Technická zpráva 595/2022

Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov

Autoři: Svoboda a kolektiv

Praha, 2022

SÚRAO

NÁZEV ZPRÁVY: Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov

NÁZEV PROJEKTU: Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Závěrečná zpráva Dílčího úkolu 15

ČÍSLO SMLOUVY: *SO 2020-092*

Bibliografický zápis: Svoboda et al. (2022): Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ – Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov, TZ 595/2022, SÚRAO, Praha

ŘEŠITELÉ:

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební [1], ÚJV Řež, a. s.[2], Technická univerzita Liberec[3]

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Svoboda J.[1], Večerník P. [2], Černá K. [3], Hlaváčková V. [3], Stiblíková P. [3], Vašíček R. [1]

Lucie Hausmannová

Digitally signed by Lucie Hausmannová
Date: 2022.04.08 10:40:39 +02'00'

Jméno Příjmení

Lucie Hausmannová (SÚRAO)

18.3. 2022

Ing. Jiří Svoboda, Ph.D.

Digitálně podepsal Ing. Jiří Svoboda, Ph.D.
Datum: 2022.04.07 14:25:31 +02'00'

Jméno Příjmení

Jiří Svoboda (ČVUT)

18.3. 2022

SÚRAO

Obsah

1 Úvod 9

2 Popis Interakčního experimentu 10

2.1 Umístění IE 10

2.2 Fyzikální modely 11

2.3 Úvodní charakterizace 17

2.4 Instrumentace horniny 17

2.5 Řídicí a měřicí systém, technologie a vedení kabeláže 19

2.5.1 Řídicí systém 19

2.5.2 Měřicí systém 19

2.5.3 Technologie tlakování a sytící systém 20

2.6 Výstavba a provoz 21

2.6.1 Geotechnický monitoring 23

2.6.2 Hydrogeologický monitoring 30

2.6.3 Mikrobiologický monitoring 30

3 Cíle demontáže IE 32

3.1 Geochemie 32

3.2 Geotechnické a ostatní fyzikální vlastnosti 33

3.3 Koroze 33

3.4 Mikrobiologie 34

3.5 Mineralogie 35

4 Postup rozebírání IE 37

4.1 Sekvence rozebírání IE 37

4.2 Technologie pro vyjmutí a rozebírání FM 38

4.2.1 Vyjmutí pouze náplně 40

4.2.2 Vyjmutí FM včetně okolní horniny 42

4.3 Obecné zásady postupu rozebírání 50

4.3.1 Dokumentace 50

4.3.2 Vyjímání FM (samostatně či blok FM s horninou) 51

4.3.3 Odebírání materiálu a jeho uchování (Odběry) 53

4.3.4 Vzorkování a uchování vzorků (Vzorky) 54

4.3.5 Zjištění stavu IE před a po rozebrání FM 56

4.3.6 Ochrana ostatních FM a jiných experimentů v okolí 57

4.3.7 Provoz a ochrana technologie, instrumentace a měřicího systému 57

4.3.8 Dodatečný monitoring 57
4.4 Vzorový postup FM 58
4.4.1 Příprava před vyjmutím 58
4.4.2 Vlastní vyjmutí a uchování po vyjmutí 60
4.4.3 Rozebrání/odběry/vzorkování 61
4.4.4 Uchování zbylého vyjmutého materiálu po rozebrání/vzorkování 63
4.4.5 Sanace místa 64
4.4.6 Časová a finanční náročnost 64
4.5 Rizika 65
5 Analýza interakcí 69
5.1 Popis analýz 69
5.1.1 Geochemie 69
5.1.2 Geotechnika 71
5.1.3 Koroze 72
5.1.4 Mikrobiologie 72
5.1.5 Mineralogie 74
5.1.6 Fyzikální vlastnosti 74
5.2 Vzorkovací plán pro FM 76
5.2.1 FM1-5 76
5.2.2 FM6-10 84
5.3 Časová a finanční náročnost 91
6 Závěr 93

Seznam příloh:

Příloha 1 (elektronická) – Vzorkovací plán, seznam analýz, rozpočet analytických prací

Seznam použitých zkratek:

CEC	Kationtově výměnná kapacita
Cq	Kvantifikační cyklus qPCR
DNA	Deoxyribonukleová kyselina (deoxyribonucleic acid)
EDX	Energiově-disperzní spektrometrie
EGME	Ethylenglykol-monomethylether
FM	Fyzikální model
HÚ	Hlubinné úložiště
IE	Interakční experiment
JE	Jaderná elektrárna
LPC	Beton se sníženým pH výluhu (Low-pH Concrete)
LPM	Malta se sníženým pH výluhu (Low-pH Mortar)
MIC	Mikrobiálně indukovaná koroze (microbially induced corrosion)
MS	Měřicí systém
MV	Měřicí vrt
NGS	Sekvenování nové generace (next generation sequencing)
OPC	Beton s portlandským cementem
PCR	Polymerázová řetězová reakce (polymerase chain reaction)
PID	Regulátor s proporčním-integračním-derivačním řízením (Proportional–integral–derivative controller)
PLC	Programovatelný kontroler řízení procesů (Programmable logic controller)
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
PWM	Pulzní modulace (Pulse width modulation)
qPCR	Kvantitativní polymerázová řetězová reakce
RH	Relative Humidity, relativní vlhkost
ŘS	Řídicí systém
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SRB	Síran redukující bakterie
SSR	Solid state relay - polovodičové „relé“
TDR	Time Domain Reflectometry (Měření doby odrazu)
THM	Termo-hydro-mechanické
TOC	Celkový organický uhlík
UOS	Ukládací obalový soubor
XRD	Rentgenová difrakce
rRNA	Ribozomální RNA, součást malé podjednotky prokaryotického ribozomu

Abstrakt

Tato zpráva je závěrečným výstupem DÚ č. 15 „Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov“ zakázky „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“.

Zpráva představuje technický a vědecký návrh, jakým způsobem provést rozebrání Interakčního experimentu. Jsou zde popsány vědecké cíle rozebírání, technické způsoby, jak rozebrání realizovat, podmínky pro úspěšné rozebírání a vzorový postup rozebrání části Interakčního experimentu.

Zpráva je rozdělena do čtyř hlavních částí, kdy nejprve je představen Interakční experiment, následně jsou popsány odborné cíle rozebírání, vlastní postup rozebírání a navazující analýzy.

Pro postup rozebírání jsou uvedeny možné technologie rozebrání IE, obecné zásady, které je třeba splnit, aby bylo dosaženo úspěšného rozebrání a naplnění odborných cílů. Postup rozebrání je popsán jako vzorový pro jeden FM (uplatnitelný na všechny FM).

Popis analýz vzorků, počet vzorků a jejich lokace je popsán v poslední části dokumentu. Je zde popsán přehled metod, které mohou být použity pro analýzu vzorků, který je následován popisem tří variant vzorkovacího plánu (tabulkový přehled je uveden v příloze „Vzorkovací plán“). Dále je uvedena předpokládaná časová a finanční náročnost.

Klíčová slova

Interakční experiment, fyzikální model, interakce, bentonit, beton

Abstract

This report presents results of Task n. 15 “Project of dismantling of Interaction Experiment in PVP Bukov” of contract “Backfill and other engineered components of geological repository”.

A project of Interaction experiment dismantling is presented. Report provides insight into scientific goals, technical means, conditions to be fulfilled to carry out successful dismantling and a dismantling procedure for a physical model.

The report is divided into four main parts. At first Interaction experiment is described, followed by scientific goals, dismantling procedure and analyses to be caried out.

Dismantling procedure chapter provides description of technologies suitable for experiment dismantling, general requirements for successful dismantling, prototype procedure for a physical model dismantling.

Analyses description, amount and position of sample points is described in last part of the document. List of method and their description which are suitable for samples analyses is provided followed by description of three variants of sampling plan (the detailed list of samples is provided in annex “Sampling plan”). Estimation of costs and time required is provided as well.

Keywords

Interaction experiment, physical model, interactions, bentonite, concrete

1 Úvod

Tato zpráva je závěrečným výstupem DÚ č. 15 „Projekt demontáže Interakčního experimentu v PVP Bukov“ zakázky „Výplně a ostatní inženýrské komponenty HÚ“.

Technické zadání zakázky uvádí:

V PVP Bukov je instalován Interakční experiment, který má být ukončen na konci roku 2022. Realizační projekt tohoto experimentu je popsán ve zprávě Svoboda et al. (2018), v případě potřeby poskytne SÚRAO také zprávy z instalace a z průběhu experimentu, které jsou vydávány každý rok.

V plánu demontáže musí být popsán:

- Způsob rozebírání experimentu – postup, jakým se bude experiment rozebírat s přibližným časovým odhadem

- Požadavky na rozebírání experimentu – definice požadavků, které budou muset být naplněny, aby dismantling proběhl úspěšně (např. trvání rozebírání, materiály použité při dismantlingu kvůli možné kontaminaci atd.)

- Popis analýz vzorků – typy analýz relevantních pro takový experiment, zpracování vzorků po odebrání z experimentu pro danou analýzu

- Počet vzorků s jejich lokací v experimentu – návrh počtu odebíraných vzorků, jejich umístění a typ analýz

Zpráva je dělena do čtyř hlavních částí. Nejprve je v kapitole 2 představen Interakční experiment (IE). Je zde uveden základní popis IE, jeho technické řešení, výstavba, provoz a výsledky průběžného monitoringu.

Ve druhé části (kapitola 3) jsou představeny cíle demontáže z odborného hlediska.

Postup, **způsob** a **požadavky na rozebírání** jsou popsány **v kapitole 4**. Kapitola popisuje možné technologie pro rozebrání IE, obecné zásady, které je třeba splnit, aby bylo dosaženo úspěšného rozebrání a naplnění odborných cílů. Postup rozebrání je popsán jako vzorový pro jeden FM (uplatnitelný na všechny FM). Na konci kapitoly jsou popsána rizika a doporučené akce pro jejich mitigaci.

Popis analýz vzorků, počet vzorků a jejich lokace je popsána v kapitole 5 (tabulkový přehled je pak uveden v příloze „Vzorkovací plán“). Kapitola nejprve stručně popisuje seznam metod, které mohou být použity pro analýzu vzorků. Následuje popis tří variant vzorkovacího plánu, které se liší rozsahem prací. Dále je uvedena předpokládaná časová a finanční náročnost.

2 Popis Interakčního experimentu

Tato kapitola vychází a části textu jsou převzaty z článku Interakční experiment v PVP Bukov (Svoboda et al., 2019), TZ 245/2018 Interakční experiment – realizační projekt (Svoboda et al., 2018), TZ 385/2019 Interakční experiment – Přípravné a podpůrné práce (Svoboda et al., 2019), TZ 371/2018 Interakční experiment – instalace experimentu (Svoboda et. al, 2019) a TZ 594/2022 Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 4 (Svoboda (et al., 2022).

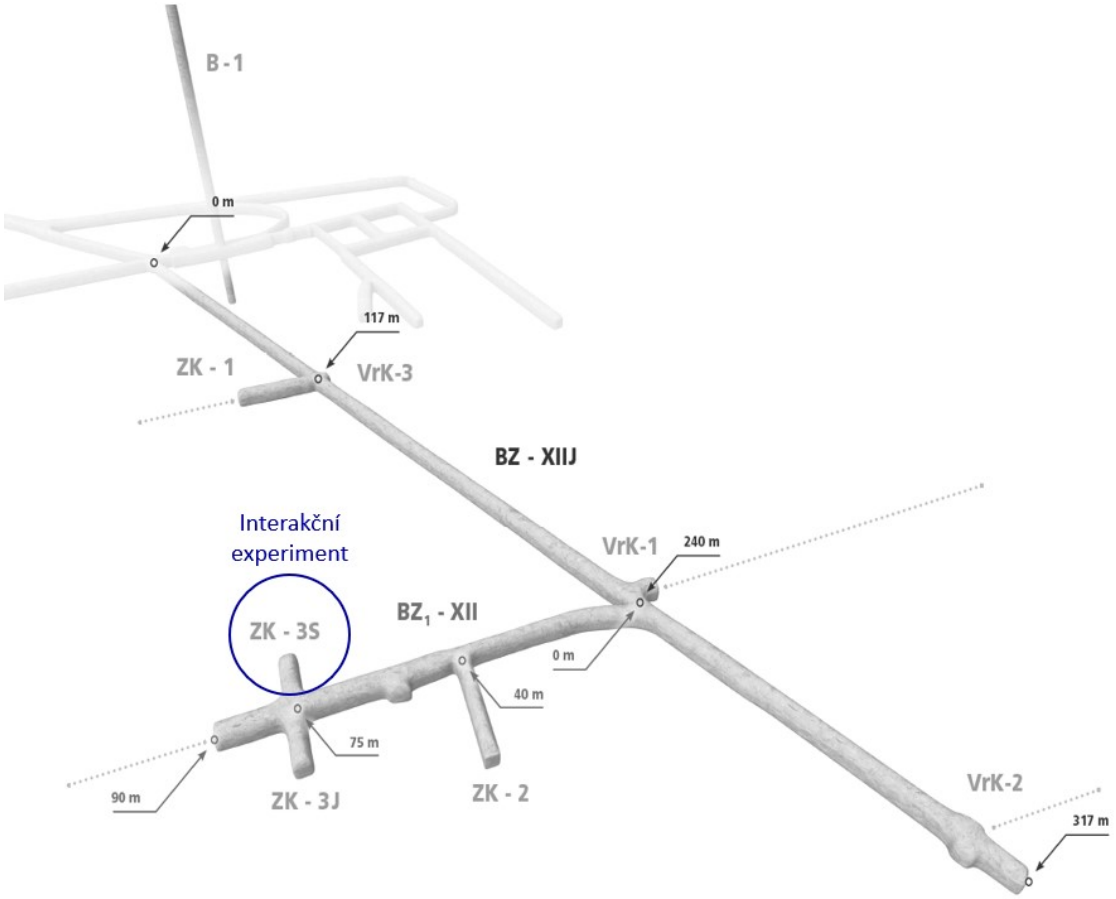
V rámci programu přípravy hlubinného uložiště (HÚ) v ČR navrhlo a provozuje ČVUT, ÚJV a ČGS pro SÚRAO v Podzemním výzkumném pracovišti (PVP) Bukov Interakční experiment (IE). IE je zaměřen na studium vzájemných interakcí mezi materiály inženýrských bariér HÚ a na jejich interakce s horninovým prostředím a podzemní vodou. Cílem IE je dlouhodobě zkoumat interakce materiálů plánovaných pro HÚ v reálných podmínkách. IE je proto realizován v PVP Bukov v hloubce 550 m na 12. patře dolu Rožná I.

IE se skládá z deseti fyzikálních modelů (FM) umístěných do horizontálních vrtů. Pět modelů je určeno pro studium interakcí za přirozené teploty (modely 6-10) a pět modelů pro studium interakcí při zvýšených teplotách (až 100 °C u modelů 1-4, a až 200 °C pro model 5). Modely 1-5 jsou válcového tvaru o průměru 240 mm a délce 1450 mm. V ose modelu je umístěno tyčové topidlo, které simuluje teplo vydávané vyhořelým jaderným palivem. Kolem topidla je vždy bentonitová výplň, která je obklopena buď betonem, nebo geotextilií určenou pro kontakt s podzemní vodou. Modely 6-10 mají konstrukci obdobnou modelům 1-5, avšak neobsahují topidlo a mají průměr 90 mm. Všechny modely jsou uměle syceny podzemní vodou z PVP Bukov.

Aby bylo možno zkoumat různé typy interakcí, je pro každý z modelů zvolena jiná kombinace materiálů – lisovaný bentonit o dvou objemových hmotnostech, bentonitové pelety, standardní beton, a beton se sníženým pH. Všechny tyto materiály a horninové prostředí byly před zahájením detailněji charakterizovány, aby bylo možné studovat jejich změny.

2.1 Umístění IE

Pro IE byla zvolena zkušební komora ZK-3S v PVP Bukov (Obr. 1). Zkušební komora vychází severním směrem z překopu BZ_1-XII ve staničení 74,8 m.



Obr. 1 Schéma prostor PVP Bukov s vyznačením zkušební komory pro realizaci Interakčního experimentu

Úvodní geologická charakterizace (Franěk, 2018) ukázala, že litologická variabilita v ZK-3S je relativně nízká. Varíruje mezi migmatitizovanými amfibol-biotitickými pararulami až migmatitizovanými biotitickými amfibolity, s nízkým až středním obsahem leukosómu, a odpovídá běžné litologické variabilitě známé z PVP Bukov. Z hlediska umístění experimentálních vrtů nebyl doporučen cca 1 m mocný pás amfibol-biotitických pararul, který protíná zkušební komoru ZK-3S těsně před čelbou, a dále jihovýchodní úsek této zkušební komory, kde se vyskytují litologicky velmi heterogenní migmatitizované amfibolity.

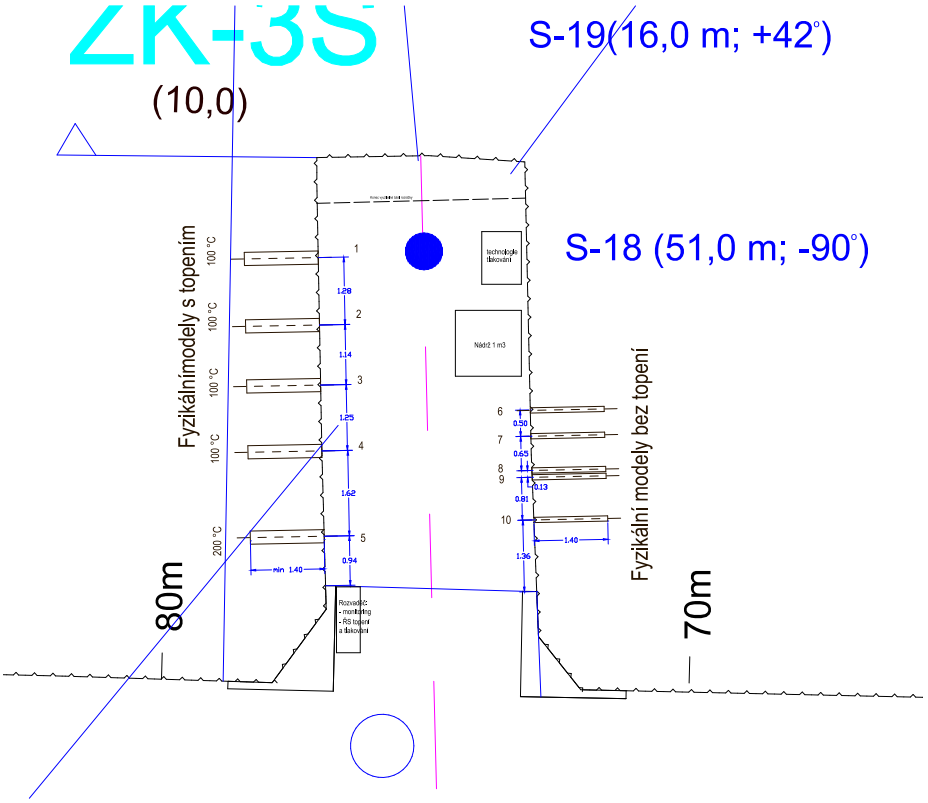
Západní stěna a střední úsek východní stěny, budované převážně migmatitizovanými biotit-amfibolickými až amfibol-biotitickými pararulami, byly zhodnoceny jako vhodné pro lokalizaci experimentu díky litologické homogenitě a menší míře křehkého porušení. Čelba a většina východní stěny byly zhodnoceny jako nevhodné kvůli vysoké míře křehkého porušení a variabilní orientaci křehkých struktur, které by pravděpodobně způsobily odtok vody z jednotlivých experimentálních vrtů a hydraulickou komunikaci mezi jednotlivými experimentálními vrty.

2.2 Fyzikální modely

Interakční experiment se skládá z deseti fyzikálních modelů umístěných do vrtů. Pět modelů je určeno pro studium interakcí za přirozené teploty (modely 6-10) a pět modelů pro studium interakcí při zvýšených teplotách (až 100 °C u modelů 1-4, a až 200 °C pro model 5).

Na základě úvodní charakterizace masivu v oblasti ZK-3S a úvodního matematického modelu bylo provedeno rozmístění fyzikálních modelů (FM) v rozrážce. Na západní stěnu zkušební komory byly rozmístěny fyzikální modely 1-5, tedy tepelně zatěžované modely s větším průměrem. Model č. 1 byl umístěn nejblíže k čelbě a ostatní modely byly postupně umístěny směrem k ústí zkušební komory. Model č. 5 byl umístěn s větším odstupem nejblíže k ústí, aby byl omezen vliv plánované vyšší teploty modelu na ostatní fyzikální modely (Obr. 2).

Na východní stěnu zkušební komory byly rozmístěny modely 6-10. Model č. 6 se nachází cca v polovině délky zkušební komory a ostatní modely byly postupně rozmístěny směrem k ústí zkušební komory (Obr. 2).



Obr. 2 Situace ZK-3S

Všechny modely jsou umístěny do horizontálních vrtů s využitelnou hloubkou minimálně 1,4 m. Modely 1-5 jsou umístěny ve vrtech o průměru 250 mm a modely 6-10 jsou umístěny do vrtů o průměru 100 mm.

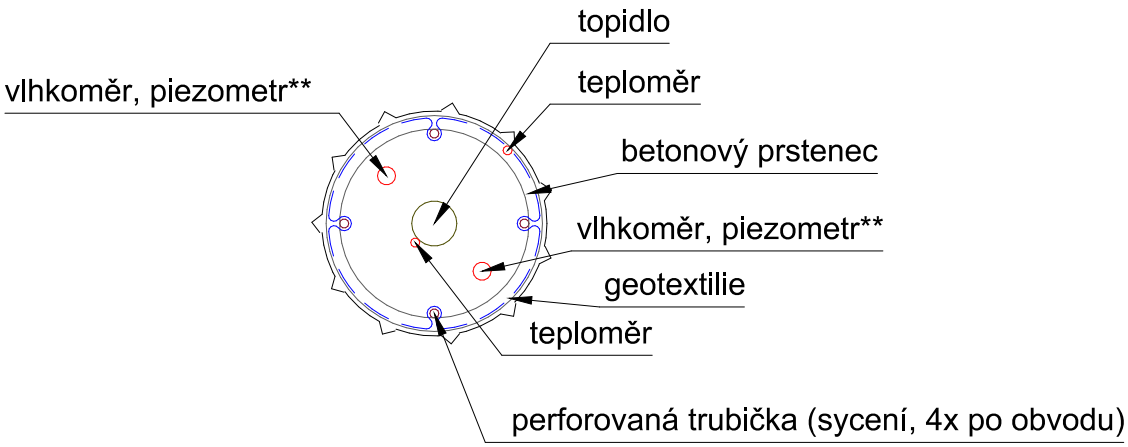
Poloha modelů je vyznačena v rozvinutém pohledu na stěny ZK-3S (Obr. 7 a Obr. 8), v situaci (Obr. 2) a v Tab. 1.

Tab. 1 Poloha vrtů fyzikálních modelů a jejich hloubka

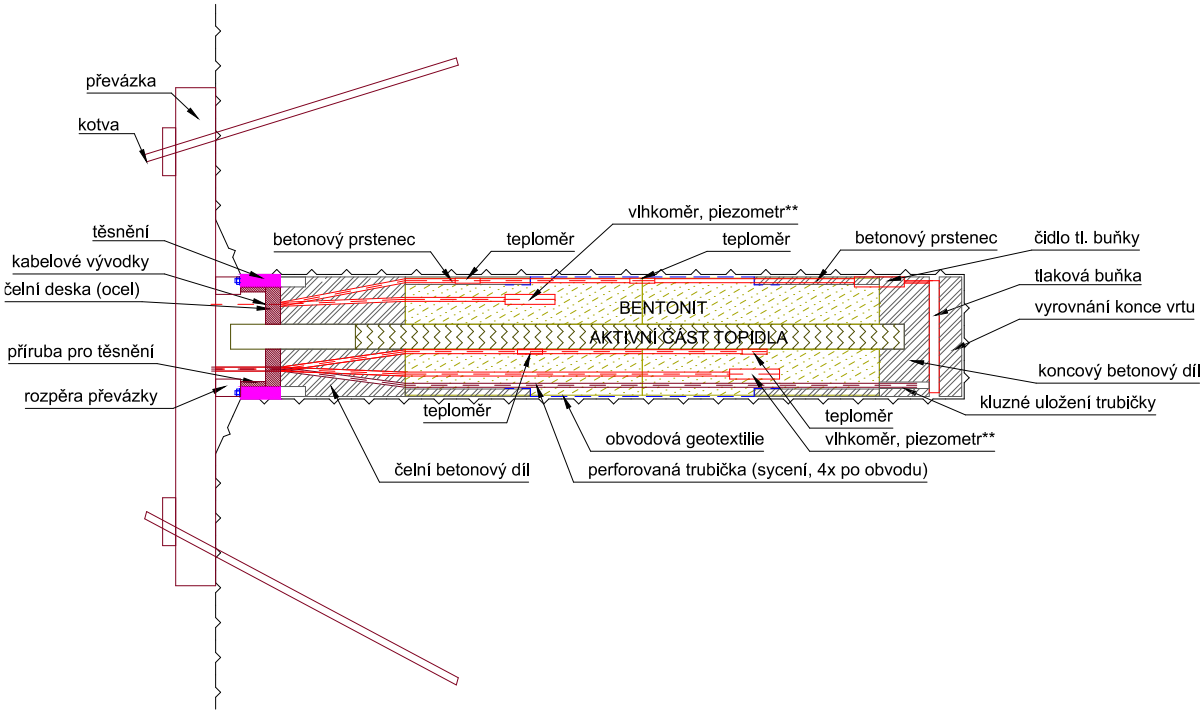
č.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
JTSK Y	622353.9	622353.9	622353.9	622353.9	622353.8
JTSK X	1128918	1128919	1128920	1128921	1128923
JTSK Z	23.81	23.8	23.78	23.81	23.8
hloubka vrtu [m]	1.71	1.73	1.72	1.63	1.74
využitelná hloubka [m]	1.60	1.51	1.69	1.47	1.65
úklon vrtu [°]	-0.20	-0.10	-0.05	0.50	1.20

č.	6	7	8	9	10
JTSK Y	622349.8	622349.8	622349.8	622349.8	622349.8
JTSK X	1128921	1128921	1128922	1128922	1128923
JTSK Z	24.68	24.1	24.71	23.92	23.94
hloubka vrtu [m]	1.63	1.55	1.56	1.57	1.52
využitelná hloubka [m]	1.60	1.52	1.51	1.53	1.48
úklon vrtu [°]	0.30	0.50	-0.30	-0.20	0.00

Modely 1-5 jsou válcového tvaru o průměru 240 mm a délce 1450 mm. V ose modelu je umístěno tyčové topidlo, které simuluje teplo vydávané vyhořelým jaderným palivem. Zvýšená teplota také urychluje interakční procesy a reakce mezi materiály. Kolem topidla je vždy bentonitová výplň, která je obklopena buď betonem, nebo geotextilií určenou pro kontakt s podzemní vodou. Typickou konstrukci modelu uvádí Obr. 3 a Obr. 4. Konstrukčně se jednotlivé fyzikální modely mezi sebou liší vystrojením a náplní (Tab. 2). U modelu č. 5 je z důvodů vyšší požadované teploty (200 °C) v patě modelu vynechána tlaková buňka.

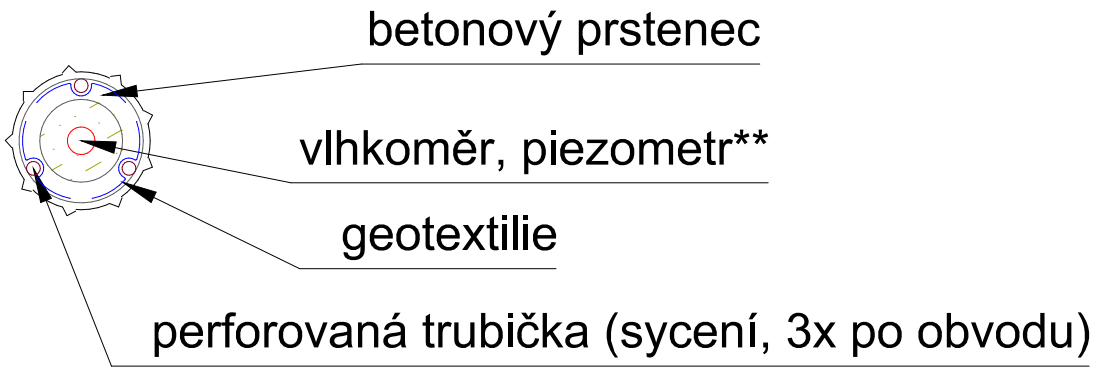


Obr. 3 Schematický příčný řez fyzikálním modelem 1-5

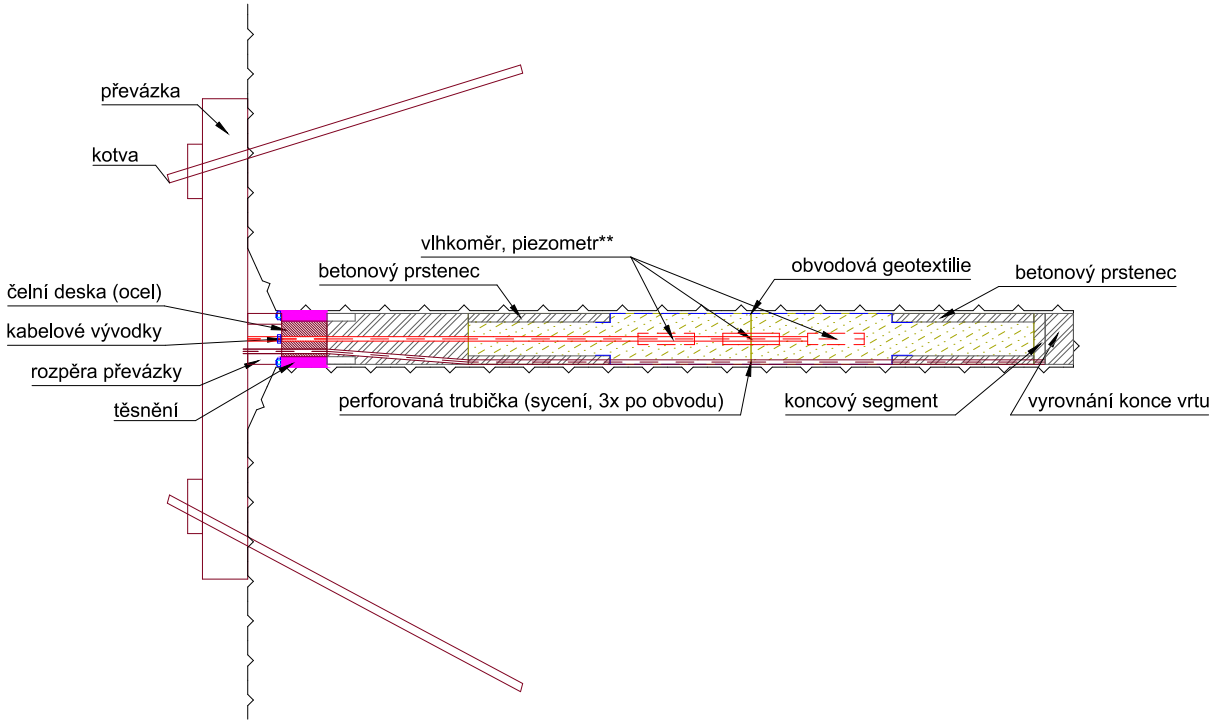


Obr. 4 Schematický podélný řez fyzikálním modelem 1-5

Modely 6-10 mají konstrukci obdobnou modelům 1-5, avšak neobsahují topidlo a mají průměr 90 mm. Typická konstrukce modelu je uvedena na Obr. 5 a Obr. 6. Konstrukčně se jednotlivé fyzikální modely mezi sebou liší vystrojením čidly a náplní (viz Tab. 2).



Obr. 5 Schematický příčný řez fyzikálním modelem 6-10

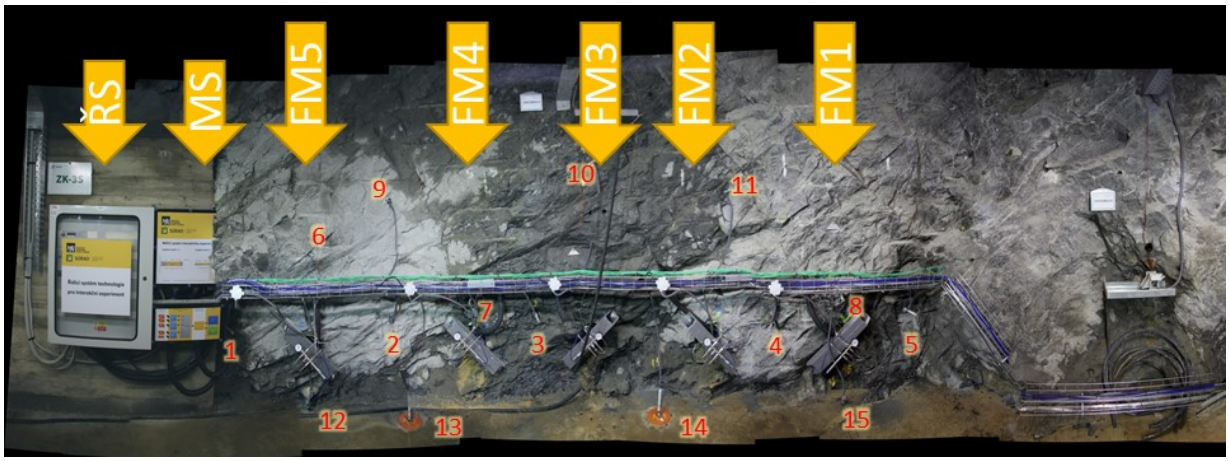


Obr. 6 Schematický podélný řez fyzikálním modelem 6-10

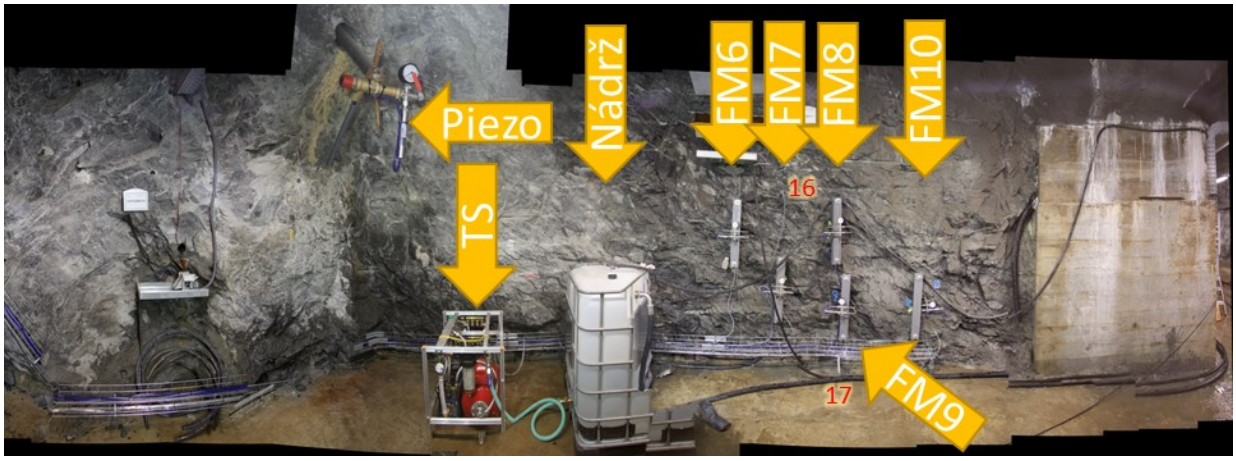
Všechny modely jsou uměle syceny podzemní vodou z PVP Bukov.

