

Problematika hlubinného úložiště jaderného odpadu

Dušan Kobyłka
Katedra jaderných reaktorů
FJFI – ČVUT v Praze
U3V, 2020



Náplň přednášky

- ◆ Proč potřebujeme hlubinné úložiště a co to vlastně je
- ◆ Požadavky na hlubinné úložiště principiální a legislativní
- ◆ Bariéry:
 - Inženýrské
 - Přírodní
- ◆ Varianty hlubinného úložiště
- ◆ Součásti hlubinného úložiště
- ◆ Situace v ČR a výběr lokality
- ◆ Doporučené zdroje, dotazy a diskuse

Radioaktivní odpady (RAO)



Původ vzniku odpadů:

- JE, institucionální, těžba, nakládání s RAO, ...
- Provozní, vyřazování
- Vyhořelé jaderné palivo
- Havárie



Skupenství odpadů

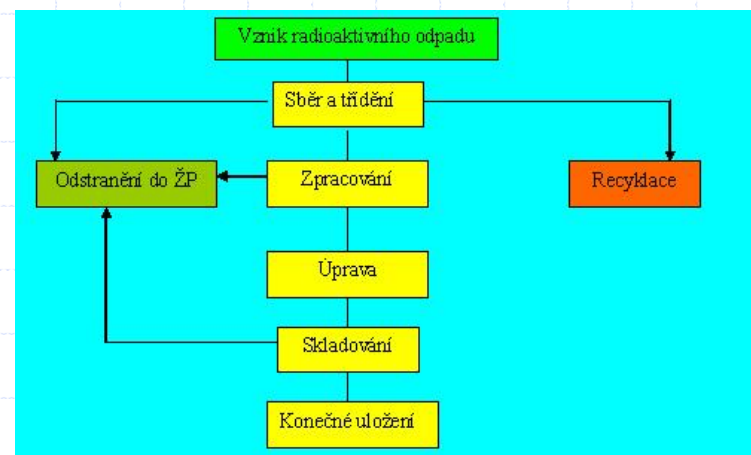


Aktivita odpadů (posuzování podle koncentrace vybraných RA nuklidů):

- Přechodně aktivní
- Velmi nízkoaktivní
- Nízkoaktivní
- Středněaktivní
- Vysokoaktivní



Životní cyklus RAO



Skladování x ukládání



Skladování: předem časově omezené umístění RAO do prostoru, objektu nebo zařízení s úmyslem jej znovu vyjmout



Ukládání: trvalé umístění RAO do prostor, objektu, nebo zařízení bez úmyslu jej vyjmout:

- RAO se nesmí ukládat s jiným odpadem a materiály
- Pouze pevný nebo zpevněný RAO splňující podmínky přijatelnosti
- Evidence uloženého RAO a označení OS ke snadné identifikaci
- Limity a podmínky pro nakládání s RAO před jeho uložením
- Atd.



Úložiště



Přípovrchové úložiště

- V blízkosti zemského povrchu
- Ukládání nízko nebo středněaktivního RAO

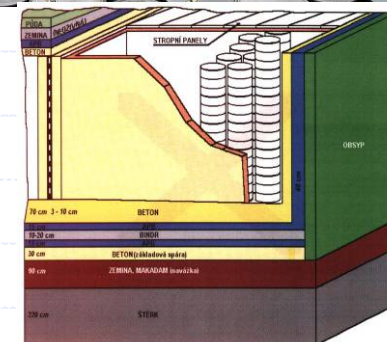


Podzemní úložiště

- Desítky metrů pod zemským povrchem
- Ukládání nízko nebo středněaktivního RAO



View of a Disposal Chamber in the Richard Repository



Obr. 1.4 Řez jámkou URAO Dukovany



Hlubinné úložiště

- Stovky metrů pod zemským povrchem
- Ukládání vysokoaktivního RAO



Vlastnosti VJP a VRAO



Vlastnosti VJP závisí na:

- Typu jaderného reaktoru
- Typu paliva (konstrukční provedení, obohacení, ...)
- Vyhoření
- Historii vyhořívání
- Době skladování po vytažení z aktivní zóny



Vlastnosti VRAO závisí na:

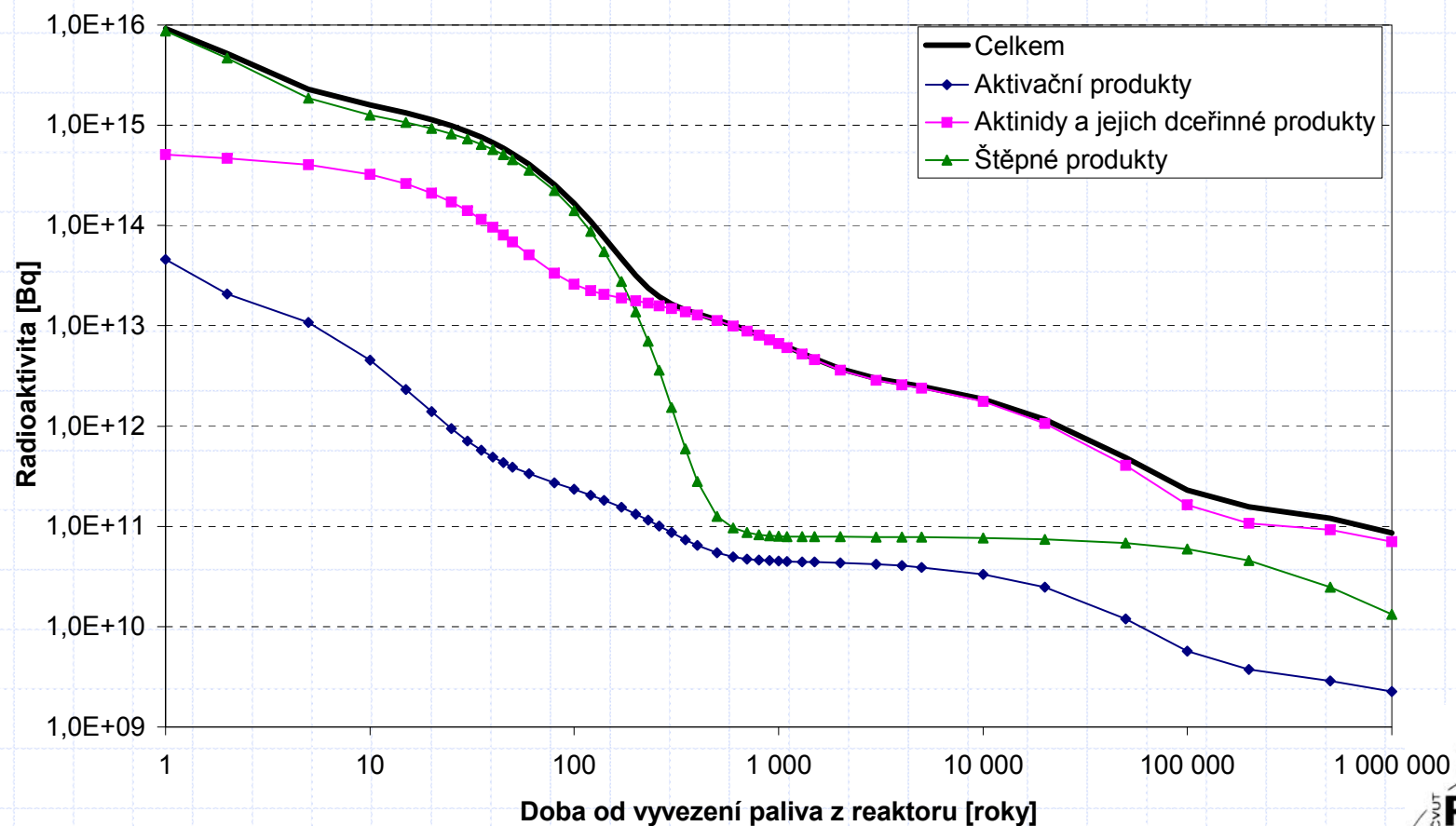
- Aktivaci
- Původním materiálu
- Znečištění
- **Zpracování**
- ...



