

Zhodnocení konstrukčních prvků z hlediska vzájemných interakcí s materiály na bázi bentonitu v úrovni ukládacího horizontu

Autoři: Petr Večerník a kol.

Praha, 2022

Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.

NÁZEV ZPRÁVY: Zhodnocení konstrukčních prvků z hlediska vzájemných interakcí s materiály na bázi bentonitu v úrovni ukládacího horizontu

NÁZEV PROJEKTU: Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU: Závěrečná zpráva DÚ04

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2020-092

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Večerník P.¹, Svoboda J.², Stiblíková P.³, Pospíšková I.⁴, Špinka O.⁵, Dobrev D.¹, Havlová V.¹, Zuna M.¹, Vašíček, R.², Černá K.³, Hlaváčková V.³, Vozár M.⁴, Butovič A.⁵

ÚJV Řež, a. s.¹; České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební²; Technická univerzita Liberec³; AFRY CZ s.r.o.⁴; SATRA, spol. s r. o.⁵

(Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše)

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS: Večerník P., Svoboda J., Stiblíková P., Pospíšková I., Špinka O., Dobrev D., Havlová V., Zuna M., Vašíček, R., Černá K., Hlaváčková V., Vozár M., Butovič A. (2022): Zhodnocení konstrukčních prvků z hlediska vzájemných interakcí s materiály na bázi bentonitu v úrovni ukládacího horizontu – TZ 616/2022, SÚRAO, Praha

Lucie Hausmannová

Manažer projektu (SÚRAO)

Datum

Jiří Svoboda

Manažer projektu (ČVUT)

Datum

Obsah

1	Přehled konstrukčních prvků a materiálů	10
1.1	Popis konstrukčních prvků	11
1.2	Charakteristiky vybraných konstrukčních prvků	12
1.3	Životnost konstrukčních prvků	13
2	Přehled vlivů na konstrukční prvky	14
2.1	Vlivy v počátečním stavu	14
2.2	Vlivy z hlediska dlouhodobé bezpečnosti	15
3	Vhodnost konstrukčních prvků	17
3.1	Beton	18
3.2	Výztuž	19
3.3	Jehly	19
3.4	Svorníky	20
3.5	Mikropiloty	20
3.6	Injektáž	20
3.7	Drenáž	21
3.8	Bentonit	21
4	Popis interakcí ovlivňujících konstrukční prvky a materiály v počátečním stavu	23
4.1	Ovlivnění bentonitu	23
4.1.1	Ovlivnění bentonitu běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem	23
4.1.2	Ovlivnění bentonitu horninovým prostředím a podzemní vodou	25
4.2	Ovlivnění běžného betonu, cementových materiálů a low-pH betonu	27
4.2.1	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu bentonitem	28
4.2.2	Vzájemné ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu	30
4.2.3	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu horninovým prostředím a podzemní vodou	30
4.3	Ovlivnění ocelových prvků	32
4.3.1	Ovlivnění oceli bentonitem	32
4.3.2	Ovlivnění oceli běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem	33
4.3.3	Ovlivnění oceli horninovým prostředím a podzemní vodou	33
4.4	Ovlivnění organických materiálů	34
4.4.1	Ovlivnění organických materiálů bentonitem	34

4.4.2	Ovlivnění organických materiálů běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem.....	35
4.4.3	Ovlivnění organických materiálů horninovým prostředím a podzemní vodou...	35
5	Popis interakcí ovlivňujících konstrukční prvky a materiály z hlediska dlouhodobé bezpečnosti	37
5.1	Souhrnné vlivy zvýšené teploty	38
5.2	Ovlivnění bentonitu	39
5.2.1	Ovlivnění bentonitu běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem	39
5.2.2	Ovlivnění bentonitu ocelí	40
5.2.3	Ovlivnění bentonitu organickými materiály	41
5.2.4	Ovlivnění bentonitu horninovým prostředím a podzemní vodou	42
5.3	Ovlivnění běžného betonu, cementových materiálů a low-pH betonu.....	43
5.3.1	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu bentonitem	43
5.3.2	Vzájemné ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu	47
5.3.3	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu ocelí	47
5.3.4	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu organickými materiály	48
5.3.5	Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu horninovým prostředím a podzemní vodou	49
5.4	Ovlivnění ocelových prvků.....	50
5.4.1	Ovlivnění oceli bentonitem	50
5.4.2	Ovlivnění oceli běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem	51
5.4.3	Ovlivnění oceli organickými materiály.....	53
5.4.4	Ovlivnění oceli horninovým prostředím a podzemní vodou.....	53
5.5	Ovlivnění organických materiálů.....	54
5.5.1	Ovlivnění organických materiálů bentonitem	54
5.5.2	Ovlivnění organických materiálů běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem.....	55
5.5.3	Ovlivnění organických materiálů ocelí	56
5.5.4	Ovlivnění organických materiálů horninovým prostředím a podzemní vodou...	56
6	Zhodnocení.....	57
6.1	Počáteční stav a provozní bezpečnost	57
6.2	Dlouhodobá bezpečnost.....	58
7	Závěr	61

Seznam příloh

Příloha 1: Charakteristiky vybraných konstrukčních prvků

Seznam použitých zkratk

DGR	Deep Geological Repository (hlubinné úložiště)
DÚ	dílčí úkol
EdZ	zóna narušení v důsledku ražby (Excavation Disturbed Zone)
EDZ	zóna poškození v důsledku ražby (Excavation Damaged Zone)
HÚ	hlubinné úložiště
IB	inženýrská bariéra
IBO	Injektion-BOhr
IOB	železo-oxidující bakterie
IRB	železo-redukující bakterie
JE	jaderná elektrárna
LPC	beton se sníženým pH výluhu (Low-pH Concrete)
MIC	mikrobiálně indukovaná koroze (Microbially Induced Corrosion)
NRTM	nová rakouská tunelovací metoda
OPC	portlandský cement (Ordinary Portland Cement)
PP	polypropylen
RAO	radioaktivní odpad(y)
SOB	síran-oxidující bakterie
SRB	síran-redukující bakterie
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
TBM	plnoprofilové razicí stroje (Tunnel Boring Machines)
UOS	ukládací obalový soubor
VJP	vyhořelé jaderné palivo

Vysvětlení pojmů

Bezpečnostní funkce

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

Hlubinné úložiště

Jaderné zařízení sloužící k trvalému uložení radioaktivních odpadů zahrnující jak podzemní, tak i povrchový areál, vč. podpůrných zařízení a objektů mimo samotnou střeženou část povrchového areálu.

Konstrukční prvek

Konstrukční prvek je základní část stavební konstrukce, která se liší podle materiálu, účelu a technologie provádění a je v celém svém povrchu pevně spojena se stavební konstrukcí nebo hostitelským prostředím.

Potenciálně využitelný horninový blok

Horninový blok na ukládacím horizontu prostorově vymezený průzkumnou činností, u kterého je předpoklad, že svými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi je vhodný pro uložení UOS.

Ukládací horizont

Horizont, ve kterém jsou umístěny sekce pro ukládání VJP, technické zázemí úseku ražby a výstavby a úseku přípravy a ukládání VJP a konfirmační laboratoř. Zatímco sekce pro ukládání VJP jsou projektovány v potenciálně využitelných horninových blocích, tak technické zázemí HÚ je umístěno vždy mimo tyto bloky. Hodnota -500 m pod povrchem představuje nejvyšší polohu ukládacího místa pro VJP. Vlivem zajištění min. podélného sklonu pro gravitační odvodnění celého ukládacího horizontu se technické zázemí, ve kterém jsou mimo jiné umístěny jímací objekt a čerpací stanice, nachází o několik desítek metrů níže než ukládací sekce VJP. Řádově se ukládací sekce VJP nachází v hloubce 500 až 530 m pod povrchem.

Ukládací obalový soubor

Obalový soubor určený k trvalému uložení VJP v HÚ.

Abstrakt

Tato zpráva je závěrečnou zprávou Dílčího úkolu 4 (DÚ04) zakázky SÚRAO „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“.

Představen je soupis konstrukčních prvků a materiálů, které jsou používány v běžné stavební praxi v podzemních stavbách a v hornictví a je zhodnocena jejich vhodnost pro použití v hlubinném úložišti.

Ve zprávě jsou popisována možná vzájemná působení mezi jednotlivými konstrukčními prvky, které budou/mohou být použity v úrovni ukládacího horizontu v hlubinném úložišti při ukládání vyhořelého jaderného paliva. Kromě konstrukčních prvků je také popisován vliv bentonitu, jako výplňového materiálu inženýrské bariéry a působení horninového prostředí a podzemní vody. Vzájemné vlivy a působení jsou hodnoceny pro provozní bezpečnost a také pro časový horizont po uzavření hlubinného úložiště (dlouhodobá bezpečnost).

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, chemie, mineralogie, mechanika, mikrobiologie, provozní bezpečnost, dlouhodobá bezpečnost, konstrukční prvky

Abstract

This is the final report of Subtask 04 (DÚ04) of the SÚRAO contract "Buffer, backfill and other engineering components of the DGR".

An inventory of the repository's structural elements and materials that are used in the underground constructions and in the mining industry is presented in the report. The suitability of these elements and materials for the application in a deep geological repository is evaluated.

The report describes possible interactions between the individual components that will / can be used in the deep geological repository of spent nuclear fuel. In addition, the influence of bentonite as backfill material and the effect of the rock environment and groundwater is also described. Mutual influences and effects are evaluated for operational safety and also for the time horizon after the closure of the deep repository (long-term safety).

Keywords

Deep geological repository, chemistry, mineralogy, mechanics, microbiology, operation safety, long term safety, structural elements

1 Přehled konstrukčních prvků a materiálů

Přehled konstrukčních prvků používaných v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství je uveden v Tab. 1. V seznamu je uveden i bentonit, který bude v hlubinném úložišti používán jako materiál inženýrské bariéry – tlumicí a výplňový (buffer a backfill). V této zprávě je v popisech vzájemného působení bentonit řešen pouze jako výplňový materiál. Z tohoto pohledu tedy bentonitový materiál nepřichází do přímého kontaktu s UOS s VJP a jejich vlivy.

Tab. 1: Konstrukční prvky používané v běžné stavební praxi

konstrukční prvek	typ
bentonit	backfill
injektáže	cementové jílocementové polyuretanové jednosložkové pryskyřice polyuretanové dvousložkové pryskyřice organicko-minerální pryskyřice epoxidové pryskyřice minerální akrylové pryskyřice metakrylátové gely
jehly	ocelové sklolaminátové
svorníky	ocelové zainjektované pomocí: - rychle tuhnoucí cementové malty - organicko-minerální pryskyřice ¹⁾ ocelové upínané pomocí: - epoxidových lepicích ampulí - polyesterových lepicích ampulí ocelové hydraulicky upínané sklolaminátové zainjektované pomocí: - rychle tuhnoucí cementové malty - organicko-minerální pryskyřice sklolaminátové upínané pomocí: - polyesterových lepicích ampulí
mikropiloty	trubkové ocelové injekční zavrtávané kotevní tyče
drenáže	HDPE žlábký a trubky PVC trubky PE trubky betonové trubky
beton	stříkaný monolitický prefabrikovaný vláknobeton:

konstrukční prvek	typ
	<ul style="list-style-type: none"> - ocelové drátky - skleněná vlákna - polypropylenová vlákna - bazaltová vlákna speciální (low-pH)
výztuž (důlní a betonářská)	ocelové sítě ocelová oblouková výztuž: <ul style="list-style-type: none"> - válcovaná - příhradová

¹⁾ Organicko-minerálních pryskyřic může být více typů, např. se speciálními vlastnostmi (tixotropní směsi)

1.1 Popis konstrukčních prvků

Konstrukční prvky používané v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství, které uvádí výčtem Tab. 1, jsou zde uvedeny samostatně následujícím základním popisem:

Bentonit

Bentonit je reziduální, nepřemístěná, jílovitá hornina, vznikající mechanickým a chemickým zvětráváním mateční horniny (v alkalickém prostředí), především sopečných tufů a tufitů, v menší míře i andezitů, ryolitů, čedičů a jiných převážně třetihorních hornin. Bentonit má vysoký obsah jílových minerálů, mezi které patří především montmorillonit, který je nositelem charakteristických vlastností bentonitu – velké sorpční schopnosti, tj. vysoká schopnosti výměny kationtů, bobtnání a vysoká plasticita. Dalšími významnými složkami bentonitu jsou beidelit, kaolinit a illit.

Beton

Stavební materiál vytvořený smícháním cementu, drobného a hrubého kameniva, vody a eventuálních příměsí a přísad, které zlepšují jeho vlastnosti.

Low-pH beton

Typ betonu vyvinutý s cílem snížit pH výluhu pro zmenšení ovlivnění ostatních materiálů bariér HÚ, zejména bentonitu. Přesná hodnota pH není definována, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 11,0-11,5. Složením surovin je low-pH beton obdobný běžnému betonu, zvýšený bývá podíl složek obsahujících mikrostrukturní SiO₂.

Důlní výztuž

Konstrukce zajišťující stabilitu výrubu proti pádu horniny

Betonářská výztuž

Plné, většinou kruhové ocelové tyče (hladké i žebírkové), které se vkládají do betonu za účelem zvýšení jeho únosnosti a snížení deformací.

Svorník

Tahový konstrukční prvek, který se vkládá do vrtu, kotví líc výrubu do vzdálenější oblasti horninového masivu, která není ražbou výrubu porušena, přenáší zatížením přirozeným klenbovým účinkem a zajišťuje stabilitu výrubu.

Jehly

Krátké tyčové prvky, které jsou osazovány do vrtů v prostoru před čelbou, zajišťují stabilitu přístropí horninového výrubu.

Mikropilota

Ocelová trubka, která je uchycená ve vrtu do horninového masivu cementovou zálivkou, případně injektována vysokotlakou injektáží v prostoru před čelbou, zajišťuje stabilitu horninového výrubu nad jeho kalotou.

Injektáže

Technologie zlepšování vlastností hornin vtačováním injekční směsi do puklin či pórů horniny s cílem jejího zpevnění a utěsnění.

Drenáže

Trubky nebo žlaby pro odvádění, případně svádění vody.

1.2 Charakteristiky typických konstrukčních prvků

Tato kapitola popisuje vybrané typické konstrukční prvky pro stříkané betony, kotvení, injektáže a sanace s ohledem na jejich mnohostranné použití v běžné stavební praxi.

V oboru výroby, dodávek a realizace systémů pro stříkané betony, kotvení, injektáže a sanace existuje v současné době (kveten 2022) v ČR a ve světě celá řada společností. Pro účely této technické zprávy byly vybrány výrobky společností Minova Bohemia, s.r.o., STAGEO, s.r.o., Sanax chemical construction s.r.o. a Master Builders Solutions CZ s.r.o. jako reprezentativní příklady výrobků pro danou kategorii.

Charakteristika, složení a použití vybraných konstrukčních prvků pro:

- kotvení, injektáže a sanace používaných v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství je uveden v Příloze 1, Tab. 6. (Minova Bohemia, s.r.o.)
- samozavrtávací tyčové kotvy, resp. IBO a sklolaminátových tyče používané v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství jsou uvedeny v Příloze 1, Tab. 7. (STAGEO, s.r.o., Sanax chemical construction s.r.o.)
- stříkané betony a injektážních produkty, používaných v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství jsou uvedeny v Příloze 1, Tab. 8. (Master Builders Solutions CZ s.r.o.)

1.3 Životnost konstrukčních prvků

Analogicky jako u tunelových staveb se dle TKP-D7 (2016) hlavní nosné konstrukce (stavební části) navrhují s předpokládanou životností 100 let (jedná se o části, které nelze vyměnit). Tato doba odpovídá i předpokládanému trvání provozní fáze HÚ.

V prostředí HÚ je třeba u některých konstrukcí počítat s potenciálním dlouhodobým zatížením vyšší teplotou, která může vést ke zkrácení životnosti prvků. Tyto podmínky, je třeba zohlednit při návrhu konstrukcí.

2 Přehled vlivů na konstrukční prvky

Jako možné vlivy a děje, které mohou/budou ovlivňovat konstrukční prvky a jejich vzájemné působení, jsou shrnuty v Tab. 2. Předpokládanými a popisovanými vlivy jsou působení chemické, mechanické, mineralogické, mikrobiologické, teplotní a vliv ionizujícího záření (radioaktivity).

V následujícím textu mohou být používány zkrácené názvy jevů či jejich jednopísmenné zkratky dle Tab. 2.

Tab. 2: Seznam posuzovaných vlivů a jejich používaných zkratk

vlivy	zkrácený název	jednopísmenná zkratka
chemické	CHEM	C
mechanické	MECH	M
mineralogické	MIN	N
mikrobiologické	BIO	B
teplotní/tepelné	TEP	T
ionizující záření (radioaktivita)	RAD	R

Konstrukční prvky jsou shrnuty do skupin dle materiálů, z nichž jsou vyráběny: bentonit; běžný beton a cementové materiály; low-pH beton; ocel; organický materiál. Jako další ovlivňující faktor je v Tab. 3 a Tab. 4 zahrnuto působení horninového prostředí a podzemní vody.

2.1 Vlivy v počátečním stavu

Procesy, které ovlivňují materiály inženýrských bariér, konstrukčních prvků a dalších částí úložiště, mají vliv na další celkový chemicko-geochemický vývoj úložiště, ovlivnění mineralogického složení, fyzikálních a mechanických vlastností i mikrobiálního osídlení materiálů inženýrských bariér. V provozní fázi se většina těchto jevů a procesů neprojeví, nebo bude jejich vliv zanedbatelný. Výrazněji se mohou konstrukční prvky ovlivňovat v delším časovém horizontu.

Vliv radioaktivity/ionizujícího záření (R) na materiály v počátečním stavu je nulový. Ionizující záření bude působit primárně na UOS a bentonitový buffer. Konstrukční prvky nebudou ionizujícím zářením ovlivněny.

Vliv zvýšené teploty (T) na materiály v počátečním stavu je minimální. V zásadě k němu může dojít jen při výstavbě prvků z cementových materiálů a betonů působením hydratačního tepla při tuhnutí a zrání.

Mikrobiologické jevy (B) jsou v počáteční fázi hodnoceny pro materiály, které mohou být významným zdrojem mikroorganismů/bakterií, primárně tedy bentonit a hornina/podzemní voda. Zdrojem mikrobiálního osídlení však budou i ostatní materiály konstrukčních prvků, jako je běžný beton i low-pH beton, avšak v menší míře. Z tohoto důvodu jsou diskutovány i tyto materiály.

Vzájemné působení materiálů a vlivů konstrukčních prvků v počátečním stavu, při provozu HÚ, jsou shrnuty v Tab. 3. V počáteční (provozní) fázi vývoje HÚ bude mít dominantní vliv na konstrukční prvky působení podzemní vody a související chemické, mineralogické mechanické a mikrobiologické jevy. Dále mohou na ostatní konstrukční prvky působit zejména bentonitový buffer, a čerstvé cementové materiály, betony a low-pH betony.

Protože jsou vlivy běžných betonů a cementových materiálů na ostatní konstrukční prvky obdobné s vlivy low-pH betonu, stejně tak jako ovlivnění a degradace těchto materiálů, budou v následujících textech (kapitola 4) sdruženy do souhrnných podkapitol.

Tab. 3: Tabulka významných vzájemných vlivů mezi materiály konstrukčních prvků, bentonitu a prostředí pro počáteční stav HÚ.

MATERIÁL		ovlivňující					
		bentonit	běžný beton a cem. materiály	low-pH beton	ocel	organický materiál	hornina/ podzemní voda
ovlivněný	bentonit		T, C, B	T, C, B			C, M, B, N
	běžný beton	M, B		T, C, B			C, M, B, N
	low-pH beton	M, B	T, C, B				C, M, B, N
	ocel	M, B	T, C, B	T, C, B			C, M, B, N
	organický materiál	M, B	T, C, B	T, C, B			C, M, B, N

2.2 Vlivy z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

Dlouhodobé procesy v úložišti ovlivní chemický, biologický a fyzikální vývoj inženýrských bariér, konstrukčních prvků a okolní geosféry. Chemické procesy ovlivní chemické podmínky v úložišti i okolní geosféře. Mezi tyto procesy patří vývoj pH, vývoj redox podmínek, oxidační/redukční děje, rozpouštění a srážení, komplexace, loužení, alterace materiálů (např. působení chloridů a sulfidů, karbonatce cementových materiálů).

Vliv radioaktivity/ionizujícího záření (R) na konstrukční materiály z hlediska dlouhodobé bezpečnosti je zanedbatelný. Uvolnění radioaktivních kontaminantů z uloženého vyhořelého jaderného paliva (VJP) se předpokládá v řádově delších časových obdobích, než je požadovaná životnost a funkčnost konstrukčních prvků.

Vzájemné působení materiálů a vlivů konstrukčních prvků v dlouhodobém časovém horizontu (z pohledu dlouhodobé bezpečnosti HÚ), jsou shrnuty v Tab. 4. V dlouhodobém časovém horizontu vývoje HÚ po jeho uzavření dojde k nasycení všech materiálů podzemní vodou a jejich vzájemným interakcím.

Na základě provedených výpočtů dlouhodobého vývoje teplot v HÚ je možno očekávat působení zvýšené teploty. Výpočty (Kobylka, 2019) prokázaly, že při všech variantách (tj. jakémkoliv dispozičním návrhu pro libovolný typ zavážení) nedojde v oblasti HÚ ke zvýšení teploty nad limitní teplotu pro daný typ UOS a v HÚ tedy nebude nikde překročena limitní

teplota bentonitu 95 °C. Hodnoty vypočtených maximálních teplot horninového bloku se pohybují v rozmezí 53-75 °C v závislosti na lokalitě a způsobu ukládání (Kobylka, 2019).

Vliv teploty (T) na materiály a probíhající ovlivňující děje z hlediska dlouhodobé bezpečnosti je shrnut do společné kapitoly 5.1. Případné specifické jevy a jejich ovlivnění teplotou jsou popsány detailněji v odpovídajících podkapitolách popisujících dlouhodobé ovlivnění jednotlivých materiálů.

Protože jsou dlouhodobé vlivy běžných cementových materiálů a betonů na ostatní konstrukční prvky obdobné s dlouhodobými vlivy low-pH betonu, stejně tak jako dlouhodobé ovlivnění a degradace těchto materiálů, budou v následujících textech (kapitola 5) sdruženy do souhrnných podkapitol.

Tab. 4: Tabulka významných vzájemných vlivů mezi materiály konstrukčních prvků, bentonitu a prostředím z hlediska dlouhodobé bezpečnosti HÚ

MATERIÁL		ovlivňující					
		bentonit	běžný beton a cem. materiály	low-pH beton	ocel	organický materiál	hornina/ podzemní voda
ovlivněný	bentonit (backfill)		C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T
	běžný beton	C, M, B, N, T		C, N, M, T	C, N, M, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T
	low-pH beton	C, M, B, N, T	C, N, M, T		C, N, M, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T
	ocel	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T		C, M, B, N, T	C, M, B, N, T
	organický materiál	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, M, B, N, T	C, N, M, T		C, M, B, N, T

3 Vhodnost konstrukčních prvků

Konstrukční prvky a jejich vhodnost je třeba posuzovat z různých úhlů pohledu – z hlediska zajištění technické a personální bezpečnosti v období provozu úložiště, a z hlediska ovlivnění komponent důležitých pro zajištění bezpečnostních funkcí v období po uzavření úložiště.

Volba konstrukčních prvků je obecně ovlivněna koncepcí podzemní části HÚ, která je projektově řešena ve dvou variantách, samostatně jak pro vertikální, tak pro horizontální způsob ukládání VJP. Další dvě modifikovaná projektovaná řešení přinesla variabilní koncepce preferovaných způsobů ražeb hlavních chodeb (zavážecí tunel (úpadnice), páteřní chodby a zavážecí chodby ukládacího horizontu). Je uvažováno v nejvyšší možné míře s použitím technologie plnoprofilového tunelovacího stroje, tzv. metody TBM. Alternativou k ní je počítáno s využitím konvenčního způsobu ražby za pomoci trhacích prací (metoda NRTM, případně metodu „Drill & Blast“), jak blíže uvádí (Grünwald et al. 2018).

Referenční projekt (Pospíšková et al. 2011) řešil harmonogram výstavby a provozu hlubinného úložiště. Předpokládá se, že v době zahájení provozu bude vyražena a připravena pro příjem VJP jedna sekce. Ražby dalších sekcí budou realizovány bezprostředně před jejich potřebou pro ukládání (zejména z důvodu zachování vlastností homogenního bloku). Sekce pak budou postupně zaváženy a uzavírány. Doba, potřebná pro uložení VJP z českých JE, by se měla pohybovat mezi 63 a 86 lety, v závislosti na směnném provozu ukládání (uvedené doby vychází ze scénářů dvou a třisměnného režimu ukládání VJP). První přístupové tunely se mohou budovat cca s 10letým předstihem. Konstrukční prvky v nich použité budou svou funkci plnit po celou dobu do uzavření úložiště.

Z hlediska provozní bezpečnosti je důležitá především doba životnosti použitých materiálů a jejich odolnost vůči specifickým podmínkám v hlubinném úložišti.

Maximální délka životnosti použitých konstrukčních prvků by se tedy měla pohybovat v řádu cca 100 let (především v přístupových chodbách), ale řada z nich bude aerobnímu prostředí s vysokou vlhkostí vystavena výrazně kratší dobu (v úložných prostorách).

Z hlediska dlouhodobé životnosti je důležitá především vzájemná kompatibilita použitých materiálů konstrukčních prvků s ostatními inženýrskými bariérami, aby nedošlo k předčasné degradaci a ztrátě bezpečnostních funkcí tlumicí bariéry (bentonitu), příp. UOS.

Protože se nepředpokládá, že by konstrukční materiály měly být před uzavřením ukládacích i přístupových prostor vyjímány (Špinko et al. 2018), je nutné omezit roznorodost materiálů vnášených do úložiště. Zároveň charakter materiálu nesmí podpořit rozvoj negativního ovlivnění (např. organické materiály mohou být živnou půdou pro rozvoj mikrobiálních společenství). Dále je třeba zajistit, aby ponechané konstrukční prvky po skončení své životnosti (a degradaci) neměly negativní vliv na dlouhodobou funkci HÚ (např. vznik preferenčních cest pro vodu). Z tohoto hlediska je třeba zvážit a omezit jejich množství a konkrétní umístění prvku v HÚ.

Konstrukční prvky z hlediska jejich umístění v úrovni ukládacího horizontu dle výkresových příloh závěrečné zprávy Optimalizace podzemních částí HÚ (Grünwald et al. 2018) dokumentuje Tab. 5.

Tab. 5: Konstrukční prvky z hlediska jejich umístění v úrovni ukládacího horizontu HÚ

Stavební objekt	Beton	Výztuž	Jehly	Svorníky	Mikropiloty	Injektáž	Drenáž	Bentonit
Odtěžovací tunel	ano	ano ¹⁾	ano ¹⁾	ano	ano ¹⁾	ano ²⁾	ano	ano
Zavážecí tunel	ano	ano ¹⁾	ano ¹⁾	ano	ano ¹⁾	ano ²⁾	ano	ano
Vtažná jáma	ano	ano	ne	ano	ne	ano ²⁾	ne	ano
Páteřní chodby	ano	ano	ne	ano	ne	ano ²⁾	ano	ano
Zavážecí chodby	ano	ne	ne	ne	ne	ano ²⁾	ano	ano
Ukládací vrty	ne ³⁾	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano
Technické zázemí podzemní části HÚ	ano	ano	ne	ano	ne	ano ²⁾	ano	ano

¹⁾ Pouze s ohledem na zastiženou geologii v úvodních částech tunelu
²⁾ Pouze utěšňování velkých přítoků vody, včetně přítoků tlakové vody
³⁾ Upraveno dle aktuálního dokumentu SÚRAO (Dohnálková et. al, 2022)

3.1 Beton

Obecně je beton nejužívanější stavební materiál. S ohledem na jeho měnitelné vlastnosti ve fázi jeho výroby a možnost jeho použití v různém prostředí je možno beton považovat za téměř univerzální stavební hmotu. Nelze opomenout ani fakt, že řada konstrukcí v úrovni ukládacího horizontu, mají-li být trvanlivé a funkční, jsou realizovatelné pouze z betonu, což dokumentuje Tab. 5.

Beton je směs cementu, hrubého kameniva a drobného kameniva, vody, eventuálních přísad a příměsí, které zlepšují jeho vlastnosti, jak bylo uvedeno v kap. 1.1. Volba eventuálních chemických přísad a příměsí do betonu je ovlivněna nejen vlivem prostředí, ale i požadavkem na čerpatelnost čerstvého betonu, zpracovatelnost betonové směsi a rychlost tuhnutí čerstvého betonu včetně zajištění kvality betonu během jeho míchání, dopravy, ukládání a zpracování, jak dokumentuje charakteristika, složení a použití vybraných urychlovačů a přísad pro stříkané betony v Příloze 1, Tab. 8.

Speciálním typem betonu je low-pH beton, tj. beton se sníženým pH výluhu. Hodnota pH výluhu běžných betonů je > 12,5 a tyto vysoce alkalické roztoky mohou negativně ovlivňovat vlastnosti inženýrských bariér HÚ, zejména bentonitu. Přesná hodnota pH výluhu není definována, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 11,0-11,5. Low-pH betony jsou uvažovány jako konstrukční materiály pro úroveň ukládacího horizontu HÚ.

Dle výkresových příloh závěrečné zprávy Optimalizace podzemních částí HÚ (Grünwald et al. 2018) není obecně použití betonu v úrovni ukládacího horizontu HÚ ovlivněno způsobem ukládání VJP ani rozpojováním hornin.

S použitím stříkaného betonu se uvažuje v úvodních částech obou úpadních tunelů (s ohledem na zastiženou geologii), u páteřních chodeb, spojovacích chodeb technického zázemí a jako primární ostění stavebních objektů (komor) technického zázemí.

Monolitický beton bude použit v úrovni ukládacího horizontu HÚ jako vozovka (dno) obou úpadních tunelů, páteřních, spojovacích a zavážecích chodeb. Dle (Špinka et al. 2020a, 2020b; Butovič et al., 2020; Zahradník et al. 2020) se s použitím monolitického betonu uvažuje rovněž jako sekundární ostění stavebních objektů (komor) technického zázemí včetně jejich dna (počvy komor).

S použitím prefabrikovaného betonu (segmentové ostění) se s ohledem na zastiženou geologii uvažuje při zajištění výrubu v úvodních částech obou úpadních tunelů u metody ražby TBM.

U hloubení vtažné jámy konvenčním nebo mechanizovaným způsobem lze případně uvažovat s použitím monolitického betonu při budování ostění. Ostění jámy tvořené betonovými segmenty je možno uvažovat pouze u mechanizovaného způsobu hloubení.

Odvodnění průsakových a technologických vod je v úrovni ukládacího horizontu HÚ primárně uvažováno jako gravitační, přičemž svod důlních vod je prováděn prefabrikovanými odvodňovacími žlaby umístěnými v jednotlivých chodbách.

3.2 Výztuž

S použitím ocelových KARI sítí, jako výztuž stříkaného betonu, která zajišťuje stabilitu výrubu ražených chodeb, se v úrovni ukládacího horizontu HÚ rovněž uvažuje v ostění v úvodních částech obou úpadních tunelů (s ohledem na zastiženou geologii), u páteřních chodeb, spojovacích chodeb technického zázemí a v primárním ostění stavebních objektů (komor) technického zázemí.

U hloubení vtažné jámy konvenčním nebo mechanizovaným způsobem lze případně uvažovat s použitím ocelových KARI sítí jako výztuž monolitického betonu při budování ostění.

Dle závěrečné zprávy Optimalizace podzemních částí HÚ (Grünwald et al. 2018) je použití ocelové obloukové výztuže (válcovaná nebo příhradová) pro potřeby zajištění výrubu ražených chodeb v HÚ diskutabilní. Obecně se předpokládá dostatečně stabilní výrub po celou dobu životnosti úložiště. Nežádoucí je degradace tohoto materiálu v dlouhodobém horizontu, která může vést k vytvoření preferenčních cest v případě úniku radionuklidů.

Dle (Špínka et al. 2020a, 2020b; Butovič et al., 2020; Zahradník et al. 2020) je dosud neřešenou otázkou použití výztuže v sekundárním ostění stavebních objektů (komor) technického zázemí včetně jejich dna (počvy komor) tak jako ve vozovce (dna) obou úpadních tunelů, páteřních, spojovacích a zavážecích chodeb.