Aby bylo možno zkoumat různé typy interakcí, je pro každý z modelů zvolena jiná kombinace materiálů – lisovaný bentonit o dvou suchých objemových hmotnostech, bentonitové pelety, standardní beton, a beton se sníženým pH (Tab. 2). Všechny tyto materiály a horninové prostředí byly před zahájením detailněji charakterizovány, aby bylo možné studovat jejich změny.

Detailní specifikace je uvedena v TZ 371/2018 Interakční experiment – instalace experimentu (Svoboda et. al, 2019) a TZ 245/2018 Interakční experiment – realizační projekt (Svoboda et al., 2018).



Obr. 7 Rozvinutý pohled na západní stěnu a čelo ZK-3S



Obr. 8 Rozvinutý pohled na východní stěnu a čelo ZK-3S

Tab. 2 Přehled parametrů fyzikálních modelů

č.	průměr	teplota [°C]	náplň	cílová suchá objemová hmotnost výplně [kg/m^3]	typ betonu	teploměry (samostatné)	vlhkoměry	piezometry	tlaková buňka
1	250 mm	100	pelety	1600	LPM	4	RH+TDR		1
2	250 mm	100	tvárnice	1600	LPM	4	RH+TDR		1
3	250 mm	100	pelety + tvárnice	1600	LPM	4	2x RH		1
4	250 mm	100	pelety + tvárnice	1600	OPC	4	2x TDR		1
5	250 mm	200	pelety + tvárnice	1600	LPM	4		2	
6	100 mm		tvárnice	1200	OPC		RH+TDR		
7	100 mm		tvárnice	1600	OPC		RH+TDR		
8	100 mm		tvárnice	1200	LPM		TDR		
9	100 mm		tvárnice	1600	LPM		TDR		
10	100 mm		pelety	1600	OPC			1	

2.3 Úvodní charakterizace

Charakterizace vlastností materiálů použitých pro přípravu fyzikálních modelů (bentonitu, cementových materiálů a dalších doplňkových/podpůrných materiálů), podzemní vody a horninového prostředí je popsána ve zprávě SÚRAO 385/2019 (Svoboda et al., 2019). Takto byl charakterizován počáteční stav materiálů a k tomuto stavu budou vztahovány všechny zjištěné změny vlastností po ukončení interakčního experimentu.

V rámci úvodních mikrobiologických charakterizací byly před zahájením IE odebírány vzorky vod z dostupných vodních zdrojů a z okolí experimentálních vrtů v rozrážce ZK-3S. Popis a výsledky z těchto prvotních odběrů z roku 2018 lze nalézt ve zprávě Franěk et al. (2018) - TZ 228/2018 a Svoboda et al. (2019) - TZ 385/2019.

2.4 Instrumentace horniny

Horninové prostředí je monitorováno 17 vrty, do kterých byly umístěny teploměry. Celkem bylo do horninového prostředí instalováno 42 teploměrů typu PT100.

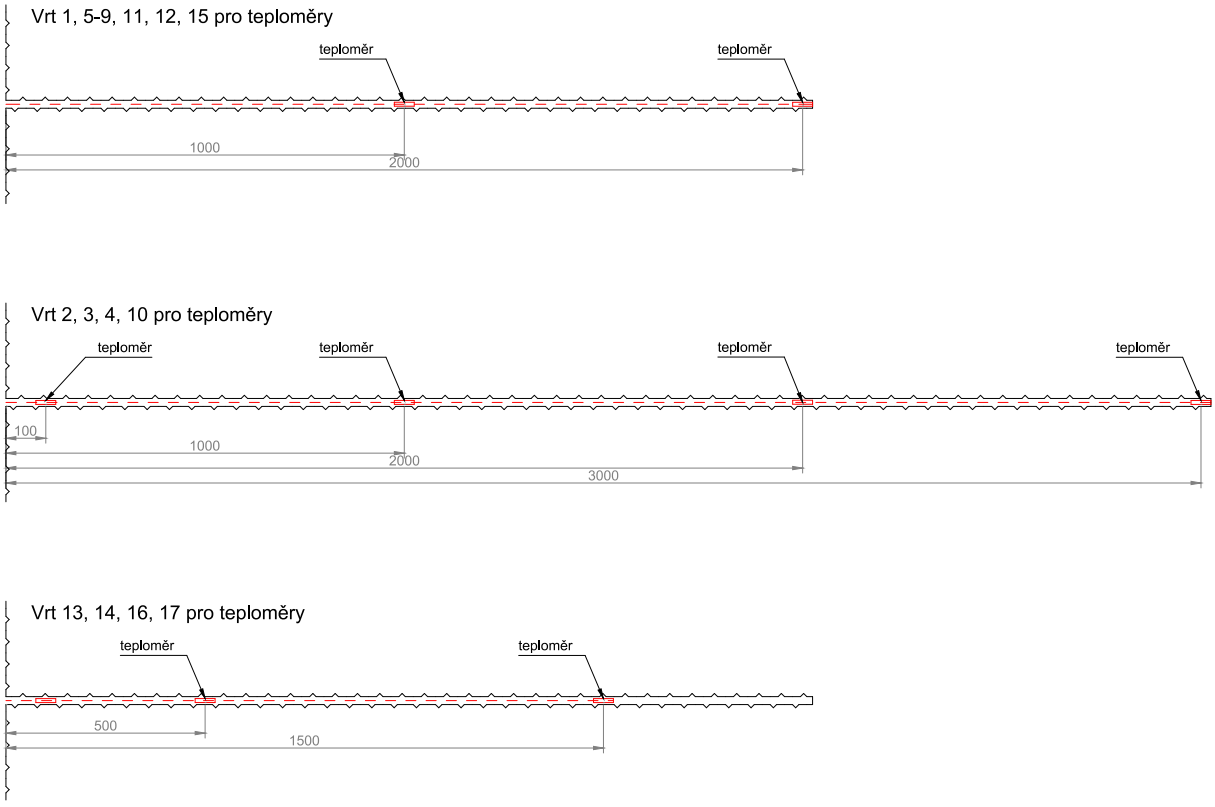
Vrty pro teploměry jsou ponechány bez výplně, ústí vrtů do počvy bylo uzavřeno plastovou zátkou s otvorem pro kabeláž.

Přehled vrtů pro teploměry a jejich vystrojení je uvedeno v Tab. 3. Na Obr. 9 jsou znázorněny řezy jednotlivými vrty. Na Obr. 7 a Obr. 8 je rozvinutý pohled do ZK-3S s vyznačenou polohou jednotlivých vrtů.

Mimo vrtů pro teploměry je monitorován tlak vody pomocí piezometru 4500H ve vrtu u stropu na čelbě zkušební komory (Obr. 8).

Tab. 3 Vystrojení horninového prostředí (teploměry)

Vrt č.	Délka vrtu [m]	Poloha teploměrů [m]					
		0	0.5	1	1.5	2	3
1	2			1		1	
2	3	1		1		1	1
3	3	1		1		1	1
4	3	1		1		1	1
5	2			1		1	
6	2			1		1	
7	2			1		1	
8	2			1		1	
9	2			1		1	
10	3	1		1		1	1
11	2			1		1	
12	2			1		1	
13	2		1		1		
14	2		1		1		
15	2			1		1	
16	2		1		1		
17	2		1		1		



Obr. 9 Řezy vrty s umístěním teploměrů v horninovém masivu

2.5 Řídicí a měřicí systém, technologie a vedení kabeláže

Kromě vlastních fyzikálních modelů jsou v rozrážce umístěny další podpůrné prvky. Na betonové ostění v ústí zkušební komory na západní stěně jsou umístěny prvky elektroinstalace (Obr. 2 a Obr. 7) – rozvaděč řídicího systému (ŘS), rozvaděč pro měřicí systém (MS). Na západní stěně u čelby je umístěna technologie tlakování – jednotka obsahující filtr, čerpadlo, regulaci tlaku a rozdělovač vedení tlakovací vody pro jednotlivé FM.

V rozrážce je dále nádrž na vodu pro technologii tlakování. Technologie a nádrž na vodu jsou umístěny podél východní stěny zkušební komory mezi čelbou a fyzikálním modelem č. 6. Umístění jednotlivých technologických komponent je uvedeno na Obr. 2, Obr. 7, a Obr. 8.

Pro vedení kabelů byl po obvodu ZK-3S na boční stěny instalován kabelový žlab. Kabelový žlab je veden na západní stěně nad FM1-5 (Obr. 7), poté schází směrem k podlaze a čelbě a východní stěně je veden nad podlahou, kde podchází FM6-10 (Obr. 8).

2.5.1 Řídicí systém

Řídicí systém (ŘS) topných patron (a tlakování) je postaven na PLC Tecomat Foxtrot. Jde o průmyslový kontroler určený pro řízení procesů ve výrobě, průmyslu a dalších aplikacích.

ŘS má dvě hlavní funkce:

- Řízení topení experimentů a předávání dat o jejich stavu do MS
- Odstavení tlakovacího systému v případě nedostatku vody

ŘS je umístěn v silnoproudém rozvaděči v ústí na západní stěně zkušební komory (Obr. 7). Rozvaděč je propojen kabeláží do jednotlivých FM a k technologii tlakování.

Upozornění – rozvaděč ŘS (včetně připojené kabeláže, technologie a topidel) je vyhrazeným zařízením a hrozí nebezpečí úrazu elektrickým proudem při neodborné manipulaci.

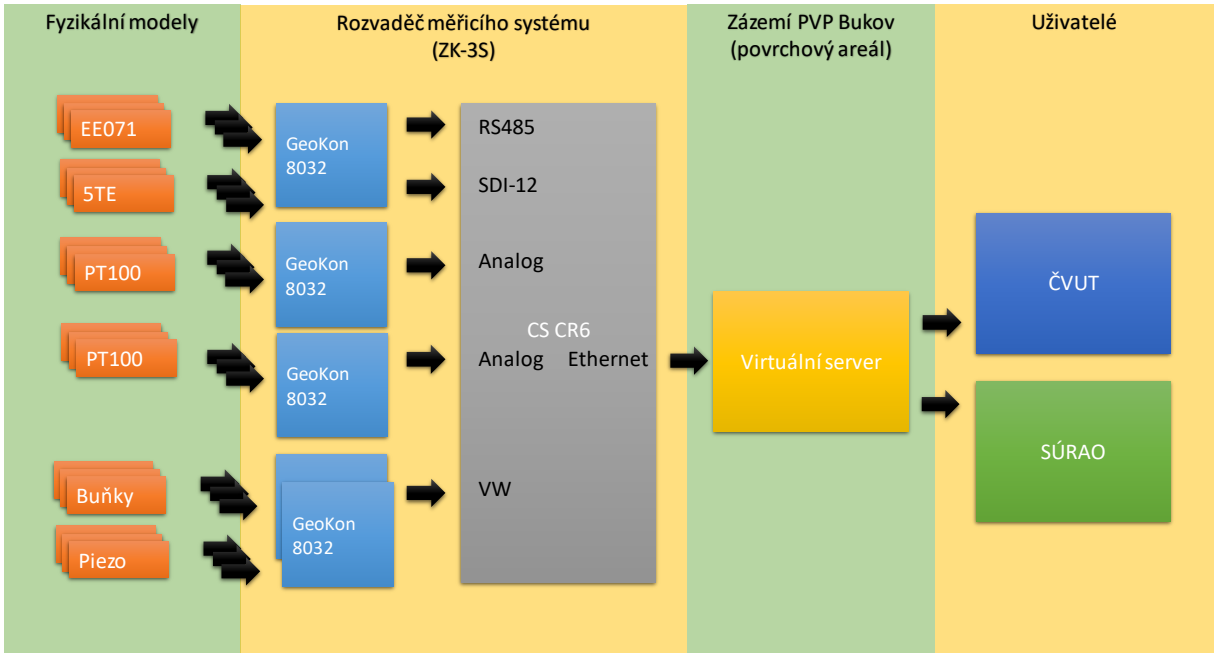
2.5.2 Měřicí systém

Měřicí systém (MS) se skládá ze dvou hlavních částí:

- Systému pro měření a lokální sběr dat (na Obr. 10 označen jako Rozvaděč měřicího systému)
- Serveru měřicího systému (Virtuální server na Obr. 10)

První komponenta zajišťuje vlastní měření veličin v pravidelném intervalu a dočasné uchování dat. Druhá komponenta zajišťuje sběr dat, jejich uchování, předběžné zpracování a předání k dalšímu využití.

Blokové schéma měřicího systému je uvedeno na Obr. 10.



Obr. 10 Schéma měřicího systému

MS je umístěn v slaboproudém rozvaděči v ústí na západní stěně zkušební komory (Obr. 7). Rozvaděč je propojen kabeláží do jednotlivých FM, k monitorovacím vrtům, k technologii tlakování a čidlům prostoru ZK-3S.

Upozornění – MS (včetně připojené kabeláže) a instrumentace je citlivým elektronickým zařízením. Při práci v jeho okolí je třeba dbát na jeho ochranu a zabránění rušení.

2.5.3 Technologie tlakování a sytící systém

Technologie tlakování fyzikálních modelů se skládá z následujících hlavních komponent (Obr. 11):

- Zásobní nádrž
- Tlakovací jednotka s regulací a distribucí

Na tyto komponenty navazují zhlaví jednotlivých fyzikálních modelů a sytící systém uvnitř fyzikálních modelů. Jednotlivá zhlaví jsou připojena k distribučnímu systému pomocí flexibilních hadic s rychlospojkami.

Zásobní nádrž o objemu 1 m^3 s kontinuálním doplňováním vody slouží jako zdroj vody pro tlakování fyzikálních modelů. Nádrž je opatřena hladinovým čidlem snímajícím minimální úroveň hladiny jako ochranu technologie proti chodu naprázdno.

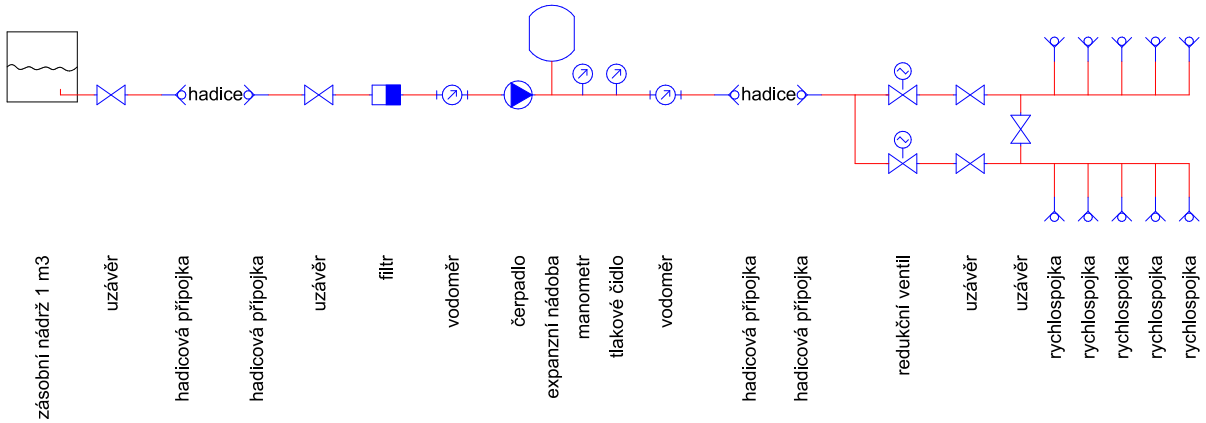
Nádrž je umístěna na východní straně zkušební komory mezi tlakovací jednotkou a FM6-10 (Obr. 8).

Tlakovací jednotka je hlavní strojní sestavou systému. Zajišťuje kontinuální dodávku vody o tlaku ~0,6 MPa pro jednotku regulace a distribuce. Jednotka je umístěna u čelby na východní straně zkušební komory (Obr. 8).

Napájení tlakovací jednotky je zajištěno z rozvaděče ŘS. Jednotka je schopna zcela autonomní funkce - řídicí jednotka čerpadla zajišťuje autonomní spínání čerpadla, ŘS zajišťuje odstavení jednotky v případě nedostatku vody.

Součástí tlakovací jednotky je i komponenta **regulace a distribuce** (Obr. 11 pravá část, Obr. 8), která zajišťuje regulaci tlaku vody pro sycení fyzikálních modelů. Jednotka obsahuje dvě regulační větve s redukčním ventilem, uzávěrem a samouzavíracími rychlospojkami pro připojení zhlaví jednotlivých fyzikálních modelů. Větve je možné mezi sebou propojit přes uzávěr.

FM jsou napojeny na tlakovací systém flexibilními plastovými trubičkami. Trubičky jsou vedeny spolu s kabeláží v technickém žlabu po obvodu zkušební komory.



Obr. 11 Schéma tlakovacího systému

2.6 Výstavba a provoz

Výstavba IE začala na počátku roku 2018 vytipováním míst pro jednotlivé FM. V dubnu 2018 byly vytyčeny polohy vrtů pro jednotlivé FM a byly zahájeny vrtné práce. Kromě vrtů pro vlastní FM byly v druhé polovině roku 2018 připraveny vrty pro instrumentaci.

Vlastní vrtné a další přípravné práce v ZK-3S proběhly v roce 2018 ve čtyřech termínech:

- Vrty pro FM1-10: 3.- 6.4.2018
- Tlakové zkoušky a úprava čel vrtů: 1.- 2.8.2018
- Vrty pro instrumentaci: 20.- 22.8.2018 a 5.- 6.11.2018

Fyzikální modely, řídicí systém, měřicí systém a technologie byly připraveny v URC Josef. Nejprve byly připraveny jednotlivé komponenty (zhlaví, betonové segmenty, bentonitové bloky, instrumentace, …) a pak proběhla jejich kompletace. Příprava FM a podpůrné technologie byla dokončena 31.1.2019.

Instalace IE v PVP Bukov proběhla ve čtyřech etapách:

- 5.2.2019 – Etapa č. I – příprava technologie a instrumentace horniny
- 11.2-13.2.2019 – Etapa č. II – instalace modelů
- 27.2.2019 – Etapa č. III – úprava měření tlaku a instalace dodatečného piezometru

- 7.3.2019 – Etapa č. IV –zahájení umělé saturace

Před zahájením IV. etapy byl proveden test funkčnosti topidel u FM 1-5, v období mezi těmito etapami modely nebyly uměle saturovány.

Jednotlivé FM byly instalovány v těchto časech:

- FM1 – 11.2.2019 10.30
- FM2 – 11.2.2019 11.30
- FM3 – 11.2.2019 12.50
- FM4 – 11.2.2019 13.45
- FM5 – 11.2.2019 14.30
- FM6 – 11.2.2019 15.30
- FM7 – 11.2.2019 14.55
- FM8 – 11.2.2019 14.35

Po instalaci a dokončení testu topidel došlo 7.3.2019 k zahájení sycení a kontinuálního tepelného namáhání. FM1-10 jsou kontinuálně syceny (0,5 MPa) a FM1-5 jsou navíc namáhány teplotou (FM1-4 ~100 °C, FM5 ~200 °C). V pravidelných intervalech jsou prováděny odběry vody v okolí FM, probíhá pravidelná údržba a odstraňování případných problémů.

V průběhu provozu bylo nutno řešit problém s izolačním odporem topidel FM1 a FM5. Problém topidla FM1 byl řešen instalací izolačního transformátoru a provozem na bezpečném napětí. Problém topidla FM5 byl řešen vyjmutím topné kazety a pískové výplně z patrony topidla. Dovnitř patrony bylo instalováno nové topidlo a regulační teploměry (Obr. 12). Volný prostor byl vyplněn pískem.

Obr. 12 Nové topidlo FM5 po instalaci

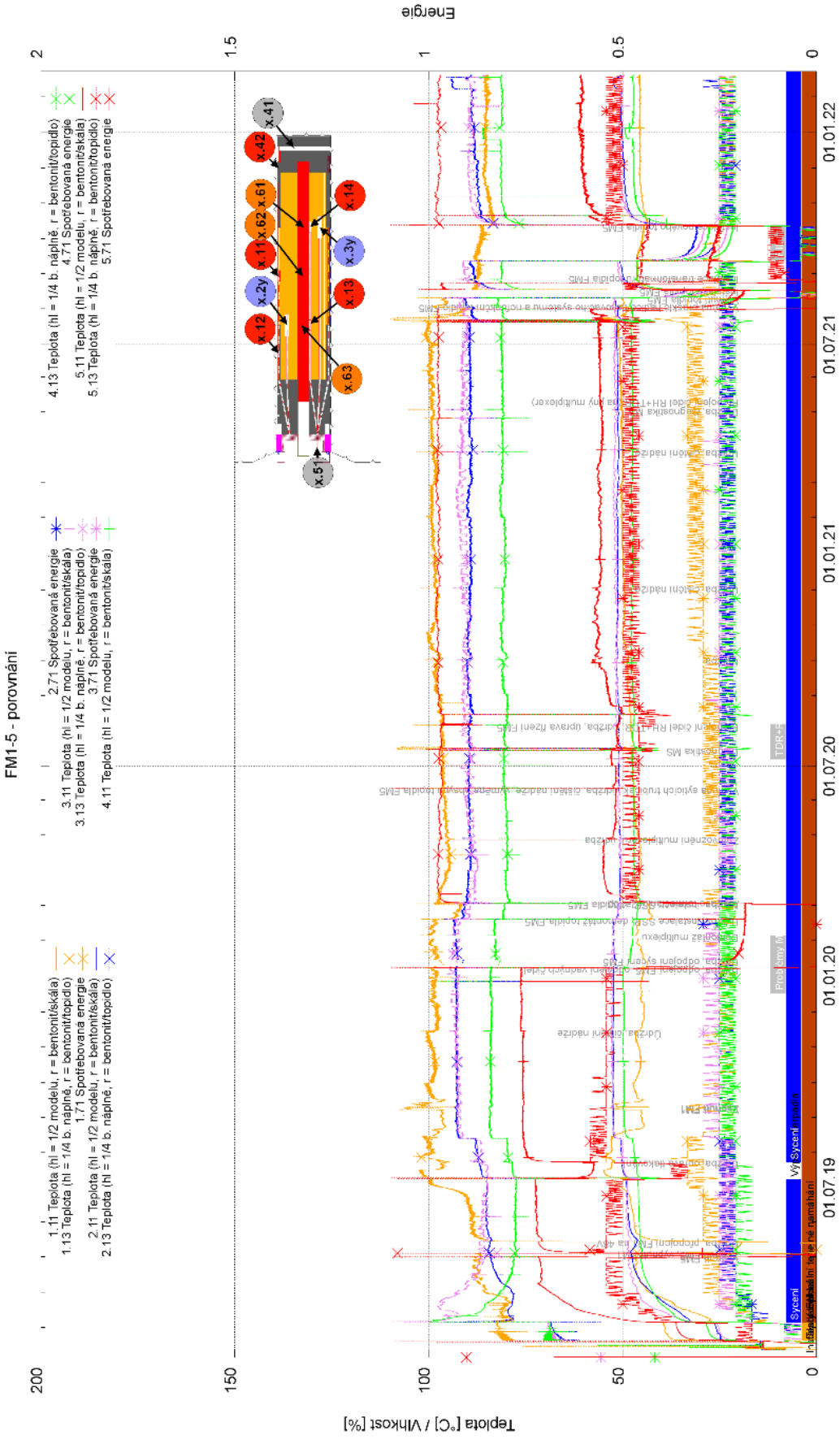
Kromě úprav na topení FM byly vyměněny trubičky rozvodu vody od tlakovacího systému ke zhlavím a provedeny úpravy na ŘS a MS. Detailní popis provozu, mimořádných událostí a úprav IE je uveden ve TZ 594/2022 (Svoboda et al., 2022).

2.6.1 Geotechnický monitoring

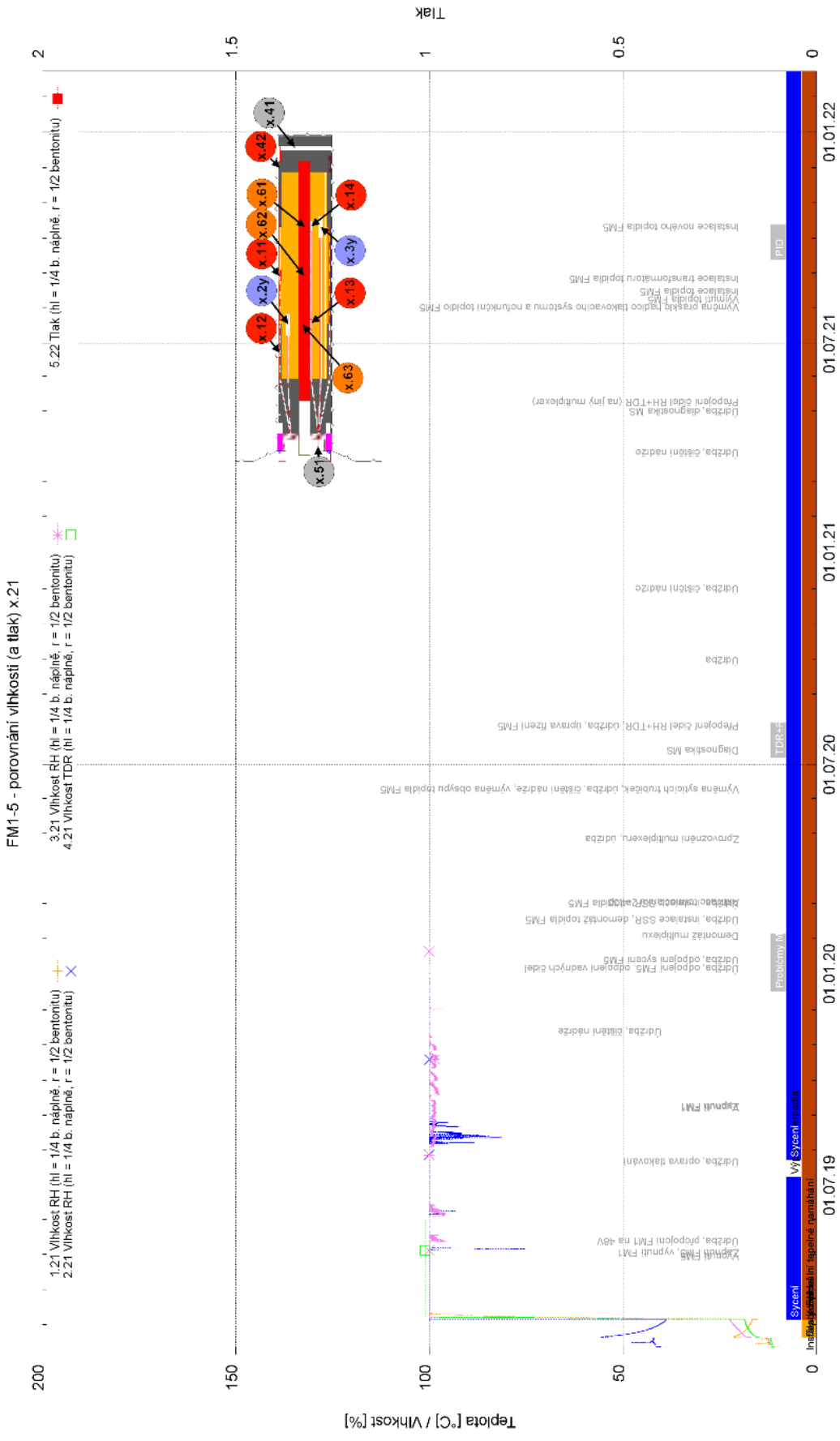
Od 7.3.2019 probíhá zatěžovací fáze IE, kdy je všech 10 fyzikálních modelů syceno vodou a FM1-5 jsou zahřívány. Probíhá kontinuální monitoring FM a horninového prostředí.

Ve fyzikálních modelech byl pozorován postupný nárůst vlhkosti (Obr. 14, Obr. 16, Obr. 17) a totálního napětí, který postupně přešel do kvazi ustáleného stavu. Po zahájení zatěžování byl pozorován na čidlech výrazně rychlejší nárůst vlhkosti, než predikoval matematický model (Obr. 16 a Obr. 17). To je dáno zejména charakterem materiálu, kdy na počátku voda volně proudila mezerami mezi peletami (a technologickými spárami), což vedlo k rychlejšímu počátečnímu nárůstu měření vlhkosti. Vliv preferenčních cest (např. podél kabeláže) lze pozorovat na reakci čidel při výpadku tlakování, kde je v některých případech vidět okamžitý pokles vlhkosti. Nárůst uvnitř bentonitových tvárnic byl pravděpodobně pomalejší (blíže k předpovědi matematického modelu). Většina měřených hodnot je ustálených nebo s velmi pomalým vývojem. Výraznější změny měřených hodnot lze vysledovat jako důsledek vnějších zásahů (změna teploty topidel, tlakování, …). Jedinou výjimku tvoří čidla TDR v FM6-10, kde po relativně ustáleném stavu v druhé polovině 2019 dochází v roce 2020 k pozvolným změnám, které pravděpodobně souvisejí se sezónními výkyvy (teplota a režim větrání PVP Bukov) a výkyvy v tlakování.

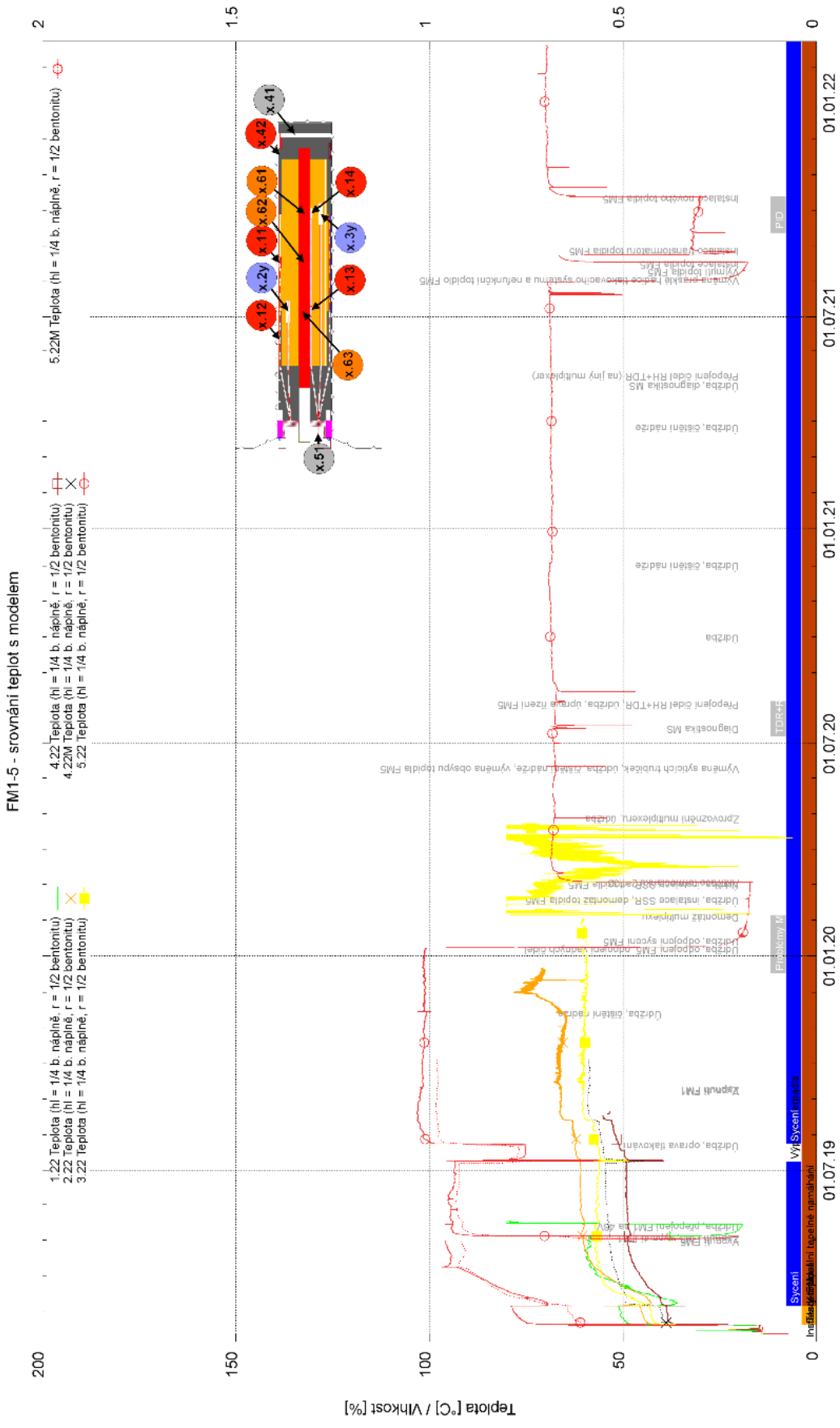
Ve fyzikálních modelech, kde je instalováno topidlo, a v jejich okolí dochází k postupnému nárůstu teploty (Obr. 13, Obr. 15). U FM3 je patrné ovlivnění teplot změnami teplot v rozrážce. Měřené hodnoty teplot ve FM1-4 se pohybují v rozsahu 25–100 °C, v FM5 60–200 °C (mimo výpadek topidla), v FM6-10 10-16 °C a v hornině 13–35 °C (Obr. 18).