Vlastnosti VJP



Referenční pal. soubor VVER-440



Vlastnosti VJP



Referenční pal. soubor
VVER-440

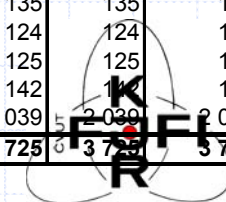


Vše v gramech

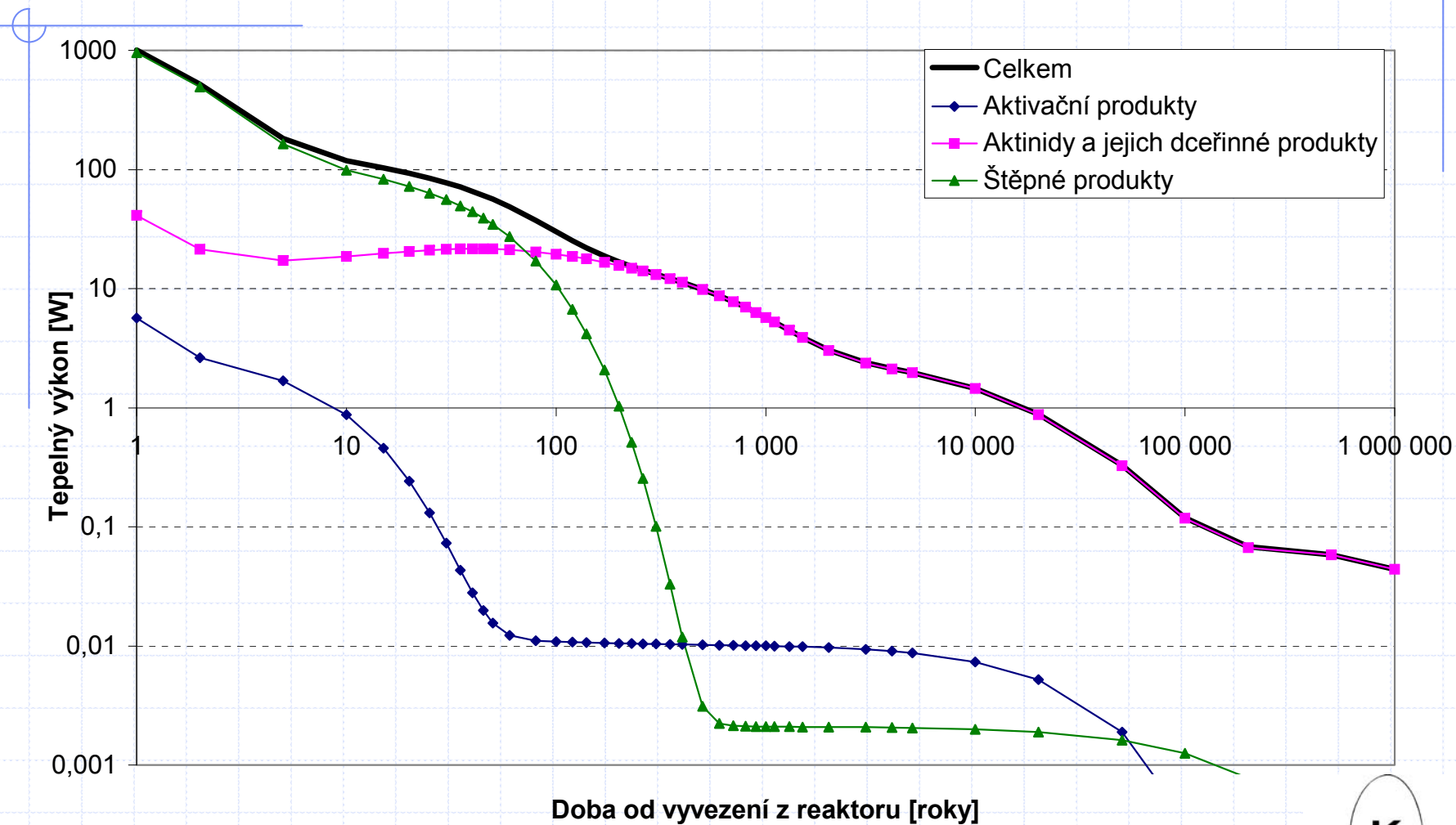
Skupina	Izotop	Počet let od vyvezení paliva z reaktoru			
		0	100	10 000	1 000 000
Aktivační produkty	O 16	16 730	16 730	16 730	16 730
	CR 52	3 548	3 548	3 548	3 548
	FE 56	16 150	16 150	16 150	16 150
	NI 58	1 517	1 517	1 517	1 517
	ZR 90	26 520	26 520	26 520	26 520
	ZR 91	5 816	5 816	5 816	5 816
	ZR 92	9 018	9 018	9 018	9 018
	ZR 94	9 360	9 360	9 360	9 360
	ZR 96	1 533	1 533	1 533	1 533
	Ostatní	4 598	4 598	4 598	4 598
	<i>Celkem</i>	94 790	94 790	94 790	94 790
Aktinidy a jejich dceřinné produkty	U238	113 600	113 600	113 600	113 600
	U235	1 339	1 340	1 487	1 935
	Ostatní	1 561	1 560	1 413	965
	<i>Celkem</i>	116 500	116 500	116 500	116 500
Štěpné produkty		<i>Celkem</i>	3 725	3 725	3 725
Celkem palivový soubor			215 015	215 015	215 015

Skupina	Izotop	Počet let od vyvezení paliva z reaktoru							
		0	10	50	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
Urany a transurany	U234	23	24	27	30	36	35	28	8
	U235	1 339	1 339	1 340	1 340	1 356	1 487	1 903	1 935
	U236	500	500	501	502	521	640	712	693
	U238	113 600	113 600	113 600	113 600	113 600	113 600	113 600	113 600
	NP237	48	50	56	65	157	184	179	133
	PU238	12	12	9	6	0	0	0	0
	PU239	593	602	601	600	586	455	34	0
	PU240	217	217	217	216	196	76	0	0
	PU241	129	80	12	1	0	0	0	0
	PU242	38	38	38	38	38	37	31	6
	AM241	4	53	115	116	28	0	0	0
	Ostatní	9	7	6	6	6	3	5	10
Dceřinné produkty rozpadu uranů a transuranů	HE 4	0	0	0	1	3	8	17	28
	PB206	0	0	0	0	0	0	3	38
	BI209	0	0	0	0	0	0	1	36
	TH232	0	0	0	0	0	0	2	20
	Ostatní	0	0	0	0	0	1	6	5
Celkem		116 500	116 500	116 500	116 500	116 500	116 500	116 500	116 500

Izotop	Počet let od vyvezení paliva z reaktoru							
	0	10	50	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
MO100	102	102	102	102	102	102	102	102
XE132	113	114	114	114	114	114	114	114
CS133	125	127	127	127	127	127	127	127
XE134	161	161	161	161	161	161	161	161
XE136	247	247	247	247	247	247	247	247
CS137	130	103	41	13	0	0	0	0
BA137	4	31	94	122	135	135	135	135
BA138	141	141	141	141	141	141	141	141
LA139	135	135	135	135	135	135	135	135
CE140	132	135	135	135	135	135	135	135
PR141	118	124	124	124	124	124	124	124
CE142	125	125	125	125	125	125	125	125
ND144	102	142	142	142	142	142	142	142
Ostatní	2 089	2 039	2 039	2 039	2 039	2 039	2 039	2 039
Celkem	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725



Vlastnosti VJP



Potřebujeme HÚ?

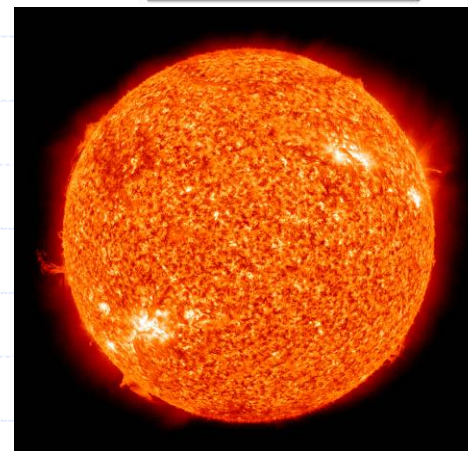
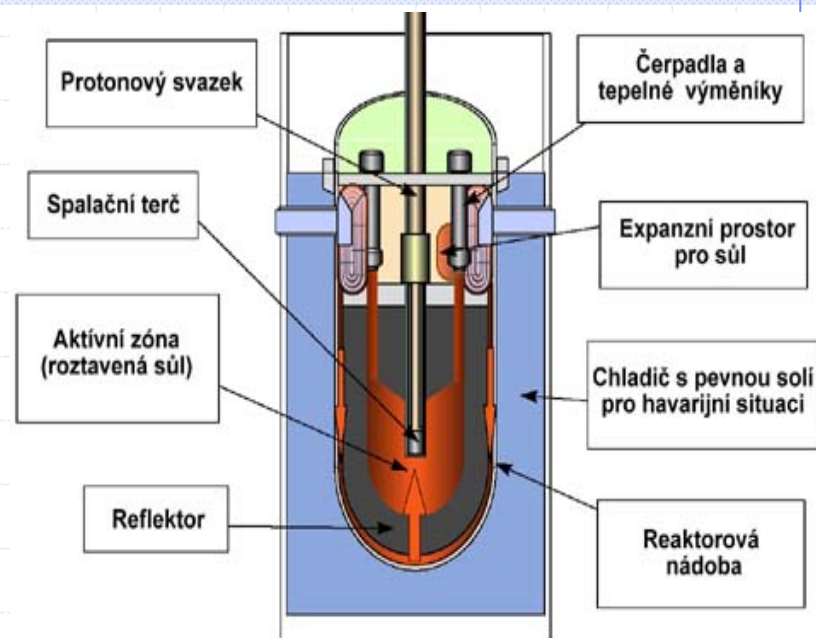


Alternativy:

- Přepracování VJP a VRAO
- Transmutace
- Expedice ze Země
- Protavení do Země
- ...

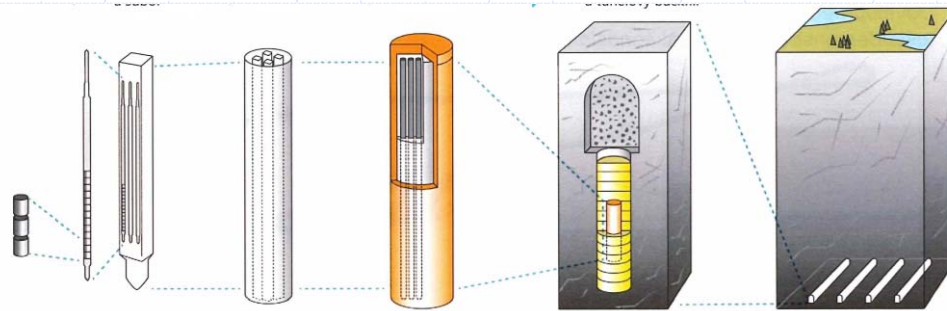


Za současného stavu poznání a technologií: ANO !!