Otázka použití vláknobetonu v ostění zavážecího a odtěžovacího tunelu, páteřních chodeb a technického zázemí podzemní části HÚ nebyla rovněž dosud řešena. Z výčtu vláken uvedených v Tab. 1 se upozorňuje zejména na bazaltová a skleněná vlákna pro jejich odolnost proti korozi. V úvahu přichází i použití polypropylenových (PP) vláken, které zvyšují odolnost betonu proti explozivnímu odprýskání vlivem vysoké teploty, ačkoli je jejich použití v HÚ rovněž diskutabilní.

3.3 Jehly

V případě, že nelze dostatečně zajistit čelbu a výrub před vyražením dalšího záběru jeho zkrácením nebo členěním, musí se přistoupit k dodatečným stabilizujícím technologiím, jak je blíže popsáno v závěrečné zprávě Optimalizace podzemních částí HÚ (Grünwald et al. 2018). Vhodnost použití jednotlivých technologií, mezi které se řadí i zajištění stability přístropí výrubu jehlováním pomocí ocelových nebo sklolaminátových jehel, je poplatné nejenom konkrétním geologickým podmínkám, ale i technicko-ekonomické náročnosti jejich realizace. Užití této technologie se ovšem předpokládá pouze v úvodních a přípovrchových ražbách, v nižších

horizontech již nikoliv. S ohledem na tuto skutečnost nejsou jehly v rámci této závěrečné zprávy řešeny.

3.4 Svorníky

Při ražení s použitím TBM bez pláště v pevných skalních horninách často není dle Grünwald et al. (2018) potřeba primární ostění. V případě potřeby se k lokálnímu zajištění výrubu volí kombinace radiálních svorníků, stříkaného betonu (kap. 3.1) a výztužných sítí (kap. 3.2), jak se v úvodních částech ražby zavážecího a odtěžovacího tunelu variantně uvažuje. Se zvyšující se hloubkou je v případě potřeby uvažováno se zajištěním výrubu pouze radiálními svorníky.

Při použití konvenční metody ražby se dle Grünwald et al. (2018) rovněž primárně uvažuje s ohledem na zastíženou geologii v úvodních částech obou úpadních tunelů s použitím primárního ostění tvořeného výztužnými sítěmi a stříkaným betonem v kombinaci s radiálními svorníky. Se zvyšující se výškou nadloží se počítá s tím, že bude možné upustit od realizace primárního ostění a výrub bude zajišťován, v případě nutnosti, pouze svorníkovou výztuží.

Dle (Špínka et al., 2020a, 2020b; Butovič et al., 2020; Zahradník et al. 2020) je v případě nutnosti při výstavbě technického zázemí podzemní části HÚ uvažováno s použitím krátkých kotevních prvků (svorníků) pro zajištění přístropí stavebních objektů (kaveren). Se zajištěním výrubu radiálními svorníky je rovněž uvažováno při ražbě páteřních a spojovacích chodeb v kombinaci se stříkaným betonem vyztuženým ocelovými KARI sítěmi.

Dle charakteristik, složení a použití vybraných konstrukčních prvků uvedených v Tab. 1 a v Příloze 1, Tab. 6 a Tab. 7 vyplývá, že se v současné době (květen 2022) používají v podzemním stavitelství a ve stavebnictví vůbec jak tradiční ocelové, tak sklolaminátové svorníky. Jak uvádí (Šnupárek a Janíček, 2001), tak sklolaminátové svorníky mají oproti ocelovým svorníkům vysokou resistenci vůči korozním a obecně chemickým vlivům prostředí.

3.5 Mikropiloty

V podmínkách, kde běžné jehlování není již bezpečné a únosné, se používají pro ochranu volného výrubu mikropilotové deštníky z ocelových perforovaných zainjektovaných trubek, jak blíže popisuje Mosler et al. (2019). S ohledem na skutečnost, že toto opatření se navrhuje dle Grünwald et al. (2018) v příportálovém úseku před zahájením ražby v případě rizika vypadávání bloků horniny v závislosti na zastížených báňsko-geologických podmínkách, nejsou tyto konstrukční prvky v rámci této závěrečné zprávy rovněž řešeny.

3.6 Injektáž

Dle charakteristik, složení a použití vybraných konstrukčních prvků uvedených v Tab. 1 a v Příloze 1, Tab. 6 a Tab. 8 vyplývá, že se v současné době (květen 2022) používá v podzemním stavitelství, a ve stavebnictví vůbec, celá řada injektážních hmot jak na cementové, tak chemické (organické) bázi.

Cílem injektáže je v maximální míře vyplnit póry v zeminách, resp. diskontinuity a dutiny ve skalním masivu, a tím ho utěsnit a zpevnit. Z toho důvodu úspěch injektáže závisí na volbě složení směsi, injekčním tlaku, rychlosti injektáže, množství injekční směsi, a nakonec na

charakteru injektovaných diskontinuit, jejich vodonosnosti a charakteru podzemních vod, jak blíže popisuje (Klepsatel et al., 2003).

U mechanizovaného způsobu ražby za pomoci plnoprofilových razících strojů typu hard rock TBM je případná předstihová injektáž horniny dalším důležitým opatřením pro stabilizaci rozpukané skalní horniny a bránění průsakům vody, obzvláště v geologických poruchových pásmech. Potřebné zařízení musí být na štítu instalováno ještě před zahájením ražby, jelikož pozdější vylepšování je nákladné, časově náročné a často je možné pouze částečně. Zahrnuje zařízení na vrtání, míchání i vrtací přípravky procházející štítem, je-li to nutné i řeznou hlavou.

Charakteristickým rysem NRTM je dle (Mosler et al., 2019) rovněž aplikace systematických injektáží (na cementové i chemické bázi) velkého rozsahu pro redukci možných přítoků vody do ražených chodeb. Je používána zejména metoda předstihových injektážních vějířů do předpolí čelby – pregrouting. Dodatečné injektáže lze provádět jak přímo do líce výrubu, tak častěji až po ustálení lokálních přítoků, přes ostění – postgrouting.

Jak je popsáno v závěrečných zprávách aktualizovaných studií umístitelnosti HÚ (Špínka et al. 2020a, 2020b; Butovič et al., 2020; Zahradník et al. 2020), tak odvodnění průsakových a technologických vod je primárně uvažováno jako gravitační, přičemž svádění důlních vod je uskutečňován odvodňovacími žlaby umístěnými v jednotlivých chodbách. S ohledem na tuto skutečnost případná injektáž bude použita pouze u malých až velkých přítoků vody, včetně přítoků tlakové vody. Motyčka (2001) doporučuje, aby injekční hmota byla objemově stálá, odolná proti mechanickému vyplavování z těsněných dutin a pórů a odolná vůči případné agresivitě horninového prostředí včetně působících podzemních vod. Na základě zkušeností, které byly získány při provádění těsnících injektáží při ražbě tunelů Ólafsjördur a Siglufjördur na Islandu (Cyroň a Kučera, 2008; Cyroň et al. 2009), lze usuzovat, že použití případných cementových injektážních směsí při ražbě a výstavbě HÚ nemusí být s ohledem na teplotu a tlak podzemní vody účinné. Z toho důvodu je možno očekávat, že budou použity injektážní směsi na chemické (organické) bázi (polyuretanové, metakrylátové).

3.7 Drenáž

Podle závěrečných zpráv aktualizovaných studií umístitelnosti HÚ (Špínka et al. 2020a, 2020b; Butovič et al., 2020; Zahradník et al. 2020) se při horizontálním ukládání VJP upozorňuje na důsledné odvodnění zpevněného dna chodeb, jelikož zde bude umístěna trolej pro napájení transportní technologie HÚ na bázi kolejové dopravy. Z tohoto důvodu se vně kolejí uvažuje s realizací dvojice odvodňovacích žlabů, ze kterých jsou důlní vody sváděny do drenážního potrubí umístěném pod úroveň napájecí troleje. Kumulace důlních vod probíhá v jímacím objektu (dále jímcce). Vody jsou čerpány směrem k povrchu výtlačným potrubím. Otázka materiálu drenážního a výtlačného potrubí v úrovni ukládacího horizontu nebyla sice dosud řešena, ale lze očekávat, že drenážní trubky budou z PE a výtlačné potrubí z oceli.

3.8 Bentonit

Bentonit bude v HÚ využit jako materiál inženýrských barier, zátek a případně jako součást injektážních směsí.

Referenční projekt (Pospíšková et al. 2011) předpokládá využití lisovaného bentonitu v okolí ukládacího obalového souboru jako jednu z inženýrských barier, která plní těsnicí a tlumicí

funkci. Referenční projekt předpokládá lisované prefabrikáty, v závislosti na konkrétním technickém řešení, lze však uvažovat i o formě pelet.

Referenční projekt dále počítá s využitím bentonitu pro výplň nevhodných úseků ukládacích vrtů (mezi oddělovací zátky) a obecně jako výplňovým materiálem dalších prostor (přístupové chodby atd.). Forma výplňového materiálu není v projektu definována. Lze předpokládat, že půjde o pelety, či jinak zhutněný/kompaktovaný materiál. Případně o směs bentonitu s kamenivem.

Bentonit bude také použit v kombinovaných mechanicko-hydraulických zátkách, kdy bude využíván jako těsnicí prvek mezi dvěma betonovými bloky (viz Obr. 2). Předpokládanou formou bentonitu jsou pelety, případně jejich směs s práškovým bentonitem.

4 Popis interakcí ovlivňujících konstrukční prvky a materiály v počátečním stavu

Počátečním stavem je myšlen okamžik instalace komponenty, u betonu je počátečním stavem myšlen stav po vyzrání. S ohledem na tuto definici není zmíněný časový bod stejný pro celé úložiště, resp. všechny jeho prvky. Z hlediska provozní bezpečnosti „odpočet“ životnosti daného konstrukčního prvku nastává tímto, pro prvek „individuálním“, okamžikem.

Při popisu možných interakcí je rovněž třeba vzít v úvahu časovou posloupnost prováděných prací (např. využití konstrukčních materiálů při výstavbě úložiště a vyplňování vrtů nebo přístupových chodeb bentonitem), neboť i to zužuje možnost vzájemného ovlivnění.

K výraznějšímu ovlivnění materiálů mikrobiologickými procesy dojde pravděpodobně až spíše v rámci dlouhodobé bezpečnosti HÚ, zpočátku budou fyzikálně-chemické podmínky v materiálech použitých v úložišti nehostinné (vysoká teplota, sucho, možné radioaktivní záření) a dá se proto předpokládat, že mikroorganismy se budou v materiálech použitých v inženýrských bariérách vyskytovat převážně ve formě spor. V této kapitole se proto zaměřujeme spíše na možný mikrobiální potenciál jednotlivých materiálů, který bude hrát důležitou roli v dlouhodobé bezpečnosti po zavodnění celého systému.

V následujících kapitolách jsou vlivy a interakce popisovány z pohledu ovlivněného materiálu/prvku.

4.1 Ovlivnění bentonitu

Dle textu výše a Tab. 3 jsou popsány následující interakce a vlivy na bentonit v počátečním stavu.

4.1.1 Ovlivnění bentonitu běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

Beton a cementové materiály jsou běžně používaným konstrukčním materiálem při realizaci důlních děl. Bližší specifikace jeho využití je uvedena v kapitole 3.1.

4.1.1.1 Teplotní vlivy

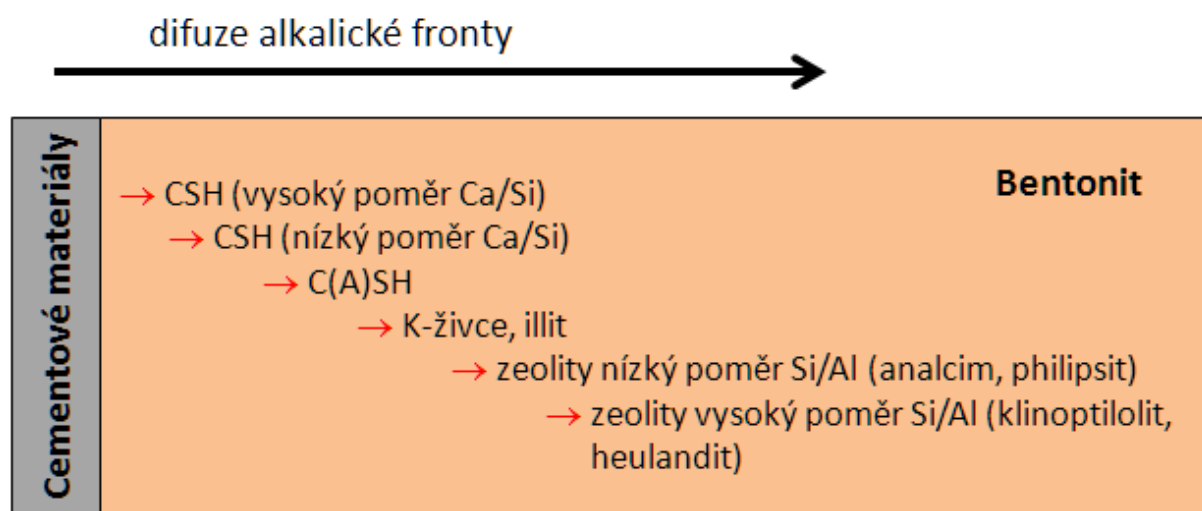
S ohledem na postup prací a časovou posloupnost instalace uvedených materiálů během výstavby a provozu k ovlivnění nedojde.

Poznámka: I u konstrukcí, které jsou při zrání betonu, a tedy i vývinu hydratačního tepla, v kontaktu s bentonitem (např. oddělovací zátka), musí být teplota při hydrataci a zrání betonu nižší, než je uvažovaná limitní teplota 95 °C na povrchu UOS. Tím bude zajištěno, že nedojde k negativnímu ovlivnění vlastností bentonitu. Požadavek musí být zajištěn výběrem použité technologie.

4.1.1.2 Chemické a mineralogické vlivy

4.1.1.2.1 Vlivy běžného betonu a cementových materiálů

Pro ovlivnění bentonitu cementovými materiály je nutná přítomnost vysoce alkalické vody, která by mohla mít původ jako voda záměsová, nebo jako podzemní voda, která interagovala s cementovým materiálem. Postupující alkalická fronta bude na rozhraní s bentonitem nejdříve pufrována na silanolových a aluminiových funkčních skupinách (tzv. edge sites), nicméně po vyčerpání kapacity dojde k postupnému rozpouštění složek bentonitu. Bentonit je ve vysoce alkalickém prostředí nestabilní a rozpouští se. Pomalé rozpouštění při vysokém pH platí i pro ostatní minerály bentonitu jako je např. křemen, živec, pyrit či sádrovec. Při rozpouštění dochází ke spotřebování hydroxylových iontů a ke zpomalování postupu alkalické fronty. Z přesycených roztoků dále krystalizují sekundární minerály jako např. jílové minerály, hydroxidy, karbonáty, CSH fáze, zeolity či živce v určitém zonálním uspořádání. Blíže k rozhraní s vyšším pH krystalizují především C(A)SH fáze, illit, živce a hliníkem bohaté zeolity a dále od rozhraní, kde je nižší pH, krystalizují křemíkem bohaté zeolity (viz Obr. 1). Tvorba sekundárních minerálů následně vede ke snižování porozity. Rovněž iontová výměna draselných a vápenatých iontů za kationty v mezivrstvi smektitů může vést ke změně bobtnacího tlaku a rovněž k ovlivnění rozpouštěcích a srážecích reakcí při postupu alkalické fronty. Nicméně v případě lokálního Ca-Mg bentonitu by tyto změny měly být zanedbatelné.



Obr. 1: Schéma postupného vzniku sekundárních minerálů s postupující alkalickou frontou z cementového materiálu (OPC). V čase bude docházet ke změně složení alkalické fronty, a tudíž se bude měnit zastoupení z Na-K fází na více vápenaté fáze; upraveno dle Savage et al. 2007 (Šťástka et al., 2018).

4.1.1.2.2 Vlivy low-pH betonu

Low-pH beton lze obecně definovat jako cement/beton, jehož výluh má nižší pH než 12, ideálně kolem hodnoty pH 11. V praxi to znamená, že v cementu chybí portlandit a je tedy složen především z C-S-H fáze s poměrem Ca/Si 0,8 (Savage a Benlow 2007). Předpokládá se, že bude využit na ukládacím horizontu, aby ovlivnění bentonitu pro interakci s podzemní vodou bylo co nejmenší. Přestože pH vody po interakci s low-pH betonem nebude dosahovat hodnot jako pro běžné cementové materiály, interakční procesy na rozhraní s bentonitem budou probíhat podobnými mechanismy. Oproti běžným betonům a cementům bude tedy

alkalická fronta výluhu z low-pH betonu méně a pomaleji vyčerpávat pufrací kapacitu silanolových a aluminiových funkčních skupin bentonitu a k rozpouštění složek bentonitu bude docházet výrazně pomaleji. Díky sníženému množství portlanditu v low-pH betonu bude docházet k menšímu ovlivnění bentonitu vápenatými ionty avšak s ohledem na plánované použití Ca-Mg bentonitu by tyto změny (např. v bobtnacím tlaku či výměnné kapacitě) měly být zanedbatelné.

Z pohledu provozní bezpečnosti by však měl být omezen průnik vody do prostor HÚ na minimum, tudíž k výše uvedeným dějům bude docházet pouze v minimální míře a ovlivnění bentonitu v průběhu provozní fáze bude zanedbatelné.

4.1.1.3 Mikrobiologické vlivy

Přestože v počátečním stavu lze označit jako rizikový zdroj mikroorganismů především bentonit a horninu s podzemní vodou, mohou i beton a cementové materiály obsahovat mikroorganismy. Samotné prostředí betonu je pro rozvoj mikrobiálního života nehostinné – vysoké pH, vysoká teplota při výrobě cementu, zvýšená teplota v průběhu zrání betonu, nedostatek vody a živin, zvýšený obsah solí – to vše jsou faktory limitující výskyt bakterií. Přesto se v betonu bakterie vyskytují (Kiledal et al., 2021; Maresca et al., 2016). Pedersen a spol. (Pedersen et al., 2004) zkoumali výskyt bakterií v unikátních hyperalkalických pramenech Maqarin s vysokým obsahem vápníku v Jordánsku. Hodnota pH zde dosahuje až 12,9 a přesto se zde našlo 82 klonů v koncentraci tisíců až několik milionů buněk/ml. Navzdory jejich malému počtu, pomalému růstu a nízké metabolické aktivitě, jejich výskyt v takto extrémních podmínkách je důkazem toho, že bakterie jsou schopné přežít ve vysoce extrémních podmínkách a mohou tedy působit i v nepříznivých podmínkách úložišť radioaktivního odpadu (Pedersen et al., 2004). Mikroorganismy izolované z betonu se do něj dostávají pravděpodobně jak lidskou činností při jeho přípravě (Maresca et al., 2016), tak z cementových a štěrkových komponent (Kiledal et al., 2021). S přítomností mikroorganismů v betonu a cementových materiálech je tedy nutno také počítat vzhledem k dlouhodobé bezpečnosti HÚ RAO, byť znalosti v této oblasti jsou relativně malé a v případě bakterií zavlečených v průběhu přípravy betonu špatně predikovatelné.

V případě ovlivnění bentonitu low-pH betonem platí víceméně totéž co u ovlivnění běžným betonem. Přestože je beton nehostinné prostředí pro rozvoj mikrobiálního života, může být zdrojem bakterií. Oproti běžnému betonu má LPC nižší pH (přesná hodnota není definována, nejčastěji se pohybuje v rozmezí 11,0-11,5), což může vést k dřívějšímu a též významnějšímu rozvoji mikrobiálního společenstva, zejména v prostředí bohatém na organismy (Mijnendonckx et al., 2018; Mijnendonckx et al., 2019b; Mijnendonckx et al., 2019a; Shrestha et al., 2022), tedy v místech styku LPC s bentonitem, popř. horninou či podzemní vodou.

S ohledem na diskutované podmínky lze očekávat, že v období provozu bude mikrobiálně působené ovlivnění minimální.

4.1.2 Ovlivnění bentonitu horninovým prostředím a podzemní vodou

Zóna narušení v důsledku ražby (Excavation Disturbed Zone – EdZ) a zóna poškození v důsledku ražby (Excavation Damaged Zone – EDZ) jsou oblasti okolo podzemních děl, v nichž je horninový masiv více či méně rozrušen v důsledku razících prací. Vznik těchto zón je nevyhnutelný (Hudson et al. 2009), intenzita ovlivnění okolního masivu je ovšem závislá na použité metodě ražby, tj. zda je použita např. trhací práce nebo je výstavba naopak prováděna

pomocí technologie TBM (Tunnel Boring Machine). Kromě použité metody výstavby díla je rozsah a tvar zón porušení ovlivněn také tvarem a průřezem podzemních prostor, pevnostními vlastnostmi horninového masivu, napětovými poměry in-situ a strukturními fenomény.

V průběhu konstrukce úložiště jsou změny v masivu, vedoucí ke vzniku EDZ, důsledkem změny tlakového pole zásahem do masivu a vlivem technologických postupů ražby. Obě příčiny se z hlediska hydrauliky projevují změnou odporových parametrů zóny – zvýšením nasycené hydraulické vodivosti v důsledku zvýšení hustoty, konektivity a propustnosti puklinové sítě.

Odtěžením horniny dochází k porušení rovnovážného stavu a při redistribuci geostatického tlaku dochází k posunům okolní horniny směrem do vytěženého prostoru v důsledku jejího odlehčení. Mění se tak parametry stávající puklinové sítě v masivu. Atmosférický tlak při povrchu vytěženého prostoru vede ke vzniku tlakového gradientu. V období realizace a provozu HÚ tak nastává proudění podzemní vody směrem do výrubu, přičemž v EDZ mohou nastat podmínky nesaturovaného proudění, jež snižují efektivní hydraulickou vodivost v bezprostředním okolí odvodňovaného díla. Snižování hydraulické vodivosti v dané fázi může být rovněž zapříčiněno biologickou aktivitou vedoucí ke snížení efektivního průřezu vzniklých poruch (Hudson a Harrison, 1997).

Tsang et al. (2005) uvádějí, že pokud je jako metoda ražby použito vrtání a trhací práce, může být EDZ rozvinuto v mocnosti od 10 cm až do 1,5 m směrem do horninového masivu při nárůstu propustnosti o dva až tři řády (10^{-15} – 10^{-16} m²). Při použití TBM, mocnost EDZ dosahuje okolo 1 cm, přičemž propustnost narůstá o jeden řád.

Z hlediska životnosti HÚ je vhodné existenci a projevy EDZ hodnotit také s ohledem na časový faktor. Z tohoto pohledu lze rozlišit tři stádia vývoje EDZ v hlubinném úložišti (Hudson et al. 2009):

fáze 1 – počáteční výstavba, která mění „nastavené“ mechanické, hydrologické a chemické podmínky v masivu. Zkušenosti z hornické činnosti, z ražení chodeb a podzemních tunelů a kolektorů v horninách podobného typu dávají dostatečnou znalostní databázi pro výběr optimálních technologií a použitých geotechnických metod pro zajištění bezpečné výstavby HÚ s požadovanými vlastnostmi a jeho provozování v době jeho výstavby a následném zavážení VJP;

fáze 2 - provoz HÚ představuje období, kdy je ponecháno otevřené dílo, čímž dochází k vysychání horniny, k proudění vody přes otevřené trhliny a kdy může docházet k chemickým změnám;

fáze 3 – po umístění UOS a výplňového materiálu (bentonit) a následně uzavření HÚ dochází k nárůstu teploty, obnovování pórového tlaku, resaturace masivu atd. Rovnováha se následně obnovuje po velmi dlouhé časové období.

4.1.2.1 Chemické a mineralogické vlivy

Po uzavření jednotlivých úložných prostor či úložiště jako celku bude docházet k postupné saturaci bentonitu podzemní vodou z okolní hostitelské horniny. Na rozhraní bentonit/hostitelská hornina může v závislosti na různých faktorech docházet k těmto jevům (Červinka et al. 2015):

- mechanická a chemická eroze bentonitu – fyzický odnos horniny, snížení objemové hmotnosti, pórovitosti a s tím spojený případný vznik koloidních částic.
- vznik jílových koloidů – v případě příhodných podmínek mohou jílové koloidy zůstat v podzemní vodě stabilní a přispět k migraci uvolněných radionuklidů.
- interakcí podzemní vody a bentonitu dojde ke vzniku pórové vody v bentonitu, jejíž chemické složení bude mít zásadní vliv na rozpustnost, difúzi a sorpci uvolněných radionuklidů.
- interakce podzemní vody a bentonitu rovněž ovlivní samotný bentonit (např. iontová výměna mezi bentonitem a podzemní vodou) a může dojít ke změně jeho chemických, ale i geotechnických vlastností, jakož i transportních (difúze).

Z pohledu provozní bezpečnosti by však měl být omezen průnik vody do prostor HÚ na minimum, tudíž k ovlivnění bentonitu by mělo docházet pouze v minimální míře a chemicko-mineralogické ovlivnění bentonitu v průběhu provozní fáze bude zanedbatelné.

4.1.2.2 Mechanické vlivy

Po vyplnění prostor bentonitem dojde nejprve k „vysušení“ okolí, kdy bentonit absorbuje vodu z okolí (zejména EDZ). Postupně dojde k nárůstu vlhkosti uvnitř bentonitu a nárůstu bobtnacího tlaku, který povede k namáhání rozhraní bentonit hornina. Dále pak v závislosti na dostupnosti vody v horninovém masivu dojde k postupnému sycení bentonitu a doplnění vody/nasycení puklinového prostředí. Rychlost/dynamika těchto procesů výrazně závisí na dostupnosti vody v horninovém prostředí (přítoky/proudění). V případě malé dostupnosti vody bude proces zejména řízen/omezován horninovým prostředím. V případě velké dostupnosti vody bude proces řízen šířením vody v bentonitu. Zde v extrémním případě, při výskytu proudící vody, může dojít k erozi bentonitu.

Provozní bezpečnost není ovlivněna, neboť takto uzavřené prostory již nejsou přístupné (jsou oddělené zátkou).

4.1.2.3 Mikrobiologické vlivy

Stejně jako bentonit jsou i hornina a podzemní voda v počátečním stavu v HÚ RAO z mikrobiologického hlediska důležité. Přítomnost vody obecně umožňuje rozvoj mikrobiální aktivity a podzemní voda i hornina jsou též zdrojem samotných mikroorganismů (Pedersen, 1997), které mohou v pozdějším procesu vývoje HÚ RAO ovlivňovat svými procesy bentonit a ostatní konstrukční prvky a materiály. V horninovém prostředí je výskyt mikroorganismů oproti podzemní vodě několikanásobně vyšší (McMahon and Parnell, 2014; Wanger et al., 2006), mikroorganismy v horninách jsou však velice odlišné od těch přítomných v podzemních vodách (Jägevall et al., 2011; Lazar et al., 2019; Momper et al., 2017; Mullin et al., 2020; Sahl et al., 2008). Zároveň i v rámci hornin mohou být mikrobiologická společenstva velmi rozdílná (Jägevall et al., 2011; Lazar et al., 2019) a to i na prostorově malé škále (Lazar et al., 2019).

4.2 Ovlivnění běžného betonu, cementových materiálů a low-pH betonu

Beton a cementové materiály jsou běžně používaným konstrukčním materiálem při realizaci důlních děl. Bližší specifikace jeho využití je uvedena v kapitole 3.1. V blízkosti úložných

prostor se předpokládá využít low-pH beton, z důvodu minimalizace negativního ovlivnění bentonitu.

S výjimkou instalace zátek budou konstrukční prvky (ostění, počva, ...) v době zaplnění prostor bentonitem již realizované a využívané.

Z hlediska provozní bezpečnosti je důležitá především jejich životnost, neboť některé z nich, především v přístupových chodbách), budou instalovány již v počátečních fázích provozu hlubinného úložiště. Hlavní nosné konstrukce (stavební části) se navrhuje s předpokládanou životností 100 let (viz kap.1.3).

Na přístupných místech bude prováděna kontrola, a v případě, že to bude potřebné, mohou tyto konstrukce být opraveny, aby nedošlo k ohrožení provozní bezpečnosti.

Dle textu v úvodu kapitoly 4 a Tab. 3 jsou popsány následující interakce a vlivy na běžný beton a cementové materiály v počátečním stavu.

4.2.1 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu bentonitem

Postupná degradace betonových konstrukcí z běžného či low-pH betonu před zaplněním prostor bentonitem může mít vliv z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (vznik trhlin a tím preferenčních cest pro podzemní vodu).

Provozní bezpečnost betonových prvků je ošetřena kontrolou stavu a včasnou opravou.

4.2.1.1 Mechanické vlivy

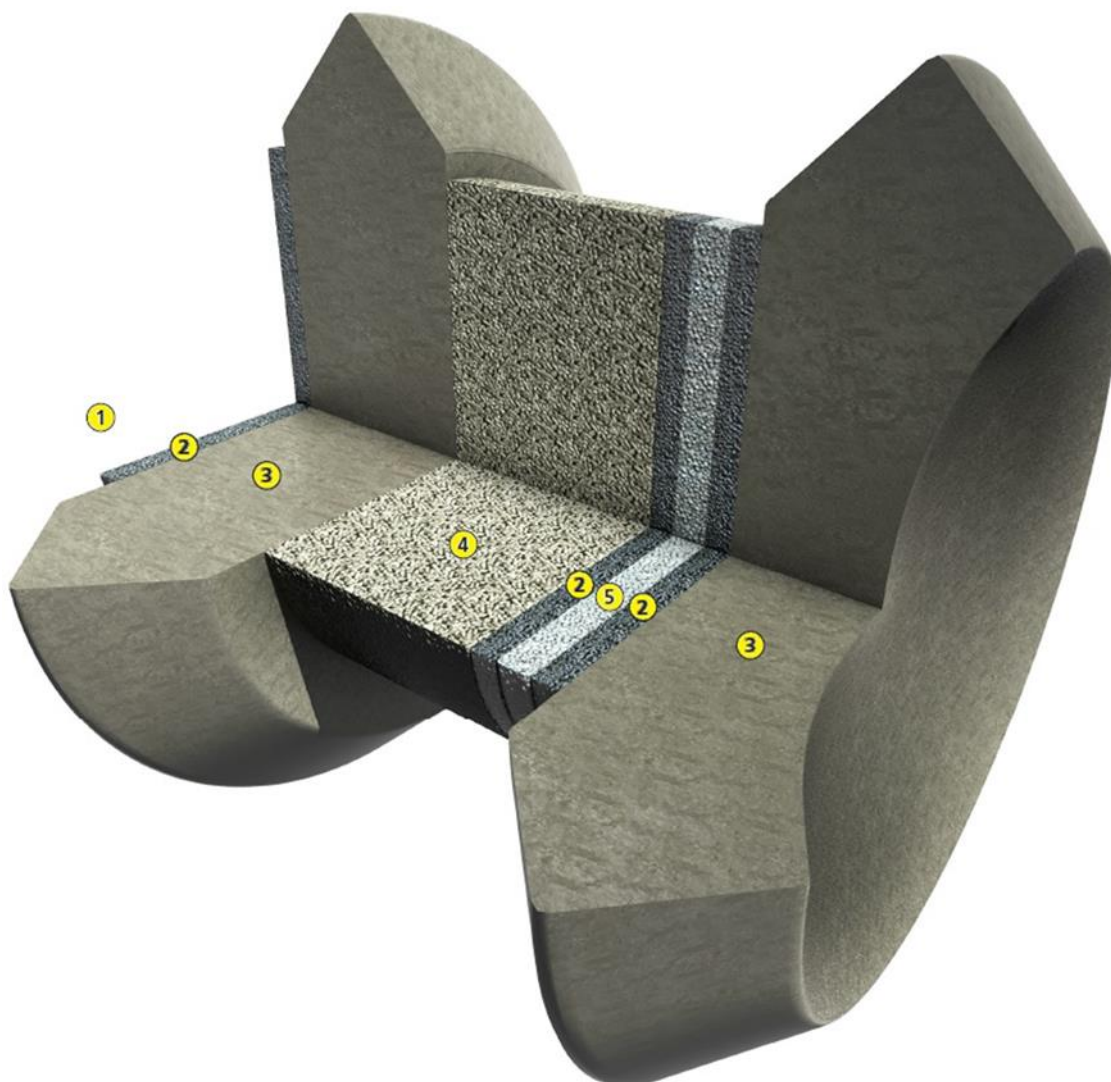
Bentonit (v „suchém stavu“) bude na konstrukci z běžného či low-pH betonu působit pouze vlastní tíhou, ať již přímo nebo formou bočního tlaku. Správně navrženou betonovou konstrukci by toto namáhání nemělo ovlivnit.

K výraznějšímu namáhání dojde až v případě, že se bentonit dostane do styku s vodou a začne bobtnat a dojde k vývinu bobtnacího tlaku. S takovýmto zatížením by měly betonové konstrukce z běžného či low-pH betonu po dobu své životnosti počítat a být na něj navrženy.