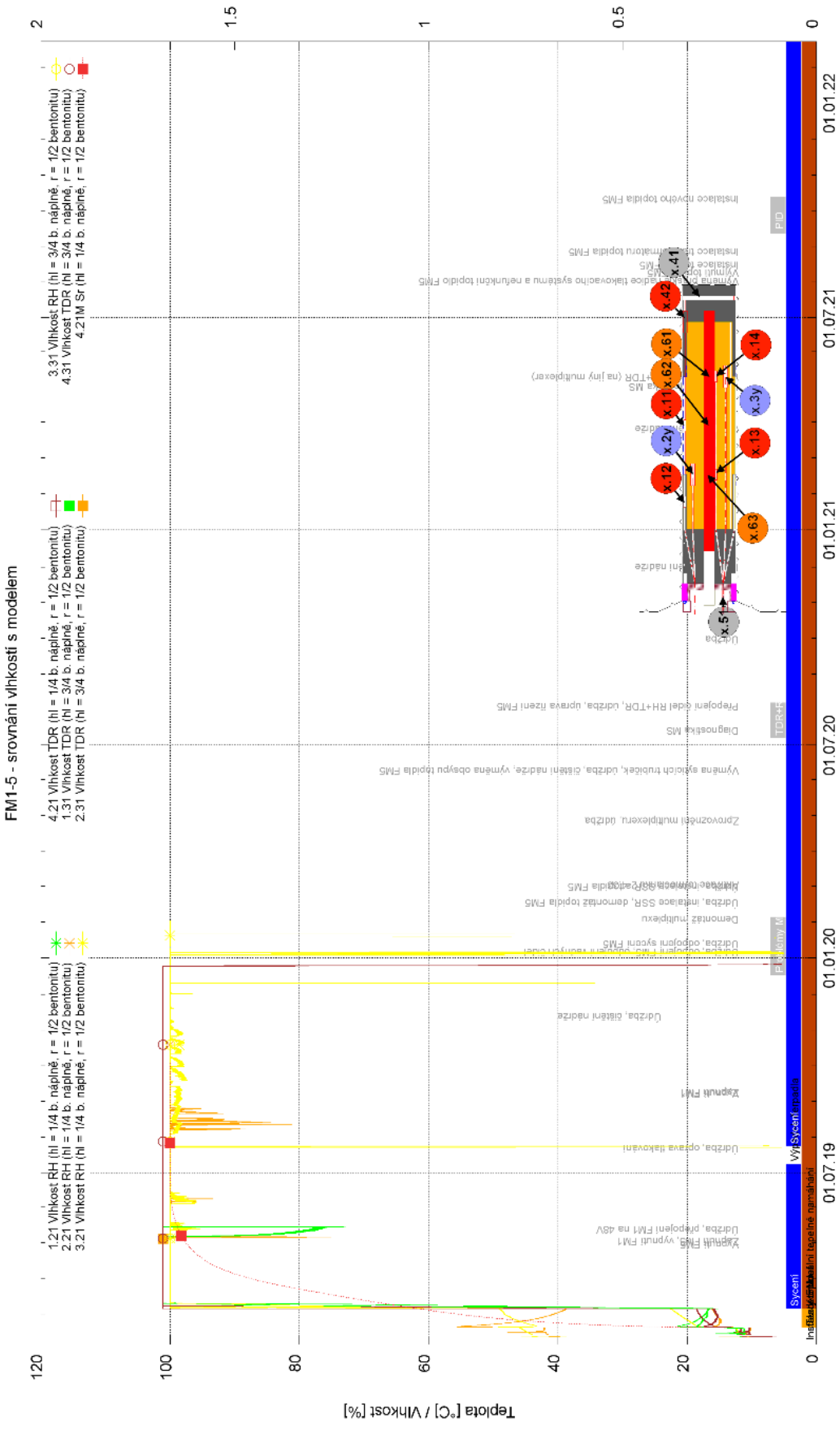
Obr. 13 Teplota v FM1-5



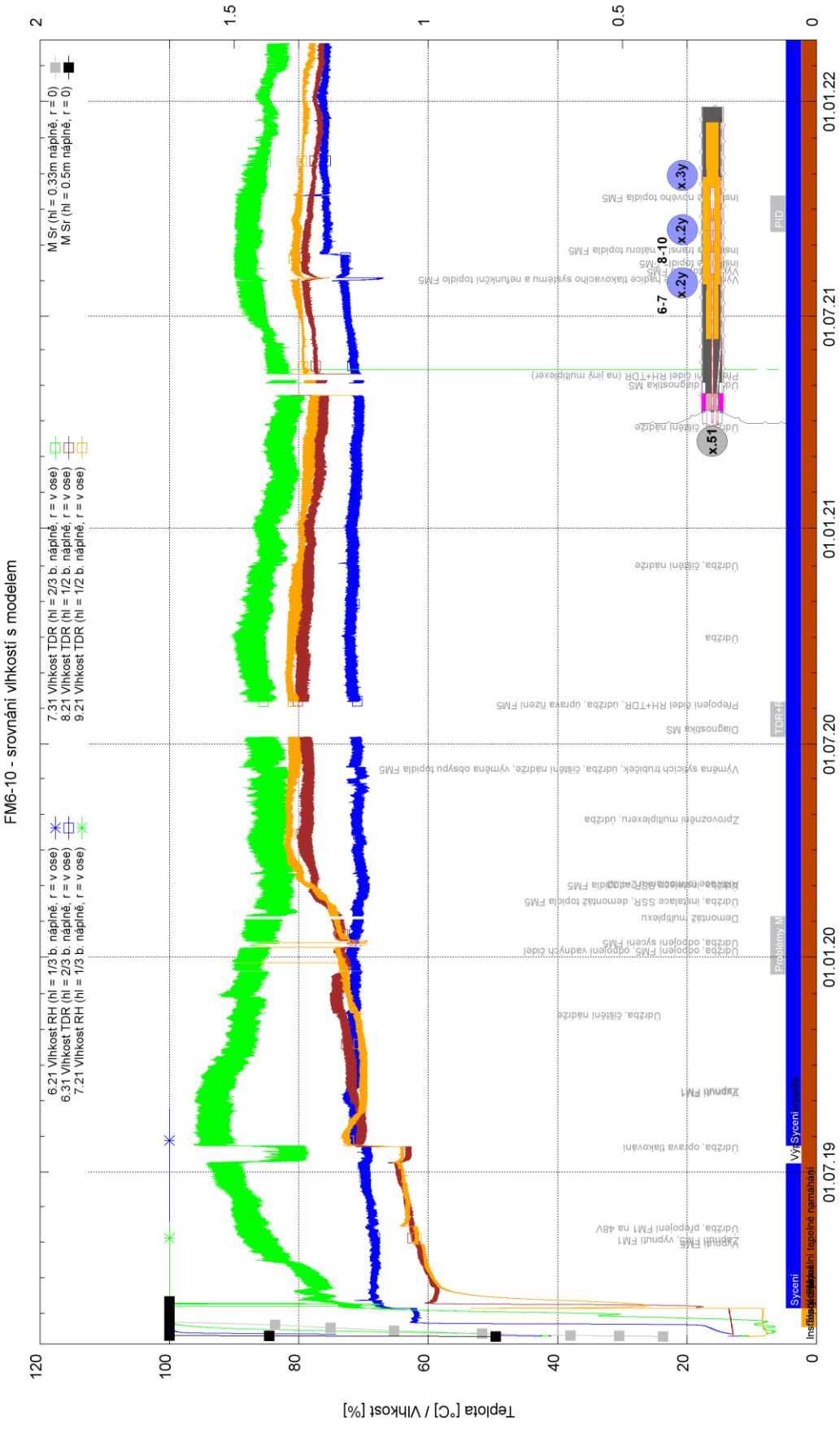
Obr. 14 Vlhkost v FM1-5



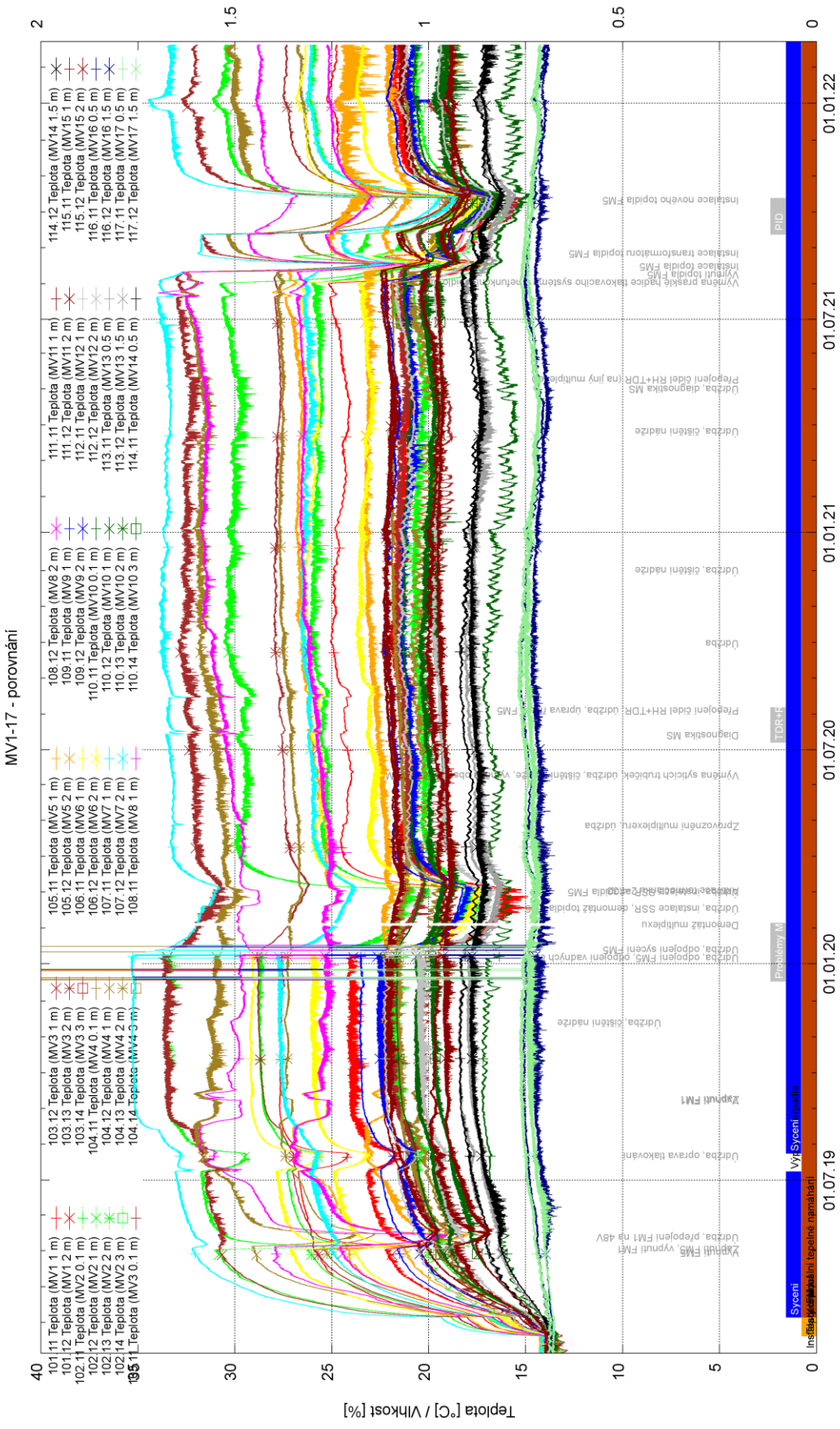
Obr. 15 Srovnání měřených dat a matematického modelu FM1-5 (teplota)



Obr. 16 Srovnání měřených dat a matematického modelu FM1-5 (vlhkost)



Obr. 17 Srovnání měřených dat a matematického modelu FM6-10 (vlhkost)



Obr. 18 Teplota v horninovém masivu

2.6.2 Hydrogeologický monitoring

Před zahájením experimentů a v průběhu realizace interakčních experimentů byly/jsou pravidelně monitorovány parametry pozemních vod souvisejících s realizací experimentů – sytící voda odebíraná z vrtu S-1 a vody vytékající v rozrážce ZK-3S.

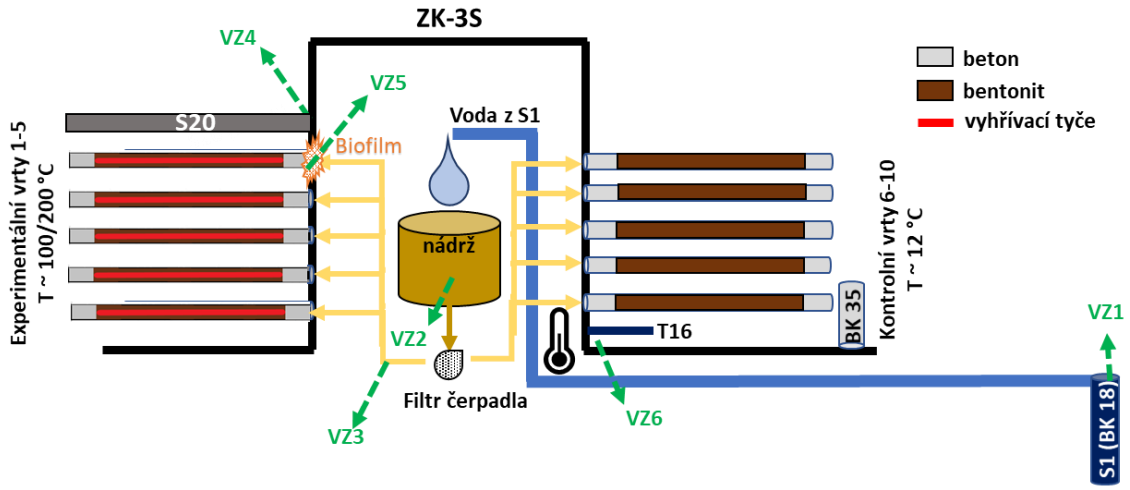
Podzemní voda pravidelně vzorkovaných přítoků v rozrážce ZK-3S (vrt S-20/BK43, výtok z měřícího vrtu MV16) je typu $CaSO_4$ s celkovým obsahem rozpuštěných látek (TDS) v rozmezí 400 až 500 $mg.l^{-1}$. Sytící voda z vrtu S-1 (BK18) je typu Ca-HCO_3, TDS je přibližně 300 $mg.l^{-1}$. Poměrné zastoupení hlavních iontů i jejich obsahy jsou u pravidelně vzorkovaných vod obdobné, s časem se nemění. Doposud nebylo prokázáno ovlivnění chemického složení podzemních vod přitékajících do zkušební komory působením experimentu.

Průsak sytící vody experimentálním vrtem FM1 jímaný do lyzimetru je typu Na-HCO_3 s TDS 650 až 700 $mg.l^{-1}$, TDS je tedy více než 3x vyšší ve srovnání se sytící vodou. Jedná se o sytící vodu z vrtu S-1, která prochází bezprostředním okolím experimentu, kde dochází k jejímu zahřátí a následnému odpařování na kontaktu se zavzdušněnou částí systému. Vzhledem ke konstrukci experimentu je delší či významnější kontakt prosakující sytící vody s bentonitem nepravděpodobný. Nárůst obsahů rozpuštěných látek je pravděpodobně z velké části způsoben odparem zahřáté vody.

2.6.3 Mikrobiologický monitoring

V rámci IE probíhá od roku 2018 průběžný mikrobiologický monitoring vody vstupující do experimentu a okolí experimentu (Svoboda et al., 2022, TZ 594/2022).

Schéma založení IE je načrtnuto na Obr. 19. Voda z vrtu S-1 (BK18) je vedena do zásobní nádrže umístěné ve zkušební komoře ZK-3S, z níž je voda částečně přečištěna a čerpána pomocí čerpadla do experimentálních vrtů. V pravidelných odběrech jednou za 6 měsíců byly odebírány vzorky vod vrtu S-1 (VZ1), voda z nádrže (VZ2), filtrát vody z nádrže (VZ3) a voda vytékající z vrtu S-20 ve zkušební komoře (VZ4), a sytící experimentální vrty. Dále byly odebírány vzorky biofilmu z okolí FM1 a biofilm nebo voda z vrtu MV16 pro teploměr T16.



Obr. 19: Schéma interakčního experimentu ve zkušební komoře ZK-3S

Pravidelné analýzy vod i stěrů dokládají převládající komunitu nekultivovatelných nebo blíže neurčených, ale přesto hojně zastoupených bakteriálních rodů. Z popsaných rodů se nejhojněji vyskytují aerobní či fakultativně anaerobní bakteriální společenstva, což odpovídá podmínkám v PVP. Z hlubších vrstev biofilmu byly někdy zachyceny striktně anaerobní mikroorganismy. Mikrobiální složení vody z vrtu S-1 je původně anaerobní, ale detekujeme spíše smíšenou komunitu v závislosti na způsobu odběru a rychlosti konzervace vzorkované vody. Zde mohou být více či méně zastoupeny striktně anaerobní metanogenní a síran redukující rody. Pro mikrobiální donaci experimentálních vrtů je nejpodstatnější porovnání nárůstu společenstev v zásobní nádrži a filtrátu vody z nádrže v jednotlivých odběrech. Rozdíl v zastoupení bakteriálních rodů v nádrži v jednotlivých odběrech je důkazem neustále se vyvíjejícího prostředí. Obecně se v nádrži vyskytují smíšená společenstva oxidující sirné nebo železnaté sloučeniny a byl detekován jejich částečný přechod přes filtr do sytící vody spolu s fakultativními anaeroby. Detekované mikroorganismy dále využívají pro svůj metabolický cyklus sloučeniny uhlíku, dusíku, síry, železa a vodíku. Vzhledem k objemu nádrže předpokládáme možnou stratifikaci bakteriálního společenstva podle obsahu kyslíku v jednotlivých vrstvách nádrže. Zástupci fakultativně anaerobních rodů mohou využívat buď kyslík, alternativně dusičnany nebo mohou v nižších anoxických vrstvách fermentovat organické látky. Podrobnější výsledky z let 2019 a 2020 lze nalézt ve zprávě (Svoboda et al., 2022, TZ 594/2022).

3 Cíle demontáže IE

Cílem projektu „Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov“ byl test materiálů uvažovaných pro HÚ (primárně bentonitu a cementových směsí) a jejich interakce v přirozeném prostředí HÚ. Na základě tohoto testu by mělo být možné vyhodnotit a následně doporučit nebo vyloučit použití konkrétních materiálů a jejich kombinací v budoucím HÚ.

Cílem demontáže IE je tedy na základě analýz materiálu z jednotlivých FM zkoumat vzájemné interakce mezi materiály (hornina, cement, bentonit ve formě tvárnic a pelet, materiály instrumentace a konstrukce FM), které proběhly v in-situ experimentu v horninovém prostředí v PVP Bukov.

Cílem je zjistit jak interakce uvnitř jednotlivých FM, tak srovnat jednotlivé FM mezi sebou a také provést srovnání s výchozím stavem, který byl zjištěn při charakterizaci (Svoboda et al., 2019, TZ 385/2019).

3.1 Geochemie

Aktualizace referenčního projektu HÚ (Vokál et al. 2011) předpokládá, že základním těsnícím a výplňovým materiálem v českém konceptu HÚ bude lokální český bentonit. Tato zpráva rovněž zmiňuje i použití materiálů na cementové bázi, a to jednak v podobě betonkontejnerů, jako solidifikační matrice a pro výstavbu konstrukčních prvků v úložišti. V HÚ se předpokládá použití dvou typů cementových materiálů, a to cementového materiálu založeného na běžných cementech, jenž mají vysoké pH výluhu (>12), a dále cementového materiálu se sníženým pH výluhu (<12), cementové malty se sníženým pH výluhu (Low-pH Mortar (LPM)) a betonu se sníženým pH výluhu (Low-pH Concrete (LPC)).

Interakcí podzemní vody použité pro sycení experimentů s cementovými materiály a s bentonitem dochází ke změnám v jejím chemickém složení. Složení a parametry výluhů cementových materiálů a bentonitu jsou popsány ve zprávě SÚRAO TZ 385/2019 (Svoboda et al., 2019). Jeden ze základních parametrů, hodnota pH výluhu, je pro bentonitové materiály ~ 8,5, zatímco pro cementový materiál se sníženým pH je přibližně 11,5 a pro cementové materiály založené na běžném cementu je ~ 12,3. 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.

U studovaných bentonitových a cementových materiálů bylo provedeno stanovení celkového organického uhlíku (TOC) a celkového anorganického uhlíku (TIC) v pevné fázi a také stanovení TOC ve výluzích materiálů použitých při konstrukci in-situ fyzikálních modelů (perlinka, používaná jako výztuž prvků vyráběných z cementových materiálů, dvousložková kotevní hmota HILTI MM plus a dvousložková hmota BETONFINISH pro úpravu povrchů vrtů) do podzemní vody a alkalického roztoku (Svoboda et al., 2019). Tyto materiály mohou být výrazným zdrojem vyloužitelného organického uhlíku, který může ovlivnit chemismus roztoků a materiálů a také být zdrojem energie a živin pro mikrobiální osídlení v experimentech.

Cílem je tedy zjistit míru ovlivnění chemických vlastností jednotlivých materiálů po interakci jejich porovnáním se vstupními hodnotami neinteragovaných materiálů. Těmito parametry jsou zejména fyzikálně-chemické parametry výluhů do destilované vody (pH, vodivost, oxidačně-

redukční potenciál), chemické složení výluhů, prvkové složení pevných fází, obsah forem uhlíku, termogravimetrická analýza pevných fází a kationtově výměnná kapacita bentonitu.

3.2 Geotechnické a ostatní fyzikální vlastnosti

Přestože IE je primárně zaměřen na chemické interakce materiálů je geotechnická analýza a analýza fyzikálních vlastností důležitou součástí zhodnocení. Navíc hrají výsledky těchto analýz důležitou podpůrnou funkci pro ostatní analýzy.

Interakcí podzemní vody použité pro sycení experimentů s cementovými materiály a s bentonitem dochází jak ke změnám v chemickém složení vody, tak ke změnám v chemickém složení materiálů, přičemž se mění také mineralogické, strukturní, fyzikální a geotechnické vlastnosti. Ve zvodnělém prostředí také dochází ke vzájemným interakcím materiálů, v tomto případě zejména cementových materiálů a bentonitu.

V souvislosti s rozpouštěním minerálů a srážením nových sekundárních fází může docházet ke změnám fyzikálních vlastností: porozity, specifických povrchů materiálů, pevnosti apod. Dalšími ovlivněnými parametry mohou být retenční křivky bentonitu, které udávají závislost sacího tlaku na vlhkosti.

Cílem je zjistit míru změn výše uvedených parametrů a vlastností jednotlivých materiálů po interakci a porovnat zjištěné hodnoty se vstupními hodnotami neinteragovaných materiálů.

Kromě změn fyzikálních vlastností může dojít i ke změnám geotechnických vlastností. Z geotechnického hlediska jsou zde dva hlavní cíle analýz:

- Popis stavu FM (podpora pro další analýzy, technické zhodnocení komponent)
- Změny geotechnických charakteristik

První cíl je zaměřen na zjištění stavu materiálu uvnitř FM a tedy i finálních podmínek, za kterých probíhaly interakce. Analýzy jsou proto zaměřeny na zjištění rozložení vlhkosti a objemové hmotnosti bentonitu uvnitř FM a kontrolní měření termofyzikálních charakteristik. Dále by měl být zhodnocen stav homogenizace/přesunu/distribuce bentonitu a hojení spár.

Nedílnou součástí prvního cíle je i kvalitativní zhodnocení stavu jednotlivých komponent FM (včetně instrumentace a technických částí). Toto zhodnocení bude jedním z podkladů pro stanovení rozsahu potřebných analýz (např. (ne)očekávaná koroze materiálů).

Druhým cílem je pak zjistit vliv interakcí, ať již přímých (kontakt materiálů) nebo nepřímých (přes vodné prostředí) na základní geotechnické vlastnosti: mez tekutosti, propustnost a bobtnací tlak. Tyto charakteristiky patří mezi klíčové pro správnou funkci bentonitu jako inženýrské bariéry uvnitř HÚ.

3.3 Koroze

Interakční experimenty nebyly primárně plánovány a určeny pro studium korozních procesů v bentonitu a cementových materiálech, ale přesto by bylo vhodné zaměřit pozornost i na tyto jevy. Laboratorní studium korozních dějů v prostředí bentonitu a cementu je popsáno v technické zprávě SÚRAO TZ 406/2019 (Dobrev et al., 2019). V těchto testech byl zaznamenán významný rozdíl v korozní rychlosti pro ocelové vzorky exponované ve směsi bentonitu se dvěma procenty cementu. Tato směs může v prvním přiblížení simulovat bentonit

ovlivněný interakcí s cementovým materiálem, jak je předpokládáno v interakčním experimentu. V in-situ experimentech jsou použity kovové (ocelové) prvky (topidlo, čidla, konstrukční materiály) a v prostředí bentonitu a cementu u nich může dojít/pravděpodobně došlo ke korozním dějům.

V případě, že budou pozorovány korozní jevy na kovových materiálech, mělo by být posouzeno, zda korozní napadení je rovnoměrné (materiál koroduje na celé exponované ploše) nebo nerovnoměrné. Dále by pak analýzy měly být směřovány na identifikaci korozních produktů, stanovení množství/tloušťky korozních produktů a mít vazbu na mikrobiologické analýzy.

3.4 Mikrobiologie

Hlavním cílem mikrobiologických analýz provedených při demontáži IE je zhodnocení vlivu mikroorganismů na stabilitu a funkčnost těsnících materiálů plánovaných pro použití v HÚ včetně vyhodnocení vlivu vzájemných interakcí mezi těmito materiály. Výsledky analýz přinesou v první řadě poznatky o charakteru bakteriálních společenstev v různých typech materiálů (beton, bentonit, hornina) a jejich možném vlivu na funkčnost těchto materiálů při použití v HÚ. Z hlediska bezpečnosti jsou materiály v HÚ ohroženy především mikrobiální korozí, která by mohla vést k porušení kovového pláště UOS a úniku radionuklidů do životního prostředí, dalšími faktory jsou produkce plynů mikroorganismy ohrožující těsnící funkci bentonitu, mikrobiálně působené změny v mineralogické struktuře bentonitu (tzv. illitizace bentonitu) či degradace cementových materiálů (Černá et al., 2021, TZ 552/2021). Kromě základních materiálů bude možné také zhodnotit vývoj bakteriálních společenstev na povrchu dalších materiálů jako je použité topidlo, čidla a další kovové komponenty, geotextilie a jiné. Analýzy těchto komponent mohou ukázat vliv mikroorganismů na různé další materiály, jako byla např. detekována koroze čidel zapouzdřených v nerezové oceli v in-situ experimentu FEBEX (Azkarate et al., 2004), jež mohou být v prostředí HÚ či navazujících in-situ experimentech použité.

Druhým zásadním aspektem mikrobiologických analýz v rámci IE bude detekce bakteriálních společenstev a jejich aktivity na rozhraní různých materiálů použitých ve FM. Rozhraní různých materiálů používaných v HÚ jsou potenciálním místem rozvoje mikrobiální aktivity, neboť představují komplexní prostředí s často větším životním prostorem (Stroes-Gascoyne et al., 2002). To může ohrožovat dlouhodobou stabilitu použitých těsnících materiálů. Přes tento potenciál nejsou rozhraní mezi materiály dobře mikrobiologicky prozkoumaná. Mikrobiální analýzy interakcí mezi těsnícími materiály jsou velmi ojedinělé a v in-situ podmínkách s výjimkou studia MIC (Rajala et al., 2015; Rajala, 2017) dosud chybí, proto jsou podobné studie klíčové.

Dalším velice zajímavým jevem, který bude možné v IE zhodnotit, je vývoj bakteriálních společenstev na teplotním a vlhkostním gradientu ve FM1-5 v bentonitu a betonu, neboť tyto moduly jsou zahřívány topidlem. Vyšší teplota ve středu FM v kombinaci s následným nedostatkem vody způsobeným vyšší teplotou může snižovat množství životaschopných buněk, tedy vytvářet méně příznivé podmínky pro mikrobiální aktivitu (Bengtsson et al., 2017). Vlhkostní gradient bude možné sledovat i u FM6-10, neboť množství vody, které pronikne bentonitem až do středu FM bude menší než na jeho okraji. Kromě vlhkostního a teplotního gradientu bude možná pozorovatelný i gradient dostupnosti kyslíku. Přestože jsou fyzikální modely kontinuálně sycené aerobní vodou ze zásobní nádrže, snížení koncentrace kyslíku

v zadní části modulu vlivem horizontálního umístění a poměrně veliké vzdálenosti zadní části modulu od zkušební komory nelze zcela vyloučit a je tedy třeba ve vzorkování zohlednit. Výrazné úbytky množství kyslíku v různých hloubkách vrtu byly detekované např. při monitoringu vrtu S-18 v rámci zakázky Monitoring anaerobního mikrobiálního osídlení PVP Bukov a rešerše vztahů horninového prostředí a mikroorganismů (Steinová et al., 2021). Různá dostupnost kyslíku přímo ovlivňuje přítomnost a metabolickou aktivitu bakterií (Černá et al., 2021, TZ 552/2021) a tedy i nežádoucí procesy, které mohou tyto bakterie způsobovat, stejně tak jako abiotické korozní procesy.

Kromě zmíněných gradientů lze mezi jednotlivými FM v IE také zkoumat možný rozdílný vývoj mikrobiálních společenstev v různě připravovaném bentonitu (tvárnice/pelety) o různých vysušených objemových hmotnostech (1200/1600 kg/m³) a také v různém typu betonu (OPC/LPC). Podle dostupných dat z literatury se dá očekávat, že hustota a typ použitého bentonitu ovlivní do určité míry mikrobiální aktivitu a složení společenstev (Stroes-Gascoyne et al., 2010; Bengtsson and Pedersen, 2016; Bengtsson et al., 2017). Vysoká objemová hmotnost kompaktovaného bentonitu snižuje difuzi živin a metabolických produktů díky menší velikosti pórů, čímž snižuje mikrobiologickou aktivitu (Pedersen, 2017; Pedersen et al., 2017). Navíc i na rozhraních peletového a tvárnicového bentonitu, či jen na rozhraní bentonitových tvárnic, lze očekávat nehomogenity v objemové hmotnosti bentonitu s potenciálním vlivem na rozvoj mikrobiální aktivity v těchto místech. Prostorové nehomogenity v objemových hmotnostech byly zjištěné též v jiných in-situ experimentech (Villar et al., 2020). Také typ použitého betonu v jednotlivých FM může mít významný vliv na mikrobiální společenstva. OPC neboli beton obsahující portlandský cement je charakterizován poměrně vysokým pH (okolo 12-13), což může mít destabilizační efekt na minerální strukturu bentonitu (Sánchez et al., 2006). V prostředí HÚ je proto testováno použití betonů se sníženým pH výluhu (White a Doudou, 2016). Přítomnost různých typů betonu bude zcela jistě též ovlivňovat výskyt a aktivitu bakterií (Shrestha et al., 2022; Taborowski and Pedersen, 2018).

Zásadní výstupy z mikrobiálních analýz IE tedy mohou být:

1) Zhodnocení charakteru a aktivity bakteriálních společenstev v různých typech materiálů použitých v IE, a především změn těchto společenstev v místech interakce materiálů.
2) Zjištění vlivu teplotního a vlhkostního gradientu a gradientu dostupnosti kyslíku na bakteriální společenstva v bentonitu a betonu a v místech jejich interakce, a tedy možnost zhodnotit funkčnost materiálů jako těsnícího materiálu v HÚ
3) Získání informací o možném vlivu typu použitého těsnícího materiálu (peletový či tvárnicový bentonit; beton typu OPC/LPC) na bakteriální složení a aktivitu v daných materiálech

3.5 Mineralogie

Je možno předpokládat, že rozměry interakčních zón na rozhraních materiálů budou relativně malé. Malá množství vzniklých interakčních/degradačních produktů předurčují i analytické techniky pro identifikaci hlavních procesů (např. metody skenovací elektronové mikroskopie v kombinaci s použitím energiově-disperzní spektrometrie (SEM/EDX), specifické postupy mineralogické analýzy pomocí XRD, např. rentgenová difrakce orientovaných vzorků materiálu). Odběr a příprava odběrem neovlivněných vzorků je zásadním klíčem k úspěšné analýze.

Je možno předpokládat, že v experimentech dojde k rozpouštění/srážení uhličitanů. Interakcí alkalické fronty s bentonitem může docházet k významným změnám vlastností těchto materiálů (např. rozpouštění jílových minerálů a srážením nových sekundárních fází). V případě interakce draslíku (např. z alkalického cementového výluhu) a při zvýšené teplotě experimentu (200 °C) lze očekávat alespoň stopovou přeměnu smektitu na smíšené struktury illit/smektit. Pokud by došlo ke korozím kovových (ocelových) prvků, které jsou součástmi experimentů (topidlo, čidla, …) mohou vzniknout nové minerální fáze založené na těchto korozních produktech.

Cílem je tedy zjistit míru změn v mineralogickém složení jednotlivých materiálů po interakci jejich porovnáním se vstupními hodnotami neinteragovaných materiálů.

4 Postup rozebírání IE

Rozebírání IE je technologicky, časově a odborně náročný proces. Tento proces bude probíhat z velké části v prostoru PVP Bukov, což je důlní dílo a kontrolované pásmo z hlediska radiační ochrany. Před zahájením prací bude tedy nutné vytvořit Realizační projekt, Technologické postupy a další podpůrné dokumenty tak, aby byly naplněny nejen vědecké cíle, ale byla zajištěna i bezpečná technická realizace. Vzhledem k charakteru prací budou muset být tyto dokumenty vypracovány pracovníky s příslušnou odbornou způsobilostí a podléhat schválení DIAMO a příslušných orgánů.

Dále popsaný postup rozebírání a požadavky nejsou náhradou Realizačního projektu a Technologických postupů, jsou popisem principů a zásad, jejichž smyslem je naplnit odborné cíle.

Postup rozebírání je vypracován jako vzorový pro rozebrání jednoho FM. Předpokládá se, že konkrétní postup rozebírání a jeho harmonogram bude upraven podle zvolené technologie rozebírání, velikosti vzorkování a sekvence rozebírání FM.

Upozornění: Prostor PVP Bukov je kontrolovaným pásmem z hlediska radiační ochrany. Pokud je materiál přesouván mimo toto pásmo musí projít dozimetrickou kontrolou.

4.1 Sekvence rozebírání IE

Vzhledem k dostupnému manipulačnímu prostoru v ZK-3S a jejím okolí je velmi obtížné provádět více činností v souběhu a tedy i provádět bezpečně rozebrání více (zejména velkých) FM najednou. Z tohoto důvodu je nutné zvolit sekvenční způsob rozebírání IE.

Zároveň je třeba konstatovat, že proces rozebírání a analýzy jednotlivých FM bude zejména u prvních rozebíraných FM časově a technicky velmi náročný (viz kapitola 4.4.6), neboť půjde o neodzkoušenou technologii. Z toho vyplývá, že zde vždy bude časový odstup mezi rozebráním jednotlivých FM.

Principiálně je vhodné uvažovat o dvou variantách sekvence rozebírání:

- Rozebírání ve vlnách - pilotní rozebrání vybraného/vybraných FM, jeho analýza a poté návrh další sekvence + rozebrání
- Rozebrání všech FM ihned po sobě (a následné souběžné analýzy všech FM)

První varianta spočívá v provedení pilotního rozebrání vybraného vyhřívaného a/nebo nevyhřívaného FM a provedení kompletního vyhodnocení. Na základě zkušeností s pilotním rozebráním vyhřívaného a/nebo nevyhřívaného FM bude možné připravit přesnější harmonogram dalšího rozebírání, který zahrne i případný souběh činností. Časový odstup mezi pilotním rozebráním a následující vlnou bude 1-2 roky z důvodu čekání na výsledky analýz a přípravy aktualizovaného projektu dismantlingu. Tato varianta umožňuje výrazně kvalitnější návrh úpravy – optimalizaci – technologie rozebírání, vzorkovacího plánu a analýz pro FM rozebírané ve druhé vlně na základě výsledku první vlny.

Druhá varianta představuje sekvenční rozebrání všech FM bez přestávek způsobených čekáním na výsledky analýz. Tato analýza odstraňuje prodlevu (cca 1 rok) mezi vlnami pro rozebrání, avšak vzhledem k neznalosti stavu FM a potřebných analýz, bude výrazně těžší získat kvalitní výsledky při rozumné finanční náročnosti – nebude možné provést optimalizaci

vzorkovacího plánu a ani případnou zásadnější úpravu v technologii rozebírání. Tato varianta má vyšší personální náročnost (probíhá souběh rozebírání/vzorkování v podzemí a analýz) a může vést k vyčerpání kapacit laboratoří pro analýzy.