Funkce HÚ a její zaručení

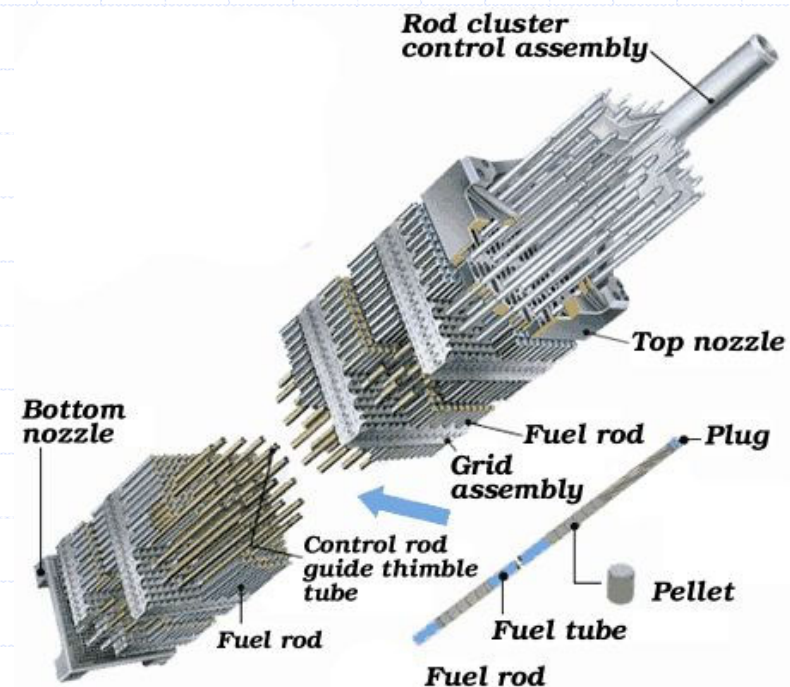
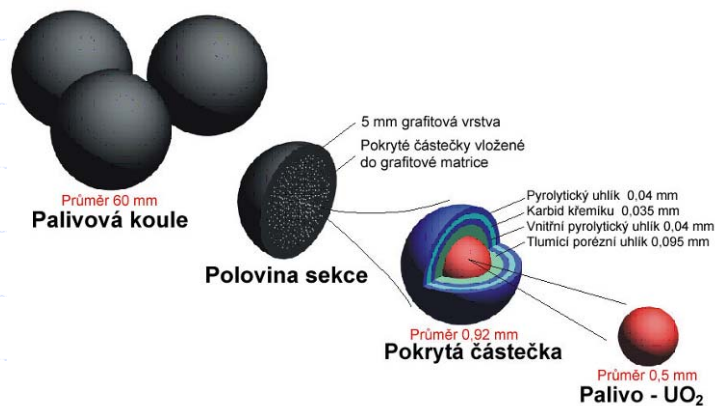
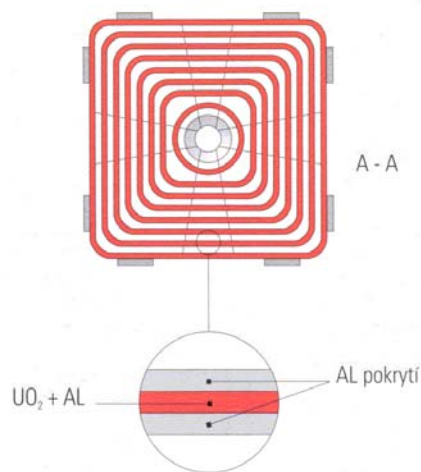
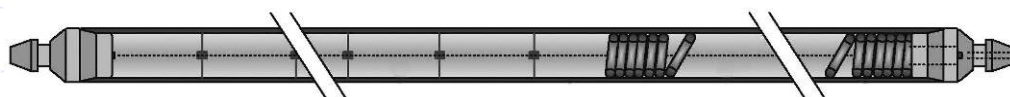
- ◆ Základní funkcí hlubinného úložiště je izolovat nebezpečné látky v něm uložené od životního prostředí po dostatečně dlouhou dobu
- ◆ Multibariérový přístup:
 - Inženýrské bariéry (obaly, kontejnery, stavby, ...)
 - Přírodní bariéry



- ◆ Legislativní požadavky dány zákony, v ČR např.:
 - Vyhlášky SÚJB (č.377/2016 Sb., č.378/2016 Sb., č.329/2017Sb., atd.)
 - Stavební zákony
 - Báňské zákony

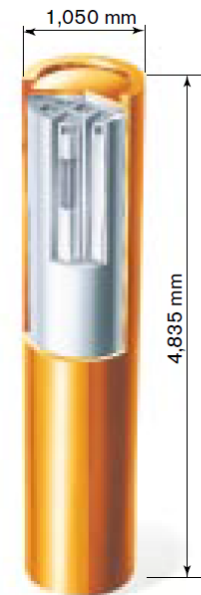
Inženýrské bariéry

Forma (matrice) odpadů



Inženýrské bariéry

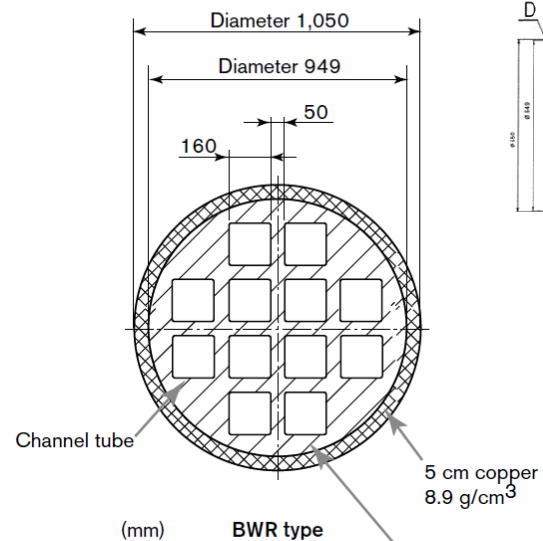
Ukládací obalový soubor (UOS)



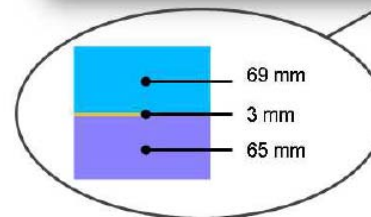
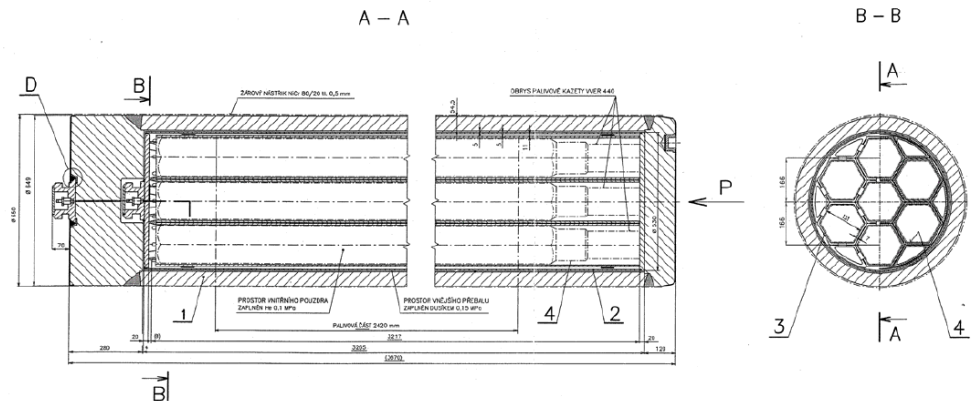
5 cm copper

Estimated weight (kg):

Copper canister	7,400
Insert	13,600
Fuel assemblies (BWR)	3,600
Total	24,600

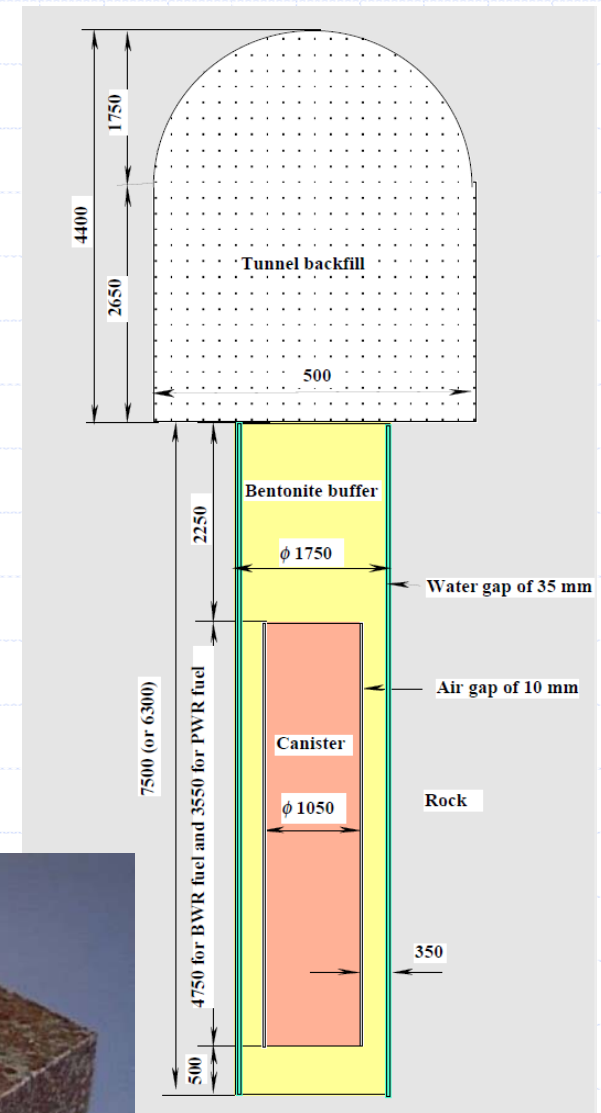


Nodular iron
7.2 g/cm³



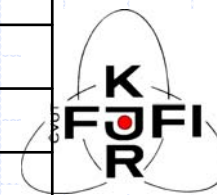
Inženýrské bariéry

◆ Tlumič (buffer), zásyp



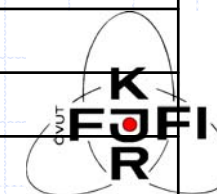
Horninový masiv (homogenní blok)

Belgie	Mol	plastický jíł
Kanada	Lac du Bonnet	žula
Finsko	Olkiluoto	žula
Francie	Fanay	žula
	Amelie	solné ložisko
	Tournemire	břidlice
Německo	Asse	solný dóm
	Gorleben	solný dóm
	Konrad	břidlice
Japonsko	Tono	pískovec
	Kanaishé	žula
Švédsko	Stripa	žula
	Aspoo	žula
Švýcarsko	Grimsel	žula
	Mont Terri	břidlice
USA	Nevada Test Site	žula
	Nevada Test Site	tuf
	Carlsbad	solné ložisko
	Yucca Mountains	tuf

