení tepla konvekci a sáláním) a proměnnými podmínkami v konfiguraci blízké reálnému HÚ. Použitý software bude primárně COMSOL Multiphysics, podle povahy dílčích úloh mohou být použity vlastní pomocné programy pro preprocessing a postprocessing a propojení mezi jednotlivými modely. Obě pracoviště budou během práce vzájemně sdílet soubory pro COMSOL tak, aby dílčí výsledky byly vzájemně kompatibilní.