Potenciálně nepříznivým ovlivněním může být situace, kdy k bobtnání dojde v průběhu instalace konstrukce a jejího zrání. Například z nepředpokládaného výronu vody z horninového masivu, přítomností technologické vody, adsorpcí z čerstvého betonu. V takovém případě může dojít k předčasnému zatížení konstrukce, které může vést k deformaci konstrukce či jejímu porušení.

4.2.1.2 Chemické a mineralogické vlivy

Bentonit (v „suchém stavu“) může potenciálně pohltit vodu z betonové konstrukce z běžného či low-pH betonu při její výstavbě. Tj. nedostatek vody při tvrdnutí betonu může ovlivnit vlastnosti konstruovaného betonového prvku. Mohlo by dojít k nedokonalé hydrataci a vývoji cementových minerálních fází. Přímý kontakt mezi „suchým bentonitem“ a čerstvým betonem je však velmi málo pravděpodobný. Je možné, že při konstrukcích prvků bude použit prefabrikovaný materiál jako tomu bylo u konstrukce zátky EPSP v projektu DOPAS, kdy bentonitové pelety byly od stříkaného betonu odděleny betonovými prvky ztraceného bednění (Obr. 2).



Obr. 2: Schéma zátky EPSP realizované v projektu DOPAS; popis: 1 – experimentální komora, 2 – stěna ze ztraceného bednění, 3 – stříkaný low-pH beton, 4 – bentonitové pelety, 5 – šterkový filtr/drenáž

4.2.1.3 Mikrobiologické vlivy

Bentonit v počátečním stavu v HÚ je z mikrobiologického hlediska důležitým zdrojem mikroorganismů, které mohou v pozdějším procesu vývoje HÚ ovlivňovat svou metabolickou aktivitou beton a cementové materiály (stejně jako další komponenty). Bentonity obsahují řadu organických látek, které mohou mikroorganismy pro svůj růst využít (Taborowski et al., 2019). Přítomnost mikroorganismů byla zjištěna jak u českých bentonitů (Bengtsson et al., 2017; Černá et al., 2019; Mijndonckx et al., 2021; Svensson et al., 2011; Taborowski et al., 2019), tak i u zahraničních (Boivin-Jahns et al., 1996; Fukunaga et al., 2005; Chi Fru and Athar, 2008; Lopez-Fernandez et al., 2015; Poulain et al., 2008; Stroes-Gascoyne et al., 2007; Svensson et al., 2011). Na druhou stranu, kompaktováním bentonitu v HÚ RAO prokazatelně dochází ke značnému omezení mikrobiální aktivity (Černík et al., 2019; Grant, 2004; Motamedi et al., 1996; Pedersen, 2017; Pedersen et al., 2017) a mikroorganismy jsou tak přítomné především v inaktivním stavu spor (Stroes-Gascoyne et al., 2007). Kompaktování na vysokou objemovou hmotnost má prokazatelný vliv též na následnou kultivovatelnost mikroorganismů (Pedersen, 2017), což je faktor důležitý především z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

LPC představuje mikrobiologicky méně extrémní prostředí, a proto je zde možné očekávat výraznější vliv bentonitových mikroorganismů než v případě běžného betonu a OPC.

4.2.2 Vzájemné ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu

Protože běžné betonové materiály i low-pH betony jsou založeny na bázi cementu jako základního pojiva, jsou si složením podobné, může případně dojít ke zlepšení jejich stavu (zacelení možných trhlin které vznikly vlivem postupné degradace u dříve instalovaného prvku). Je to benefitem jak z hlediska provozní, tak dlouhodobé bezpečnosti.

4.2.2.1 Teplotní vlivy

Hydratační teplo může potenciálně ovlivnit přilehlé konstrukce, které mohou mít nižší tepelnou odolnost. Tento případ je však velmi nepravděpodobný, neboť low-pH a běžné betony mají obdobnou tepelnou odolnost.

4.2.2.2 Chemické a mineralogické vlivy

Protože jsou si běžné cementové materiály a betony spolu s low-pH betony v základu velmi podobné, nepředpokládá se výrazné ovlivnění chemismu či mineralogie. Dá se očekávat, že na rozhraní materiálů dojde k ekvilibraci pH a případné redistribuci portlanditu.

V počátečním stavu jsou však tyto jevy velmi málo pravděpodobné a jejich případný průběh nebude mít v krátkodobém horizontu vliv na vlastnosti běžného betonu a cementových materiálů.

4.2.2.3 Mikrobiologické vlivy

Podobně jako běžný beton, lze i LPC beton v počátečním stavu HÚ RAO považovat za zdroj mikroorganismů, přičemž low-pH beton představuje pro mikroorganismy prostředí méně nepříznivé a lze tak očekávat, že bude představovat zdroj případné mikrobiální aktivity spíše než běžný beton. Na styku s běžným betonem však bude pravděpodobně z počátku prostředí příliš nehostinné, aby tak došlo k většímu rozvoji mikrobiální aktivity. V období provozu je tedy možné očekávat ovlivnění minimální.

4.2.3 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu horninovým prostředím a podzemní vodou

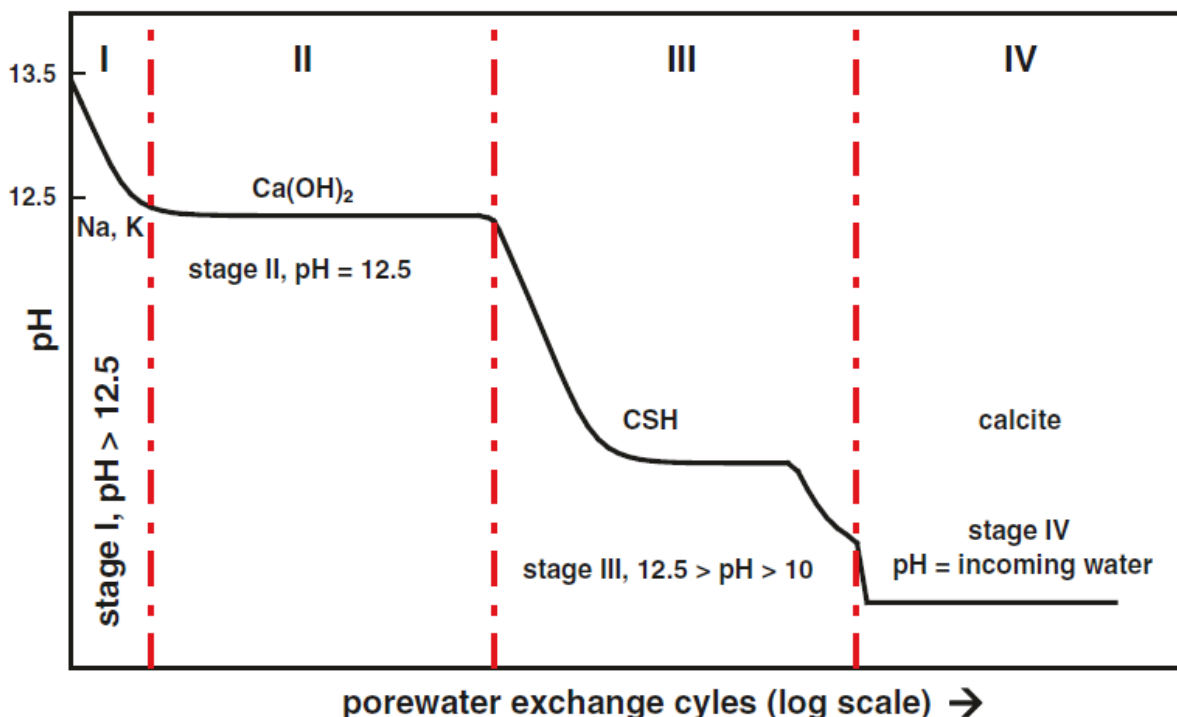
Interakcemi podzemní vody s materiály inženýrských bariér a konstrukčních prvků na bázi cementových materiálů a vytvořených z běžného betonu bude vznikat interagovaná voda, jejíž složení se může změnit až na pórovou vodu cementových materiálů. Tato voda může dále ovlivňovat ostatní materiály IB a konstrukční prvky v hlubinném úložišti. Voda interagovaná s low-pH betonem bude mít nižší pH a drobně odlišné složení (menší obsah hydroxidu vápenatého).

V počátečním stavu po instalaci betonových či cementových materiálů a low-pH betonu se nepředpokládá výrazné působení vody na tyto materiály, tento jev se však nedá zcela vyloučit. Výjimkou mohou být cementové injektáže zvodnělých puklin.

4.2.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Obecně při interakci cementových materiálů s vodou dochází k postupnému rozpouštění cementových minerálních fází. V závislosti na rychlosti výměny vody v cementovém materiálu a okolí pak dochází k jejich vymývání a cementový materiál/beton je tak postupně ochuzován o tyto minerální fáze. Interakci cementového materiálu s vodou schematicky znázorňuje Obr. 3. Hodnoty na osách pH a cykly výměny vody v pórech (respektive čas) jsou orientační a závisí na mnoha faktorech, jako je rychlost výměny pórů, agresivita prostředí a teplota. (Ochs et al., 2015).

Při prvotním kontaktu cementových materiálů s vodou primárně dochází k vyluhování minerálů s obsahem alkalických kovů a složení roztoku ve stavu I je řízeno rozpustnými sodnými a draselnými solemi. Tyto interakce závisí na mnoha faktorech, jako je rychlost výměny vody v pórovém prostoru, agresivita (chemismus) prostředí a teplota. Po relativně rychlém rozpouštění/vyloužení sodných a draselných solí následuje degradační fáze ve stavu II, kdy jsou procesy řízeny rozpouštěním portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). U low-pH betonů je obsah portlanditu výrazně nižší.



Obr. 3: Schematické zobrazení vývoje pH ve vodě a rozpouštění minerálních fází při degradaci cementu. Hodnoty na osách pH a cykly výměny vody v pórech (respektive čas) jsou orientační (Ochs et al., 2015)

4.2.3.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). V pozdější fázi je třeba počítat s možnou erozí materiálu vodou.

Z hlediska provozní životnosti je však třeba s těmito jevy počítat a je nutné, aby konstrukce byla správně navržena s ohledem na plánovanou dobu funkce v HÚ.

4.2.3.3 Mikrobiologické vlivy

Hornina i podzemní voda jsou v počátečním stavu HÚ RAO důležitým zdrojem bakterií, jak je již popsáno v kapitole o ovlivnění bentonitu, které mohou v pozdějším procesu vývoje úložiště dále ovlivňovat svými procesy beton a cementové materiály stejně jako low-pH beton.

4.3 Ovlivnění ocelových prvků

Dle textu v úvodu kapitoly 4 a Tab. 3 jsou popsány následující interakce a vlivy na ocelové prvky v počátečním stavu.

Koroze kovů je samovolná fyzikálně chemická interakce mezi kovem a prostředím jejímž důsledkem je postupná ztráta vlastností daného materiálu. Při korozi dochází k postupné degradaci materiálu od povrchu do středu, která ve výsledku vede ke ztrátě vlastností kovového prvku. Korozní rychlosti kovových materiálů budou záviset na vývoji podmínek v jejich okolí. Degradacním procesem kovových prvků je koroze. Zabránit korozi, nebo alespoň omezit její rozsah, lze v zásadě třemi různými způsoby: úpravou korozního prostředí, sekundární ochranou, primární ochranou. Sekundární ochrana spočívá v zamezení přímého styku materiálu s korozním médiem, a to buď úpravou povrchu materiálu, nebo vytvořením ochranného povlaku. Primární ochranou se rozumí volba materiálu vhodného složení, tedy použití materiálu, který je v daném prostředí odolný (Svoboda et al., 2013). Prostředí, v němž jsou kovové (ocelové) prvky umístěny, je definováno horninovým prostředím a používanými stavebními materiály (cementem/betonem). Použití kovových materiálů a jejich povrchová úprava je volena s ohledem na použití v prostředí důlního díla a na základě znalostí a zkušeností z běžné stavební praxe.

U konstrukcí využívajících ocelových prvků se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce. Z hlediska provozní životnosti je však třeba s těmito jevy počítat a je nutné, aby konstrukce byla správně navržena s ohledem na plánovanou dobu funkce v HÚ.

4.3.1 Ovlivnění oceli bentonitem

4.3.1.1 Mechanické vlivy

Bentonit (v „suchém stavu“) bude na konstrukci působit pouze vlastní tíhou, ať již přímo nebo formou bočního tlaku. Správně navrženou ocelovou konstrukci by toto namáhání nemělo ovlivnit.

K výraznějšímu namáhání dojde až v případě, že se bentonit dostane do styku s vodou a začne bobtnat a dojde k vývinu bobtnacího tlaku. S takovýmto zatížením by měly ocelové konstrukce po dobu své životnosti počítat a být na něj navrženy.

Potenciálně nepříznivým ovlivněním může být situace, kdy k bobtnání dojde v průběhu instalace konstrukce. V takovém případě může dojít k předčasnému zatížení konstrukce, které může vést k deformaci konstrukce či jejímu porušení.

4.3.1.2 Mikrobiologické vlivy

V případě oceli (stejně jako u ostatních konstrukčních prvků a materiálů) bude bentonit z mikrobiologického hlediska v počátečním stavu úložiště působit jako důležitý zdroj

mikroorganismů, které mohou v dlouhodobém procesu vývoje HÚ RAO způsobovat korozi oceli. V provozní fázi lze předpokládat minimální ovlivnění.

4.3.2 Ovlivnění oceli běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

4.3.2.1 Teplotní vlivy

Hydratační teplo může potenciálně ovlivnit přilehlé konstrukce, které mohou mít nižší tepelnou odolnost. Tento případ je však velmi nepravděpodobný, neboť ocel má výrazně vyšší tepelnou odolnost, než je teplota při hydrataci a zrání betonu.

4.3.2.2 Chemické a mineralogické vlivy

Beton je vysoce alkalický materiál. Hodnota pH čerstvě uloženého betonu bývá obvykle v rozmezí 12 až 13. V tomto rozsahu alkality je zabetonovaná výztuž chráněná před korozi pasivačním filmem vázaným na povrch výztuže. Hovoří se o alkalické pasivaci výztuže betonem. Obdobně budou na povrchu pasivovány ostatní kovové konstrukční prvky v kontaktu s čerstvými cementovými materiály. Když se však pasivační film poruší, může nastat koroze kovového prvku/výztuže. Obdobně jako u běžných cementových materiálů a betonů, bude i u záměsi se sníženým pH (low-pH betonu) docházet k pasivaci povrchů kovových materiálů, neboť hodnota pH bude > 10 . U tohoto materiálu existuje riziko, že pH prostředí bude klesat rychleji než u běžných betonů/cementových materiálů a bude tak dříve nastávat koroze a degradace kovových prvků.

Významné ovlivnění kovových konstrukčních prvků cementovými materiály se v provozní fázi nepředpokládá.

4.3.2.3 Mikrobiologické vlivy

Beton stejně tak jako bentonit a podzemní voda může představovat v hlubinném úložišti zdroj mikrobiálního osídlení pro dlouhodobé ovlivnění těchto materiálů, i když je množství bakterií v těchto materiálech nižší. U low-pH betonu, který je mikrobiologicky méně nehostinný, je možné očekávat významnější vliv než v případě běžného betonu. V provozní fázi lze však v obou případech předpokládat minimální ovlivnění.

4.3.3 Ovlivnění oceli horninovým prostředím a podzemní vodou

4.3.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ve vodném/vlhkém prostředí bude docházet ke korozi kovových konstrukčních prvků. Primárními korozními produkty oceli jsou oxidy a hydroxidy železa projevující se na povrchu jako rez. Aby tyto korozní děje mohly nastat, musí být přítomna voda a kyslík. Zabránit korozi, nebo alespoň omezit její rozsah, lze v zásadě třemi různými způsoby: úpravou korozního prostředí, sekundární ochranou, primární ochranou. Sekundární ochrana spočívá v zamezení přímého styku materiálu s korozním médiem, a to buď úpravou povrchu materiálu, nebo vytvořením ochranného povlaku. Primární ochranou se rozumí volba materiálu vhodného složení, tedy použití materiálu, který je v daném prostředí odolný (Svoboda et al., 2013).

Prostředí, v němž jsou kovové (ocelové) prvky umístěny je definováno horninovým prostředím, podzemní vodou a jejich geochemickými vlastnostmi.

Použití kovových materiálů a jejich povrchová úprava je volena s ohledem na použití v prostředí důlního díla a na základě znalostí a zkušeností z běžné stavební praxe. S ohledem na toto by působení horninového prostředí a podzemní vody v provozní fázi nemělo výrazně ovlivnit vlastnosti kovových konstrukčních prvků.

4.3.3.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). Při návrhu konstrukčních prvků je třeba s tímto počítat.

4.3.3.3 Mikrobiologické vlivy

V případě oceli (stejně jako v případě ostatních konstrukčních prvků a materiálů) jsou hornina i podzemní voda v počátečním stavu úložiště důležitými zdroji bakterií, které budou ocelové konstrukční prvky a materiály v pozdějším vývoji HÚ ovlivňovat svou činností (5.4.4.3).

4.4 Ovlivnění organických materiálů

Dle textu v úvodu kapitoly 4 a Tab. 3 jsou popsány následující interakce a vlivy na organické materiály v počátečním stavu.

U částí konstrukcí využívajících organických prvků (injektáží) se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce. Z hlediska provozní životnosti je však třeba s těmito jevy počítat a je nutné, aby konstrukce byla správně navržena s ohledem na plánovanou dobu funkce v HÚ.

4.4.1 Ovlivnění organických materiálů bentonitem

Vzhledem k sekvenci prací při výstavbě HÚ se nepředpokládá styk bentonitu s organickými materiály při jejich instalaci. Bentonit jako součást inženýrských bariér a jako výplň bude instalován až po instalaci organických materiálů.

4.4.1.1 Mechanické vlivy

Bentonit (v „suchém stavu“) bude na blízké okolí působit pouze vlastní tíhou, ať již přímo nebo formou bočního tlaku. K výraznějšímu namáhání dojde až v případě, že se bentonit dostane do styku s vodou a začne bobtnat a dojde k vývinu bobtnacího tlaku. Správně navrženou konstrukci, resp. vybranou a provedenou injektáž, by toto namáhání nemělo ovlivnit. Jinak by neplnila svůj účel již od počátku/ instalace.

4.4.1.2 Mikrobiologické vlivy

Na organické materiály bude bentonit v počátečním stavu úložiště působit jako důležitý zdroj mikroorganismů, který může v dlouhodobém procesu vývoje HÚ vyvolávat změny použitých materiálů. Organické materiály budou z dlouhodobého hlediska fungovat jako zdroj živin pro

rozvoj bakteriálních společenstev, neboť obsahují látky (např. formaldehyd či naftalen), které bakterie mohou využít pro svůj růst a vývoj (Hallbeck et al., 2012; Pedersen et al., 2008).

V případě rozsáhlejší mikrobiální činnosti v důsledku přítomnosti organických látek je možné očekávat rychlou degradaci organických komponent, a tedy negativní efekt mikrobiální aktivity již v průběhu provozní fáze.

4.4.2 Ovlivnění organických materiálů běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

4.4.2.1 Teplotní vlivy

Hydratační teplo betonu může nepříznivě ovlivnit organické materiály. Zvýšená teplota může vést ke změnám užitečných vlastností organických materiálů a jejich případné degradaci.

4.4.2.2 Chemické a mineralogické vlivy

Alkalické prostředí cementových materiálů může urychlovat degradaci organických materiálů. Pokud budou v prostředí HÚ použity organické materiály, budou splňovat požadavky na odolnost a životnost těchto prvků na základě zkušeností z běžné stavební praxe. V rámci projektu DOPAS byly vzorky injektážní hmoty ve dvou formách, kompaktní tvrdá a pěnová, vloženy do alkalizovaných roztoků syntetické granitické vody (pH až 13) a dlouhodobě sledovány. Interakce obou forem hmoty s alkalickými roztoky byla minimální a bez viditelného vlivu na povahu a strukturu hmoty (Večerník et al., 2016). Působení low-pH betonu na organické materiály používané v HÚ bude obdobné jako u běžných cementových materiálů, prostředí bude méně agresivní (méně alkalické) a proto by případné jevy měly probíhat v ještě menší míře. Ovlivnění jejich funkce chemickým působením alkalické fronty případně cementovými minerálními fázemi by v provozní fázi HÚ tedy nemělo nastat.

4.4.2.3 Mikrobiologické vlivy

Beton může představovat v hlubinném úložišti zdroj mikrobiálního osídlení pro ovlivnění organických materiálů, i když je množství bakterií v těchto materiálech nižší, než v případě bentonitu a podzemní vody. U low-pH betonu, který je mikrobiologicky méně nehostinný, je možné očekávat významnější vliv než v případě běžného betonu. V případě rozsáhlejší mikrobiální činnosti v důsledku přítomnosti organických látek je možné očekávat rychlou degradaci organických komponent, a tedy negativní efekt mikrobiální aktivity již v průběhu provozní fáze.

4.4.3 Ovlivnění organických materiálů horninovým prostředím a podzemní vodou

4.4.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Pokud budou v prostředí HÚ použity organické materiály, budou splňovat požadavky na odolnost a životnost těchto prvků na základě zkušeností z běžné stavební praxe. Na základě těchto zkušeností je možno tvrdit, že nedochází k degradaci či ovlivnění těchto organických materiálů podzemní vodou či horninovým prostředím samotným působením chemických či mineralogických vlivů.

4.4.3.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). Při návrhu konstrukčních prvků je třeba s tímto počítat.

4.4.3.3 Mikrobiologické vlivy

V případě organických materiálů (stejně jako v případě ostatních konstrukčních prvků) jsou hornina i podzemní voda v počátečním stavu úložiště důležitými zdroji bakterií, které mohou v pozdějším vývoji HÚ využívat organické materiály jako živnou půdu pro svůj rozvoj, a tak nepřímo ovlivňovat ostatní konstrukční prvky. V případě rozsáhlejší mikrobiální činnosti v důsledku přítomnosti organických látek je možné očekávat rychlou degradaci organických komponent, a tedy negativní efekt mikrobiální aktivity již v průběhu provozní fáze.

5 Popis interakcí ovlivňujících konstrukční prvky a materiály z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

Tak jako v předchozí kapitole budou vlivy a interakce popisovány z pohledu ovlivněného materiálu/prvku.

Pro většinu procesů, které by mohly ovlivňovat konstrukční prvky je potřeba přítomnost vody, a to jak pro chemické reakce, transport hmoty, bobtnání bentonitu, rozvoj mikrobiálního osídlení apod. Podzemní voda pocházející z hostitelské horniny přímo ovlivňuje funkci a integritu každé složky hlubinného úložiště. Je nutné znát kompletní složení podzemní vody (výchozí stav) a vývoj jejího složení v čase před a po interakci s bariérami hlubinného úložiště. Samotný pohyb podzemní vody v hornině je závislý na přítomnosti otevřených puklin a propojených pórů. V tomto prostředí dochází k transportu rozpuštěných složek advekcí (rychlost $< 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). V zónách, kde voda nemůže proudit tj v pórovém systému horniny, nebo se pohybuje jen nízkou rychlostí, (rychlost $< 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), dominuje transport rozpuštěných složek difúzí.

Během stavby a provozních činností v hlubinném úložišti dojde v hostitelské hornině obklopující úložiště k desaturaci a vzniku oxidačních podmínek a vystavení atmosférickému tlaku, to způsobí i změny ve složení podzemní vody. Při výstavbě vznikne v hornině zóna ovlivněná ražbou, tzv. excavation disturbed zone (EDZ). S uzavřením podzemních prostor úložiště (ukládacích vrtů, galerií, chodeb) dojde k obnovení původních podmínek a resaturaci EDZ a horniny kolem EDZ. Během tohoto procesu dojde k chemické nerovnováze mezi podzemní a pórovou vodou v EDZ, dojde ke spotřebování kyslíku a vzniku redukčních podmínek v úložišti. Je velmi důležité znát vlastnosti podzemní a pórové vody, jež bude sytit systém inženýrských bariér a která silně závisí na lokalitě hlubinného úložiště. Její chemismus totiž ovlivňuje hydrataci a bobtnací schopnost bentonitu nebo může měnit vlastnosti betonu a ovlivnit jeho životnost, stejně jako životnost dalších konstrukčních prvků.

Jak je zmíněno už v kapitole, která se zabývá ovlivněním materiálů v počátečním stavu, k výraznějšímu ovlivnění materiálů mikrobiologickými procesy dojde pravděpodobně až v dlouhodobém časovém horizontu, tedy v období hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ, neboť zpočátku budou fyzikálně-chemické podmínky v materiálech použitých v úložišti nehostinné (vysoká teplota, sucho, možné radioaktivní záření). Působení mikroorganismů tak lze očekávat až po zavodnění celého systému. Je ale třeba mít na paměti, že zavodnění a následný rozvoj mikrobiální činnosti budou pravděpodobně nastávat u různých interagujících materiálů různě rychle. Ke korozi ocelových materiálů může například dojít již během několika let. Dalším důležitým bodem je vzájemnost všech mikrobiálních interakcí. Např. koroze oceli na rozhraní s bentonitem a následné zpětné ovlivnění bentonitu výluhem železa z oceli a mikrobiálním biofilmem na povrchu oceli nelze jednoduše oddělit jako dva nezávislé procesy a je potřeba vždy nahlížet na interakce v obou směrech zároveň.

Zvýšená teplota prostředí ovlivňuje chemicko-fyzikální a mikrobiologické děje a jevy. Na základě výpočtů dlouhodobého vývoje teplot v HÚ (Kobylka, 2019) je možno v prostředí úložiště očekávat dosažení teplot 53 až 75 °C v závislosti na lokalitě a způsobu ukládání. Zvýšená teplota prostředí úložiště je důsledkem šíření zbytkového tepla z uloženého VJP. Za maximální teplotu prvků komponent vnitřní vestavby UOS lze považovat teplotu tání daného materiálu. Limitní teplota na rozhraní bentonitu byla v analýze (Šik 2021) uvažována 95 °C.

Prahovou hodnotu (rozhraní UOS/ bentonit) 100 °C, převzatou ze švédského konceptu, uvádí Vokál a kol. (2010). Prahová hodnota by měla být pro další posuzování zmenšena o tzv. bezpečnostní rezervu. Obecně se uvažuje 5 °C.

5.1 Souhrnné vlivy zvýšené teploty

Teplota v HÚ dle modelových výpočtů šíření tepla může být až 75 °C. Zvýšená teplota výrazně neovlivní základní vlastnosti bentonitu, oceli, low-pH betonu, běžného betonu a cementových materiálů, ale může ovlivnit jejich životnost, neboť zvýšená teplota urychluje mnohé degradační procesy. U organických materiálů (v závislosti na jejich typu) lze potenciálně předpokládat i výrazné ovlivnění jejich vlastností vlivem teploty.

Většina chemických geochemických a mineralogických jevů je ovlivňována teplotou, a to že se zvyšující se teplotou jsou tyto děje akcelerovány. Bude tedy docházet k rychlejšímu rozpouštění minerálních fází, posunuto bude ustavování (geo)chemických rovnováh, srážení a vznik minerálních fází apod.

Dále je třeba počítat s tepelnou rozpínavostí materiálů zejména ve spojitosti s tepelným gradientem. Tepelný gradient na konstrukcích může způsobit výrazné mechanické namáhání vlivem různé velikosti tepelné expanze dané rozdílnou teplotou. Obdobně také působí ohřátí dvou materiálů s rozdílnou tepelnou roztažností. Beton se vzrůstající teplotou zvětšuje svůj objem, a naopak s klesající teplotou zmenšuje svůj objem. Rovněž záleží na velikosti objektu či prvku z betonu. Přibližně lze velikost roztažení či zkrácení betonového tělesa stanovit takto: $\Delta L = 1 \text{ mm}/10 \text{ m}/10 \text{ }^\circ\text{C}$. To znamená že betonový prvek délky 10 m, jehož teplota se zvýší o 10 °C se protáhne o 1 mm. Hodnoty koeficientu lineární teplotní roztažnosti pro ocel, beton/železobeton jsou maximálně v rozmezí jednoho řádu (10^{-6} až 10^{-5} m/m·K), vzájemné ovlivnění způsobené různou tepelnou roztažností materiálů je tedy minimální (Svoboda a kol., 2013).

Zvýšená teplota bude mít na mikrobiální aktivitu u všech použitých materiálů podobný vliv. Do určitého stupně bude docházet vlivem vyšších teplot ke zvyšování rychlosti metabolismu mikroorganismů akcelerací kinetiky chemických reakcí (Turick and Berry, 2016), při zvyšování teploty dojde teoreticky ke zdvojnásobení tempa růstu mikroorganismů při změně teploty o každých 10 °C (Turick and Berry, 2016). Ovšem příliš vysoké teploty způsobí denaturaci enzymů zapojených v metabolických drahách (Atkinson and Mavituna, 1991) a to společně s vysušením materiálu a nedostatkem vody způsobí zpomalení aktivity mikroorganismů, až k jejímu úplnému zastavení a přežívání organismů ve formě spor. Teplota denaturace enzymů je ovšem specifická pro každý organismus a enzym a většinou dojde k nahrazení aktivity inaktivovaného mikroorganismu jiným, který je adaptovaný na vyšší teploty. Většina bakterií zapojená například do procesu MIC přežije v rozsahu teplot 10–75 °C (Axelsen and Rogne, 1998), ale např. ve studii Azkarate et al. (2004) se optimum některých SRB nacházelo mezi 25–35/40 °C. Za příliš zvýšené teploty dochází v bentonitu ke snížení aktivity a životaschopnosti bakterií až k jejich případnému úplnému potlačení (Aoki et al., 2010; Černá et al., 2021; Pedersen et al., 2000). Při vysokých teplotách mohou bakterie přežívat ve formě spor. Schopnost spor přežívat extrémní podmínky závisí mimo jiné na přítomnosti vody. Zatímco v suspendovaném stavu dochází k úplnému potlačení mikrobiální aktivity i schopnosti následné regenerace (tedy sterilizaci bentonitu) již při 90°C (Černá et al., 2022), bentonit v práškové podobě nebyl úspěšně vysterilizovaný ani při dlouhodobém vystavení teplotě 150°C, i když i zde byl pozorován výrazný pokles schopnosti regenerace ze spor (Kašpar et

al., 2021). V případě kompaktovaného bentonitu dochází vlivem zvýšených teplot také zároveň k vysušování materiálu, což je pravděpodobně jedna z hlavních příčin potlačené aktivity mikroorganismů (Aoki et al., 2010; Stroes-Gascoyne et al., 1996; Stroes-Gascoyne and West, 1997). Podobně jako u bentonitu a MIC se dá očekávat, že v prostředí úložiště bude bio-deteriorace betonu a cementových materiálů záviset na míře saturace vodou a při vysokých teplotách bude spíše zpomalena či úplně potlačena. Na druhou stranu může zvýšená teplota a následné vysušení bentonitu způsobit popraskání kompaktovaného materiálu, čímž vznikne prostor pro budoucí rozvoj mikroorganismů (Stroes-Gascoyne and West, 1997), což může mít negativní vliv též na dlouhodobou stabilitu cementových materiálů v kontaktu s takto zatíženým bentonitem.

Zvýšená teplota nebude mít na interakci organických materiálů s ostatními konstrukčními prvky pravděpodobně žádný speciální efekt, kromě toho již popsáno u ostatních materiálů.

5.2 Ovlivnění bentonitu

Dle textu v úvodu kapitoly 5 a Tab. 4 jsou popsány následující interakce a vlivy působící na bentonit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

5.2.1 Ovlivnění bentonitu běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

5.2.1.1 Chemické a mineralogické vlivy

Dlouhodobé vlivy cementových materiálů a běžných betonů na bentonit vycházejí z jevů, které jsou popsány v kapitole 4.1.1. Jeden ze základních parametrů prostředí, hodnota pH výluhu, je pro bentonitové materiály přibližně 8,5, zatímco pro cementové materiály založené na běžném cementu je 12-13 i více, pro beton se sníženým pH je přibližně 11,0-11,5. Již z tohoto je patrné, že bude docházet ke vzájemnému ovlivňování chemismu všech studovaných materiálů. Látky rozpuštěné do podzemní/pórové vody budou ovlivňovat chemické a následně fyzikální vlastnosti a mineralogické složení materiálů (viz Obr. 1). Interakcí alkalické fronty s bentonitem může docházet k významným změnám vlastností těchto materiálů, bentonit je ve vysoce alkalickém prostředí nestabilní a rozpouští se, popř. dochází ke srážení nových sekundárních fází. Je možno předpokládat, že zpočátku dojde na rozhraní bentonitu a cementových materiálů k rozpouštění/srážení uhličitánů. Pomalé rozpouštění při vysokém pH platí i pro ostatní minerály bentonitu jako je např. křemen, živec, pyrit či sádrovec. Postupně bude docházet ke zpomalování postupu alkalické fronty. Z přesycených roztoků mohou krystalizovat sekundární minerály. Blíže k rozhraní s vyšším pH mohou krystalizovat především C(A)SH fáze, illit, živce a hliníkem bohaté zeolity a dále od rozhraní, kde je nižší pH, mohou krystalizovat křemíkem bohaté zeolity (viz Obr. 1). Ovlivnění bentonitu cementovými materiály bude souviset s degradací cementových materiálů, kdy v průběhu času bude postupně klesat hodnota pH vody/výluhu z cementových materiálů, koncentrace hydroxylových iontů a obsahů rozpuštěných látek (viz Obr. 3 – Vývoj chemismu cementové vody). V průběhu času tak bude postupně klesat působení těchto negativních vlivů na bentonit.