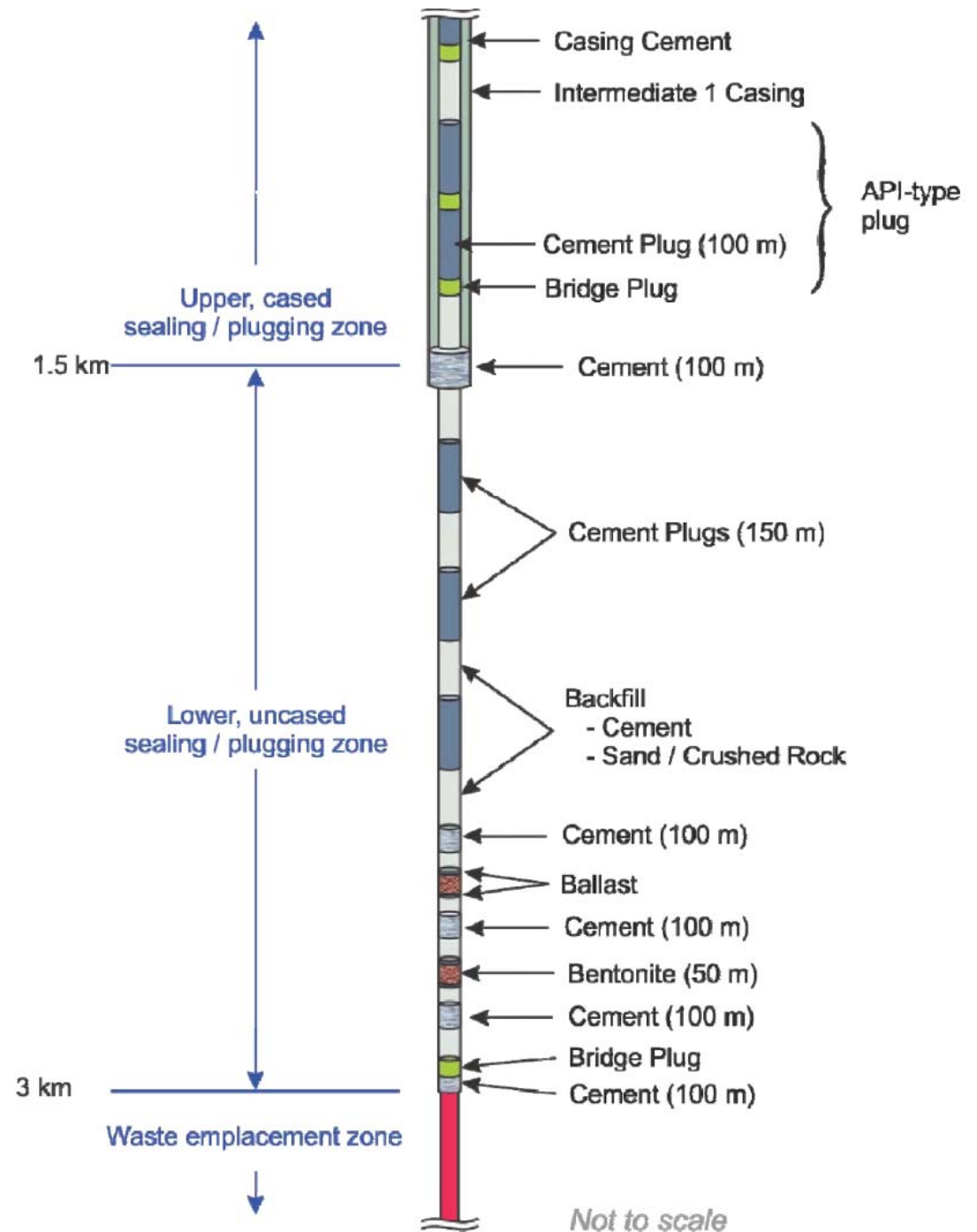


Horninový masiv (homogenní blok)

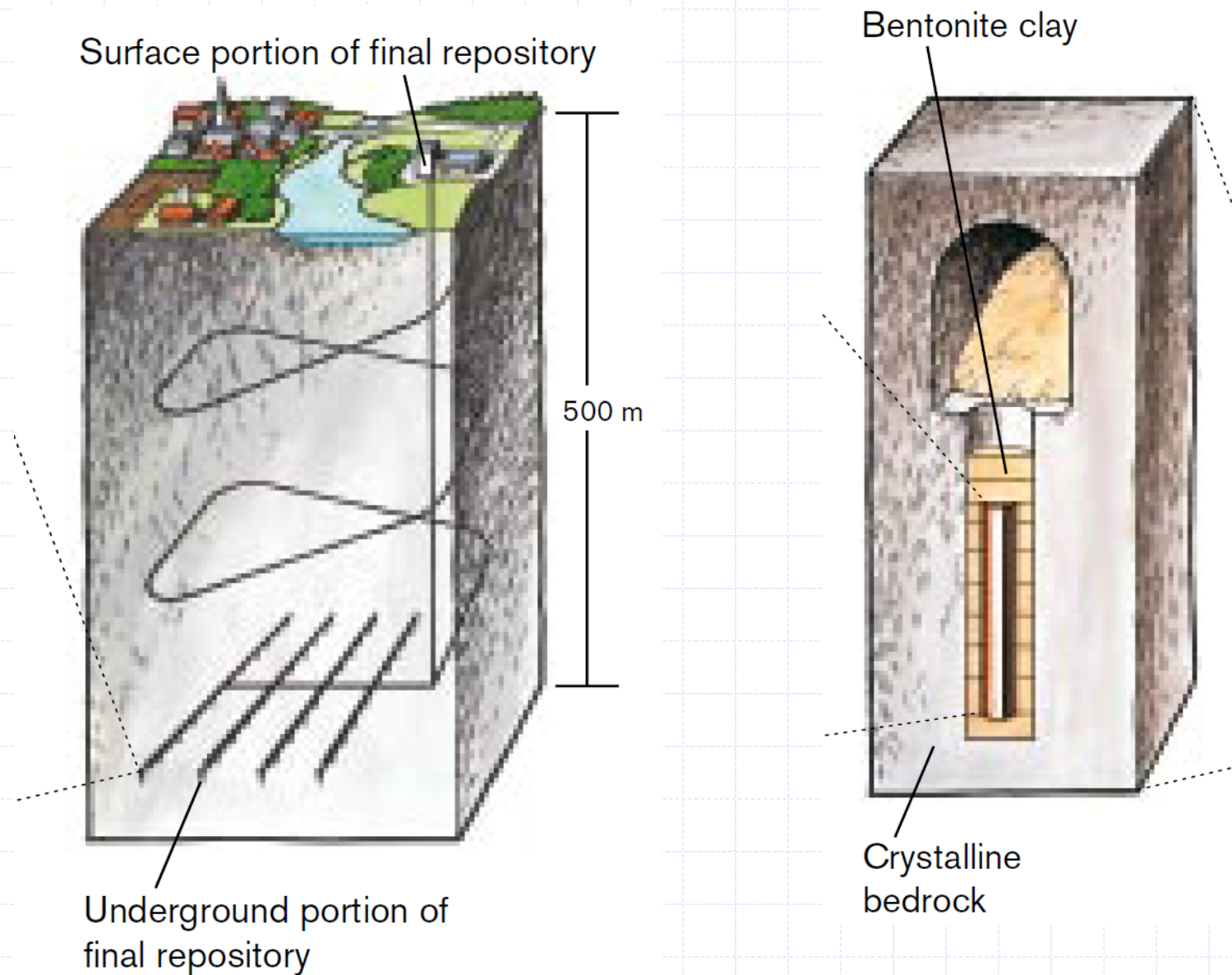
Parametr	Sůl	Žula
Tepelná vodivost	Vysoká	Střední
Permeabilita	Zanedbatelná	Velmi nízká (bez zlomů)
		Vysoká (se zlomy)
Pevnost	Střední	Vysoká
Deformační vlastnosti	Visko-plastické	Křehké
Stabilita chodeb/vrtu	Samo udržitelná konstrukce po dobu dekád	Vysoká (bez zlomů)
		Velmi nízká (se zlomy)
In situ stres	Izotropní	Anizotropní
Rozpustnost	Vysoká	Velmi nízká
Sorpční vlastnosti	Velmi nízké	Střední až vysoké
Chemické vlastnosti	Redukční	Redukční
Tepelná odolnost	Vysoká	Vysoká
Zkušenosti s vybudováním	Velké	Velké
Geologická stabilita	Vysoká	Vysoká
Inženýrské bariéry	Minimum	Potřebné
Legenda	Příznivé	Průměrné