Z odborného i kapacitního hlediska se jeví jako nejvhodnější provést nejprve pilotní dismantling malého a velké FM včetně všech analýz a na základě zkušeností z rozebírání a výsledků analýz provést optimalizovaný návrh rozbírání zbylých FM jak po technické stránce, tak po stránce vědecké.

Vzhledem k typu náplně fyzikálních modelů (geotextilie, betonové bloky, bentonit) a její celkové hmotnosti může být nejprve vhodné provedení testu vybrané technologie na zkušebním vrtu (může být i mimo oblast IE).

4.2 Technologie pro vyjmutí a rozebírání FM

Pro vyjmutí FM z horninového masivu lze teoreticky využít několik technologických postupů. Tyto postupy lze rozdělit do několika kategorií:

- Vyjmutí pouze náplně bez okolní horniny
  - Postupné rozebírání (s odřezáváním topidla) – viz kapitola 4.2.1.1
  - Vytažení „v celku“ (tah za zhlaví, instrumentaci, …) – viz kapitola 4.2.1.2
  - Vytažení „v celku“ s pomocí výpažnice – viz kapitola 4.2.1.3
- Vyjmutí FM včetně okolní horniny
  - Obřezání bloku s FM lanovou pilou – viz kapitola 4.2.2.1
  - Obvrtání bloku s FM – viz kapitola 4.2.2.2
  - Kombinace obvrtání a obřezání

Každý z těchto postupů má své výhody a nevýhody včetně rizik (Tab. 4). Z hlediska kvality vědeckých výstupů se jako nejvhodnější jeví vyjmutí s blokem horniny (obřezání lanovou pilou, případně obvrtání). Z postupů, které vyjímají pouze náplň, pak vyjmutí pomocí výpažnice, u kterého je však riziko poškození náplně.

Tab. 4 Přehled vybraných metod pro vyjmutí FM

Metoda		Výhody	Nevýhody	Rizika
Pouze náplň	**Postupné rozebírání**	• Cena • Neporušení horninového masivu	• Velmi malý pracovní prostor (technická náročnost) • Nepřesnost vzorkování • Nedostupnost některých rozhraní • Pomalé vyjmutí po částech • Nesterilní prostředí	• Kontaminace od prací (materiálová, mikrobiologická) • Technické problémy/nevyjmutí všech částí • Expanze náplně • Ztráta některých důležitých rozhraní/vzorků z konkrétních odběrových bodů

			• Velká nejistota v časové náročnosti pro vyjmutí náplně	
	Vytažení za technické části	• Cena • Vlastní rozebrání vně horniny (jednodušší a přesnější vzorkování) • Neporušení horninového masivu	• Je třeba přípravky/technické zařízení na vytažení (lis, …) • Nedostupnost/poškození některých rozhraní (kontakt s horninou)	• Extrémně velké riziko „přetržení“ FM s poškozením náplně a potenciálně bez možnosti vyjmutí zadní odtržené části • Ztráta materiálů z vnějšího rozhraní • Poškození důležitých rozhraní (rozhraní budou představovat slabá místa) • Expanze náplně • Technické problémy/nevyjmutí všech částí • Kontaminace od prací (materiálová, mikrobiologická)
	Vytažení pomocí výpažnice	• Cena • Vlastní rozebrání vně horniny (jednodušší a přesnější vzorkování) • Neporušení horninového masivu	• Potřeba přípravků/technického zařízení na vytažení (trubka, lis, …) • Nedostupnost/poškození některých rozhraní (kontakt s horninou)	• Riziko shrnutí geotextilie při instalaci trubky a poškození rozhraní bentonit/geotextilie/skála • Expanze náplně • Kontaminace od prací (materiálová, mikrobiologická)
Včetně okolní horniny	**Vyříznutí lanovou pilou**	• Vyjmutí neporušeného FM včetně horniny • Přesné vzorkování	• Cena • Nutnost injektáže • Hmotnost/náročnost na manipulaci	• Kontaminace injektáží • Kontaminace výplachem (technickou vodou) • Problémy při vyjmutí bloku, zaklínění bloku

		• Možnost sterilních odběrů • Lze odřezat „konec za FM“ od horniny	• Nutnost přípravků a specializovaného technického vybavení • Nutnost sanace otvoru po vyjmutí • Nutnost statického posouzení masivu • Vyžaduje vrty většího průměru pro vedení kladek	• Problémy při rozebírání horninového bloku - nebezpečí poškození/kontaminace náplně FM • Odmytí/kontaminace bentonitu při řezání horninového bloku
	Obvrtání	• Vyjmutí neporušeného FM včetně horniny • Přesné vzorkování • Možnost sterilních odběrů	• Cena • Nutnost injektáže • Hmotnost/náročnost na manipulaci • Nutnost přípravků a specializovaného technického vybavení • Není oddělen konec za FM od horninového masivu • Nutnost sanace otvoru po vyjmutí • Nutnost statického posouzení masivu •	• Nedostatečné převrtání/uhnutí vrtů • Kontaminace injektáží • Kontaminace výplachem • Rozlomení/ulomení FM (oddělení od horniny v nesprávném místě) • Problémy při vyjmutí bloku, zaklínění bloku • Problémy při rozebírání horninového bloku - nebezpečí poškození/kontaminace náplně FM • Odmytí/kontaminace bentonitu při řezání horninového bloku •
	Kombinace	Viz lanová pila a obvrtání		

4.2.1 Vyjmutí pouze náplně

Vyjmutí pouze náplně spočívá v demontáži bez zásahu do okolní horniny. Pro toto vyjmutí jsou možné tři scénáře:

- Postupné rozebírání (s odřezáváním topidla)
- Pokus o vytažení „v celku“
- Pokus o vytažení „v celku“ s pomocí výpažnice

Vzhledem k technické náročnosti je pravděpodobná kombinace všech těchto postupů (zejména prvního a druhého).

4.2.1.1 Postupné rozebírání (s odřezáváním topidla a komponent)

Tento postup je založen na vyjmutí jednotlivých konstrukčních částí a náplně po částech. Vzhledem k tomu, že zhlaví + topidlo jsou pevně spojeny a trubičky jsou pevně ukotveny v betonu, je nutné použít destruktivní metody.

Pro dělení topidla je nutné nejprve vyjmout jeho vnitřek (topná spirála, termočlánky, keramický držák, obsyp, …). Tím dojde k zpřístupnění prostoru, ze kterého je možné zevnitř postupně odřezávat trubku topidla (frézou/řezným kotoučem/bruskou na delší hřídeli). Frézu/řezný kotouč/úhlovou brusku bude dále nutné použít i na sytící trubičky a další konstrukční prvky.

Pro sejmutí zhlaví bude nutné sejmout kabelové průchodky a průchodky pro tlakovací trubičky na zhlaví, odříznout trubičky a topidlo za zhlavím (rozhraní ocel/beton).

Následující betonovou zátku bude nutné mechanicky rozrušit a vyndat po částech. Poté opět odříznout trubičky a topidlo.

Bentonit již bude možno vzorkovat/vyjmout pomocí trubkových vzorkovnic, škrabek, a podobně. Betonový prstenec bude možné po vyjmutí bentonitu vytáhnout buďto v celku nebo po segmentech (po rozlomení). Po uvolnění pracovního prostoru bude nutné opět odříznout trubičky a topidlo pro přístup k další sekci.

Bentonit ve střední sekci bude vzorkován obdobně jak v sekci s betonovým prstencem, obdobně pak geotextilie. Je pravděpodobné, že sekci bude nutné rozebírat postupně (více odřezávání topidla a trubiček).

Bentonit v zadní sekci s betonovým prstencem bude vyjmut obdobně jako v sekci s předním prstencem. Topidlo a trubičky již nebude nutné odřezávat – vše je volně zasunuto do přilehlého betonu a mělo by jít vysunout.

Zadní betonový segment a tlakovou buňku by mělo být možné volně vyjmout. Pokud dojde k jejich vzpříčení/zalepení bude nutné je mechanicky či vodou uvolnit, případně rozbít a vyndat po částech.

Poznámka: Tento postup lze v kterémkoliv kroku kombinovat s ostatními postupy podle zastiženého stavu FM.

Upozornění: Tento postup používá destruktivní metody a vyžaduje vzorkování uvnitř vrtu. Hrozí vysoké riziko kontaminace a není zajištěna přesnost vzorkování a dostupnost všech (neporušených) rozhraní.

4.2.1.2 Vytažení „v celku“

Principem tohoto postupu je pokus o vytažení FM v celku (nebo jeho části). Tah je aplikován na technické části FM (zhlaví, topidlo, trubičky) a cílem je překonat tření na kontaktu s horninou a vše vytáhnout jako jeden kus.

Výhodou tohoto postupu je vzorkování, které bude probíhat vně vrtu.

Upozornění: Vzhledem k tomu, že náplň FM není v podélném směru „sepnutá“, hrozí velké riziko „přetrhnutí“ FM. Tedy že dojde k vytažení zhlaví, přilehlého betonu, části náplně (např. první sekce bentonitu v betonovém prstenci) a zbytek FM zůstane ve vrtu. Při přetržení dojde vzhledem k pohybu topidla, trubiček a instrumentace k poškození/promíchání zbytku bentonitové náplně FM.

Poznámka: Tento postup lze kombinovat s ostatními postupy podle zastiženého stavu FM.

4.2.1.3 Vytažení „v celku“ s pomocí plechové výpažnice

Principem tohoto postupu je zavedení výpažnice (tenkostěnné ocelové trubky) mezi náplň FM a horninu. Výpažnice bude zavedena po plášti vrtu. Pro zavedení bude nutné použít vibroberanění nebo zatlačení pomocí hydraulického (či jiného) listu. Pro vytažení výpažnice s FM pak bude opět využito hydraulických listů nebo jiných technických prostředků.

V průběhu instalace bude nutné zajistit prostorovou stabilitu výpažnice. Pro snížení rizika zachycení o konstrukci FM je třeba výpažnici opatřit na čelním břitu náběhem směrem dovnitř (postupné zvětšování tloušťky směrem od horniny). Výpažnice také musí být na vnějším konci opatřena límcem s upínacími prvky pro zhlaví FM a upínacími prvky pro následné vytažení.

Výhodou tohoto postupu je vyjmutí náplně FM v celku. Nevýhodu je **poškození rozhraní beton/skála a bentonit/geotextilie/skála vlivem zavedení odběrné trubky**.

4.2.2 Vyjmutí FM včetně okolní horniny

Vyjmutí FM včetně okolní horniny spočívá v oddělení části horninového masivu v nejbližším okolí FM a jeho využití jako ochrany náplně při vyjímání FM do doby před zahájením vlastního vzorkování.

V první fázi je tedy vyjmut FM včetně horniny a vlastní vzorkování je prováděno až ve druhé fázi, kdy je kontrolovaně oddělena zbylá hornina a rozebrán/vzorkován vlastní FM.

Pro vyjmutí/oddělení bloku horniny s FM lze využít dvě základní technologie a jejich kombinaci:

- Obvrtání
- Vyřezání lanovou pilou

Technologie vekoprůměrového převrtání není vhodná, neboť je zde extrémně vysoké riziko zlomení/prasknutí bloku s FM během vrtání, jeho mechanické poškození a kontaminace výplachem.

Technologie obvrtání a vyřezání mají principálně následující kroky:

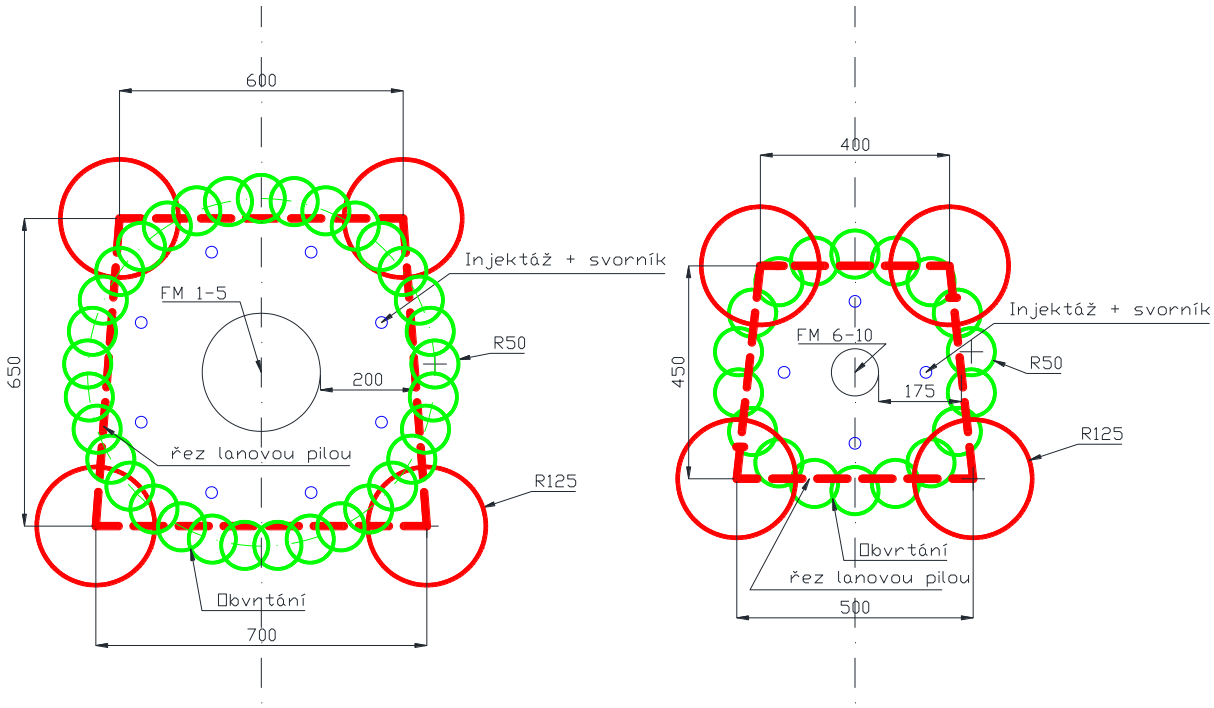
- Zpevnění a utěsnění bloku pomocí injektáží. Zároveň budou injektážní vrty využity pro instalaci podélných svorníků, které zpevní blok a budou sloužit jako kotevní body pro převázku FM a jako manipulační úchyty pro vytažení.
- Obvrtání a/nebo řezání lanovou pilou. Během vrtání/řezání je nutné instalovat pod blok podpůrné prvky (trubky, plechy, …), které zajistí blok proti prosednutí/prasknutí a budou sloužit jako nosný/kluzný prvek pro vysunutí (manipulační „lopata“/kolébka). Výsledný tvar bloku musí být kónický (sbíhavý směrem do horniny), aby bylo možno blok vyjmout.

- Vysunutí bloku s FM z horninového masivu. Pro vysunutí bloku bude nutné využít přípravky a technologie pro posuv (manipulační podložka, nástroje pro uchopení bloku, hydraulické lisy, …).
- Upnutí bloku do manipulační/přepravní stolice. Zabalení bloku (pokud je třeba).
- Přeprava bloku do vyčleněného místa v podzemí nebo na povrchu (dočasná nebo trvalá laboratoř)
- Rozebrání blok(ů) a vzorkování

Do doby, než bude zahájeno vlastní vysunutí bloku, je vhodné udržovat tlakovací systém FM stále pod mírným tlakem jako ochranu proti průniku injektáže a výplachu. Do stejné doby je vhodné provozovat i veškerou instrumentaci (měření) uvnitř FM.

Vzhledem k tomu, že dochází k vyjmutí velkého objemu horniny, je třeba zejména u velkých FM co nejdříve po vytažení zahájit sanaci vzniklého otvoru.

Z hlediska hmotnosti vyjmutého bloku jsou obě navrhované technologie srovnatelné. Lze očekávat, že blok horniny (viz schematické srovnání na Obr. 20) s velkým FM bude vážit ~2-2,5 t v závislosti na zvolené geometrii, kdy hmotnost při použití lanové pily je mírně vyšší oproti obvrtání. Celkový příčný rozměr (průměr) bloku horniny vychází z odhadu nutné „ochranné vrstvy“ horniny okolo FM o mocnosti cca 200 mm.



Obr. 20 Srovnání obvrtání (zeleně) a lanového řezání (červeně) pro FM1-5 a FM 6-10 (čelní pohled)

Technologická voda použitá během vrtných a řezných prací by měla být totožná s vodou použitou na sycení FM v průběhu celého experimentu a měla by být v průběhu vyjímání opakovaně vzorkována pro detekci přítomných bakterií. V případě použití jiné vody (což velmi nedoporučujeme) bude třeba významným způsobem zvýšit množství odebraných vzorků a provést důkladnou genetickou charakterizaci přítomných mikroorganismů k odlišení možných kontaminantů. Pokud to bude technologicky možné doporučujeme též přidat do použité technologické vody stopovací látky, jež umožňují dodatečně detekovat místa kontaminovaná technologickou vodou v průběhu vyjímání.

4.2.2.1 Obvrtání

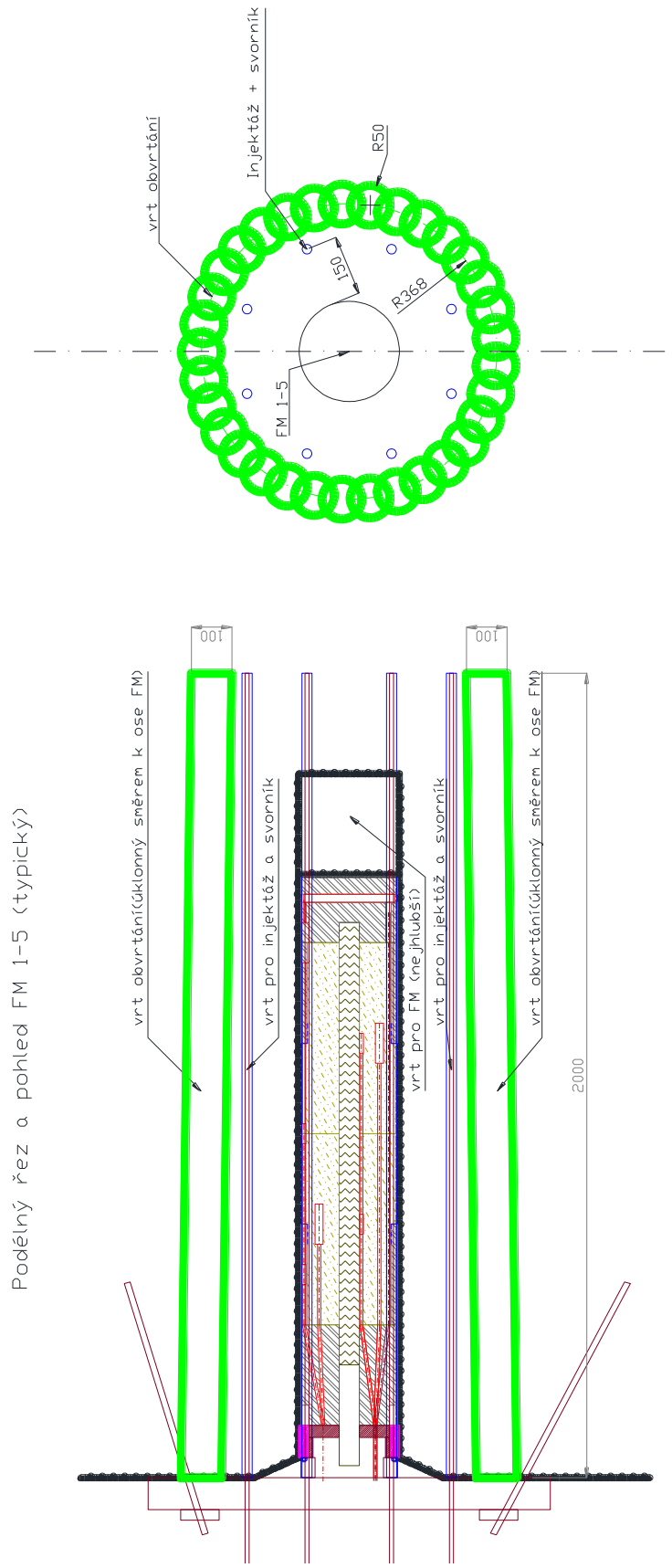
Vyjmutí pomocí obvrtání spočívá v oddělení bloku horniny s FM od masivu pomocí překrývajících se sbíhavých vrtů. Výhodou obvrtání je, že se používá pouze jedna technologie – vrtání. Nevýhodou je, že není možno kontrolovaně oddělit blok s FM od masivu v prostoru za FM (mezi vrty) a potřeba přesnosti vrtání.

Na Obr. 21 a Obr. 22 jsou schémata oddělení pomocí obvrtání (vrty zeleně). Vrtné schéma je uvedeno pouze jako příklad – v prováděcím projektu musí být proveden detailní návrh v závislosti na zvoleném průměru vrtné korunky a použitého vrtného stroje. Zcela vpravo na Obr. 22 je příklad alternativního vrtné schématu, kde velkoprofilové vrty v rozích lze využít i k řezání lanovou pilou místo dokončení oddělení převrtáváním. Schéma umožňuje po vyvrtání velkoprofilových vrtů učinit rozhodnutí, zda pokračovat s vrtáním nebo řezat lanovou pilou.

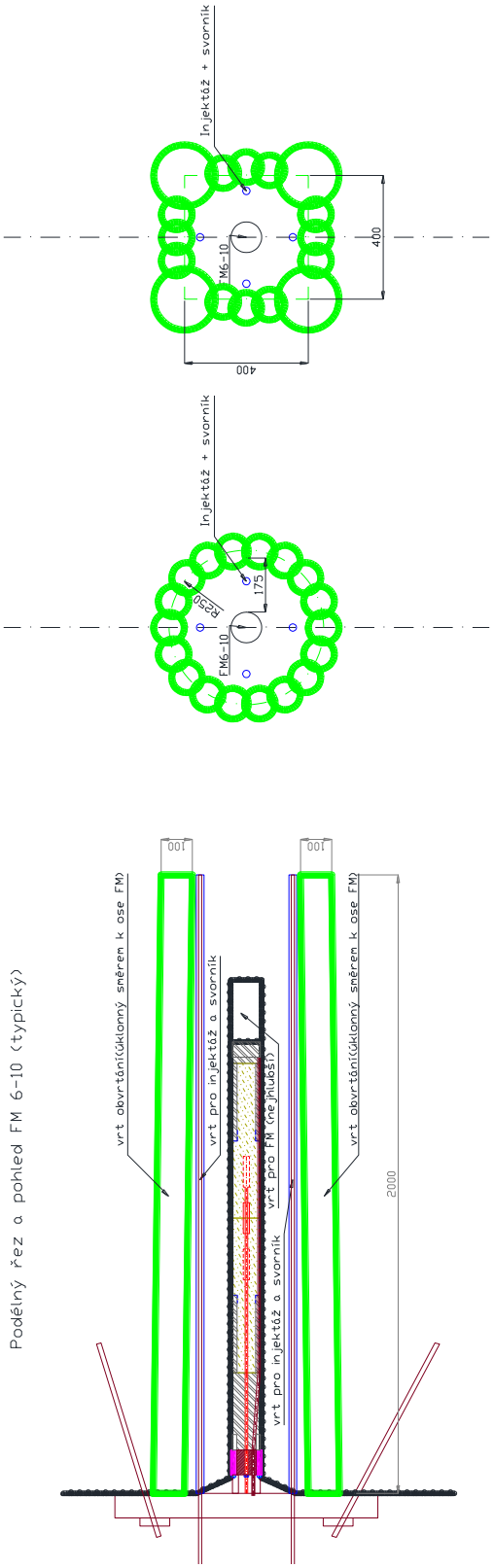
Ve vrtném schématu je třeba zvolit dostatečné překryvy, aby nedošlo k tomu, že některá část zůstane neoddělena (např. vlivem uhnutí vrtu). Vrty musí být provedeny jako sbíhavé, aby bylo možné blok vyjmout (nedošlo k zaklínění) a vytékala voda s výplachem (voda nesmí ve vrtech stát, aby se minimalizovalo riziko kontaminace FM).

Sekvence vrtání by měla začít spodními vrty a poté postupovat symetricky vzhůru, tak aby se co nejdříve zajistilo „podložení“ bloku (stabilizace proti poklesnutí a rozlomení) a umožnil odtok výplachu.

Upozornění: vzhledem k množství vrtů (s tím spojené nutnosti redukovat zásahy do masivu při kotvení stroje) a nárokům na přesnost vrtání je možné, že bude nutné použít technického přípravku/konstrukce pro kotvení a polohování vrtné soupravy.



Obr. 21 Schéma vyjmutí FM1-5 obvrtáním



Obr. 22 Schéma vyjmutí FM6-10 obvrtáním (napravo příklad alternativního vrtné schématu)

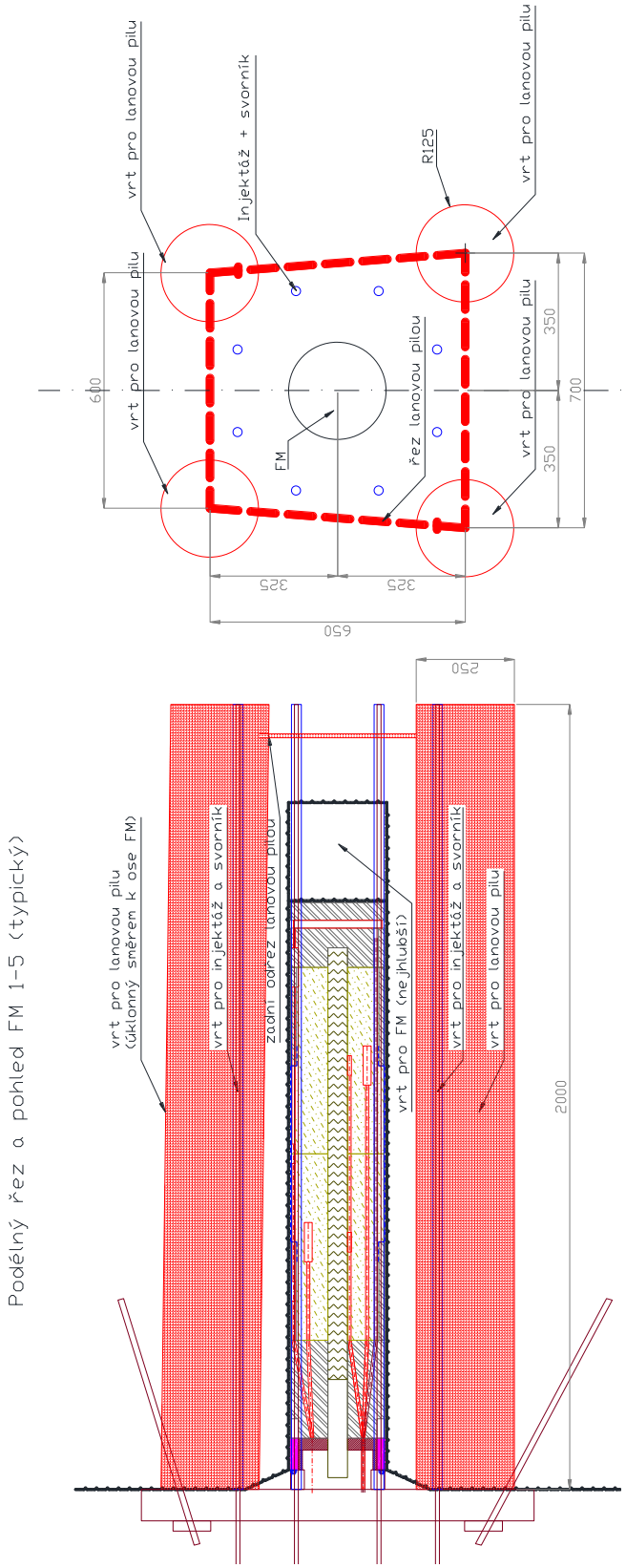
4.2.2.2 Vyřezání lanovou pilou

Vyjmutí pomocí lanové pily spočívá v oddělení bloku horniny s FM od masivu pomocí řezů lanovou pilou vedených ze sbíhavých vrtů. Výhodou řezání je, že výsledný blok má hladké boky a dojde ke kontrolovanému oddělení od masivu i v prostoru za FM.

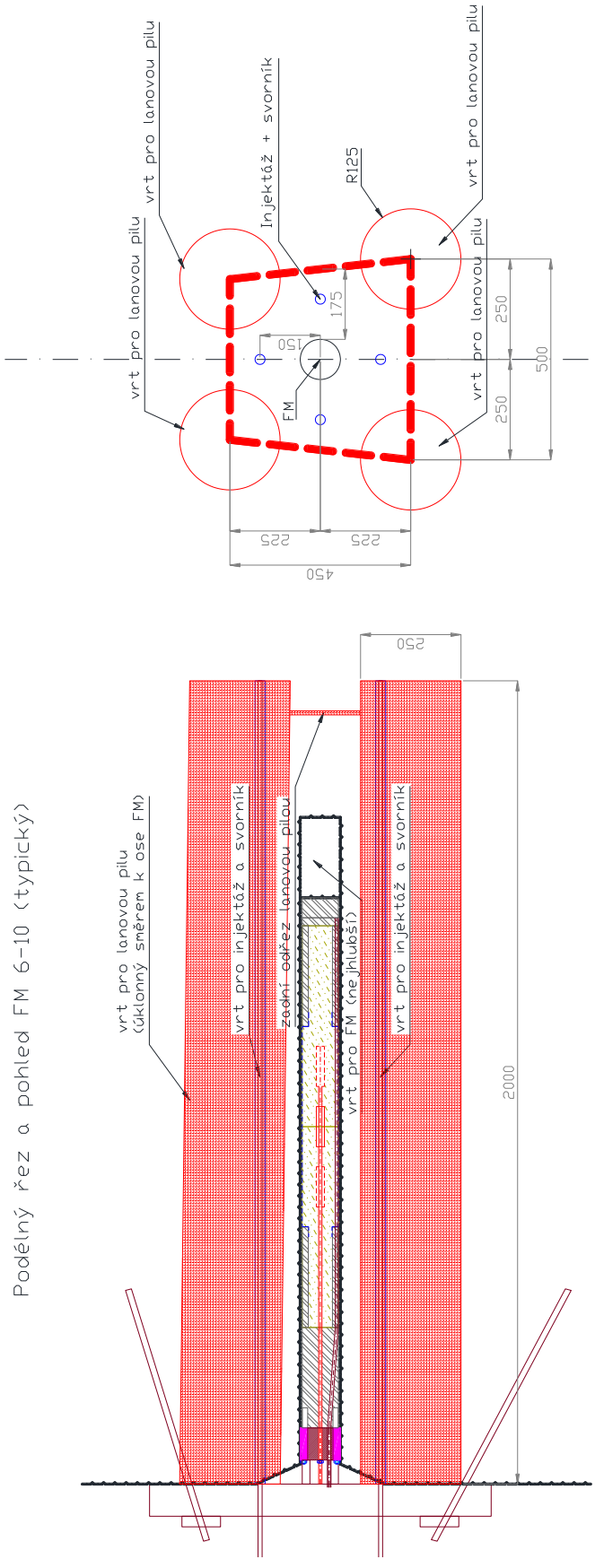
Na Obr. 23 a Obr. 24 jsou schémata oddělení pomocí lanové pily. Vrtné/řezné schéma je uvedeno pouze jako příklad – v prováděcím projektu musí být proveden detailní návrh v závislosti na použité pile a z toho i požadavku na velikost vrtů pro kladky pily.

Vrty pro kladky musí být provedeny jako sbíhavé, aby bylo možné blok vyjmout (nedošlo k zaklínění) a vytékala voda s výplachem (voda nesmí ve vrtech stát, aby se minimalizovalo riziko kontaminace FM).

Sekvence oddělení začne nejprve vrtáním vrtů pro vedení kladek pily a poté řezáním. Nejprve bude proveden řez na spodní straně, tak aby se co nejdříve zajistilo „podložení“ bloku (stabilizace proti poklesnutí a rozlomení) a umožnil odtok výplachu. Následovat pak budou boční řezy, vrchní řez a odříznutí za FM. Řez za FM se předpokládá/ doporučuje minimálně ve vzdálenosti 200 mm za čelem vrtu.



Obr. 23 Schéma vyjmutí lanovou pilou FM1-5



Obr. 24 Schéma vyjmutí lanovou pilou FM6-10

4.3 Obecné zásady postupu rozebírání

4.3.1 Dokumentace

Součástí rozebírání IE bude dokumentace, a to jak ve významu plánu/postupu jak rozebírat, tak ve významu popisu toho, co bylo provedeno (zápisy, záznamy, protokoly…).

Dokumentaci pro rozebírání IE lze rozdělit na dvě části. Na technickou dokumentaci a dokumentaci odbornou.

Cílem technické dokumentace je příprava, provedení a sanace rozebírání z technického hlediska. Technická dokumentace se tedy zaměřuje na technologickou stránku rozebírání včetně bezpečnosti celého procesu.

Cílem dokumentace odborné je podpora vědeckých cílů IE a jeho rozebrání. Odborná dokumentace se tedy soustředí na vědeckou náplň rozebírání IE – na odběry/vzorkování, analýzy a jejich výsledky.

Základními částmi jsou:

- Technická dokumentace:
  - Realizační projekt dismantlingu – technická část
  - Technologické postupy
  - Pasportizace – technická část
  - Deník rozebírání (stavební/technická část deníku)
  - AV dokumentace
- Odborná dokumentace:
  - Realizační projekt dismantlingu – odborná část
  - Pasportizace – odborná část
  - Evidence/protokoly vyjmutého materiálu (odběry)
  - Evidence/protokoly vzorků (zpracovaný odběr pro analýzu)
  - Evidence/protokoly analýz a jejich výsledků
  - Databáze dismantlingu
  - Deník rozebírání (odborná část deníku)
  - AV dokumentace

Realizační projekt – Realizační projekt popíše, jakým postupem přesně proběhne rozebírání IE. Tento projekt bude vypracován dodavatelem a bude obsahovat konkrétní technická a odborná řešeni zvolená dodavatelem v souladu s platnou legislativou.

Technologické postupy – Pro jednotlivé technické činnosti je třeba před zahájením rozebírání vypracovat technologické postupy v souladu platnou legislativou. Tyto postupy musí být schváleny DIAMO.

Pasportizace – Před zahájením prací a po skončení prací je třeba provést (stavebně technickou a odbornou) pasportizaci stavu IE a jeho okolí. Cílem je zjistit stav před rozebráním a ovlivnění rozebráním.

Deník rozebírání – Deník rozebírání popisuje/dokumentuje všechny činnosti, které budou při rozebírání IE probíhat. Deník musí uvádět popis a časové značky všech událostí, tak by bylo možno identifikovat události/postup/kroky během rozebírání, a tedy i možné vlivy na výsledky

rozebírání. Deník musí obsahovat i odborná pozorování během rozebírání. Podpůrnou součástí deníku je AV dokumentace (fotografie, videa).