Působením vysoce alkalické fronty ($\text{pH} > 12,5$) výluhu z běžných betonových a cementových materiálů bude docházet k vyčerpávání pufrční kapacity bentonitu a k následným rozpouštěním minerálních fází ve vysoce alkalickém prostředí. Výrazný vliv na chemismus prostředí budou mít kromě vysoce alkalické fronty i vápenaté ionty uvolňované

rozpuštěním portlanditu, který je přítomen v betonových a cementových materiálech. Oproti tomu výluh z low-pH betonu má nižší hodnoty pH (11-11,5), a proto všechny procesy a změny vyvolané působením hydroxylových iontů budou méně výrazné a budou probíhat pomaleji (např. snižování pufrací kapacity bentonitu, rozpuštění složek a změny v mineralogii). Protože v low-pH betonu je výrazně sníženo množství portlanditu bude docházet k menšímu ovlivnění bentonitu vápenatými ionty a vzroste význam působení křemíku/křemičitanů (viz Obr. 1).

5.2.1.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce z betonu a cementových materiálů postupně degradují a ztratí svoji funkci. Z toho vyplývá potenciální kolaps těchto konstrukcí vedoucí k vyššímu zatížení bentonitu a možnost vzniku diskontinuit/volných prostor/preferenčních cest pro proudění vody.

Při návrhu bentonitové konstrukce by se s těmito vlivy mělo počítat tak, aby jim konstrukce byla schopná odolat (zatěsnit volné prostory bobtnáním, odolat erozi, ...).

5.2.1.3 Mikrobiologické vlivy

Na rozhraní bentonit/beton bude z mikrobiologického hlediska velkou měrou docházet především k ovlivňování betonu bentonitem, avšak i opačný směr interakce je možný. Po zavodnění systému se začne z betonu uvolňovat alkalický výluh, který může zvýšit pH bentonitu na rozhraní s betonem (Gaucher and Blanc, 2006; Shrestha et al., 2022; Taborowski and Pedersen, 2018). Zvyšování pH následně způsobí změny v rozpuštění a srážení bentonitu a tím může ovlivnit bobtnací tlak a hustotu bentonitu (Sánchez et al., 2006). Toto může vést ke vzniku životního prostoru pro mikroorganismy. Na druhou stranu vlivem zvýšení pH bentonitu alkalickým výluhem z betonu může dojít ke snížení množství mikroorganismů a jejich aktivity v bentonitu (Taborowski and Pedersen, 2018; Shrestha et al., 2022). Navíc může beton obsahovat chemickou sloučeninu (mravenčan vápenatý), který má inhibiční efekt na bakterie oxidující sulfidy a bakterie oxidující i redukující železo a zabraňuje tak korozi materiálů (Turick and Berry, 2016; Yamanaka et al., 2002). Podobně bakteriálně inhibiční vlastnosti má i hydroxid vápenatý (Morrier et al., 2003) vzniklý rozpouštěním minerálních fází betonů při loužení.

Stejně jako běžný beton může mít i LPC vliv na mikrobiální aktivitu v bentonitu, jak ukázala studie Shrestha et al. (2022). V přítomnosti LPC došlo k výrazně nižšímu rozvoji mikrobiální aktivity než v samotném bentonitu. Přestože beton obsahoval poměrně velké množství sulfátu, též nedošlo ve vzorcích k většímu rozvoji SRB bakterií díky přítomnosti betonu. Přítomnost betonu ovlivňovala i složení mikrobiálního společenstva. V betonových vzorcích dominoval fakultativně anaerobní rod *Bacillus*, navíc se ale ve vzorcích s betonem objevili rody bakterií podporující deterioraci cementu (*Dethiobacter* a *Anaerosolibacter*). V jednom vzorku se objevil i rod *Thermincola*, což je železo-redukující bakterie, která může způsobovat illitizaci bentonitu, čímž dojde ke snížení jeho bobtnacích schopností (Kim et al., 2004).

5.2.2 Ovlivnění bentonitu ocelí

5.2.2.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ve fázích vývoje HÚ, kdy bude již bentonitová bariéra nasycena a případně bude působit zvýšená teplota bude na ocelových prvcích docházet ke korozním jevům, které by měly být

relativně rovnoměrné. Při hodnocení korozních procesů ocelových materiálů a jejich vlivů na bentonit lze vyjít např. z doposud prováděných experimentů pro korozi UOS (Dobrev et al. 2020, Dobrev et al. 2021). Korozní produkty, které jsou předpokládány v kompaktovaném bentonitu jsou siderit a čukanovit či magnetit. Díky korozním procesům může vznikat i plynný vodík a pravděpodobně může docházet ke spolusrážení sideritu a kalcitu, případně se mohou tvořit křemičitanové korozní produkty.

Kovové konstrukční prvky nemají v dlouhodobém časovém horizontu bezpečnostní funkci, tudíž jejich degradace a ovlivnění bentonitu nebývají z tohoto pohledu hodnoceny. Degradací kovových prvků mohou vzniknout nehomogenity a preferenční cesty v bentonitovém materiálu.

5.2.2.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky z oceli postupně degradují a ztratí svoji funkci. Z toho vyplývá potenciální kolaps těchto konstrukcí vedoucí k vyššímu zatížení bentonitu a možnost vzniku diskontinuit/volných prostor/preferenčních cest pro proudění vody.

Při návrhu bentonitová konstrukce by se s těmito vlivy mělo počítat tak, aby jim konstrukce byla schopná odolat (zatěsnit volné prostory bobtnáním, odolat erozi, ...).

5.2.2.3 Mikrobiologické vlivy

V rámci interakce bentonit/ocel bude z mikrobiologického hlediska docházet především k ovlivnění směrem od bentonitu k oceli, což se bude projevovat mikrobiální korozí oceli, jak je popsáno v kapitole 5.4.1.3. Na druhou stranu z korodované oceli bude do bentonitu difundovat železo reagující s bentonitem. To způsobí změny např. v pH bentonitu a dalších jeho geochemických vlastnostech (Hadi et al., 2019; Marty et al., 2010), což následně může ovlivnit skladbu mikrobiálního společenstva. Navíc železo difundované do bentonitu využijí železo-redukující bakterie (Kostka et al., 1999), které redukcí trojmocného železa na dvojmocné budou nepřímo působit geomechanické změny v bentonitu, jako je snížení bobtnavosti, zvýšení hydraulické vodivosti, či snížení plasticity a těsnících vlastností (Gilmour et al., 2021; Kim et al., 2004).

5.2.3 Ovlivnění bentonitu organickými materiály

5.2.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ovlivnění bentonitu degradací organických materiálů je možno obecně shrnout jako možný vznik nehomogenity a preferenční cesty v bentonitovém materiálu. Organické materiály a jejich degradační produkty mohou podporovat rozvoj mikrobiálního osídlení v bentonitu. Ovlivnění mineralogických fází bentonitu působením organických látek se nepředpokládá.

5.2.3.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky využívající organických materiálů postupně degradují a ztratí svoji funkci. Z toho vyplývá potenciální kolaps těchto konstrukcí vedoucí k vyššímu zatížení bentonitu a možnost vzniku diskontinuit/volných prostor/preferenčních cest pro proudění vody.

Při návrhu bentonitové konstrukce by se s těmito vlivy mělo počítat tak, aby jim konstrukce byla schopná odolat (zatěsnit volné prostory bobtnáním, odolat erozi, ...).

5.2.3.3 Mikrobiologické vlivy

Působení organických materiálů na bentonit a ostatní materiály v HÚ je nepřímé. V organických materiálech se nacházejí látky (např. formaldehyd, naftalen), které mikroorganismy využívají pro svůj růst a rozvoj (Hallbeck et al., 2012; Pedersen et al., 2008). V podzemních tunelech ve finském ONKALO podporovaly látky z organických materiálů rozvoj především metanogenních bakterií a po saturaci mikrobiálního slizu podzemní vodou i rozvoj SRB (Pedersen et al., 2008). Následné laboratorní experimenty potvrdily, že tři organická aditiva podporovala růst mikroorganismů izolovaných z podzemní vody z finského ONKALO, navíc dvě aditiva samotná již obsahovala mikroorganismy (Hallbeck et al., 2012). Použitím organických materiálů může tedy dojít k podpoře mikrobiální činnosti v bentonitu a k potenciálnímu zesílení negativních efektů bentonitu na ostatní materiály (např. deteriorace betonu či koroze oceli).

5.2.4 Ovlivnění bentonitu horninovým prostředím a podzemní vodou

5.2.4.1 Chemické a mineralogické vlivy

Po uzavření úložiště dojde k postupné saturaci bentonitu podzemní vodou z okolní hostitelské horniny. Složení podzemní vody není v porovnání s bentonitovou pórovou vodou tak odlišné jako je např. složení vody po interakci s cementovými materiály (cementové pórové vody). Ovlivnění a degradace bentonitu podzemní vodou bude výrazně pomalejší v porovnání s ovlivněním bentonitu cementovými materiály a vodami (viz kapitola 4.1.1.2). Na rozhraní bentonit/hostitelská hornina může v závislosti na různých faktorech docházet k jevům jako mechanická a chemická eroze bentonitu, vznik jílových koloidů, rozpouštění a srážení minerálních fází, ovlivnění složení pórové vody bentonitu a ovlivnění chemických, fyzikálních i geotechnických vlastností (Červinka et al. 2015). Bude pokračovat vývoj prostředí, který je popsán v kapitole 4.1.2.1.

5.2.4.2 Mechanické vlivy

Ovlivnění bentonitu horninovým prostředím je shodné/pokračováním ovlivnění popsaném v 4.1.2.2.

Po vyplnění prostor bentonitem dojde nejprve k „vysušení“ okolí, kdy bentonit absorbuje vodu z okolí (zejména EDZ). Postupně dojde k nárůstu vlhkosti uvnitř bentonitu a nárůstu bobtnacího tlaku, který povede k namáhání rozhraní bentonit hornina. Dále pak v závislosti na dostupnosti vody v horninovém masivu dojde k postupnému sycení bentonitu a doplnění vody/nasycení puklinového prostředí. Rychlost/dynamika těchto procesů výrazně závisí na dostupnosti vody horninovém prostředí (přítoky/prodění). V případě malé dostupnosti vody bude proces zejména řízen/omezován horninovým prostředím. V případě velké dostupnosti vody bude proces řízen šířením vody v bentonitu. Zde v extrémním případě, při výskytu proudící vody může dojít k erozi bentonitu.

5.2.4.3 Mikrobiologické vlivy

Podzemní voda a horninové prostředí jsou společně s bentonitem hlavními zdroji mikroorganismů v HÚ. Zásadní vliv podzemní vody na bentonit je jeho zavodnění, což umožní nejen požadované nabobtnání bentonitu, ale také rozvoj mikrobiálních společenstev. V počáteční fázi vývoje HÚ nedojde k přílišnému rozvoji mikrobiálních společenstev, neboť vyšší teplota společně s vysušením materiálu tento rozvoj neumožní. V dlouhodobém vývoji HÚ budou hornina i podzemní voda přispívat k rozvoji bakterií v bentonitu (např. SRB či IRB) a tím mohou zesilovat takové děje jako je mikrobiální koroze. Stroes-Gascoyne et al. (2002) ve studii zkoumající vliv saturace podzemní vodou na bentonitový buffer potvrdili přítomnost mikroorganismů v bentonitu a jejich několikanásobně větší rozvoj především na rozhraní bentonitu a okolního prostředí. Jiná studie z podzemního prostředí ukázala největší přítomnost bakterií (původem z bentonitu či podzemní vody) v bentonitovém bufferu v okolí horniny (Lydmark and Pedersen, 2011).

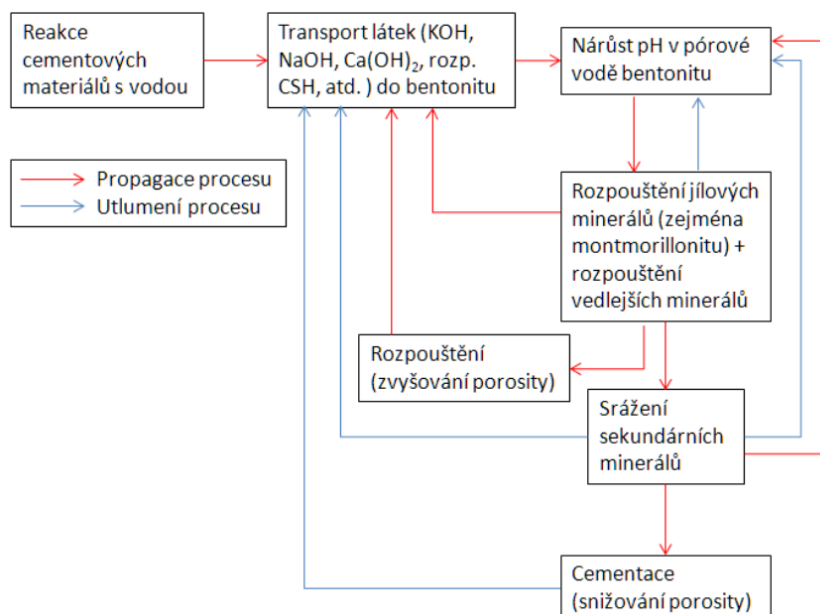
5.3 Ovlivnění běžného betonu, cementových materiálů a low-pH betonu

Dle textu v úvodu kapitoly 5 a Tab. 4 jsou popsány následující interakce a vlivy působící na běžný beton, cementové materiály a low-pH beton z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

5.3.1 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu bentonitem

5.3.1.1 Chemické a mineralogické vlivy

Vzhledem k tomu, že cementová matrice (a také běžný nebo low-pH beton) a bentonit jsou dva velice významné materiály v konceptu hlubinného úložiště s výrazně odlišnými vlastnostmi, je nezbytné zaměřit se na studium dějů na rozhraní obou materiálů. Může docházet k rozpouštění betonu, vzniku sekundárních minerálů a dalším doprovodným jevům, které mohou být ovlivněny rovněž fyzikálními podmínkami, zejména teplotou a pH. Je třeba si uvědomit, že v podmínkách vysoce alkalického pH může docházet ke změnám v poměru C : S ve složení C(A)SH fáze cementu (Červinka a Vopálka 2015). Procesy přitom nejsou jednosměrné, ale ovlivňují se navzájem (viz Obr. 4).



Obr. 4 Schéma interakce cementových materiálů a bentonitu

Působení bentonitu na cementové materiály bude zejména prostřednictvím bentonitové vody. Pro interakci/degradaci tak bude podstatné její složení, které se bude vyvíjet v čase a bude ovlivněno přítomností kyslíku, oxidačně-redukčním potenciálem, teplotou.

Dragolici (2013) na základě až 10letých experimentů v úložišti Baita-Bihor (vzorky cementové pasty a směsi cement-bentonit/tuf; teplota ~ 10 °C; vlhkost 85-90 %) uvádí, že k ovlivnění cementového materiálu bentonitem nedochází. XRD spektra získaná pro směsi cement-bentonit a cement-tuf vykazovaly velmi malý pokles obsahu portlanditu. V difrakčních spektrech byly pozorovány stejné fáze jako u cementové pasty, v raných stádiích se tvořil ettringit a u starších vzorků byl pozorován úbytek ettringitu.

Obecně se dá počítat s ovlivňováním poměru vápníku a křemíku v cementovém materiálu, a tedy změnám v C(A)SH fázích. Abdel Rahman et al. (2013) uvádějí, že při experimentálních studiích lze první změny pozorovat až v řádu několika let od začátku experimentu. Lze předpokládat, že bentonit/bentonitová pórová voda budou působit vznik pH gradientu (nižší pH bentonitové vody a vyšší pH cementové pórové vody) vedoucí k rozpouštění portlanditu a zvýšení porosity. Dále budou procesy ovlivněny chemismem bentonitové pórové vody a může dojít k jevům jako karbonatace, síranový atak či hořčíkový atak.

5.3.1.2 Mechanické vlivy

Bentonit bude na konstrukci působit vlastní tíhou a bobtnacím tlakem, ať již přímo nebo formou bočního tlaku.

Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti HÚ se nepředpokládá dlouhodobá funkce běžných i low-pH betonových konstrukcí a předpokládá se jejich degradace. Mechanické namáhání tlakem bentonitu může jedním z důvodů pro porušení struktury konstrukcí.

5.3.1.3 Mikrobiologické vlivy

I po zavodnění budou zejména na styku bentonit/beton nepříznivé podmínky. Bentonit bude v kompaktovaném stavu vykazovat menší mikrobiální aktivitu (Černík et al., 2019; Grant, 2004; Motamedi et al., 1996; Pedersen, 2017; Pedersen et al., 2017) a na druhé straně se z betonu mohou louhovat po nějakou dobu alkalické sloučeniny ovlivňující jak chemismus, tak mikrobiální aktivitu okolí (Gaucher and Blanc, 2006; Shrestha et al., 2022; Taborowski and Pedersen, 2018).

Působením mikroorganismů přítomných v bentonitu může docházet ke snížení odolnosti a trvanlivosti betonu a cementových materiálů, beton stárne a křehne, dochází k tzv. bio-deterioraci betonu. K bio-deterioraci betonu dochází prostřednictvím vzniku mikrobiálních biofilmů (Li et al., 2017) a tedy přímým působením mikroorganismů nebo jejich metabolitů (Magniont et al., 2011). Bio-deteriorace je podrobně popsána ve zprávě Černá et al. (2021b, TZ 552/2021). Ve zkratce k ní dochází působením silných anorganických či slabých organických kyselin. Deteriorace betonových struktur kanalizačních systémů je způsobena působením především kyseliny sírové, která může být produktem síru oxidujících bakterií nebo vzniká oxidací sirovodíku uvolněného z kalu, který je produktem anaerobních SRB (Dopson and Johnson, 2012; Li et al., 2019). Alternativně může k narušení betonových struktur docházet také působením slabých organických (mléčná, propionová, máselná atd.) i jiných anorganických kyselin (např. dusičná) vyprodukovaných lokálně mikroorganismy povrchového biofilmu (Horikoshi, 1999; Pedersen, 1999; Turick and Berry, 2016). Jev bio-deteriorace je velmi rozšířen v různých prostředích (kanalizační potrubí, systémy pro zpracování odpadních vod, betonové pilíře v slaných a brakických vodách) a tak může hrát významnou roli i v HÚ RAO (Hamilton et al., 1995; Rogers et al., 1994, 1992; Wolfram et al., 1997).

Na druhé straně může mít biofilm na povrchu betonu protektivní účinky, zabraňuje jeho degradaci zpomalením deteriorace či její inhibicí (Dubiel et al., 2002; Örnek et al., 2002; Pedersen and Hermansson, 1991). V principu jde o mikrobiální precipitaci uhličitanu vápenatého (kalcitu), k níž dochází u různých bakterií (denitrifikační, SRB, IRB, fotosyntetizující, při oxidaci metanu) v důsledku jejich metabolické aktivity. Precipitace kalcitu způsobuje snížení permeability a propustnosti betonu pro korozivní látky a tím zvyšuje životnost betonových struktur (Hammes and Verstraete, 2002; Wang et al., 2016; Yamanaka et al., 2002).

V počátečních fázích, kdy bude pH betonu vysoké ($\text{OPC} > 12$), se dá předpokládat, že rozvoj mikrobiální aktivity bude potlačen (Rafrafi et al., 2017). Ukázalo se však, že k neutralizaci pH betonů může dojít již po 10 letech (Small et al., 2017). Pokles pH hodnot < 11 by mohl vést k rozvoji mikrobiální aktivity zejména v prostředí bohatém na mikroorganismy (bentonit, matečná hornina, spodní voda) (Mijnendonckx et al., 2018; Mijnendonckx et al., 2019b; Mijnendonckx et al., 2019a). Nicméně existuje celá řada mikroorganismů, které snášejí i vysoké pH (alkalifilní) a pokud je v prostředí dostatek živin, budou metabolizovat. Tyto příklady známe z prostředí s vysokým pH např. z vápencového lomu Harpur Hill v Buxton, kde lokální hodnoty pH dosahují až $\text{pH} > 12$. V sedimentech z této oblasti byla zaznamenána mikrobiální aktivita (redukce dodaných akceptorů) až do pH 11 (Rizoulis et al., 2012), což potvrzuje přítomnost extrémofilních anaerobních alkalifilních bakterií schopných redukovat nitráty, železité sloučeniny i sírany. Redukce oxyaniontů (nitráty) mohou vytvářet oxidující podmínky v blízkosti radioaktivního odpadu a tím zvyšovat mobilitu redox-senzitivních radionuklidů v prostředí úložiště (Durban et al., 2018). Na druhé straně produkty metabolismu bakterií mohou také s

radionuklidy vytvářet komplexy, čímž je demobilizují, jak ukázali experimenty se sedimenty z Harpur Hill obohacené o kyselinu citronovou (el. donor) v prostředí nitrátů nebo železitých sloučenin (el. akceptory) (Byrd et al., 2021). A konečně byla prokázána i aktivita metanogenních alkalifilních bakterií, které mohou produkovat metan z fermentačních produktů (H_2 a CO_2) (Rout et al., 2015). Všechny tyto studie jasně dokládají existenci bakterií s různými metabolickými preferencemi schopnými snášet vysoké pH.

Další fyzikální veličinou ovlivňující stabilitu výplňových materiálů je tlak. V očekávaném anaerobním prostředí HÚ bude docházet ke změnám tlakových podmínek v souvislosti s produkcí různých plynů mikroorganismy přítomnými v bentonitu. Změny těchto tlaků mohou vést nejen k popraskání bentonitu, ve kterém se budou plyny hromadit (Mulligan et al., 2009), ale potenciálně i k popraskání betonu na rozhraní s bentonitem. Jakákoli nehomogenita v betonu pak bude fungovat jako prostor pro rozvoj mikrobiálních společenstev pocházejících z bentonitu či horninového a vodního prostředí (Stroes-Gascoyne, 2010; Stroes-Gascoyne et al., 2002).

Stejně jako u běžného betonu může u low-pH betonu v místech styku s bentonitem docházet k tzv. bio-deterioraci a tedy k poškozování betonu. Na druhou stranu, podobně jako u běžného betonu, je možný výskyt biofilmu s protektivními účinky díky mikrobiální precipitaci uhličitanu vápenatého (Castro-Alonso et al., 2019). Také na LPC může působit tlak související s produkcí plynů mikroorganismy v bentonitu a potenciálně způsobit popraskání betonu na rozhraní s bentonitem, což by mohlo vést k rozvoji mikrobiálních společenstev v nově vzniklém prostoru (Stroes-Gascoyne, 2010; Stroes-Gascoyne et al., 2002).

Oproti běžnému betonu s $pH > 12$, má LPC nižší pH (okolo 11). Nižší pH může vést k dřívějšímu rozvoji mikrobiální aktivity na rozhraní betonu a bentonitu (či jiných rozhraních s prostředími bohatými na mikroorganismy – hornina, podzemní voda) (Mijnendonckx et al., 2018; Mijnendonckx et al., 2019b; Mijnendonckx et al., 2019a). Navíc i po zavodnění budou zpočátku na rozhraní beton/bentonit panovat nepříznivé podmínky díky kompaktování bentonitu na vysokou objemovou hmotnost, což pomůže omezit mikrobiální aktivitu (Černík et al., 2019; Grant, 2004; Motamedi et al., 1996; Pedersen, 2017; Pedersen et al., 2017). Kromě toho běžný beton s $pH > 12$ může mít destabilizační efekt na minerální strukturu bentonitu (Sánchez et al., 2006), oproti LPC se sníženým pH výluhu (White and Doudou, 2016). Ovšem i LPC bude zpětně chemicky ovlivňovat bentonit a výskyt a aktivitu bakterií na rozhraní beton/bentonit (Shrestha et al., 2022).

Určitým způsobem, jak předcházet degradaci betonu a cementových materiálů mikrobiálními společenstvy z bentonitu, je omezení mikrobiální aktivity v bentonitu. Kompaktováním bentonitu na vysokou objemovou hmotnost dojde k omezení mikrobiální aktivity (Černík et al., 2019; Grant, 2004; Motamedi et al., 1996; Pedersen, 2017; Pedersen et al., 2017) a kultivovatelnosti mikroorganismů (Pedersen, 2017). Ovšem musíme mít na paměti, že v saturovaných podmínkách se budou oba materiály navzájem chemicky ovlivňovat a struktura bentonitu na styčných plochách s betonem může být významně pozměněna. To, do jaké míry budou vzniklé podmínky příznivé pro rozvoj bakteriální společenstev by mělo být předmětem dalšího studia.

5.3.2 Vzájemné ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu

5.3.2.1 Chemické a mineralogické vlivy

Protože jsou si běžné cementové materiály a betony spolu s low-pH betony v základu velmi podobné, nepředpokládá se výrazné ovlivnění chemismu či mineralogie. Dá se očekávat, že na rozhraní materiálů (např. zátky z low-pH betonu a cementové injektáže) dojde k ekvilibraci pH a případné redistribuci portlanditu.

5.3.2.2 Mechanické vlivy

Nad rámeček degradace konstrukcí a z toho vyplývajícího zvýšeného zatížení se nepředpokládá specifické ovlivnění.

5.3.3 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu ocelí

5.3.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Alkalické prostředí cementových materiálů zaručuje samovolnou pasivaci oceli a velmi malé korozní rychlosti (při pH vyšším než 10). S poklesem hodnoty pH pórového roztoku dochází k aktivaci oceli a významnému zvýšení korozní rychlosti. Rychlost postupu karbonační fronty je závislá na kvalitě cementu i betonu a vlhkosti betonu (Novák et al., 2002). Důsledkem korozního napadení železa ve vlhkém betonu je vznik objemných korozních produktů (2 až 3 krát objemnějších než původní kov), které způsobí vznik trhlin v betonu.

K výrazné korozi ocelových prvků v betonu tedy může dojít v kombinaci přítomnosti vody a kyslíku a v prostředí s pH menším než 10,5. V prvních fázích vývoje úložiště (aerobní prostředí, bez přítomnosti vody) nebude splněna podmínka přítomnosti vody mimo přirozené vlhkosti a nízkého pH cementového prostředí. V dalších fázích vývoje HÚ již bude systém anaerobní a nasycený vodou, bude tedy záležet na době, kdy dojde k degradaci cementových fází a poklesu pH. Poté již budou korozní procesy probíhat za podmínek blízkých bentonitovému prostředí. Laboratorní studium korozních dějů v prostředí bentonitu a cementu je popsáno v technické zprávě SÚRAO 406/2019 (Dobrev et al., 2019). Vznik korozních produktů bude záviset na charakteru okolního prostředí. Korozními produkty mohou být klasické rzi (oxohydroxidy železa), hematit atd., vznikat mohou i křemičitanové korozní produkty (Dobrev et al. 2020).

Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti HÚ se nepočítá s bezpečnostní funkcí betonových konstrukcí a předpokládá se jejich degradace, a to jak samovolná, tak působením degradačních produktů ostatních konstrukčních prvků, v tomto případě kovů/ocelí.

5.3.3.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky z oceli postupně degradují a ztratí svoji funkci. Z pohledu betonových konstrukcí se jedná zejména o výztužné prvky (armatury, kotvy, ...), které zajišťují únosnost konstrukcí. Jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku betonové konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce. Dalším možným ovlivněním, je mechanické poškození konstrukce vlivem

korozních produktů. Korozní produkty mají větší objem než neporušený ocelový prvek, což vede „bobtnání“ a může vést k „roztržení betonové konstrukce.“

U betonových konstrukcí se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce. Z hlediska provozní životnosti je však třeba s těmito jevy počítat a je nutné, aby konstrukce byla správně navržena s ohledem na plánovanou dobu funkce v HÚ.

5.3.4 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu organickými materiály

5.3.4.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ovlivnění cementových materiálů a betonů organickými materiály (u betonů budou používány plastifikátory apod.) bude způsobeno nepřímo jejich degradačními produkty a spolupůsobením chemických a mikrobiologických vlivů. Běžně užívané betonové směsi i low-pH směs vyvinutá v rámci zakázky SÚRAO (Pernicová et al., 2019) obsahují organický plastifikátor, je tedy možné předpokládat, že při celkové degradaci betonové záměsi bude docházet i k degradaci plastifikátoru. Avšak s ohledem na množství, které je přidáváno do betonové záměsi, nebude mít tento organický materiál výrazný vliv na vlastnosti běžných či low-pH betonů. Vliv plastifikátorů a jejich degradačních produktů na vlastnosti cementových a jejich interakci s radionuklidy je studován v rámci projektu EURAD WP3 – CORI (Drtinová et al., 2021). Ovlivnění mineralogických vlastností působením organických látek se nepředpokládá.

Protože betonové konstrukční prvky nemají v dlouhodobém horizontu bezpečnostní funkci, je předpokládána jejich degradace i vlivem možného působení organických látek.

5.3.4.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky využívající organické materiály postupně degradují a ztratí svoji funkci. Z pohledu konstrukcí se jedná zejména o výztužné prvky (např. injektáž kotevních prvků), které zajišťují únosnost konstrukcí. Jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce.

U konstrukcí na bázi organických prvků se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce. Z hlediska provozní životnosti je však třeba s těmito jevy počítat a je nutné, aby konstrukce byla správně navržena s ohledem na plánovanou dobu funkce v HÚ.

5.3.4.3 Mikrobiologické vlivy

Působení organických materiálů na beton a cementové materiály i low-pH beton v HÚ je nepřímé. V organických materiálech se nacházejí látky, které mikroorganismy mohou využít pro svůj růst a rozvoj (Hallbeck et al., 2012; Pedersen et al., 2008) a tím může dojít k rozvoji takových procesů jako je bio-deteriorace betonu a cementových materiálů popsaná v kapitole 5.3.1.3. Na druhou stranu mikroorganismy mohou biomineralizací podporovat zacelování cementových trhlin pomocí CaCO_3 a superplastifikátory přidané do cementu mají schopnost tento jev podporovat (Amiri et al., 2018).

5.3.5 Ovlivnění betonu, cementových materiálů a low-pH betonu horninovým prostředím a podzemní vodou

Interakcemi podzemní vody s materiály inženýrských bariér a konstrukčních prvků na bázi cementových materiálů a vytvořených z běžného betonu bude vznikat interagovaná cementová voda, jejíž složení se může změnit až na pórovou vodu cementových materiálů. Tato voda může dále ovlivňovat ostatní materiály IB a konstrukční prvky v hlubinném úložišti.

5.3.5.1 Chemické a mineralogické vlivy

Budou probíhat a pokračovat procesy popsané v kapitole 4.1.2.1 a Obr. 3. Voda hraje klíčovou roli v interakcích mezi cementovou maticí a okolním prostředím, je hnací silou a zásadním účastníkem chemických reakcí mezi vnějšími materiály a cementovými fázemi. Chemické reakce jsou dvojího typu: rozpouštění hydratované a bezvodé fáze a/nebo srážení nově vytvořených produktů. Tyto reakce často probíhají z vnějšku betonu, postupují s časem směrem dovnitř a vytvářejí alterovanou zónu (Alexander et al., 2013). Degradace cementového materiálu ovlivňuje složení „cementové pórové vody“, kdy v počátečních fázích (stav I a II) je dominantní složkou hydroxid vápenatý, případně v první fázi ještě hydroxid sodný a draselný. Hodnoty pH těchto roztoků ve stavu I a II jsou velmi vysoké ($\geq 12,5$) a ovlivňují tak okolní prostředí jinak než ve fázi vývoje/degradace cementu do stavu III a následně stavu IV, kdy se finálně složení „cementové pórové vody“ blíží složení okolní podzemní vody (Obr. 3). Cement v čerstvé podzemní vodě podléhá loužení Ca(OH)_2 a rozpuštění CSH fází a tím dochází k degradaci betonu. V salinních vodách je rozpouštění pomalejší. Mezi betonem a podzemní vodou může dojít rovněž k chloridovým interakcím, jež vedou k přeměně hlinitanových fází na jiné komplexy. Při síranovém působení dochází k reakci vápenatých iontů a síranových iontů za vzniku ettringitu jako nové minerální fáze. Při karbonataci vznikají minerální fáze uhličitanu vápenatého (kalcit, aragonit). Tvorba uhličitanu vápenatého je také spojena s objemovou roztažností a možným poškozením cementových materiálů (Šavija a Lukovič, 2016). Obecně pak k mineralogickým změnám dochází při interakci/loužení vodou (Ochs et al., 2015).