Hlubinné vrty

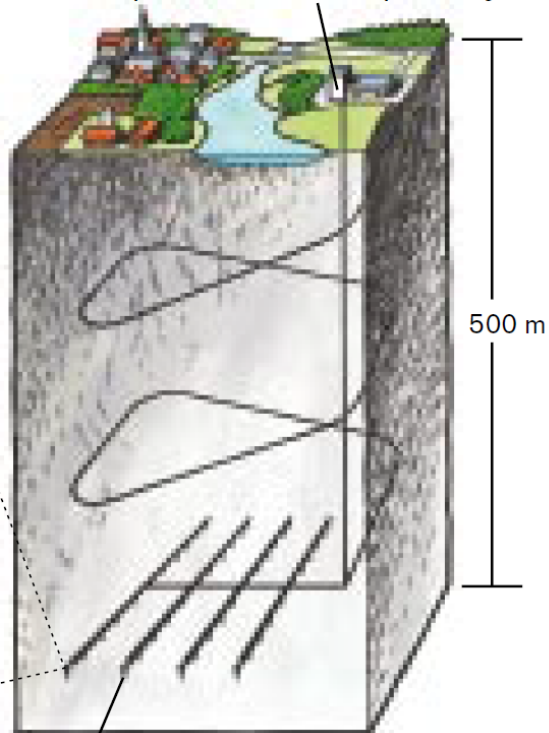


Vertikální ukládání

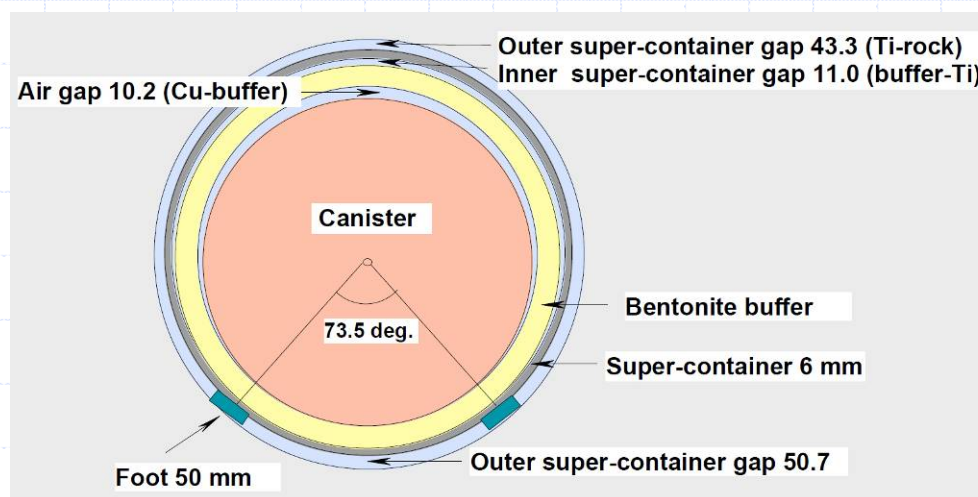
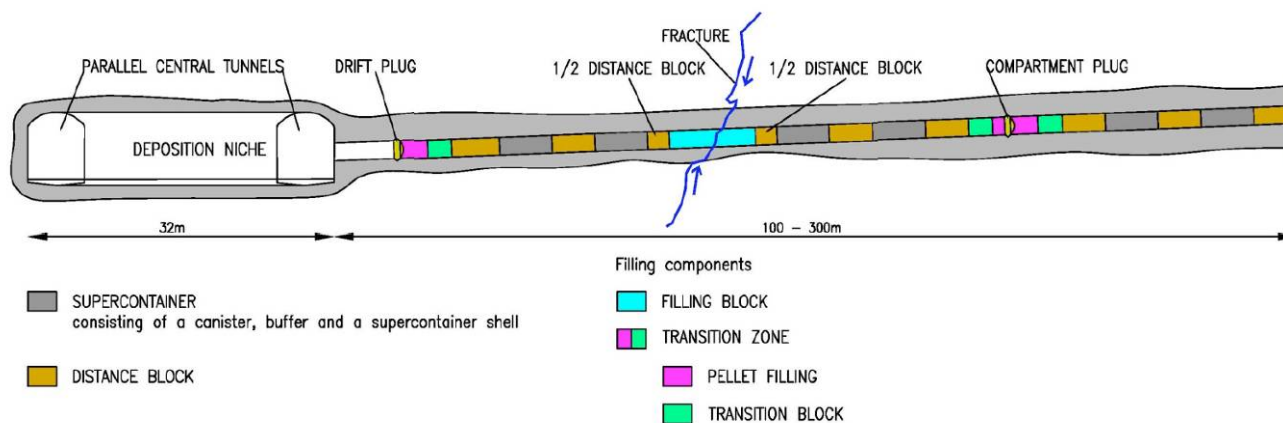


Horizontální ukládání

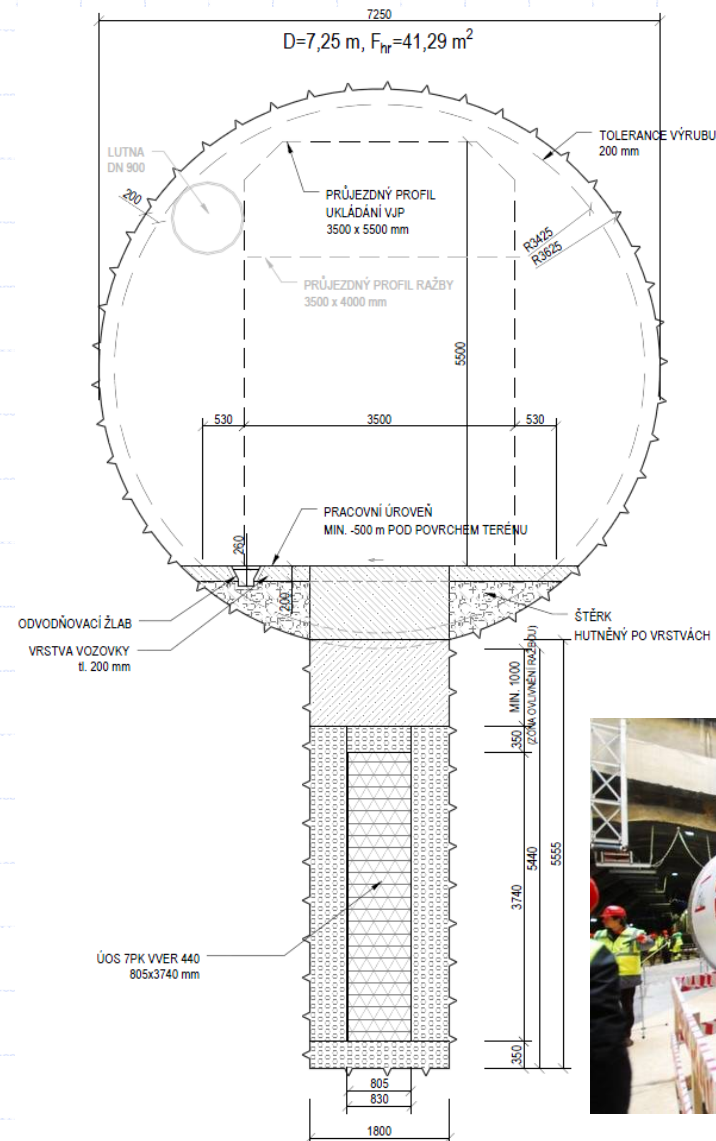
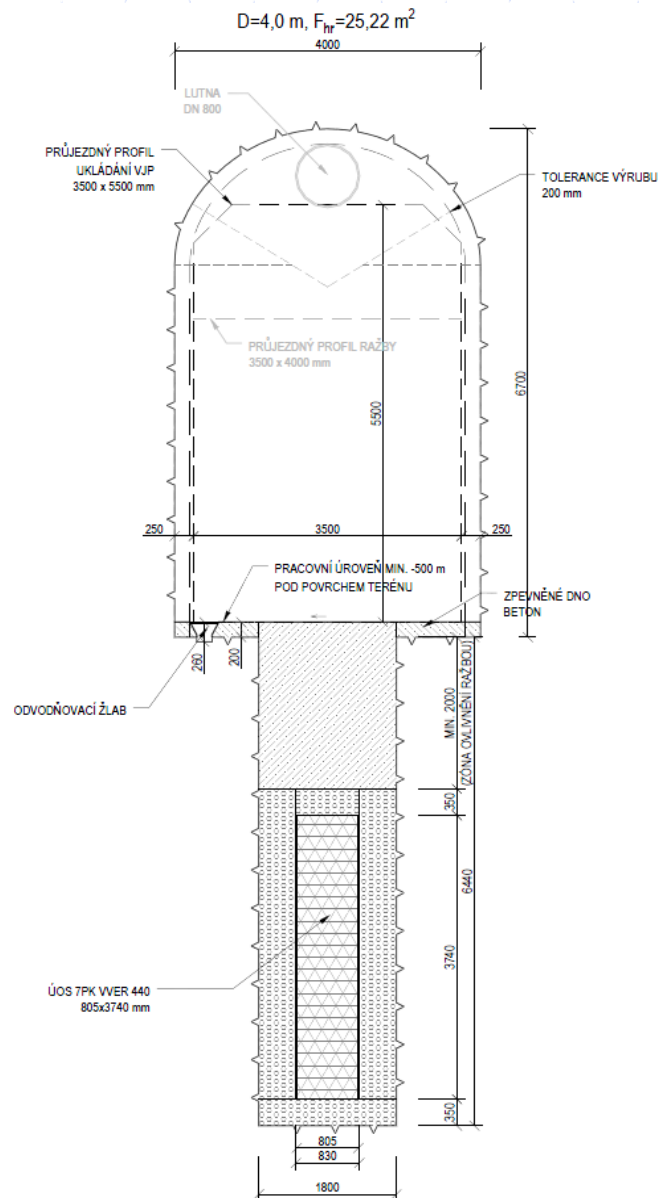
Surface portion of final repository



Underground portion of final repository



Typy ražby





Podzemní část HÚ

◆ Obsahuje:

- Ukládací prostory (chodby, vrty)
- Chodby (páteřní, spojovací, ...)
- Vtažnou jámu
- Těžební a zavážecí tunel
- Technické zázemí (čerpací stanice, sklady, šatny, ...)
- Konfirmační laboratoř

◆ Geologie:

- Tvar a velikost HB
- Zlomové struktury a puklinové systémy

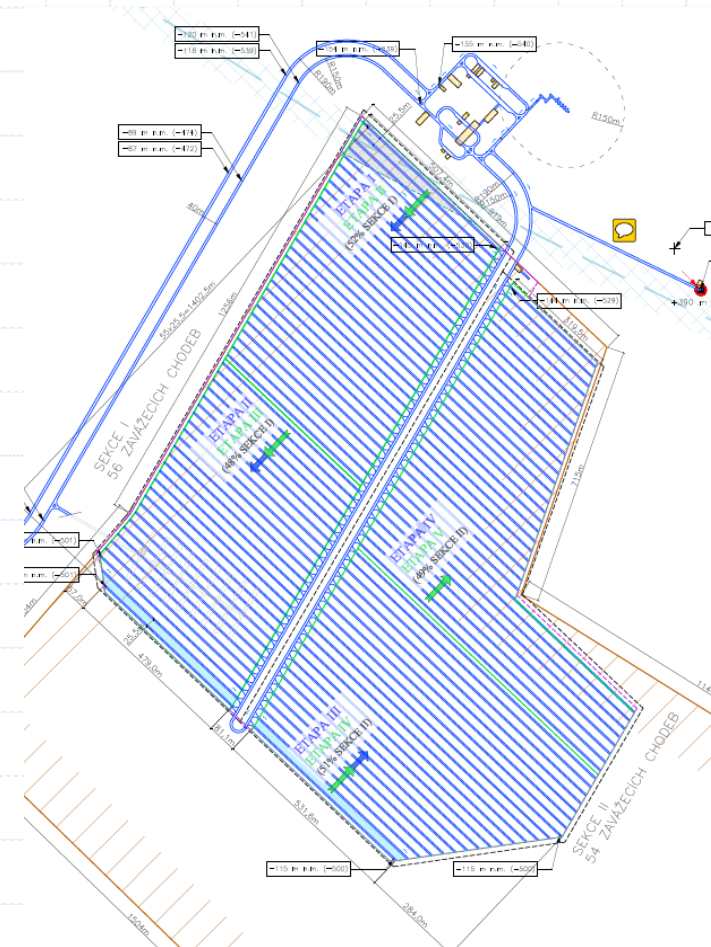
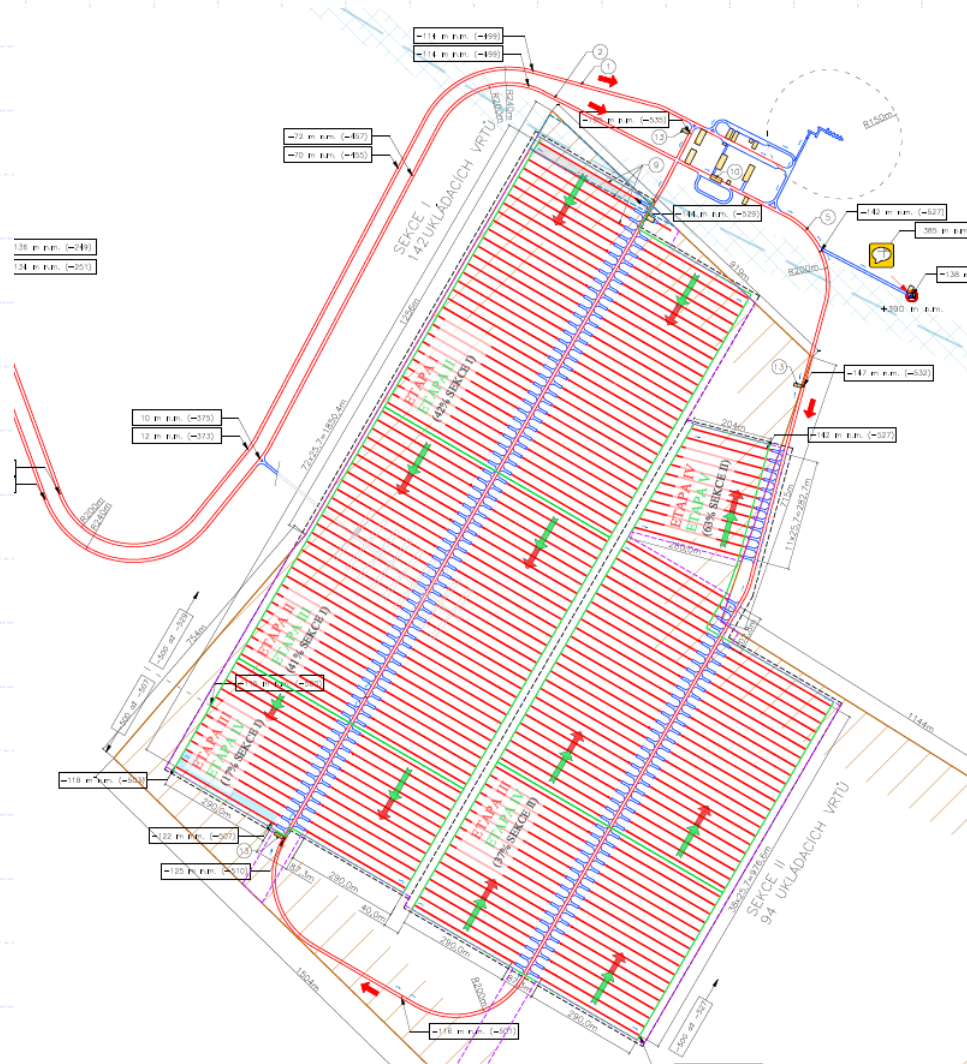
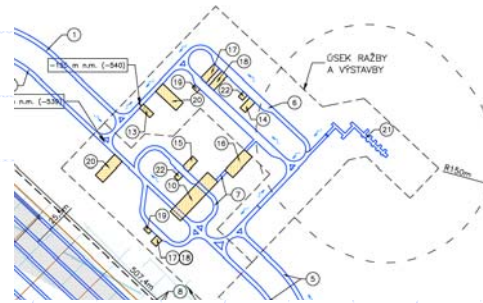
◆ Hydrogeologií, tj. prouděním vody v podzemí

◆ Teplotním výpočtem

◆ Typem ražby a ukládání, provozem HÚ

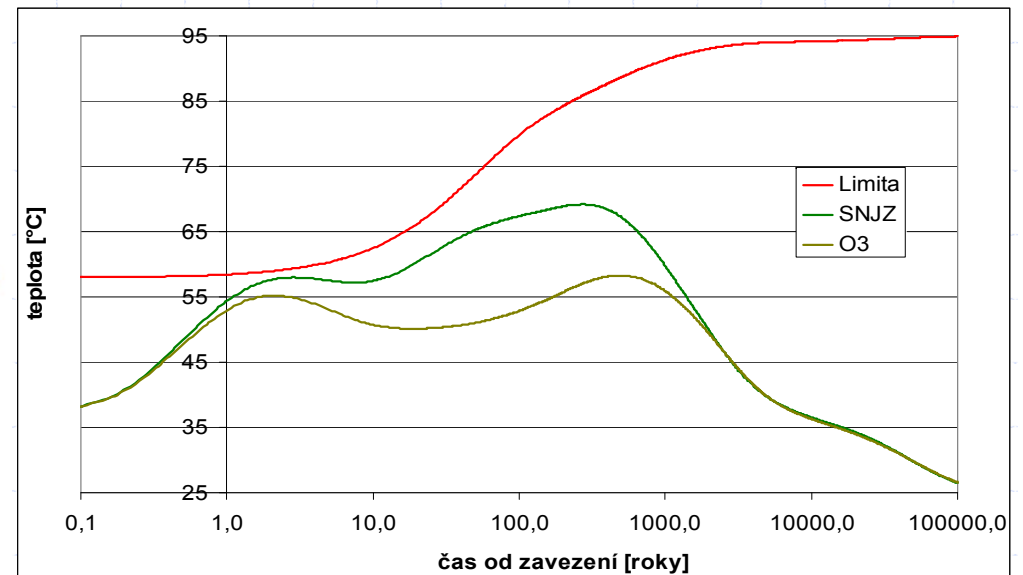
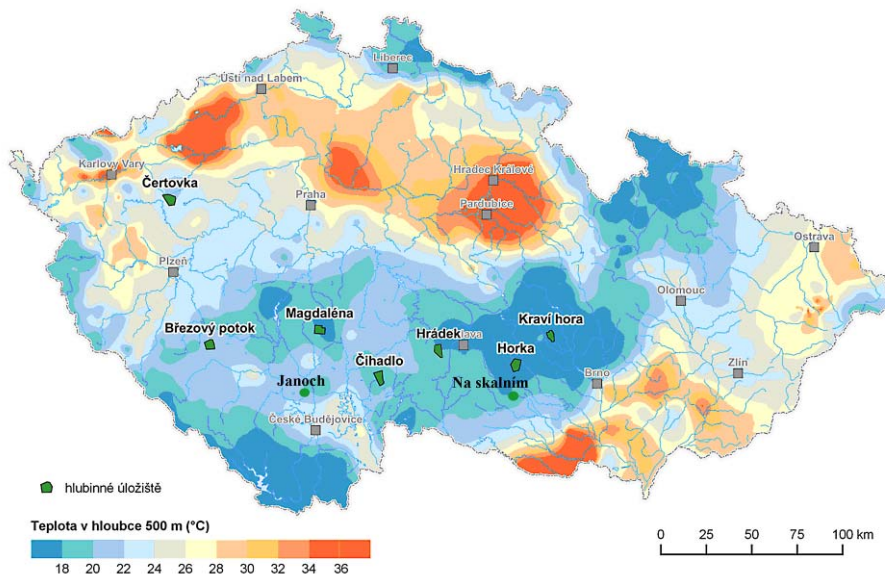


Podzemní část HÚ



Teplotní výpočet HÚ

- ◆ Optimalizace roztečí UOS, vlivy:
 - Výkon UOS
 - Geometrie a konstrukce UOS a inženýrských bariér
 - Počáteční teplota HB
 - Termofyzikální vlastnosti HB
- ◆ Dlouhodobý teplotní výpočet HÚ