AV dokumentace – Fotografická a video dokumentace je podpůrným prostředkem Deníku rozebírání a další dokumentace. Patří sem pravidelná AV dokumentace stavu během rozebírání (minimálně 2x denně), dokumentace hlavních a mimořádných událostí, dokumentace odběrů, … Během rozebírání se doporučuje se provádět kontinuální videozáznam.

Evidence/protokoly (odběry, vzorky, analýzy) – Evidence/protokoly jsou základním nástrojem pro dokumentování materiálu, který byl vyjmut z IE, jeho účelu, jak bylo s materiálem naloženo, jaké analýzy na něm byly provedeny a jaké jsou jejich výsledky.

Veškerou evidenci odběrů, vzorků a analýz je třeba vést tak, aby jí bylo možno provádět na místě a byla zálohována. Výstupem evidence budou primární data/záznamy (např. papírové formuláře a fotografie). Data získaná touto evidencí budou neprodleně uložena do databáze dismantlingu.

Pro evidenci je doporučeno využívat sekvenční číslování se separátními číselnými řadami (odběry, vzorky, analýzy, …). Pro zjednodušení a vyloučení chyb se doporučuje mít předem připravena čísla na samolepkách s QR kódem (odkaz do příslušné části databáze dismantlingu) v několika kopiích tak, aby mohly být lepeny přímo na označovaný materiál a příslušné protokoly/formuláře. Minimální požadavky na dokumentaci jsou dále popsány u odběrů, vzorků a analýz (viz dále v kapitole 4.3).

Pro lokalizaci uvnitř FM se doporučuje používat cylindrický lokální souřadný systém, kde poloha je charakterizována: **hloubkou** od vnější hrany zhlaví (ocelový prvek s těsněním tl. 80 mm; jeho hrana do zkušební komory); **poloměrem** – vzdáleností od osy FM (osa symetrie zhlaví/topidla); **úhlem** od svislé ve směru hodinových ručiček.

Databáze dismantlingu (evidence odborné části včetně výsledků) – Elektronický nástroj pro uchování dat a metadat při rozebírání IE. Databáze bude obsahovat data a metadata z evidence odběrů, vzorků, analýz (včetně výsledků analýz) a deníku rozebírání. Součástí databáze bude i elektronická kopie primárních dat. Databáze bude dále využita pro analýzu výsledků.

4.3.2 Vyjímání FM (samostatně či blok FM s horninou)

Upozornění: V době vyjímání je třeba již mít plně připraveno zázemí, technické a personální zajištění pro odběry/vzorkování/analýzy. V průběhu vyjímání modulu může dojít k situacím, kdy odběry/vzorkování bude zahájeno již během těchto činností. Některé z technologií vyjímání dokonce předpokládají souběh těchto činností. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM / vlastního FM a jeho částí. Laboratorní zázemí musí umožnit požadované zpracování odběrů na vzorky, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak provedení zkoušek přímo na místě.

Vyjímání modulu je nutné provést tak, aby:

- Byla zajištěna bezpečnost osob a pracoviště

- Byla minimalizována doba vyjímání. Tedy doba, po kterou již není FM zatěžován a mění se podmínky/stav FM před jeho rozebráním
- Nedošlo k poškození FM (bylo minimalizováno riziko) a znemožnění interpretace výsledků
- Došlo k minimálnímu ovlivnění ostatních FM
- Nedošlo k poškození technologie, MS, ŘS
- Nedošlo k ovlivnění okolních experimentů

Postup vyjímání FM bude záviset na zvolené technologii vyjímání (kapitola 4.2) a bude detailně popsán v Realizačním projektu a příslušných technologických postupech.

Upozornění: Vzhledem k hmotnosti vyjmutého materiálu u některých postupů je třeba dopředu zajistit manipulační/transportní prostředky a přípravky a případně i dopravní cestu na povrch.

Do doby, než bude zahájeno vlastní vysunutí bloku, je vhodné udržovat tlakovací systém FM stále pod mírným tlakem jako ochranu proti průniku injektáže a výplachu. Do stejné doby je vhodné provozovat i veškerou instrumentaci (měření) uvnitř FM.

Po vyjmutí bloku/materiálu bude tento uložen ideálně na předem připravenou a vysterilizovanou či desinfekcí a UV zářením ošetřenou pracovní plochu, kde bude následně rozebrán (viz 4.3.3) na menší části (odběry), které budou dále rozebírány již sterilním způsobem v prostředí sterilního boxu nebo jiným způsobem dle specifických požadavků na vzorkování (viz 4.3.4). V případě potřeby budou před zahájením odběrů provedeny stěry z povrchu modulu a následně bude přistoupeno k jeho okamžitému rozebrání. Průběh vyjímacích prací by měl být pravidelně konzultován s odborníkem na mikrobiologii a klíčové fáze vyjímání a rozebírání jednotlivých modulů by měly probíhat za přítomnosti osoby mikrobiologického zaměření, aby bylo dohlédnuto na optimální průběh rozebírání IE z mikrobiologického hlediska. Obdobně je třeba postupovat i pro ostatní specializace.

Při vyjímání bloku/materiálu je pro následné mikrobiologické analýzy nezbytné zachovávat co největší sterilitu pracovních nástrojů, aby nedošlo ke kontaminaci a tím možnému znehodnocení vzorků. Vhodným postupem sterilizace je ošetření nástrojů předem pomocí autoklávu, či namístě opakovaně pomocí etanolu a plamene nebo silného desinfekčního činidla.

Technická voda použitá během vyjímání by měla být totožná s vodou použitou na sycení FM v průběhu celého experimentu a měla by být v průběhu vyjímání opakovaně vzorkována pro detekci přítomných bakterií. V případě použití jiné vody (což velmi nedoporučujeme) bude třeba významným způsobem zvýšit množství odebraných vzorků a provést důkladnou genetickou charakterizaci přítomných mikroorganismů k odlišení možných kontaminantů. Pokud to bude technologicky možné doporučujeme též přidat do použité technické vody stopovací látky, jež umožňují dodatečně detekovat místa kontaminovaná technickou vodou v průběhu vyjímání (Černá et al., 2021, TZ 552/2021). Jako stopovací látky jsou využívány většinou chemické (Colwell et al., 1992; McKinley and Colwell, 1996) či fluorescenční (Nyyssönen et al., 2014; Sahl et al., 2008; Stroes-Gascoyne et al., 2007) látky nebo částice, jež se v místě vrtu nevyskytují. Tyto látky jsou posléze detekovány na povrchu a uvnitř vrtných jader/vzorků. Zatímco na povrchu vrtných jader přítomnost stopovačů znamená úspěšný průběh označení, uvnitř vrtných jader pak jejich přítomnost znamená možnou kontaminaci.

Z postupu vyjímání musí být pořízena AV dokumentace a postup dokumentován do Deníku rozebírání.

4.3.3 Odebírání materiálu a jeho uchování (Odběry)

Upozornění: Pro úspěšné provedení odběrů/vzorkování bude třeba připravit technické a laboratorní zázemí. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM/ vlastního FM a jeho částí. Laboratorní zázemí musí umožnit požadované zpracování odběrů na vzorky, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak provedení zkoušek přímo na místě.

Všechen materiál, který je vyjmut z FM a jeho zájmového okolí (bez ohledu na vzorkovací plán) je dále označován jako **Odběr**. Každý odběr musí být **evidován, stabilizován a zabalen (pokud není ihned zpracován), předán k dalšímu zpracování či uložen**. V místech odborného zájmu se poloha odběrů primárně řídí polohou vzorků ze **vzorkovacího plánu**. V ostatních místech se doporučuje provádět pravidelné dělení s ohledem na uchování neporušených oblastí zájmu (např. rozhraní materiálů). Odběr může být okamžitě, či později zpracován na jeden či více **vzorků**. Odběr musí být dostatečně velký, aby z něj mohly být odebrány plánované vzorky.

Pro některé odběry cílící na vzorkování vzorků typu rozhraní, mikrobiologie, korozní produkty a podobně je nutno počítat se **specifickým přístupem**, který bude vyžadovat speciální přístup k odebírání materiálu/vzorkování (např. udržení původní vlhkosti materiálů, zamezení/snížení času kontaktu se vzduchem apod.). Dále viz Vzorkování (4.3.4) a požadavky ve Vzorkovacím plánu (Příloha 1).

Velkou pozornost je třeba věnovat dodržení specifických postupů u odběrů, které jsou dále určeny na mikrobiologické analýzy. Zde je třeba odebírat intaktní kusy (= odběry) a tyto přemístit do sterilního prostředí UV boxu, kde budou dále sterilně odebrány jednotlivé vzorky (viz 4.3.4). Odběry musí být dostatečně velké, aby se z nich daly odebrat všechny plánované vzorky. Odběry budou z modulu získány s použitím vysterilizovaných nástrojů (autokláv, ethanol, plamen), aby nedošlo k případné kontaminaci. Zároveň veškerý materiál, který přijde do styku s odběry, musí být sterilní (např. použití sterilních rukavic, desinfekce vzorkovacích povrchů apod).

Odběry, které nebudou ihned zpracovány na vzorky, je třeba neprodleně ošetřit. Minimálním požadavkem je zabalení a vakuování do nepropustné folie (i pro vzduch) a organizované uložení v suchu, chladu a temnu. Nejlépe v podmínkách identických s podmínkami v PVP Bukov. Doporučuje se provést uskladnění v číslovaných přepravkách, kde do protokolů odběrů/vzorků bude vyznačeno, ve které přepravce je odběr uložen.

Většina mikrobiologických analýz vyžaduje náročnější přípravu pro uchování a způsob uchování materiálu před analýzou (např. sterilní odběr, zmrazení a uchování v mrazicím boxu). Tento postup je třeba respektovat, pokud má být materiál v budoucnu pro tyto analýzy využit. *Upozornění: I takto uchované vzorky však mají omezenou životnost v závislosti na typu analýzy*.

Značení odběrů se doporučuje sekvenčním číslováním. Pro zjednodušení a vyloučení chyb se doporučuje mít předem připravena čísla na samolepkách s QR kódem (odkaz do databáze odběrů), kdy jedna samolepka se lepí přímo na zabalený odběr a druhá na formulář odběru. Další jsou pak využity jako reference pro navazující vzorky. Celkem se doporučuje je mít pro jeden odběr připraveny minimálně čtyři samolepky s tím, že pokud nebudou všechny využity, tak zbylé lepit na zabalený odběr.

Minimální rozsah evidence u odběru (protokol odběru):

- Číslo odběru (jedinečné číslo na samolepce s QR kódem do databáze odběrů)
- Datum a čas odběru
- Číslo FM
- Poloha v rámci FM (souřadnice a orientace)
- Slovní popis zájmové oblasti/místa odběru
- Rozměry
- Hmotnost
- Fotografická dokumentace – místo před a po odebrání, nezabalený a zabalený odběr. Fotografie musí obsahovat číslo odběru (např. na formuláři).
- Stav odběru
- Lokace/identifikace místa, kam byl odběr uložen (číslo přepravky, sklad,…)
- Navazující vzorek/vzorky na který je zpracován/předán (pro odběry, které jsou ihned zpracovány)
- Místo na samolepky/čísla vzorků (a samolepky/čísla vzorků)
- Poznámky – další informace zjištěné při vzorkování
- Kdo odběr provedl (osoba, organizace)

Na zabaleném odběru je nutné vyznačit orientaci odběru. Dále pak na obal vypsat základní informace o odběru: číslo, hmotnost, FM, polohu, datum a čas.

Pro lokalizaci polohy odběrů se doporučuje používat cylindrický lokální souřadný systém FM, kde poloha je charakterizována: **hloubkou** od vnější hrany zhlaví (ocelový prvek s těsněním tl. 80 mm; jeho hrana do zkušební komory); **poloměrem** - vzdáleností od osy FM (osa symetrie zhlaví/topidla); **úhlem** od svislé ve směru hodinových ručiček.

U odběrů, které nebudou ihned zpracovány na vzorky a pro zbylý materiál z odběru po vzorkování, se doporučuje provést uskladnění v číslovaných přepravkách, kde do protokolů odběrů bude vyznačeno, ve které přepravce je odběr uložen. Vlastní uskladnění je třeba provádět za podmínek specifikovaných ve vzorkovacím plánu pro příslušné vzorky/odběry.

Veškerou evidenci odběru je třeba vést tak, aby jí bylo možno provádět na místě a byla zálohována. Výstupem evidence budou primární data/záznamy (např. papírové formuláře a fotografie) a elektronická databáze odběrů. Součástí databáze bude i elektronická kopie primárních dat.

4.3.4 Vzorkování a uchování vzorků (Vzorky)

Upozornění: Pro úspěšné provedení odběrů/vzorkování bude třeba připravit technické a laboratorní zázemí. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM / vlastního FM a jeho částí. Laboratorní zázemí musí umožnit požadované zpracování odběrů na vzorky, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak provedení zkoušek přímo na místě.

Vzorek je odběr, či jeho část, která je připravena pro nebo zpracována pro další odbornou analýzu. Vzorky jsou připravovány v souladu se vzorkovacím plánem. Příprava a nakládání se vzorkem se musí řídit specifickými pravidly, která jsou dále popsána u jednotlivých analýz a ve vzorkovacím plánu (Příloha 1).

Každý ze vzorků musí být evidován včetně návaznosti na příslušný odběr a provedené analýzy. Značení vzorků se doporučuje sekvenčním číslováním. Pro zjednodušení a vyloučení chyb se doporučuje mít předem připravena čísla na samolepkách s QR kódem (odkaz do databáze vzorků), kdy jedna samolepka se lepí přímo na formulář vzorku, druhá na přímo na zabalený vzorek (pokud je zpracován později) nebo na formulář analýzy, třetí na formulář odběru, ze kterého je vzorek oddělen. Celkem se doporučuje je mít pro jeden vzorek čtyři samolepky a s tím, že pokud nebudou všechny využity, tak zbylé lepit na zabalený vzorek.

Dále se doporučuje mít předem připraveny (předvyplněny) formuláře vzorků na základě vzorkovacího plánu. Předvyplněné formuláře dále slouží jako kontrola kompletnosti odběrů.

Minimální rozsah evidence u vzorků (protokol vzorku):

- Číslo vzorku (jedinečné číslo na samolepce s QR kódem do databáze odběrů)
- Číslo odběru, ze kterého vzorek pochází (nejlépe číslo na samolepce s QR kódem do databáze odběrů)
- Datum a čas vzorku (oddělení z odběru)
- Číslo FM
- Poloha v rámci FM (souřadnice) – vychází z polohy odběru
- Slovní popis zájmové oblasti/místa vzorku
- Rozměry
- Hmotnost
- Popis přípravy vzorku
- Fotografická dokumentace – odběr (s polohou vzorku), nezabalený a zabalený vzorek. Fotografie musí obsahovat číslo vzorku.
- Stav vzorku
- Místo uložení vzorku/komu byl předán
- Navazující analýza/analýzy
- Místo na samolepky/čísla analýz
- Poznámky – další informace zjištěné při vzorkování/zpracování
- Kdo vzorek odebral (osoba, organizace)

Doporučuje se provést uskladnění vzorků v číslovaných přepravkách, kde do protokolů vzorků bude vyznačeno, ve které přepravce je vzorek uložen.

Veškerou evidenci vzorků je třeba vést tak, aby jí bylo možno provádět na místě a byla zálohována. Výstupem evidence budou primární data/záznamy (např. papírové formuláře a fotografie) a elektronická databáze vzorků, předávacích protokolů a analýz (a jejich výsledků). Součástí databáze bude i elektronická kopie primárních dat.

Vlastní vzorkování musí probíhat v kontrolovaných podmínkách. Pokud to zvolená technologie vyjmutí neumožňuje, hrozí nemožnost provedení vzorkování tak, aby bylo možno provést všechny analýzy (nemožnost řádného odběru vzorků – např. díky kontaminaci).

Pro úspěšné provedení vzorkování bude třeba připravit technické a laboratorní zázemí. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM / vlastního FM.

Laboratorní zázemí musí umožnit požadované **zpracování odběrů na vzorky**, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak **provedení zkoušek přímo na místě**.

Minimálním požadavkem na ochranu vzorků je zabalení a vakuování do nepropustné folie (i pro vzduch) a organizované uložení v suchu, chladu a temnu. Nejlépe v podmínkách identických s podmínkami v PVP Bukov. Více viz kapitola 4.3.3 a Příloha 1, kde jsou popsány specifické postupy pro rozebírání, vzorkování, ochranu a uchování vzorků.

Pro vzorkování rozhraní je nutno co nejvíce zachovat charakter kontaktu materiálů, a tedy odebrat zorek tak, aby obsahoval oba typy materiálů a jejich společné rozhraní – neporušené. Tyto vzorky pak dle požadavků laboratorních metod uložit např. zabalené a zavakuované ve folii nebo je na místě zalít do pryskyřice.

Pro odběry korozních produktů je nutno počítat se specifickým přístupem, a to omezení kontaktu se vzdušným kyslíkem nebo alespoň na co nejmenší míru snížení času, kdy budou vzorky vystaveny vzduchu. Toho může být dosazeno zpracováváním odběrů a přípravou vzorků v rukavicovém stanu naplněném inertním plynem, nebo alespoň co nejrychlejším zabalením vzorku do folie a zavakuováním. Vzorky pro analýzy korozních produktů by měly být následně uloženy do transportních pouzder s inertní atmosférou a přepraveny do laboratoře k analýze.

Pro potřeby mikrobiologických a chemických analýz budou z odběrů ve sterilním prostředí UV boxu odebrány vzorky bentonitu, horniny a betonu, případně vzorky více materiálů naráz v místech styku těchto materiálů. Alternativně mohou být provedeny také stěry z povrchů či na místech interakcí těchto materiálů. Vzorky budou uloženy do sterilních obalů (např. uzavíratelný sterilní PE sáček) a umístěny do mrazícího zařízení ihned po odebrání (vzorky na mikrobiologické molekulárně-genetické analýzy). V případě odběru vzorků i na kultivaci mikrobiologických společenstev budou jednotlivé vzorky uloženy v chladu taktéž rovnou po jejich odběru (4 °C). Takto uložené vzorky budou poté převezeny do mikrobiologických laboratoří, kde budou následně uchovány až do jejich použití v analýzách, které budou prováděny v nejkratším možném čase od odebrání. Přesná místa odběrů vzorků v rámci jednotlivých FM jsou popsána v kapitole 5.2, postup následného zpracování vzorků v mikrobiologických laboratořích viz podkapitola 5.1.4.

Kromě odběrů popsaných ve vzorkovacím plánu se předpokládá inspekce a dle potřeby i analýza technických komponent FM. Tedy zhlaví a jeho těsnění, betonových zátek, topidla, instrumentace a jeho kabeláže… Tyto prvky nejsou jmenovitě uváděny ve vzorkovacím plánu, avšak je třeba jim při rozebírání věnovat pozornost.

4.3.5 Zjištění stavu IE před a po rozebrání FM

Před zahájením prací a po skončení prací je třeba provést (stavebně technickou a vědeckou) pasportizaci stavu IE a jeho okolí. Cílem je zjistit stav před rozebráním a ovlivnění rozebráním.

Tato pasportizace musí zahrnovat i odborný monitoring v rozsahu, jak probíhá v rámce běhu IE. Je tedy nezbytné provést mikrobiologický a geochemický monitoring vody a stěry stěn stejným způsobem a na stejných místech jako v průběhu IE (Svoboda et al., 2021, TZ 537/2021), viz podkapitola 2.6. Pokud to bude technicky možné, po vyjmutí jednotlivých FM by měly být provedené odběry vod a stěry též v místě vyjmutí modulu. Odběry pro monitoring vody by zcela jistě měly být provedeny, pokud se v místě po vyjmutém FM objeví výtoky podzemní vody.

S monitoringem masivu a prostoru IE se doporučuje pokračovat i po skončení rozebírání všech FM do ustálení podmínek (minimálně 6 měsíců po skončení rozebírání IE).

4.3.6 Ochrana ostatních FM a jiných experimentů v okolí

Práce při rozebírání FM musí být prováděny tak, aby nedošlo k poškození zbylých FM a bylo minimalizováno ovlivnění chování zbylých FM a horniny. Tam, kde hrozí nebezpečí poškození, je třeba zajistit mechanickou ochranu (např. zábranami nebo obložením).

Dále je třeba předejít ovlivnění probíhajících měření (přímé a nepřímé rušení). Je třeba volit takové technologie a postupy, které budou mít minimální vliv na běh ostatních FM, chování horninového masivu a dalších experimentů v okolí IE.

4.3.7 Provoz a ochrana technologie, instrumentace a měřicího systému

Práce při rozebírání FM musí být prováděny tak, aby nedošlo k poškození MS, ŘS, technologie a instrumentace. **Je třeba zajistit mechanickou ochranu** (např. zábranami nebo obložením) **ŘS, MS a technologie IE proti poškození.**

Dále je třeba předejít ovlivnění probíhajících měření (přímé a nepřímé rušení). **Nesmí být zasahováno do elektroinstalace IE a nesmí být využita napájecí větev rozvodu IE pro potřeby dismantlingu.** V případě nutnosti, je provést dopředu přeložky kabeláže a tlakovacího rozvodu (včetně dostatečně dlouhého testu funkčnosti/ovlivnění).

Provoz IE musí být v průběhu prací nepřerušen. Je doporučeno, aby měření i uvnitř vyjímaných FM pokračovalo až do okamžiku zahájení vlastního vyjmutí (zejména tedy v době technické přípravy, injektáží, vrtných prací, …).

4.3.8 Dodatečný monitoring

Současná konstrukce fyzikálních modelů neumožňuje vzorkování podzemních vod v bezprostředním okolí některého z fyzikálních modelů nebo přímo z nich. V rámci doplňujících prací by proto bylo velmi přínosné odvrtat maloprofilový vzorkovací vrt souběžný s FM1 v jeho bezprostřední blízkosti a osadit tento vrt vzorkovacím zařízením (typ vzorkovacího zařízení a technické parametry by byly určeny v závislosti na velikosti průsaku podzemní vody do vrtu) a odebírat vzorky podzemní vody ze vzorkovacího vrtu souběžně s ostatními vzorky a provádět analýzy chemického složení a mikrobiologický monitoring ve stejném rozsahu, jako to bylo v doposud prováděném monitoringu (Svoboda et al., 2021, TZ 537/2021).

Dále by se mělo pokračovat monitorování chemického složení podzemních vod a provádění mikrobiologických analýz i v průběhu a po postupném rozebírání fyzikálních modelů, týká se zejména odběrů sytící vody, vody jímané z lyzimetru u FM1 a sledovaných přítoků v ZK-3S: návrtu pro teploměr č. 16 (MV16) poblíž vrtu FM6 a vrtu S-20 (BK43).

Po vyjmutí jednotlivých FM by měly být provedené mikrobiologické a chemické analýzy v místě vyjmutí modulu (pokud to bude technicky možné). Tyto analýzy jsou velmi důležité zejména pokud se v místě po vyjmutém FM objeví výtoky podzemní vody.

4.4 Vzorový postup FM

Postup rozebírání FM lze principiálně rozdělit do následujících činností:

1. Příprava
    a. Před zahájením prací
    b. Příprava IE
    c. Příprava pracoviště
    d. Příprava laboratoře
    e. Příprava FM
2. Vyjmutí FM
3. Odběry a vzorkování
4. Analýzy
    a. Na místě
    b. V odborných laboratořích
5. Sanace místa
6. Vyhodnocení rozebírání a výsledků analýz

Tyto činnosti jsou shodné pro všechny FM. Liší se pouze svým rozsahem.

Celý postup včetně přípravných a sanačních prací je nutno dokumentovat (viz kapitola 4.3).

Postup je popsán jako best-practise. Při technické realizaci se v závislosti na zvolené technologii a konkrétních podmínkách/stavu FM může ukázat, že ne všechny postupy a podmínky lze dodržet **a bude nutné je přizpůsobit aktuálním podmínkám při rozebírání**.

4.4.1 Příprava před vyjmutím

4.4.1.1 Příprava před zahájením prací

Před zahájením vlastních prací v PVP Bukov je třeba provést přípravu celého procesu. Cílem je navrhnout (aktualizovat) prováděcí postup rozebírání, provést zajištění potřebných prostředků (materiálních i personálních) a zjištění stavu IE před započetím prací.

Jedná se zejména o:

- Vypracování a schválení realizační dokumentace včetně nezbytných povolení, pokud budou třeba
- Zajištění personálního a materiálního zabezpečení (včetně výroby přípravků)
- Zajištění kapacity v laboratořích pro zpracování analýz
- Pasportizace stavu (technická a odborná včetně měření, odběrů, analýz) IE
- Test postupu a navazujících procesů (včetně dopravy do odborných laboratoří)

4.4.1.2 Příprava IE

Před zahájením rozebírání IE je třeba provést přípravu IE. Cílem je zajistit nepřerušený provoz IE (včetně monitoringu) i po dobu jeho rozebírání.

Jedná se zejména o:

- Ochranu MS, ŘS, technologie

- Přeložku kabeláže a rozvodu syticího systému (včetně kabelové lávky)
- Relokaci technologie
- Úpravy MS a ŘS (příprava na odpojení vyjímaných FM)
- Úpravy sytícího systému (příprava na zvláštní režim pro vyjímaný FM)

Je tedy třeba provést takové aktivity, které ochrání infrastrukturu IE a zajistí její provoz. Více viz kapitola 4.3.

4.4.1.3 Příprava pracoviště

Cílem přípravy pracoviště je zajištění bezproblémového provedení technických prací v celém průběhu rozebírání IE.

Jedná se zejména o:

- Zajištění připojení na inženýrské sítě
- Zajištění technické vody
- Zajištění odpadového hospodářství (včetně likvidace výplachové vody)
- Zajištění zázemí pro pracovníky
- Vymezení a příprava prostoru pro jednotlivé aktivity
- Vybudování/instalace manipulačních prostředků
- Vybudování/instalace místa a prostředků pro práci na vyjmutém FM
- Nastavení procesů na pracovišti a navazujících činností (až po analýzy v laboratořích)

V závislosti na zvolené technologie rozebírání bude příprava pracoviště pravděpodobně zahrnovat i stavebně technickou přípravu (např. úpravu čelby nabetonováním pro snadnější zavedení vrtů a uchycení šablony a stroje).

Více viz podmínky v kapitole 4.3.

4.4.1.4 Příprava laboratoře (v místě rozebírání)

Pro vlastní rozebírání vyjmutého FM a zpracování materiálu na místě, ať již pro transport do odborné laboratoře nebo přímo pro provedení analýz na místě, bude třeba v blízkosti IE vybudovat laboratoř. Laboratoř bude zároveň sloužit jako technické zázemí pro odborné pracovníky (např. pro zpracovávání dokumentace).

Laboratoř bude zajišťovat následující činnosti:

- Rozebírání FM (po jeho vyjmutí) a provádění odběrů
- Vzorkování a přípravu vzorků pro transport/analýzy
- Analýzy vzorků

Vzhledem k tomu, že velká část těchto aktivit vyžaduje specifické postupy a podmínky bude nutné větší část laboratoře vybudovat jako „čisté“ pracoviště. Tedy oddělit ji od technických prací (vlastní rozebírání), které mohou vést ke znehodnocení vzorků a analýz z důvodů vedlejších produktů technických činností.

V rámci laboratoře se předpokládá vybudování následujících stanovišť:

- Místo pro vlastní rozebírání FM a provádění odběrů + technické zázemí pro rozebírání (dílna)

- Místo pro provádění vzorkování a přípravu vzorků (ve spolupráci s odbornou laboratoří)
- Místo pro balení odběrů a vzorků (ve spolupráci s odbornou laboratoří)
- Odborné laboratoře (např. geotechnická, mikrobiologická,…) pro analýzy, které je třeba provést zcela či částečně na místě a pro odbornou přípravu vzorků
- Sklad odběrů a vzorků
- Zázemí pro dokumentaci

Více viz podmínky v kapitole 4.3 (např sterilní pracoviště pro mikrobiologii).

U postupů, které vyjímají FM v celku včetně horniny (nebo ocelové trubky), je alternativně možné využít pro větší část odběrů a vzorkování laboratoř na povrchu. V tomto případě laboratoř v místě bude pouze minimální pro nezbytné analýzy z místa rozebírání a jako záložní pro případ problémů při vyjímání, které by znemožnily transport FM. Vlastní rozebírání proběhne v povrchové laboratoři.

4.4.1.5 Příprava FM a horninového masivu

Příprava FM a horninového masivu závisí na zvolené technologii vyjímání.

U technologií, které vyjímají FM bez okolní horniny bude příprava spočívat:

- V odpojení a vyjmutí náplně topidla (pro technologii postupného rozebírání)
- V sejmutí převázky
- V odpojení tlakování a přípravě odpojení instrumentace (instrumentace se však neodpojuje a dále měří)

U technologií, které vyjímají FM včetně okolní horniny je proces přípravy složitější a skládá se z:

- Úpravy tlakování FM (mírný tlak vody uvnitř FM tak, aby se zabránilo kontaminaci výplachem)
- Vrtání pro injektáž a svorníky
- Injektáž masivu a instalace svorníků
- Relokace převázky FM na svorníky
- Přípravy instrumentace FM na odpojení (instrumentace se však neodpojuje a dále měří)

Po celou dobu přípravy pokračuje monitoring chování FM a jeho okolí.

4.4.2 Vlastní vyjmutí a uchování po vyjmutí

Upozornění: V době vyjímání je třeba již mít plně připraveno zázemí, technické a personální zajištění pro odběry/vzorkování. V průběhu vyjímání modulu může dojít k situacím, kdy odběry/vzorkování bude zahájeno již během těchto činností. Některé z technologií vyjímání dokonce předpokládají souběh těchto činností. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM / vlastního FM a jeho částí. Laboratorní zázemí musí umožnit požadované zpracování odběrů na vzorky, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak provedení zkoušek přímo na místě.

Postup vyjmutí závisí na zvolené technologii (viz kapitola 4.2). U technologií, které nevedou k vyjmutí vcelku (nebo dojde k jejich selhání) dochází při vyjímání přímo k procesu odběrů/vzorkování (viz kapitola 4.4.3).

U technologií, které vyjímají pouze náplň FM v celku, bude postup následující:

- Odpojení sycení a instrumentace
- Sejmutí převázky
- Sejmutí pryžového těsnění zhlaví
- Vyjmutí pomocí výpažnice nebo tahem za technické části
- Vzorkování na místě (např. mikrobiologické stěry, pokud budou třeba)
- Stabilizace a zabalení pro transport do laboratoře
- Transport do laboratoře (v místě nebo na povrchu)

U technologií, které vyjímají FM včetně horniny, bude postup následující:

- Vrtné práce (vrty pro lanovou pilu nebo obvrtání) + lanová pila (pokud nebude obvrtáno)
- Odpojení sycení a instrumentace
- Vysunutí bloku s FM z horninového masivu
- Vzorkování na místě (např. mikrobilogické stěry, pokud budou třeba)
- Stabilizace a zabalení pro transport do laboratoře
- Transport do laboratoře (v místě nebo na povrchu)

Upozornění: Prodleva mezi vyjmutím a začátkem rozebírání v laboratoři by měla být minimální. Při pracovních přestávkách je nutno zajistit, aby nedošlo ke změně stavu bloku s FM (vysychání, kontaminace, …).

Pro manipulaci s blokem (a obecně jakýmkoliv odebraným materiálem, který bude dále analyzován) by měly desinfikované nástroje a materiály tak, aby se minimalizovala kontaminace.

Vzhledem k hmotnosti bloku, je pro jeho vyjmutí a následnou manipulaci třeba dopředu připravit technické vybavení (prostředky pro vytažení, manipulátor, manipulační stůl, přepravní obal, …).

U postupů, které vyjímají FM v celku včetně horniny (nebo ocelové trubky), je alternativně možné využít pro větší část odběrů a vzorkování použít laboratoř na povrchu. V tomto případě je třeba blok zabalit a neprodleně provést transport do povrchové laboratoře. Při transportu je třeba zajistit ochranu bloku proti jeho poškození a předejít ovlivnění bloku transportem.

4.4.3 Rozebrání/odběry/vzorkování

Před/při/po vyjmutí bloku s FM či náplně FM dojde ke vzorkování. Tedy k odběru a zpracování vzorků dle vzorkovacího plánu. Tento proces je pevně spjat s vyjmutím a rozebráním FM.

Všechen materiál, který je vyjmut z FM a jeho zájmového okolí (bez ohledu na vzorkovací plán) je dále označován jako **Odběr**. Každý odběr musí být evidován, zabalen, předán k dalšímu zpracování či uložen. V místech odborného zájmu se poloha odběrů primárně řídí polohou vzorků ze vzorkovacího plánu. V ostatních místech se doporučuje provádět pravidelné dělení s ohledem na uchování neporušených oblastí zájmu (např. rozhraní materiálů).

Odběr může být okamžitě, či později zpracován na jeden či více **vzorků**. Zpracování na vzorky je prováděno dle vzorkovacího plánu. Každý ze vzorků musí být evidován včetně návaznosti na příslušný odběr.

Vlastní vzorkování by mělo probíhat v kontrolovaných podmínkách. Pokud to zvolená technologie vyjmutí neumožňuje, hrozí nemožnost provedení vzorkování tak, aby bylo možno provést všechny analýzy (nemožnost řádného odběru vzorků – např. díky kontaminaci).

U metod, kdy je FM rozebírán postupně se provádí vzorkování přímo v prostoru FM. U ostatních metod se doporučuje provést vzorkování v prostoru laboratoře (dočasné či trvalé).

V případě vyjmutí pomocí výpažnice bude před zahájením vzorkování náplně FM nutné buďto FM vytlačit nebo podélně rozstřihnout (pokud nebude použita trubka s volným švem), aby byl přístup k vlastnímu FM.

V případě, že je FM vyjmut včetně okolní horniny vzorkování zahrnuje rozebrání této horniny. Pro rozebrání bude třeba horninu vhodným způsobem rozdělit na části a sejmout, aniž by došlo k porušení náplně FM. Dle rozměrů a stavu horniny půjde pravděpodobně o kombinaci řezání, expanzivního rozpojování (mechanického) a mechanického rozpojování. Doporučuje se sejmout po částech pouze horní „polovinu“ horniny a spodní využít jako kolébku pro náplň během vzorkování.

Po získání přístupu k náplni FM proběhne vzorkování – tedy kontrolované rozebrání FM a odběr materiálu. Poloha odběrů se řídí požadavkem na vzorky ve vzorkovacím plánu. Udávané souřadnice jsou orientační a prioritu má popsaná zájmová oblast. Prioritu při vzorkováním mají odběry určené pro analýzy interakcí, pak geotechnické charakteristiky, a nakonec odběry pro screening. Odběry pro screening je třeba operativně upravit tak, aby byl vždy poblíž odběru pro interakce (lze využít i zbytek materiálu po vzorcích na interakce).

V případě nálezu neočekávaných/zajímavých jevů je třeba provést příslušné vzorkování/analýzy i mimo vzorkovací plán.

Při rozebírání je třeba se řídit specifickými požadavky na provedení odběrů a vzorků tak, jak jsou popsány v kapitole kapitola 4.3.3 a 4.3.4. a v Příloha 1.