Betonové/cementové materiály a z nich vytvořené konstrukce nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci. Rozpuštěné minerální fáze budou interagovat s okolím, je proto nutno zohlednit možné negativní interakce s materiály IB, zejména bentonitem, a také zohlednit možnost vzniku preferenčních cest.

5.3.5.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). V dlouhodobém časovém horizontu je třeba počítat s možnou erozí materiálu vodou.

U betonových konstrukcí se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce. Nicméně je s těmito vlivy třeba počítat po dobu požadované životnosti.

5.3.5.3 Mikrobiologické vlivy

Podobně jako v případě vlivu bentonitu mohou i mikroorganismy přítomné v podzemní vodě a horninovém prostředí způsobovat tzv. bio-deterioraci betonu a cementových materiálů, což povede ke stárnutí, křehnutí a degradaci materiálu. Navíc, k ovlivnění mikrobiální komunity

přirozeně se vyskytující v podzemní vodě může dojít již při změně jednoho geochemického parametru. V takovém případě může být reakcí mikrobiálního společenstva změna jeho struktury (Pedersen et al., 2014), či úbytek biomasy společenstva (Ino et al., 2016; Steinová et al., 2021). Tím pádem dochází ke zhoršení míry predikce reakce cementových a jiných materiálů při styku s podzemní vodou.

Z mikrobiologického hlediska je vliv teploty na beton a cementové materiály v interakci s horninou a podzemní vodou stejný jako je popsán v souhrnném vlivu zvýšené teploty. Na druhou stranu především v prostředí horkých pramenů mohou žít mikroorganismy upřednostňující vyšší teploty, tzv. termofilní bakterie (Albuquerque et al., 2005; Brock, 2001; Chung et al., 2000; Daumas et al., 1988; Fardeau et al., 2010; Zavarzina et al., 2007). Teploty, ve kterých žijí a jsou metabolicky aktivní, se u termofilních mikroorganismů mohou pohybovat od 70°C až po teploty přesahující 115°C (Brock, 2001). V případě termofilních mikroorganismů tedy ani vysoká teplota nemusí zabránit degradaci betonu a cementového materiálu.

5.4 Ovlivnění ocelových prvků

Dle textu v úvodu kapitoly 5 a Tab. 4 jsou popsány následující interakce a vlivy působící na ocelové prvky z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

5.4.1 Ovlivnění oceli bentonitem

5.4.1.1 Chemické a mineralogické vlivy

Bentonit bude ovlivňovat kovové prvky prostřednictvím bentonitové vody. V období, kdy bude prostředí již anaerobní a bentonit bude saturován bude docházet ke koroznímu napadení kovových komponent zejména v místech, kde bude jejich povrch v kontaktu s bentonitem. Při hodnocení korozních procesů ocelových materiálů a v prostředí bentonitu lze vyjít např. z doposud prováděných experimentů pro korozi UOS (Dobrev et al. 2020, Dobrev et al. 2021). Korozní produkty, které mohou v bentonitovém prostředí vznikat, jsou např. siderit, čukanovit, magnetit či křemičitanové korozní produkty. Díky korozním procesům může vznikat i plynný vodík.

Kovové konstrukční prvky nemají v dlouhodobém časovém horizontu bezpečnostní funkci, tudíž jejich degradace je předpokládána a není z tohoto pohledu hodnocena. Degradací kovových prvků mohou vzniknout nehomogenity a preferenční cesty v bentonitovém materiálu.

5.4.1.2 Mechanické vlivy

Bentonit bude na konstrukci působit vlastní tíhou a bobtnacím tlakem, ať již přímo nebo formou bočního tlaku. Správně navrženou ocelovou či ocel využívající konstrukci by toto namáhání nemělo po dobu její životnosti ovlivnit a měla by na něj být navržena.

Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti HÚ se nepředpokládá dlouhodobá funkce ocelových konstrukcí a předpokládá se jejich degradace. Mechanické namáhání tlakem bentonitu může jedním z důvodů pro porušení struktury konstrukcí.

5.4.1.3 Mikrobiologické vlivy

Ocel je v HÚ ohrožena především mikrobiálně indukovanou korozí (MIC), do které jsou zapojené hlavně SRB (Bitton, 2002; De Romero et al., 2002; Uhlig and Revie, 1985), ale i další mikroorganismy jako IRB, SOB a IOB (Černoušek et al., 2021; Dowling et al., 1992; Javaherdashti, 2017; Lens et al., 2003; Usher et al., 2014; Vigneron et al., 2016). MIC se v základu rozlišuje na přímou (elektrickou) a nepřímou. Při přímé dochází ke korozi za přítomnosti bakteriálního biofilmu, což je v prostředí zhutnělého bentonitu nepřilíš pravděpodobné. Při nepřímé MIC dochází k tvorbě H₂S, který může difundovat bentonitem k UOS. Podrobněji jsou MIC a její princip popsány například v práci Černá et al. (2021b, TZ 552/2021). MIC působí snížení dlouhodobé stability a tím i bezpečnosti kovových obalových souborů v HÚ (Libert et al., 2014).

K MIC může docházet v saturované fázi na rozhraní bentonitu a oceli, kde se bude ocel dostávat do interakce s mikroorganismy z bentonitu za přítomnosti podzemní vody. Bentonit navíc obsahuje organický uhlík v různých formách (Pedersen, 2017; Rajala, 2017), který může být při MIC některými mikroorganismy využíván jako zdroj energie. Přestože hlavní skupinou organismů zapojených do MIC jsou SRB, nelze přehlížet ani působení jiných skupin bakterií. Například MIC způsobená IRB může mít zpětně vliv i na vlastnosti a tím i stabilitu samotného bentonitu (Kim et al., 2004; Kostka et al., 1999), stejně tak jako produkovaný H₂S při nepřímé MIC. Při přímé MIC se na kovových površích jako ocel či železo tvoří biofilmy (Kjellerup et al., 2003; Rajala, 2017), které urychlují MIC (Obuekwe et al., 1981; Usher et al., 2014). V některých případech může ale biofilm MIC i zpomalovat, a to produkcí ochranné vrstvy oxidů/sulfidů na korodovaném povrchu (Enning and Garrelfs, 2014; Javaherdashti, 2017; Jones and Amy, 2002; Little and Ray, 2002; Little et al., 1998; Ornek et al., 2002). Nelze opomenout ani negativní vliv případných nehomogenit v bentonitu. Větší životní prostor v nehomogenních místech bentonitové bariéry umožní větší rozvoj mikroorganismů a tím může dojít k urychlení MIC (Stroes-Gascoyne, 2010).

Vliv teploty na mikrobiální interakci bentonitu a oceli (a tedy především na proces mikrobiální koroze) je stejný jako je popsán v souhrnném vlivu zvýšené teploty.

5.4.2 Ovlivnění oceli běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

5.4.2.1 Chemické a mineralogické vlivy

Beton je vysoce alkalický materiál. Hodnota pH čerstvě uloženého betonu bývá obvykle v rozmezí 12 až 13, pro low-pH beton obvykle v rozmezí 11,0-11,5. V tomto rozsahu alkality je zabetonovaná výztuž chráněná před korozi pasivačním filmem vázaným na povrch výztuže. Hovoří se o alkalické pasivaci výztuže betonem. Když se však pasivační film poruší, může nastat koroze výztuže. Dá se očekávat, že k degradaci kovových prvků vlivem low-pH betonu může dojít, s ohledem na nižší pH výluhu, o něco dříve než u běžných cementových materiálů. Vlhkost v betonové hmotě vytváří elektrolyt a korozní děje mají za následek zvětšení objemu kovu v konstrukci, když železo oxiduje na Fe(OH)₂ (hydroxid železnatý) a Fe(OH)₃ (hydroxid železitý) a projevuje se jako rez FeO(OH) (Macháček, 2006). V betonu dobré kvality bude průběh koroze zpomalen. Rychlá koroze nastane, když se pH (alkalita) betonu sníží, např. karbonatací, sulfatací apod., nebo když se do betonu zavedou agresivní chemikálie, nebo pokud by byla výztuž tvořena různými kovy. Další příčinou mohou být bludné proudy a místní

koncentrační články dané nerovnoměrným chemickým prostředím (Macháček 2006). V počátečních fázích lze předpokládat, vzhledem k vysokému pH v betonu, povrch kovových prvků v pasivním stavu a v pozdějším období, které bude ovlivněno degradací cementového materiálu/betonu, bude záležet na aktuálních podmínkách, které budou v systému (aerobní/anaerobní prostředí, pH Eh atd.). Korozní produkty vznikající degradací oceli by v prostředí předpokládaném v podmínkách na HÚ by měly být v alkalickém prostředí cementových materiálů/betonu termodynamicky stabilní oxidy jako např. magnetit, maghemit. Tyto oxidy budou tvořit pasivní vrstvu na povrchu kovu. Za předpokladu, že v průběhu vývoje prostředí HÚ bude koroze probíhat za anaerobních podmínek, bude vznikat i vodík. Stabilita pasivní vrstvy na povrchu ocelového konstrukčního prvku bude záviset na pH, ale i na obsahu uhličitánů, resp. hydrogenuhlíčanů a oxidačně-redukčním potenciálu prostředí přítomností, resp. nepřítomností kyslíku v systému. V závislosti na podmínkách může docházet k rozpouštění oxidické vrstvy za vzniku uhličitánových komplexů se železem, resp. uhličitánu železnatého. Důležitá je z hlediska koroze v betonu i přítomnost chloridů. Chloridy mohou při vyšších koncentracích narušit pasivní vrstvu oxidů i za vysokých hodnot pH. Při reakci kovového materiálu s prostředím dochází k tvorbě korozních produktů, které mohou mít negativní vliv na stabilitu betonu, kdy by mohlo docházet k šíření trhlin po rozhraní mezi korozními produkty a betonem/cementovým materiálem.

V dlouhodobém časovém horizontu povede koroze kovového prvku až k jeho celkové degradaci a v důsledku toho k selhání jeho vlastností. Nicméně z hlediska dlouhodobé bezpečnosti nemá kovový prvek ani konstrukční ani bezpečnostní funkci.

Parametr, který by mohl být z dlouhodobého vlivu degradace kovových prvků hodnocen, je možnost vzniku preferenčních cesty na rozhraní cementové materiály-korozní produkty ocelového konstrukčního prvku.

5.4.2.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky z betonu postupně degradují a ztratí svoji funkci. Jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce.

V případě, že je beton slouží jako ochrana ocelových konstrukcí/konstrukčních prvků proti korozi (např. pro výztuž), degradace betonu povede ke ztrátě této funkce a k akceleraci koroze.

U ocelových konstrukcí se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.4.2.3 Mikrobiologické vlivy

Beton na rozhraní s ocelí pomáhá svými antikorozními účinky působit proti MIC (Rajala, 2017). Low-pH beton kvůli svému nižšímu pH pravděpodobně nedokáže stejně efektivně zabraňovat MIC v rámci dlouhodobé bezpečnosti HÚ, jako je tomu potenciálně v případě běžného betonu. Beton zvyšuje pH prostředí a tím zpomaluje aktivitu biofilmu a snižuje množství mikroorganismů přítomných v místě interakce. Dokáže tak zlepšovat integritu, stabilitu a dlouhodobou bezpečnost ocelových materiálů použitých v HÚ. Na druhou stranu je diskutabilní, jak dlouhodobý je tento efekt v rámci HÚ. Beton si totiž své povrchově vysoké pH brání nárůstu biofilmů nejspíše neudrží dostatečně dlouho, aby z hlediska dlouhodobé bezpečnosti významněji přispěl k potlačování MIC. Mikroorganismy totiž svou metabolickou činností pH snižují, neboť jsou schopné produkovat různé organické a anorganické kyseliny

(Sato et al., 2009). V prostředí betonu také může docházet k MIC především prostřednictvím SRB, které redukuje síran na sirovodík, který je dále přeměněn SOB na kyselinu sírovou působící korozi (Mori et al., 1992; Parker, 1945; Roghanian and Banthia, 2019; Sato et al., 2009). I v low-pH betonu může docházet k MIC, podobně jako je tomu u běžného cementových materiálů a betonu (Garcia-Calvo et al., 2016). V rámci MIC je důležitý i obsah vápníku v betonu, se kterým reaguje kyselina sírová. MIC může ovlivňovat vnitřní strukturu betonu a zhoršovat mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu (Xie et al., 2019; Yuan et al., 2013).

5.4.3 Ovlivnění oceli organickými materiály

5.4.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Přímé ovlivnění ocelových/kovových konstrukčních prvků organickými látkami se nepředpokládá. Očekávané je spolupůsobení chemických a mikrobiologických vlivů na kovové prvky, což může urychlit proces jejich degradace, za vzniku korozních produktů.

Protože kovové konstrukční prvky nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci, není nutno detailněji hodnotit jejich ovlivnění. Degradace kovových konstrukčních prvků je předpokládána.

5.4.3.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že prvky využívající organické materiály postupně degradují a ztratí svoji funkci. V případě, že se jedná o prvky se statickou funkcí jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce. V případě, že slouží jako ochrana ocelových konstrukcí/konstrukčních prvků proti korozi, jejich degradace povede ke ztrátě této funkce a k akceleraci koroze.

U ocelových konstrukcí se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.4.3.3 Mikrobiologické vlivy

Působení organických materiálů na ocel je nepřímé. V organických materiálech se nacházejí látky (např. formaldehyd, naftalen), které mikroorganismy mohou využívat pro svůj metabolismus (Hallbeck et al., 2012; Pedersen et al., 2008), například rozvoj SRB bakterií, který povede ke zvýšení míry mikrobiální koroze oceli. Z toho důvodu je žádoucí vyhnout se zvyšování obsahu organických látek a živin obecně v materiálech u nichž hrozí následné mikrobiologické narušování.

5.4.4 Ovlivnění oceli horninovým prostředím a podzemní vodou

5.4.4.1 Chemické a mineralogické vlivy

Kovové konstrukční prvky budou v kontaktu s horninovým prostředím nebo podzemní vodou společně s dalšími materiály IB, buď bentonitem nebo cementovými materiály. Tyto materiály inženýrských bariér ovlivní složení podzemní vody a bude tak docházet k dějům popsaných v kapitolách 5.4.1.1 a 5.4.2.1.

Protože kovové konstrukční prvky nemají dlouhodobou bezpečnostní funkci, není nutno detailněji hodnotit jejich ovlivnění. Degradace kovových konstrukčních prvků je předpokládána.

5.4.4.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). Při návrhu konstrukčních prvků je třeba s tímto počítat.

U ocelových konstrukcí se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.4.4.3 Mikrobiologické vlivy

Horninové prostředí a podzemní voda budou s ocelí interagovat ve stejném duchu jako bentonit. Mikroorganismy přítomné v hornině i ve vodě mohou přispívat k MIC kovových konstrukčních prvků. Ačkoli jsou podmínky v podzemní vodě, která je obecně chudá na živiny i mikrobiální osídlení, méně příznivé pro rozvoj MIC oproti hornině, změněné podmínky pod bakteriálním biofilem dokáží zrychlit korozi oceli i v podzemní vodě (Rajala, 2017; Rajala et al., 2015).

5.5 Ovlivnění organických materiálů

Dle textu v úvodu kapitoly 5 a Tab. 4 jsou popsány následující interakce a vlivy působící na organické materiály z hlediska dlouhodobé bezpečnosti.

5.5.1 Ovlivnění organických materiálů bentonitem

5.5.1.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ovlivnění organických materiálů bentonitem je možno obecně shrnout jako možnou akceleraci jejich degradace spolupůsobením chemických a mikrobiologických jevů. K ovlivnění mineralogických fází na rozhraní organických materiálů a bentonitu nebude docházet, neboť organické materiály neobsahují minerální fáze.

5.5.1.2 Mechanické vlivy

Bentonit (v „suchém stavu“) bude na konstrukci působit pouze vlastní tíhou, ať již přímo nebo formou bočního tlaku. K výraznějšímu namáhání dojde až se bentonit dostane do styku s vodou a začne bobtnat a dojde k vývinu bobtnacího tlaku.

U organických prvků se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.5.1.3 Mikrobiologické vlivy

Z mikrobiologického hlediska budou organické materiály ovlivněné především materiály, které jsou bohaté na výskyt mikroorganismů, tedy bentonit, ale i hornina a podzemní voda. Mikroorganismy totiž mohou využít látky obsažené v organických aditivech ke svému rozvoji, jako tomu bylo ve finském ONKALO (Hallbeck et al., 2012; Pedersen et al., 2008). Ovšem i v materiálech, které příliš nepodporují výskyt bakterií (běžný beton, low-pH beton), může dojít

k nárůstu mikrobiální aktivity díky přítomnosti organických materiálů, neboť samy příliš živin neobsahují. Organické látky jako formaldehyd a naftalen indukují mikrobiální aktivitu a růst především metanogenních bakterií, ale i SRB a IRB (Pedersen et al., 2008). Na organických materiálech tedy může dojít k nárůstu bakterií a bakteriálních biofilmů, které následně zpětně ovlivní ostatní materiály, především beton a ocel, podporou bio-deteriorace a MIC. Biotickou i abiotickou degradací organických materiálů také může docházet k uvolňování jednodušších organických látek, které pak mohou být zdrojem živin pro další rozvoj mikrobiální aktivity (Bucci et al., 2018; Märkl and Stephan, 2015).

5.5.2 Ovlivnění organických materiálů běžným betonem, cementovými materiály a low-pH betonem

5.5.2.1 Chemické a mineralogické vlivy

Ovlivnění organických materiálů cementovými materiály bude způsobeno zejména alkalickým prostředím. U běžných i low-pH betonů (Pernicová et al., 2019) budou používány plastifikátory apod. a bude způsobeno nepřímo jejich degradačními produkty a spolupůsobením chemických a mikrobiologických vlivů. Studium degradace plastifikátorů a jejich degradačních produktů v cementovém prostředí se zabývá projekt EURAD WP3 – CORI (Drtinová et al., 2021). K ovlivnění mineralogických fází na rozhraní organických materiálů a cementu nebude docházet, neboť organické materiály neobsahují minerální fáze.

5.5.2.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky z betonu postupně degradují a ztratí svoji funkci. Jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce. To může vést ke zvýšenému namáhání prvků na bázi organických materiálů.

U organických prvků se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.5.2.3 Mikrobiologické vlivy

Z mikrobiologického hlediska neočekáváme přílišný vliv betonu na organické materiály jako je popsán u bentonitu, avšak konkrétní studie na toto téma chybí. Je možno předpokládat, že low-pH beton je obecně pro rozvoj mikrobiální aktivity příznivější. Nicméně například v úložištích středně aktivního radioaktivního odpadu je očekávaná alkalická hydrolyza celulósových materiálů za vzniku kyseliny isosacharinové. Tuto kyselinu jsou některé alkalifilní síru-redukující, železo-redukující či metanogenní bakterie schopny využít pro svůj metabolismus (Rout et al., 2014). Jiná studie z prostředí úložiště nízké aktivního radioaktivního odpadu ukázala bakteriální oxidaci a redukci kyseliny citrónové (v prostředí nitrátů a železitých sloučenin jako el. akceptorů) za vysokého pH (10 až <11) (Byrd et al., 2021). I ve vysoce alkalickém prostředí je tedy možné, že organické materiály budou využity mikroorganismy v jejich metabolismech, jako např. železo-redukující bakterie byly schopny využít laktát (el. donor) v pH okolo 10 (Williamson et al., 2013).

5.5.3 Ovlivnění organických materiálů ocelí

5.5.3.1 Chemické a mineralogické vlivy

Kovové konstrukční prvky nebudou přímo ovlivňovat organické materiály. Vliv mohou mít degradační produkty kovových prvků, které díky objemovým změnám mohou působit zvýšeným tlakem na organický materiál.

Organické materiály nemají bezpečnostní funkci, jejich ovlivnění a degradace je očekávána a nemá vliv na celkové hodnocení bezpečnosti HÚ.

5.5.3.2 Mechanické vlivy

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce a ostatní prvky z oceli postupně degradují a ztratí svoji funkci.

Z pohledu konstrukcí, které využívají organické komponenty, se jedná zejména o výztužné prvky těchto konstrukcí (např. tahové prvky kotev lepené organickou injektáží), které zajišťují únosnost konstrukcí. Jejich degradace povede k zatížení (přetížení) zbytku konstrukce, ztrátě její funkce a potenciálnímu kolapsu konstrukce.

U konstrukcí využívajících organických prvků se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.5.4 Ovlivnění organických materiálů horninovým prostředím a podzemní vodou

5.5.4.1 Chemické a mineralogické vlivy

Organické materiály budou při dlouhodobém kontaktu s vodným prostředím degradovat spolupůsobením chemických a mikrobiologických vlivů. Při provozu HÚ by na základě zkušeností z běžné stavební praxe měly plnit svou funkci po dobu životnosti konstrukčního prvku, z dlouhodobého hlediska nemají organické materiály bezpečnostní funkci, jejich ovlivnění a degradace je očekávána a nemá vliv na celkové hodnocení bezpečnosti HÚ.

5.5.4.2 Mechanické vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa). Při návrhu konstrukčních prvků je třeba s tímto počítat.

U konstrukcí využívajících organické komponenty se nepředpokládá jejich dlouhodobá bezpečnostní funkce.

5.5.4.3 Mikrobiologické vlivy

Z mikrobiologického hlediska je vliv horniny a podzemní vody na organické materiály stejný jako je popsán u bentonitu, viz. 5.5.1.3.

6 Zhodnocení

6.1 Počáteční stav a provozní bezpečnost

Konstrukční prvky, použité v hlubinném úložišti jsou materiálově zastoupeny běžným a low-pH betonem a cementovými materiály, ocelí a případně organickými materiály, které mohou být použity jako injektáže nebo pro kotvení výztuží nebo svorníků. Po uzavření hlubinného úložiště se předpokládá veškerý volný prostor v ukládacích vrtech / tunelech a přístupových/zavážecích chodbách vyplnit bentonitem.

Z hlediska provozní bezpečnosti je důležitá především doba životnosti použitých materiálů a jejich odolnost vůči specifickým podmínkám hlubinného úložišti. Některé z těchto materiálů budou instalovány už v konstrukčním období (především v přístupových chodbách a tunelech). Ve stavební praxi se hlavní nosné konstrukce navrhují s předpokládanou životností 100 let, což by pro předpokládanou délku provozu (cca 80-90 let) mělo postačovat. Navíc ne všechny konstrukční prvky budou po celou délku provozu takto exponované, např. v úložných prostorech, které budou raženy a uzavírány postupně podle harmonogramu zavážení UOS s VJP je životnost těchto konstrukcí z hlediska provozní bezpečnosti více než dostačující.

V přístupových/ zavážecích chodbách, které budou v provozu delší dobu, bude prováděna kontrola, a v případě, že to bude potřebné, mohou být přístupné konstrukce opraveny, aby nedošlo k ohrožení provozní bezpečnosti.

Pro hodnocení počátečního stavu vzájemného ovlivnění jednotlivých konstrukčních prvků byl vzat okamžik instalace komponenty a stabilizace jejích stavu (např. u betonu je to okamžik po vyzrání betonu).

Na základě provedené analýzy použitých konstrukčních materiálů bylo zjištěno, že:

- k vzájemnému tepelnému ovlivnění může dojít jen v případě uvolnění hydratačního tepla při zrání betonu. Ovlivnění bentonitu i ostatních materiálů je zanedbatelné;
- k mechanickému ovlivnění může dojít pouze vzájemným tlakem materiálů v „suchém stavu“, které je zanedbatelné. Jediným významnějším mechanickým vlivem může být důsledek saturace bentonitu vodou při výstavbě zátky;
- k chemickému ovlivnění může dojít rozpouštěním a srážením minerálních fází materiálů na bázi betonu/cementu. K tomu může dojít pouze pomocí fyzikálních a chemických procesů za přítomnosti vody, tudíž k těmto jevům bude docházet až při/po saturaci úložiště a nasycení materiálů vodou. V prvních fázích vývoje úložiště procesy rozpouštění a srážení nemohou probíhat;
- k mikrobiologickému ovlivnění může dojít v důsledku vnesených mikroorganismů v konstrukčních materiálech (bentonit, beton) či vlivem mikroorganismů přítomných přirozeně v podzemní vodě a hornině. Nicméně zpočátku budou fyzikálně-chemické podmínky v materiálech použitých v úložišti nehostinné (sucho, teplo, možné radioaktivní záření) a dá se proto předpokládat, že mikroorganismy se budou v materiálech použitých v inženýrských bariérách vyskytovat převážně ve formě spor. Působení mikroorganismů tak lze očekávat až po zavodnění celého systému v dlouhodobém měřítku.

Důležitým fenoménem je působení podzemní vody, která je zdrojem chemických, mechanických, mikrobiologických a mineralogických změn ovlivněných materiálů. Vzhledem k tomu, že EDZ představuje prostředí kontaktu HÚ a jeho inženýrských bariér a geologického prostředí tvořícího přirozenou bariéru HÚ, má charakter EDZ z hlediska proudění podzemní vody významný vliv na bezpečnost HÚ. Vyšší míra porušení EDZ, a tedy vyšší hydraulická vodivost, zvyšuje riziko hydraulického propojení HÚ s konektivní puklinovou sítí, umožňující transport kontaminace v geologické bariéře. Při realizaci je tedy žádoucí rozsah a intenzitu porušení EDZ minimalizovat.

6.2 Dlouhodobá bezpečnost

Vývoj podmínek v úložišti po jeho uzavření prochází několika fázemi. Podmínky jsou formovány především vývojem tepelného pole tepla generovaného VJP a prouděním podzemní vody. Tento stav lze rozčlenit do několika charakteristických období:

- Po uzavření, zvýšená teplota vlivem generace tepla z UOS, bez přítomnosti vody (s výjimkou počáteční vlhkosti v bentonitu), přechod z aerobního do anaerobního prostředí;
- Zvýšená teplota s klesající tendencí, anaerobní prostředí, částečná saturace vodou;
- Pokles teploty, ale stále ještě tepelně ovlivněné, anaerobní prostředí, plná saturace;
- Okolní neovlivněná teplota, anaerobní prostředí, plná saturace (vzdálené časové období).

Po celou dobu své životnosti jsou konstrukční prvky vystaveny chemickým, tepelným, mikrobiálním a mechanickým vlivům.

Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti ale nemají konstrukční prvky, využitě při výstavbě úložiště nebo uzavírání jeho částí, bezpečnostní funkci. Nicméně tvoří systém podpurných inženýrských konstrukcí, a jejich volba a instalace by neměla ohrožovat bezpečnostní funkce důležitých inženýrských bariér – UOS, buffer, backfill. Využití konstrukčních prvků by naopak mělo podpořit stabilitu celého systému, především z mechanického hlediska (zabránění vyplavování bentonitu), chemického hlediska (materiálová kompatibilita a redukce nežádoucích vlivů) a z hlediska migrace radionuklidů (omezení vzniku preferenčních cest).

Ovlivnění konstrukčních materiálů teplotními vlivy

Zvýšená teplota výrazně neovlivní základní vlastnosti bentonitu, oceli, low-pH betonu, běžného betonu a cementových materiálů, ale může ovlivnit jejich životnost, neboť zvýšená teplota urychluje mnohé degradační procesy:

- bude docházet k rychlejšímu rozpouštění minerálních fází, posunuto bude ustavování (geo)chemických rovnováh, srážení a vznik minerálních fází apod;
- vysoké teploty způsobí denaturaci enzymů zapojených v metabolických drahách, a to společně s vysušením materiálu a nedostatkem vody způsobí zpomalení aktivity mikroorganismů, až k jejímu úplnému zastavení a přežívání organismů ve formě spor. Většina bakterií zapojená například do procesu MIC přežije v rozsahu teplot 10–75 °C. Teplota denaturace enzymů je ovšem specifická pro každý organismus a enzym a většinou dojde k nahrazení aktivity inaktivovaného mikroorganismu jiným, který je adaptovaný na vyšší teploty. V případě vodou saturovaného prostředí mohou na

druhou stranu zvýšené teploty do určité míry akcelarovat metabolické procesy, podobně jako kinetiku všech chemických reakcí.

Vzájemné ovlivnění způsobené různou tepelnou roztažností materiálů je minimální.

Ovlivnění konstrukčních materiálů mechanickými vlivy

HÚ bude situováno v hloubce ~500 m. Z toho vyplývá potenciální vysoké zatížení od horniny a zejména pórového tlaku vody (až ~5 MPa).

Ovlivnění v „suchém stavu“ v počátečním období (vzájemným působením mezi materiály) je zanedbatelné. V důsledku saturace úložiště vodou však mohou některé probíhající procesy vést k nárůstu tlaku při vzájemném působení:

- koroze ocelových konstrukčních prvků a vznik korozních produktů spojené se zvětšením objemu oproti neporušenému konstrukčnímu prvku;
- saturace bentonitu a nárůst bobtnacího tlak bentonitu.

V dlouhodobém horizontu se předpokládá, že konstrukce z betonu, oceli, cementových a organických materiálů postupně degradují a dojde k narušení jejich původního tvaru a funkce. Potenciální kolaps těchto konstrukcí (i v důsledku snížení mechanické odolnosti a nárůstu tlaku) povede k možnosti vzniku diskontinuit/volných prostor/preferenčních cest pro proudění vody a tím následně k vyššímu zatížení bentonitu (buffer a backfill) a UOS.

Ovlivnění konstrukčních materiálů chemickými a mineralogickými vlivy

Spouštěčem chemických reakcí a mineralogických změn je přítomnost podzemní vody a změna jejich chemických vlastností v důsledku interakce s materiálem. Právě přítomnost vody ovlivní životnost konstrukčních materiálů a rychlost jejich degradace.

Bude pak docházet k možnému vzájemnému ovlivnění:

- na rozhraní bentonit – cement bude vlivem cementové a bentonitové pórové vody docházet k oboustrannému rozpouštění materiálu, ke vzniku sekundárních minerálů a dalším doprovodným jevům, které mohou být ovlivněny rovněž fyzikálními podmínkami, zejména teplotou pH, přítomností kyslíku, oxidačně-redukčním potenciálem. Toto vzájemné ovlivnění bude z hlediska dlouhodobého vývoje úložiště patřit mezi důležité;
- rozhraní cementových materiálů – ocel zaručuje samovolnou pasivaci oceli a velmi malé korozní rychlosti (při pH vyšším než 10). S poklesem hodnoty pH pórového roztoku dochází k aktivaci oceli a významnému zvýšení korozní rychlosti. Prostředí s vyšším pH tak může prodloužit životnost kovových konstrukcí;
- na rozhraní bentonit – ocel bude docházet ke koroznímu napadení ocelových prvků. Díky korozním procesům může vznikat i plynný vodík;
- životnost organických materiálů bude ovlivněna cementovými materiály (alkalickým prostředím) i bentonitem, lze předpokládat urychlení jejich degradace spolupůsobením chemických a mikrobiologických jevů.

Degradace konstrukčních materiálů povede

- k možnosti vzniku diskontinuit/volných prostor/preferenčních cest pro proudění vody a tím následně k vyššímu zatížení bentonitu (buffer a backfill) a UOS;

- ke změně chemického složení podzemní vody, která bude postupovat přes backfill a buffer směrem k UOS.

Ovlivnění konstrukčních materiálů mikrobiologickými vlivy

K výraznějšímu ovlivnění materiálů mikrobiologickými procesy bude docházet pravděpodobně až v rámci dlouhodobé bezpečnosti HÚ po zavodnění celého systému. Je ale třeba mít na paměti, že zavodnění a následný rozvoj mikrobiální činnosti budou pravděpodobně nastávat u různých interagujících materiálů různě rychle. Ke korozi konstrukčních ocelových materiálů může například dojít již během několika let v závislosti na převládajících podmínkách prostředí. Dalším důležitým bodem je vzájemnost všech mikrobiálních interakcí. Např. koroze oceli na rozhraní s bentonitem a následné zpětné ovlivnění bentonitu korozními produkty nelze jednoduše oddělit jako dva nezávislé procesy a je potřeba vždy nahlížet na interakce v obou směrech zároveň, neboť se vzájemně ovlivňují a vyvíjejí.

Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti jsou mikrobiálními riziky především:

- alterace bentonitu, jakožto hlavního těsnícího materiálu. Informace o tomto nežádoucím procesu jsou však nedostatečné a vyžadují další výzkum;
- bio-deteriorace betonu, která vede ke stárnutí, křehnutí a degradaci betonu a cementových materiálů;
- nedostatečně prozkoumaným jevem je mikrobiální aktivita v betonových materiálech za podmínek hlubinného úložiště, stejně tak jako následná interakce mikroorganismů z cementových materiálů s ostatními materiály v hlubinném úložišti. I přes velmi vysoké pH totiž beton obsahuje organismy schopné rozvíjet se i za vysoce alkalických podmínek. Z tohoto důvodu je nezbytné provést interakční experimenty cementových materiálů s dalšími materiály a vyhodnocovat zde také vliv mikrobiální aktivity;
- málo prozkoumaný je vliv organických materiálů na ostatní komponenty HÚ, ovšem z dostupných dat se dá předpokládat, že organické látky obsažené například v různých pryskyřicových injektážích mohou být využity mikroorganismy k rozvoji jejich metabolické aktivity. To může urychlovat nežádoucí procesy jako je koroze či deteriorace, obzvláště v materiálech, které jsou jinak živinami chudé (př. beton). Použití organických materiálů v HÚ se tedy jeví jako velice nevhodné

7 Závěr

V této zprávě je uveden soupis nejběžnějších konstrukčních prvků a materiálů, které jsou používány v běžné stavební praxi v podzemním stavitelství a v hornictví a je zhodnocena jejich vhodnost pro použití v hlubinném úložišti. Ve zprávě jsou popisována možná vzájemná působení mezi jednotlivými materiály konstrukčních prvků a také vliv bentonitu, jako výplňového materiálu inženýrské bariéry, a působení horninového prostředí a podzemní vody.

Procesy, které ovlivňují materiály inženýrských bariér, konstrukčních prvků a dalších částí úložiště, mají vliv na celkový chemicko-geochemický vývoj hlubinného úložiště, ovlivnění mineralogického složení, fyzikálních a mechanických vlastností i mikrobiálního osídlení materiálů inženýrských bariér. Z hlediska dlouhodobé bezpečnosti je důležitá především vzájemná kompatibilita použitých materiálů konstrukčních prvků s ostatními inženýrskými bariérami, a to zejména s ohledem na výraznou degradaci a ztrátu bezpečnostních funkcí tlumící bariéry (bentonitu) nebo dokonce UOS. Možností ovlivnění tlumící bariéry nebo ukládacího obalového souboru se tato práce nezabývala.

Použití konstrukčních prvků bude obecně ovlivněno koncepcí podzemní části HÚ, která je projektově řešena ve dvou variantách, jako vertikální nebo horizontální koncept ukládání VJP. Konstrukční prvky budou také voleny dle aplikovaných způsobů ražby a dalších technických parametrů. V současnosti však zůstává mnoho nejistot spojených s použitím konstrukčních prvků v HÚ, kterými jsou zejména materiálové složení. Předpokládaný materiál pro tlumící a výplňovou bariéru je český bentonit, avšak parametry pro jeho užití v IB nejsou ještě zcela definovány. Pro možnou aplikaci v českém HÚ byl vyvinut low-pH beton, výrazný výzkum jeho vlastností a chování v kontaktu s dalšími konstrukčními prvky v předpokládaném prostředí HÚ však zatím neprobíhá. Pro běžný beton taktéž nejsou plně definovány požadavky na vlastnosti a materiálové složení pro potřeby jeho využití v HÚ. U ostatních konstrukčních prvků, jako jsou např. výztuže, svorníky, injektáže atd., se bude vycházet z dosavadních zkušeností při jejich aplikaci v hornictví a podzemních stavbách.

Na základě aktualizace a rozšiřování znalostí z materiálového výzkumu, zpřesňování projektového řešení HÚ a zpřesňování technického řešení vyplynou požadavky a parametry, které budou muset splňovat materiály IB a konstrukčních prvků. Zejména pro hodnocení dlouhodobé bezpečnosti výplňových materiálů by bylo vhodné studovat zejména vzájemné působení bentonitu, cementových materiálů (low-pH i běžných betonů) jakožto materiálů jejichž množstevní zastoupení bude nejvyšší. Testy by měly probíhat jak v laboratorních podmínkách, tak v podmínkách in-situ, tj. blízkých podmínkách a prostředí hlubinného úložiště.

Reference

- ABDEL RAHMAN R. O., ZIN EL ABIDIN D. H. A., ABOU-SHADY H. (2013): Assessment of strontium immobilization in cement–bentonite matrices. *Chemical Engineering Journal*, 228, 772–780.
- ALBUQUERQUE L., SIMMOES C., NOBRE M. F., PINO N. M., BATTISTA J. R., SILVA M. T., RAINEY F. A., DE COSTA M. S. (2005): *Truepera radiovictrix* gen. nov., sp. nov., a new radiation resistant species and the proposal of *Trueperaceae* fam. nov. *FEMS Microbiol. Lett.* 247, 161–169.
- AMIRI A., AZIMA M., BASARAN Z. (2018): Impact of chemical admixtures on bio-based self-healing mortar.
- AOKI K., SUGITAY., CHIMAJITSU M., TAZAKI K. (2010): Impacts of thermo-hydro-mechanical experiments on the microbial activity in compacted bentonite at the Kamaishi Mine, Northeast Japan. *Applied Clay Science* 47, 147–154.
- ATKINSON B., MAVITUNA F. (1991): *Biochemical engineering and biotechnology handbook*. Stockton Press, New York.
- AXELSEN S. B., ROGNE T. (1998): Do micro-organisms “eat” metal? Microbiologically influenced corrosion of industrial materials, Contract No. BRRT-CT98-5084.
- AZKARATE I., MADINA V., INSAUSTI M. (2004): Corrosion of several components of the in-situ test performed in a deep geological granite disposal site.
- BENGTSSON A., BLOM A., JOHANSSON L., TABOROWSKI T., ERIKSSON L., PEDERSEN K. (2017): Bacterial sulphide-producing activity in water saturated iron-rich Rokle and iron-poor Gaomiaozi bentonite at wet densities from 1 750 to 1 950 kg m⁻³. (SKB report No. TR 17-05). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
- BITTON G. (2002): *Encyclopedia of environmental microbiology*. Wiley Online Library.
- BOIVIN-JAHNS V., RUIMY R., BIANCHI A., DAUMAS S., CHRISTEN R. (1996): Bacterial diversity in a deep-subsurface clay environment. *Applied and Environmental Microbiology* 62, 3405–3412.
- BROCK T. D. (2001): The origins of research on thermophiles, in: reysenbach, a.-l., Voytek, m., Mancinelli, R. (Eds.), *Thermophiles Biodiversity, Ecology, and Evolution*. Springer US, Boston, MA, pp. 1–9.
- BUCCI A., PREVOT A.B., BUOSO S., DE LUCA D.A., LASAGNA M., MALANDRINO M., MAURINO V. (2018): Impacts of borehole heat exchangers (BHEs) on groundwater quality: the role of heat-carrier fluid and borehole grouting. *Environ Earth Sci* 77, 175.
- BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., POŘÍZEK J., ŠPINKA O., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace. Horka. ČVUT-SATRA- Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 512/2020
- BYRD N., LLOYD J. R., SMALL J. S., TAYLOR F., BAGSHAW H., BOOTHMAN C., MORRIS K. (2021). Microbial Degradation of Citric Acid in Low Level Radioactive Waste Disposal: Impact on Biomineralization Reactions. *Frontiers in Microbiology* 12, 723.

- CASTRO-ALONSO M. J., MONTANEZ-HERNANDEZ L. E., SANCHEZ-MUÑOZ M. A., MACIAS FRANCO M. R., NARAYANASAMY R., BALAGURUSAMY N. (2019): Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts. *Front. Mater.* 6.
- CYROŇ D. A KUČERA P. (2008): Problematika provádění těsnících chemických injektáží na tunelech Ólafsjördur a Siglufjördur na Islandu. [online]. In Sborník příspěvků 13. mezinárodního semináře "Zpevňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí 2008. 21.-22.2.2008. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. ISBN 978-80-248-1715-6. Dostupný z <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2008/pics/02.pdf>
- CYROŇ D. ET. AL. (2009): Injektáže na Islandu: Problematika provádění chemických injektáží metodou pre-groutingu na projektu Héðinsfjarðargöng – 2. část. [online]. In Sborník příspěvků 14. mezinárodního semináře "Zpevňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí 2009. 19.-20.2.2009. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. ISBN 978-80-248-1958-7. Dostupný z <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2009/pics/01.pdf>
- ČERNÁ K., ČERNOUŠEK T., POLÍVKA P., ŠEVCŮ A. (2019): Survival of microorganisms in bentonite subjected to different levels of irradiation and pressure (No. DELIVERABLE 2.15). MIND Project.
- ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V., STEINOVÁ J., PUSZTAI M. (2021b): Mikroorganismy ve vztahu k hlubinným úložištím radioaktivního odpadu. Technická zpráva TZ 552/2021, SÚRAO, 126 str.
- ČERNÁ K., HOFMANOVÁ E., HLAVÁČKOVÁ V., BARTAK D., ŘÍHA J., DOBREV D., KAŠPAR V., ŠACHLOVÁ Š., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022): TAČR TK02010169: Odborná zpráva za rok 2021. Technická univerzita v Liberci.
- ČERNÁ K., HOFMANOVÁ E., HLAVÁČKOVÁ V., BARTAK D., VEČERNÍK P., KAŠPAR V., DOBREV D., ŠACHLOVÁ Š. (2021a): TAČR TK02010169: Odborná zpráva za rok 2020. Technická univerzita v Liberci.
- ČERNÍK M., STEINOVÁ J., MIKEŠ J., ŠPAČEK P., DOBREV D., ČERNOUŠEK T., STOULIL J. (2019): SÚRAO report 403/2019/ENG: Microbial corrosion under the conditions of a deep geological repository for the concept of steel UOS - compacted bentonite, final report (Technická zpráva No. 403/2019).
- ČERNOUŠEK T., ŠEVCŮ A., SHRESTHA R., STEINOVÁ J., KOKINDA J., VIZELKOVÁ K. (2021): Chapter 6 - Microbially influenced corrosion of container material, in: Lloyd, J.R., Cherkouk, A. (Eds.), *The Microbiology of Nuclear Waste Disposal*. Elsevier, pp. 119–136.
- ČERVINKA R., VOPÁLKA D. (2015): Transport radionuklidů z úložiště / Vstupní parametry a procesní modely pro hodnocení transportu radionuklidů přes inženýrské bariéry, 1. průběžná zpráva. ÚJV Řež, a. s., 177 stran.
- ČERVINKA R., GONDOLLI J., KOLOMÁ K. (2016): Eroze bentonitu a její dopad na dlouhodobé chování inženýrských bariér hlubinného úložiště a transport radionuklidů. Zpráva Z4495; ÚJV Řež, a. s.

- DAUMAS S., CORD-RUWISCH R., GARCIA J. L. (1988): *Desulfotomaculum geothermicum* sp. nov., a thermophilic, fatty acid-degrading, sulfate-reducing bacterium isolated with H₂ from geothermal ground water. *Antonie Van Leeuwenhoek* 54, 165–178.
- DE ROMERO M. F., DUQUE Z., DE RINCON O. T., PÉREZ O., ARAUJO I., BRICENO B. (2002): Microbiological corrosion: hydrogen permeation and sulfate-reducing bacteria. *Corrosion* 58, 429–435.
- DOBREV D., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí, TZ406/2019 SÚRAO.
- DOBREV D., GONDOLLI J., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N., STOULIL J. STRAKA M. (2020): Korozní zkoušky s materiály navrženými pro konstrukci ukládacích obalových souborů, SÚRAO TZ 248/2018 Rev. č. 1
- DOBREV D., MENDOZA MIRANDA A. N., STEINOVÁ J., ZUNA M. (2021): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí, SÚRAO TZ 194/2017 rev. č. 4
- DOHNÁLKOVÁ M., VONDROVIC L., HAUSMANNOVÁ L., (2022): Technické řešení hlubinného úložiště 2022. - MS SÚRAO, TZ 580/2022, Praha
- DOPSON M., JOHNSON D. B. (2012): Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-metabolizing microorganisms. *Environmental Microbiology* 14, 2620–2631.
- DOWLING N. J. E., BROOKS S. A., PHELPS T. J., WHITE D. C. (1992): Effects of selection and fate of substrates supplied to anaerobic bacteria involved in the corrosion of pipe-line steel. *Journal of Industrial Microbiology* 10, 207–215.
- DRAGOLICI F. (2013): Long Term Behaviour Evaluation of Cement Conditioning Matrices Used for Management of Radioactive Wastes at IFIN-HH. In: *The Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste. Results of a Coordinated Research Project. Report IAEA*, 18 s.
- DRTINOVÁ B., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., HLAVÁČ, Z., BERGELOVÁ K., BUREŠOVÁ M., ČEJKOVÁ A., ČERNOCHOVÁ K., HYBÁŠKOVÁ M., KITTNEROVÁ J., KUČEROVÁ M., KOZEMPELL J., SVOBODA J., VLK M. (2021). WP3 CORI: Souhrn výstupů českých stran projektu EURAD, TZ 558/2021, Praha
- DUBIEL M., HSU C. H., CHIEN C. C., MANSFELD F., NEWMAN D. K. (2002): Microbial Iron Respiration Can Protect Steel from Corrosion. *AEM* 68, 1440–1445.
- DURBAN N., RAFRAFI Y., RIZOULIS A., ALBRECHT A., ROBINET J.-C., LLOYD J. R., BERTRON A., ERABLE B. (2018): Nitrate and nitrite reduction at high pH in a cementitious environment by a microbial microcosm. *International Biodeterioration & Biodegradation* 134, 93–102.
- ENNING D., GARRELFIS J. (2014): Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem. *Applied and Environmental Microbiology* 80, 1226–1236.
- FARDEAU M.-L., BARSOTTI V., CAYOL J.-L., GUASCO S., MICHOTÉY V., JOSEPH M., BONIN P., OLLIVIER B. (2010): *Caldinitratiruptor microaerophilus*, gen. nov., sp. nov. isolated from a French hot spring (Chaudes-Aigues, Massif Central): a novel cultivated facultative microaerophilic anaerobic thermophile pertaining to the Symbiobacterium branch within the Firmicutes. *Extremophiles* 14, 241–247.

- FUKUNAGA S., JINTOKU T., IWATA Y., NAKAYAMA M., TSUJI T., SAKAYA N., MOGI K., ITO M. (2005): Investigation of Microorganisms in Bentonite Deposits. *Geomicrobiology Journal* 22, 361–370.
- GARCIA-CALVO J.L., SANCHEZ M., FERNANDEZ-LUCO L., ALONSO M.C. (2016): Shrinkage behaviour and related corrosion performance of low-pH cementitious materials based on OPC or CAC. *Mater. Constr.* 66, e079.
- GAUCHER E. C., BLANC P. (2006): Cement/clay interactions – A review: Experiments, natural analogues, and modeling. *Waste Management, Mechanisms and Modeling of Waste/Cement Interactions* 26, 776–788.
- GILMOUR K. A., DAVIE C. T., GRAY N. (2021): An indigenous iron-reducing microbial community from MX80 bentonite - A study in the framework of nuclear waste disposal. *Applied Clay Science* 205, 106039.
- GRANT W. D. (2004): Life at low water activity. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 359, 1249–1267.
- GRÜNWARD L. ET AL. (2018): Optimalizace podzemních částí HÚ referenčního projektu. Závěrečná zpráva. TZ 134/2017. Praha: ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO.
- HADI J., WERSIN P., SERNEELS V., GRENECHE J.-M. (2019): Eighteen years of steel–bentonite interaction in the FEBEX in situ test at the Grimsel Test Site in Switzerland. *Clays Clay Miner.* 67, 111–131.
- HALLBECK L., JÄGEVALL S., PÄÄJÄRVI A., RABE L., EDLUND J., ERIKSSON S. (2012): Microbial Analyses of Cement and Grouting Additives (No. Working Report 2012-04). Posiva Oy, Finland.
- HAMILTON M. A., ROGERS R. D., VEEH R., ZOLYNSKIL M. (1995): Evaluation of microbially-influenced degradation of massive concrete structures. *MRS Online Proceedings Library Archive* 412.
- HAMMES F., VERSTRAETE W. (2002): Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology* 1, 3–7.
- HORIKOSHI K. (1999): Alkaliphiles: Some Applications of Their Products for Biotechnology. *Microbiol Mol Biol Rev* 63, 735–750.
- HUDSON J. A., BÄCKSTRÖM A., RUTQIST J., JING L., BACKERS T., CHIMAJITSU M., CHRISTIANSSON R., FENG X. T., KOBAYASHI A., KOYAMA T., LEE H. S., NERETNIEKS I., PAN P. Z., RINNE M., SHEN B. T. (2009): Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology*, 57(6), 1275-1297.
- HUDSON J. A. A HARRISON J. P. (1997): *Engineering rock mechanics – an introduction to the principles.* Elsevier Science Ltd., Oxford, United Kingdom.
- CHI FRU E., ATHAR R. (2008): In situ bacterial colonization of compacted bentonite under deep geological high-level radioactive waste repository conditions. *Appl Microbiol Biotechnol* 79, 499–510.

- CHUNG A. P., RAINEY F. A., VALENTE M., NOBRE M. F., DA COSTA M. S. (2000): *Thermus igniterrae* sp. nov. and *Thermus antranikianii* sp. nov., two new species from Iceland. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 50, 209–217.
- INO K., KONNO U., KOUDEKA M., HIROTA A., TOGO Y.S., FUKUDA A., KOMATSU D., TSUNOGAI U., TANABE A. S., YAMAMOTO S., IWATSUKI T., MIZUNO T., ITO K., SUZUKI Y. (2016): Deep microbial life in high-quality granitic groundwater from geochemically and geographically distinct underground boreholes. *Environmental Microbiology Reports* 8, 285–294.
- JÄGEVALL S., RABE L., PEDERSEN K. (2011): Abundance and Diversity of Biofilms in Natural and Artificial Aquifers of the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Microb Ecol* 61, 410–422.
- JAHAVERDASHTI R. (2017): Microbiologically influenced corrosion (MIC), in: *Microbiologically Influenced Corrosion*. Springer, pp. 29–79.
- JONES D. A., AMY P. S. (2002): A thermodynamic interpretation of microbiologically influenced corrosion. *Corrosion* 58, 638–645.
- KAŠPAR V., ŠACHLOVÁ Š., HOFMANOVÁ E., KOMÁRKOVÁ B., HAVLOVÁ V., APARICIO C., ČERNÁ K., BARTAK D., HLAVÁČKOVÁ V. (2021): Geochemical, Geotechnical, and Microbiological Changes in Mg/Ca Bentonite after Thermal Loading at 150 °C. *Minerals* 11, 965.
- KILEDAL E. A., KEFFER J. L., MARESCA J. A. (2021): Bacterial Communities in Concrete Reflect Its Composite Nature and Change with Weathering. *mSystems* 6, e01153-20.
- KIM J., DONG H., SEABAUGH J., NEWELL S. W., EBERL D. D. (2004): Role of Microbes in the Smectite-to-Illite Reaction. *Science* 303, 830–832.
- KJELLERUP B. V., OLESEN B. H., NIELSEN J. L., FÖLUND B., ÖDUM S., NIELSEN P. H. (2003): Monitoring and characterisation of bacteria in corroding district heating systems using fluorescence in situ hybridisation and microautoradiography. *Water Science and Technology* 47, 117–122.
- KLEPSATE, F., KUSÝ P., MAŘÍK L. (2003): *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 230 s. - Jaga group v.o.s. ISBN 80-88905-43-5.
- KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS, TZ 135/2017, SÚRAO.
- KOSTKA J. E., WU J., NEALSON K. H., STUCKI J. W. (1999): The impact of structural Fe(III) reduction by bacteria on the surface chemistry of smectite clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 3705–3713.
- LAZAR C. S., LEHMANN R., STOLL W., ROSENBERGER J., TOTSCHKE K. U., KÜSEL K. (2019): The endolithic bacterial diversity of shallow bedrock ecosystems. *Science of The Total Environment* 679, 35–44.
- LENS P., O'FLAHERTY V., MORAN A. P., STOODLEY P., MAHONY T. (2003): *Biofilms in medicine, industry and environmental biotechnology*. IWA publishing.
- LI X., KAPPLER U., JIANG G., BOND P. L. (2017): The Ecology of Acidophilic Microorganisms in the Corroding Concrete Sewer Environment. *Front. Microbiol.* 0.

- LI X., O'MOORE L., SONG Y., BOND P. L., YUAN Z., WILKIE S., HANZIC L., JIANG G. (2019): The rapid chemically induced corrosion of concrete sewers at high H₂S concentration. *Water Research* 162, 95–104.
- LIBERT M., SCHÜTZ M.K., ESNAULT L., FÉRON D., BILDSTEIN O. (2014): Impact of microbial activity on the radioactive waste disposal: long term prediction of biocorrosion processes. *Bioelectrochemistry, BIOCORROSION* 97, 162–168.
- LITTLE B. A RAY R. (2002): A perspective on corrosion inhibition by biofilms. *Corrosion* 58, 424–428.
- LITTLE B. J., WAGNER P. A., LEWANDOWSKI Z. (1998): The role of biomineralization in microbiologically influenced corrosion, in: *CORROSION* 98. OnePetro.
- LOPEZ-FERNANDEZ M., CHERNOUK A., VILCHEZ-VARGAS R., JAUREGUI R., PIEPER D., BOON N., SANCHEZ-CASTRO I., MERROUN M. L. (2015): Bacterial Diversity in Bentonites, Engineered Barrier for Deep Geological Disposal of Radioactive Wastes. *Microb Ecol* 70, 922–935.
- LYDMARK S., PEDERSEN K. (2011): Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Microorganisms in buffer from the Canister Retrieval Test – numbers and metabolic diversity. (SKB Report No. P-11-06). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
- MAGNIONT C., COUTAND M., BERTRON A., CAMELEYRE X., LAFFORGUE C., BEAUFORT S., ESCADEILLAS G. (2011): A new test method to assess the bacterial deterioration of cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41, 429–438.
- MACHÁČEK T. (2006): Koroze železobetonových konstrukcí a způsob jejich ochrany, *Silnice Železnice číslo 1/2006*.
- MARESCA J. A., MOSER P., SCHUMACHER T. (2016): Analysis of bacterial communities in and on concrete. *Mater Struct* 50, 25.
- MÄRKL V., STEPHAN D.A. (2015): Release Behaviour of Major Elements and Superplasticiser from Cement Suspensions. *Water Air Soil Pollut* 227, 30.
- MARTY N. C. M., FRITZ B., CLÉMENT A., MICHAU N. (2010): Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository. *Applied Clay Science, Advanced smectitic clay research* 47, 82–90.
- MCMAHON S., PARNELL J. (2014): Weighing the deep continental biosphere. *FEMS Microbiology Ecology* 87, 113–120.
- MIJNENDONCKX K., CONINX I., GOMPEL A. V., LEYS N. (2018): Microbial cement deterioration boundaries (No. DELIVERABLE 2.11). MIND Project.
- MIJNENDONCKX K., GOMPEL A. V., CONINX I., BLEYEN N., LEYS N. (2019a): Radiation and Microbial Degradation of Bitumen 48.
- MIJNENDONCKX K., MONSIEURS P., ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V., STEINOVÁ J., BURZAN N., BERNIER-LATMANI R., BOOTHMAN C., MIETTINEN H., KLUGE S., MATSCHIARELLI N., CHERNOUK A., JROUNDI F., MERROUN M. L., ENGEL K., NEUFELD J. D., LEYS N. (2021): Chapter 4 - Molecular techniques for understanding microbial abundance and activity in clay barriers

- used for geodisposal, in: Lloyd, J.R., Cherkouk, A. (Eds.), *The Microbiology of Nuclear Waste Disposal*. Elsevier, pp. 71–96.
- MIJNENDONCKX K, SMALL J., ABRAHAMSEN-MILLS L., PEDERSEN K., LEYS N. (2019b): MIND Deliverable 3.7: Final Integration and Evaluation Report. European Commission 104.
- MOMPERL., KIELREESE B., ZINKE L., WANGER G., OSBURN M. R., MOSER D., AMEND J. P. (2017): Major phylum-level differences between porefluid and host rock bacterial communities in the terrestrial deep subsurface.
- MORI T., NONAKA T., TAZAKI K., KOGA M., HIKOSAKA Y., NODA S. (1992): Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. *Water Research* 26, 29–37.
- MORRIER J.-J., BENAY G., HARTMANN C., BARSOTTI O. (2003): Antimicrobial activity of Ca (OH) 2 dental cements: an in vitro study. *Journal of endodontics* 29, 51–54.
- MOSLER A KOL. (2019): Uživatelská příručka pro konvenční tunelování. [online]. Dokumenty českého tunelářské asociace ITA-AITES – Česká tunelářská asociace ITA-AITES. Praha. ISBN 978-80-906452-4-0. Dostupný z https://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/prirucka-konvencni-tunelovani-191120.pdf
- MOTAMEDIL M., KARLAND O., PEDERSEN K. (1996): Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite. *FEMS Microbiology Letters* 141, 83–87.
- MOTYČKA Z. (2001): Poznámky o zpevňování a těsnění hornin při výstavbě tunelů II. Uplatnění a kontrola injektáže. [online]. In *Sborník příspěvků 6. mezinárodního semináře "Zpevňování a těsnění hornin a stavebních konstrukcí na počátku 21. století. 15. – 16.2.2001. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. ISBN: 80-7078-870- 4. Dostupný z <http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/23.pdf>*
- MULLIGAN C. N., YONG R. N., FUKUE M. (2009): Some effects of microbial activity on the evolution of clay-based buffer properties in underground repositories. *Applied Clay Science* 42, 331–335.
- MULLIN S. W., WANGER G., KRUGER B. R., SACKETT J. D., HAMILTON-BREHM S. D., BHARTIA R., AMEND J. P., MOSER D .P., ORPHAN V. J. (2020). Patterns of in situ Mineral Colonization by Microorganisms in a ~60°C Deep Continental Subsurface Aquifer. *Front. Microbiol.* 11.
- NOVÁK P: A KOL. (2002): *Korozní inženýrství, e-skripta VŠCHT Praha*.
- OBUEKWE C. O., WESTLAKE D. W., COOK F. D. (1981): Effect of nitrate on reduction of ferric iron by a bacterium isolated from crude oil. *Can J Microbiol* 27, 692–697.
- OCHS M., MALLANTS D., WANG L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality*, no. 29, 1 edn, Springer, Switzerland.
- ÖRNEK D., WOOD T. K., HSU C. H., MANSFELD F. (2002): Corrosion control using regenerative biofilms (CCURB) on brass in different media. *Corrosion Science* 44, 2291–2302.
- ORNEK D., WOOD T. K., HSU C. H., SUN Z., MANSFELD F. (2002): Pitting corrosion control of aluminum 2024 using protective biofilms that secrete corrosion inhibitors. *Corrosion* 58, 761–767.

- PARKER C. (1945): The Corrosion of Concrete. *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science* 23, 81–90.
- PEDERSEN K. A HERMANSSON M. (1991): Inhibition of metal corrosion by bacteria. *Biofouling* 3, 1–11.
- PEDERSEN K. (2017): Bacterial activity in compacted bentonites (No. D2.4). MIND.
- PEDERSEN K. (1999): Subterranean microorganisms and radioactive waste disposal in Sweden. *Engineering Geology* 52, 163–176.
- PEDERSEN K. (1997): Microbial life in deep granitic rock.
- PEDERSEN K., ARLINGER J., ERIKSSON S., HALLBECK M., JOHANSSON J., JÄGEVALL S., KARLSSON L. (2008): Microbiology of Olkiluoto Groundwater. Results and Interpretations 2007. POSIVA Working Report 2008-34, POSIVA OY, Olkiluoto, Finland.
- PEDERSEN K., BENGTTSSON A., BLOM A., JOHANSSON L., TABOROWSKI T. (2017): Mobility and reactivity of sulphide in bentonite clays – Implications for engineered bentonite barriers in geological repositories for radioactive wastes. *Applied Clay Science* 146, 495–502.
- PEDERSEN K., BENGTTSSON A. F., EDLUND J. S., ERIKSSON L. C. (2014): Sulphate-controlled Diversity of Subterranean Microbial Communities over Depth in Deep Groundwater with Opposing Gradients of Sulphate and Methane. *Geomicrobiology Journal* 31, 617–631.
- PEDERSEN K., MOTAMENDIL M., KARNLAND O., SANDÉN T. (2000): Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. *Engineering Geology* 58, 149–161.
- PEDERSEN K., NILSSON E., ARLINGER J., HALLBECK L., O'NEILL A. (2004): Distribution, diversity and activity of microorganisms in the hyper-alkaline spring waters of Maqarin in Jordan. *Extremophiles* 8, 151–164.
- PERNICOVÁ R., ČÍTEK D., DOBIÁŠ D., MANDLÍK T., KRATOCHVÍLE L., KOLÍSKO J. (2019): Vývoj betonu se sníženým pH, MS SÚRAO TZ 415/2019, 45 s.
- POSPÍŠKOVÁ I. A KOL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA.
- POULAIN S., SERGEANT C., SIMONOFF M., LE MARREC C., ALTMANN S. (2008): Microbial Investigations in Opalinus Clay, an Argillaceous Formation under Evaluation as a Potential Host Rock for a Radioactive Waste Repository. *Geomicrobiology Journal* 25, 240–249.
- RAFRAFI Y., DURBAN N., BERTRON A., ALBRECHT A., ROBINET J.-C., ERABLE B. (2017): Use of a continuous-flow bioreactor to evaluate nitrate reduction rate of *Halomonas desiderata* in cementitious environment relevant to nuclear waste deep repository. *Biochemical Engineering Journal* 125, 161–170.
- RAJALA P. (2017): Microbially-induced corrosion of carbon steel in a geological repository environment: Dissertation. University of Helsinki.
- RAJALA P., BOMBERG M., VEPSÄLÄINEN M., CARPÉN L. (2017): Microbial fouling and corrosion of carbon steel in deep anoxic alkaline groundwater. *Biofouling* 33, 195–209.