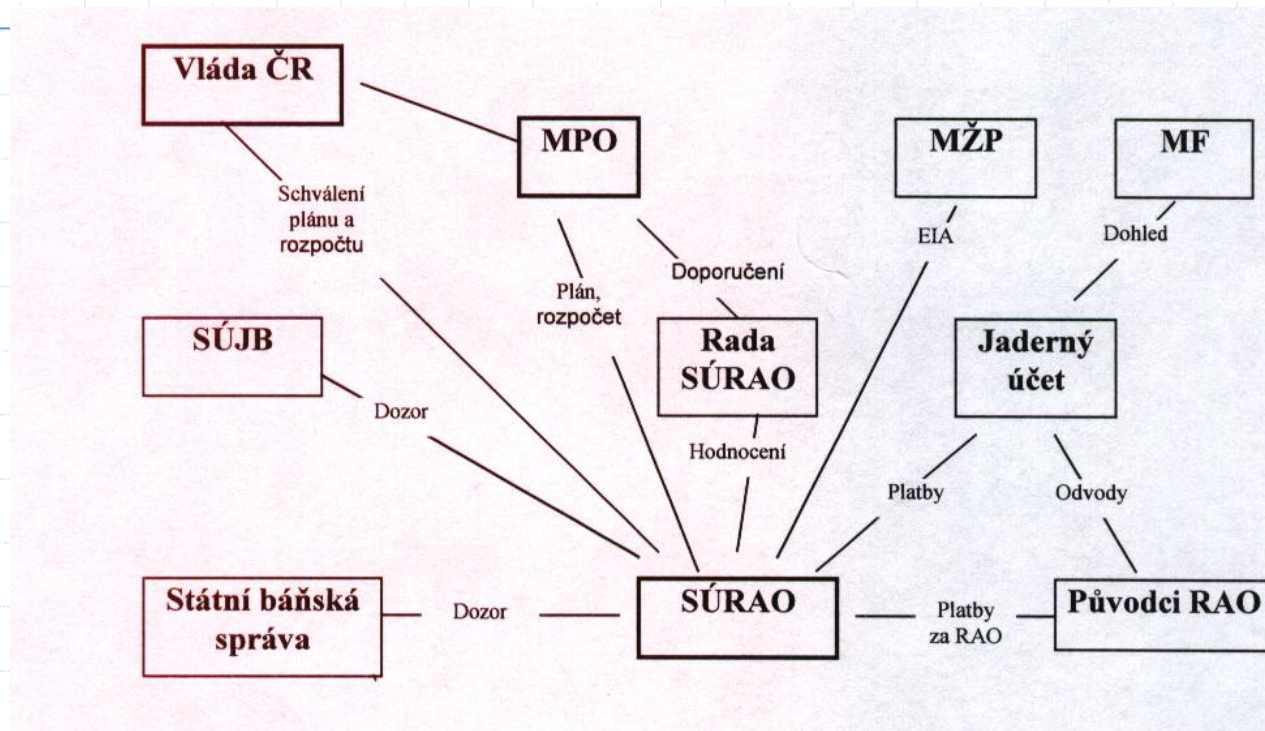


Nadzemní část HÚ

- ◆ Těžební objekty (šatna, lampovna, zásoba vody, ...)
- ◆ Objekty přípravy VJP a RAO (horká komora, ...)
- ◆ Napojení na infrastrukturu (silnice, vlečka, přívod el. energie)
- ◆ Přípravu bentonitu
- ◆ Sklady a dílny
- ◆ Média (kompresorovna, čistírna vody, zdroj tepla, ...)
- ◆ Zacházení s rubaninou (výsypky, deponie, ...)
- ◆ Požární ochrana
- ◆ ...



Administrativní situace v ČR



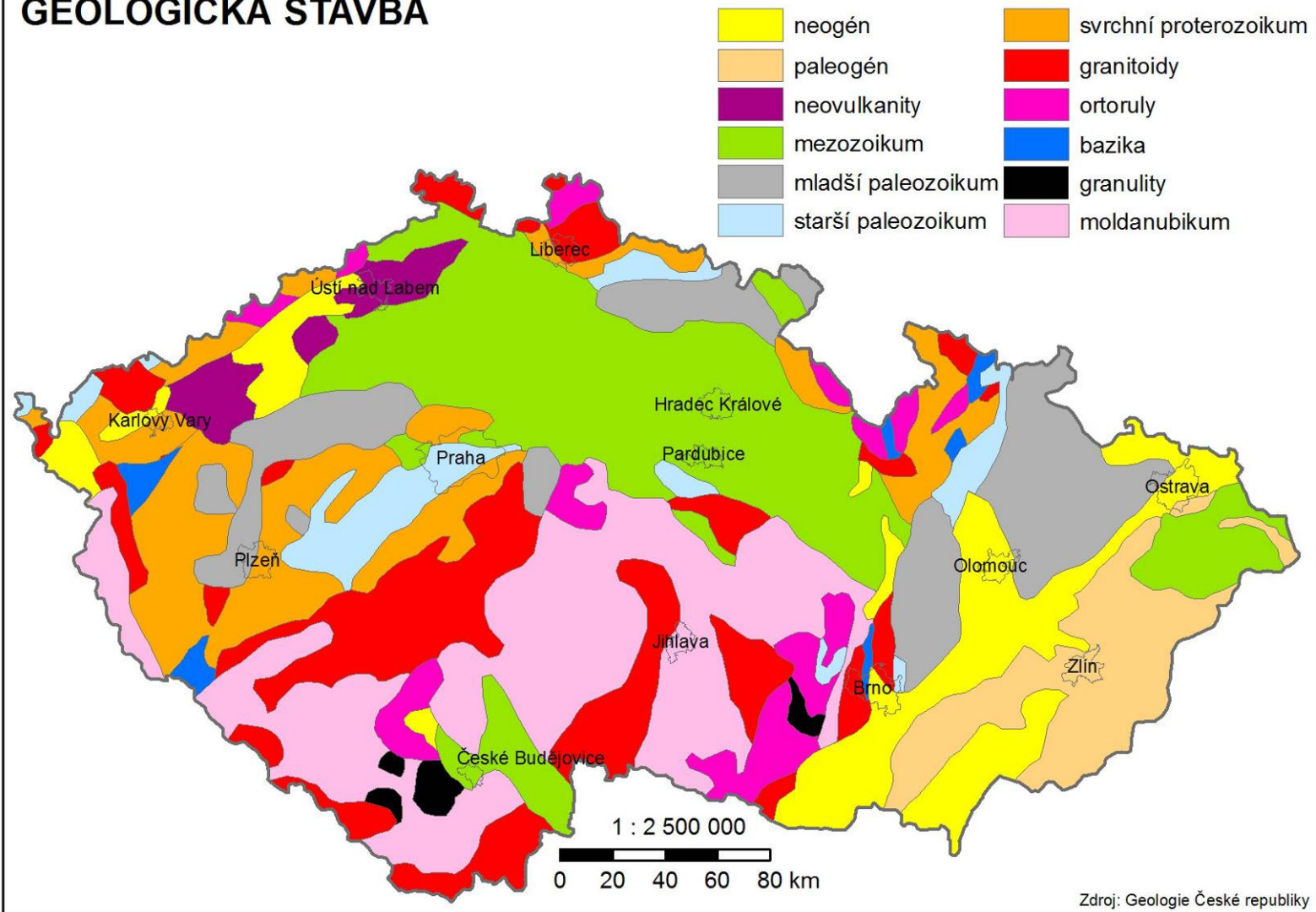
- ◆ **SÚRAO** - Organizační složka státu zřízená MPO pro zajišťování činností spojených s ukládáním RaO

Časový plán

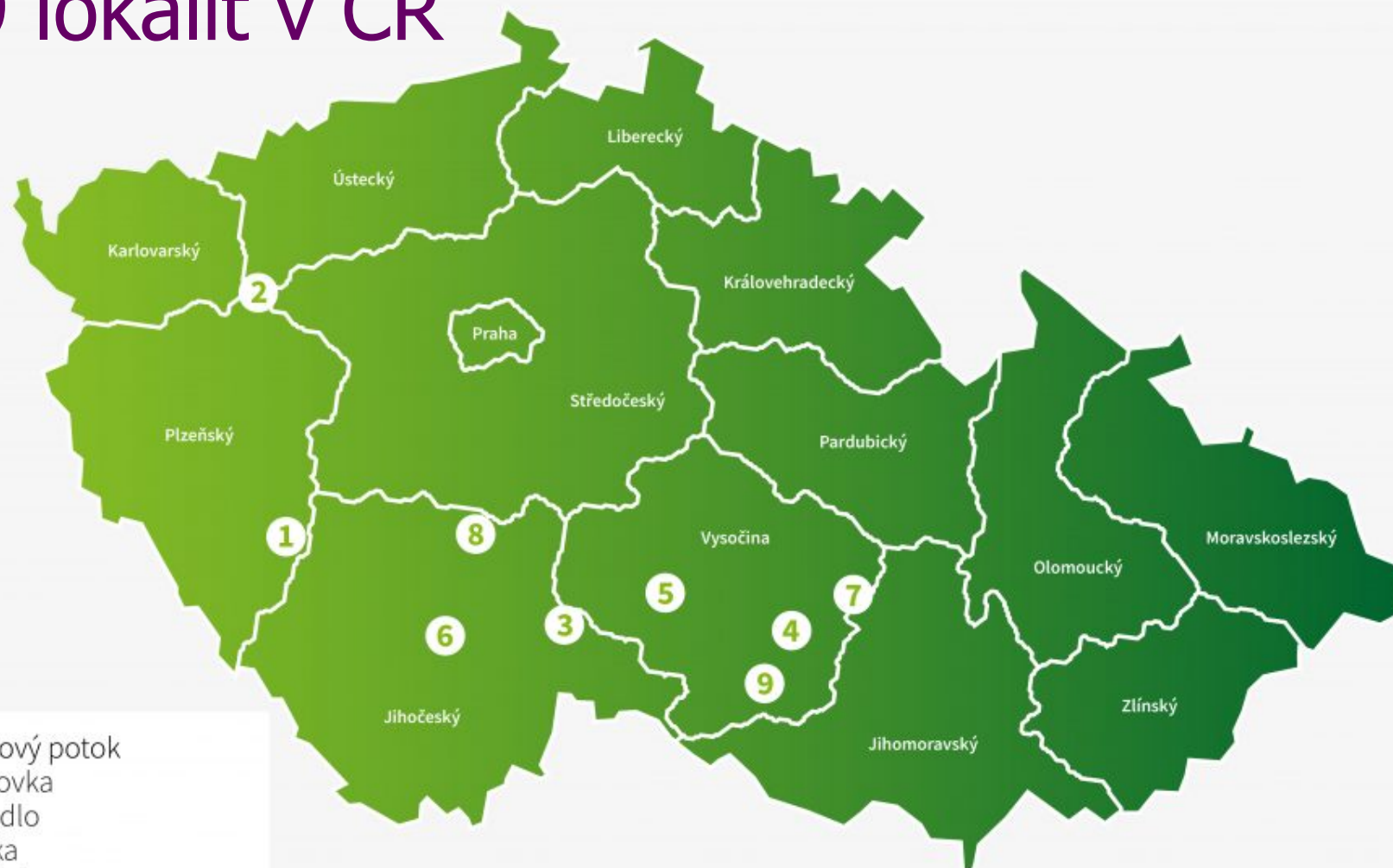
Provedení výzkumných studií k nalezení dalších potenciálně vhodných lokalit HÚ včetně revizí prací provedených do roku 2002	2016
Výběr dvou kandidátních lokalit na základě předběžné charakterizace lokalit se stanoviskem dotčených obcí	2022
Výběr finální lokality se stanoviskem dotčených obcí a podání žádosti o územní ochranu vybrané lokality	2025
Zahájení procesu EIA pro podzemní laboratoř ve finální lokalitě	2026
Podání žádosti o vydání územního rozhodnutí pro podzemní laboratoř ve finální lokalitě	2028
Zahájení procesu EIA pro HÚ	2035
Předložení dokumentace k územnímu řízení pro HÚ všem dotčeným orgánům včetně SÚJB (zadávací bezpečnostní zpráva)	2040
Předložení dokumentace ke stavebnímu řízení	2045
Výstavba hlubinného úložiště (s první ukládací sekcí) a další práce a příprava dokumentace pro zahájení provozu	2050–2064
Příprava dokumentace k povolení provozu HÚ, vydání rozhodnutí	2063–2065
Zahájení provozu hlubinného úložiště	2065