Pro úspěšné provedení vzorkování bude třeba připravit technické a laboratorní zázemí. Technické zázemí musí umožnit manipulaci a rozebrání bloku s FM / vlastního FM. Laboratorní zázemí musí umožnit požadované zpracování odběrů na vzorky, stabilizaci vzorků, jejich skladování a přípravu na převoz do odborných laboratoří. U vzorků, kde je nutné zkoušky provést ihned, pak provedení zkoušek přímo na místě.

Minimálními požadavkem na ochranu odběrů/vzorků je zabalení a vakuování do nepropustné folie (i pro vzduch) a organizované uložení v suchu, chladu a temnu. Nejlépe v podmínkách identických s podmínkami v PVP Bukov. Více viz kapitola 4.3.3 a 4.3.4. a Příloha 1, kde jsou popsány specifické postupy pro rozebírání, vzorkování, ochranu a uchování vzorků.

Proces rozebírání musí být připraven a proveden tak, aby se zkrátila doba jeho trvání a nedocházelo k jeho přerušování. Cílem je minimalizovat dobu mezi koncem provozu FM a jeho analýzou. Tedy proces vyjmutí, rozebrání a vzorkování, tak aby tento proces neovlivnil výsledky.

Doporučená strategie/postup rozebírání

Pokud je pro vyjmutí FM zvolena technologie, která ponechává celý FM nebo jeho část v horninovém masivu je třeba postupovat směrem od zhlaví do masivu. Pro rozebírání/vzorkování bude třeba navrhnout, vyrobit a využít přípravky, které umožní dosáhnout až na konec vrtu ve kterém je umístěn FM a provést vzorkování. Vzorkování začne vyjmutím náplně topidla (destruktivní), odpojením sytícího systému a sejmutím těsnění okolo zhlaví. Poté je možno přistoupit k pokusu o vytažení v celku (tahem za zhlaví a instrumentaci) nebo postupnému rozbírání. Při postupném rozebírání je třeba sejmout průchodky instrumentace (uvolnění pohybu trubiček a kabeláže skrz zhlaví), následně je možné zevnitř odříznout topidlo za zhlavím a provést pokus o oddělení zhlaví od betonové zátky. Pokud nepůjde oddělit zhlaví bude nutné jej vytáhnout i s betonovou zátkou, kdy dojde i k vytažení instrumentace a trubiček, což může vést k částečné destrukci náplně. Pokud se zhlaví podaří sejmout je možné postupně rozbít a po částech vyjmout betonovou zátku. Tím bude získán přístup k bentonitu a bude možné bezpečně vyjmout (nebo odříznout) sytící trubičky. Následovat bude postupné odebírání materiálu až na konec FM. Při tomto postupu bude materiál odebírán po vrstvách a bude nutné po částech odstřihávat/odřezávat topidlo a instrumentaci. Tento postup je v příslušné části aplikovatelný i pokud dojde k selhání pokusu o vytažení v celku.

Pokud je pro vyjmutí FM zvolena technologie, která FM nebo jeho část vyjímá ven z horninového masivu, je tuto část nutné umísti na sterilní plochu (plachta, stůl), přemístit je do laboratoře a provést jeho rozebírání. Nechráněnou část a části, na kterých se nepracuje, je vždy třeba zakrýt/zabalit sterilní plachtou a zabránit kontaminaci a vysychání. U těchto technologií se doporučuje začít s rozebíráním/vzorkování částí zadním koncem FM (který byl nejhlouběji v hornině) a pokračovat směrem ke zhlaví nebo částí, která je nejvíce exponovaná vlivem technologie rozebírání (zlom, roztržení, …).

Pro manipulaci a prostorovou stabilizaci vyjmutého je třeba připravit kolébku a/nebo využít horninový masiv/ocelovou trubku. Ty také musí zajistit ochranu vyjmutého FM.

Z mikrobiologického hlediska je důležité zajistit co největší sterilitu materiálů a nástrojů použitých při rozebírání FM. Nástroje by měly být vysterilizovány, voda použitá při rozebírání by měla být ideálně sterilní (či desinfikovaná), nouzově alespoň totožná s vodou, kterou byl experiment po celou dobu sycen. Po vyjmutí FM je potřeba jeho uložení na sterilní plochu, jednotlivé odběry sterilně zabalit a vzorky odebírat ve sterilním prostředí UV boxu. Podrobněji viz podkapitoly 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, a také podkapitola o možných rizicích kontaminace 4.5.

4.4.4 Uchování zbylého vyjmutého materiálu po rozebrání/vzorkování

Ne všechen materiál vyjmutý z FM a jeho zájmového okolí bude dále zpracován pro laboratorní analýzy. Tento materiál musí být vhodně uchován nebo provedena jeho likvidace v souladu se současnou legislativou (některé z materiálů je možné klasifikovat jako nebezpečný opad). Obdobně je třeba likvidovat materiál z analýz.

Pokud bude materiál uchováván pro další analýzy, je třeba postupovat v souladu s požadavky, které jsou kladeny na odběry/vzorky a jejich uchování. Minimálním požadavkem je zabalení a vakuování do nepropustné folie (i pro vzduch) a organizované uložení v suchu, chladu a temnu. Nejlépe v podmínkách identických s podmínkami v PVP Bukov. Doporučuje se provést

uskladnění v číslovaných přepravkách, kde do protokolů odběrů/vzorků bude vyznačeno, ve které přepravce je odběr uložen (viz Obecné zásady).

Většina mikrobiologických analýz vyžaduje náročnější přípravu pro uchování a způsob uchování materiálu před analýzou (např. sterilní odběr, zmrazení a uchování v mrazicím boxu). Tento postup je třeba respektovat, pokud má být materiál v budoucnu pro tyto analýzy využit. Upozornění: I takto uchované vzorky však mají omezenou životnost v závislosti na typu analýzy.

V případě, že bude zvolena některá z redukovaných variant vzorkovacího plánu (viz dále kapitola 5.2 - oranžová, červená), tak se doporučuje přesto provést vlastní odběry a vzorkování v rozšířené variantě (zelená) a vzorky příslušně skladovat jako záložní do doby rozhodnutí, zda neprovést dodatečné analýzy i na těchto vzorcích. Například pro odběry/vzorky určené na mikrobiologii to znamená uchování ve sterilních uzavřených obalech v mrazícím zařízení. Pro dlouhodobé uložení je nezbytné umístění v - 80°C. Vzorky/odběry pro ostatní analýzy však také mohou vyžadovat zvláštní přístup (například uchování ve vysušeném stavu, bez přístupu vzduchu, zalité v pryskyřici apod.) tak, aby byl zachován jejich stav v době odběru a nedocházelo k jejich degradaci či změnám interakčních procesů.

4.4.5 Sanace místa

Pokud bude zvolen postup rozebírání s vyjmutím bloku horniny, je nutné provést statické posouzení, zda nedojde k porušení stability výrubu. Pokud výsledek posouzení bude indikovat požadavek na sanaci (zaplnění) místa, je třeba pro zaplnění použít takový materiál, který minimálně ovlivní geochemický/hydrogeologické poměry v prostoru IE. Je doporučeno použití low pH betonu nebo jiného inertního materiálu.

V případě, že prostory po FM nebude třeba zaplňovat, je doporučeno je využít pro dodatečný monitoring (viz kapitola 4.3.8).

4.4.6 Časová a finanční náročnost

V Tab. 5 je uvedena časové a finanční náročnost rozbírání pro FM s topidlem a bez topidla.

Časovou a finanční náročnost rozebírání je možno rozdělit do dvou částí:

- Práce před zahájením rozebírání
- Vlastní rozebírání v PVP Bukov.

Příprava před zahájením prací se předpokládá minimálně 6 měsíců v závislosti na zvolené technologii a variantě rozebírání. Během této doby bude nutné vypracovat prováděcí dokumentaci, zajistit jejích schválení, zajistit výrobu přípravků (na základě dokumentace), zajistit personální a materiální zajištění, provést případně test technologie a postupů, …

Harmonogram rozebírání přímo v PVP je pak determinován:

- Časovou náročností vyjmutí FM
- Časovou náročností rozebráním vyjmutého FM a vzorkováním
- Časovou náročností nutného zpracování vzorků na místě po vzorkování
- Prostorovými potřebami pro manipulaci při vyjmutí
- Prostorovými potřebami pro manipulaci při rozebrání a vzorkování

- Prostorovými potřebami pro nutné laboratorní zpracování na místě
- Vyloučením souběhu některých činností z důvodu vzájemného ovlivnění (např. nebezpečí znečištění/kontaminace) a/nebo nedostatku prostoru

Vzhledem k současné inflaci a nejistotám postupu rozebírání nelze stanovit exaktně ceny a dobu trvání prací. Ceny a časy uvedené v Tab. 5 jsou proto pouze kvalifikovanými odhady. Celkové ceny a časová náročnost jsou uvedeny zvlášť pro práce před zahájením rozebírání a práce v PVP Bukov.

Tab. 5 Odhad časové a finanční náročnosti

Aktivita	**Časová náročnost**		**Finanční náročnost**	
	FM bez topidla	**FM s topidlem**	**FM bez topidla**	**FM s topidlem**
Příprava před zahájením prací	min. 6 měsíců		750 000	
Příprava pracoviště	2-4 týdny		450 000	
Příprava laboratoře	2-4 týdny		300 000	
Injektáže	1-2 týdny	2 týdny	100 000	150 000
Vrtné práce a řezání lanovou pilou	1-3 týdny	2-4 týdny	225 000	350 000
Vyjmutí a přesun do laboratoře	1 týden	1 týden	100 000	150 000
Vlastní rozebrání FM a vzorkování	2-4 týdny	4-6 týdnů	750 000	1 200 000
Sanace místa	?	2 týdny	?	200 000
Celkem včetně sanace	min. 6 měsíců + 7-14 týdnů	min. 6 měsíců + 13-19 týdnů	750 000 + 1 600 000	750 000 + 2 600 000

4.5 Rizika

Rozebírání IE je technologicky, časově a odborně náročný proces. V průběhu rozebírání mohou nastat situace, které mohou zapříčinit nedosažení požadovaného cíle rozbírání. V následující tabulce (Tab. 6) je přehled vytipovaných rizik a doporučených opatření pro jejich mitigaci.

Tab. 6 Potenciální vybraná rizika při rozebírání IE

Popis rizika	Následky	Doporučená opatření
Kontaminace z použité technické vody	• Kontaminace odběrů a vzorků z FM při vyjímání a rozebírání z použité nesterilní vody • Ovlivnění výsledků analýz	• Použití vody sytící experiment v jeho průběhu/destilované vody • Mikrobiální charakterizace použité vody • Použití stopovacích látek
Materiálová kontaminace vzorků při odběrech a vzorkování (zejména rozhraní)	• Ovlivnění výsledků geochemických a mineralogických analýz	• Používání čistých nástrojů • Důsledné dodržování vzorkovacího plánu • Důsledná dokumentace
Mikrobiální kontaminace vzorků při řezání/ vyjímání/rozebírání modulu	• Možná kontaminace odběrů a vzorků z prostředí při rozebírání FM • Ovlivnění výsledků mikrobiologických analýz	• Rozdělení FM na co nejméně částí před jeho převezením do nadzemní sterilní laboratoře • Zajištění co nejsterilnějších podmínek při rozebírání modulu • Vzorkování z odběrů ve sterilním UV boxu • Pečlivost při řezání/ vyjímání/rozebírání modulu
Nedostatečná dokumentace	• Nemožnost dohledání původu materiálu • Nemožnost zjištění historie materiálu • Nemožnost zjištění vlivu rozebírání	• Postupy pro dokumentaci • Archivace primárních dat • Zálohovaná databáze dismantlingu
Nedostatečné převrtání/uhnutí vrtu	• Celý obvod kolem FM není převrtán • Nemožnost vytažení FM	• Dostatečný překryv vrtů
Pohyb horninového masivu	• Zvětšení/rozevření puklinového systémy • Porušení stability výrubu/kolaps	• Zaplnění prostoru po vyjmutém FM vhodným materiálem

Porušení stability výrubu	• Vypadnutí bloku horniny • Porušení stability zkušební komory	• Ověření stability výpočtem • Opatření pro zajištění stability
Prasknutí bloku s FM během vrtných prací/řezání lanovou pilou *(a/nebo)* Vodivá puklina v masivu	• Kontaminace výplachovou vodou. • Rozplavení náplně FM	• Zpevnění/utěsnění bloku pomocí injektáže a svorníků • Udržovat mírný sytící tlak uvnitř FM • Používat k výplachu vodu shodnou se sytící • Zvážit přidání stopovače do výplachové vody (identifikace kontaminace v FM)
Průnik injektáže do FM	• Mechanické poškození FM • Kontaminace FM injektáží	• Kvalitní návrh injektáže • Udržování tlaku sytícího média uvnitř FM v době injektáží
Ulomení FM v nesprávném místě	• Část FM nebude vyjmuta • Poškození vyjmuté části	• Dostatečná hloubka vrtů • Zpevnění okolí FM pomocí injektáže a svorníků
Vyjmutí pouze části FM (selhání vyjmutí)	• Pouze část FM dostupná pro analýzy	• Volba technologie s minimálním rizikem • Test technologie před pracemi na IE
Výluh ze sanace místa	• Ovlivnění zbývajících FM	• Zaplnění prostoru po vyjmutém FM vhodným materiálem
Změna podmínek uvnitř FM po jeho vyjmutí před převozem do laboratoře	• Změna vlastností materiálů (např. vysychání bentonitu) a ovlivnění výsledků analýz	• Zabalení do vhodného pouzdra či folie, překrytí vlhou textilií • Minimalizace časové prodlevy mezi vyjmutím FM a jeho rozebráním • Minimalizace času potřebného na rozebírání

Změna podmínek uvnitř FM při jeho rozebírání v laboratoři	• Změna vlastností materiálů (např. vysychání bentonitu) a ovlivnění výsledků analýz	• Zabalení folie, překrytí vlhou textilií • Minimalizace časové prodlevy mezi operacemi při rozebírání FM

5 Analýza interakcí

Aby byly naplněny cíle rozebrání IE (viz kapitola 3), je třeba provést řadu analýz na odebraných vzorcích. V této kapitole jsou nejprve stručně popsány analytické metody použité pro analýzy (kapitola 5.1) a dále je pak představen vzorkovací plán (kapitola 5.2).

Vzorkovací plán představuje zájmová místa uvnitř FM, kde je třeba provést vzorkování (odběry/vzorky) a na nich analýzy. Vlastní poloha vzorků/odběrů je pak uvedena v Příloze 1. Poloha vzorků je orientační a musí být v proběhu rozebírání operativně upravena tak, aby byla zastižena popsaná zájmová oblast.

Důležitou součástí vzorkovacího plánu jsou požadavky na odběry/vzorky, které musí být naplněny, aby mohlo být dosaženo odborných cílů.

5.1 Popis analýz

5.1.1 Geochemie

Výluhy cementových materiálů a bentonitu (LUH)

Pro získání výluhů a jeho následnou charakterizaci je používáno nenáročné experimentální uspořádání vsádkového testu. Ke kontaktu vodné a pevné fáze dochází ve vhodné uzavřené nádobě po předem určenou dobu. Do nádoby je naváženo požadované množství pevného vzorku, většinou ve formě namletého prášku kvůli rychlejšímu dosažení rovnováhy. Poté je přidáno určité množství extrakční kapalné fáze podle požadovaného poměru kapalné a pevné fáze (L/S). Během loužení je zajištěno míchání směsi. Po ukončení experimentu jsou pevná a kapalná fáze odděleny (centrifugací, filtrací) a ve výluzích se sleduje pH, vodivost a změny koncentrací jednotlivých složek. Díky této jednoduchosti je možné vsádkové testy snadno multiplikovat a provádět tak řadu stanovení vedle sebe v relativně krátkých časových intervalech. Vsádkové (statické) experimenty lze použít ke stanovení maximální koncentrace jednotlivých iontů ve výluhu při dosažení rovnováhy za daných experimentálních podmínek (Večerník et al., 2016). Pro stanovení obsahu majoritních složek (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, chloridů, síranů, uhličitanů, křemičitanů, dusičnanů) a minoritních složek (jako jsou např. Sr, Mn, fluoridy, fosforečnany atd.) ve vodných fázích je možno použít atomovou absorpční spektrometrii, iontovou kapalinovou chromatografii, hmotnostní spektrometrii či další obecné či specifické analytické techniky (např. stanovení organického uhlíku).

Fyzikálně chemické parametry vod a výluhů

Stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků patří mezi základní a jednoduchá laboratorní měření. Sledovanými parametry jsou hodnoty pH, oxidačně-redukčního potenciálu, vodivosti a množství rozpuštěného kyslíku. Pro tyto parametry jsou používány stolní či přenosná zařízení s měřicími elektrodami specifickými pro danou veličinu. Dle návodů výrobce a pracovního postupu laboratoře jsou čidla kalibrována a prováděna měření sledovaných veličin.

Stanovení pH výluhu cementových materiálů

Hodnoty pH výluhů obecných cementových materiálů se nejčastěji pohybují v rozmezí 12 až 13, proto je nutno provádět měření elektrodou vhodnou pro tyto oblast pH a kalibrovanou

odpovídajícími pufry. Pracovní postup popsaný ve zprávě SÚRAO 42/2016 (Večerník et al., 2016) byl převzat a upraven z reportu SKB R-12-02 (Alonso et al., 2012). Vzorek cementové směsi je nejprve nadrcen na prášek. Příprava práškového vzorku může být provedena v třecí misce nebo v mechanickém kulovém mlýně. Příprava práškového vzorku by měla trvat co nejkratší možnou dobu, aby bylo zabráněno interakci cementové směsi se vzdušným CO_2. Vyluhování nadrceného vzorku je prováděno do odplyněné destilované vody. Připravuje se převařením destilované vody po dobu 30 minut a poté je ochlazována na laboratorní teplotu, přičemž je probublávána dusíkem, aby bylo zamezeno rozpouštění vzdušného CO_2 do takto odvzdušněné vody. Nadrcený práškový vzorek je smíšen s odplyněnou destilovanou vodou v poměru 1:1 a vzniklá suspenze je 5 minut promíchávána pro ustanovení rovnováhy. Míchání suspenze probíhá pod atmosférou N_2. Poté je měřeno pH suspenze. Pro stanovení pH je nutno zvolit elektrodu s vhodným měřícím rozsahem (elektrodou pro alkalickou oblast) a kalibrační pufry pro alkalickou oblast. Měření pH je opět prováděno pod atmosférou N_2. Další měření pH probíhá pomocí elektrody ve filtrátu, měření je také prováděno pod atmosférou N_2. Filtrát je připraven filtrací suspenze přes 45 μm filtr.

Prvkové složení bentonitu a cementových materiálů (CC_SILA a XRF)

Chemické (prvkové) složení materiálů pevných fází je možno stanovit několika způsoby, např. pomocí silikátové analýzy nebo rentgenové fluorescence. Silikátová analýza je založena na kyselém rozkladu vzorku za použití HF, HNO_3, H_2SO_4 a následných analýzách specifickými analytickými technikami pro stanovení obsahů jednotlivých prvků (atomová absorpční spektrometrie, spektrofotometrie, titrace, infračervená spektrometrie, gravimetrie (Vašíček et al., 2022). Silikátová analýza je optimální pro stanovení makroprvků (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, S, P, Si) včetně lehkých prvků (C). Nevýhodou je úprava vzorku specifická pro každý prvek samostatně. Velké množství jednotlivých kroků úpravy vzorku a množství vedlejších látek používaných k úpravě ovlivňují přesnost metody.

Rentgenová fluorescence je spektroskopická metoda využívající rentgenové záření pro nedestruktivní analýzu materiálů s cílem stanovit jejich prvkové složení. Vzorky nevyžadují žádnou specifickou nebo jen velice malou přípravu před měřením a jsou zpracovávány a měřeny ve specializovaných laboratořích (Vašíček et al., 2022).

Obsahu organického uhlíku v pevných fázích (CC_C)

Obsah celkového organického uhlíku (TOC) se stanovuje z rozdílu obsahu celkového a anorganického (minerálního) uhlíku. Existují i metodiky přímého stanovení TOC, nejčastěji jsou založeny na destruktivním odstranění organické hmoty (chemické oxidační rozklady nebo tepelné rozklady), např. TOC byl stanoven z množství CO_2 uvolněného spalováním vzorku do teplot přibližně 500 °C na spalovacích analyzátorech. Znalost obsahu forem uhlíku, zejména organického, je důležitá z pohledu koroze UOS v HÚ, neboť sloučeniny organického uhlíku mohou sloužit jako živiny pro mikrobiálně indukovanou korozi (Vašíček et al., 2022).

Termogravimetrická analýza (TA)

Termická analýza je souborem metod, při nichž se měří fyzikální nebo chemické vlastnosti pevných látek jako funkce teploty a popř. času. Základní metoda termické analýzy je termogravimetrie, zaznamenávající změnu hmotnosti studovaného vzorku při zahřívání až do 1000 °C. Termická analýza se běžně sdružuje s analytickými technikami, které analyzují složení plynů uvolněných při tepelném rozkladu. Ve spojení s hmotnostní spektrometrií lze zaznamenat celé spektrum plynných produktů. Přiřazení píku přesnému procesu či složce ve

vzorku, ani kvantifikace jednotlivých složek však termická analýza obecně neposkytuje (Vašíček et al., 2022).

Kationtově výměnná kapacita bentonitu (CEC_Cu)

Kationtová výměnná kapacita (CEC) je parametr odrážející schopnost vzorku vyměňovat si kationty při kontaktu s okolním roztokem. Metodika stanovení CEC spočívá v kontaktování pevné fáze o známé hmotnosti s kapalnou fází o známém objemu obsahující tzv. indexový kationt o definované počáteční koncentraci. Po zvolené době interakce se stanoví koncentrace indexového kationtu v roztoku. Dostupné metodiky stanovení CEC se liší v druhu a koncentraci používaného indexového kationtu a počtu interakčních kroků. Kationt je volen tak, aby měl selektivní reakci v mezivrství montmorillonitu. Toho se docílí buď volbou extrémně selektivního kationtu (např. organokovové komplexy Ag^{+}, Cu^{2+}, Ni^{2+} či Co^{3+} atd.) nebo použitím vysoké koncentrace kationtu (H^{+}, Cs^{+}, NH_4^{+}, Ba^{2+} atd.; větší náboj indexového kationtu je pro účinnou kationtovou výměnu příznivější). Použití typu činidla předurčuje, zda lze stanovením získat i zastoupení vyměnitelných kationtů, v zasolených roztocích obecně nelze stanovit nízké koncentrace vytěsněných kationtů (Vašíček et al., 2022).

5.1.2 Geotechnika

Pro charakterizaci obsahu FM se předpokládá využití následujících metodik:

- Stanovení hmotnostní vlhkosti (W_105 C)
- Stanovení objemové hmotnosti nepravidelného vzorku (D_irr)
- Stanovení propustnosti (PROP)
- Stanovení bobtnacího tlaku – zkouška bobtnání při konstantním objemu (SWEP_CVT)
- Stanovení meze tekutosti kuželovou metodou (WL_cone)
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti (THC)
- Stanovení měrné tepelné kapacity (HEC)

tak, jak jsou popsány ve výstup metodiky DÚ č. 1 (TZ 590/2022).

První dvě metody budou primárně použity pro charakterizaci stavu bentonitu uvnitř FM.

Rozložení vlhkosti bude stanoveno pomocí metody „Stanovení hmotnostní vlhkosti“ (W_105 C), která spočívá ve vážení vzorku ihned po odběru a jeho následném vysušení. Z rozdílu hmotností je pak možno stanovit vlhkost materiálu.

Pro stanovení rozložení () objemové hmotnosti bude využita metoda „Stanovení objemové hmotnosti nepravidelného vzorku“ (D_irr), která spočívá ve vážení materiálu na vzduchu a pod hladinou kapaliny (vážení nadlehčeného vzorku). Na těchto vážení je možné stanovit objem vzorku a objemovou hmotnost.

Zbylé metody budou využit pro zjištění potenciální změny geotechnických a termofyzikálních charakteristik.

Metoda „Stanovení propustnosti“ (PROP) umožňuje stanovit součinitel hydraulické vodivosti, který charakterizuje, jakým způsobem (jak rychle v závislosti na gradientu tlaku) bude voda proudit skrz materiál. Zkouška spočívá v měření průtoku vody skrz materiál při definovaném hydraulickém spádu.

Metoda „Stanovení bobtnacího tlaku – zkouška bobtnání při konstantním objemu“ (SWEP_CVT) umožňuje stanovit velikost bobtnacího tlaku materiálu. Tedy jaký tlak je schopen materiál schopen vyvinout při nasycení vodu a nulové deformaci. Zkouška spočívá v měření totálního napětí na saturovaném vzorku v komoře s konstantním objemem.

Metoda „Stanovení meze tekutosti kuželovou metodou“ (WL_cone) umožňuje stanovit vlhkost materiálu, při němž přechází z plastického stavu do stavu tekutého. Zároveň jde o jeden z krajních bodů pro stanovení rozsahu vlhkosti, v níž je materiál plastický. Metoda spočívá v měření penetrace padajícího kužele do materiálu o různé vlhkosti. V okamžiku, kde se kužel zaboří do definované hloubky, je materiál na mezi tekutosti.

Pro zjištění, jak materiál vede a skladuje teplo budou použit termofyzikální metody. Metoda „Stanovení součinitele tepelné vodivosti“ (THC) bude využita pro stanovení součinitele λ, který popisuje, jak rychle materiál vede teplo. Metoda „Stanovení měrné tepelné kapacity“ (HEC) bude využita pro zjištění měrné tepelné kapacity, tedy množství tepla, které materiál přijme/uvolní při ohřátí/ochlazení. Obě metody jsou založeny na nestacionární metodě, kdy se sleduje odezva materiálu na tepelný pulz.

5.1.3 Koroze

Při odběrech bude pozornost zaměřena i na přítomnost korozních produktů. Pokud bude vizuálně zjištěna přítomnost korozních produktů na rozhraních s kovovými prvky FM (zhlaví, topidlo, čidla, …) budou odebrány vzorky pro analýzy pomocí metody rentgenové difrakce a Ramanovy analýzy pomocí infračervení spektrometrie na disperzním Ramanově spektrometru. Další analýzy je možno provést pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a prvkové analýzy.

5.1.4 Mikrobiologie

Mikrobiologické analýzy vhodné pro zhodnocení IE v PVP Bukov zahrnují jak detekci a kvantifikaci mikroorganismů (kvantitativní PCR, kultivace), tak analýzu kvalitativního složení mikrobiálních společenstev (amplikonové sekvenování 16S rRNA). Genetické metody založené na analýze DNA dokáží detekovat veškerou mikrobiální biomasu včetně metabolicky neaktivních buněk či dokonce mrtvých buněk. Vhodným doplňkem genetických analýz jsou proto kultivační přístupy, které dokáží detekovat a kvantifikovat pouze kultivovatelné (a tedy životaschopné) bakterie. Ani kultivační metody však nerozliší mezi metabolickým stavem mikroorganismů ve vzorku v čase odběru a při kultivacích může dojít k namnožení jak metabolicky aktivních buněk, tak např. neaktivních spor. Pro cílenou detekci přítomnosti metabolicky aktivních buněk je tedy vhodné tyto metody doplnit také o stanovení obsahu metabolických produktů, jako je ATP či např. acetát. Řada z metod popsaných níže je podrobně popsána v přehledu metodik v rámci DÚ č.1 (TZ 590/2022).

Izolace DNA ze vzorků (MB1-EKK, MB1-Ech, MB1-EKW) je krokem předcházejícím kvantitativní PCR (qPCR) a amplikonové (NGS) sekvenování. Izolace DNA může probíhat za použití komerčních kitů či pomocí fenol-chloroformové extrakce. V případě bentonitu je vhodné nejprve vzorek třeba za sterilních podmínek homogenizovat – rozpustit za mírného protřepávání ve sterilní vodě nebo ve fosfátovém pufru. Z rozpuštěného vzorku je následně izolována DNA. Izolace DNA z bentonitu je obecně komplikovaná, neboť bentonit na svém povrchu váže velmi dobře DNA pomocí elektrostatických sil, což značně snižuje výtěžek DNA

ze vzorku (Engel et al., 2019). Extrahovaná DNA ze vzorků je následně použita v analýzách qPCR a NGS sekvenování. Pro izolaci DNA z bentonitu, betonu a horniny je potřeba vzorek alespoň 5 g materiálu, který je ihned po odebrání uzavřen ve sterilním sáčku a zamrazen v tekutém dusíku. Stejně tak stěrové tyčinky a vzorky geotextilie je potřeba uzavřít a zamrazit stejným způsobem. U vzorků vod je potřeba odebrat alespoň půl litru tekutiny, filtry z odběrů vod je potřeba uložit do sterilního sáčku a zamrazit v tekutém dusíku.

Relativní kvantifikace (qPCR, MB2-qPCR) je metoda, která kvantifikuje sledovaný úsek DNA a přináší tak informaci o množství kopií sledovaného genu ve studovaném vzorku. Množství kopií jednotlivých genů se u různých mikroorganismů liší, nicméně i přesto je tuto metodu možné použít pro odhad mikrobiální početnosti ve studovaném vzorku. qPCR reakce je založena na přidávání fluorescenčních látek do vzorku, které se váží na amplifikované úseky DNA. Z nárůstu fluorescenčního signálu lze poté kvantifikovat relativní zastoupení daného organismu pomocí tzv. hodnot Cq (počet cyklů PCR nutných k dosažení hraničního fluorescenčního signálu na detektoru). Absolutní kvantifikace je v případě environmentálních vzorků obsahujících celou řadu různých druhů mikroorganismů poněkud problematická vzhledem k obtížnosti získání relevantního standartu (Dhanasekaran et al., 2010), se kterými se hodnoty Cq daného vzorku porovnávají. Kvalita analýz qPCR se navíc odvíjí od kvality vyizolované DNA.

NGS amplikonové sekvenování (NGS, MB3-NGS) taktéž pracuje s vyizolovanou DNA, ovšem přináší informace o kvalitativním složení mikroorganismů ve vzorku. Tato metoda využívá variabilitu v sekvenci genu kódující malou ribozomální podjednotku (16S rRNA), která umožňuje rozlišení jednotlivých taxonomických úrovní bakterií. Pomocí primerů, které jsou specifické pro malý úsek genu v rámci 16S rRNA, dojde k namnožení těchto úseků a metodou NGS je následně přečtena přesná sekvence bází těchto amplifikovaných úseků. Přečtené sekvence bází jsou poté porovnány s veřejně dostupnou databází a je k nim přiřazena příslušná linie mikroorganismu na různé taxonomické úrovni (druh, rod, či vyšší). Kvalita těchto analýz závisí stejně jako u qPCR na kvalitě vyizolované DNA.

Kultivační přístupy (MB2-K) vhodně doplňují qPCR a NGS analýzy, neboť na rozdíl od genetických metod cílí na detekci a kvantifikaci kultivovatelných (a tedy životaschopných bakterií). Kultivace využívají tekuté či pevné živné půdy pro nárůst kolonií jednotlivých mikroorganismů a pomocí nich lze tedy zjistit početnost a životaschopnost bakterií ve vzorku. I když je obecně kultivovatelnost bakterií z environmentálních vzorků malá (ve vzorcích hlubinných vod a bentonitů jen okolo 5 % (Haveman and Pedersen, 2002; Stroes-Gascoyne et al., 2002; Eydal and Pedersen, 2007; Hallbeck and Pedersen, 2012), jedná se o cenné doplnění k analýzám qPCR a NGS. Vzorky na kultivaci bakterií je nutné ihned po odběru sterilně uložit do uzavíratelného sáčku, uložit v chladu (4°C) a co nejrychleji převézt do laboratoře ke zpracování. Délky kultivací se mohou lišit od 5-7 dnů v případě aerobních heterotrofů až po 5-6 týdnů v případě obligátně anaerobních SRB a je pro ně zapotřebí pouze 5 g gramů materiálu.

Stanovení obsahů metabolických produktů (MB4-DPM-ACE), jako je např. acetát, je další velmi vhodnou doplňkovou analýzou ke kultivačním a genetickým analýzám v IE experimentu, neboť může sloužit k detekci přítomnosti metabolicky aktivních mikroorganismů. Acetát je jedním z důležitých meziproduktů metabolismu uhlíku produkovaných během anaerobní degradace organické hmoty a fermentace (Ozuolmez et al., 2015; Zhuang et al., 2019; Pan et al., 2021). Měření koncentrace acetátu může být prováděno enzymaticky či pomocí iontové

chromatografie z vodného výluhu bentonitu (King, 1991; Bengtsson et al., 2017). Pro každé stanovení je zapotřebí několik gramů bentonitu. Stanovení obsahu acetátu již bylo úspěšně provedeno ve studii Černá et al. (2019).

5.1.5 Mineralogie

Rentgenová difrakce (PXRD)

Mineralogická analýza je prováděna metodou rentgenové difrakce (XRD) na práškových materiálech. Vzorky mohou být měřeny v původním stavu (vzorek „as received“). K části vzorku může být přidán vnitřní standard (ZnO). Ze vzorku (bentonitového) materiálu může být také připraven orientovaný a glykolovaný preparát. Získané záznamy získané měřením na práškovém difraktometru jsou zpracovány v softwaru pro vyhodnocení XRD dat s použitím databází. Semikvantitativní složení je stanoveno z analýzy preparátu obsahujícího vnitřní standard. Metoda XRD umožňuje analýzu fázového (mineralogického) složení a strukturní analýzu. Limit detekce metody je závislý na charakteru (krystalinitě) analyzované fáze. V případě bentonitu je metoda citlivá na vlhkost vstupního vzorku, která může zkreslit celkové vyhodnocení (Vašíček et al., 2022).

5.1.6 Fyzikální vlastnosti

Rtuťová porozimetrie (PORO_Hg)

Pro vzorky cementových materiálů je možno pro stanovení porozity použít rtuťovou porozimetrii i gravimetrickou metodu stanovení porozity. Stanovení porozity cementových materiálů je vhodné zejména pro sledování jejich degradace/interakce s okolím, při porovnání materiálu z rozhraní a z vnitřní části tělesa z cementového materiálu. Rtuťová porozimetrie je běžnou, relativně rychlou a jednoduchou technikou umožňující stanovení porozity i distribuce velikosti pórů pevných vzorků. Do vysušených vzorků je pod tlakem vtlačována rtuť a ta vniká do otevřených pórů vzorku. Objem rtuti vtlačený do vzorku je zaznamenán a je obecně interpretován jako celkový objem pórů. Ze vztahu mezi aktuálně aplikovaným tlakem a příslušným vtlačeným objemem rtuti lze dovodit distribuci velikosti pórů. Rtuťová porozimetrie umožňuje použití vzorků o rozměrech v řádech milimetrů, např. testovací tělísko o max rozměru 8×8×15 mm (Vašíček et al., 2022; Večerník et al., 2016).

Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda stanovení porozity pomocí nasycení kapalinou je založena na zjišťování poměrů mezi hmotnostmi vysušených a nasycených vzorků. Tato metoda umožňuje použít tělesa o větších (centimetrových) rozměrech než metoda rtuťová. Postup lze popsat pomocí následujících kroků: Zjištění hmotnosti suchého vzorku; Nasycení vzorku kapalinou pod vakuem; Zjištění hmotnosti vzorku nadlehčovaného v kapalině; Zjištění hmotnosti nasyceného, na povrchu suchého vzorku; Zjištění objemu vzorku na základě Archimédova zákona. Za zaznamenaných hmotností je pak možno vypočítat hodnotu porozity vzorku. Pro vysoké hodnoty porozity již není metoda nasycením vodou příliš vhodná, přesto je možno ji, s uvědoměním si limitů a omezení, pro stanovení porozity využít (Večerník et al., 2016).