- RAJALA P., CARPÉN L., VEPSÄLÄINEN M., RAULIO M., SOHLBERG E., BOMBERG M. (2015): Microbially induced corrosion of carbon steel in deep groundwater environment. *Frontiers in microbiology* 6, 647–647.
- RIZOULIS A., STEELE H. M., MORRIS K., LLOYD J. R. (2012): The potential impact of anaerobic microbial metabolism during the geological disposal of intermediate-level waste. *Mineralogical Magazine* 76, 3261–3270.
- ROGERS R. D., HAMILTON M. A., MCCONNELL J. W. (1992): The Possibility for Microbially Influenced Degradation of Cement Solidified Low-Level Radioactive Waste Forms. *MRS Online Proceedings Library (OPL)* 294.
- ROGERS R.D., HAMILTON W. A., VEEH R. H., MCCONNELL J.W. (1994): Microbially influenced degradation of cement-solidified low-level radioactive waste forms, in: *Proceedings of the Third International Symposium on Stabilization/Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Waste*. Presented at the Third International Symposium on Stabilization/Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Waste | November 1-5, 1993 | Williamsburg, VA.
- ROGHANIAN N., BANTHIA N. (2019): Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes. *Cement and Concrete Composites* 100, 99–107.
- ROUT S. P., CHARLES C. J., DOULGERIS C., MCCARTHY A. J., ROOKS D. J., LOUGHANE J. P., LAWS A. P., HUMPHREYS P. N. (2015): Anoxic Biodegradation of Isosaccharinic Acids at Alkaline pH by Natural Microbial Communities. *PLoS One* 10.
- ROUT S. P., RADFORD J., LAWS A.P., SWEENEY F., ELMKAWY A., GILLIE L.J., HUMPHREYS P. N. (2014): Biodegradation of the Alkaline Cellulose Degradation Products Generated during Radioactive Waste Disposal. *PLOS ONE* 9, e107433.
- SAHL J. W., SCHMIDT R., SWANNER E. D., MANDERNACK K. W., TEMPLETON A. S., KIEFT T. L., SMITH R. L., SAANFORD W. E., CALLAGHAN R. L., MITTON J. B., SPEAR J. R. (2008): Subsurface Microbial Diversity in Deep-Granitic-Fracture Water in Colorado. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 143–152.
- SÁNCHEZ L., CUEVAS J., RAMÍREZ S., RUIZ DE LEÓN D., FERNÁNDEZ R., VIGIL DELA VILLA R., LEGUEY S. (2006): Reaction kinetics of FEBEX bentonite in hyperalkaline conditions resembling the cement–bentonite interface. *Applied Clay Science* 33, 125–141.
- SATOH H., ODAGIRI M., ITO T., OKABE S. (2009): Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system. *Water Research* 43, 4729–4739.
- SAVAGE D. A BENLOW S. (2007): Low pH cement. *SKI Report 2007:32*, Stockholm, SE, 46 s.
- SAVAGE D., WALKER C., ARTHUR R., ROCHELLE C. A., ODA C., TAKASE H. (2007): Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids: A review of the role of secondary minerals, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 287–297.
- SHRESTHAA R., ČERNÁ K., SPANEK R., BARTAK D., ČERNOUŠEK T., ŠEVCŮ A. (2022): The effect of low-pH concrete on microbial community development in bentonite suspensions as a

- model for microbial activity prediction in future nuclear waste repository. *Science of The Total Environment* 808, 151861.
- SMALL J. S., NYKYRI M., VIKMAN M., ITÄVAARA M., HEIKINHEIMO L. (2017): The biogeochemistry of gas generation from low-level nuclear waste: Modelling after 18 years study under in situ conditions. *Applied Geochemistry* 84, 360–372.
- STEINOVÁ J., ZUNA M., ČERNÁ K. (2021): Mikrobiologický monitoring vybraných podzemních vod PVP Bukov a dolu Rožná (No. Technická zpráva 547/2021). SÚRAO.
- STROES-GASCOYNE S. (2010): Microbial occurrence in bentonite-based buffer, backfill and sealing materials from large-scale experiments at AECL's Underground Research Laboratory. *Applied Clay Science, Advanced smectitic clay research* 47, 36–42.
- STROES-GASCOYNE S., HAMON C. J., DIXON D. A., MARTINO J. B. (2007): Microbial analysis of samples from the tunnel sealing experiment at AECL's Underground Research Laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32, 219–231.
- STROES-GASCOYNE S., HAMON C. J., VILKS P., GIERSZEWSKI P. (2002): Microbial, redox and organic characteristics of compacted clay-based buffer after 6.5 years of burial at AECL's Underground Research Laboratory. *Applied Geochemistry* 17, 1287–1303.
- STROES-GASCOYNE S., PEDERSEN K., SAUMAS S., HAMON C., HAVEMAN S., DELANEY T.-L., EKENDAHL S., JAHROMI N., ARLINGER J., HALLBECK L., DEKEYSER K. (1996): Microbial analysis of the buffer/container experiment at AECL's underground research laboratory.
- STROES-GASCOYNE S. A WEST J. M. (1997): Microbial studies in the Canadian nuclear fuel waste management program. *FEMS Microbiology Reviews* 20, 573–590.
- SVENSSON D., DUECK A., NILSSON U., OLSSON S., SANDÉN T., LYDMARK S., JÄGERWALL S., PEDERSEN K., HANSEN S. (2011): Alternative buffer material. Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1. (No. TR-11-06). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
- SVOBODA L. A KOLEKTIV (2013): *Stavební hmoty*, 3.vydání – elektronické, Praha, 2013, ISBN 978-80-260-4972-2.
- ŠAVIJA B. A LUKOVIČ M. (2016): Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, *Constr. Build. Mater.*, vol. 117, pp. 285–301.
- ŠIK J. (2020): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Tepelný výpočet. Škoda JS, Ae 16093/Dok Rev. 4.
- ŠNŮPÁREK R. A JANÍČEK D. (2001): Použití sklolaminátových kotev v podzemním stavitelství. [online]. In *Sborník příspěvků 6. mezinárodního semináře "Zpevňování a těsnění hornin a stavebních konstrukcí na počátku 21. století. 15. – 16.2.2001. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. ISBN: 80-7078-870-4. Dostupný z <http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/24.pdf>*
- ŠPINKA O., GRÜNWARD, L. ZAHRADNÍK O., VEVERKA A., FIEDLER F., NOHEJL J., POŘÍZEK J., KOBYLKA D. (2018): Studie umístitelnosti HÚ v lokalitě Březový potok. MS SURAO TZ 139/2017, SÚRAO, Praha.

- ŠPINKA O., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020a): Studie umístitelnosti – aktualizace Březový potok. ČVUT- SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 514/2020
- ŠPINKA P., BUTOVIČ A., BUREŠ P., GRÜNWARD L., POŘÍZEK J., SOURAL J., ZAHRADNÍK O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020b): Studie umístitelnosti – aktualizace. Hrádek. ČVUT- SATRA- Mott mac Donald CZ, MS SÚRAO, TZ 514/2020
- ŠTÁSTKA J., SVOBODA J., PACOVSKÁ D., VEČERNÍK P., ČERVINKA R. (2018): Provedení rešerše obdobných experimentů, návrh případných úprav technického provedení. TZ 228/2018, SÚRAO.
- TABOROWSKI T., CHUKHARKINA A.B.A., BLOM A., PEDERSEN K. (2019): Bacterial presence and activity in compacted bentonites (No. DELIVERABLE D2.4, v2). MIND.
- TABOROWSKI T., PEDERSEN K. (2018): Microbial activity in a concrete-bentonite clay interface. (No. DELIVERABLE 2.12). MIND.
- TKP-D7 (2016): Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací. Kapitola 7 Tunely, podzemní objekty a galerie (tunelové stavby) [online]. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor pozemních komunikací. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_7_TPK_D/TKP_D_7_2016.pdf
- TSANG C. F., BERNIER F., DAVIES C. (2005): Geohydrromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42(1), 109-125.
- TURICK C .E., BERRY C. J. (2016): Review of concrete biodeterioration in relation to nuclear waste. *Journal of Environmental Radioactivity* 151, 12–21.
- UHLIG H. H., REVIE R. W. (1985). *Corrosion and corrosion control*.
- USHER K. M., KAKSONEN A. H., COLE I., MARNEY D. (2014): Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 93, 84–106.
- VEČERNÍK P., TRPKOŠOVÁ D., GONDOLLI J., KOLOMÁK K., BRÁZDA L., HAVLOVÁ V. (2016): Odborná podpora při provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS; Závěrečná zpráva, TZ 64/2016.
- VIGNERON A., ALSOP E. B., CHAMBERS B., LOMANS B. P., HEAD I. M., TSEMETZIS N. (2016): Complementary microorganisms in highly corrosive biofilms from an offshore oil production facility. *Appl. Environ. Microbiol.* 82, 2545–2554.
- VOKÁL A., HAVLOVÁ V., HERCÍK M., LANDA J., LUKIN D., VEJSADA J. (2010): 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.
- WANG J., ERSAN Y. C., BOON N., DE BELIE N. (2016): Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100, 2993–3007.

- WANGER G., SOUTHAM G., ONSTOTT T. C. (2006): Structural and Chemical Characterization of a Natural Fracture Surface from 2.8 Kilometers Below Land Surface: Biofilms in the Deep Subsurface. *Geomicrobiology Journal* 23, 443–452.
- WHITE M. A DOUDOU S. (2016): DOPAS Work Package 2, Deliverable D2.4: WP2 Final Report Design Basis for DOPAS Plugs and Seals, 94s.
- WILLIAMSON A. J., MORRIS K., SHAW S., BYRNE J. M., BOOTHMAN C., LLOYD J. R. (2013): Microbial reduction of Fe(III) under alkaline conditions relevant to geological disposal. *Appl. Environ. Microbiol.* 79, 3320–3326.
- WOLFRAM J. H., ROGERS R. D., GAZSÓ L. G. (1997): *Microbial Degradation Processes in Radioactive Waste Repository and in Nuclear Fuel Storage Areas*. Springer Science & Business Media.
- XIE Y., LIN X., JI T., LIANG Y., PAN W. (2019): Comparison of corrosion resistance mechanism between ordinary Portland concrete and alkali-activated concrete subjected to biogenic sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials* 228, 117071.
- YAMANAKA T., ASO I., TOGASHI S., TANIGAWA M., SHOJI K., WATANABE T., WATANABE N., MAKI K., SUZUKI H. (2002): Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth. *Water Research* 36, 2636–2642.
- YUAN H., DANGLA P., CHATELLIER P., CHAUSSADENT T. (2013): Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research* 53, 267–277.
- ZAHRADNÍK O., PÖPPERLE J., MAKÁSEK P., BUTOVIČ A., GRÜNWARD L., BUREŠ P., ŠPINKA O., MARTINČÍK J., KOBYLKA D. (2020): Studie umístitelnosti – aktualizace, Janoch, ČVUT-SATRA-Mott MacDonald CZ, MS SÚRAO, TZ 518/2020
- ZAVARZINA D. G., SOKOLOVA T. G., TOUROVA T. P., CHERNYH N. A., KOSTRIKINA N. A., BONCH-OSSMOLOVSKAYA E. A. (2007): *Thermincola ferriacetica* sp. nov., a new anaerobic, thermophilic, facultatively chemolithoautotrophic bacterium capable of dissimilatory Fe(III) reduction. *Extremophiles* 11, 1–7.

Příloha 1 – Charakteristiky vybraných konstrukčních prvků

Tab. 6: Charakteristika, složení a použití vybraných konstrukčních prvků používaných v běžné stavební praxi dodávaných společnostmi Minova Bohemia, s.r.o.

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
Injekční zavrtávací kotevní tyče MAI SDA R a T	Injekční zavrtávací kotevní tyč MAI SDA R je nastavovatelná tyč opatřená po celé délce levotočivým oblým R-závitem a u tyče MAI SDA T závitem trapézovým. V podélné ose tyče prochází injekční otvor určený pro dopravu injekční směsi.	Pro její výrobu je použita silnostěnná ocelová trubka ze zušlechtné oceli o vysoké kvalitě. Závít je tuto trubku válcován za studena.	<ul style="list-style-type: none"> – kotevní práce v hornictví – kotevní práce v podzemním stavitelství – zvyšování únosnosti podzákladí – kotvení svahů – zajištění stability základů – kotvení stavebních konstrukcí – v nesoudržných zeminách, porušených horninách nebo stavebních konstrukcí, kde není možno zajistit stabilitu vývrtnu – zavrtávací ztracené injekční jehly – pro injektáž a upínání kotevních tyčí jsou využívány polyuretanové nebo organicko-minerální pryskyřice a cementy 	Kotvení
Injekční zavrtávací kotevní tyče R a T	Injekční zavrtávací kotevní tyč je nastavovatelná tyč opatřená po celé délce levotočivým oblým R-závitem (tyče typu R) a speciálně tvarovaným T-závitem (tyče typu T). V podélné ose tyče prochází injekční otvor určený pro dopravu injekční směsi.	Pro její výrobu je použita silnostěnná ocelová trubka ze zušlechtné oceli o vysoké kvalitě. Závít je tuto trubku válcován za studena.	<ul style="list-style-type: none"> – tyčové kotvy – tyčové mikropiloty – svorníky při vyztužování podzemních děl – vyztuž ochranných deštníků během ražby podzemních děl – hřebíky při vyztužování a stabilizaci svahů, násypů a míst ohrožených sesuvy – v nesoudržných zeminách, porušených horninách nebo 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<p>stavebních konstrukcí, kde není možno zajistit stabilitu vývrtu</p> <ul style="list-style-type: none"> – pro injektáž a upínání kotevních tyčí jsou využívány polyuretanové nebo organicko-minerální pryskyřice a cementy 	
Injekční zavrtávací kotevní tyče typu TITAN	<p>Injekční zavrtávací kotevní tyč TITAN je nastavovatelná tyč opatřená po celé délce levotočivým (pro průměry 30, 40 a 52 mm), resp. pravotočivým (pro průměry 52 až 127 mm), speciálně tvarovaným závitem.</p> <p>V podélné ose tyče prochází injekční otvor určený pro dopravu injekční směsi.</p>	Pro její výrobu je použita silnostěnná ocelová trubka ze zušlechtěné oceli o vysoké kvalitě.	<ul style="list-style-type: none"> – dočasné tyčové kotvy – tyčové mikropiloty – svorníky při vyztužování podzemních děl – vyztuž ochranných deštníků během ražby podzemních děl – hřebíky při vyztužování a stabilizaci svahů, násypů a míst ohrožených sesuvy – v nestabilním prostředí zemin, porušených skalních a poloskalních hornin 	Kotvení Stabilizace
Hydraulicky upínané svorníky Swellex Sp	<p>Základním prvkem hydraulicky upínaného svorníku Swellex Sp je uzavřený tenkostěnný profil, podélně zborcený, na koncích uzavřený plnicí a ukončovací koncovkou. Vnitřní stěna je opatřena speciálním olejovým povlakem.</p> <p>Po zasunutí svorníku do předvrtaného kotevního vývrtu se jeho zborcený profil opětovně vyrovná tlakem hydraulického média (voda) nebo vzduch, čímž dojde k dolehnutí stěny svorníku k povrchu horniny.</p>		<ul style="list-style-type: none"> – vyztužování důlních děl, tunelů, kolektorů apod. – zajištění stability uhelných pilířů a stěn – přechod tektonických poruch – stabilizace přechodu porubchodba – zajištění nadloží sloje před porubem 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	S ohledem na způsob aktivace jsou svorníky po instalaci okamžitě plně únosné a zatížení je přenášeno rovnoměrně po celé jejich délce. Tahové zatížení svorníku je poté na horninu přenášeno třením na styku pláště svorníku a stěny kotevního vývrtu.			
Celozávitové kotevní tyče CKT	Ocelová celozávitová kotevní tyč opatřená po celé délce speciálním průběžným závitem, zvyšující jednak spolupůsobení mezi kotevním tmelem a jednak umožňujícím nastavování nebo zkracování tyčí v libovolném místě	Celozávitové kotevní tyče typu CKT jsou vyráběny z vysoce kvalitních ocelí tříd ST 500 S a S 670 H.	<ul style="list-style-type: none"> – krátké kotevní prvky (svorníky) lepené po celé své délce při ražbě podzemních děl – dočasné injektované horninové a zemní kotvy s možností jejich předepnutí – svahové a skalní hřebíky injektované cementem (např. Ekoment RT, Ekoment RAPID nebo organicko-minerální pryskyřicí (např. Geoflex) nebo lepené polyesterovými ampulemi LOKSET – kotvení rámové výztuže v hornictví a podzemním stavitelství – spínání objektů a pomocná dočasná výztuž při rekonstrukcích 	Kotvení
Celozávitové předpínací kotevní tyče CKT	Celozávitové předpínací kotevní tyče CKT jsou po celé délce opatřeny průběžným pravotočivým závitem, válcovaným na tyč za tepla. Závit umožňuje libovolné zkracování nebo nastavování tyčí pomocí závitových spojníků a zároveň zvyšuje	Celozávitové předpínací kotevní tyče CKT jsou vyráběny z vysokojakostní oceli třídy Y 1050 (St 950/1050 MPa).	<ul style="list-style-type: none"> – realizace dočasných nebo trvalých předpínaných tyčových kotev v oblasti geotechniky a podzemního stavitelství – realizace kotevních prvků lepených po celé své délce (SN kotev) v podzemním stavitelství 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	spolupůsobení mezi kotevní tyčí a kotevním tmelem.		<ul style="list-style-type: none"> – provádění předpjatých betonových konstrukcí a zvyšování únosnosti konstrukcí dodatečnou výztuží v pozemním stavitelství – zvyšování odolnosti mostů – spínání konstrukcí v rámci jejich sanace a rekonstrukce – upínají se lepením pomocí speciálních kotevních směsí na bázi cementu, speciálních chemických materiálů určených pro kotvení nebo pomocí lepicích polyesterových ampulí. 	
Celozávitové kotevní tyče GS 25	<p>Kotevní tyče GS 25 jsou opatřeny po celé délce speciálním průběžným pravotočivým závitem s vysokým stoupáním, zvyšujícím spolupůsobení mezi kotevním tmelem a kotevní tyčí. Použitím vysokojakostní třídy oceli je docíleno vysoké tahové únosnosti tyče na mezi pevnosti při současné vysoké hodnotě protažení.</p>		<ul style="list-style-type: none"> – krátké kotevní prvky (svorníky) lepené po celé své délce při ražbě podzemních děl – kotvení ocelové výztuže v hornictví – kotvení rámové výztuže v podzemním stavitelství – ke stabilizaci strojních prvků (dopravníky, vrátky, čerpadla apod.) – ke stabilizaci horninového masivu v místech zvýšeného horninového napětí – upínají se pomocí polyesterových lepicích ampulí LOKSET nebo injektáží pomocí kotevních směsí na cementové nebo chemické bázi 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
Tyčové SN svorníky, typ G Tyčové PG svorníky, typ G-KRC	Ocelové tyčové SN svorníky typu G a G-KRC jsou určeny pro kotevní práce především v podzemní výstavbě (tunelová výstavba, hornictví). Ocelové tyčové PG svorníky jsou standardního typu G doplněné o HDPE injekční a ochranný návlek a injekční koncovku, osazenou před kotevní maticí.	Pro výrobu tyčových svorníků typu G a G-KRC je použita žebírková ocel třídy ST 500 S (500/550 MPa)	<ul style="list-style-type: none"> – radiální kotvení jako součást kombinované výztuže nebo jako samostatná svorníková výztuž při ražbě podzemních děl – lepené svorníky pomocí cementové kotevní směsi – lepené svorníky pomocí ampulí LOKSET – kotvení technologických zařízení – zesílení svorníkové výztuže stropů – zesílení podpěrné obloukové výztuže 	Kotvení
Lanové kotvy MCA-I	Výztuž lanové kotvy MCA-T tvoří pramence z předpínací oceli, vedené ve volné délce v HDPE návleku. V souladu s ČSN EN 1537 jsou lanové kotvy MCA-T konstruovány jako dočasné, s návrhovou životností kratší než 2 roky	Lanové kotvy MCA- T jsou tvořeny sedmidrátovými pramenci z oceli třídy 1670/1860 MPa jsou dodávány standardně s jednoduchou antikorozi úpravou a HDPE ochranou volné délky. V případě kotvení v agresivním prostředí jsou pramence dodávány se speciální antikorozi povrchovou úpravou (s dráty opatřenými epoxidovou ochranou).	<ul style="list-style-type: none"> – kotvení opěrných zdí – kotvení tunelových portálů – stabilizace strmých svahů a zářezů – kotvení skalních útvarů 	Kotvení
Lanové kotvy MCA-P	Výztuž lanové kotvy MCA-P tvoří pramence z předpínací oceli, vedené ve volné délce v ochranném žebrovaném HDPE návleku. V souladu s ČSN EN 1537 jsou lanové kotvy MCA-P konstruovány jako trvalé, s návrhovou životností delší než 2 roky	Lanové kotvy MCA- P jsou tvořeny sedmidrátovými pramenci z oceli třídy 1670/1860 MPa jsou dodávány standardně s jednoduchou antikorozi úpravou a HDPE ochranou volné délky. V případě kotvení v agresivním prostředí jsou pramence dodávány se speciální antikorozi povrchovou úpravou (s dráty opatřenými epoxidovou ochranou)	<ul style="list-style-type: none"> – kotvení opěrných zdí – kotvení tunelových portálů – stabilizace strmých svahů a zářezů – kotvení skalních útvarů 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
Sklolaminátové kotevní tyče typu Durglass FL	<p>Sklolaminátové plné a injekční kotevní tyče jsou vyráběny tažením z průběžných skelných vláken, navzájem spojených polyesterovou pryskyřicí. Kombinací těchto materiálů se dosahuje vysoké pevnosti v tahu, kteří nedegradují v čase. Mají nízkou hmotnosti, ohebnost, dobré antikorozní vlastnosti a snadnou odstranitelnost díky nižší stříhové pevnosti.</p> <p>Kotevní tyče Durglass jsou vyráběny ve dvou modifikacích – plný kruhový profil a injekční kruhový profil (s průběžným otvorem v ose tyče).</p> <p>Sklolaminátové kotevní tyče jsou do prostředí upínány lepením, zpravidla po celé délce prvku.</p>		<ul style="list-style-type: none"> – upínají se lepením, zpravidla po celé délce vrtu, pomocí speciálních kotevních cementů (pro dočasné kotvení) nebo speciálních chemických materiálů určené pro kotevní práce anebo lepicích ampulí na bázi polyesteru – jehlování kolem výrubu – vyztužování předpolí ražených podzemních děl v kombinaci s injektáží – stabilizace strmých svahů a násypů – kotvení svahů, zářezů a stavebních jam – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů 	Kotvení Stabilizace
Sklolaminátové kotevní tyče typu Rockbolt	<p>Sklolaminátové plné a injekční kotevní tyče jsou vyráběny z jakostních skelných vláken, navzájem spojených zpravidla polyesterovou pryskyřicí, případně pro speciální použití vinylesterovou nebo epoxidovou pryskyřicí. Kombinace těchto dvou syntetických materiálů je dosaženo výborných mechanických vlastností, které nedegradují v čase. Mají zvýšenou odolnost vůči chemickým vlivům a nepodléhají korozi.</p> <p>Kotevní tyče Rockbolt jsou vyráběny ve třech modifikacích - plný kruhový profil s ozn. K, injekční kruhový profil s ozn. J</p>		<ul style="list-style-type: none"> – trvalé radiální svorníkování – radiální svorníkování s částečným odebráním délky – stabilizace čelby kotvením – stabilizace kotvením v kombinaci s injektáží – svorníkování a jehlování horniny v profilu ražby – trvalé nebo částečné hřebíkování svahů s možností následného odtěžení – pasivní a aktivní kotevní prvky – skalní svorníky a injekční jehly 	Kotvení Stabilizace

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	(s průběžným otvorem v ose tyče) a injekční zavrtávací tyče Spinmax (typu IBO resp. SDA). Kotvení pomocí sklolaminátových tyčí se využívá pro dočasnou stabilizaci horninového masivu, kdy se uvažuje s jeho následným částečným nebo úplným odtěžením.			
Sklolaminátové kotevní profily Durglass Kombinované injekční profily typu P	Injekční sklolaminátové kombinované kotevní profily Durglass, typ P se skládají ze tří hlavních součástí. Základem je jeden sklolaminátový profil přenášející tahové zatížení tvořený průběžnými skelnými vlákny navzájem spojenými polyesterovou pryskyřicí. Kotevní profil je doplněn o injekční trubku nebo hadici (dle typu), sloužící k transportu injekční směsi do vývrtu. Tahové sklolaminátový a injekční hadice jsou spojeny speciálními spojovacími elementy.		<ul style="list-style-type: none"> – kombinované kotevní profily spojují vysokou tahovou únosnost kotevních prvků s možností vysokotlaké injektáže prostředí – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů – konsolidace čelby ražených podzemních děl – stabilizace strmých svahů a násypů – kotvení svahů, zářezů, stavebních jam a dalších geotechnických konstrukcí 	Kotvení Stabilizace
Sklolaminátové kotevní profily Durglass Kombinované injekční profily typu ES	Injekční sklolaminátové kombinované kotevní profily Durglass, typ ES se skládají ze tří hlavních součástí. Základ tvoří tři ploché sklolaminátové profily přenášející tahové zatížení, které jsou obdélníkového průřezu a jsou tvořeny průběžnými skelnými vlákny navzájem spojenými polyesterovou pryskyřicí. Středem kotevního prvku je vedena injekční trubka nebo hadice (dle		<ul style="list-style-type: none"> – kombinované kotevní profily spojují vysokou tahovou únosnost kotevních prvků s možností vysokotlaké injektáže prostředí – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů – konsolidace čelby ražených podzemních děl – stabilizace strmých svahů a násypů 	Kotvení Stabilizace

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	typu), sloužící k transportu injekční směsi do vývrtu. Tahové sklolaminátové a injekční hadice jsou spojeny speciálními spojovacími elementy, které zajišťují optimální vzájemnou pozici sklolaminátových profilů.		– kotvení svahů, zářezů, stavebních jam a dalších geotechnických konstrukcí	
Sklolaminátové kotevní profily Durglass Kombinované injekční profily typu Y	Injekční sklolaminátové kombinované kotevní profily Durglass, typ Y se skládají ze tří hlavních součástí. Základem je jeden sklolaminátový profil přenášející tahové zatížení tvořený průběžnými skelnými vlákny navzájem spojenými polyesterovou pryskyřicí. Kotevní profil je doplněn o injekční trubku nebo hadici (dle typu), sloužící k transportu injekční směsi do vývrtu. Tahové sklolaminátové a injekční hadice jsou spojeny speciálními spojovacími elementy.		– kombinované kotevní profily spojují vysokou tahovou únosnost kotevních prvků s možností vysokotlaké injektáže prostředí – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů – konsolidace čelby ražených podzemních děl – stabilizace strmých svahů a násypů – kotvení svahů, zářezů, stavebních jam a dalších geotechnických konstrukcí	Kotvení Stabilizace
Sklolaminátové kotevní profily Durglass Kombinované injekční profily typu ED	Injekční sklolaminátové kombinované kotevní profily Durglass, typ ED se skládají ze tří hlavních součástí. Základ tvoří dva ploché sklolaminátové profily přenášející tahové zatížení, které jsou obdélníkového průřezu a jsou tvořeny průběžnými skelnými vlákny navzájem spojenými polyesterovou pryskyřicí. Středem kotevního prvku je vedena injekční trubka nebo hadice (dle typu), sloužící k transportu injekční směsi do vývrtu. Tahové sklolaminátové		– kombinované kotevní profily spojují vysokou tahovou únosnost kotevních prvků s možností vysokotlaké injektáže prostředí – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů – konsolidace čelby ražených podzemních děl – stabilizace strmých svahů a násypů	Kotvení Stabilizace

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	a injekční hadice jsou spojeny speciálními spojovacími elementy, které zajišťují optimální vzájemnou pozici sklolaminátových profilů.		– kotvení svahů, zářezů, stavebních jam a dalších geotechnických konstrukcí	
Lepicí ampule LOKSET	<p>Polyesterové lepicí ampule LOKSET jsou určeny k lepení plných ocelových a sklolaminátových kotevních tyčí, kotevních šroubů, speciálních lanových a pramencových svorníků.</p> <p>Jsou dodávány ve třech základních druzích – HS Fast, HS Slow a HS Ultra Slow, lišících se rychlostí vytvrzovací reakce.</p>	<p>Lepicí ampule LOKSET jsou dvousložkové. Obsahují polyesterovou pryskyřici a tvrdidlo v přesně odměřeném množství. Pryskyřice a tvrdidlo se nacházejí v oddělených komorách, které jsou vytvořeny z několikavrstvé fólie, odolné proti porušení. Pryskyřičná část obsahuje směs nenasycených polyesterových pryskyřic, minerální pojivo a prostředek zamezující sedimentaci. Tvrdidlo obsahuje zředěný organický peroxid. Ampule je na obou koncích uzavřena svorkami a standardně je opatřena rozpěrným prvkem, který zabrání jejímu vyjetí z ukloněných nebo svislých vrtů.</p> <p>Lepicí ampule LOKSET mohou být použity pouze mimo oblasti zdrojů pitných vod.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – upínání (lepení) ocelových a sklolaminátových tyčových svorníků při vyztužování v podzemním stavitelství a hornictví – upínání krátkých tyčových kotev ve skalních horninách – upínání speciálních kotevních prvků – upínání (lepení) speciálních lanových a pramencových svorníků – kotvení strojů a zavěšování strojního zařízení – kotvení sloupků, bariér záchytných systémů – kotvení ve stavebních konstrukcích se zvýšenou odolností proti vibracím – lepicí ampule LOKSET je možno aplikovat při teplotách v rozmezí od +5 °C do +60 °C 	Kotvení
Geoflex	Rychle reagující nepěnicí dvousložková elastifikovaná organicko-minerální injekční pryskyřice s výbornou přilnavostí i na mokřím povrchu k hornině a stavebním materiálům. Je	<p>Geoflex, složka A, je speciální sodné vodní sklo s přísadami.</p> <p>Geoflex, složka B, je modifikovaný polyisokyanát na bázi difenylmethan-4-4'-diisokyanátu (MDI), který konečnému produktu propůjčuje pevnost</p>	<ul style="list-style-type: none"> – zpevnění a stabilizace styku porub - chodba – lepení injekčních kotevních tyčí pramencových svorníků, lanových kotev – sanace starých důlních děl 	Stabilizace Zpevnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	vhodná pro injektáž trhlin s šířkou nad 0,25 mm. Vzhledem k rychlosti chemické reakce je Geoflex klasifikován jako okamžitě únosný. S ohledem na jeho flexibilní vlastnosti je Geoflex schopen přetvoření při namáhání způsobené pohybem hornin a stavebních konstrukcí.		<ul style="list-style-type: none"> – zpevnění a utěsnění stavebních konstrukcí – pryskyřice Geoflex je použitelná při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	
Ekoment RT	Ekoment RT je hydraulická prefabrikovaná směs na bázi portlandského cementu. Kotevní směs Ekoment RT je jednoduše zpracovatelná, neinklinuje k segregaci, má nízké smrštění a je objemově stálá. Ekoment RT dosahuje v krátkém čase vysokých hodnot pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (v přímé závislosti na zvoleném vodním součiniteli).	Směs Ekoment RT obsahuje kromě základní báze speciální cementy, plnivo o max. velikosti zrna 0,3 mm a speciální plastifikační přísady.	<ul style="list-style-type: none"> – upínání tyčových ocelových nebo syntetických kotev – aplikace zavrtávacích kotevních systémů R a typu TITAN – výplňové a zpevňující injektáže 	Kotvení
Ekoment RAPID	Ekoment RAPID je modifikovaná varianta směsi plnící požadavek na rychlejší náběh pevností. Využívá směs portlandského a hlinitanového cementu (< 15 %). Kotevní směs Ekoment RAPID tak jako Ekoment RT je jednoduše zpracovatelná, neinklinuje k segregaci, má nízké smrštění a je objemově stálá. Ekoment RAPID tak jako Ekoment R dosahuje v krátkém čase vysokých hodnot pevnosti v tlaku a v tahu za	Směs Ekoment RAPID obsahuje kromě základní báze speciální cementy, plnivo o maximální velikosti zrna 0,5 mm a speciální plastifikační přísady.	<ul style="list-style-type: none"> – upínání kotevních prvků s možností aktivace v krátkém čase 	Kotvení