Podmínky v ČR

GEOLOGICKÁ STAVBA



9 lokalit v ČR



- 1 Březový potok
- 2 Čertovka
- 3 Čihadlo
- 4 Horka
- 5 Hrádek
- 6 Janoch (ETE-jih)
- 7 Kraví hora
- 8 Magdaléna
- 9 Na Skalním (EDU-západ)

Posuzovací kritéria

- ◆ Vylučující kritéria
- ◆ Velikost využitelného horninového masivu
 - Využitelnost homogenních bloků
 - Fragmentace podzemní části HÚ
 - Fragmentace území
- ◆ Dostupnost infrastruktury (množství a složitost střetů zájmů) - možnost trvalého uložení rubaniny v blízkém okolí
- ◆ Popsatelnost a predikovatelnost homogenních bloků
 - Stupeň křehkého porušení masivu - zlomové struktury
 - Stupeň křehkého porušení masivu - puklinové systémy
 - Stupeň duktilní deformace



Posuzovací kritéria

◆ Variabilita geologických vlastností

- Prostorová variabilita horninového prostředí
- Petrologická variabilita hornin

◆ Charakteristika proudění vody v okolí úložiště a transportní charakteristiky

- Rychlost proudění z prostoru HÚ k drenáži (roky)
- Rychlost proudění v úrovni úložiště ($\text{m} \cdot \text{rok}^{-1}$)
- Propustnost v prostoru HÚ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Sestupná vertikální složka proudění (% plochy HÚ)
- Maximální propustnost zón do 500 m od hranice HÚ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- specifický průtok v prostoru HÚ ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)
- Ředění radionuklidů (%)

Posuzovací kritéria

◆ Identifikace drenážních bází

- Počet drenážních povodí
- Dominantní recipient
- Dominantní drenážní povodí
- Horizontální vzdálenost HÚ od drenáže (m)

◆ Seismická a geodynamická stabilita

- Hodnota maximálního horizontálního zrychlení vyšší než 1,5 m.s-2: získaná z pravděpodobnostní metody pro 50 % pravděpodobnost a dobou opakování 105 let
- Výškový gradient
- Procentuální podíl plochy reliéfu postiženého a přetvořeného mladými cykly zpětné eroze a svahovými deformacemi

Posuzovací kritéria

- ◆ Charakteristiky, které by mohly vést k narušení úložiště budoucími aktivitami člověka - Ložiskové poměry na lokalitě a poddolování
- ◆ Jevy ovlivňující šíření radioaktivní látky
 - Rozložení a hustota osídlení a jeho vývoj z hlediska šíření radioaktivní látky
 - Vzdálenost od jaderných elektráren
- ◆ Vliv na povrchové vody a vodní zdroje
 - Vliv na odtokové poměry a kvalitu povrchových vod
 - Ovlivnění vodních zdrojů v blízkosti HÚ
 - Ovlivnění významných vodních zdrojů v širším území



Posuzovací kritéria

- ◆ Vlivy na ochranu přírody a krajiny
 - Vlivy na biodiverzitu
 - Vlivy na migrační koridory a migračně významná území
 - Vlivy na PO a EVL Natura 2000
 - Vlivy na krajinu
- ◆ Vlivy na ZPF a PUPFL
 - Vlivy na ZPF (zemědělský půdní fond)
 - Vlivy na PUPFL (pozemky určené k plnění funkcí lesa)
- ◆ Vlivy na obyvatelstvo, hmotný majetek a ochranu památek
 - Narušení faktorů pohody
 - Vlivy na obytné, rekreační nebo památkově chráněné objekty (výkup, demolice, změna využití)

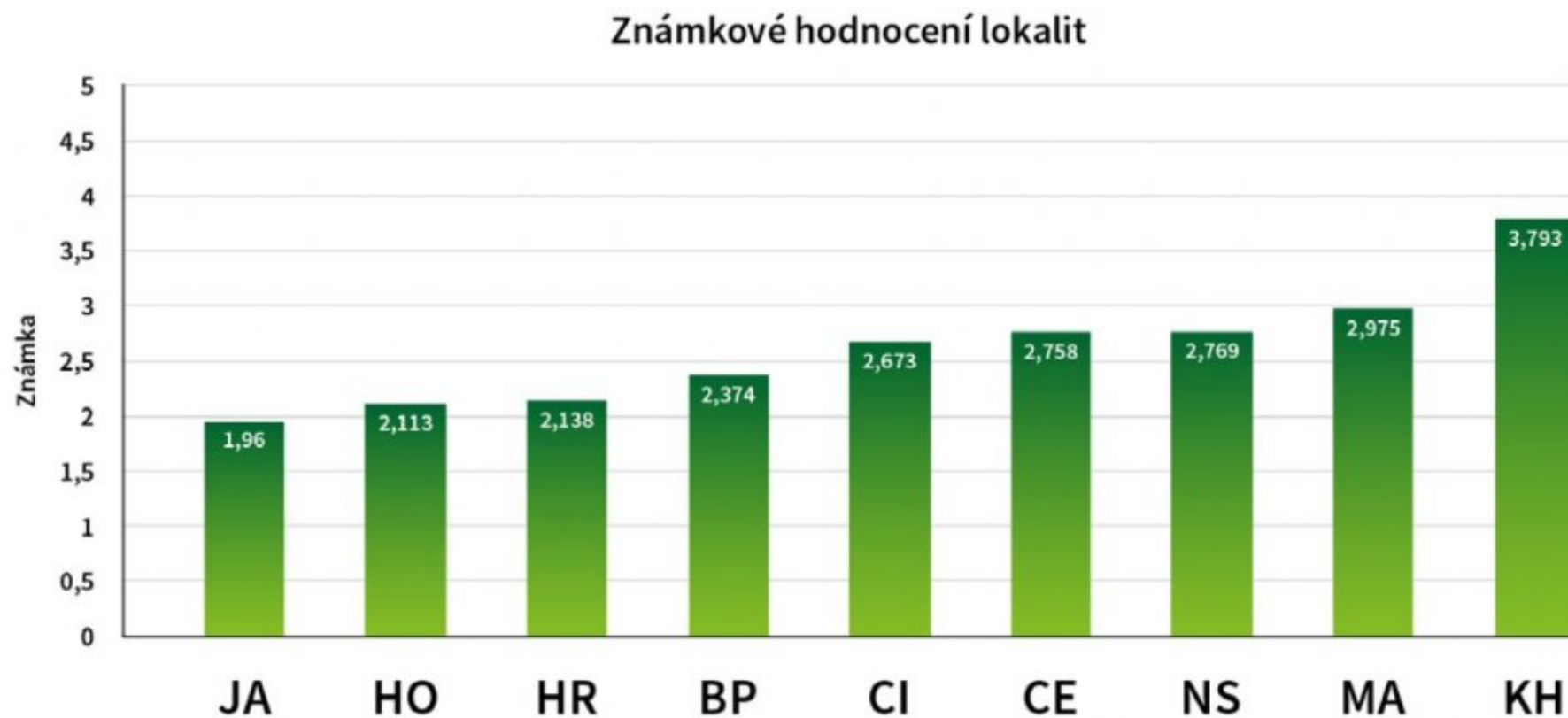
Zůžení počtu lokalit



- 1 Březový potok
- 2 Čertovka
- 3 Čihadlo
- 4 Horka
- 5 Hrádek
- 6 Janoch (ETE-jih)
- 7 Kraví hora
- 8 Magdaléna
- 9 Na Skalním (EDU-západ)

- doporučená lokalita
- záložní lokalita

Zůžení počtu lokalit



Další kroky

- ◆ Geologický průzkum na doporučených lokalitách
- ◆ Určení varianty ukládání
- ◆ Vývoj inženýrských bariér:
 - Bentonit
 - UOS
- ◆ Práce s veřejností
- ◆ Zúžení počtu lokalit na jednu preferenční a jednu záložní
- ◆ Výstavba HÚ:
 - Konfirmační laboratoř
 - Vlastní HÚ



Doporučené zdroje ke studiu

- ◆ Dlouhý Z.: Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem, VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM, IBSN 978-80-214-3629-9, 2009
- ◆ SÚRAO, <https://www.surao.cz/>
- ◆ MPO: Koncepce nakládání s RAO a VJP v ČR, 2017
- ◆ POSIVA OY, <http://www.posiva.fi/en>
- ◆ SKB – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, <https://www.skb.com/>
- ◆ IAEA