Porozita nasyceného bentonitu

Pro vzorky bentonitu je možno stanovit porozitu na kompaktovaném a plně nasyceném materiálu. Princip stanovení spočívá ve zjištění objemu pórové vody ve známém objemu nasyceného kompaktovaného bentonitu. Objem pórové vody se stanoví z rozdílu vlhkého vzorku a vysušeného do konstantní hmotnosti (při 105 °C) a uvažováním hustoty vody. Tento postup je omezen nutností mít vzorek o známém objemu.

Specifický povrch cementových materiálů (SSA_N2)

Pro stanovení specifického měrného povrchu a případně distribuce velikosti pórů je běžnou technikou umožňující stanovení těchto parametrů adsorpce dusíku nebo i jiných plynů jako např. argon, krypton nebo oxid uhličitý (často označovaná jako BET metoda). Vzorky se nejprve odplyní ve vakuu, zváží a ochladí externím kapalným dusíkem. Kapalný dusík slouží pro udržování stálé teploty vzorku během měření. Postup spočívá v zaznamenání ustáleného adsorbovaného množství molekul dusíku jako funkci tlaku plynného dusíku při konstantní teplotě při postupném zvyšování tlaku, tzv. adsopční izotermy, a následné desorpční izotermy při snižování tlaku zpět na vakuum (Vašíček et al., 2022).

Specifický povrch bentonitu (SSA_N2 a SSA_EGME)

Specifický povrch bentonitu je možno stanovit technikou BET (viz výše) a také pomocí adsorpce par organické látky, tzv. metodou EGME. Ethylenglykol-monomethylether (EGME) je polární kapalina schopná vstoupit i do mezivrství montmorillonitu, a to ve formě monovrstvy molekul. Práškové vzorky se ekvilibrují v exsikátoru se solvátem $CaCl_2$-EGME. Přebytek EGME se odstraňuje evakuací. Povrch vzorku je pokryt monovrstvou molekul EGME, když je dosaženo rovnováhy mezi parami EGME a EGME adsorbovaným na vzorku. Ze změn hmotnosti vzorku se určuje množství adsorbovaného EGME. Výpočet hodnoty specifického povrchu vychází z předpokladu, že 1 m^2 monomolekulární vrstvy ethylenglykol-monomethyletheru váží 0,286 mg (Vašíček et al., 2022).

Retenční křivky bentonitu

Retenční křivky popisují závislost sacího tlaku na hmotnostní vlhkosti. Pro stanovení retenčních křivek se používají dvě metodiky lišící se v přístupu nastavení různé relativní vlhkosti: bloková metoda (založená na přípravě vzorků o různé hmotnostní vlhkosti) a komorová metoda (založená na udržení různé relativní vlhkosti prostředí).

Bloková metoda spočívá v měření relativní vlhkosti v cele, do které je nalisován vzorek bentonitu o známé, předem stanovené suché objemové hmotnosti a hmotnostní vlhkosti. Ve vzorku je poté sondou měřena relativní vlhkost. Po ustálení odečítané hodnoty relativní vlhkosti se vypočte hodnota sacího tlaku. Retenční křivka pro danou suchou objemovou hmotnost je poté vynesena jako závislost sacích tlaků na hmotnostních vlhkostech jednotlivých vzorků s touto suchou objemovou hmotností. Bloková metoda je vhodná z důvodů její časové nenáročnosti. Nevýhodou je nemožnost postihnutí hystereze retenční křivky, protože každý bod křivky je reprezentován samostatně připraveným vzorkem bentonitu.

Komorová metoda (WRC_K) spočívá ve stanovení hmotnostní vlhkosti vzorků bentonitu o dané suché objemové hmotnosti, které jsou v rovnováze se známou relativní vlhkostí. Relativní vlhkost je udržována pomocí tenze vodních par nad nasyceným (přesyceným) vodním roztokem uvnitř uzavřené nádoby (exsikátoru). Jednotlivé cely se vzorky jsou průběžně váženy, po ustálení jejich hmotnosti (tj. dosažení rovnováhy) je dopočtena hmotnostní vlhkost vzorků. Relativní vlhkost v nádobě se následně změní použitím jiného

nasyceného roztoku a celý proces se opakuje. Tím se získá tzv. sytící větev retenční křivky. Tzv. vysoušecí větev lze získat obdobně postupným sušením v exsikátoru s krokovou výměnou sušidla. Retenční křivka každého vzorku je poté vynesena jako závislost sacích tlaků na hmotnostních vlhkostech. Výhodou komorové metody je možnost postihnutí hystereze retenční křivky každého vzorku. Nevýhodou je časová náročnost, protože je vždy nutné čekat na ustálení hmotnosti cel se vzorky, respektive relativní vlhkosti uvnitř vzorku (Vašíček et al., 2022).

Mikrostruktura – skenovací elektronové mikroskopie (SEM)

Základní charakteristiku (mikro)struktury materiálů v submilimetrovém měřítku je možno pozorovat i pomocí běžné optické mikroskopie na standardních optických mikroskopech s dostatečným zvětšením. Pro analýzu mikrostrukturních vlastností v řádu jednotek μm je vhodná metoda skenovací elektronové mikroskopie (SEM). V kombinaci s metodou energiově-disperzní spektrometrie (EDX) umožňuje analýzu chemického složení jednotlivých fází. Speciální význam má ve smyslu charakterizace přechodových zón a rozhraní mezi bentonitem a jinými fázemi (např. beton, hornina), které nelze analyzovat odděleně. Měřené vzorky vyžadují specifický přístup a přípravu (vysušení, pokovení a práce ve vakuu). Limitujícími faktory metody jsou příprava vhodných preparátů, rozměry analyzovaných fází menší, než je rozlišovací schopnost metody a kvantitativní a statistické vyhodnocení mikrostrukturních dat (Vašíček et al., 2022).

5.2 Vzorkovací plán pro FM

5.2.1 FM1-5

Pro „velké“ fyzikální modely, které jsou vyhřívány vnitřním topidlem bylo vytipováno až 14 zájmových oblastí, u kterých by bylo záhodno studovat vlastnosti materiálů po vzájemné interakci a kontaktu se sytící vodou a za vlivu tepla. Kombinace materiálů ve fyzikálních modelech je popsána v Tab. 2. Počet zájmových oblastí se liší dle navrhovaných variant dismantlingu (zelená, oranžová a červená) i dle použitých materiálových výplní ve FM. Největší rozsah a variabilita kombinací materiálů je u FM3, FM4 a FM5, u nichž jsou kombinovány bentonitové pelety a tvárnice a cementový materiál. Pro tyto modely jsou ve variantě odběrů plného rozsahu (zelené variantě) navrhovány odběry ze všech 14 zájmových oblastí (schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 25):

V1 – ocelová deska/těsnění/beton

V2 – betonový blok

V3 – rozhraní betonový blok-bentonit (tvárnice)

V4 – bentonit (tvárnice střed)/betonový prstenec

V5 – bentonit (tvárnice spára)/betonový prstenec

V6 – bentonit (tvárnice střed)

V7 – bentonit (tvárnice spára)

V8 – rozhraní bentonit tvárnice-pelety

V9 – bentonit (pelety)

V10 – bentonit (pelety)

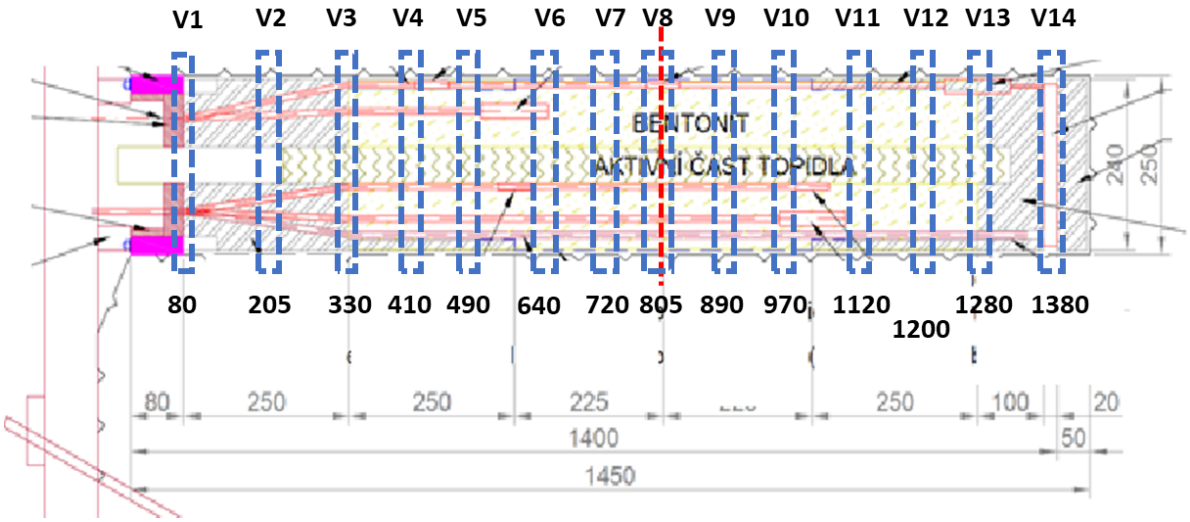
V11 – bentonit (pelety)/betonový prstenec

V12 – bentonit (pelety)/betonový prstenec

V13 – rozhraní betonový blok-bentonit (pelety)

V14 – betonový bok/tlaková buňka

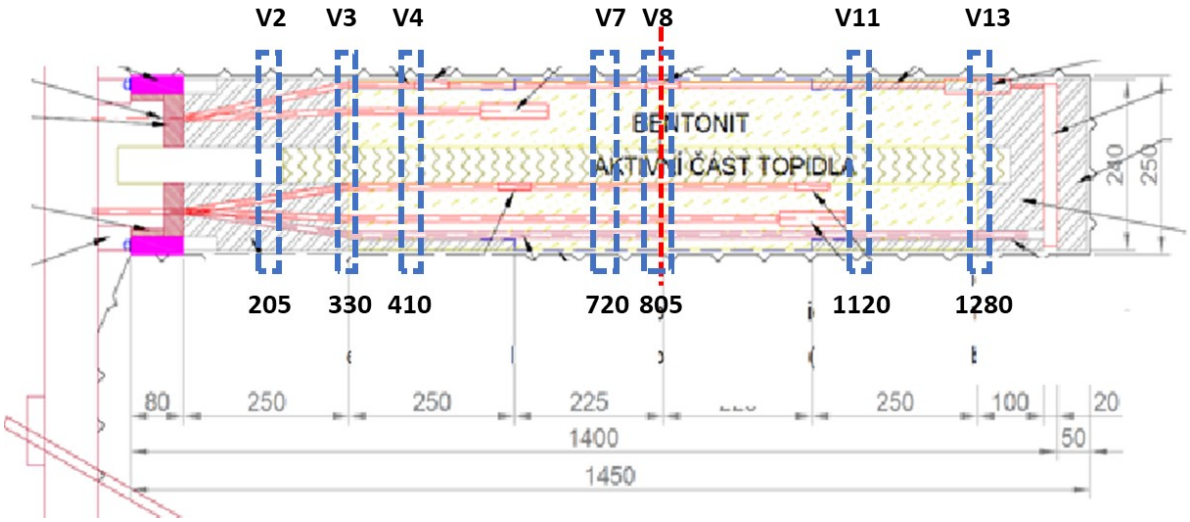
Tyto oblasti zohledňují vzájemné kontakty mezi všemi prvky FM (bentonit, cementový materiál, topidlo a instrumentace) i okolním horninovým prostředím a hloubkou zájmové oblasti v horninovém prostředí od stěny zkušební komory. Dále je vzorkován též teplotní a vlhkostní gradient směrem od topidla směrem k vnějšímu okraji FM. Navržené vzorkovací schéma dále zohledňuje i rozdílnost použitých forem bentonitu (materiál na kontaktu mezi tvárnicemi (V7), uvnitř tvárnice (V6), rozhraní mezi tvárnicemi a peletami (V8), a samotné pelety (V9 a 10). Ve FM1 je použit bentonit ve formě pelet, ve FM2 je použit bentonit ve formě tvárnic, a proto jsou z pohledu vstupního materiálového složení navrhované zájmové oblasti V3 až V7 adekvátně symetrické oblastem V9 až V13 a není zde přítomno rozhraní mezi bentonitovými tvárnicemi a peletami (V8).



Obr. 25 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM1-5 v plnohodnotné (zelené) variantě

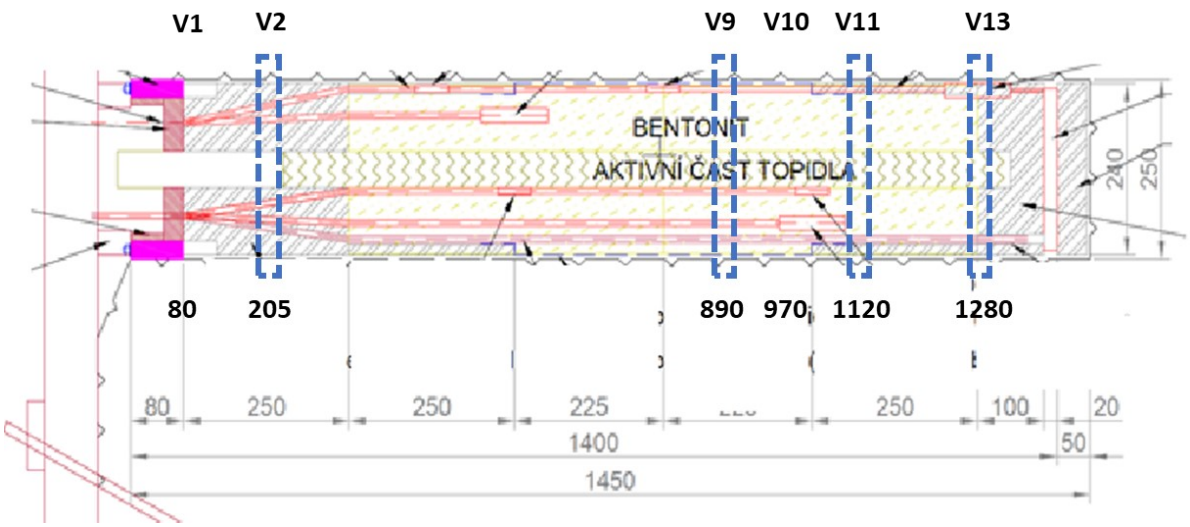
Redukovaná (oranžová) varianta odběrů nabízí pro dismantling FM1-5 zájmové oblasti V2, V3, V4, V7, V8, V11 a V13 (schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 26). Redukována jsou odběrová místa především v bentonitovém materiálu. Vzorkovací schéma zohledňuje zájmové materiály (bentonit, cementový materiál) včetně jejich vzájemných rozhraní i kontakt s horninovým prostředím, hloubku zájmové oblasti v horninovém prostředí od stěny zkušební komory a teplotní a vlhkostní gradient směrem od topidla směrem k vnějšímu okraji FM. Kvůli redukci odběrových míst v bentonitu oranžové

vzorkovací schéma méně zohledňuje rozdílnost použitých forem bentonitu a proto nemusejí být některé projevy změn vlastností bentonitu zastiženy.



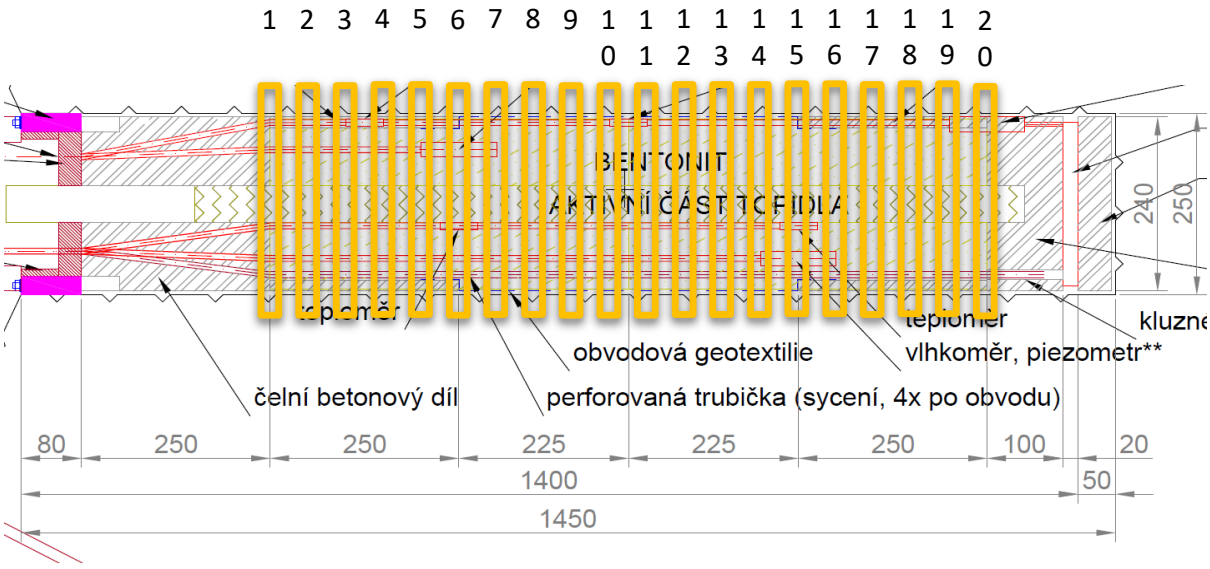
Obr. 26 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM1-5 v redukované (oranžové) variantě

V basic (červené) variantě dismantlingu by byla odebrána pouze základní rozhraní mezi bentonitem a cementovým materiálem (V11 a V13), samotný bentonitový materiál (V9) a cementový materiál (V2), schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 27). Zachováno je pouze zohlednění teplotního a vlhkostního gradientu směrem od topidla směrem k vnějšímu okraji FM. Všechny ostatní oblasti materiálů a rozhraní jsou zanedbány.



Obr. 27 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM1-5 v basic (červené) variantě

Jako podpůrný výzkum pro analýzu interakcí byl pro FM1-5 navržen celkový screening rozložení vlhkosti a objemové hmotnosti uvnitř bentonitu FM, který je ve svém principu shodný pro všechny varianty a liší se rozsahem stanovení objemové hmotnosti a počtem verifikačních pozic. Tento screening je doplněn ve vybraných profilech odběry pro analýzu geotechnických charakteristik. Jak screening tak odběr pro geotechnickou charakterizaci má při konfliktu nižší prioritu (je třeba ho relokovat) oproti analýzám pro interakce. Na druhou stranu je třeba screening při odběrech flexibilně upravovat tak, aby u všech analýz pro interakce proběhl odběr i pro screening (např. relokací nejbližšího plánovaného odběru).



Obr. 28 Polohy geotechnických profilů v FM1-5 (G1-G20)

Pro screening bylo navrženo 20 geotechnických profilů (Obr. 28). V každém profilu jsou pro screening jsou navrženy vždy tři pozice pod úhlem 45 ° - prostor u topidla, střed bentonitu a prostor u betonu/horniny. Shodné ověřovací pozice jsou navrženy ve vybraných profilech v opačném směru (úhel 200 °), kde se plánují vzorky u topidla u betonu/horniny. Ve stejném prostoru jsou navrženy i odběry pro geotechnické analýzy – bobtnací tlak, propustnost, mez

tekutosti a termofyzikální vlastnosti. V místech těchto odběrů jsou pak vynechány ověřovací odběry.

Kromě odběrů pro interakce, screeningu a geotechnických vlastností se předpokládá inspekce a dle potřeby i analýza technických komponent FM. Tedy zhlaví a jeho těsnění, betonových zátek, topidla, instrumentace a jeho kabeláže, … Tyto prvky nejsou jmenovitě uváděny ve vzorkovacím plánu, avšak je třeba jim při rozebírání věnovat pozornost.

Přehled všech plánovaných vzorků a analýz je uveden v **Příloze č. 1 –** Vzorkovací plán (tabulka). Tato příloha obsahuje ve třech variantách detailní informace o polohách vzorků, zájmové oblasti, množství materiálu a navazujících analýzách. Příloha také obsahuje přehled všech analýz včetně předpokládané finanční analýzy.

5.2.1.1 Geochemie

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou, topidlem a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM1-5 (Obr. 25). Jedná se o 14 zájmových oblastí rozdělených po délce fyzikálního modelu, které zohledňují i možnou variabilitu sledovaných chemických a geochemických parametrů se vzdáleností od zhlaví FM/hloubkou v horninovém prostředí. V jednotlivých zájmových oblastech jsou naplánovány odběry materiálů v příčném profilu v různých vzdálenostech od osy FM (viz Příloha 1). Navrženy jsou také odběry přítomné podzemní vody, tj. vody použité při vyjímání FM, přítomné v okolí FM (sytící voda) nebo možné průsaky z okolí. Sledovány budou všechny geochemické parametry popsané v kapitole 5.1.1. – výluhy z cementových materiálů a bentonitu a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů, prvkové složení pevných fází pomocí XRF a silikátové analýzy, obsah organického uhlíku v pevných fázích, termogravimetrická analýza a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

Oranžová varianta

Redukovaná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování pouze zájmových oblastí oproti plnohodnotné (zelené) variantě. Zredukován je počet odběrů (Obr. 26), které zohledňují i možnou variabilitu sledovaných parametrů se vzdáleností od zhlaví FM/hloubkou v horninovém prostředí a možné rozdílné vlastnosti bentonitového materiálu. Sledovány budou pouze vybrané geochemické parametry – výluhy z cementových materiálů a bentonitu a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů, prvkové složení pevných fází pomocí XRF a silikátové analýzy, obsah organického uhlíku v pevných fázích a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

Červená varianta

V basic (červené) variantě jsou sledovány pouze základní geochemické parametry jen na vzorcích na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 27: výluhy z cementových materiálů a bentonitu a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

5.2.1.2 Geotechnika

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje plné vzorkování bentonitu pro screening ve všech 20 profilech (Obr. 28) pro analýzu rozložení vlhkosti a objemové hmotnosti. Vždy u topidla, ve středu bentonitu a u betonu/horniny. Ověřovací analýzy pak v 16 profilech u topidla a betonu/horniny, kdy jsou vynechány profily G4, G8, G13, G18. Tyto profily jsou využity pro geotechnické analýzy.

Ve profilech G4, G8, G13, G18 je u topidla, ve středu bentonitu a u horniny/betonu naplánován odběr pro analýzu bobtnacího tlaku a propustnosti. Ve shodných profilech je u topidla a u skály/horniny naplánována analýza meze tekutosti. V profilech G8 a G13 jsou analýzy doplněny o měření termofyzikálních charakteristik.

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta odběrového plánu redukuje množství analýz stanovení objemové hmotnosti v rámci screeningu. V rámci ověřovacích analýz jsou provedeny analýzy pouze rozložení vlhkosti, kdy jsou vynechány profily G4, G8, G13, G18

Ve profilech G8, G18 je u topidla, ve středu bentonitu a u horniny/betonu naplánován odběr pro analýzu bobtnacího tlaku a propustnosti. Ve shodných profilech je u topidla a u skály/horniny naplánována analýza meze tekutosti. V profilu G8 jsou analýzy doplněny o měření termofyzikálních charakteristik.

Červená varianta

V nejmenší (červené) variantě je zachován screening shodný s oranžovou variantou, avšak nejsou prováděny ověřovací analýzy.

Ve profilu G8 je u topidla, ve středu bentonitu a u horniny/betonu naplánován odběr pro analýzu bobtnacího tlaku a propustnosti. Ve shodném profilech je u topidla a u skály/horniny naplánována analýza meze tekutosti. Dále je v profilu G8 naplánováno měření termofyzikálních charakteristik.

Všechny varianty

Kromě odběrů popsaných ve vzorkovacím se předpokládá inspekce a dle potřeby i analýza technických komponent FM. Tedy zhlaví a jeho těsnění, betonových zátek, topidla, instrumentace a jeho kabeláže,… . Tyto prvky nejsou jmenovitě uváděny ve vzorkovacím plánu, avšak je třeba jim při rozebírání věnovat pozornost.

5.2.1.3 Koroze

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu a rozhraní těchto materiálů s topidlem a ostatními kovovými prvky FM (zhlaví, čidla) na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM1-5 (Obr. 25). Budou-li při demontáži a rozebírání identifikovány korozní jevy/přítomnost korozních produktů na kovových materiálech a jejich rozhraní, budou tyto jevy zaznamenány a odebrány vzorky na analýzu a identifikaci korozních produktů. Přítomnost korozních produktů je možno očekávat s velkou

pravděpodobností. Protože korozní procesy jsou jevy sdružující působení chemismu prostředí a mikrobiologické aktivity, budou taktéž odebírány vzorky pro mikrobiologickou analýzu (více viz kapitola 5.2.1.4).

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta odběrového plánu nezahrnuje zájem o zjištění přítomnosti korozních jevů/produktů koroze a jejich analýzu.

Červená varianta

V basic (červené) variantě není zahrnuto sledování přítomnosti korozních jevů/produktů koroze a jejich analýzy.

5.2.1.4 Mikrobiologie

Zelená varianta

Zelená varianta obsahuje mikrobiologické vzorkování bentonitu a betonu na všech 14-ti odběrových místech v jednotlivých FM1-5 (Příloha 1, Obr. 25), jednotlivé odběrové body jsou shodné s odběry geochemie (5.2.1.1.), což umožní komplexní interpretaci získaných dat. Dále jsou v zelené variantě prováděny též odběry betonu a bentonitu na rozhraní s různými částmi instrumentace FM (piezometr, vlhkoměr), stejně tak jako jsou v rámci rozebírání FM1-5 v zelené variantě zahrnuty též stěry ze všech možných interakčních ploch – styk betonu, kovu a horniny (V1,2,3,5,11,13,14) a styk bentonitu, kovu a horniny (V4,6,7,8,9,10,12). V místech interakce FM s horninou je odebrán i vzorek geotextilie. Místa interakcí materiálů jsou důležitá především kvůli korozním/degradačním procesům (viz 3.4), které vznikají spolupůsobením mikrobiologické aktivity a chemismu prostředí. Každý vzorek bentonitu, betonu, geotextilie či stěru je odebrán v duplikátu pro získání spolehlivých genetických dat. Navíc jsou v zelené variantě zahrnuty i rezervní vzorky pro případné ovzorkování dalších zajímavých rozhraní či nečekaných jevů ve FM (např. koroze, 3.4). Tyto rezervní vzorky obsahují odběry bentonitu, betonu, horniny a stěry a filtry při odběru podzemních a technických vod.

Díky důkladnému ovzorkování FM v podélném i příčném směru bude v analýzách pokryt kromě samotných materiálů také gradient teploty, vlhkosti a dostupnosti kyslíku, a také případné korozní jevy. Dostatečný počet odběrových míst a z nich odebraných vzorků spolu s paralelními geochemickými analýzami umožní řádné a zodpovědné vyvození závěrů z mikrobiálních analýz. Ty v zelené variantě zahrnují jak analýzy izolované DNA (kvantitativní PCR, amplikonové sekvenování), tak kultivaci mikrobiálních společenstev a analýzu mikrobiální aktivity pomocí měření důležitých metabolitů (acetát). Kombinace těchto přístupů poskytne kompletní informaci o početnosti, taxonomickém zařazení, životaschopnosti a aktivitě bakteriálních společenstev v jednotlivých FM. To umožní zodpovědnou analýzu možných dějů probíhajících v mikrobiálních společenstvech FM.

Oranžová varianta

V oranžové variantě (Příloha 1, Obr. 26) je oproti zelené variantě počet míst pro odebrání mikrobiologických vzorků omezen pouze na sedm hlavních zájmových oblastí bentonitu a betonu a nejdůležitějších zón interakcí (bentonit x beton x hornina). Odebírány jsou pouze vzorky z bentonitu/betonu bez stěrů z míst interakcí a povrchových zón modulů či vzorků geotextilie. Mikrobiologické vzorování opět kopíruje geochemické (5.2.1.1). Počet vertikálních odběrů (na průřezu FM) v jednotlivých odběrových místech zůstává zachován jako v zelené

variantě. Každý vzorek bentonitu a betonu je odebrán v duplikátu. Rezervní vzorky jsou početně redukovány oproti zelené variantě.

V rámci betonu a bentonitu bude stále možné v omezené míře zhodnotit gradient teploty, vlhkosti a kyslíku. Tato varianta už ovšem není schopná zohlednit případné korozní jevy. Z mikrobiologických analýz není plánována kultivace mikrobiálních společenstev, ponechána je ve středových vzorcích bentonitu pouze detekce acetátu jako míra mikrobiální aktivity. Dále bude provedena genetické analýza (qPCR a amplikonové sekvenování) u všech odebraných vzorků. Množství vzorků je v rámci této varianty limitní pro zodpovědnou a důkladnou analýzu mikrobiologických poměrů FM.

Červená varianta

V červené variantě (Příloha 1, Obr. 27) jsou podobně jako u oranžové varianty zkoumané rozhraní a materiály redukované pouze na beton x bentonit. Zachováno je však pouze minimum odběrových míst. U FM 3-5 tak např. nebude možno porovnat rozdíl mezi bentonitovými peletami a tvárnicemi v rámci jednoho modulu ani rozdíly dané různou hloubkou zájmové oblasti v horninovém prostředí od stěny zkušební komory. Počet vertikálních odběrů (na průřezu FM) v jednotlivých odběrových místech zůstává zachován jako v zelené variantě. Každý vzorek betonu a bentonitu je odebrán v duplikátu. Rezervní vzorky jsou oproti oranžové variantě dále redukované.

Počet vzorků v červeném vzorkovacím plánu je velmi nedostatečný pro zodpovědné analýzy mikrobiálních dějů. Nedojde k zohlednění korozních jevů ani zohlednění gradientu kyslíku, ovšem díky zachované vertikální stratifikaci odběrů bude možno zohlednit teplotní a vlhkostní gradient. Z mikrobiálních analýz je zahrnuta pouze analýza genetická, tedy kvantitativní PCR a amplikonové sekvenování.

5.2.1.5 Mineralogie

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou, topidlem a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM1-5 (Obr. 25). Je sledováno mineralogické složení metodou rentgenové difrakce (XRD) a pro bentonitové materiály je rovněž plánováno měření XRD na glykolovaných a orientovaných preparátech.

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta zahrnuje XRD analýzy jen na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 26, a to v základním stavu po odběru bez specifické úpravy.

Červená varianta

V basic (červené) variantě jsou navrženy analýzy metodou XRD jen na vzorcích na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 27, a to v základním stavu po odběru bez specifické úpravy.

5.2.1.6 Fyzikální vlastnosti

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou, topidlem a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM1-5 (Obr. 25). Sledovány budou všechny navrhované fyzikální a mikrostrukturní vlastnosti: porozita cementových materiálů pomocí rtuťové porozimetrie; porozita cementových a bentonitových materiálů pomocí gravimetrické metody; specifický povrch cementových a bentonitových materiálů pomocí metody BET; specifický povrch bentonitových materiálů pomocí metody EGME; retenční křivky bentonitových materiálů; mikrostruktura pomocí optické mikroskopie a skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Navrženo je stanovení pevností cementových materiálu na vzorcích malého měřítka pomocí nanoindentace a stanovení volného bobtnání bentonitových materiálů modifikovaným postupem pro malé měřítko.

Oranžová varianta

V redukované (oranžové) variantě je navrženo studovat jen na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 26 pouze následující parametry: porozita cementových materiálů pomocí rtuťové porozimetrie; porozita cementových a bentonitových materiálů pomocí gravimetrické metody; specifický povrch cementových a bentonitových materiálů pomocí metody BET; specifický povrch bentonitových materiálů pomocí metody EGME; mikrostruktura pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

Červená varianta

Basic (červená) varianta zahrnuje pouze stanovení specifického povrchu bentonitových materiálů metodou EGME a cementových materiálů metodou BET na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 27.