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	ohybu (v přímé závislosti na zvoleném vodním součiniteli).			
CarboPur WX	Pomalou reagující dvousložková injekční pryskyřice, neobsahující fluorované a chlorované uhlovodíky a halogeny. CarboPur WX může být aplikován jako jednosložková nebo dvousložková pryskyřice. Vyznačuje se dlouhou dobou reakce v suchém prostředí, na styku s vodou významně urychlenou. Použitelná při teplotách 0 – 40 °C.	Složka A je směs polyolů a přísad, která spolu se složkou B reaguje na tvrdou a houževnatou polyuretanovou pryskyřici. Složka B je polyisokyanát na bázi difenymethan-4,4'-diisokyanátu (MDI)	<ul style="list-style-type: none"> – zpevnění slabě saturovaných zemin a hornin – utěsnění přítoků vody z horniny, průsaků hrází nebo ostění podzemních děl, včetně přítoků vod s obsahem minerálních solí – sanace ostění šachet, tunelů, kanálů a kolektorů – zpevnění a utěsnění betonu, cihelného a smíšeného zdiva injektáží – upínání lepených typů kotevních prvků v prostředí obsahující pouze malé množství vody. 	Kotvení Utěsnění Stabilizace Zpevnění
CarboPur WF	Velmi rychle reagující dvousložková polyuretanová injekční pryskyřice, neobsahující fluorované a chlorované uhlovodíky a halogeny.	Složka A je směs polyolů a přísad, která spolu se složkou B reaguje na tvrdou a houževnatou polyuretanovou pryskyřici. Složka B je polyisokyanát na bázi difenymethan-4,4'-diisokyanátu (MDI)	<ul style="list-style-type: none"> – zpevnění hornin a zemin při teplotě injektovaného prostředí až do -15 °C – utěsnění přítoků vody z horniny, průsaků hrází nebo ostění podzemních děl včetně přítoků vod s obsahem minerálních solí s teplotou nad 15 °C – sanace netěsných šachet, tunelů, kanálů a kolektorů – zpevnění a utěsnění betonu, cihelného a smíšeného zdiva – pryskyřice CarboPur WF je použitelná při teplotách v rozmezí od -15 °C do +40 °C 	Utěsnění Stabilizace Zpevnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
CarboPur WFA	Okamžitě tuhnutí dvousložková polyuretanová injekční pryskyřice, neobsahující fluorované a chlorované uhlovodíky a halogeny.	Složka A je směs polyolů a přísad, která spolu se složkou B reaguje na tvrdou a houževnatou polyuretanovou pryskyřici. Složka B je polyisokyanát na bázi difenylmethan-4,4'-diisokyanátu (MDI)	<ul style="list-style-type: none"> – zpevňování zemin a hornin při teplotě injektovaného zpevnění zemin a hornin – utěsnění přítoků vody z horniny, průsaků hrází nebo ostění podzemních děl včetně přítoků vod s obsahem minerálních solí – utěsnění přítoků tlakové vody – stabilizační a těsnící práce v tunelech – sanace netěsných šachet, tunelů, kanálů a kolektorů – zpevnění a utěsnění betonu, cihelného a smíšeného zdiva – utěsnění hlavic zemních kotev – pryskyřice CarboPur WFA je použitelná při teplotách v rozmezí od - 25 °C do +30 °C 	Utěsnění Stabilizace Zpevnění
CarboPur WT	Velmi rychle reagující dvousložková polyuretanová injekční pryskyřice s okamžitým nárůstem viskozity, neobsahující fluorované a chlorované uhlovodíky a halogeny. Je určena pro zastavení a utěsnění silných průsaků vod a vody proudící pod tlakem.	Složka A je směs polyolů a přísad, která spolu se složkou B reaguje na tvrdou a houževnatou polyuretanovou pryskyřici. Složka B je polyisokyanát na bázi difenylmethan-4,4'-diisokyanátu (MDI)	<ul style="list-style-type: none"> – utěsnění přítoků vody z horniny, průsaků hrází nebo ostění podzemních děl včetně přítoků vod s obsahem minerálních solí – utěsnění přítoků tlakové vody i z širokých trhlin – utěsnění štětových stěn a podzemních děl – utěsnění betonových konstrukcí vodohospodářských staveb – pryskyřice CarboPur WT je použitelná při teplotách v rozmezí od -5°C do +40°C 	Utěsnění Stabilizace Zpevnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
CarboStop 42 - CarboAdd 42	<p>S vodou rychle reagující jednosložková hydrofobní polyuretanová pryskyřice s velmi nízkou viskozitou při aplikaci. Separátní katalyzátor umožňuje nastavení doby reakce v závislosti na teplotě prostředí a okolních podmínkách. Tvoří tuhou pěnu s nízkým stupněm napětí a je určena ke zpevnění a utěsnění jemnozrnných zvodnělých zemin, injektáži rozvolněných hornin a injektáži porézních struktur. Neobsahuje fluorované a chlorované uhlovodíky ani rozpouštědla.</p>	<p>Pryskyřice CarboStop 42 se skládá z modifikovaných isokyanátů s aditivy. CarboAdd 42 je akcelerátor, umožňující řídit rychlost reakce podle potřeby</p>	<ul style="list-style-type: none"> – zpevnění jemnozrnných, ulehých a málo propustných písků – zpevnění rozvolněných hornin – utěsnění přítoků vody v propustných a málo propustných zeminách a rozvolněných horninách – lepení lanových a tyčových kotev a svorníků ve vodonosných jemných píscích – zpevňující a utěsňující injektáž při ražbě podzemních děl – rubová injektáž stavebních konstrukcí – pryskyřice CarboStop 42 je použitelná při teplotách v rozmezí od -5 °C do +40 °C 	<p>Utěsnění Stabilizace</p>
CarboStop 102 - CarboAdd 102	<p>S vodou rychle reagující jednosložková hydrofobní polyuretanová pryskyřice s nízkou viskozitou při aplikaci. Separátní katalyzátor umožňuje nastavení doby reakce v závislosti na teplotě prostředí a okolních podmínkách. Tvoří tvrdou pěnu a je určena k utěsnění trhlin a spár stavebních konstrukcí a injektáž porézních struktur. Neobsahuje fluorované a chlorované uhlovodíky ani rozpouštědla.</p>	<p>Pryskyřice CarboStop 102 se skládá z modifikovaných isokyanátů s aditivy. CarboAdd 102 je akcelerátor, umožňující řídit rychlost reakce podle potřeby</p>	<ul style="list-style-type: none"> – zastavení velkých přítoků vody včetně tlakové z nepohyblivých trhlin v konstrukcích – utěsňování průsaků z podzemních stěn – utěsnění přítoků vody v zeminách a rozvolněných horninách – výplňová injektáž hydroizolačních membrán v tunelové stavitelství – zpevňující a utěsňující injektáž v předpolí při ražbě tunelů – injektáž pracovních spár při využití speciálních postupů 	<p>Utěsnění</p>

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<ul style="list-style-type: none"> – zpevňující injektáž v podzákladi staveb – rubová injektáž stavebních konstrukcí – pryskyřice CarboStop 102 je použitelná při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	
CarboStop 401 (LV, SLV) - CarboAdd 401	<p>S vodou rychle reagující, jednosložkové polyuretanové pryskyřice se separátním akcelerátorem, který umožňuje nastavit dobu reakce. Pryskyřice řady CarboStop 401 tvoří pružnou pěnu, která je určena k utěsnění trhlin a spár stavebních konstrukcí a k injektáži porézních struktur. Neobsahují fluorované a chlorované uhlovodíky ani rozpouštědla.</p>	<p>Pryskyřice CarboStop 401 jsou na bázi modifikovaných isokyanátů a aditiv, neobsahující ftalátové plastifikátory. CarboAdd 401 je akcelerátor, umožňující řídit rychlost reakce podle potřeby</p>	<ul style="list-style-type: none"> – těsnění trhlin a spár v konstrukcích namáhaných pohybem a dynamickým zatížením – dotěšňování pracovních spár stavebních konstrukcí – zastavení průsaků nebo přítoků vody z horniny, průsaků hrází nebo ostění podzemních děl – utěsnění na kontaktu s izolačními foliovými systémy podzemních částí staveb – výplňová injektáž za ostěním ražených podzemních děl – rubová injektáž stavebních konstrukcí – CarboStop 401 se aplikuje do trhlin šířky $\geq 4,0$ mm – CarboStop 401 LV se aplikuje do trhlin, jejichž šířka v rozmezí 0,5 - 4,0 mm – CarboStop 401 SLV se aplikuje do trhlin šířky $< 0,5$ mm 	Utěsnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<ul style="list-style-type: none"> – pryskyřice CarboStop 401 je použitelná při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	
CarboCrackseal H Plus	Pomalou reagující, trvale pružná a vysoce elastická dvousložková polyuretanová pryskyřice s nízkou viskozitou při aplikaci. Používá se k vyplňování, utěšňování a pružnému spojení trhlin a spár ve stavebních konstrukcích (např. z betonu, přírodního kamene nebo cihel)	CarboCrackseal H Plus - složka A sestává z hydrofobní polyolů a aditiv. CarboCrackseal H Plus - složka B je modifikovaný isokyanát	<ul style="list-style-type: none"> – těsnění trhlin a spár v konstrukcích namáhaných dynamickým zatížením – utěšnění cihelného zdiva a betonových konstrukcí – dotěšňování pracovních spár monolitických stavebních konstrukcí – utěšňovací práce na vnitřních obezdívkách tunelů, betonových van a podzemních stěn – utěšnění pracovních spár betonových konstrukcí pomocí předem vložených injekčních hadic (utěšňování pozemních konstrukcí založených na principu "bílá vana") – pryskyřice CarboCrackseal H Plus je použitelná při teplotách v rozmezí od +5 °C do +30 °C 	Utěšnění
CarboCryl Hv	Těsnící, pružný dvousložkový injekční metakrylátový gel s hydrofilními vlastnostmi.	CarboCryl Hv - složka A1 je vodný roztok metakrylátu. CarboCryl Hv - složka A2 je urychlovač na bázi aminu. CarboCryl Hv - složka B2 je tvrdidlo, persůl, který se dodává v pevném stavu rozpustném ve vodě. CarboCryl Hv neobsahuje akrylamid ani jeho deriváty.	<ul style="list-style-type: none"> – stabilizace jemnozrnných zemin (jemný prach, písek) – injektáž trhlin – injektáž těsnících stěn – injektáž zdiva – vytvoření horizontální clony proti vzlínající vlhkosti 	Utěšnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<ul style="list-style-type: none"> – rubová injektáž konstrukcí v podzemním, pozemním a dopravním stavitelství – aktivace pojistných hydroizolačních systémů – injektáž pracovních spár prostřednictvím injekčních hadiček – metakrylátový gel je Carbokryl Hv je použitelný při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	
CarboCryl Hv Long	Těsnící, pružný dvousložkový injekční metakrylátový gel s hydrofilními vlastnostmi.	CarboCryl Hv Long - složka A1 je vodný roztok metakrylátu. CarboCryl Hv Long - složka A2 je urychlovač na bázi aminu. CarboCryl Hv Long - složka B2 je tvrdidlo, persůl, který se dodává v pevném stavu rozpustném ve vodě. CarboCryl Hv Long neobsahuje akrylamid ani jeho deriváty.	<ul style="list-style-type: none"> – stabilizace jemnozrnných zemin (jemný prach, písek) – injektáž těsnících stěn – injektáž zdiva – vytvoření horizontální clony proti vztlínající vlhkosti – rubová injektáž konstrukcí v podzemním, pozemním a dopravním stavitelství – aktivace pojistných hydroizolačních systémů – metakrylátový gel je Carbokryl Hv Long je použitelný při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	Utěsnění
CarboCryl Wv	Velmi rychle utěšňující hydrofilní, flexibilní dvousložkový metakrylátový gel	CarboCryl Wv - složka A1 je vodný roztok metakrylátu. CarboCryl Wv - složka A2 je urychlovač na bázi aminu. CarboCryl Wv - složka B2 je tvrdidlo, persůl, který se dodává v pevném stavu rozpustném ve vodě. CarboCryl Wv neobsahuje akrylamid ani jeho deriváty.	<ul style="list-style-type: none"> – utěšňování přítoků vody, včetně přítoků tlakové vody – rubové injektáže konstrukcí v zeminách a nesoudržných zeminách – clonové injektáže v půdě a rozvolněné hornině 	Utěsnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<ul style="list-style-type: none"> – sanaci dilatačních spár – metakrylátový gel je Carbokryl Wv je použitelný při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	
CarboCryl Plus	CarboCryl Plus je vodní disperze polyakrylátu, která může být použita místo vody k přípravě složky B při zpracování metakrylátových gelů CarboCryl Hv a CarboCryl Wv. Použití disperze CarboCryl Plus vede ke zvýšení flexibility a přilnavosti gelů k materiálům na silikátové bázi. Rovněž se takto zvýší obsah pevné hmoty gelu, což vede k výraznému snížení smršťování v suchém prostředí. Toto je obzvláště účelné v místech, kde je nutné počítat s vysycháním gelu na kontaktu se vzduchem.	CarboCryl Plus je vodní disperze polyakrylátu.	<ul style="list-style-type: none"> – sanace dilatačních spár gelem CarboCryl Wv Plus – sanace trhlin gelem CarboCryl Hv Plus – CarboCryl Plus je použitelný při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	Utěsnění
CarboCryl SPlus	CarboCryl SPlus je vodní disperze polyakrylátu, která může být použita místo vody k přípravě složky B při zpracování metakrylátových gelů CarboCryl Hv a CarboCryl Wv. Použití disperze CarboCryl SPlus vede ke zvýšení flexibility a přilnavosti gelů k materiálům na silikátové bázi. Rovněž se takto zvýší obsah pevné hmoty gelu, což vede k výraznému snížení smršťování v suchém prostředí. Toto je obzvláště účelné v místech, kde je nutné	CarboCryl SPlus je vodní disperze polyakrylátu	<ul style="list-style-type: none"> – sanace dilatačních spár gelem CarboCryl Wv Plus – sanace trhlin gelem CarboCryl Hv Plus – CarboCryl SPlus je použitelný při teplotách v rozmezí od +5 °C do +40 °C 	Utěsnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
	počítat s vysycháním gelu na kontaktu se vzduchem.			
CarboEpoX	Dvousložková epoxidová pryskyřice s velmi nízkou viskozitou, neobsahující organická rozpouštědla, určená k injektážím betonových konstrukcí, a to i ve vlhkém prostředí.	CarboEpoX - složka A je epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu-A, neobsahující organická rozpouštědla. CarboEpoX - složka B je tvrdidlo na bázi polyaminů	<ul style="list-style-type: none"> – injektáž betonových konstrukcí – utěšňování porézních betonových konstrukcí – zpevňování a utěšňování betonových konstrukcí vyplňování trhlin a mikrotrhlin – lepení a kotvení – CarboEpoX je použitelná při teplotách povrchu konstrukce v rozmezí od +10 °C do +40 °C. 	Utěšnění Zpevnění
WilkitFoam T	WilkitFoam T je rychle reagující, silně napěňující výplňová pěna na organicko-minerální pryskyřice, neobsahující fluorované a chlorované uhlovodíky a halogeny. Pryskyřice WilkitFoam T je odolná vůči vodě, zředěným kyselinám a alkalickým roztokům. Neabsorbuje vodu. Je neutrální vůči podzemním vodám a nemá vliv na jejich kvalitu.	WilkitFoam T - složka A je modifikované vodní sklo. WilkitFoam T - složka B je modifikovaný isokyanát. Složky neobsahují žádná organická rozpouštědla ani změkčovadla.	<ul style="list-style-type: none"> – rychlé vyplňování kaveren a nadvýlomů při výstavbě tunelů, podzemních děl apod. – zpevňování a utěšňování hornin a nesoudržných zemin – zastavení přítoků vody – stabilizace nadvýlomů při výstavbě tunelů – budování bariér při vyplňování kaveren – zabránění hromadění plynů – WilkitFoam T je použitelná při teplotách prostředí v rozmezí od +10 °C do +40 °C. 	Stabilizace Vyplňování
Jetblend	Injekční směs Jetblend je prefabrikovaný rychle tuhnoucí přípravek, obsahující speciální cementy a přísady.		<ul style="list-style-type: none"> – zpevňující injektáže v prostředí skalních hornin a zemin – provádění injektovaných a zavrtávaných mikropilot 	Stabilizace Zpevnění

Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
			<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="1435 277 1883 347">– injektáž kořenové části lanových a tyčových kotev<li data-bbox="1435 347 1883 421">– kontaktní injektáž (mezi horninou a stavební konstrukcí)	

Tab. 7: Charakteristika, složení a použití samozavrtávacích tyčových kotev, resp. IBO a sklolaminátových tyčí používaných v běžné stavební praxi dodávaných společnostmi STAGEO, s.r.o., resp. Sanax chemical construction s.r.o.

Dodavatel:	STAGEO, s.r.o.			
Obchodní název	Charakteristika	Složení	Použití	Aplikace
Samozavrtávací tyčové kotvy	Ocelové tyče jsou opatřeny oblým závitem typu R po celé délce. Ty slouží během vrtání jako vrtné tyče, spojovány jsou pomocí spojníků. Při vrtání jsou kotevní tyče zároveň cementovány (injektovány).		<ul style="list-style-type: none"> – kotvení a mikropilotáž v nesoudržných horninách – realizaci podzemních děl, ražení štol a tunelů – kotvení opěrných zdí 	Kotvení
Dodavatel:	Sanax chemical construction s.r.o.			
IBO tyče	Injekční zavrtávací kotevní IBO tyče jsou ocelové nastavitelné tyče opatřené po celé délce závitem. U typu R je závit levotočivý oblý, u typu T je závit trapézový. V podélné ose tyče prochází otvor určený pro injektáž. Hlavice tyče je opatřena zavrtávací korunkou. Tyč lze krátit či nastavovat do libovolné délky.	IBO tyče jsou vyrobeny z ušlechtilé oceli o vysoké kvalitě.	<ul style="list-style-type: none"> – kotevní práce v podzemním stavitelství a hornictví – kotvení svahů – zvyšování únosnosti podzákladí – zajištění stability základů – vyztužování ostění tunelů 	Kotvení
GlasBar FL	Sklolaminátové GlasBar FL jsou vyrobeny ze skelných vláken spojených polyesterovou pryskyřicí. Na povrchu jsou opatřeny křemičitou úpravou, která zajišťuje lepší spolupůsobení s okolním materiálem. Kombinace syntetických materiálů zajišťuje výborné mechanické vlastnosti a zároveň odolnost vůči chemickým vlivům a korozi. Tyče je možné libovolně nastavovat či krátit do požadované délky.		<ul style="list-style-type: none"> – radiální vyztužování průzkumných štol tunelů – jehlování kolem výrubu – vyztužování předpolí – stabilizace svahů, stavebních jam – ve všech případech je vhodná kombinace s injektáží 	Kotvení

Tab. 8: Charakteristika, složení a použití vybraných jak produktů pro stříkané betony, tak injektážních produktů, používaných v běžné stavební praxi dodávaných společností Master Builders Solutions CZ s.r.o.

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
MasterRoc HCA 20	<p>MasterRoc HCA 20 je bezchloridový chemický systém, který řídí průběh hydratace, tzn., že umožňuje zastavení hydratačního procesu a po několika hodinách nebo dokonce dnech jeho opětovné nastartování, aniž by došlo ke snížení výsledných parametrů betonu.</p> <p>MasterRoc HCA 20 systém zahrnuje dva produkty MasterRoc HCA 20 a urychlovač MasterRoc.</p> <p>MasterRoc HCA 20 je tekutá složka, která po přidání do mokrého nebo suchého betonu zcela zastaví hydratační proces vytvořením ochranné bariéry kolem cementových částic.</p> <p>Urychlovač MasterRoc je tekutá přísada, která zpětně zaktivuje beton a nastartuje hydratační proces.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Dočasné i finální nástřiky. – Vyřešení technologických problémů staveb. – Metro (podzemní dráhy). – Hydroenergetické stavby, stoky. – Stabilizace svahů. – Opravy betonových konstrukcí a výplňových betonů. – Injektážní suspenze. 	Stříkaný beton
MasterRoc SA 183	<p>MasterRoc SA 183 je vysoce účinný nealkalický urychlovač tuhnutí pro stříkané betony, jehož dávkování se dá měnit podle požadované doby tuhnutí a tvrdnutí.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Dočasné a trvalé zajištění výrubu při ražbě tunelů a v dolech. – Zajištění svahů. – Vhodný i pro urychlování tuhnutí a tvrdnutí cementových injektážních směsí, používaných např. pro vyplňování prostoru za ostěním tunelů ražených plnoprofilovými tunelovacími stroji TBM, nebo směsí pro injektáže hornin a směsí pro pěnobeton. 	Stříkaný beton
MasterRoc SA 184	<p>MasterRoc SA 184 je tekutá vysokoúčinná bezalkalická přísada urychlující tuhnutí betonu na bázi hliníkových solí pro stříkané betony s vysokými nároky na vývoj počátečních pevností a vývoj pevnosti do 24 hodin.</p> <p>MasterRoc SA 184 umožňuje nástřik velké tloušťky vrstvy na stropních částech a zároveň</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Stříkaný beton – mokrou cestou – Stříkaný beton – suchou cestou – Stavba tunelů 	Stříkaný beton

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
	zpracování stříkaného betonu s vysokou konzistencí. Vývoj pevnosti může být řízený dávkováním urychlovače.		
MasterRoc SA 190	MasterRoc SA 190 je vysoce účinný bezalkalický urychlovač tuhnutí pro stříkaný beton, jehož dávkování lze měnit podle požadovaných dob tuhnutí a tvrdnutí.	<ul style="list-style-type: none"> – Dočasné a trvalé zajištění výrubu při ražení tunelů a při těžbě. – Zajišťování svahů. – Vhodný také pro urychlení tuhnutí cementové směsi, například pro injektáž prstenců v tunelech ražených s použitím technologie TBM, injektáž betonované plochy a pro pěnový beton. 	Stříkaný beton
MasterRoc SA 193	MasterRoc SA 193 je tekutá vysoce účinná bezalkalická přísada urychlující tuhnutí betonu na bázi hliníkových solí pro stříkané betony s vysokými nároky na vývoj počátečních pevností. MasterRoc SA 193 umožňuje nástřik velké tloušťky vrstvy na stropních částech a zároveň zpracování stříkaného betonu s vysokou konzistencí. Vývoj pevnosti může být řízen dávkováním urychlovače.	<ul style="list-style-type: none"> – Stříkaný beton – mokrou cestou – Stříkaný beton – suchou cestou – Stavba tunelů 	Stříkaný beton
MasterRoc SA 545	MasterRoc SA 545 je prášková, bezalkalická přísada pro stříkaný beton na urychlení tuhnutí a tvrdnutí. Je vhodná pro stříkaný beton suchou cestou.	<ul style="list-style-type: none"> – Stříkaný beton - suchou cestou – Stavba tunelů 	Stříkaný beton
MasterRoc TCC 735	MasterRoc TCC 735 je bezchloridová, víceúčelová tekutá přísada, která zlepšuje kvalitu stříkaného betonu v plastickém i vytvrzeném stavu. Jedinečné složení MasterRoc TCC 735 zajišťuje lepší hydrataci cementu. Výsledkem je značná redukce počátečního smršťování, lepší přilnavost a zvýšení hustoty a pevnosti v tlaku.	<ul style="list-style-type: none"> – Všechny druhy aplikací stříkaného betonu - mokrých směsí – Litý beton – Čerpaný beton – Systém MasterRoc TCC – Beton s nízkým obsahem cementu – Beton s neideální křivkou zrnitosti nebo s nízkým obsahem kameniva – Lití / stříkání v horkých klimatických podmínkách 	Stříkaný beton

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
MasterRoc MP 900	<p>MasterRoc MP 900 je velmi jemně mletý portlandský mikrocement, vhodný pro speciální způsoby použití, jako jsou injektáže a zálivky. Materiál MasterRoc MP 900 významně zvyšuje schopnost tzv. infiltrace do mikrotrhlinek. Tato schopnost je ve srovnání s běžnými rychlovaznými cementy podstatně vyšší. Navíc je dosažen vyšší stupeň vodotěsnosti.</p> <p>MasterRoc MP 900 má prodlouženou dobu do počátku tuhnutí/tvrdnutí a to až na 90 až 120 minut a vyznačuje se velice rychlým průběhem tvrdnutí. Směs je vytvrzená asi po 2,5 hodinách po zamíchání s vodou.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Injektáže: <ul style="list-style-type: none"> • stabilizační injektáže, • vodotěsnost – Trysková injektáž. – Kontaktní injektáž. – Injektážní hadice Masterflex 900 FUKO. – Trhlinky v betonu. 	Injektáž
MasterRoc FLC 100	<p>MasterRoc FLC 100 je práškový výrobek, který se přidává do cementu v hmotnostním podílu 3 – 6%. Po přidání vznikne čerpatelná tixotropní zálivková hmota s malým poměrem vody a cementu (vodním součinitelem).</p> <p>MasterRoc FLC 100 obsahuje velice účinné činidlo, která snižuje množství vody, složku, která omezuje smršťování, a tixotropní činidla. Díky silnému účinku vedoucímu k omezení množství vody je možné použít vodní součinitel 0,25. To pak umožňuje, aby zálivková hmota dosáhla velmi vysoké počáteční i konečné pevnosti. I přesto si po celou tu dobu zachovává MasterRoc FLC 100 schopnost zcela vyplnit kotevní otvory nebo kanálky.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Skalní / horninové kotvy – Kotevní a hmoždinková zálivka pro horniny a skály – Kanálková a kabelová injektáž 	Injektáž
MasterRoc MP 303 CE	<p>MasterRoc MP 303 CE je nízkoviskózní vysoce reaktivní dvousložková akrylátová pryskyřice s</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Opravy betonu – bobtnavé vyplňování prasklin a trhlin. – Injekční clony. 	Injektáž

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
	velmi dobrou penetrací. Tento produkt rychle zraje a vytváří vysoce flexibilní hydrogel s výbornou schopností bobtnat, a to i opakovaně.	<ul style="list-style-type: none"> – Trvalé těsnění betonového ostění tunelů a šachet a zdiva proti vodě. – Zastavování drobných průsaků trhlinami. 	
MasterRoc MP 304	MasterRoc MP 304 je nízkoviskózní vysoce reaktivní dvousložková akrylátová pryskyřice s velmi dobrou penetrací. Tento produkt rychle zraje a vytváří vysoce flexibilní hydrogel s výbornou schopností bobtnat, a to i opakovaně. Vzhledem ke své výborné pružnosti je schopen přenášet pohyb trhlin. Produkt je schopen i v suchém období výborně plnit svoji funkci.	<ul style="list-style-type: none"> – Opravy betonu – bobtnavé vyplňování prasklin a trhlin. – Injekční clony. – Opravy dilatací. – Trvalé těsnění betonového ostění tunelů a šachet a zdiva proti vodě. – Injektáže vlhkých nebo mokrých prostor. – Zastavování drobných průsaků trhlinami. 	Injektáž
MasterRoc MP 307 CE	MasterRoc MP 307 CE je nízkoviskózní vysoce reaktivní dvousložková akrylátová pryskyřice s velmi dobrou penetrací. Tento výrobek rychle zraje, vytváří gumovitou pryskyřici se schopností snášet jisté pohyby horniny a trhlin. MasterRoc MP 307 CE je speciálně navržen pro opravy betonů.	<ul style="list-style-type: none"> – Opravy betonů – bobtnavé výplně prasklin a trhlin. – Injekční clony. – Trvalá hydroizolace betonových ostění tunelů a šachet a zdiva. – Zastavování drobných přítoků vody trhlinami. – Aplikace injektážními hadičkami. – Stabilizace hornin. 	Injektáž
MasterRoc MP 309	MasterRoc MP 309 je vysoce reaktivní dvousložková akrylátová injektážní pryskyřice s nízkou viskozitou pro dobrou penetraci. Tento produkt rychle zraje a vytváří tvrdou kompaktní pryskyřici s velkou pevností v tlaku pro zpevňování hornin.	<ul style="list-style-type: none"> – Zpevňování hornin, obzvláště prachovitých a písčitých zemin. – Stabilizace svahů ve skalních horninách. 	Injektáž
MasterRoc MP 320	MasterRoc MP 320 je jednosložkový injektážní systém založený na manometrické koloidní silikátové suspenzi primárních nespojitých částic. V důsledku hydrofilní povahy výrobku je přilnavost k mokřým povrchům také dobrá. Tento	<ul style="list-style-type: none"> – Předstihová injektáž pro použití v podzemí – Vhodné i pro dodatečnou injektáž – Zlepšování zemin – Snižování průsaků vody – Stabilizace svahů 	Injektáž

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
	nepěnový výrobek neobsahuje rozpouštědla ani toxické složky.		
MasterRoc MP 325	MasterRoc MP 325 je jednosložkový injektážní systém založený na manometrické koloidní silikátové suspenzi primárních nespojitých částic. V důsledku hydrofilní povahy výrobku je přilnavost k mokřým povrchům také dobrá. Tento nepěnový výrobek neobsahuje rozpouštědla ani toxické složky.	<ul style="list-style-type: none"> – Předstihová injektáž pro použití v podzemí – Vhodné i pro dodatečnou injektáž – Zlepšování zemin – Snižování průsaků vody – Stabilizace svahů 	Injektáž
MasterRoc MP 350	MasterRoc MP 350 je jednosložková hydrofilní polyuretanová injektážní pryskyřice, která ve styku s vodou vytváří trvalý, nepropustný a flexibilní těsnicí materiál.	<ul style="list-style-type: none"> – Trvalé těsnění trhlin v podzemních konstrukcích. – Těsnění drobných přítoků vody. – Zvýšení kvality dočasného těsnění vody na trvalé řešení. – Pro použití s injektážními hadicemi MasterFlex 900. 	Injektáž
MasterRoc MP 355 1K	MasterRoc MP 355 1K je jednosložková polyuretanová injektážní pěna, která reaguje pouze v kontaktu s vlhkostí nebo vodou. Brání malému až střednímu průniku vody do podzemních konstrukcí a je rovněž vhodná pro výplň vodonosných dutin.	<ul style="list-style-type: none"> – Zastavování malých až středně velkých přítoků vody do podzemních konstrukcí – Také vhodný pro vyplňování vodu obsahujících dutin 	Injektáž
MasterRoc MP 355 1K DW	MasterRoc MP 355 1K DW je jednosložková polyuretanová injektážní pěna, která reaguje pouze v kontaktu s vlhkostí nebo vodou. Brání malému až střednímu průniku vody do podzemních konstrukcí a je rovněž vhodná pro výplň vodonosných dutin.	<ul style="list-style-type: none"> – Zastavování malých až středně velkých přítoků vody do podzemních konstrukcí – Také vhodný pro vyplňování vodu obsahujících dutin 	Injektáž
MasterRoc MP 355 MR0	MasterRoc MP 355 MR0 je dvousložková polyuretanová injektážní pryskyřice bez rozpouštědel, specificky navržená pro zpevňování hornin a zemin na dlouhé vzdálenosti.	<ul style="list-style-type: none"> – Stabilizace trhlin ve skalách, písků a štěrků 	Injektáž

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
MasterRoc MP 358 GS	MasterRoc MP 358 GS je dvousložková polyuretanová injektážní pryskyřice bez rozpouštědel specificky určená pro rychlou stabilizaci nadloží a zpevnění tam, kde je potřebná velmi vysoká pevnost v tlaku a přilnavost.	<ul style="list-style-type: none"> – Zpevňování rozpukaných skalních hornin u podzemních staveb. – Zpevňování uhlí při výstavbě přístupových chodeb a dobývacích stěn (porubů). – Těsnění proti pronikání plynu a vody 	Injektáž
MasterRoc MP 367 Foam	MasterRoc MP 367 Foam je dvousložková, bezrozpouštědlová, organicko-minerální injektážní pryskyřice, specificky navržená pro rychlé vyplňování dutin a zpevňování hornin.	<ul style="list-style-type: none"> – Vyplňování dutin v uhlí a jiném podloží. – Zpevňování rozpukané horniny, písků, štěrků a uhlí. – Stabilizace dutin v tunelech. – Utěsnění šachet a ventilace v uhelných dolech. – Předběžná injektáž TBM tunelu. 	Injektáž
MasterRoc MP 368	MasterRoc MP 368 je dvousložková, bezrozpouštědlová polyuretan-silikátová injektážní pryskyřice specificky navržená pro rychlou stabilizaci podloží a těsnění proti vodě.	<ul style="list-style-type: none"> – Zpevnění uhelného a skalnatého podloží při přípravných pracích a rubání. – Zpevnění rozpukané horniny v chodbách, šachtách a v porubech. – Stabilizace úklonů. – Těsnění proti plynu a vodě. – Opravy trhlin v betonu. – Podvodní aplikace. 	Injektáž
MasterRoc MP 368 TIX	MasterRoc MP 368 TIX je rychle reagující, dvousložková, tixotropní, bezrozpouštědlová, silikátová injektážní pryskyřice na bázi polyurey, určená speciálně pro rychlou stabilizaci zemin v souvrstvích s četnými otevřenými trhlinami na povrchu.	<ul style="list-style-type: none"> – Zpevňování rozpukaných skalních hornin u podzemních staveb – Zpevňování uhlí při výstavbě přístupových chodeb a těžebních stěn – Utěsnění proti plynu a vodě – Utěsnění trhlin v klenbách – Vhodný i pro aplikaci pod vodou – Slepění a těsnění trhlin betonových konstrukcí 	Injektáž
MasterRoc MP 800	MasterRoc MP 800 je velmi jemně mletý portlandský mikro cement, vhodný pro speciální způsoby použití, jako jsou injektáže a zálivky.	<ul style="list-style-type: none"> – Injektáže: <ul style="list-style-type: none"> • stabilizační injektáže, • vodotěsnost. – Trysková injektáž. 	Injektáž

Obchodní název	Charakteristika a složení	Použití	Aplikace
	<p>MasterRoc MP 800 významně zvyšuje schopnost tzv. infiltrace do mikrotrhlinek. Tato schopnost je ve srovnání s běžnými rychlovaznými cementy podstatně vyšší. Navíc je dosažen vyšší stupeň vodotěsnosti.</p> <p>MasterRoc MP 800 má prodlouženou dobu do počátku tuhnutí/tvrdnutí, a to až na 90 až 120 minut a vyznačuje se velice rychlým průběhem tvrdnutí. Směs je vytvrzená asi po 2,5 hodinách po zamíchání s vodou.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Kontaktní injektáž. – Trhlinky v betonu. 	
MasterRoc TIX 20	<p>MasterRoc TIX 20 je prefabrikovaný produkt, který vykazuje velmi malé smrštění, je objemově stálý a nemá tendenci inklinovat k segregaci, a to i při vysokých teplotách.</p> <p>MasterRoc TIX 20 po smísení s vodou vytvoří tekutou injektážní maltu, která v krátkém časovém intervalu dosahuje vysokých hodnot pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (v závislosti na v/c).</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Dodatečně předpjaté konstrukce <ul style="list-style-type: none"> • injektáž kabelových kanálků • kotvení kabelů – Podzemní konstrukce <ul style="list-style-type: none"> • zemní a skalní kotvy • výplňové a zpevňující injektáže – Geotechnické použití <ul style="list-style-type: none"> • stabilizace sesuvů • vázání opěrných stěn 	Injektáž



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

www.surao.cz