5.2.2 FM6-10

Pro „malé“ fyzikální modely, které jsou umístěny v přirozeném horninovém prostředí bylo vytipováno až 12 zájmových oblastí, u kterých by bylo záhodno studovat vlastnosti materiálů po vzájemné interakci a kontaktu se sytící vodou. Kombinace materiálů ve fyzikálních modelech je popsána v Tab. 2. Počet zájmových oblastí se v jednotlivých FM liší dle navrhovaných variant dismantlingu (zelená, oranžová a červená) i dle použitých materiálových výplní ve FM. Tyto oblasti zohledňují vzájemné kontakty mezi všemi prvky FM (bentonit, cementový materiál a instrumentace) i okolním horninovým prostředím. Zohledňují i rozdílnost použitých forem bentonitu (materiál na kontaktu mezi tvárnicemi, materiál uvnitř tvárnice). Pro fyzikální modely FM6-9 jsou ve variantě plného rozsahu odběrů (zelené variantě) navrhovány odběry z 12 zájmových oblastí (schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 29):

M1 – ocelová deska/těsnění/beton

M2 – betonový blok

M3 – rozhraní betonový blok-bentonit

M4 – bentonit /betonový prstenec

M5 – bentonit (tvárnice spára)/betonový prstenec

M6 – bentonit (tvárnice střed)

M7 – bentonit (tvárnice spára)

M8 – bentonit (tvárnice střed)

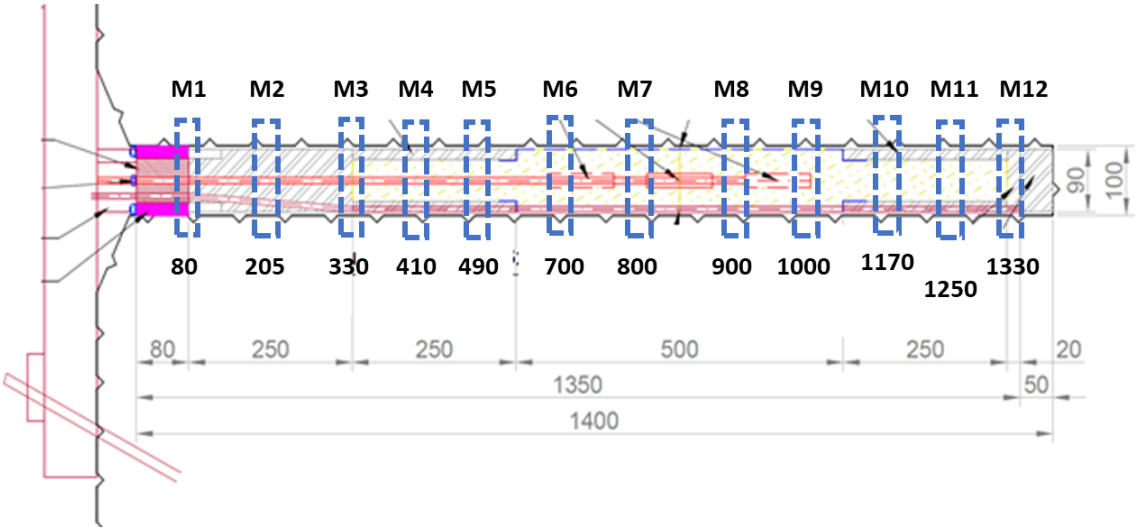
M9 – bentonit (tvárnice spára)

M10 – bentonit/betonový prstenec

M11 – bentonit/betonový prstenec

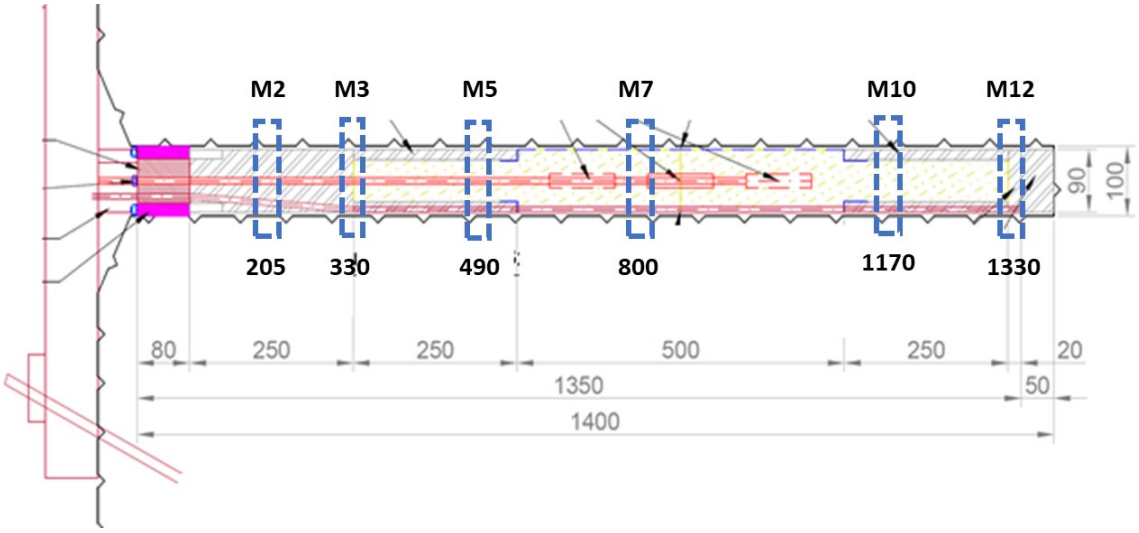
M12 – rozhraní betonový blok-bentonit

Tyto oblasti zohledňují vzájemné kontakty mezi všemi prvky FM (bentonit, cementový materiál a instrumentace) i okolním horninovým prostředím. Zohledňují i rozdílnosti v bentonitovém materiálu (kontakt mezi tvárnicemi vs. vnitřek tvárnice) a hloubku od stěny zkušební komory do horninového prostředí. Dále je vzorkován též vlhkostní gradient směrem od vnitřku FM k vnějšímu okraji. Fyzikální model FM 10 obsahuje bentonit ve formě pelet, je tedy možnost adekvátně zmenšit počet zájmových oblastí (oproti tvárnicím zde nejsou rozdíly mezi spárou a vnitřním materiálem).



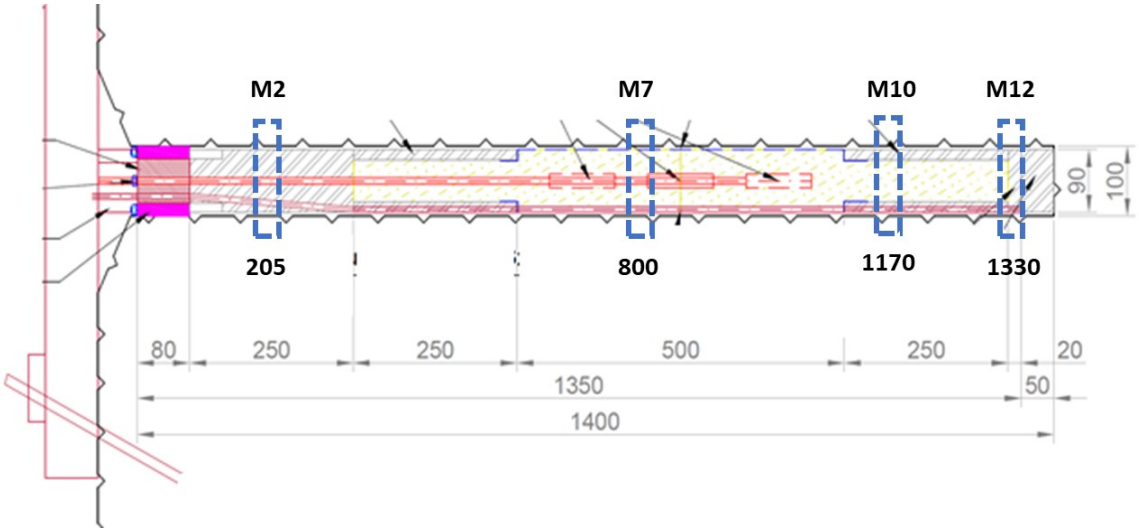
Obr. 29 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM6-10 v plnohodnotné (zelené) variantě

Redukovaná (oranžová) varianta odběrů nabízí pro dismantling FM1-5 zájmové oblasti M2, M3, M5, M7, M10 a M12 (schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 30). Redukována jsou odběrová místa v bentonitovém materiálu. Vzorkovací schéma zohledňuje zájmové materiály (bentonit, cementový materiál) včetně jejich vzájemných rozhraní i kontakt s horninovým prostředím, hloubku zájmové oblasti v horninovém prostředí od stěny zkušební komory a vertikální vlhkostní gradient. Díky redukci odběrových míst v bentonitu oranžové vzorkovací schéma nemusí dobře postihnout možné nehomogenity v bentonitu.



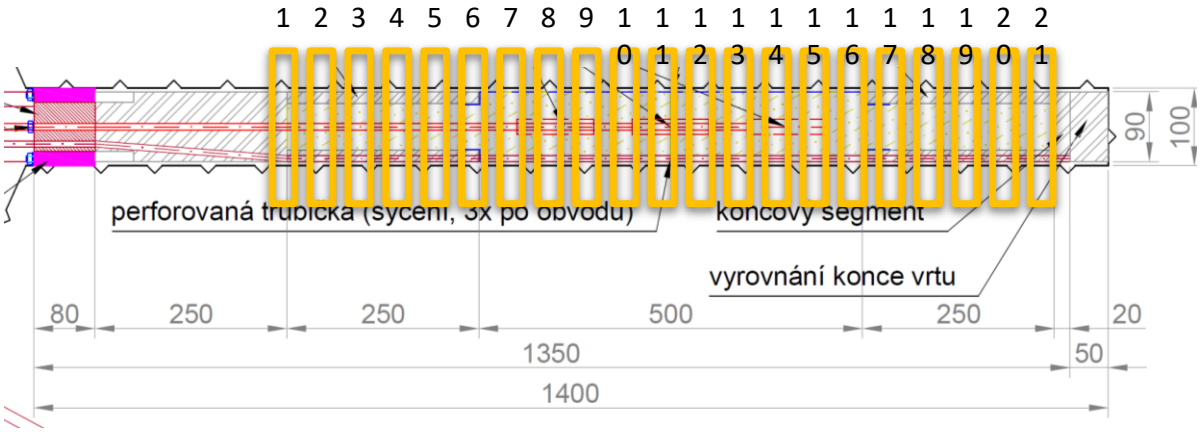
Obr. 30 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM6-10 v redukované (oranžové) variantě

V basic (červené) variantě dismantlingu by byly odebrány pouze základní rozhraní mezi bentonitem a cementovým materiálem (M10 a M12), cementový materiál (M2) a bentonitový materiál (M7), schematicky znázorněno s přibližnou polohou/vzdáleností od zhlaví na Obr. 31). Zachováno je zohlednění vertikálního vlhkostního gradientu ve FM. Všechny ostatní oblasti materiálů a rozhraní jsou zanedbány.



Obr. 31 Schématické znázornění zájmových oblastí pro odběry a vzorkování FM6-10 v basic (červené) variantě

Jako podpůrný výzkum pro analýzu interakcí byl pro FM6-10 navržen celkový screening rozložení vlhkosti a objemové hmotnosti uvnitř bentonitu FM po jeho délce. Tento screening je doplněn ve vybraných profilech odběry pro analýzu geotechnických charakteristik. Jak screening, tak odběr pro geotechnickou charakterizaci má při konfliktu nižší prioritu (je třeba ho relokovat) oproti analýzám pro interakce. Na druhou stranu je třeba screening při odběrech flexibilně upravovat tak, aby u všech analýz pro interakce proběhl odběr i pro screening (např. relokací nejbližšího plánovaného odběru).



Obr. 32 Polohy geotechnických profilů v FM6-10 (G1-G21)

Pro screening bylo navrženo 21 geotechnických profilů (Obr. 32). V každém profilu je pro screening navrženy jedna pozice pod úhlem 45. Ve stejném prostoru, avšak v opačném směru (úhel 160 a 200 °), jsou navrženy i odběry pro geotechnické analýzy – bobtnací tlak, propustnost, mez tekutosti a termofyzikální vlastnosti.

Kromě odběrů pro interakce, screeningu a geotechnických vlastností se předpokládá inspekce a dle potřeby i analýza technických komponent FM. Tedy zhlaví a jeho těsnění, betonových zátek, instrumentace a jeho kabeláže, … Tyto prvky nejsou jmenovitě uváděny ve vzorkovacím plánu, avšak je třeba jim při rozebírání věnovat pozornost.

5.2.2.1 Geochemie

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM6-10 (Obr. 29) obdobně jako u FM1-5. Jedná se o 12 zájmových oblastí rozdělených po délce fyzikálního modelu, které zohledňují i možnou variabilitu sledovaných chemických a geochemických parametrů se vzdáleností od zhlaví FM/hloubkou v horninovém prostředí. V jednotlivých zájmových oblastech jsou naplánovány odběry materiálů v příčném profilu v různých vzdálenostech od osy FM (viz Příloha 1). Navrženy jsou také odběry přítomné podzemní vody, tj. vody použité při vyjímání FM, přítomné v okolí FM (sytící voda) nebo možné průsaky z okolí. Sledovány budou všechny geochemické parametry popsané v kapitole 5.1.1. – výluhy z cementových materiálů a bentonitu a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů, prvkové složení pevných fází pomocí XRF a silikátové analýzy, obsah organického uhlíku v pevných fázích, termogravimetrická analýza a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

Oranžová varianta

Redukovaná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování pouze zájmových oblastí oproti plnohodnotné (zelené) variantě. Zredukován je počet odběrů (Obr. 30), které zohledňují i možnou variabilitu sledovaných parametrů se vzdáleností od zhlaví FM/hloubkou v horninovém prostředí a možné rozdílné vlastnosti bentonitového materiálu. Sledovány budou pouze vybrané geochemické parametry – výluhy z cementových materiálů a bentonitu

a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů, prvkové složení pevných fází pomocí XRF a silikátové analýzy, obsah organického uhlíku v pevných fázích a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

Červená varianta

V basic (červené) variantě jsou sledovány pouze základní geochemické parametry jen na vzorcích na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 31: výluhy z cementových materiálů a bentonitu a jejich složení, stanovení fyzikálně chemických parametrů vodných vzorků a výluhů, stanovení pH výluhů cementových materiálů a stanovení kationtově výměnné kapacity bentonitu.

5.2.2.2 Geotechnika

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu pro screening ve všech 21 profilech (Obr. 32) pro analýzu rozložení vlhkosti a objemové hmotnosti.

Ve profilech G4, G8, G13, G18 jsou naplánovány odběry pro analýzu bobtnacího tlaku, propustnosti a analýzu meze tekutosti. V profilu G8 jsou analýzy doplněny o měření termofyzikálních charakteristik.

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta odběrového plánu redukuje množství analýz stanovení objemové hmotnosti v rámci screeningu, analýza rozložení vlhkosti je shodná.

Ve profilech G8 a G18 jsou naplánovány odběry pro analýzu bobtnacího tlaku, propustnosti a analýzu meze tekutosti. V profilu G8 jsou analýzy doplněny o měření termofyzikálních charakteristik.

Červená varianta

V nejmenší (červené) variantě je redukován screening oproti oranžové variantě o některé analýzy vlhkosti. Jsou pouze zachována místa, kde je zároveň analyzována i objemová hmotnost.

Ve profilech G8 jsou naplánovány odběry pro analýzu bobtnacího tlaku, propustnosti a analýzu meze tekutosti. Termofyzikální vlastnosti nejsou analyzovány.

Všechny varianty

Kromě odběrů pro interakce, screeningu a geotechnických vlastností se předpokládá inspekce a dle potřeby i analýza technických komponent FM. Tedy zhlaví a jeho těsnění, betonových zátek, instrumentace a jeho kabeláže,… . Tyto prvky nejsou jmenovitě uváděny ve vzorkovacím plánu, avšak je třeba jim při rozebírání věnovat pozornost.

5.2.2.3 Koroze

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu a rozhraní těchto materiálů s kovovými prvky FM (zhlaví, čidla) na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM6-10 (Obr. 29). Budou-li při demontáži a rozebírání identifikovány korozní jevy/přítomnost korozních produktů na kovových materiálech a jejich rozhraní, budou tyto jevy zaznamenány a odebrány vzorky na analýzu a identifikaci korozních produktů. Přítomnost korozních produktů je možno očekávat s velkou pravděpodobností. Protože korozní procesy jsou jevy sdružující působení chemismu prostředí a mikrobiologické aktivity, budou taktéž odebírány vzorky pro mikrobiologickou analýzu (více viz kapitola 5.2.1.4 a 5.2.2.4).

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta odběrového plánu nezahrnuje zájem o zjištění přítomnosti korozních jevů/produktů koroze a jejich analýzu.

Červená varianta

V basic (červené) variantě není zahrnuto sledování přítomnosti korozních jevů/produktů koroze a jejich analýzy.

5.2.2.4 Mikrobiologie

Zelená varianta

Zelená varianta obsahuje mikrobiologické vzorkování bentonitu a betonu na všech 12-ti odběrových místech v jednotlivých FM6-10 (Příloha 1, Obr. 29) – ovzorkování je obdobné tomu u FM1-5 (viz 5.2.1). Odběrové body jsou opět shodné s odběry geochemie (5.2.2.1), což umožní komplexní interpretaci dat. Kromě betonu a bentonitu je v zelené variantě zkoumáno i rozhraní všech materiálů včetně instrumentace pomocí stěrů. V místech interakce FM s horninou je odebrán i vzorek geotextilie. Každý vzorek bentonitu, betonu, geotextilie či stěru je odebrán v duplikátu. Navíc jsou v zelené variantě zahrnuty i rezervní vzorky pro případné ovzorkování dalších zajímavých rozhraní či nečekaných jevů ve FM (např. koroze, 3.4). Tyto rezervní vzorky obsahují odběry bentonitu, betonu, horniny a stěry a filtry při odběru podzemních a technických vod.

Stejně jako u FM1-5 je v zelené variantě u FM6-10 pokryt gradient vlhkosti a dostupnosti kyslíku, a také korozní jevy. Dostatečný počet odběrových míst a z nich odebraných vzorků umožní řádné a zodpovědné vyvození závěrů z mikrobiálních analýz. Ty v zelené variantě stejně jako u FM1-5 (5.2.1.4) zahrnují jak genetické analýzy, tak kultivaci mikrobiálních společenstev a analýzu mikrobiální aktivity. Kombinace těchto přístupů poskytne kompletní informaci o početnosti, taxonomickém zařazení, životaschopnosti a aktivitě bakteriálních společenstev v jednotlivých FM. To umožní zodpovědnou analýzu možných dějů probíhajících v mikrobiálních společenstvech FM.

Oranžová varianta

V oranžové variantě (Příloha 1, Obr. 30) je oproti zelené variantě počet odběrových míst omezen na šest hlavních zájmových oblastí a odebírány jsou pouze vzorky materiálů (bentonit,

beton) bez stěrů z míst interakcí a povrchových zón modulů či vzorků geotextilie. Mikrobiologické vzorkování opět kopíruje geochemické (5.2.2.1). Počet vertikálních odběrů (na průřezu FM) v jednotlivých odběrových místech zůstává zachován jako v zelené variantě. Každý vzorek bentonitu a betonu je odebrán v duplikátu. Rezervní vzorky jsou početně redukovány oproti zelené variantě.

V rámci betonu a bentonitu bude stále možné v omezené míře zhodnotit gradient vlhkosti a kyslíku. Tato varianta už ovšem není schopná zohlednit případné korozní jevy. Z mikrobiologických analýz není plánována kultivace mikrobiálních společenstev, zachovány jsou analýzy mikrobiální aktivity (acetát) u vzorků bentonitů z prostřední části modulu. Dále budou provedeny genetické analýzy (qPCR a amplikonové sekvenování). Množství vzorků je v rámci této varianty limitní pro zodpovědnou a důkladnou analýzu mikrobiologických poměrů FM.

Červená varianta

V červené variantě (Příloha 1, Obr. 31) jsou podobně jako u oranžové varianty odběrové body redukované pouze na beton x bentonit a jejich interakci. Zachováno je však pouze minimum odběrových míst. Nebude tak např. možno porovnat rozdíly dané různou hloubkou zájmové oblasti v horninovém prostředí od stěny zkušební komory. Počet vertikálních odběrů (na průřezu FM) v jednotlivých odběrových místech zůstává zachován jako v zelené variantě. Každý vzorek betonu a bentonitu je odebrán v duplikátu. Rezervní vzorky jsou oproti oranžové variantě dále redukované.

Počet vzorků v červeném vzorkovacím plánu je velmi nedostatečný pro zodpovědné analýzy mikrobiálních dějů. Nedojde k zohlednění korozních jevů ani zohlednění gradientu kyslíku, ovšem díky zachované vertikální stratifikaci odběrů bude možno zohlednit vlhkostní gradient. Z mikrobiálních analýz je zahrnuta pouze analýza genetická, tedy kvantitativní PCR a amplikonové sekvenování.

5.2.2.5 Mineralogie

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM6-10 (Obr. 29) obdobně jako u FM1-5. Je sledováno mineralogické složení metodou rentgenové difrakce (XRD) a pro bentonitové materiály je rovněž plánováno měření XRD na glykolovaných a orientovaných preparátech.

Oranžová varianta

Redukovaná (oranžová) varianta zahrnuje XRD analýzy jen ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 30, a to na vzorcích v základním stavu po odběru bez specifické úpravy.

Červená varianta

V basic (červené) variantě jsou navrženy analýzy metodou XRD jen ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 31, a to na vzorcích v základním stavu po odběru bez specifické úpravy.

5.2.2.6 Fyzikální vlastnosti

Zelená varianta

Plnohodnotná varianta odběrového plánu navrhuje vzorkování bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou a ostatními prvky FM na všech důležitých odběrových místech v jednotlivých FM6-10 (Obr. 29) obdobně jako u FM1-5. Sledovány budou všechny navrhované fyzikální a mikrostrukturní vlastnosti: porozita cementových materiálů pomocí rtuťové porozimetrie; porozita cementových a bentonitových materiálů pomocí gravimetrické metody; specifický povrch cementových a bentonitových materiálů pomocí metody BET; specifický povrch bentonitových materiálů pomocí metody EGME; retenční křivky bentonitových materiálů; mikrostruktura pomocí optické mikroskopie a skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Navrženo je stanovení pevností cementových materiálu na vzorcích malého měřítka pomocí nanoindentace a stanovení volného bobtnání bentonitových materiálů modifikovaným postupem pro malé měřítko.

Oranžová varianta

V redukované (oranžové) variantě je navrženo studovat jen na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 30 pouze následující parametry: porozita cementových materiálů pomocí rtuťové porozimetrie; porozita cementových a bentonitových materiálů pomocí gravimetrické metody; specifický povrch cementových a bentonitových materiálů pomocí metody BET; specifický povrch bentonitových materiálů pomocí metody EGME; mikrostruktura pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

Červená varianta

Basic (červená) varianta zahrnuje pouze stanovení specifického povrchu bentonitových materiálů metodou EGME a cementových materiálů metodou BET na vzorcích ze zájmových oblastí uvedených na Obr. 31.

5.3 Časová a finanční náročnost

V Tab. 7 je uvedena předpokládaná časová náročnost zpracování analýz v odborných laboratořích. Časová náročnost je stanovena na základě předpokládaných kapacit laboratoří v ČR a předpokládá rezervaci kapacity v dostatečném předstihu.

V Tab. 8 a v Příloze 1 je uvedena předpokládaná finanční náročnost analýz. Cena zahrnuje přípravu vzorků z odběrů v podzemí, náklady na jejich stabilizaci pro přepravu do odborné laboratoře a analýzu v odborné laboratoři.

Přehledy jsou vždy uvedeny ve třech variantách (červená, oranžová, zelená) pro každý z typů FM.

Tab. 7 Celková časová náročnost analýz (po předání do laboratoře)

	Varianta	Geochemie	Geotechnika	Koroze	Mikrobiologie	Mineralogie	Fyzikální vlastnosti
FM bez topidla	Zelená	4m	4m	2m	9m	3m	4m
	Oranžová	3m	3m	x	4m	2m	3m

	Červená	2m	2m	x	2m	1m	2m
FM s topidlem	Zelená	4m	6m	2m	9m	3m	4m
	Oranžová	3m	4m	x	4m	2m	3m
	Červená	2m	2m	x	2m	1m	2m

Tab. 8 Finanční náročnost analýz (včetně zpracování na místě) pro jeden FM v Kč

	Varianta	**Geochemie**	**Geotechnika**	**Koroze**	**Mikrobiologie**	**Mineralogie**	**Fyzikální vlastnosti**	**Celkem**
FM bez topidla	Zelená	5 330 000	104 900	77 000	3 631 500	770 000	3 366 000	13 279 400
	Oranžová	2 749 500	57 900		1 251 000	255 000	349 000	4 662 400
	Červená	632 000	30 400		783 000	125 000	192 000	1 762 400
FM s topidlem	Zelená	6 387 000	342 800	220 000	5 042 500	1 000 000	3 895 000	16 887 300
	Oranžová	3 516 500	177 400		1 930 000	325 000	495 000	6 443 900
	Červená	632 000	98 800		1 018 000	125 000	192 000	2 065 800

6 Závěr

V rámci navrženého projektu rozebírání IE je popsán dosavadní stav a monitoring IE v PVP Bukov I, dále je zde ve variantách navržen a podrobně vysvětlen možný postup rozebírání IE včetně požadavků, které je nutné při rozebírání dodržet. Jsou zde popsána možná rizika každého přístupu a je navržen optimální způsob rozebrání a vzorkování pro vzorový FM s topidlem a bez topidla. Z možných variant vyjímání FM je doporučeno použít postup, kdy je FM vyjmut včetně okolní horniny pomocí obřezání lanovou pilou. Tento postup zajistí přístup k neporušeným vzorkům ze všech částí FM. Zejména z důvodů mikrobiologických analýz je důležité dbát na co největší opatrnost a zachování sterility při rozebírání jednotlivých FM.

Možné varianty vzorkování a analytických prací jsou popsány ve druhé části projektu. Jsou zde vysvětleny a popsány jednotlivé varianty (zelená, oranžová, červená) vzorkovacích plánů zvlášť pro FM s topidlem a FM bez topidla. Je zde vysvětlen i rozdíl výstupů z jednotlivých variant vzhledem ke stanoveným cílům demontáže IE. Následuje popis geochemických, geotechnických, mikrobiologických, mineralogických a fyzikálních analýz navržených pro dismantling IE a shrnutí časové a finanční náročnosti těchto analýz pro FM s topidlem i bez.

Z hlediska geotechnických, geochemických, fyzikálních, mineralogických a korozních vlastností a parametrů je doporučena plnohodnotná zelená varianta (kapitola 5.2) vzorkovacího plánu pro vzorkování a následné analýzy bentonitu a cementového materiálu, jejich vzájemných rozhraní a rozhraní těchto materiálů s horninou a ostatními prvky FM. Tato varianta byla navržena tak, aby zahrnula všechna předpokládaná důležitá místa a materiály v jednotlivých fyzikálních modelech.

Zelený plán byl optimalizován tak, aby byly maximálně naplněny cíle demontáže IE (kapitola 3.4). V případě redukovaných variant (oranžová, červená) nejsou pokryty všechny možné oblasti a rozhraní a získaná data tak plně a detailně nepopíší proběhlé interakční děje a nepostihnou všechny možné informace.

Použití oranžového či dokonce červeného plánu povede nutně ke značnému omezení výstupních informací, a tedy i ke snížení možnosti relevantních závěrů (v případě červeného plánu se jedná o analýzy nedostatečné pro zodpovědné zhodnocení mikrobiálních a dějů v jednotlivých FM). Z hlediska mikrobiálních jevů pouze zelená varianta dokáže popsat jak strukturu mikrobiálních společenstev, tak jejich životaschopnost a aktivitu, což je v mikrobiologickém výzkumu velice žádoucí.

Z daného popisu vyplývá, že IE v PVP Bukov je, co se týká možných interakcí na různých gradientech, velmi složitý, nicméně jeho řádné ovzorkování může přinést zcela nové poznatky o geochemických, geotechnických, mikrobiálních a mineralogických procesech, které mohou v materiálech a jejich kombinacích v HÚ nastávat za různých podmínek. Tyto informace mohou být důležité pro zhodnocení stability a funkčnosti inženýrských bariér v HÚ z hlediska chemických, geotechnických, mikrobiologických a mineralogických vlastností a parametrů.

Reference

ALONSO M. C., GARCÍA CALVO J. L., WALKER C., NAITO M., PETTERSSON S., PUIGDOMENECH I., CUÑADO M. A., VUORIO M., WEBER H., UEDA H., FUJISAKI K. (2012): Development of an accurate pH measurement methodology for the pore fluids of low pH cementitious materials, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB R-12-02, 128 s.

BENGTSSON A., BLOM A., JOHANSSON L., TABOROWSKI T., LENA E., PEDERSEN K. (2017): Bacterial sulphide-and acetate-producing activity in water saturated Calcigel bentonite cores in a wet density gradient from 1 750 to 2 000 kg m-3. SKB Rep. 17–18.

BENGTSSON A., BLOM A., TABOROWSKI T., SCHIPPERS A., EDLUND J., KALINOWSKI B., PEDERSEN K. (2017): FEBEX-DP: Microbiological report. - Nagra. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste. Arbeitsbericht NAB 16-15

BENGTSSON A., PEDERSEN K. (2016): Microbial sulphate-reducing activity over load pressure and density in water saturated Boom Clay. Applied Clay Science 132–133:542–551.

COLWELL F.S., STORMBERG G.J., PHELPS T.J., BIRNBAUM S.A., MCKINLEY J., RAWSON S.A., VEVERKA C., GOODWIN S., LONG P.E., RUSSELL B.F., GARLAND T., THOMPSON D., SKINNER P., GROVER S. (1992): Innovative techniques for collection of saturated and unsaturated subsurface basalts and sediments for microbiological characterization. Journal of Microbiological Methods 15:279–292.

ČERNÁ K., ČERNOUŠEK T., POLÍVKA P., ŠEVCŮ A. (2019): Survival of microorganisms in bentonite subjected to different levels of irradiation and pressure. MIND Project

ČERNÁ K., HLAVÁČKOVÁ V., STEINOVÁ J., PUSZTAI M. (2021): Mikroorganismy ve vztahu k hlubinným úložištím radioaktivního odpadu. Technická zpráva TZ 552/2021, SÚRAO, 126 str.

DHANASEKARAN S., DOHERTY T.M., KENNETH J., TB TRIALS STUDY GROUP (2010): Comparison of different standards for real-time PCR-based absolute quantification. J Immunol Methods 354:34–39.

DOBREV D., KOUŘIL M., MENDOZA MIRANDA A. N. (2019): Korozní zkouška v alkalickém prostředí, TZ406/2019 SÚRAO.

ENGEL K., COYOTZI S., VACHON M.A., MCKELVIE J.R., NEUFELD J.D. (2019): Validating DNA Extraction Protocols for Bentonite Clay. mSphere 4. https://doi.org/10.1128/mSphere.00334-19

EYDAL H.S.C., PEDERSEN K. (2007): Use of an ATP assay to determine viable microbial biomass in Fennoscandian Shield groundwater from depths of 3–1000 m. Journal of Microbiological Methods 70:363–373.

FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ, L., ČERVINKA, R., ŠVAGERA, O., NAHODILOVÁ, R., ŘIHOŠEK, J., VEČERNÍK, P. (2018): Interakční experiment – zhodnocení in-situ podmínek, charakterizace horninového prostředí v okolí experimentu, SÚRAO TZ228/2018, Praha.

HALLBECK L., PEDERSEN K. (2012): Culture-dependent comparison of microbial diversity in deep granitic groundwater from two sites considered for a Swedish final repository of spent nuclear fuel. FEMS Microbiology Ecology 81:66–77.

HAVEMAN S.A., PEDERSEN K. (2002): Distribution of culturable microorganisms in Fennoscandian Shield groundwater. FEMS Microbiology Ecology 39:129–137.

KING G.M. (1991): Measurement of acetate concentrations in marine pore waters by using an enzymatic approach. Applied and Environmental Microbiology 57:3476–3481

MADINA V., AZKARATE I., INSAUSTI M. (2005): Corrosion of several components of the in situ test performed in a deep geological granite disposal site, in Prediction of Long Term Corrosion Behaviour in nuclear waste systems. Proceedings of the 2nd International Workshop, 61–67

MCKINLEY J.P., COLWELL F.S. (1996): Application of perfluorocarbon tracers to microbial sampling in subsurface environments using mud-rotary and air-rotary drilling techniques. Journal of Microbiological Methods 26:1–9.

NYYSSÖNEN M., HULTMAN J., AHONEN L., KUKKONEN I., PAULIN L., LAINE P., ITÄVAARA M., AUVINEN P. (2014): Taxonomically and functionally diverse microbial communities in deep crystalline rocks of the Fennoscandian shield. ISME J 8:126–138.

OZUOLMEZ D., NA H., LEVER M.A., KJELDSEN K.U., JØRGENSEN B.B., PLUGGE C.M. (2015): Methanogenic archaea and sulfate reducing bacteria co-cultured on acetate: teamwork or coexistence? Front Microbiol 6:.

PAN X., ZHAO L., LI C., ANGELIDAKI I., LV N., NING J., CAI G., ZHU G. (2021): Deep insights into the network of acetate metabolism in anaerobic digestion: focusing on syntrophic acetate oxidation and homoacetogenesis. Water Research 190:116774.

PEDERSEN K, BENGTSSON 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. (2017): Bacterial activity in compacted bentonites. MIND. D2.4

RAJALA P. (2017): Microbially-induced corrosion of carbon steel in a geological repository environment: Dissertation. University of Helsinky.

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

SAHL J.W., SCHMIDT R., SWANNER E.D., MANDERNACK K.W., TEMPLETON A.S., KIEFT T.L., SMITH R.L., SANFORD 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., RIUIZ 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.

SHRESTHA R., CERNA K., SPANEK R., BARTAK D., CERNOUSEK T., SEVCU 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.

STEINOVÁ J., ZUNA M., ČERNÁ K. (2021): Mikrobiologický monitoring vybraných podzemních vod PVP Bukov a dolu Rožná. Technická zpráva 547/2021, SÚRAO.

STROES-GASCOYNE S., HAMON C.J., MAAK P., RUSSELL S. (2010): The effects of the physical properties of highly compacted smectitic clay (bentonite) on the culturability of indigenous microorganisms. Applied Clay Science 47:155–162.

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., SCHIPPERS A., SCHWYN B., POULAIN S., SERGEANT C., SIMONOFF M., MARREC C.L., ALTMANN S., NAGAOKA T., MAUCLAIRE L., MCKENZIE J., DAUMAS S., VINSOT A., BEAUCAIRE C., MATRAY J.-M., (2007): Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Geomicrobiol. J. 24, 1–17.

SVOBODA J., PACOVSKÝ J., ŠŤÁSTKA J., VAŠÍČEK R., PACOVSKÁ D. A NÁDHERNÁ D. (2018), Interakční experiment – Realizační projekt, SÚRAO TZ 245/2018, Praha.

SVOBODA J., VAŠÍČEK, R., NÁDHERNÁ, D. (2019): Interakční experiment – instalace experimentu, SÚRAO TZ371/2019, Praha.

SVOBODA J., VAŠÍČEK, R., PACOVSKÁ, D., RUKAVIČKOVÁ, L., VEČERNÍK, P., ČERVINKA, R., NAHODILOVÁ, R., LAUFEK, F., ŘIHOŠEK, J., BURIÁNEK, D. (2019): Interakční experiment – přípravné a podpůrné práce, SÚRAO TZ385/2019, Praha.

SVOBODA J., VAŠÍČEK, R., RUKAVIČKOVÁ, L., ŘIHOŠEK, J., VEČERNÍK, P. (2022): Interakční experiment – Průběžná zpráva etap 7-9 č. 4, SÚRAO TZ 594/2022, Praha.

SVOBODA, J.; VAŠÍČEK, R.; SMUTEK, J.; HAUSMANNOVÁ, L.; FRANĚK, J.; RUKAVIČKOVÁ, L.; VEČERNÍK, P. (2019): Interaction Experiment At The Bukov URF, Underground Construction Prague 2019. Praha: Česká tunelářská asociace ITA-AITES, 2019. ISBN 978-80-906452-3-3.

TABOROWSKI T., PEDERSEN K. (2018): Microbial activity in a concrete-bentonite clay interface. DELIVERABLE 2.12, MIND.

VAŠÍČEK R., HOFMANOVÁ E., ČERNÁ K., BARTAK D., ČERNOCHOVÁ K., PUSZTAI M., SVOBODA J., ŠACHLOVÁ Š., KAŠPAR V., KUČEROVÁ M., VEČERNÍK P., ZUNA M. (2022): Metodiky testování bentonitu, TZ590/2022, 2022, Praha

VEČERNÍK P., DRTINOVÁ B., ADAM R., BABOROVÁ L., BRÁZDA L., FILIPSKÁ H., HAVLOVÁ V., KITTNEROVÁ J., KOZEMPEL J., PODOJIL A., VOPÁLKA D., ZAVADILOVÁ A. (2016): Transportní vlastnosti cementových materiálů, Technická zpráva číslo 42/2016, SÚRAO/ ÚJV Řež, a. s., Praha, 103 s.

VILLAR M.V., IGLESIAS R.J., GARCÍA-SIÑERIZ J.L. (2020): State of the in situ Febex test (GTS, Switzerland) after 18 years: a heterogeneous bentonite barrier. Environmental Geotechnics 7:147–159.

WHITE M. A DOUDOU S. (2016): DOPAS Work Package 2, Deliverable D2.4: WP2 Final Report Design Basis for DOPAS Plugs and Seals, 94 s.

ZHUANG G.-C., PEÑA-MONTENEGRO T.D., MONTGOMERY A., MONTOYA J.P., JOYE S.B. (2019): Significance of Acetate as a Microbial Carbon and Energy Source in the Water Column of Gulf of Mexico: Implications for Marine Carbon Cycling. Global Biogeochemical Cycles 33:223–235.

SÚRAO | SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ | NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST

www.surao.cz